

2019년 전문교육과정
화재조사실무 I

- 제1편 기초화학
- 제2편 기초전기
- 제3편 화재학
- 제4편 발화개소판정



Contents | 목차

제 1 편

기초화학

제1장 기초화학	2
제1절 화학 기초	2
제2절 화학 양론	11
제3절 화학반응	25
제4절 산과 염기	31
제5절 산화와 환원반응	35
제6절 유기화합물	37
제2장 화학용어정리	60
제1절 용어 해설	60
제2절 화학식 약호	67
제3절 화합물 읽기	70

제 2 편

기초전기

제1장 전기의 이해	78
제1절 전기 에너지	78
제2장 전기의 사용 및 안전	91
제1절 전기 사용	91
제2절 전기 사고 및 대책	93



제 3 편

화재학

제1장 서론	106
제1절 화재 현상	106
제2절 기본적인 물리량	111
제3절 기본적인 화염의 특성	127
제2장 열전달 (Heat Transfer)	127
제1절 열전달의 개요	127
제2절 전도열전달	129
제3절 대류열전달	132
제4절 복사열전달	135
제3장 점화와 화염전파	139
제1절 점 화(Ignition)	139
제2절 화염전파	153
제4장 연소율과 발열량	160
제1절 연소율(burning rate)과 연소열(burning heat)	160
제2절 발열량(heat release rate)과 화재성장(fire growth)	168
제5장 연소생성물(Combustion products)	181
제1절 연소반응	181
제2절 생성율(Yield rate)	187

Contents | 목차

제3절 연기밀도와 가시거리	191
제4절 독성기체	196
제6장 화재 플럼(Fire Plume)	199
제1절 난류 화재플럼	199
제2절 화염 높이	202
제3절 플럼 이론 (Plume theory)	209
제4절 플럼식의 실험적 검토	220
제5절 화재플럼과 천정/벽과의 상호작용	224
제7장 구획화재(Compartment Fire)	232
제1절 구획화재의 개요	232
제2절 구획화재에 영향을 미치는 인자	239
제3절 구획화재의 유동특성	244
제4절 환기조건에 따른 구획화재 특성	265

제4편

발화개소판정

제1장 연소강약 및 연소방향의 판정	287
제2장 건물구조재별 연소강약 및 연소방향의 파악	292
제3장 화재패턴 등에 의한 발화개소의 판정	352



표 목차

[표 1-1] SI 기본 및 보조단위계	4
[표 1-2] SI 유도단위	5
[표 1-3] 측정단위의 머리약자(prefix)	5
[표 1-4] 양자수의 허용값	31
[표 1-5] 주기율표의 족과 원자가	0 2
[표 1-6] 산과 염기	23
[표 1-7] 탄화수소화합물의 결합형식에 따른 분류	9 3
[표 1-8] 주요 작용기의 명칭과 특성	0 4
[표 1-9] 알칸의 가능한 이성질체의 수	1 4
[표 1-10] 알칸계 탄화수소(C1 - C10)	5 4
[표 1-11] 알칸계 탄화수소의 물리적 성질	6 4
[표 1-12] 시클로알칸의 물리적 성질	7 4
[표 1-13] 알켄류의 물리적 성질	9 4
[표 1-14] 알킨류의 물리적 성질	0 5
[표 1-15] 방향족화합물의 주요작용기	4 5
[표 1-16] 방향족화합물의 물리적 성질	7 5
[표 3-1] 대표적인 물질에 대한 열전도 계수	131
[표 3-2] 열전달 과정에 대한 대류열전달 계수의 범위	331
[표 3-3] 연료종류별 복사분율 측정값 비교	831
[표 3-4] 주요 가연성 연료의 가연한계와 자연발화온도	241
[표 3-5] 주요연료의 시험방법에 따른 인화점과 화재점	441
[표 3-6] 인화점과 끓는점에 따른 가연성 연료의 분류	541
[표 3-7] 두꺼운 고체 가연물의 열 유속에 따른 점화시간	151



Contents | 목차

[표 3-8] 대표적인 건축 내장재료의 점화 물성	151
[표 3-9] 측면 화염전파에 관한 물성값 (ASTM E 1321)	651
[표 3-10] 가연성 연료의 주요 물성값	31
[표 3-11] 다양한 에너지원에서 방출되는 에너지정도	761
[표 3-12] 다양한 일상 생활용품의 화재성장률(NIST 칼로리미터 실험)	471
[표 3-13] t^2 화재의 분류 (NFPA)	671
[표 3-14] 건축공간의 형태에 따른 화재성장 정도	771
[표 3-15] 주요 연료별 분자량과 이론공연비	081
[표 3-16] 연료별 연소가스의 생성율	78
[표 3-17] 독성가스별의 노출시간에 따른 영향	491
[표 3-18] 열적노출 조건에 따른 인체의 화재손상 정도	491
[표 3-19] 액체연료의 최대증발속도 크기 정도	102
[표 3-20] McCaffrey 플럼식에 사용되는 상수	612
[표 3-21] Babrauskas에 의한 천정아래 화염확장 길이	32
[표 3-22] 일상에서 사용되는 고체가연물의 열적 물성 (J. G. Quintere, Principle of Fire Behavior, Thomson)	7
[표 4-1] 목재의 수열(受熱)에 의한 상태·형상 변화	72
[표 4-2] 「연소열」 과 「소화수」 에 의한 탄화물 박리상태의 차이점	982
[표 4-3] 각종 금속의 열에 의한 색변화(템퍼 칼라)	792
[표 4-4] 각종 금속의 용융온도	9
[표 4-5] 콘크리트의 수열정도에 따른 외관관찰 결과	903
[표 4-6] 유리의 수열영향에 의한 형태	53
[표 4-7] 열영향에 의한 유리의 상태	53
[표 4-8] 고분자재료의 융점 등	3
[표 4-9] 「단락혼」 과 「열혼」 의 특징	3



그림 목차

[그림 3-1] 런던 대화재와 시카고 대화재 그림	701
[그림 3-2] 그리스 산불과 위성사진(미항공우주국 NASA의 아쿠아 기상관측 위성) 1	
[그림 3-3] 연간 화재사고 사망률의 국가 간 비교	801
[그림 3-4] 화재현상에서 발생하는 다양한 길이규모	901
[그림 3-5] 연소의 3요소와 4요소	01
[그림 3-6] 썩기 모양의 유체요소에 작용하는 힘	611
[그림 3-7] 유속변화에 따른 압력변화	711
[그림 3-8] 분젠버너	2
[그림 3-9] 주요연료의 가연한계	21
[그림 3-10] 예혼합화염의 구조	31
[그림 3-11] 확산화염의 구조	31
[그림 3-12] 화염편의 미세 구조	01
[그림 3-13] 열전달 모드의 예	8
[그림 3-14] 전도열전달과 푸리에의 법칙	081
[그림 3-15] 수평평판위에서의 대류열전달	231
[그림 3-16] 전자기파 스펙트럼과 열복사 파장범위(www.schoolnotes.com)	6 3 1
[그림 3-17] 대기 중 복사에너지의 파장대별 투과율	631
[그림 3-18] 등방성 복사열전달	71
[그림 3-19] 파일럿 점화와 자연점화	01
[그림 3-20] 확산화염의 형성	01
[그림 3-21] 온도에 따른 가연한계의 변화	141
[그림 3-22] 인화점의 시험방법	31
[그림 3-23] 열적으로 얇은 두께를 가진 물질의 가열	641

Contents | 목차

[그림 3-24] 가열율에 따른 점화온도와 점화시간	741
[그림 3-25] 열적으로 두꺼운 물질의 가열	911
[그림 3-26] 외기에 의한 화염전파	21
[그림 3-27] 화염전파의 이상적인 모델	31
[그림 3-28] 역풍방향과 순풍방향으로의 화염전파	451
[그림 3-29] 측면으로의 화염전파 실험	51
[그림 3-30] 액체표면을 따른 화염전파 메커니즘	651
[그림 3-31] 메탄을 액체 표면을 따른 화염전파	751
[그림 3-32] 연소율과 화염전파	91
[그림 3-33] 연료표면에서의 에너지 전달	101
[그림 3-34] 가연성 물질의 시간에 따른 질량변화의 측정값	161
[그림 3-35] 휘발유 화재의 풀직경에 따른 연소율변화	261
[그림 3-36] 매트리스 연소과정중의 발열량 변화와 화재성장 (미국립표준기술연구원 1710 1)	710 1
[그림 3-37] OSU 칼로리미터의 개략도 (ASTM E 906)	86 1
[그림 3-38] 화원부에서의 산소의 유입과 유출	1071
[그림 3-39] 목재화재의 발열량 (1.22 m×1.22 m×1.22 m)	271
[그림 3-40] 실제 화재실험을 통한 가연물의 발열량 변화	271
[그림 3-41] t2 화재성장 곡선	41
[그림 3-42] t2 화재분류 및 대표적인 가연물의 성장률 크기 정도.	67 1
[그림 3-43] 메탄의 완전연소반응	91
[그림 5-44] 당량비에 따른 연소생성물의 생성율	581
[그림 3-45] ASTM-2058 표준 시험장치	681
[그림 3-46] 일산화탄소 생성율과 soot 생성율 사이의 관계	881
[그림 3-47] soot 입자의 덩어리	91
[그림 3-48] 광소멸법에 의한 연기밀도 측정	101
[그림 3-49] 발광표식에 대한 광소멸상수와 가시거리 사이의 관계	19 1



[그림 3-50] 난류 확산 화염의 구조	69
[그림 3-51] 난류 확산화염의 주기적인 거동	79
[그림 3-52] 화염부에서 발생하는 와류의 형태 (François-Xavier in the Aerodynamics and Energetics Modeling Department)	79
[그림 3-53] 화재플럼의 세부 영역과 평균화염높이 (McCaffrey)	8 9 1
[그림 3-54] 노즐에서의 연료속도에 따른 화염높이변화 (Hottel and Hawthorn)	10 2
[그림 3-55] 화원의 직경과 발열량에 따른 화염높이 (McCaffrey)	3 0 2
[그림 3-56] 축대칭 부력 플럼의 구조	62
[그림 3-57] 부력플럼의 이상적인 가정	72
[그림 3-58] 후드를 이용한 플럼 질량유량의 측정	512
[그림 3-59] 높이에 따른 플럼중앙부에서의 온도 및 속도변화 (McCaffrey)	7 1 2
[그림 3-60] Thomas 플럼의 개략도	82
[그림 3-61] 천정제트의 구조	92
[그림 3-62] 벽과 모퉁이 근처의 화원	122
[그림 3-63] 천정 아래 화염확장의 형태	222
[그림 3-64] 자유연소 화염높이와 천정에서의 확장화염 길이의 비교	3 2 2
[그림 3-65] 수직벽면을 따른 재부착 유동	422
[그림 3-66] 돌출부 형태에 따른 화재플럼 거동 (John H. Mammoser III and Francine Battaglia)	25
[그림 3-67] 구획화재와 화재안전 관계	72
[그림 3-68] 구획화재에 영향을 미치는 대표적 요소	822
[그림 3-69] 일반적인 구획화재의 열유동 특성	922
[그림 3-70] 구획화재에서 화재유동 형성과정	922
[그림 3-71] 구획화재에서 천정제트의 전파과정	032
[그림 3-72] 구획화재에서 벽면을 따른 연기의 하강과정	032
[그림 3-73] 구획화재의 화재성장 과정	12

Contents | 목차

[그림 3-74] 완전발달단계에서 형성된 역화	332
[그림 3-75] 화재공간의 높이에 따른 화재유동 특성	432
[그림 3-76] 점화위치에 따른 화염전파	632
[그림 3-77] 수직벽 근처의 화염 거동	722
[그림 3-78] 화재플럼의 온도에 미치는 벽의 영향	732
[그림 3-79] Bernoulli 정리	92
[그림 3-80] 환기구를 통한 유동	92
[그림 3-81] 하층부를 통한 공기유입	142
[그림 3-82] 오리피스 유동	22
[그림 8-83] 레이놀즈수에 따른 유동계수	242
[그림 3-84] 자연대류와 강제대류시의 출입구 유동분포	442
[그림 3-85] 화재유동형태에 따른 출입구에서 압력분포	542
[그림 3-86] 완전발달된 화재의 유동형태와 출입구에서의 압력분포	642
[그림 3-87] One zone model에서의 압력 및 유동특성	642
[그림 3-88] 온도와 밀도사이의 관계 (공기)	152
[그림 3-89] 온도비와 밀도계수 사이의 관계	252
[그림 3-90] Two zone 모델에서의 압력 및 유동특성	352
[그림 3-91] 천정의 환기구를 통한 유동특성	652
[그림 3-92] 화기조건에 따른 실내화재의 성장	662
[그림 3-93] 연소율과 개구부를 통한 유입공기량의 관계	662
[그림 3-94] 연료지배형 구획화재	82
[그림 3-95] 무차원 그룹변수와 연층온도상승과의 관계	462
[그림 3-96] 열적투과시간을 기준으로 한 고체벽면에서의 온도분포	662
[그림 3-97] 환기지배형 화재의 유동 구조	92
[그림 3-98] 온도변화에 미치는 당량비의 영향(SFPE)	172
[그림 3-99] 정상상태 열손실의 영향	32



[그림 3-100] 정상상태 출입구 높이의 영향	472
[그림 4-1] 화재원인 판정 절차	8
[그림 4-2] 연소강약, 연소방향으로부터 발화개소(방)를 판정하는 예	282
[그림 4-3] 연소방향이 명확한 방	32
[그림 4-4] 연소 방향이 명확한 반자	32
[그림 4-5] 연소 방향이 명확한 복도	42
[그림 4-6] 목재의 연소경과에 수반되는 형상변화	782
[그림 4-7] 탄화정도의 예시 - 기둥의 「소손」은 「탄화모양」을 볼 때 위쪽일수록 강하다.	288
[그림 4-8] 연소박리	9
[그림 4-9] 소화수박리	28
[그림 4-10] 타서 가늘어짐	8
[그림 4-11] 천장 반자돌림이 타서 떨어져 나갈 「타서 떨어져 나간」 부분은 다른 부분보다 「소손정도」가 강하다.	8
[그림 4-12] 마루판자의 타서 뚫린 예	12
[그림 4-13] 천장판자의 소실	12
[그림 4-14] 천장재	2
[그림 4-15] 천장반자	9
[그림 4-16] 스피커(열을 받은 방향으로 허물어짐)	392
[그림 4-17] 의자가 연소방향(우→좌)을 나타내고 있는 예	492
[그림 4-18] 탁자와 의자가 연소방향을 나타내고 있는 예	492
[그림 4-19] 탁자가 연소방향을 나타내고 있는 예	592
[그림 4-20] 침대가 연소방향을 나타내고 있는 예	592
[그림 4-21] 지붕이 연소방향을 나타내고 있는 예	692
[그림 4-22] 금속의 열영향에 따른 형상변화	692
[그림 4-23] 금속기둥	8

Contents | 목차

[그림 4-24] 알루미늄 방법창살	9
[그림 4-25] 냉장고	9
[그림 4-26] 냉장고 앞면과 측판	9
[그림 4-27] 드럼통	9
[그림 4-28] 드럼통	9
[그림 4-29] 기름탱크 (연소방향은 앞⇒안쪽)	103
[그림 4-30] 스텐레스판	9
[그림 4-31] 에어컨 실외기	9
[그림 4-32] 가스렌지 화구 (발화부위는 백색으로 변한 부분)	303
[그림 4-33] 대구지하철방화참사 현장 전동차와 덕트	303
[그림 4-34] 가스렌지	9
[그림 4-35] 패널	9
[그림 4-36] 선풍기 모터 축의 변색 상황	9
[그림 4-37] 전기관련 기기	9
[그림 4-38] 침대매트의 스프링	9
[그림 4-39] 소파의 스프링	9
[그림 4-40] 알루미늄 냄비의 용융 상황	9
[그림 4-41] 콘크리트의 수열정도에 따른 형상변화	903
[그림 4-42] 천장슬래브가 금이 가 있음. - 화재열로 아주 작은 금이 발생해 있음	3
[그림 4-43] 폭열(爆裂)1	9
[그림 4-44] 폭열2	9
[그림 4-45] 폭열3 - 소파가 놓여 있던 곳의 벽 폭열 모습.	213
[그림 4-46] 폭열4 - 구리 지하전력구의 천장 폭열 모습.	213
[그림 4-47] 폭열5 송파 노래방화재로 고시원으로 올라가는 계단벽면의 폭열된 모습	13
[그림 4-48] 변색1	9
[그림 4-49] 변색2(천장) 하얗게 변색된 좌측에서 타왔음을 알 수 있음.	413



[그림 4-50] 박리의 상태	34
[그림 4-51] 낙하한 유리	36
[그림 4-52] 발화건물 인접동 유리창	63
[그림 4-53] 그림 4-52와 같은 건물의 유리창	713
[그림 4-54] 가구의 유리 (연소방향은「우⇒좌」)	713
[그림 4-55] 열로 깨진 유리창	8
[그림 4-56] 망입유리의 열에 의한 파손	93
[그림 4-57] 뜨거운 상태에서 방수하여 깨진 유리창	913
[그림 4-58] 충격에 의한 유리 파손	98
[그림 4-59] 유리창에 그을음이 붙은 상태에서 소방대가 바깥쪽에서 도끼로 유리창을 개 예	320
[그림 4-60] 가스통을 옮겨 밸브를 열고 라이터를 켜서 폭발한 현장과 유리	1 2 3
[그림 4-61] 폭발 압력파(폭굉파)으로 깨진 유리창	223
[그림 4-62] 전구의 수열에 의한 변형1 (연소방향은 좌→우)	323
[그림 4-63] 전구의 수열에 의한 변형2	33
[그림 4-64] 전구의 수열에 의한 변형3	43
[그림 4-65] 강화유리 출입문이 열린 상태에서 화재로 깨져 있는 상황	423
[그림 4-66] 수열방향으로 무너진 케이스	63
[그림 4-67] TV 케이스1 (소손되어 우측으로 넘어진 것으로 보아 연소방향은 우⇒좌)	3
[그림 4-68] TV 케이스2	7
[그림 4-69] 사진케이스	8
[그림 4-70] 쓰레기통	8
[그림 4-71] 가림용 열화비닐판	9
[그림 4-72] 목재테이블과 컴퓨터 모니터의 소손상황	923
[그림 4-73] 쓰레기통과 밥통 케이스의 소손상황	033
[그림 4-74] 철재문의 수납함 도료의 발포	13



Contents | 목차

[그림 4-75] 내벽	32
[그림 4-76] 전선류의 단락흔 발생위치에 근거한 연소방향	333
[그림 4-77] 배선과 코드에 생긴 단락흔의 예	333
[그림 4-78] 케이블에 생긴 단락흔의 예	43
[그림 4-79] CV전선에 생긴 단락흔의 예	43
[그림 4-80] 모터 고정자권선의 층간 단락흔	533
[그림 4-81] 지하냉동창고의 내부구조 개략도	633
[그림 4-82] 13호실 주위의 벽체 파손 방향 (➡ : 넘어지거나 밀려난 방향)	7 3 3
[그림 4-83] 13호실 내부의 소손상황(안쪽 → 출입문 방향 촬영)	8 3 3
[그림 4-84] 13호실 통로측 벽으로 통로 쪽으로 기울어져 있는 모습	8 3 3
[그림 4-85] 13호실로 14호실과의 경계벽이 13호실 쪽으로 넘어져 있는 모습	9 3 3
[그림 4-86] 13호실 출입구로 통로 쪽에서 촬영한 모습	9 3 3
[그림 4-87] 12호 냉동실과 13호 냉동실의 경계벽으로 12호실 쪽으로 넘어져 있는 상황	3 4 0
[그림 4-88] 14호실 앞 통로 소손상황(좌측-15호실, 안쪽-14호실, 우측-13호실)	3
[그림 4-89] 14호 냉동실의 소손상황	13
[그림 4-90] 14호실로 출입구(통로 측)와 15호실 쪽으로 밀려나 있는 상황	2 4 3
[그림 4-91] 15호 냉동실의 출입문 측벽의 소손상황(통로 쪽으로 밀려남)	3 4 3
[그림 4-92] 14호실에서 15호실을 보고 촬영한 모습(패널이 15호실 쪽으로 넘어져 있음)	3 4 3
[그림 4-93] 교차통로에 면한 2호 냉동실의 벽체가 내측 방향으로 밀려나 파손된 상황	4 3
[그림 4-94] 건물배치도	7
[그림 4-95] 인근의 고층건물	8
[그림 4-96] 헬리콥터에 의한 촬영 - 현장이 광범위할 때에는 공중촬영도 고려한다	4 3
[그림 4-97] 지붕	9
[그림 4-98] 지붕재	9



[그림 4-99] 창문	㉓
[그림 4-100] 연소 확대 중인 건물	㉔
[그림 4-101] 연소경로인 배수관	㉔
[그림 4-102] 계단발판 표면	㉕
[그림 4-103] 계단발판 이면	㉕
[그림 4-104] 실간 소손상황 비교	㉖
[그림 4-105] 내벽 - 좌측 안쪽의 하부 부근으로 부터 화염이 올라갔음이 확인된	㉖ 3
[그림 4-106] 기둥	㉖
[그림 4-107] 주택	㉖
[그림 4-108] 그림 4-107의 안쪽 방	㉖
[그림 4-109] 미닫이문	㉖
[그림 4-110] 정리장	㉖
[그림 4-111] 개구부	㉖
[그림 4-112] 화염이 밖으로 나온 예 1	㉖
[그림 4-113] 화염이 밖으로 나온 예 2	㉖
[그림 4-114] 화염이 밖으로 나온 예 3	㉖
[그림 4-115] 화염이 방안으로 들어온 예 1	㉖
[그림 4-116] 화염이 안 쪽으로 들어간 예 2	㉖
[그림 4-117] 부엌에서 화염이 밖으로 나간 예 4	㉖
[그림 4-118] 안 쪽에서 밖으로 나온 화염의 흔적 5	㉖
[그림 4-119] 안 쪽에서 밖으로 나온 화염의 흔적 6	463
[그림 4-120] 화염이 안 쪽에서 문을 통해 나온 예 7	463
[그림 4-121] 화염이 좌측 쪽 문을 통해 나온 예 8	533
[그림 4-122] 화염이 안 쪽에서 문을 통해 나온 예 9	563
[그림 4-123] 화염이 출입문을 통해 들어오고 나간 상황	663
[그림 4-124] 타 내려감 - 일률적으로 위쪽만 탔다.	763



Contents | 목차

[그림 4-125] 역삼각형 패턴	8
[그림 4-126] 무염연소 후 화재로 진전되어 나타난 역삼각형 패턴	963
[그림 4-127] 식용유 과열로 인해 발생한 화재의 예 2	963
[그림 4-128] 전자레인지로 중심으로 올라간 화재 패턴	073
[그림 4-129] 냉장고 뒤쪽 벽면의 V패턴 (벽체매입콘센트를 중심으로)	073
[그림 4-130] V패턴	1
[그림 4-131] 2006년 7월 20일 지하노래방화재에서 나타난 V패턴	173
[그림 4-132] V패턴	2
[그림 4-133] V패턴	2
[그림 4-134] V패턴	3
[그림 4-135] U패턴	4
[그림 4-136] U패턴	5
[그림 4-137] 평행형 (화염이 올라가서 천장에 도달하여 횡 방향으로 뻗고 있다.)	73
[그림 4-138] 역 △패턴	6
[그림 4-139] △패턴	7
[그림 4-140] 철재출입문에 나타난 △패턴	83
[그림 4-141] 바닥의 연소상황	9
[그림 4-142] 연소촉진제 살포에 의한 바닥의 연소상황	083
[그림 4-143] 바닥에 석유류를 뿌린 흔적	13
[그림 4-144] 연소촉진제 살포에 의한 바닥의 연소상황	283
[그림 4-145] 연소촉진제의 살포에 의한 바닥의 소손상황	383
[그림 4-146] 연소촉진제의 살포에 의한 바닥의 소손상황	383
[그림 4-147] 연소촉진제 살포에 의한 불연속적인 바닥의 연소상황	483
[그림 4-148] 연소촉진제의 살포에 의한 바닥의 소손상황	483
[그림 4-149] 도넛패턴(비닐장판과 카펫 위)	583
[그림 4-150] 위 : 포어 패턴, 아래 : 스플래시 패턴	66
[그림 4-151] 유류에 의한 틈새의 연소 패턴	78



제1편 기초화학

제1장 기초화학

제2장 화학용어정리

1

기초화학

기초
화학

- 학습 목표**
- 01 화학에서 사용되는 용어, 단위 등을 구별할 수 있다.
 - 02 기초화학에서 다루는 결합, 산·염기, 산화·환원 등 반응의 원리를 설명할 수 있다.
 - 03 유기화합물의 종류, 성질, 명명법 등에 대해 구별할 수 있다.

제1절 화학 기초

1. 기초 화학의 영역

화학은 물체의 구성이나 성질 및 구조에 대하여 연구하는 과학이다. 석유와 나일론, 휘발유와 물, 철분과 나트륨 등의 물질 형태는 뚜렷이 다르게 나타나며, 이러한 차이점은 물질의 성분과 구조의 차이에서 기인한다. 물질의 한 형태는 다른 형태로부터 만들어질 수 있고, 또 다른 형태로 변형될 수도 있다. 예를 들면 휘발유가 공기 중에서 연소하면 물과 이산화탄소, 일산화탄소 및 탄소가 생성되고, 석유는 일련의 화학반응을 거쳐서 나일론으로 변하기도 한다. 화학은 이러한 물질의 성분이나 구조에 있어서의 변화, 변화의 원인, 변화에 수반되는 에너지의 변화 그리고 이에 따른 원리와 법칙들을 다루게 된다. 즉, 화학이란 물질의 성분, 구조, 성질을 연구하고, 물질의 생성과 변화를 연구하는 과학이라고 정의할 수 있다.

따라서 기초 화학은 화학물질의 성분, 구조, 성질을 연구를 통한 물질의 고유한 특징과 다양한 반응에 의한 화학적 변화, 에너지의 이동을 다루며, 이를 통하여 화학의 기초적인 지식을 습득하는 것이다.



2. 화학에서 사용하는 정의

가. 원자(atom)와 원소(element)

원소란 화학반응에 의하여 더 이상 간단한 물질로 분해되지 않는 물질을 원소라고 한다. 109개가 넘는 원소들이 알려져 있으며, 각 원소에는 다른 원소들과 구별되는 고유한 특성이 있다. 원소기호는 스웨덴의 화학자 Berzelius가 처음 제안하였으며, 일반적으로는 영문명의 첫 글자나 두 번째 글자까지를 나타내기도 한다. 알려진 원자는 원소 고유의 성질을 보유하고 있는 원소의 최소입자이다.

나. 분자(molecule)와 화합물(compound)

화합물은 둘 또는 그 이상의 원소들이 일정한 질량비로 화학적인 결합을 하여 생긴 물질이다. 화합물은 각 구성원소의 특성을 잃고, 그 자체의 특성을 지닌다. 서로 결합된 원자들의 집합체인 분자는 화합물 고유의 화학적 성질을 지닌 최소 단위이다. 분자에는 단원자분자와 다원자분자가 있고, 다원자분자인 경우 구성 원자들은 화학결합에 의하여 서로 묶여 있다.

다. 순수물질(substance)과 혼합물(mixture)

순수물질은 어떤 순수한 원소나 순수한 화합물을 나타낼 때 사용되는 용어으로써 모든 물체는 하나의 물질이거나 물질의 혼합체이다. 혼합물은 고유의 특성을 지닌 순수 물질이 둘 또는 그 이상 섞여 있는 것으로 물질들의 상대적인 양은 임의로 변할 수 있으며, 혼합물을 구성한 물질들의 고유한 특성은 그대로 지닌다. 혼합물은 다시 균일 혼합물(homogeneous mixture)과 불균일 혼합물(heterogeneous mixture)로 나눌 수 있다. 균일 혼합물은 혼합물 전체가 동일한 조성으로 이루어져 있어 한 종류의 물질만으로 구성되어 있는 것처럼 보인다. 증류수에 소금을 넣고 저으면 소금은 용해되고, 혼합물은 균일한 용액이 된다. 균일혼합물인 용액(solution)은 용매(solvent)와 용질(solute)로 구성되는데, 용매는 녹이는 물질이고, 용질은 용해된 물질이다. 석회석과 모래의 혼합물은 불균일 혼합물로서 각 성분의 입자들이 분리된 상태로 존재한다.

순수물질 : 설탕, 소금, 공기 중의 산소와 질소 등

혼합물 : 설탕물(설탕 + 물), 시멘트 조각 등

- 균일 혼합물 : 소금 + 증류수 - 불균일 혼합물 : 빗물 + 흙

라. 물리적 성질과 화학적 성질

모든 물질은 물리적 및 화학적 성질을 가지고 있는데, 물리적 성질(physical property)이란 물질 내의 원자비율을 변하게 하지 않는 범위 내에서 측정되고 관측될 수 있는 것들로서, 물질의 색깔, 녹거나 끓을 때의 온도, 밀도 및 물리적 상태 등이 이러한 성질에 포함된다. 화학적 성질(chemical property)은 물질이 그 조성을 변화시키는 화학반응을 일으킬 때의 특성이다. 산성과 염기성, 극성, 이온화 경향, 친전자성, 분자비대칭성(chirality) 등이 화학적 성질의 예이다.

동일한 조건하에서 물리·화학적 성질이 모두 같은 두 물질은 존재하지 않기 때문에 이러한 성질들의 차이를 이용하여 물질을 확인할 수 있다.

3. 측정단위

자연과학에서의 측정은 주어진 성질(물리적인 양)이 표준 값의 몇 배가 되는가를 결정하는 정량적인 비교과정이다. 17세기 이전에는 각 나라마다 정의된 독특한 단위를 채택하여 사용함에 따라 같은 양에 대해서도 여러 가지 단위가 혼용됨으로서 단위의 혼란을 유발하였다. 17세기 이후 과학의 방법이 더욱 정량적으로 발전하였고, 이와 함께 과학자들은 표준단위의 필요성을 깨닫게 되었다. 그리하여 1960년 10월 국제도량형회의에 의해 국제표준단위로서 미터법(1791년 프랑스에서 고안, 대다수의 국가에서 폭넓게 사용)을 기준으로 한 SI 단위계(System International Unit)가 채택되었다. 이 단위계는 [표 1-1]에서와 같이 7개의 기본단위와 2개의 보조단위를 정의하였다.

[표 1-1] SI 기본 및 보조단위계

양	단 위	기 호	비 고
길이	미터(meter)	m	
질량	킬로그램(kilogram)	kg	
시간	초(second)	s	
전류	암페어(ampere)	A	
(열역학적) 온도	(절대온도) 켈빈(Kelvin)	°K	
발광세기(광도)	칸델라(candela)	cd	
물질의 양	몰(mole)	mol	
평면각(보조단위)	라디안(radian)	rad	
입체각(보조단위)	스테라디안(steradian)	sr	



다른 모든 필요한 측정단위(유도단위)는 [표 1-2]에서와 같이 기본단위를 곱하거나 나누어서 유도한다.

[표 1-2] SI 유도단위

양	단위	기호	SI단위표현
주파수	헤르츠(Hertz)	Hz	1/s
힘	뉴턴(newton)	N	$m \cdot kg/s^2$
압력	파스칼(pascal)	Pa	$kg/(m \cdot s^2)$
에너지, 일열량	줄(joule)	J	$m^2 \cdot kg/s^2$
일률	와트(watt)	W	$m^2 \cdot kg/s$
전하, 전기량	쿨롱(coulomb)	C	$s \cdot A$
전위차, 기전력	볼트(volt)	V	$m^2 \cdot kg/(s^2 \cdot A)$
전기용량	패럿(farad)	F	$s^4 \cdot A^2/(m^2 \cdot kg)$
전기저항	옴(ohm)	Ω	$m^2 \cdot kg/(s^2 \cdot A^2)$
전기속도	지멘스(siemens)	S	$s^3 \cdot A^2/(m^2 \cdot kg)$
자속	웨버(weber)	Wb	$m^2 \cdot kg/(s \cdot A)$
자속밀도	테슬라(tesla)	T	$kg/(s^2 \cdot A)$
인덕턴스	헨리(henry)	H	$m^2 \cdot kg/(s^2 \cdot A^2)$
광속	루멘(lumen)	lm	$cd \cdot sr$
조도	럭스(lux)	lx	$cd \cdot sr/m^2$

유도단위의 크기는 모든 크기의 측정에 편리하지 못하여 SI단위에서 16개의 머리약자를 정의하여 [표 1-3]와 같이 측정단위의 크기를 바꿀 수 있도록 하였다.

[표 1-3] 측정단위의 머리약자(prefix)

머리약자	기호	승수	머리약자	기호	승수
데카(deca-)	da	10	데시(dec-)	d	10^{-1}
헥토(hecto-)	h	10^2	센티(centi-)	c	10^{-2}
킬로(kilo-)	k	10^3	밀리(milli-)	m	10^{-3}
메가(mega-)	M	10^6	마이크로(micro-)	μ	10^{-6}
기가(giga-)	G	10^9	나노(nano-)	n	10^{-9}
테라(tera-)	T	10^{12}	피코(pico-)	p	10^{-12}
페타(peta-)	P	10^{15}	펨토femto-)	f	10^{-15}
엑사(exa-)	E	10^{18}	아토(atto-)	a	10^{-18}

가. 길이(length)와 부피(volume)

길이의 표준 SI단위는 [표 1-1]와 같이 m이다. 부피는 표준길이로 정의할 수 있다. 표준 SI부피는 세제곱미터(cubic meter, m³)인데, 세제곱센티미터(cubic centimeter, cm³), 세제곱데시미터(cubic decimeter, dm³)로 표현되기도 한다. 부피단위로 리터(liter, L)가 흔히 사용되는데, 1 L는 1 dm³, 1,000 cm³와 같다.

나. 질량(mass)과 무게(weight)

물체의 질량은 당해 물체 속에 있는 물질의 양을 측정한 것이고, 무게는 물체가 중력에 의해 영향을 받는 것이다. 따라서 질량과 무게는 중력에 의해 가변적일 수 있다. 질량에 대한 SI기본단위는 킬로그램(kg)이다. 작은 질량의 경우는 그램(g, 1000 g = 1 kg)이나 밀리그램(mg, 10³ mg = 1 g, 10⁶ mg = 1 kg)으로 표기한다.

다. 밀도(density)와 비중(specific gravity)

밀도는 단위 부피당의 질량으로 정의되며, 수식적으로 다음과 같이 표시한다.

$$\text{밀도} = \frac{\text{질량}}{\text{부피}} \quad \text{또는} \quad D = \frac{M}{V}$$

비중은 한 물질의 밀도와 기준 물질의 밀도 사이의 비로 정의되며, 수식적으로 다음과 같이 표시한다.

$$\text{비중} = \frac{\text{어떤 물질의 밀도}}{\text{기준 물질의 밀도}} = \frac{\text{어떤 물질의 중량}}{\text{기준 물질의 중량}}$$

고체와 액체의 기준이 되는 물질은 4 °C의 물(밀도 = 0.997 g/cm³)이고, 기체의 기준이 되는 물질은 공기(밀도 = 1.29 g/L)이다.



예제 1) 질량이 321 g이고 부피가 45 cm³인 물체의 밀도와 비중을 구하여라.

$$\text{밀도} = \frac{\text{질량}}{\text{부피}} = \frac{321g}{45\text{cm}^3} = 7.13 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{비중} = \frac{\text{물체의 밀도}}{\text{물의 밀도}} = \frac{7.13\text{g/cm}^3}{0.997\text{g/cm}^3} = 7.15$$

예제 2) 구리(Cu)의 중량이 100 g이고, 구리와 같은 체적의 물의 무게가 40 g이었다. 구리의 비중을 구하여라.

$$\text{구리의 비중} = \frac{\text{어떤 물질의 중량}}{\text{기준물질의 중량}} = \frac{100g}{40g} = 2.5$$

예제 3) 0 °C, 1기압 상태에서 산소의 기체비중을 구하여라.

$$\begin{aligned} \text{산소의 밀도} &= \frac{\text{산소의 분자량}}{\text{몰부피}(22.4l/mole)} = \frac{32g}{22.4l/mole} \\ &\approx 1.43 \text{ g/L}(0 \text{ }^\circ\text{C}, 1\text{기압}) \end{aligned}$$

$$\therefore \text{산소의 기체비중} = \frac{\text{산소의 밀도}}{\text{공기의 밀도}} = \frac{1.43\text{g/l}}{1.29\text{g/l}} = 1.11$$

물과 섞이지 않는 가연성 액체가 1이하의 비중을 가지면, 그 가연성 액체는 물위에 떠오르게 된다. 이러한 가연성 액체의 화재에 물을 소화제로 사용하는 것은 유효하지 않다. 즉, 물이 가연성 액체의 밑으로 가라앉아 소화효과를 발휘할 수 없고, 용기 밖으로 확산된 액체의 화재에서는 물이 가연성 액체의 확산속도를 증가시켜 화재범위를 확대시키기도 한다.

라. 온도(temperature)

열과 온도는 밀접한 관계가 있다. 즉, 뜨겁고 차가운 정도를 감지할 수 있는 척도가 온도이며, 온도라는 것은 물체가 갖는 열을 정량화하는 방법이다. 온도 차이를 나타내는 수치는 측정기구, 즉 온도계의 눈금 규모에 의존한다. 대부분의 국가나 과학 분야에서는 섭씨(Celsius)를 사용하지만, 미국에서는 일반적으로 화씨(Fahrenheit)를 사용한다. 섭씨눈금은 순수한 물의 끓는점을 100 °C, 어는점을 0 °C로 정한 눈금이고, 화씨눈금은 포화된 소금용액의 어는점을 0 °F로 하고 정상인의 체온을 100 °F로 정한 것이다. 현재 화씨의 비교점을 32 °F(증류수의 빙점)와 212 °F(증류수의 비등점)로 정하고 있으며, 비교점간의 차이는 180 °F가 된다. 이것은 100 °C와 180 °F는 동일 범위라는 의미이다. 또한 섭씨는 화씨의 눈금에 비해 거의 2배 정도이며 5 °C가 9 °F에 해당된다.

$$\frac{100^{\circ}\text{C}}{180^{\circ}\text{F}} = \frac{5^{\circ}\text{C}}{9^{\circ}\text{F}}$$

이 관계식으로부터 섭씨온도와 화씨온도의 관계를 다음과 같이 상호 교환시킬 수 있다.

$$^{\circ}\text{C} = \frac{5^{\circ}\text{C}}{9^{\circ}\text{F}} (^{\circ}\text{F} - 32^{\circ}\text{F}), \quad ^{\circ}\text{F} = \left(\frac{9^{\circ}\text{F}}{5^{\circ}\text{C}}\right) T^{\circ}\text{C} + 32^{\circ}\text{F}$$

과학적 이론 또는 실험적 결과를 토대로 도달할 수 있는 최저온도에는 한계가 있다는 것을 명확하게 하고 있다. 현재 도달할 수 있는 최저 온도는 -273.15°C (-459.67°F)로서 '절대 0도'라고 부른다. 절대온도는 켈빈(Kelvin)온도라고도 하며, 섭씨와 같은 크기의 눈금을 사용하지만 절대 0도에서 시작되는 것이 다르다. 물의 어는 점 0°C 는 켈빈온도 273.15 K 에 해당되며, 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$T(\text{K}) = 273.15 + t(^{\circ}\text{C})$$

4. 물질의 상태

물질은 간단히 세 가지 상태로 분류된다. 고체상태의 물질은 굳고 제한된 모양을 갖고 있으며, 그 부피가 온도와 압력에 따라 크게 변하지 않는다. 결정성고체는 그 고체를 이루는 입자가 결정구조 내에서 제한된 위치에 존재하며 입자들 간의 상호작용의 세기는 그 고체의 균기정도와 세기정도를 나타낸다. 액체상태 물질에서의 각각의 입자는 주어진 부피 내에 한정되어 존재하지만 이동할 수 있으며, 용기의 모양에 따라 물질의 모양이 변한다. 액체는 단지 약간만 압축될 수 있기 때문에 주어진 온도에서의 부피는 변하지 않는다. 기체는 어떠한 용기에도 완전히 채워지며, 그 모양은 용기의 모양에 따라 정해진다. 기체는 무한히 팽창할 수 있으며, 쉽게 압축될 수 있기 때문에 기체입자들이 대단히 멀리 떨어져 있는 상태 즉, 빈 공간을 이룬다고 말할 수 있다.

5. 주기율표(periodic table)

원소들의 각 가로줄은 하나의 주기(period)를 구성하는 데, 주기들의 길이가 다르다는 것에 유의하여야 한다. 2개의 원소만이 들어있는 하나의 최단주기, 각 8개의 원소가 들어 있는 2개의 단주기 및 각각 18개의 원소가 들어 있는 2개의 장주기가 차례로 있다. 다음 주기에는 32개의 원소가 들어 있고 마지막 주기는 미완성이다. 이렇게 원소들을 배열할 때 같은 세로줄에 있는 원소들은 비슷한 특성을 지닌다. 이러한 세로줄은 족(group)을 구성한



다. 8개의 원소가 들어 있는 2개의 단주기원소들과 같은 세로줄에 있는 원소들을 주족(main group)원소라 하고, 다른 족의 원소들을 전이(transition) 또는 내부전이(inner transition)원소라 한다. 편의상 주족원소들은 로마숫자와 문자 A로 표시하고 전이족 원소들은 로마숫자와 문자 B로 표시한다. 주기율표에서 계단모양의 굵은 선은 원소들을 금속과 비금속으로 나눈다. 이 선 가까이에 있는 원소들은 금속과 비금속의 두 가지 특성을 지니고 있다. 모든 전이원소 및 내부전이원소를 포함한 대부분의 원소들은 금속이다. 주기율표는 이 책 마지막 장에 있다.

가. I A족 ‘알칼리금속(Alkali metal)’과 I B족

수소를 제외한 I A족의 원소들은 알칼리금속족을 구성한다. 이들은 반응성이 매우 큰 금속이고, 특히 물과의 반응으로 가연성 가스인 H₂를 발생하여 화재위험이 높은 원소도 있다. 모든 알칼리금속족의 이온은 +1의 전하를 가지며, 이들의 모든 화합물은 이온성이다. 이와 반대로 I B족의 원소들인 구리, 은 및 금은 비교적 비활성인데, 이들은 많은 화합물에서 +1 이온으로 존재한다는 점에서 알칼리금속과 유사하다. 그러나 이들은 대부분의 전이원소의 특성처럼 다른 전하의 이온도 생성한다.

나. II A족 ‘알칼리토금속(Alkali earth metal)’과 II B족

II A족의 원소들은 알칼리토금속으로 알려져 있다. 이들의 특징적인 전하는 +2이다. 이들 금속, 특히 이 족의 마지막 두 원소들은 알칼리금속과 거의 같은 정도의 반응성이 있다. II B족의 원소들, 즉 아연, 카드뮴 및 수은은 II A족의 원소들보다 반응성은 적지만, 인접하고 있는 I B족의 원소들보다 반응성이 크다. 이들 이온의 특징적인 전하도 +2이다.

다. III A족과 III B족

III A족에서 붕소를 제외한 원소들도 반응성이 상당히 큰 금속들이다. 알루미늄분말은 물과의 반응으로 가연성 수소가스를 발생시키며, 공기 중에서 산화하여 분진폭발의 위험을 가지고 있다. III A족의 금속들은 +3 전하의 이온을 생성한다. III B족은 스칸듐, 이트륨, 란탄 및 악티늄과 같은 금속으로 구성된다.

라. IV A족과 IV B족

IV A족 원소는 원자가 4개의 다른 원자와 결합하는 화합물을 생성한다. 이 경우에 화합물은 이온으로 구성되어 있지 않는다. 납, 주석, 게르마늄은 +2의 이온을 포함한 화합물을 생성한다. IV B족 금속, 즉 티탄, 지르코늄 및 하프늄도 원자가 4개의 다른 원자

와 결합하는 화합물을 생성한다.

마. VA족과 VB족

VA족은 -3전하를 가진 이온이 들어 있는 질소화물, 인화물, 비소화물과 같은 화합물을 생성한다. VB족 원소들은 모두 금속이며, 광범위한 여러 가지 화합물을 생성하므로, 이들에 대한 공통성을 표시할 수 없다.

바. VIA족 (Chalcogen ; 채 생성체)

VIA족의 원소들은 폴로늄을 제외하고 대표적인 비금속들이다. 금속과 2성분 화합물을 만들 때, 이들 원소는 -2전하를 가진 이온으로 존재한다.

사. VIIA족 (Halogen ; 염 생성체)

VIIA족의 원소들은 모두 반응성이 가장 큰 비금속으로서, 실제로 모든 금속 및 대부분의 비금속들과 서로 반응한다. 금속과 2성분화합물을 만들 때, 이들은 -1전하를 가진 이온으로 존재한다.

아. VIIIA족 (Inert gas ; 비활성 기체)

VIIIA에 속하는 헬륨, 네온, 아르곤, 크세논 및 라돈은 모두 기체이며, 지구상에서 그 존재량이 적다. 최근에 크립톤과 크세논은 다른 원소와 반응한다는 것이 알려졌지만, VIIIA족 원소들은 대부분 다른 원소들과 잘 반응하지 않으므로 비활성 기체라고 부른다.

자. VIB, VIIB, VIIIB족

이들 원소들은 모두 금속이며, 매우 광범위한 화합물을 생성하므로, 이들에 대한 공통성을 표시할 수 없다.

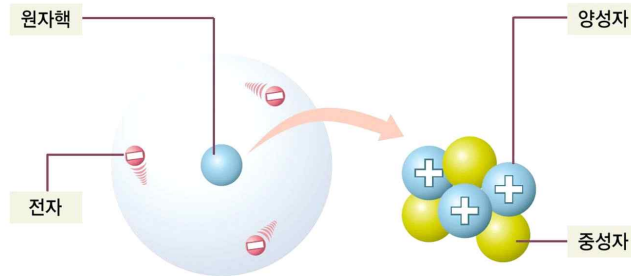


제2절 화학 양론

1. 원자, 분자, 이온

가. 원자의 구조

원자는 물질을 구성하는 최소입자(J. Dalton, 1805년)로, 원자의 중심에는 (+)전하를 띠는 원자핵이 있고, 그 주위를 (-)전하를 띠는 전자가 궤도를 선회하는 행태로 구성된다. 핵은 다시 양전하를 가진 양성자와 전기적으로 중성인 중성자로 구성되며, 양성자와 중성자는 질량이 거의 동일하다. 중성인 원자는 양성자의 양전하 수와 전자의 음전하 수가 균형을 이루고 있다. 양성자의 질량은 수소원자의 질량과 거의 동일하며 전자질량의 약 1,830배로 원자 질량의 대부분이 핵에 치중되어 있다. 대표적인 원자의 반지름이 약 1 - 25 Å인데 비해 원자핵의 반지름은 약 10⁻⁵Å이 된다. 이러한 사실은 원자부피의 대부분을 전자가 차지한다는 것을 의미한다.



(원자의 구조 / 출처 : zum 학습백과)

입자	전하	질량(amu)	위치
양성자	+1	1.0073	핵 내부
중성자	0	1.0087	핵 내부
전자	-1	5.49×10^{-4}	핵 외부

국제적 규약에 따라 1 amu(atomic mass unit)는 핵 속에 6개의 양성자와 6개의 중성자를 갖는 탄소원자 질량의 1/12로 정의 된다. 원소의 원자량은 단위가 없는 수이며, 원소의 평균원자질량과 동일하다. 따라서 수소의 원자량은 1.0079이고, 탄소는 12.011, 플루오르는 18.998, 인은 30.974이다.

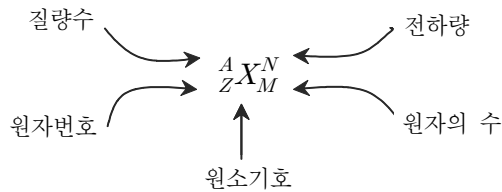
한 원자의 핵에 존재하는 양성자의 수를 그 원자의 원자번호라고 하는데, 중성원자

에서 전자의 수는 양성자의 수와 동일하므로 원자번호는 원자핵을 둘러싸고 있는 전자의 수와 일치하기도 하며 “Z”로 표기한다. 전자는 원자 질량에 큰 영향을 미치지 않으므로, 원자의 질량수는 단순히 양성자와 중성자의 수(N)의 총수로서 추정하고 “A”로 표기한다.

$$A \text{ (원자량, 질량수)} = Z \text{ (양성자 수, 원자번호)} + N \text{ (중성자 수)}$$

$$\therefore N = A - Z$$

어떤 특정한 조성을 갖는 원자는 다음과 같이 표기하여 기호화할 수 있다.



1) Bohr 이론

원자가 에너지양자를 흡수하면 바닥상태(ground state)에서 들뜬상태(excited state)로 변화된다고 한다. 들뜬상태의 원자가 바닥상태로 돌아올 때 빛을 방출한다. 예를 들면 불꽃 속에서 유리를 달굴 때 나타나는 노란빛은 유리 속의 들뜬 나트륨원자가 바닥상태로 돌아가기 때문에 생긴 것이다. 들뜬 원자로부터 나온 빛이 분광기를 통과하게 되면, 각 원소의 고유한 스펙트럼이 나타난다.

따라서 스펙트럼은 원소를 확인하는 수단으로 사용될 수 있다. Niels Bohr(1914)는 하나의 전자와 하나의 양성자로 구성되어 있는 수소원자의 전자구조에 대한 이론을 제안하였는데, 이 이론은 수소의 원자 스펙트럼을 잘 설명해 줄 뿐만 아니라 원자구조에 대하여 다음과 같이 새로운 개념을 제시하게 되었다.

가) 수소원자의 전자는 특정한 에너지 값을 갖는 궤도에만 허용된다. 이 궤도(orbit)를 에너지 준위(energy level) 또는 껍질(shell)이라고도 하는데, 이들 궤도는 원자핵을 중심으로 동심원을 이룬다. 각 궤도는 문자(K, L, M, N, O, ...)로 표시하거나, 또는 n의 값(1, 2, 3, 4, 5, ...)으로 표시한다.

나) 한 궤도의 에너지 준위는 정하여져 있기 때문에 어떤 특정한 궤도에 있는 한 전자의 에너지는 고정된다. 전자가 그 궤도에 머물고 있는 한 에너지를 흡수하거나 방출하지 않는다. 에너지 준위는 원자핵에 가장 가까이 있는 K준위(n=1)가 가장 작고 원자핵으로부터 거리가 증가함에 따라(K<L<M<N<O...; n = 1>2>3>4>5...) 증가한다.



다) 원자의 전자들이 원자핵에 가깝게 존재할 때 (K준위 궤도), 가장 낮은 에너지 상태 (바닥상태)에 있다고 한다. 원자가 외부에너지(열, 빛)를 흡수하면, 보다 높은 에너지 준위의 바깥 궤도로 옮겨져 더 높은 에너지 상태(들뜬상태)가 된다.

라) 만일 전자가 낮은 준위로 다시 내려올 때는 두 궤도의 에너지 차와 같은 양의 에너지를 방출한다.

2) 양자수(quantum number)

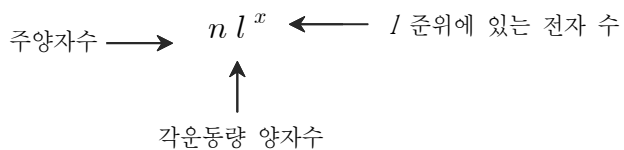
한 원자 내에 있는 각 전자에는 한 조로 된 4개의 양자수가 [표 1-4]와 같이 할당되는데, 이 양자수 들은 각 전자의 에너지, 공간에서의 전자의 배향 및 다른 전자와의 가능한 상호작용들을 결정한다.

[표 1-4] 양자수의 허용값

명칭	기호	허용값	예
주양자수	n	양의 정수	1, 2, 3, ...
각운동량 양자수	l	0부터 (n-1)까지의 정수	0, 1, 2, ..., (n-1)
자기양자수	m_L	-1부터 +1까지의 정수	-1, ..., 0, ..., +1
스핀자기양자수	m_s	$-\frac{1}{2}$ 또는 $+\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}$

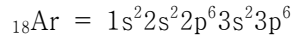
3) 원자의 전자배치

원자의 전자배치는 원자에 있는 모든 전자에 의하여 차지된 궤도함수들을 가리킨다. 원자궤도함수에 있는 전자를 나타내는 표기법은 아래와 같다.



여기서 n은 숫자(1, 2, 3, ...)로서 주양자 준위를 나타내고, L은 각 운동량 양자수로서 숫자 0, 1, 2, 3은 관계적으로 문자 s, p, d, f로 나타내며, x는 L준위에 있는 전자의 수를 나타낸다. 예를 들면 $3d^6$ 는 주양자가 3이고, d준위에 6개의 전자가 채워져 있음을 나타내는 것이다.

원자에 대한 완전한 전자배치는 전자로 채워진 각 궤도함수의 일련의 기호로 표시된다. 중성원자에서 모든 x의 총합은 원소의 원자번호이다. 예를 들면 Z=18인 아르곤원자에서 바닥상태의 전자배치는 다음과 같다.



각 원소의 원자들은 아래의 세 원리에 따라서 그 원소의 특유한 전자배치를 갖는다.

가) Pauli의 배타원리

같은 원자 내에서 4개의 양자수(n, L, m_L, m_s)가 모두 같은 두 전자는 있을 수 없다. 각 궤도함수에 있을 수 있는 전자의 최대수는 이 원리에 의하여 정해진다.

<예> $2\text{He} \rightarrow$ 2개의 전자가 $n=1, L=0, m_L=0$ 는 동일

그러나 m_s 가 각각 $+\frac{1}{2}$ 과 $-\frac{1}{2}$

나) Hund의 규칙

전자는 부껍질의 반이 채워질 때까지는 스핀쌍을 이루지 않은 채 평행한 스핀(다른 궤도함수에 들어 있는 전자와 같은 부호의 스핀)을 가지고 축퇴한 각 궤도함수를 하나씩 채워간다. 반이 채워진 후에는 이미 1개가 들어있는 각각의 궤도함수에 스핀쌍을 이루면서 차례차례로 전자가 들어간다.

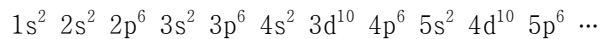
<예> 질소(7N)의 전자배치 $\rightarrow 1s, 2s, 2p$ 에 채워질 7개의 전자를 보유

각 s궤도는 한 쌍의 전자를 수용하므로, 나머지 3개의 전자는 Hund의 규칙에 의하여 축퇴된 3개의 p궤도에 1개씩 들어간다.

즉, $1s^2 2s^2 2p_x^1 2p_y^1 2p_z^1$

다) Aufbau의 원리

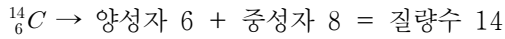
전자는 처음에 가장 낮은 에너지의 궤도함수를 채우고, 일단 낮은 에너지 준위의 궤도함수가 모두 채워지면 보다 높은 에너지 준위의 궤도함수로 들어간다. 궤도함수를 채우는 순서는 다음과 같다.



나. 동위원소

지정된 원소의 모든 원자들은 같은 수의 양성자를 가지지만 중성자의 수는 다를 수가 있다. 그러므로 같은 원소의 두 원자는 상이한 질량수(양성자수 + 중성자수)를 가질 수 있다. 원자번호는 같으나 질량수가 다른 원자들을 서로 동위원소(isotope)라고 한다. 동위원소는 전자수가 같아서 화학적 성질은 같으나, 물리적 성질이 다른 원소이다.

<예 1> ${}_{6}^{12}\text{C} \rightarrow$ 양성자 6 + 중성자 6 = 질량수 12



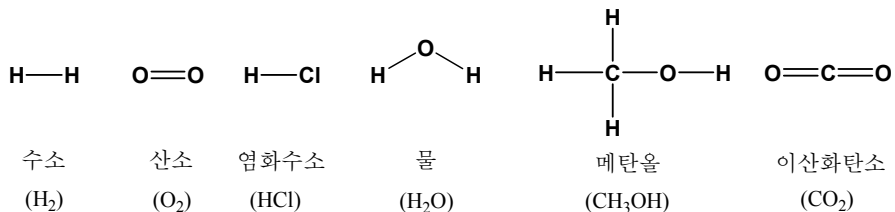
<예 2> ${}^2_1H \rightarrow D$, 중수소(deuterium), ${}^3_1H \rightarrow T$, 3중수소(tritium)

다. 분자(molecule)와 이온(ion)

분자는 서로 결합된 원자들의 집합체이다. 예를 들면 2개의 수소(H)원자는 적당한 조건아래서 수소분자(H₂)를 형성한다. 그러나 한 개의 수소분자(H₂)는 다시 한 개의 수소원자(H)와 결합으로 H₃분자를 형성하지는 않는다. H₄, H₅ 등의 분자형성도 역시 불가능하다. 따라서 H₂가 수소의 가장 안정된 분자형태임을 알 수 있다. H₂와 같이 2개의 원자로 구성된 분자를 이원자분자라고 부른다. H₂는 3,000°C이상의 가열을 해야 2개의 수소원자로 분리될 만큼 안정하다. 그러나 분자의 안정성에도 불구하고, H₂분자는 매우 낮은 온도(어떤 경우에는 실온)에서 다른 종류의 원자, 분자와 화학적 반응을 통해서 다른 분자들을 생성시킨다. 수소의외에도 질소, 산소, 염소, 플루오르, 브롬 등이 안정한 단원자분자의 형태로 존재한다.

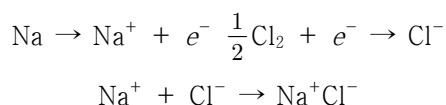
그러나 모든 원소들의 원자들이 분자를 형성하는 것은 아니다. 예를 들면 헬륨(He)이나 아르곤(Ar)원자들은 He₂, Ar₂를 형성하기 위하여 결합될 수 없다. 삼원자분자의 예로서, 3개의 산소원자는 오존(O₃)을 형성하기 위하여 결합될 수 있다. 그러나 오존분자는 산소분자(O₂)보다 안정하지 못하고, 실온에서 자발적인 과정을 통하여 수 시간 안에 O₂로 분해된다. 이와 같이 각 원소들은 분자를 구성함에 있어서 독특한 특성을 가지고 있다. 원자들의 안정한 결합체인 분자는 위에서 언급한 것처럼 2이상의 동일한 원소로 형성(단원자분자)되거나, 또는 2이상의 서로 다른 원소들로 형성(화합물)되기도 한다. 예를 들면 수소원자 1개는 염소원자 1개와 결합하여 화학적으로 안정한 HCl을 형성할 수 있다. 또한 수소원자는 산소와 함께 H₂O, H₂O₂를 형성한다. 물은 매우 안정한 화합물이고, 과산화수소(H₂O₂)는 불안정한 화합물로서 실온에서 분해되기 쉽다.

고체원자인 탄소(C)는 산소와 반응하여 기체상의 화합물 일산화탄소(CO)와 이산화탄소(CO₂)를 생성한다. 이들 두 기체화합물은 비교적 높은 온도에서도 안정하지만, 낮은 온도조건에서 다른 분자들과 반응하여 새로운 분자를 생성할 수 있다.

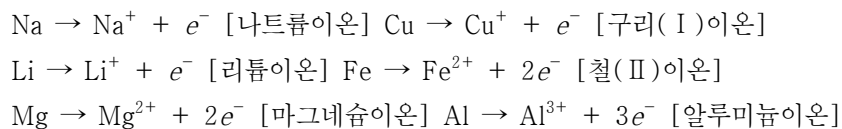


중성인 원자나 원자단이 전자를 잃거나, 전기를 얻어서 전기를 띤 상태를 이온이라

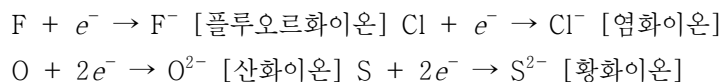
고 하며 양이온, 음이온 그리고 라디칼(radical)이온으로 구분한다. 만일 전자가 중성원자나 분자로부터 제거되면 양성자가 남아있는 전자의 수보다 많게 되므로 양이온이 생성된다. 반대로 한 원자가 그것의 원자번호보다 더 많은 전자를 가지게 되면 그 원자는 음이온이 된다. 원자들의 상대적인 전기음성도로서 원자가 전자를 끄는 힘은 그 원자의 성질을 규명하는데 매우 중요하다. 예를 들면 나트륨(Na)원자(일반적으로 금속원자)는 전기음성도가 약한 반면 염소(Cl)원자(일반적으로 비금속원자)는 전기음성도가 강하다. 소금분자(염화나트륨, NaCl)에서 나트륨 원자는 전자(e^-) 한 개를 잃어 나트륨 양이온(Na^+)를 형성하고, 염소원자는 전자 한 개를 얻어 염소 음이온(Cl^-)이 된다. 이렇게 형성된 반대하전 사이에 작용하는 정전기적 인력에 의한 이온결합으로 소금분자가 생성된다.



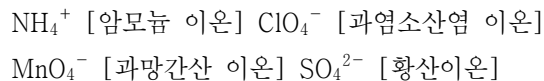
일반적으로 금속은 하나에서 셋에 이르는 전자를 쉽게 잃고 다음과 같이 양이온이 되는 경향이 있다.



이에 반하여 비금속 원소들은 전자를 얻어 다음과 같이 음이온이 되는 경향이 있다.



2개 이상의 원자가 결합되어 있는 것이 전하를 띠고 있는 것을 라디칼이온 또는 다원자이온이라고 부른다.



이온들이 결합하여 화합물을 형성할 때, 그 원자가 얻거나 잃는 전자의 수를 산화수(Oxidation number)라고 하고, 단원자이온인 경우에는 그 전하에 해당한다. 전기음성도가 클수록 음의 산화수를, 전기음성도가 작을수록 양의 산화수를 가지게 된다. 산화수를 결정하는 기본원리는 다음과 같다.

자유원소의 산화수는 0이다.

다원자이온에서 구성원소의 산화수를 합한 것은 이온의 전하와 같다.



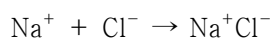
화합물에서 모든 원소의 산화수를 합한 값은 0이다.

2. 화학결합(chemical bond)

화합물에서 원자를 붙들어 두는 인력(힘)을 화학결합이라고 하며, 이온결합(ionic bond)과 공유결합(covalent bond)으로 나눌 수 있다. 소금처럼 Na^+ 과 Cl^- 의 반대전하 사이에 정전기적인 인력에 의한 결합을 이루는 이온결합이라고 한다. 이온결합은 두 이온 사이의 거리가 짧고, 두 이온의 전하량이 클수록 결합력이 강하며, 이온화합물의 물리적 형태는 반대로 하전된 이온이 규칙적으로 배열된 결정성으로서 화합물의 양이온과 음이온의 전하량의 합은 0이다.

수소분자처럼 두 원자가 한 쌍 또는 그 이상의 전자쌍을 공유함으로써 형성되는 결합을 공유결합이라고 한다. 반대로 하전된 이온을 생성할 수 없는 2개의 수소원자는 가까이 접근했을 때 양전하를 띤 핵들은 서로 반발하지만, 쌍을 이루려는 전자들에 의해서 끌리게 되고, 결국 전자들은 쌍을 이루어 두 원자에 의해서 공유된다. 이와 같이 전자가 쌍을 이루어 결합하는 공유결합은 옥테트규칙(octet rule)에 의해서 유용하게 설명되어질 수 있다.

네온(Ne)은 매우 안정한 단원자 기체로서 그 화합물은 알려져 있지 않다. 네온 원자는 8개의 전자배치를 갖는다. 다른 원자들도 이온을 생성하거나 공유결합을 형성하여 네온의 전자배열과 같은 8개의 원자가전자(결합에 관여하는 최외각 궤도의 전자, valence electron)를 가지려는 경향이 있다. 이와 같이 원자들이 서로 결합하였을 때, 그 둘레에 8개의 전자배치를 가지려는 경향을 옥테트규칙(또는 8전자설)이라고 한다.



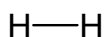
[이온결합]



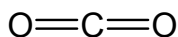
[공유결합]

위 점 구조식(Lewis의 점구조식)에 의해서 표기된 플루오르분자는 분자 내에 있는 각 플루오르 원자들이 네온과 같은 전자배치를 갖기 위하여 한 쌍의 전자를 공유한 단일공유결합을 이룬다. 어떤 원자는 옥테트, 즉 8개의 전자를 갖기 위하여 몇 개의 다른 원자와 결합하거나 또는 이중결합(double bond)이나 삼중결합(triple bond)을 형성함으로써 2쌍이상의 전자를 공유하기도 한다. 두 원자 사이에 공유된 한 쌍의 전자들은 원자기호 사이에 그은 단일선으로 표시하는 것이 편리하다. 이중선 또는 삼중선은 이중결합 또는 삼중결합을 의미한다. 이러한 공유결합의 표시에서는 아래와 같이 공유되지 않은 전자들은 표시할 필요가 없다.

단일결합



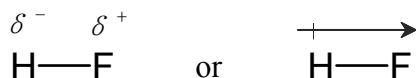
이중결합



삼중결합



상이한 두 원자가 공유결합으로 결합되면 전기음성도가 큰 원자는 공유전자를 상대적으로 더 강하게 끌어당긴다. 따라서 결합의 한 쪽 끝은 상대적으로 음성이고 다른 쪽 끝은 상대적으로 양성이다. 예를 들면 HF와 같은 이핵이원자분자(heteronuclear diatomic molecule)에서 불소의 전기음성도(4.0)는 수소의 전기음성도(2.1)보다 크다. 이에 따라 전기음성도가 큰 불소원자가 공유전자쌍을 더 강하게 당길 것이다. 따라서 불소원자는 부분적인 $-$ 전하를, 수소원자는 부분적인 $+$ 전하를 띠게 되어 HF분자는 극성을 가지게 된다. 이와 같이 전자쌍이 균등하게 공유되어 있지 않은 공유결합을 극성공유결합(polar covalent bond)이라 부르며, 다음과 같이 표시할 수 있다.



수소분자(H_2)와 같은 동핵이원자분자(homonuclear diatomic molecular)나 결합된 원자 간에 전기음성도차를 무시할 수 있을 때, 공유전자쌍은 두 원자핵 사이에 균등하게 공유되며, 이러한 결합은 비극성공유결합(nonpolar covalent bond)이라고 부른다.

3. 원자량, 분자량, 몰

가. 원자량(atomic weight)

원자는 매우 작아서 가장 가벼운 수소원자의 질량이 1.67×10^{-24} g 으로서 그대로 사용하기가 매우 불편하므로 자연계에 존재하는 탄소동위원소의 평균원자량을 기준으로 하여 비교한 다른 원자의 상대적 질량 값을 원자량이라고 한다. 이에 따라 1 amu(원자량단위)는 ^{12}C 원자질량의 $1/12$ 로 정의되었다.

탄소의 평균원자량은 탄소동위원소의 상대적 존재비(자연계에서 ^{12}C 가 99 %, ^{13}C 이 1 % 존재)에 의해 아래와 같이 결정된다.

$$\text{탄소의 평균원자량} = 12 \times \frac{99}{100} + 13 \times \frac{1}{100} = 12.011$$

그램원자량 : 각 원소의 원자량에 g을 붙인 양. 1 g원자는 6.02×10^{23} 개의 원자로 이루어지며, 이 수는 1 mole에 해당한다.



<예> 탄소 1 g원자는 12 g이다.

나. 분자량(molecular weight)

분자 또는 화학식단위를 구성하는 모든 원자의 원자량의 합을 그 분자의 분자량 또는 화학식량이라고 한다. 따라서 물질의 분자식을 알면 성분원소의 원자량을 합하여 분자량을 구할 수 있다.

<예1> 메탄올(CH₃OH)의 분자량 : 12(C) + 1(H) × 4 + 16(O) = 32

<예2> 물(H₂O)의 분자량 : 1(H) × 2 + 16(O) = 18

<예3> 공기의 평균분자량

※ 공기의 조성 : 산소(O₂, 분자량 32) 21 %, 질소(N₂, 분자량 28) 79 %

$$\therefore \text{공기의 평균분자량} = \frac{32 \times 21 + 28 \times 79}{100} = 29$$

그램분자량 : 분자량에 g을 붙인 양. 물질의 분자량과 같은 질량을 그램 단위로 표시한 것으로서 1g분자는 그 분자의 1몰에 해당한다.

<예> 산소(O₂) 1g분자는 32g이다.

다. 몰(mole)

1) 아보가드로의 수와 몰

원자, 분자, 이온 등은 매우 작은 입자들이고 실제로 많은 수를 다루기 때문에 일정한 수의 집단을 단위로 사용하는 것이 편리하다. 일상생활에서 일정한 수의 집단을 다스, 꾸러미, 단 등과 같은 단위가 활용되듯이 화학에서는 보통 몰(mole)이라는 단위를 쓰는데 6.023×10²³개만큼의 집단을 뜻한다. 6.023×10²³이라는 수는 아보가드로(Aoadeo Avogadro)의 이름을 따서 아보가드로의 수라고 한다. 물질의 일정한 집단의 수를 나타내는 몰은 원자, 분자, 이온 또는 원자단에도 공통적으로 적용된다. 즉, 원자, 분자, 이온 각 1몰속에는 원자, 분자, 이온이 각각 아보가드로의 수만큼 들어 있는 것이다.

2) 기체의 몰부피

“동일한 온도와 압력에서 동일한 기체의 부피는 동일한 분자수를 포함한다.”는 아보가드로의 법칙에 따라 모든 기체 1몰(1g 분자)이 0℃, 1기압(STP)하에서 차지하는 부피는 물질의 종류에 상관없이 22.4L를 차지하며, 그 속에는 6.023×10²³개의 분자가 들어 있다. 따라서 0℃, 1기압에서 22.4L의 기체 질량은 그 기체분자

1몰의 질량이 되며, 이것을 측정하면 그 기체의 분자량을 구할 수 있다.

4. 화학식과 화학방정식

기초
화학

가. 원자가(valence)

어떤 원소의 원자 한 개가 수소원자 몇 개와 결합 또는 치환할 수 있는가를 나타내는 수를 말한다. 이 때 원자의 최외각 껍질에 존재하며 결합에 관여하는 전자를 원자가전자(valence electron)라고 한다. 주족원소의 경우 원자가전자의 수는 [표 1-5]와 같이 주기율표의 족 번호와 같다.

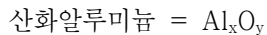
[표 1-5] 주기율표의 족과 원자가

원자가 \ 족	I 족	II 족	III 족	IV 족	V 족	VI 족	VII 족
원자가전자 수	1	2	3	4	5	6	7
양성 원자가	+1	+2	+3	+4 +2	+5 +3	+6 +2	+7 +5
음성 원자가				-4	-3	-2	-1

화합물은 전체 전하의 합이 0이므로 원자가를 알면 다음과 같이 화학식을 알 수 있다.

$$(+)\text{원자가} \times \text{원자수} = (-)\text{원자가} \times \text{원자수}$$

<예> 산화 알루미늄의 화학식



Al의 원자가 = +3, O의 원자가 = -2

$$+3 \times x = -2 \times y \quad (3과 2의 \text{최소공배수는 } 6)$$

$$\therefore x=2, y=3$$

따라서 산화알루미늄은 Al_2O_3

나. 화학식(chemical formula)

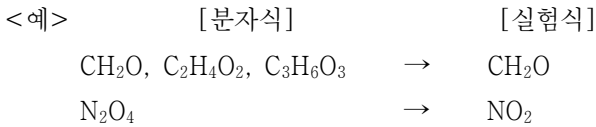
화학식은 화합물을 구성하고 있는 원소의 조성과 각 원자들의 상대적인 수 그리고 그 화합물의 분자 속에 들어 있는 각 원자의 실제적인 수와 그 화합물의 구조 등을 알려준다. 목적에 따라 성분원소의 종류와 그들의 상대비를 나타내는 실험식, 화합물 속에서 기(基)가 어떻게 결합하고 있는지를 나타내는 시성식, 화합물이 분자로 이루어질



때 그 분자의 원자조성을 나타내는 분자식, 분자나 기가 어떤 배열인지를 나타내는 구조식 등으로 분류된다.

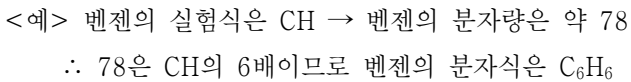
1) 실험식(empirical formula)

화합물 속의 원자의 조성을 나타내기 위하여 각 성분원소의 원자수의 비율을 가장 간단한 정수비로 하여 각 원소기호의 뒤에 붙인 식으로서, 조성식이라고도 한다.



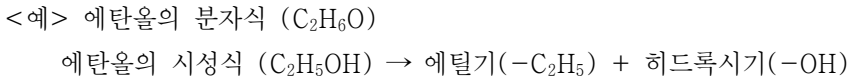
2) 분자식 (molecular formula)

분자를 구성하는 원소들의 조성파 그 분자를 구성하는 원자의 수를 원소 기호를 써서 나타낸 식으로 실험식에 분자량에 맞도록 정수배를 하여 분자식을 구할 수 있다.



3) 시성식(rational formula)

분자의 특성을 나타내는 작용기(functional group)를 표시하여, 그 결합상태를 나타낸 식으로 주로 유기화합물의 화학식에 많이 사용된다.

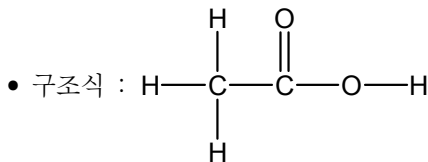


4) 구조식(structural formula)

분자 중에 존재하는 원자와 원자의 결합상태를 원자가 또는 공유전자쌍과 같은 수의 결합선으로 나타낸 식을 구조식이라고 한다.

<예> 아세트산(acetic acid)

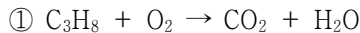
- 분자식 : C₂H₄O₂
- 실험식 : CH₂O
- 시성식 : CH₃COOH



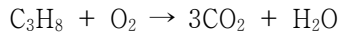
다. 화학방정식(chemical equation)

화학방정식은 화학반응을 간단한 기호법으로 기술한 것이며, 반응물과 생성물의 화학식단위의 종류와 수가 표시되어 있다. 화학반응에서는 어떠한 원자도 창조되지도 않고 또 소멸되지도 않으므로 방정식의 좌우에 있는 각 원소의 총 원자 수는 같아야 할 것이다. 이를 위해 각 화학식 앞에 계수를 붙인다. 일반적으로 방정식의 좌측에 있는 물질을 반응물(reactant)이라 하고, 변화에 의하여 생긴 물질 즉 우측에 있는 물질을 생성물(product)이라고 한다.

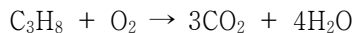
<예> 프로판(C_3H_8)은 산소(O_2)중에서 완전연소반응 후에 이산화탄소 (CO_2)와 물을 생성한다.



② 반응물의 3개의 탄소에 의한 생성물의 계수조정



③ 반응물의 8개의 수소에 의한 생성물의 계수조정



④ 생성물의 10개의 산소에 의한 반응물의 계수조정



5. 용액의 화학양론

대부분의 화학반응은 용액(solution) 속에서 일어난다. 용액의 부피를 정확히 측정하는 것은 쉬우며, 질량을 알고 있는 물질이 일정한 부피의 용액 속에 녹아 있을 때 용액의 일부분의 부피를 측정하면 그 속에 포함된 물질의 질량을 알 수 있다. 용액은 용매(solvent, 용질을 녹이는 물질)와 용질(solute, 녹는 물질)로 구성된다. 용액의 농도표시법에는 질량 퍼센트, 몰농도 등이 흔히 사용된다.

가. 질량 퍼센트 (mass percent)

용질의 농도를 나타내기 위해서는 일정량의 용매에 들어 있는 용질의 질량을 알아야 한다. 예를 들면 질량이 20 %인 NaCl 용액은 용액 100 g에 20 g의 NaCl을 포함할 것이다.

$$\text{용질\%} = \frac{\text{용질의 질량}}{\text{용액의 질량}} \times 100 = \frac{\text{용질의 질량}}{\text{용질의 질량} + \text{용매의 질량}} \times 100$$

<예> HCl 130g과 물 750g이 포함된 염산수용액에서 HCl의 질량 퍼센트는



$$\text{용질\%} = \frac{130g}{130g + 750g} \times 100 = 15\%$$

나. 몰농도(molarity, M)

용액의 몰농도는 정확히 1 L의 용액 속에 들어 있는 용질의 몰수로 정의할 수 있으며, 몰농도는 용액내 용질의 몰수를 용액의 부피로 나누어 구할 수 있다.

$$M = \frac{\text{용질의 몰수}}{\text{용액의 부피 (l)}}$$

<예> 100.0 g의 NaCl을 물에 녹여 1.00 L의 용액을 만들었을 때, 용액의 몰농도

$$\text{용질(NaCl)의 몰수} = \frac{100.0g(\text{NaCl})}{58.5g/\text{mole}} = 1.71\text{mole}$$

$$\text{몰농도} = \frac{1.71\text{mole}}{1.00l} = 1.71M$$

6. 기체의 화학양론

많은 화학반응에는 기체가 관여한다. 예를 들면 기체인 산소는 위험물의 화학반응에서 가장 중요한 것의 하나이다. 실험상 기체는 고체나 액체의 양을 측정하는 것과 같은 방법으로 그 양을 측정하는 것은 편리하지 못하다. 왜냐하면 어떤 양의 기체일지라도 용기의 크기에 관계없이 그 용기의 전체 부피를 차지하기 때문이다. 그러나 일정한 온도에서 일정한 크기의 용기 속에 들어 있는 기체의 압력은 용기 속에 존재하는 기체의 양에 따라 다르다.

가. 압력(pressure)

압력은 단위면적에 작용하는 힘으로 정의된다. 따라서 압력은 힘과 면적의 단위로 표시된다. 측정의 SI계에서 압력의 단위는 파스칼(Pa)이고, 미터계에서는 dyne/cm^2 이다. 화학실험에서 가장 널리 쓰이는 기체압력의 측정법은 기체압력으로 유지된 수은주의 수직높이를 측정하는 것이다. 수은주를 1 mm의 높이로 유지하는 압력을 1 torr라고 한다. 표준대기압(standard atmosphere)은 온도가 0 °C일 때 수은주의 수직높이로 760 mm로 유지하는 압력으로 정의하고 이 압력을 1기압(atm)이라고 규정한다. FPS단위계에서는 압력을 평방인치당 파운드 수(psi)로 표시하기 때문에 1기압을 14.7 psi로 규정하기도 한다. 적절한 환산인자를 쓰면 1기압은 다음과 같이 표시된다.

$$1\text{기압(atm)} = 760\text{ mmHg} = 14.7\text{ psi} = 14.7\text{ lb/in}_2 = 101.3\text{ kPa}$$

나. Boyle의 법칙(기체의 부피와 압력)

일정한 온도에서 기체의 질량을 고정하였을 때, 기체의 부피는 기체의 압력에 반비례한다. 이 법칙은 다음과 같이 표현되고, 액체나 고체에는 적용되지 않는다.

$$PV = k \text{ (일정온도)}$$

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \text{ (처음상태와 나중상태의 압력과 부피 관계)}$$

※ P = 압력, V = 부피, k = 상수

다. Charles의 법칙(기체의 부피와 온도)

일정한 압력에서 일정량의 기체의 부피는 그 절대온도 T 에 정비례한다. 이 법칙을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$V = k' T \text{ (일정압력)}$$

$$\frac{V_1}{T_1} = k' = \frac{V_2}{T_2} \text{ (처음상태와 나중상태의 부피와 온도 관계)}$$

※ V = 부피, k' = 상수, T = 절대온도($t + 273^\circ$)

라. 결합된 기체법칙

Boyle과 Charles의 법칙을 합치면 부피와 압력과의 반비례관계와 부피와 절대온도와의 정비례관계를 다음과 같이 동시에 나타낼 수 있다.

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

마. 이상기체의 법칙

실제기체는 Boyle의 법칙이나 Charles의 법칙을 정확하게 따르지 않는다. 실제기체는 압력이 높거나 온도가 비교적 낮을 때는 이 법칙으로부터 크게 벗어난다는 것이 밝혀졌다. 이상기체(ideal gas)는 어떠한 온도나 압력에 대해서도 정확히 기체법칙을 따르는 기체라고 정의한다. 이상기체의 법칙은 다음과 같이 수식으로 나타낼 수 있다.

$$PV = nRT$$

※ P = 압력, V = 부피, n = 몰수, T = 절대온도

R = 기체상수($8.314 \text{ kPa dm}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$)

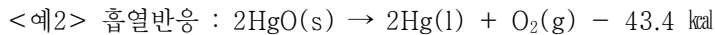
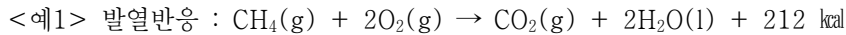


제3절 화학반응

1. 화학반응과 에너지

가. 열화학반응식(thermochemical equation)

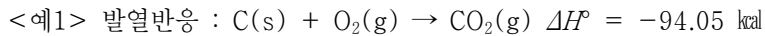
화학반응에 따르는 열의 출입량인 반응열을 표시한 반응식으로, 물질의 상태에 따라 같은 물질이라도 보유한 에너지가 다르므로 물질의 상태를 함께 표시 한다. 반응식에는 온도, 압력을 표시하며, 이러한 조건이 주어지지 않을 때는 25°C 1기압 상태에서의 반응을 의미한다. 반응열은 보통 반응식에 대응한 반응물질 1mol에 대한 열량의 값을 반응식 오른쪽에 표시하는데, 발열반응의 경우에는 열이 방출되므로 오른쪽에 양(+)의 부호를 나타내고, 흡열반응의 경우에는 열을 흡수하므로 음(-)의 부호를 사용한다. 또, 반응물이나 생성물 상태에 따라 열적 상태가 달라지므로, 기체는 g(gas), 액체는 l(liquid), 고체는 s(solid), 수용액은 aq(aqueous)라는 약자를 사용하여 괄호 안에 표시한다.



일정한 압력 하에서 발생하는 반응열은 엔탈피(enthalpy)의 변화와 관련된다. 모든 물질은 엔탈피(H, 열함량)를 갖고 있는데, 주어진 반응에서 반응열은 반응물과 생성물 사이의 엔탈피 변화(ΔH)이며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta H = H_{\text{생성물}} - H_{\text{반응물}}$$

발열반응(exothermic reaction)은 반응진행과정에서 열을 방출하는 반응이고, 흡열반응(endothermic reaction)은 열을 흡수하는 반응이다. 발열반응에서 생성물의 엔탈피는 반응물의 엔탈피보다 더 낮으므로 ΔH 는 음(-)의 값을 갖고, 이 값만큼 열을 방출한다. 흡열반응에서의 생성물은 반응물보다 더 큰 엔탈피를 가지므로 ΔH 는 양(+)의 값을 갖고, 이 값만큼 열을 흡수한다.

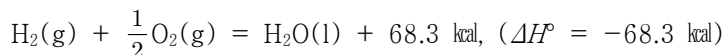


발열반응	흡열반응
<ul style="list-style-type: none"> 반응물 → 생성물 + 열방출 $H_{\text{반응물}}$은 $H_{\text{생성물}}$보다 크다. ΔH는 음의 값을 갖는다. 	<ul style="list-style-type: none"> 반응물 + 열흡수 → 생성물 $H_{\text{생성물}}$은 $H_{\text{반응물}}$보다 크다. ΔH는 양의 값을 갖는다.

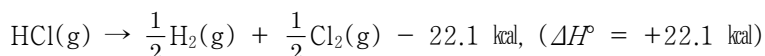
나. 반응열의 종류

화학변화에 수반되어 발생 또는 흡수되는 열로 반응물의 에너지와 생성물의 에너지 차이를 반응열이라 하며, 일반적으로 반응열은 25°C, 1기압일 때 측정하기 때문에 정압(定壓)반응열이라고도 한다. 이에 대하여 일정한 부피에서 측정한 경우를 정적(定積)반응열이라고 한다. 반응의 종류에 따라 다음과 같이 구분할 수 있다.

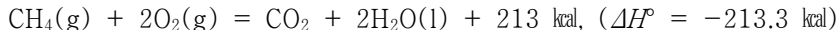
- 1) 생성열(heat of formation) - 화합물 1몰이 그들의 성분 원소로부터 생성될 때 흡수 또는 발생하는 열량



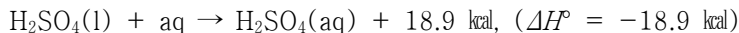
- 2) 분해열(heat of decomposition) - 화합물 1몰이 그 성분원소로 분해될 때 발생 또는 흡수하는 열량



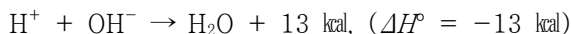
- 3) 연소열(heat of combustion) - 주어진 온도에서 1몰의 물질이 산소와 완전 반응할 때 발생하는 열량



- 4) 용해열(heat of dissolution) - 어떤 물질 1몰을 용매에 녹일 때 출입하는 열량

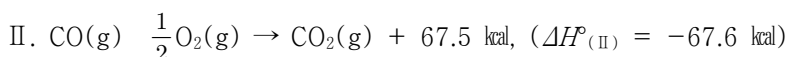
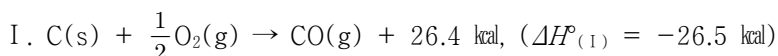


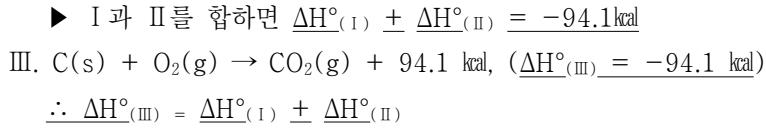
- 5) 중화열(heat of neutralization) - 산과 염기가 각각 1몰씩 중화할 때에 발생하는 열량으로서, 중화 반응에서는 H⁺, OH⁻만이 반응하므로 산이나 염기의 종류에 관계 없이 일정한 값을 갖는다.



다. Hess의 법칙

화학반응에서 반응열은 그 반응의 시작과 끝 상태만으로 결정되며, 도중의 경로에는 관계하지 않는다는 법칙으로 총열량 보존의 법칙이라고도 한다. 즉 화학적 변화가 일어날 때 반응경로와는 상관없이 총열량은 보존된다.



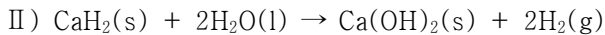
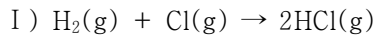


2. 화학반응의 종류

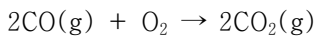
가. 결합반응

둘 또는 그 이상의 물질이 결합하여 화합물이 형성되는 반응으로서 1) 두 원소가 하나의 화합물을 만드는 결합, 2) 한 원소와 한 화합물이 새로운 화합물을 만드는 결합, 3) 두 화합물이 새로운 하나의 화합물로 되는 결합 등으로 구분할 수 있다.

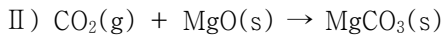
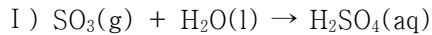
1) 두 원소가 하나의 화합물로 되는 결합



2) 한 원소와 한 화합물이 새로운 화합물을 만드는 결합

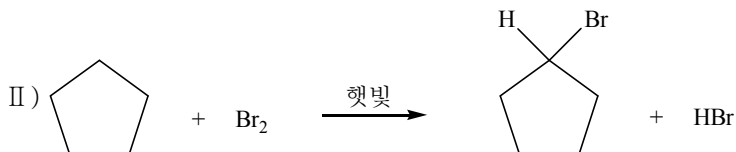
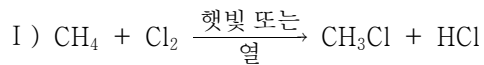


3) 두 화합물이 새로운 화합물을 만드는 결합



나. 치환반응 (substitution reaction)

화합물의 한 원소가 다른 원소에 의해 대체되는 반응으로서, 수용액 상태 또는 고체 상태에서 활성이 큰 금속이 활성이 작은 금속이나 수소를 대체하게 되는데 활성이 큰 금속은 이온화 에너지가 작아 쉽게 전자를 잃어버려 양이온이 된다.

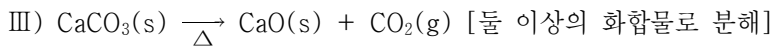
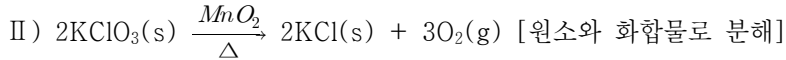
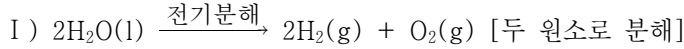


1

다. 분해반응

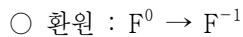
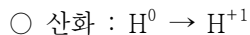
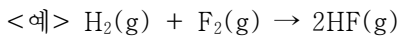
한 화합물이 분해하여 ① 두 원소, ② 1개 또는 그 이상의 원소와 화합물, ③ 2개 그 이상의 화합물 등을 만드는 반응이다.

기초
화학



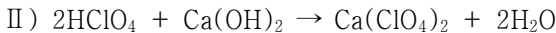
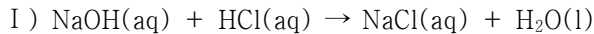
라. 산화환원반응

물질의 산화수가 변하는 반응을 말하며, 줄여서 redox반응이라고 한다.



마. 산-염기반응

산과 염기가 당량씩 반응하여 산 및 염기로서의 성질을 잃는 반응을 말하며, 중화반응이라고도 한다.



3. 반응속도

반응속도(reaction rate)는 단위시간에 반응물중의 한 물질이 반응계에서 농도가 감소하는 속도 또는 생성물 가운데 한 물질의 농도가 증가하는 속도로 정의된다.

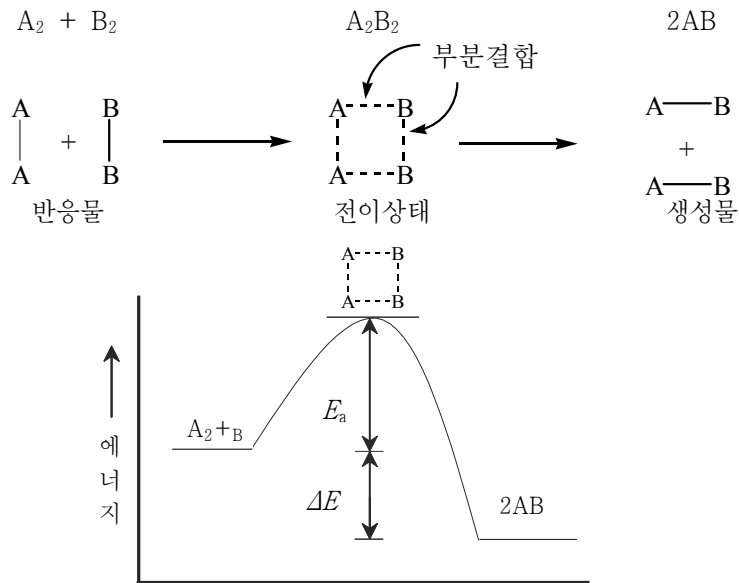
가. 충돌이론과 활성화 에너지

충돌이론에서는 원자, 이온, 분자들 사이에 반응이 일어나기 위해서는 먼저 충돌해야 된다는 것이다. 반응종의 농도가 크면 단위 시간당 충돌 횟수도 증가한다. 이때, 효과적인 충돌(effective collision)만이 반응 가능하다. 효과적인 충돌이 되기 위해서는 반응종들은 ① 결합이 끊어지거나 새로운 결합이 형성될 때에 외각전자들의 재배열이 일어나는



데 필요한 최소한의 에너지를 가져야 하고, ② 충돌 시 서로 적합한 배향을 가져야만 한다. 결국 반응속도를 결정하는 중요한 인자는 충분한 에너지를 가지고 일어나는 충돌 횟수이다. 반응을 일으키는데 필요한 최소에너지를 그 반응의 활성화에너지(activation energy)라 한다.

두 반응분자 A₂와 B₂가 충분한 에너지를 가지고 충돌한다면, 활성화물(activated complex)이라고 하는 전이중간체를 생성한다. 즉, 반응물에서 생성물을 형성하기 전 높은 에너지를 가진 중간상태(transition state, 전이상태)에 순간적으로 존재하는 상태로서, 이러한 전이상태를 거쳐서 반응을 일으키는데 필요한 최소한의 에너지를 활성화에너지(E_a)라 한다. 만약 A₂와 B₂분자들이 충돌할 때, 활성화에너지만큼 갖고 있지 못하다면 반응은 일어나지 않는다.



나. 반응속도에 영향을 미치는 요인

반응속도는 ① 반응물의 성질, ② 반응물의 농도, ③ 온도, ④ 촉매 등에 의해 영향을 받는다.

1) 반응물의 성질

반응속도는 함께 혼합된 물질들의 화학적 성질과 물리적 상태에 의존하고 있다. 산과 염기의 용액들은 혼합과 동시에 반응하고, 금속나트륨도 물과 접촉하는 순간에 반응한다. 그러나 금속성 칼슘은 실온에서 물과 느리게 반응한다. 반응하는 물질들의 물리적 상태는 화학반응속도에 큰 영향을 준다. 큰 덩어리의 금속들은 연소되지

않으나, 금속분말은 표면적이 크므로 결과적으로 많은 원자들이 공기 중의 산소에 노출되어 연소되기 쉽다.

2) 농도

반응속도는 반응하는 각 물질의 농도의 곱에 비례한다. 즉, 농도가 증가함에 따라 단위부피속의 입자가 증가하고, 입자수가 증가하면 입자간의 충돌횟수가 증가하여 반응속도가 빨라진다.

3) 온도

온도가 상승하면 반응속도 증가하며, 일반적으로 아레니우스(S. Arrhenius)의 반응속도론에 의해 온도가 10℃상승할 때 반응속도는 약 2배 증가한다.

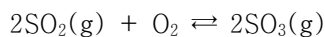
4) 촉매

촉매는 반응에 첨가되어 보통은 반응속도를 증가시키지만 때로는 반응속도를 감소시키는 물질이다. 촉매는 반응경로를 변화시키며, 이에 따라 활성화 에너지가 변화하고 반응속도에 영향을 미친다.

4. 화학평형이동

가. 가역반응과 화학평형

반응이 종결되지 않고 어느 방향으로나 일어날 수 있는 반응을 가역반응(reversible reaction)이라 한다.



위 반응식에서 오른쪽으로 진행되는 반응을 정반응, 왼쪽으로 진행되는 반응을 역반응이라고 한다. 이러한 가역반응에서 정반응속도와 역반응속도가 같아져서 외관상 반응이 정지된 것처럼 보이는 상태를 화학평형(chemical equilibrium)이라 한다.

나. 평형이동에 영향을 주는 요인

평형상태에 있는 어떤 물질계의 온도, 압력, 농도, 촉매의 조건을 변화시키면, Le Chatelier의 평형이동의 법칙에 따라 변화를 감소시키는 방향으로 반응하여, 새로운 평형상태에 도달한다.



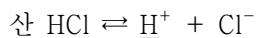
- 1) 농도의 변화
 농도를 증가시키면 농도가 감소하는 방향으로 이동
 농도를 감소시키면 농도가 증가하는 방향으로 이동
- 2) 온도의 변화
 온도를 올리면 열을 소모하는 방향으로 이동
 온도를 낮추면 제거된 열량을 보충하는 방향으로 이동
- 3) 부피와 압력의 변화
 압력을 높이면 기체의 몰수가 작은 방향으로 이동
 압력을 내리면 기체의 몰수가 큰 방향으로 이동
- 4) 촉매의 영향
 촉매는 화학평형 시간을 단축 (화학반응평형의 이동은 불가)

제4절 산과 염기

화학에서 산과 염기는 서로 대립되는 특성을 가진 개념으로 일상생활이나 화학공장에서 일어나는 모든 반응의 기초를 이룬다. 산과 염기들은 강한 것과 약한 것으로 분류할 수 있는데, 이들의 상대적 세기는 pH로 표시한다. 어떤 특정한 물질에 대한 산성 또는 염기성의 결정은 여러 가지 산-염기의 정의에 따라 달라진다.

1. 아레니우스(Arrhenius)의 개념

산(acid)은 수용액에서 이온화하여 히드로늄이온(H_3O^+ 또는 H^+)을 내고, 염기(base)는 수산화이온(OH^-)을 생성하는 물질로 정의한다.



산의 세기는 산 수용액에 존재하는 H^+ 의 농도로 정의되고, 염기는 OH^- 의 상대농도에 의존한다. 대표적인 산과 염기의 강약을 [표 1-6]에 분류하였다.

[표 1-6] 산과 염기

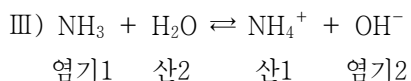
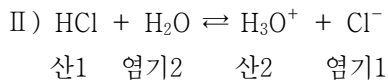
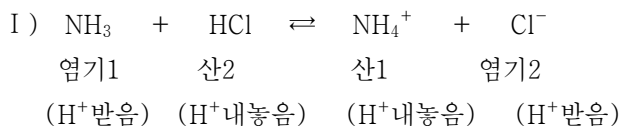
산		염기	
강산	약산	강염기	약염기
HCl	CH ₃ COOH	KOH	NH ₄ OH
H ₂ SO ₄	H ₃ BO ₃	NaOH	Fe(OH) ₃
HNO ₃	H ₃ PO ₄	Ca(OH) ₂	Cu(OH) ₂
HClO ₄	H ₂ CO ₃	Ba(OH) ₂	Al(OH) ₃

기초
화학

아레니우스의 개념은 물 및 수용액에서의 반응이라는 점을 강조하기 때문에 물이 아닌 용매 내에서의 반응으로 생성되는 물질의 산성과 염기성 그리고 OH⁻를 포함하지 않는 중들의 염기성을 설명하기에는 한계가 있다. 이러한 모순점을 수정한 것이 다음의 Brønsted와 Lowry의 이론이다.

2. 브뢴스테드-로우리(Brønsted-Lowry)의 개념

1923년에 Brønsted와 Lowry는 독립적으로 Arrhenius의 이론을 논리적으로 확장해서 보다 일반적인 산-염기의 개념을 발표했다. 이들의 개념에서 산은 양성자(H⁺)를 주는 물질(proton donor), 염기는 양성자(H⁺)를 받아들이는 물질(proton acceptor)로 정의된다. 이 정의는 매우 광범위하여 H⁺를 유리할 수 있는 수소를 가지고 있는 모든 분자나 이온은 산이며, 양성자를 받을 수 있는 모든 분자나 이온은 염기이다. 몇 가지 예를 들면 다음과 같다.



I은 염기인 NH₃가 산인 HCl과 반응하여 새로운 산-염기쌍을 형성하는 반응이다. HCl은 H⁺을 NH₃에 주었으므로 산이고, NH₃는 H⁺를 받았으므로 염기이다. 한편, 이 반응의 역반응에서는 NH₄⁺은 Cl⁻에 H⁺을 주었으므로 산이고 Cl⁻은 H⁺을 받았으므로 염기이다. 이때 HCl ↔ Cl⁻, NH₄⁺ ↔ NH₃와 같이 H⁺의 이동에 의하여 산과 염기로 되는 한 쌍의 물질을 짝산-짝염기라고 한다. II는 HCl이 물에 양성자를 주는 산이며, 따라서 물은 염기로서 작용한다.



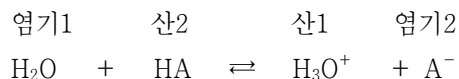
III에서는 NH₃가 염기이며, 산에 해당하는 H₂O로부터 양성자를 받아들여 산 NH₄⁺와 OH⁻를 생성한다. 물은 산과 반응할 때는 염기로, 염기와 반응할 때는 산으로 작용하게 된다. 즉, 물은 양성자를 줄 수도 있고 받을 수도 있다. 이러한 물의 성질을 양쪽성(amphoteric)이라고 한다. Arrhenius의 개념보다 보다 확장된 Brønsted와 Lowry의 산-염기 개념을 통하여 다음과 같은 사실을 알 수 있다.

- ① 산과 염기는 분자는 물론 이온이 될 수도 있다.
- ② 산-염기 반응은 수용액으로만 제한되지 않는다.
- ③ 어떤 화학종은 상대반응물에 따라 산 또는 염기로 작용한다.

그러나 Brønsted-Lowry의 개념은 양성자(H⁺)이전이 관여하는 반응에만 적용될 수 있다. 즉, Brønsted-Lowry의 산은 이온화할 수 있는 수소원자를 포함하는 화학종에 국한되어 있다.

3. 루이스(Lewis)의 개념

1923년 G. N. Lewis교수는 고전적 산-염기 이론들에 대하여 가장 포괄적인 내용을 발표했다. Lewis 관점에서 산은 전자쌍(electron pair)을 받아들이는 화학종이고, 염기는 전자쌍을 제공하거나 전자쌍이 유효한 화학종을 말한다. 본질적으로 Lewis염기는 Brønsted염기와 차이가 없다. 물과 양성자 산의 반응에서 전자쌍을 주는 것은 반응물의 전자점 구조를 쓰면 명백하다.



Brønsted염기는 양성자를 받는 화학종이기 때문에 유효한 전자쌍을 가지고 있어야 한다. 예를 들면 다음과 같은 화학종은 모두 Brønsted염기로 작용한다.



이들 화학종은 모두 유효한 전자쌍을 줄 수 있으며, 이들이 양성자를 받아 각각 NH₄⁺ 이온, H₃O⁺ 이온 또는 HF분자를 생성한다. 이와 같이 Lewis계에서 산-염기반응은 전자쌍을 내어 놓고 공유하는 배위공유결합을 형성하는 반응이다.

4. 산화물

가. 정의

산소는 다른 원소와의 친화력이 강하여 비활성기체를 제외한 거의 모든 원소와 화합물을 만드는데, 이와 같이 산소와 다른 원소와 화합물을 산화물(oxide)이라고 한다.

기초
화학

나. 산화물의 종류

1) 산성과 염기성에 의한 구분

가) 산성 산화물(무수산) : 물에 녹아 산이 되거나 염기와 반응할 때 염과 물을 만드는 비금속산화물 (CO_2 , NO_2 , SO_3 , SiO_2 , P_2O_5 등)

나) 염기성 산화물(무수염기) : 물에 녹아 염기가 되거나 산과 반응하여 염과 물을 만드는 금속산화물 (CaO , MgO , Na_2O , CuO 등)

다) 양쪽성 산화물 : 양쪽성 원소(Al , Zn , Sn , Pb 등)의 산화물로서 산, 염기와 모두 반응하여 염과 물을 만드는 양쪽성 산화물(ZnO , Al_2O_3 , SnO , PbO 등)

2) 산소의 산화수에 의한 구분

가) 초과산화물(superoxide) : 산소의 산화수가 $-1/2$ 인 산화물
(CsO_2 , KO_2 , RbO_2 등)

나) 과산화물(peroxide) : 산소의 산화수가 -1 인 산화물
(Na_2O_2 , H_2O_2 등)

다) 산화물(oxide) : 산소의 산화수가 -2 인 산화물
(Li_2O , MgO , CaO , Cs_2O 등)



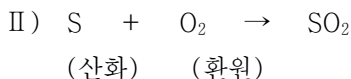
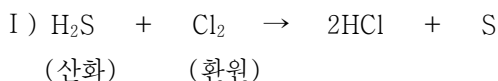
제5절 산화와 환원반응

1. 산화와 환원

산화-환원반응(oxidation-reduction reaction ; redox reaction)은 어떤 원소가 산소 또는 수소와 화합하거나 분리되는 현상으로 정의하였으나 현재는 산화수에 의해 정의되는 넓은 의미의 산화-환원이 주로 사용되고 있다. 그러나 산소나 수소가 반응에 관여하지 않는 반응에서의 산화-환원을 말할 때에는 전자의 이동이나 산화수의 변화로서 산화-환원반응을 정의할 수 있다.

산화	환원
산소와 결합할 때, 수소를 잃을 때 전자를 잃을 때, 산화수가 증가할 때	산소를 잃을 때, 수소와 결합할 때 전자를 얻을 때, 산화수가 감소할 때

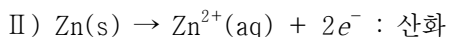
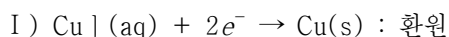
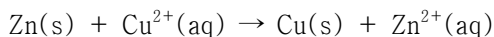
가. 산소·수소의 이동과 산화-환원



I에서 황화수소(H₂S)는 수소를 잃고 황으로 되었으므로 산화되었고, 염소(Cl₂)는 수소와 결합하여 염화수소(HCl)로 되었으므로 환원되었다. II에서는 황이 산소와 결합하여 이산화황(SO₂)이 되었으므로 산화되었다.

나. 전자이동과 산화-환원

산화-환원반응에서는 한 반응물에서 다른 반응물로 전자가 이동한다. 수용액 속의 아연금속과 구리(II)이온 사이에서 일어나는 산화-환원반응을 반응식으로 나타내면 다음과 같다.



이 과정에서는 구리의 산화상태가 +2에서 0으로 감소되었기 때문에 환원 되었다. 또한 아연의 산화상태는 0에서 +2로 증가하였기 때문에 산화되었다.

다. 산화수와 산화-환원

한 원소의 산화수(oxidation number) 또는 산화상태(oxidation state)는 분자 또는 이온의 알짜전하를 설명하기 위하여 분자 또는 이온 내에 있는 원자에 할당된 수를 말한다. 산화수는 다음과 같이 약간 임의적으로 보이는 규약에 따라서 정해진다.

- I) 반응하지 않은 원소의 산화상태는 0이다.
- II) 화합물을 구성하고 있는 모든 원자의 산화상태의 합은 화합물의 알짜 전하와 같아야 한다.
- III) 화합물을 구성하고 있는 알칼리 금속의 산화상태는 +1이고, 알칼리 토금속과 Zn, Cd의 산화상태는 항상 +2이다.
- IV) 화합물을 구성하고 있는 할로젠족의 산화상태는 -1이다.
- V) 대부분의 산소화합물에서 산소의 산화수는 -2이다. 예외로 과산화물, 초과산화물에서는 산화수가 -1, -1/2이다.
- VI) 수소화합물에서 수소원자의 산화수는 +1이고, 금속수소화합물에서 수소의 산화수는 -1이다.

2. 산화제와 환원제

가. 산화제(oxidizing agent)

자신은 쉽게 환원되면서 다른 물질을 산화시키는 성질이 강한 물질을 산화제라고 하며, 다음과 같은 조건이 필요하다.

- 산소를 내기 쉬운 물질
- 수소와 화합하기 쉬운 물질
- 전자를 얻기 쉬운 물질
- 전기음성도가 큰 비금속 단체

산화제	산화반응식
알칼리금속과산화물	$2M^I_2O_2 + 2H_2O \rightarrow 4M^IOH + O_2 + \text{발열}$ ($M^I = H, Li, Na, K, NH_4, Rb, Cs$)
알칼리토금속과산화물	$2M^{II}O_2 + 2H_2O \rightarrow 2M^{II}OH + O_2 + \text{발열}$ ($M^{II} = Mg, Ca, Sr, Ba, Zn, Cd, Hg$)
오존	$O_3 \rightarrow O_2 + O$
과산화수소	$H_2O_2 \rightarrow H_2O + O$
과염소산나트륨	$NaClO_4 \rightarrow NaCl + 2O_2$
진한 질산	$2HNO_3 \rightarrow H_2O + 2NO_2 + O$



산화제	산화반응식
묽은 질산	$2\text{HNO}_3 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{NO} + 3\text{O}$
진한 황산	$\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2 + \text{O}$
브롬	$\text{Br}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{HBr} + \text{O}$

나. 환원제(reducing agent)

자신은 쉽게 산화되면서 다른 물질을 환원시키는 성질이 강한 물질을 환원제라고 하며 다음과 같은 조건이 필요하다.

- 수소를 내기 쉬운 물질
- 산소와 화합하기 쉬운 물질
- 전자를 잃기 쉬운 물질
- 이온화 경향이 큰 금속 단체

환원제	환원반응식
알칼리금속	$\text{M} \rightarrow \text{M} + \text{e}^-$ (M = Li, Na, K, Rb, Cs)
알칼리토금속	$\text{M} \rightarrow \text{M} + 2\text{e}^-$ (M = Mg, Ca, Ba, Zn 등)
수소(고온)	$\text{H}_2 + \text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$
일산화탄소	$\text{CO} + \text{O} \rightarrow \text{CO}_2$
이산화황	$\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$
황화수소	$2\text{H}_2\text{S} + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{SO}_2$
옥살산	$\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4 + \text{O} \rightarrow 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$
알데히드	$2\text{CH}_3\text{CHO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CH}_3\text{COOH}$

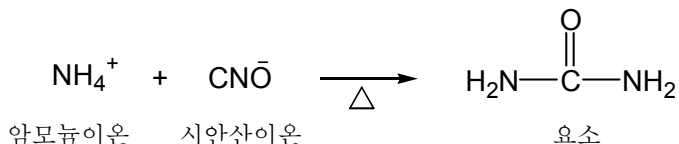
제6절 유기화합물

1. 유기화합물 일반

가. 유기화합물의 정의

1806년 스웨덴의 J.J. 베르셀리우스에 의해 최초로 유기화합물(organic compound)이라는 말이 사용되었다. 당시 천연동식물계에서 생성성분·배출물·발효생성물 등으로 얻어지는 화합물은 광물계로부터 얻어지는 무기화합물(무기물질)과 본질적으로 다르며, 생물의 생명력에 의해 그 기관(organ)에서 만들어진다고 생각하여 유기(organic)라

는 명칭이 붙여졌다. 유기화합물은 생명력에 의해 생성되므로 실험실에서 무기화합물로는 만들 수 없다고 생각되었으나, 1828년 독일의 뵐러(F. Wöhler)가 무기화합물로 알려진 시안산암모늄을 가열하여 유기화합물인 요소를 합성함으로써, 유기화합물과 무기화합물의 본질적 차이는 없어졌다.



유기화합물의 기본은 탄화수소이며, 탄소와 탄소, 탄소와 수소의 공유결합으로 구성된다. 탄소끼리는 공유결합에 의해 여러 개가 결합되어 사슬모양이나 고리모양의 골격을 형성하기도 하며, 탄소-탄소 결합에는 단일결합 외에 2중결합이나 3중결합도 가능하므로 탄화수소만으로도 여러 개가 존재한다. 또 탄화수소 골격을 산소·질소·황 등의 헤테로원자를 함유한 작용기로 치환하면 더욱 많은 유도체가 만들어지므로 유기화합물의 수는 수백만 종이 될 수 있다. 유기화합물은 일반적으로 가연성이며, 무기물에 비해 녹는점이 낮고, 물에 녹기 어려우며, 알코올·에테르 등의 유기용매에 녹기 쉬운 성질이 있다.

나. 유기화합물의 특성

유기화합물은 탄소를 주축으로 하여 이루어진 공유결합물질로서, 현재는 탄화수소화합물이라고 정의한다. 크게 포화탄화수소, 불포화탄화수소, 방향족탄화수소화합물로 나눌 수 있으며, 이들 화합물의 대부분의 성질은 작용기에 의하여 결정된다. 유기화합물의 일반적 성질은 다음과 같다.

- 1) 성분원소 - 주로 C, H, O이며, P, S, N, Cl 등의 비금속원소 포함
- 2) 종류 - 대단히 많은 화학종과 이성질체가 존재
- 3) 융점·비점 - 대부분 무극성분자로 분자사이의 인력이 작아 융점과 비점이 낮다.(분자량이 증가하면 높아진다.)
- 4) 화학결합 - 원자사이의 공유결합으로 안정하며, 비전해질이 많다.
- 5) 연소반응 - 대부분 연소하여 연소생성물인 CO₂와 H₂O를 생성하나 산소가 부족하면 C가 유리된다.
- 6) 용해성 - 대부분 물에 용해되기 어렵고, 유기용매에 용해
- 7) 반응속도 - 분자가 안정하여 반응성이 작고, 속도가 느리다.



8) 전리반응 - 대부분이 비전해질이며 전기전도성이 거의 없다.

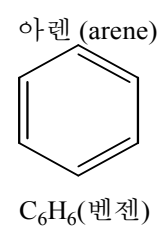
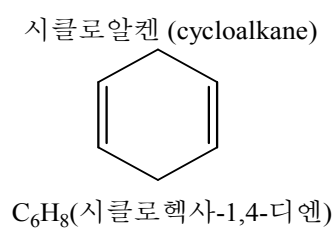
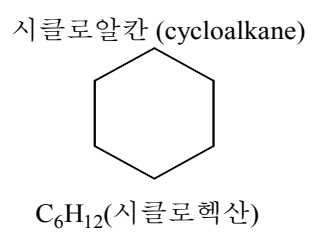
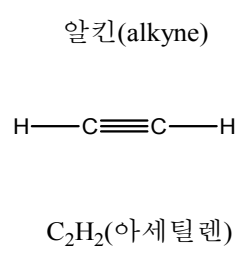
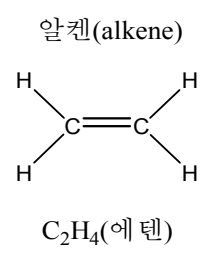
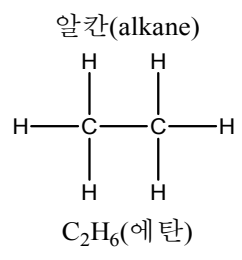
다. 탄화수소화합물의 분류

1) 탄소-탄소결합형식에 의한 분류

위험물안전관리법 시행령 제2조에서 정하는 제4류 위험물 또는 일부 제5류 위험물 들은 석유류 또는 석유류에서 유도된 화합물로서 주성분은 탄화수소(hydrocarbon)이다. 이들은 탄소-탄소결합의 양식에 따라서 [표 1-7]와 같이 분류할 수 있다. 포화 탄화수소는 탄소-탄소 단일결합만으로 되어있다. 불포화탄화수소는 탄소-탄소다중 결합, 즉 이중결합 또는 삼중결합 등을 포함하고 있다. 방향족탄화수소는 벤젠구조와 관련된 고리모양의 불포화화합물이다.

[표 1-7] 탄화수소화합물의 결합형식에 따른 분류

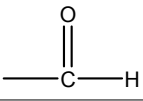
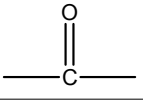
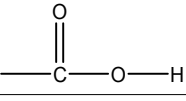
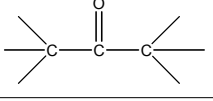
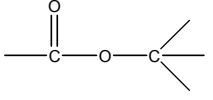
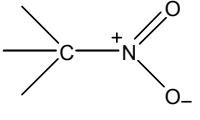
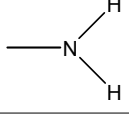
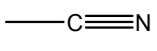
분류	분자구조	명칭	결합형식	일반식	화합물의 예
포화 탄화수소	사슬모양	알칸	단일 결합	C_nH_{2n+2}	메탄, 에탄
	고리모양	시클로알칸	단일 결합	C_nH_{2n}	시클로헥산
불포화 탄화수소	사슬모양	알켄	2중 결합	C_nH_{2n}	에텐(에틸렌)
		알킨	3중 결합	C_nH_{2n-2}	아세틸렌
	고리모양	시클로알켄	(2중 결합) $\times n$		시클로헥센
방향족 탄화수소	고리모양	아렌	비편재화 된 2중 결합		벤젠, 톨루엔



2) 작용기에 의한 분류

공통된 화학적 특성을 지니는 한 무리의 유기화합물에서 그 특성의 원인이 되는 공통된 원자단을 작용기라고 부른다. 예를 들면, 알코올류 및 페놀류에 속하는 유기화합물은 모두 히드록시기 (-OH)를 가지고 있는데, 이것이 이들 화합물에 특성을 부여하는 원인의 하나이다. 대부분의 유기화학반응에서 화학변화는 작용기에서 일어나고 분자의 나머지 부분은 원래의 구조를 유지한다.

[표 1-8] 주요 작용기의 명칭과 특성

작용기		화합물 분류	특성	예
명칭	구조			
히드록시기	-O-H	알코올 페놀	수용성, 극성화, H ₂ 발생	메탄올: CH ₃ OH 페놀: C ₆ H ₅ OH
설피히드릴기	-S-H	티올	수용성, 극성화 불쾌한 냄새	메탄티올: CH ₃ SH 티오펜올: C ₆ H ₅ OH
알데히드기		알데히드	환원성 (알코올 생성)	아세트알데히드 : CH ₃ CHO
카르보닐기		케톤	수용성, 유기용매	아세톤 : CH ₃ COCH ₃
카르복시기		카르복시산	자극성 냄새 극성, 수용성	아세트산 : CH ₃ COOH
에테르기		에테르	휘발성, 인화성 유기용매	디에틸에테르 : C ₂ H ₅ OC ₂ H ₅
에스터기		에스터	극성, 방향성 가수분해	에틸아세테이트 : CH ₃ COOC ₂ H ₅
니트로기		니트로화합물	폭발성, 산화성 환원반응 후 아민생성	니트로메탄 : CH ₃ NO ₂
아미노기		아민아미드	수소결합 염기성	아닐린 : C ₆ H ₅ NH ₂
니트릴기		시아나화물	독성, 인화성	아세토니트릴 : CH ₃ CN



라. 이성질체(isomer)

1) 정의

분자를 구성하는 원소의 수는 같으나 원자의 배열이나 구조가 달라서 물리적, 화학적 성질이 다르게 되는 관계가 있는 화합물을 서로 이성질체라고 한다.

2) 이성질체의 분류

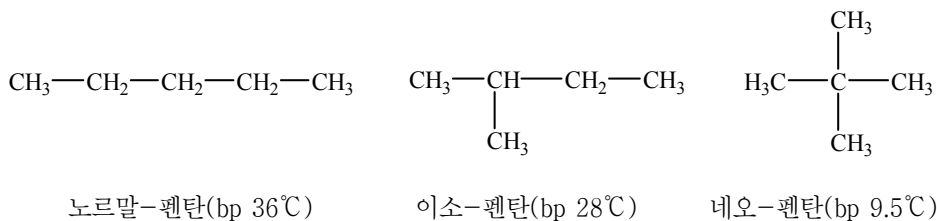
가) 구조이성질체(structural isomer)

같은 분자식을 가진 화합물이 다른 순서로 연결된 원자들을 가지면 그들은 다른 구조식을 가지며, 서로 구조이성질체라고 한다.

(1) 탄소사슬이성질체 : 탄소 사슬구조의 차이에 의하여 분류

[표 1-8] 참조

<펜탄(C₅H₁₂)의 이성질체>



[표 1-9] 알칸의 가능한 이성질체의 수

분자식	C ₁ H ₄ ~C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	C ₆ H ₁₄	C ₇ H ₁₈	C ₈ H ₁₈	C ₉ H ₂₀	C ₁₀ H ₂₂
이성질체	-	2	3	5	9	18	35	75

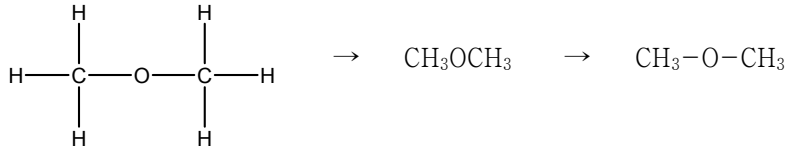
1

기초
화학

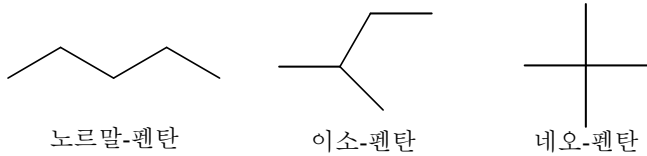
▶ 구조식의 약식화 ◀

구조식을 줄여서 다음과 쓰는 것이 편리할 때가 많다.

- 1) 원자들의 결합 순서대로 나열하거나, 탄소-탄소 또는 탄소-헤테로원소의 결합 형태를 순서대로 표시(단일결합은 1개의 선, 2중 결합은 2개의 선 등)

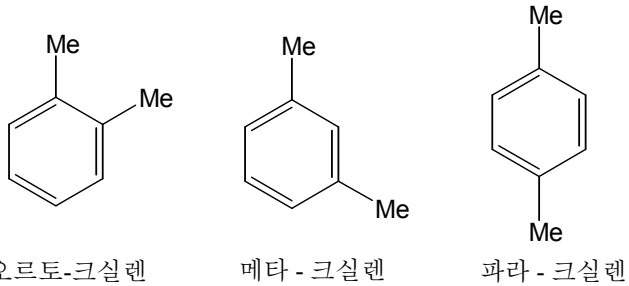


- 2) 구조식을 완전히 줄여서 탄소골격만을 선으로 표시



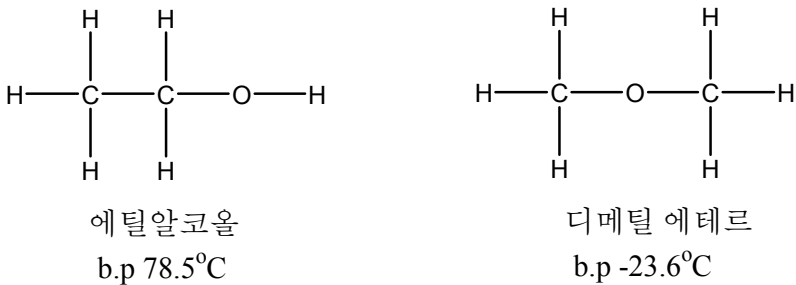
(2) 위치이성질체 : 치환기 위치의 차이에 의하여 분류

<크실렌(Xylene)의 이성질체>



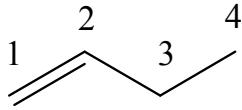
(3) 작용기 이성질체 : 작용기의 차이에 의하여 분류

<C₂H₆O의 작용기의 차이에 의한 이성질화>

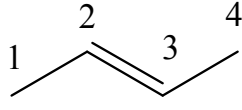




(4) 메타이성질체 : 2중 또는 3중결합 위치의 차이에 의하여 분류



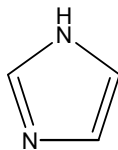
1-부텐(α -부틸렌)
bp - 6.3°C



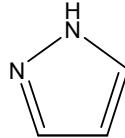
2-부텐(β -부틸렌)
bp (cis : 3.7°C, trans : 1°C)

(5) 고리이성질체 : 하나의 고리 속에 들어 있는 특정원자에 대한 상대적 위치의 차이에 의하여 분류

<5각형 고리 속의 N의 상대적 위치에 따른 이성질화>



이미다졸
bp 256°C



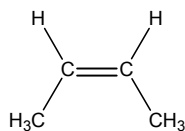
피라졸
bp 188°C

나) 입체이성질체(stereoisomer)

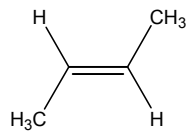
원자들의 연결방법이나 붙어있는 순서는 같으나 공간에서 원들의 입체배열이 다른 화합물이다. 입체이성질체에는 기하이성질체, 형태이성질체, 광학이성질체 등이 있다.

(1) 기하이성질체(geometrical isomer) : 배열이성질체 또는 시스-트랜스이성질체라고도 하며 이중결합으로 연결된 두 원자에 결합된 원자 또는 원자단의 공간적 배치가 다른 이성질체이다. 두 이성질체 사이의 전환은 이중결합이 끊어져야 가능하기 때문에 전환이 어렵다.

<2-부텐의 cis-trans 이성질체>



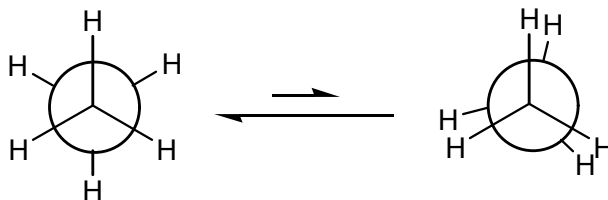
시스-2-부텐
bp 3.7°C



트랜스-2-부텐
bp 1°C

- (2) 형태이성질체(conformational isomer) : 회전이성질체라고도 하며 단일 결합을 중심으로 회전하여 상호 전환이 비교적 쉽다.

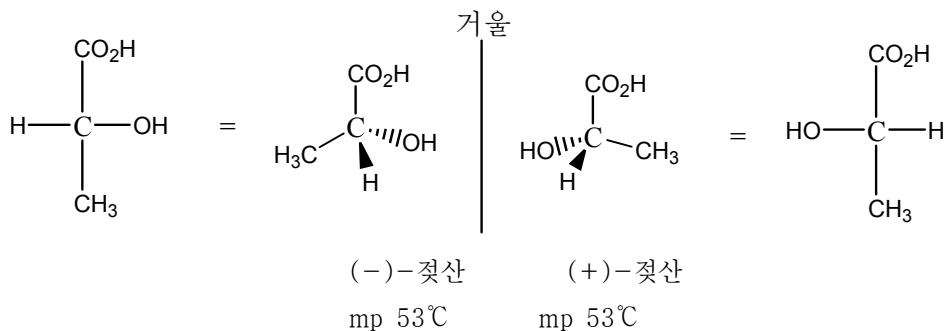
<에탄의 형태이성질화>



엇갈린 형태(99%)

가리워진 형태(1%)

- (3) 광학이성질체 : 광학이성질체는 밀도, 녹는점, 끓는점 등 대부분의 물리적 성질이 동일하지만 편광에 대한 성질이 서로 다른 이성질체이다. 비대칭탄소원자(키랄중심 : 4개의 서로 다른 원자단이 붙어 있는 탄소)가 있는 분자는 대칭 중심, 대칭면, 또는 회전축 등의 대칭 요소를 갖지 못하며, 이러한 분자들은 왼손·오른손과 같이 좌우가 바뀌고 서로 겹쳐지지 않는 거울상체의 관계를 갖는 2개의 이성질체로 존재할 수 있다. 광학이성질체는 다시 키랄중심의 원자단 배열형태에 따라 R·S, E·Z 이성질체 등으로 세분화 된다.



2. 포화 탄화수소

탄소-탄소 단일결합만으로 구성되는 포화탄화수소는 사슬모양과 고리모양으로 분류할 수 있고, 이들은 각각 알칸(alkane)류, 시클로알칸(cycloalkane)류라고 부른다.



가. 알칸계(메탄계, 파라핀계) 탄화수소

1) 일반적 성질

가) 일반식 : C_nH_{2n+2} (n은 탄소원자의 수)

나) 사슬모양(chain형)의 분자구조

다) 단일결합과 안정한 결합각으로 인해 반응성이 작고 안정된 화합물이다.

라) 탄소수(사슬길이)가 증가할수록 비중, 융점, 비점이 높아진다.

마) 무극성 분자로 물에 불용성이며, 액상은 밀도가 낮아서 물위에 뜬다.

바) 같은 분자량을 가진 다른 유기화합물보다 비점이 낮다. (분자간의 인력이 약하여 분자들이 분리하여 액체가 기체로 되는데 작은 에너지 소요)

사) 일반적으로 탄소수가 4개 이하는 기체, 5~16개 이하는 액체, 17개 이상은 고체이다.

2) 알칸의 명명법

가) 어미에 “-안(-ane)”을 붙인다.

나) 어간은 [표 1-10]과 같이 탄소수에 따라 결정한다.

다) 가지달린 알칸류는 분자 내 탄소원자의 가장 긴 사슬이름을 어간으로 하고 치환체의 이름을 붙인다.(치환체 이름-가장 긴 사슬이름)

라) 알칸류가 주된 사슬에 붙어 치환체(원자단)의 역할을 할 때는 알칸의 이름에서 어미 “-안(-ane)”을 “-일(yl)”로 바꾼다.

[표 1-10] 알칸계 탄화수소($C_1 - C_{10}$)

명 칭	탄소수	분자식	구조식
메탄(methane)	1	CH_4	CH_4
에탄(ethane)	2	C_2H_6	CH_3CH_3
프로판(propane)	3	C_3H_8	$CH_3CH_2CH_3$
부탄(butane)	4	C_4H_{10}	$CH_3CH_2CH_2CH_3$
펜탄(pentane)	5	C_5H_{12}	$CH_3(CH_2)_3CH_3$
헥산(hexane)	6	C_6H_{14}	$CH_3(CH_2)_4CH_3$
헵탄(heptane)	7	C_7H_{16}	$CH_3(CH_2)_5CH_3$
옥탄(octane)	8	C_8H_{18}	$CH_3(CH_2)_6CH_3$
노난(nonane)	9	C_9H_{20}	$CH_3(CH_2)_7CH_3$
데칸(decane)	10	$C_{10}H_{22}$	$CH_3(CH_2)_8CH_3$

3) 물리적 성질

탄소수 1~10개까지의 알칸의 물리적 성질은 [표 1-11]과 같다.

[표 1-11] 알칸계 탄화수소의 물리적 성질

명 칭	분자량	녹는점(°C)	끓는점(°C)	밀도(g/mL)
메탄(methane)	16.04	-183	-162	
에탄(ethane)	30.07	-172	-88.5	
프로판(propane)	44.10	-187.69	-47.07	
부탄(butane)	58.10	-135	-0.5	
펜탄(pentane)	72.15	-130	36	0.626
헥산(hexane)	86.18	-95	69	0.659
헵탄(heptane)	100.20	-91	98	0.684
옥탄(octane)	114.23	-57	126	0.703
노난(nonane)	128.26	-53	151	0.718
데칸(decane)	142.28	-30	174	0.73

나. 시클로알칸(시클로파라핀)계 탄화수소

1) 일반적 성질 : 알칸류와 유사

가) 일반식 : C_nH_{2n}

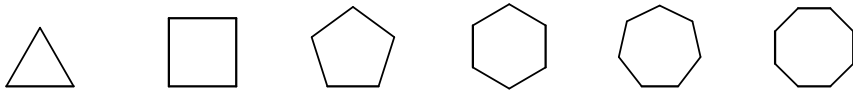
나) 사슬모양의 알칸보다 녹는점이 더 높다.

다) 물의 밀도(4°C에서 $1g/cm^3$)보다 밀도가 작다.

라) 비극성으로 수소결합을 할 수 없기 때문에 물에 불용성이다.

2) 시클로알칸의 명명법

탄소 고리의 탄소 수에 해당하는 알칸의 이름 앞에 “시클로(Cyclo-)”를 붙여서 명명한다.



시클로프로판 시클로부탄 시클로펜탄 시클로헥산 시클로헵탄 시클로옥탄



3) 물리적 성질

탄소수 3~8개까지의 시클로알칸에 대한 물리적 성질은 [표 1-12]과 같다.

[표 1-12] 시클로알칸의 물리적 성질

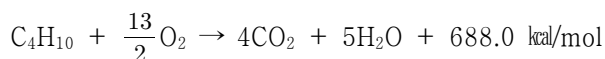
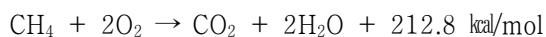
명 칭	분자량	녹는점(°C)	끓는점(°C)	밀도(g/mL)
시클로프로판(cyclopropane)	42.08	-126.6	-33	-
시클로부탄(cyclobutane)	56.11	-90	13	-
시클로펜탄(cyclopentane)	70.13	-94	50	0.751
시클로헥산(cyclohexane)	84.16	6.5	81	0.779
시클로헵탄(cycloheptane)	98.19	-12	118.5	0.811
시클로옥탄(cyclooctane)	112.21	13.5	149	0.834

다. 알칸류의 반응

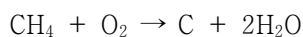
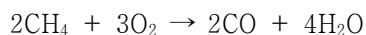
1) 연소반응(발열산화반응)

알칸의 가장 중요한 용도는 연료이다. 알칸이 과량의 산소 존재 하에서 연소하면 이산화탄소와 물을 생성한다. 가장 중요한 것은 이 반응이 많은 양의 열을 발생한다는 것이다. 연소반응의 시작은 점화원이 필요하지만 한번 반응이 시작되면 발열하면서 자발적으로 진행된다. 만약 산소가 부족하면 반응이 완전하지 못하여 부분적인 연소가 일어나 생성물은 일산화탄소나 탄소(그을음)로 된다.

I) 완전연소

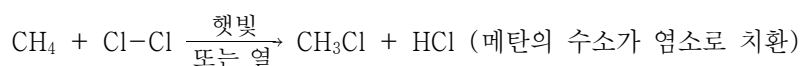


II) 불완전연소



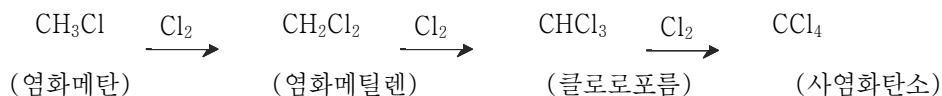
2) 할로젠화 반응

알칸은 고온의 반응조건에서 할로젠 원소와 반응하여 수소원자를 할로젠 원자로 치환한다.



만약 과량의 할로젠이 존재한다면 반응은 계속되어 여러 개의 할로젠으로 치환될

수 있다.



3. 불포화 탄화수소

탄소-탄소 2중결합을 가진 탄화수소를 알켄(alkene)류, 3중결합을 가진 탄화수소를 알킨(alkyne)류 라고 하며, 1개 이상의 2중결합 또는 3중결합을 가진 탄화수소를 알카디엔(또는 디엔)류 라고 부른다. 2중결합과 3중결합이 혼합된 구조의 화합물과 고리형 탄화수소에 다중결합을 가진 화합물도 알려져 있다.

가. 알켄계(에틸렌계, 올레핀계) 탄화수소

1) 일반적 성질

가) 일반식 : C_nH_{2n} ($n > 2$)

나) 불포화탄화수소로서 중합, 첨가반응이 쉽게 일어난다.

다) 탄소-탄소 2중결합에 의해 알칸계보다 반응성이 크다.

라) 물보다 가볍고 물에 녹지 않는다.

마) 탄소수가 증가할수록 비중, 융점, 비점이 높아진다.

바) 탄소-탄소 2중결합의 제한된 회전 때문에 기하이성질체(시스-트랜스 이성질체)가 존재한다.

사) 일반적으로 탄소수가 4개 이하는 기체, 5개 이상은 액체이다.

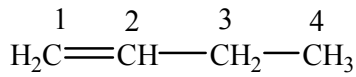
2) 알켄의 명명법

가) 어미에 “-엔(-ene)”을 붙인다. 2중결합이 1개 이상이면, 어미가 -디엔(-diene), -트리엔(-triene) 등으로 된다.

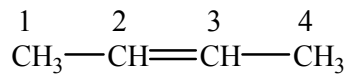
나) 2중결합의 위치가 작은 번호가 되도록 탄소사슬에 번호를 붙인다.

다) 이름의 어간은 탄소의 수에 의해 알칸계와 동일하게 결정한다.

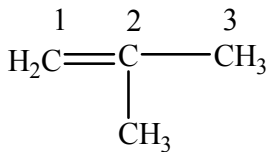
라) 고리형 탄화수소는 이중결합을 가진 탄소부터 번호를 붙여간다.



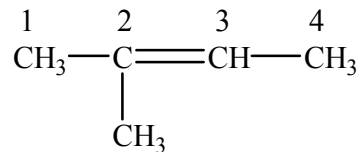
1-부텐



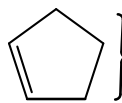
2-부텐



메틸프로펜

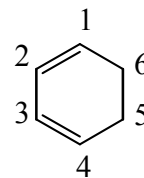


2-메틸-2-부텐



} 1개의 구조만
가능하기 때문에
번호가 필요없다.

시클로펜텐



1,3-시클로헥사디엔

3) 물리적 성질

탄소수 2~7을 가지는 대표적 알켄류의 물리적 성질은 [표 1-13]와 같다.

[표 1-13] 알켄류의 물리적 성질

명 칭	구조식	녹는점 (°C)	끓는점 (°C)	밀도 (g/mL)
에텐(ethene)	$\text{CH}_2=\text{CH}_2$	-169	-104	0.384
프로펜(propene)	$\text{CH}_3\text{CH}=\text{CH}_2$	-185	-47	0.514
1-부텐(1-butene)	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}=\text{CH}_2$	-185	-6.3	0.595
시스-2-부텐(cis-2-butene)	$\text{CH}_3\text{CH}=\text{CHCH}_3$ (cis)	-139	3.7	0.621
트랜스-2-부텐 (trans-2-butene)	$\text{CH}_3\text{CH}=\text{CHCH}_3$ (trans)	-106	0.9	0.604
1-펜텐(1-pentene)	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{CH}=\text{CH}_2$	-165	30	0.641
2-메틸-1-부텐 (2-methyl-1-butene)	$\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)\text{CH}_2\text{CH}_3$	-138	31	0.650
1-헥센(1-hexene)	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{CH}=\text{CH}_2$	-140	63	0.673
1-헵텐(1-heptene)	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}=\text{CH}_2$	-119	94	0.697

1

기초
화학

나. 알킨계(아세틸렌계) 탄화수소

1) 일반적 성질

가) 일반식 : C_nH_{2n-2} ($n > 2$)

나) 3중결합으로 알칸, 알켄보다 반응성이 풍부하다.

다) 물보다 가볍고 물에 녹지 않는다.

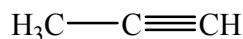
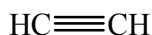
라) 탄소수가 증가할수록 비중, 융점, 비점이 높아진다.

2) 알킨의 명명법

가) 어미에 “-인(-yne)”을 붙인다. 3중결합이 1개 이상이면, 어미가 -디인(-diyne), -트리인(-triyne) 등으로 된다.

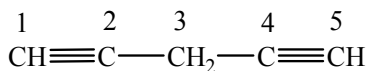
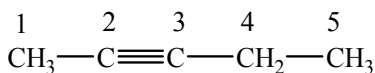
나) 3중결합의 위치가 작은 번호가 되도록 탄소사슬에 번호를 붙인다.

다) 이름의 어간은 탄소의 수에 의해 알칸계와 동일하게 결정한다.



에틴 또는 아세틸렌

프로핀



2-펜틴

펜타-1,4-디인

3) 물리적 성질

대표적 알킨화합물의 물리적 성질은 [표 1-14]와 같다.

[표 1-14] 알킨류의 물리적 성질

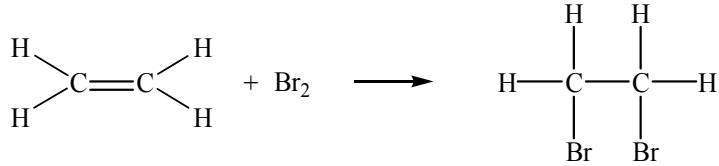
명 칭	구조식	녹는점(°C)	끓는점(°C)	밀도(g/mL)
에틴(ethyne)	$CH \equiv CH$	-81.8	-83.6	-
프로핀(propyne)	$CH_3C \equiv CH$	-101.51	-23.2	-
1-부틴(1-butyne)	$CH_3CH_2C \equiv CH$	-125.7	8.1	-
2-부틴(2-butyne)	$CH_3C \equiv CCH_3$	-32.3	27	0.691
1-펜틴(1-pentyne)	$CH_3(CH_2)_2C \equiv CH$	-90	39.3	0.695
2-펜틴(2-pentyne)	$CH_3CH_2C \equiv CCH_3$	-101	55.5	0.714
1-헥신(1-hexyne)	$CH_3(CH_2)_3C \equiv CH$	-132	71	0.715
2-헥신(2-hexyne)	$CH_3(CH_2)_2C \equiv CCH_3$	-88	84	0.730
3-헥신(3-hexyne)	$CH_3CH_2C \equiv CCH_2CH_3$	-101	8.8	0.724



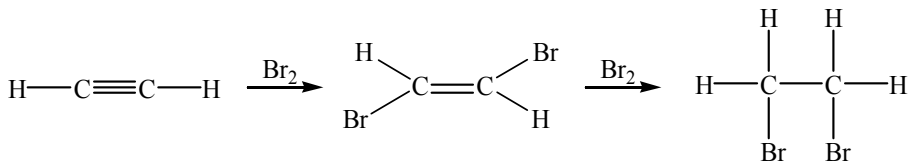
다. 알칸·알킨류의 반응

1) 첨가반응

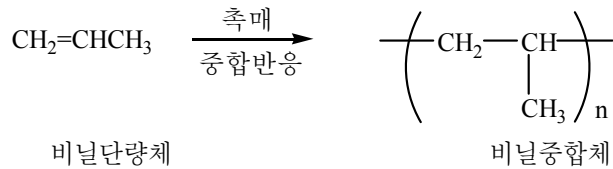
<알켄의 첨가반응>



<알킨의 첨가반응>



2) 중합반응



4. 방향족 탄화수소

유기화합물 중에서 벤젠고리를 가지며 방향족성을 나타내는 화합물을 총칭하며, 벤젠을 모체로 하는 벤젠계열 방향족화합물 외에, 고리를 구성하는 원자가 탄소 이외인 원소(N, S, O 등)를 포함한 헤테로고리방향족화합물도 많이 알려져 있다. 또 최근 벤젠을 모체로 하지 않는, 즉 6원자 고리 이외의 고리(5원자 고리 등)로 구성되는 비 벤젠계열 방향족화합물도 많이 알려져 있다.

단순히 향기 때문이 아니라 특별한 화학적 성질로 인하여 방향족화합물(aromatic compound)이라고 부르는데 최초의 방향족화합물은 수지, 향유 등의 천연물에서 얻어졌다. 이들이 포함하고 있는 공통적인 6개의 탄소단위는 여러 화학반응을 통해서도 손상을 입지 않고 방향족화합물의 모체탄화수소인 벤젠(C₆H₆)을 생성한다. 1825년에 M. 페러데이 가 압축된 조명가스로부터 처음으로 벤젠을 분리하였으나, 오늘날 벤젠을 포함한 많은 방향족 화합물들은 주로 석유에서 얻어진다.

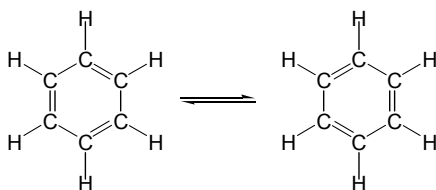
가. 방향족화합물의 구조

1) 벤젠의 구조

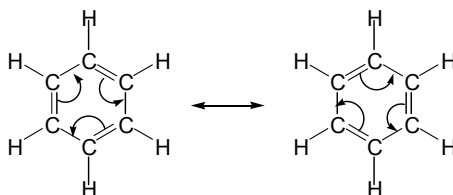
가) 6개의 탄소원자들이 정육각형의 고리모양을 이루며, 각 탄소원자에 4개의 원자를 부여하기 위하여 수소가 1개씩 붙어 있고 고리를 따라 단일결합과 2중결합이 교대로 있는 구조(Kekulé의 구조)

나) 고리 내에 6개의 π 전자가 비편재화(delocalization)되어 단일결합과 2중결합의 중간상태인 한 종류의 탄소-탄소결합만이 존재(공명혼성 구조)

<Kekulé의 벤젠구조>



<두 가지 기여구조의 공명혼성>

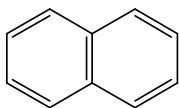


2) 폴리고리 방향족화합물

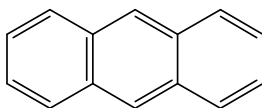
가) 벤젠고리가 2개 이상 붙어있다.

나) 고리가 접한 2개의 탄소원자는 공유한다.

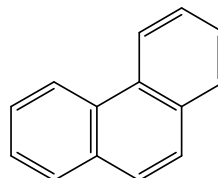
다) 결합길이가 벤젠의 결합길이(1.39 Å)와 비슷하다.



나프탈렌



안트라센



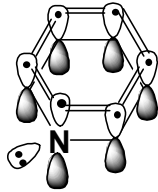
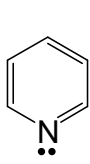
페난트렌

3) 헤테로고리 방향족화합물

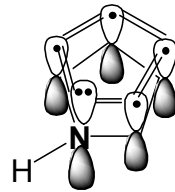
가) 방향족 고리의 탄소원자를 헤테로 원자(N, O, S 등)로 대체



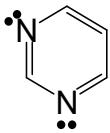
나) 6개의 π 전자에 의한 방향족성이 성질 유지(헤테로 원자가 1개의 전자를 주는 것과 2개의 전자를 주는 것으로 분류)



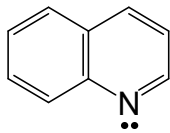
피리딘 (N의 1개 전자 공여)



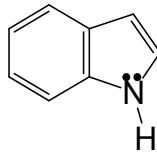
피롤 (N의 2개전자 공여)



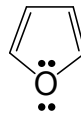
피리미딘



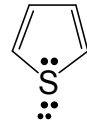
퀴놀린



인돌



퓨란



티오펜

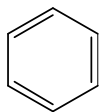
나. 일반적 성질

- 1) 사슬모양이 아닌 고리모양으로 되어 있다.
- 2) 다중결합 화합물의 특성인 첨가반응보다는 주로 치환반응을 한다.
- 3) 방향족화합물의 고리구조는 안정하다. (공명에너지의 영향)
- 4) 상온 상압에서 무색투명한 휘발성 액체로 인화성물질이다.
- 5) 대부분 극성이 낮아서 물에는 녹지 않고 유기용매(에테르, 클로로포름 등)에 잘 녹는다.
- 6) 물보다 비중이 낮고, 특이한 방향성을 지닌 액체로 상온에서 증발한다.

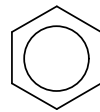
다. 기호와 명명법

1) 기호

벤젠을 나타내기 위하여 다음과 같은 두 가지 기호가 사용된다.



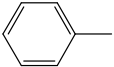
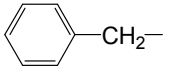
I) Kekulé의 구조



) 공명혼성구조

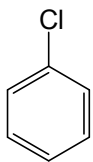
어느 기호를 사용하던 정육각형의 꼭지점에 있는 탄소에 1개씩 붙어 있는 수소는 보통 나타내지 않는다. I의 기호는 벤젠에 6개의 π 전자가 있다는 것을 명백하게 하며, II의 기호는 정육각형 내부의 원이 고리주위에 전자가 고루 분포되어 있다는 사실을 강조한 것이다. 방향족화합물에서 자주 등장하는 원자단의 이름과 기호를 [표 1-15]에 정리하였다.

[표 1-15] 방향족화합물의 주요작용기

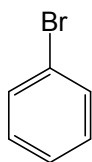
명칭	기호	구조
페닐(phenyl)기	$C_6H_5^-$, Ph^- , ϕ^- 또는 	벤젠에서 수소1개를 제거한 원자단
벤질(benzyl)기	$C_6H_5CH_2^-$ 또는 	톨루엔에서 수소1개를 제거한 원자단
알킬(alkyl)기	$C_nH_{2n+1}^-$ 또는 R^-	알칸에서 수소1개를 제거한 원자단
아릴(aryl)기	Ar^-	방향족화합물에서 수소1개를 제거한 원자단

2) 명명법

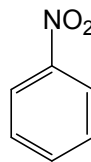
가) 벤젠유도체에는 벤젠이란 용어에 치환기의 이름을 어두에 붙인다.



클로로벤젠

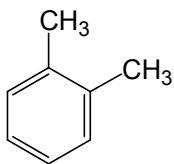


브로모벤젠

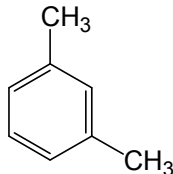


니트로벤젠

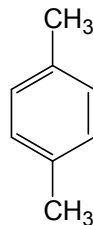
나) 2개의 치환기에 의한 3개의 이성질체는 오르토(o-), 메타(m-), 파라(p-)를 사용하여 분류한다.



o-크실렌



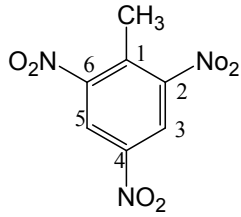
m-크실렌



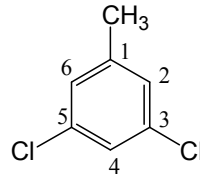
p-크실렌



다) 2개 이상의 치환기가 있을 때는 고리에 번호를 붙인다.

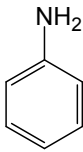


2,4,6-트리니트로톨루엔(TNT)

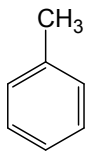


3,5-디클로로톨루엔

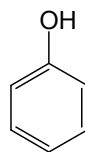
라) 치환기와 관련 없는 특수한 이름(관용명)이 흔히 사용된다.



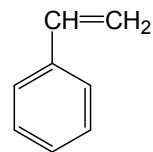
아닐린(aniline)



톨루엔(toluene)



페놀(phenol)

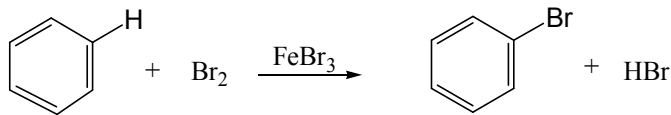


스티렌(styrene)

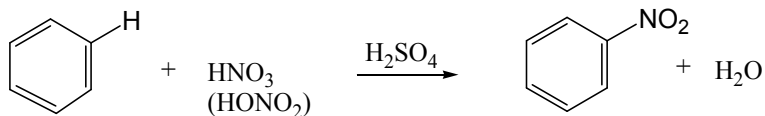
라. 방향족화합물의 반응

1) 치환반응

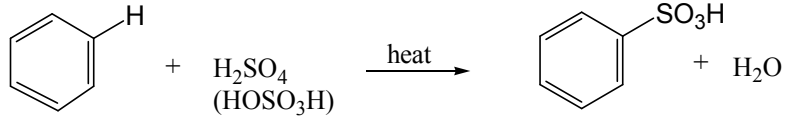
가) 할로젠화 반응 : 벤젠을 FeX_3 ($X = Br, Cl$) 촉매 하에서 할로젠과 반응하여 할로젠화 벤젠을 생성한다.



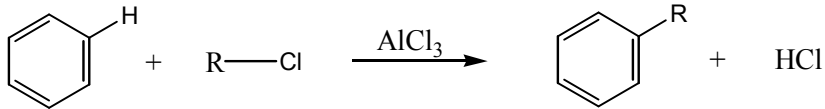
나) 니트로화 반응 : 벤젠을 진한 황산의 존재 하에서 질산과 반응하여 니트로벤젠을 생성한다.



다) 술폰화반응 : 벤젠을 진한 황산과 함께 가열하면 벤젠술폰산을 생성한다.

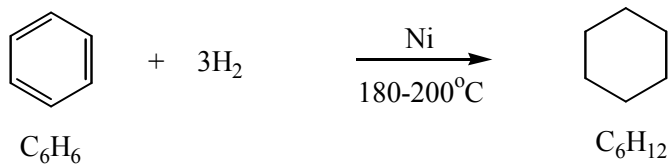


라) 알킬화 반응 : 벤젠을 염화알루미늄을 촉매로 하여 할로젠화 알킬과 반응시키면 알킬벤젠이 생성된다.

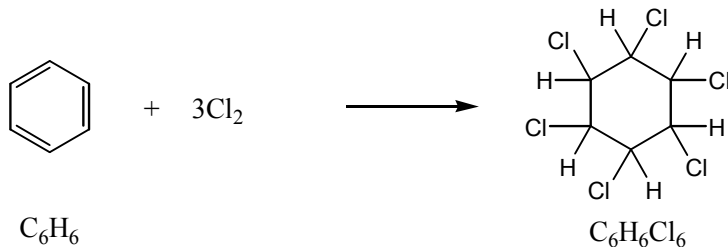


2) 첨가반응 (특수한 반응조건하에서 반응)

가) 수소(H_2)첨가반응 : 벤젠을 Ni촉매 하에서 수소를 첨가시키면 시클로헥산을 생성한다.



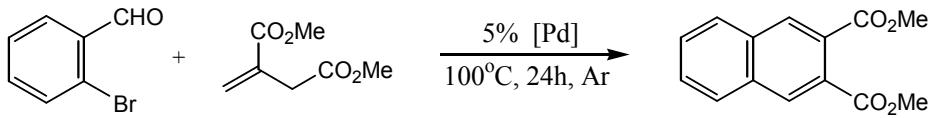
나) 염소(Cl_2)첨가반응 : 벤젠에 염소를 부가한 후 광선을 조사하면 B.H.C(벤젠 hexa클로라이드)를 생성한다.



3) 고리화반응 (특수한 반응조건하에서 반응)

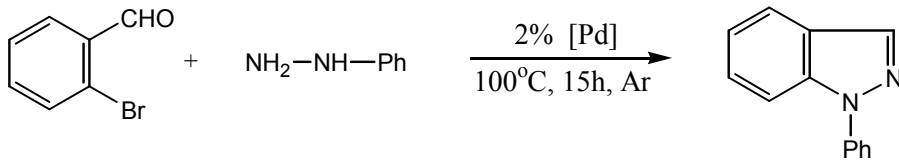
방향족화합물의 유도체들은 특수한 반응조건에 하에서 여러 형태의 고리화(Cyclization)반응과정을 거쳐 다양한 고리화합물을 새롭게 합성할 수 있는데 현대 유기합성화학에서 빈번히 연구 개발되고 있는 2가지 형태의 고리화 반응은 다음과 같다.

가) 탄소-탄소결합형성 : 2-브로모벤즈알데히드는 팔라듐(Pd)촉매하에서 카복실기가 치환된 알켄과 반응으로 새로운 고리를 형성하여 나프탈렌 유도체를 생성한다.



(임동권의 4, *Tetrahedron Lett.* 2004, 45, 5653.)

나) 탄소-질소결합반응 : 2-브로모벤즈알데히드는 팔라듐(Pd)촉매하에서 아릴히드라진과 반응으로 새로운 헤테로고리를 형성하여 인다졸을 형성한다.



(임동권의 4, *Chem. Commun.* 2004, 104)

마. 물리적 성질

대표적 방향족화합물의 물리적 성질은 [표 1-16]과 같다.

[표 1-16] 방향족화합물의 물리적 성질

명 칭	구조식	녹는점 (°C)	끓는점 (°C)	인화점 (°C)	밀도 (g/mL)
벤젠 (benzene)	C ₆ H ₆	5.5	80	-11	0.879
톨루엔	C ₆ H ₅ CH ₃	-95	111	4	0.866
o-크실렌	1,2-C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂	-25	144	27	0.880
m-크실렌	1,3-C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂	-48	139	32	0.864
p-크실렌	1,4-C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂	13	138	27	0.861
에틸벤젠 (ethylbenzene)	C ₆ H ₅ C ₂ H ₅	-95	136	15	0.867
큐멘 (Cumene)	C ₆ H ₅ CH(CH ₃) ₂	-96	152	36	0.862
비페닐 (Biphenyl)	C ₆ H ₅ C ₆ H ₅	70	255	113	-
스티렌 (Styrene)	C ₆ H ₅ CH=CH ₂	-31	145	32	0.907
페닐아세틸렌 (phenylacetylene)	C ₆ H ₅ C≡CH	-45	142	-	0.930

chapter 1 핵심요약

- 화학은 물체의 구성이나 성질 및 구조에 대해 연구하는 학문으로 SI표준단위를 기준으로 정량적인 값을 나타낸다.
- 원자는 물질을 구성하는 최소입자로 중성자, 양성자, 전자로 구성되어 있으며 각각의 원자를 표로 표현한 것이 주기율표이고 원자마다 번호를 붙인 것이 원자번호이다.
- 원자궤도함수에서 4개의 양자수를 토대로 전자배치를 적용하며 파울리의 배타원리와 훈트규칙 등을 고려하여 배치한다.
- 화학결합이란 화합물에서 원자를 붙들어 두는 인력을 의미하며 이온결합, 공유결합 등이 있다.
- 원자의 질량을 원자량, 분자의 질량을 분자량이라고 하며 이들을 일정한 수의 집단으로서 단위로 표현한 것을 몰(mol)이라고 한다.
- 화학식에는 실험식, 분자식, 시성식, 구조식이 존재하며 원자의 조성과 원자들 간의 상대적인 수 등을 보기 편하게 나타내기 위해 사용된다.
- 화학방정식이란 화학반응을 간단한 기호로 나타낸 것이다.
- $PV=nRT$ 는 보일-샤를의 법칙과 아보가드로의 법칙을 결합하여 만든 이상기체 방정식을 의미한다.
- 화학반응에는 결합, 치환, 분해, 산화환원, 산염기 반응이 있으며 열의 출입을 기준으로 흡열, 발열 반응이 존재한다.
- 반응속도에 영향을 미치는 요인에는 반응물의 성질, 농도, 온도, 촉매 등이 있다.
- 산과 염기는 아레니우스, 브뢴스테드-로우리, 루이스 등에 의한 개념이 존재한다.
- 산화환원반응은 O_2 , H_2 원자의 이동, 전자의 이동, 산화수와 연관된다.
- 유기화합물의 기본은 탄화수소이고 공유결합으로 구성된다.
- 탄화수소화합물은 결합형식, 작용기에 따라 분류된다.
- 이성질체란 분자를 구성하는 원소의 수는 같으나 배열이나 구조가 달라 성질이 다른 화합물들의 관계를 의미한다.



Chapter 1 학습가이드

- 01 기초화학에서 사용되는 기본적인 단위와 용어에 대해 이해하고 숙지하여야 한다.
- 02 원자에 관련된 가설 및 이론을 바탕으로 원자의 구성요소와 전자배치순서에 대해 먼저 이해하고 주기율표의 주기와 족에 대한 내용을 이해하는 것이 바람직하다.
- 03 화학결합을 먼저 이해하고 화학반응식을 만드는 방식에 대해 학습한다.
- 04 화학에서 사용되는 방정식에 대해 비교·분석하여 어떻게 유도되는지 이해하고 숙지한다.
- 05 반응속도와 화학평형이동에 영향을 미치는 요인들을 비교하면서 학습한다.
- 06 산과 염기의 개념을 종류별로 비교·분석하여 학습한다.
- 07 화학반응의 종류에 대해 정리하고 어떤 요소와 연관되는지 이해하고 숙지한다.
- 08 유기화합물에서 결합형식에 따른 명명법에 대해 학습한다.
- 09 유기화합물에서 작용기에 따른 명명법에 대해 학습한다.

2 화학용어정리

- 학습 목표**
- 01 소방과 관련된 화학용어들에 대해 학습한다.
 - 02 화학식의 약호에 대해 학습한다.
 - 03 화학식의 명명법에 대해 학습한다.

제1절 용어 해설

1. 인화점(引火點, Flash point, 약호 Fp)

가연성 액체 또는 고체가 표면근처에서 공기와 혼합하여 연소하기에 충분한 농도의 혼합 증기를 발생하는 최저의 온도를 말한다.

※ 측정장치

- KS M 2010 원유 및 석유제품의 인화점 시험방법
- KS M 5000 도료 및 관련원료의 인화점 시험방법
- KS M 6010 바니시 및 휘발성 액체의 인화점 시험방법
- KS M 6020 래커용 용매 및 인화점이 낮은 희석제의 시험방법

2. 발화점(發火點, Ignition Point, 약호 Ip)

공기 중에서 가연성 물질을 가열할 경우 다른 곳에서 화염·전기불꽃 등 발화원이 없어도 연소가 일어나 계속 유지되는 최저의 온도를 말한다. 보통, 연료를 점차 고온으로 가열하여 혼합기체들의 일부가 활성화되어 자동발화할 수 있는 최저의 온도를 자동발화점(Auto Ignition Temperature)이라 하는데 단순히 이를 발화점이라고 한다.



3. 폭발한계(爆發限界, Explosive Limits = Flammable Limits)

가연성 가스와 공기(또는 산소)의 혼합물에 있어서 가연성 가스의 농도가 낮거나 높게 되면 화염의 전파가 일어나지 않는 농도한계가 있는데, 낮은 쪽의 농도를 폭발하한계(Lower Flammable Limits) 높은 쪽의 농도를 폭발상한계(Upper Flammable limits)라 하며 하한계와 상한계 사이의 농도범위를 폭발한계 또는 연소한계, 연소범위(Flammable Limits)라 하며 단위는 보통 Vol %를 사용한다.

4. 비중(比重, Specific Gravity, 약호 SG)

가. 고체, 액체의 비중

표준물질의 밀도(4°C에서 물의 밀도 1g/cm³)와 대상물질의 밀도와의 비를 말한다.

$$\text{비중} = \frac{\text{대상물질의 밀도}}{\text{표준물질의 밀도}}$$

나. 기체의 비중

같은 온도, 압력에서 건조공기의 같은 체적의 무게에 대한 대상기체의 무게의 비를 말한다.

$$\text{비중} = \frac{\text{대상기체의 분자량}}{\text{건조공기의 평균분자량(약 29)}}$$

5. 증기밀도(蒸氣密度, Vapor Density)

순수기체 또는 증기의 단위체적당의 무게를 말한다. 증기밀도가 1보다 크면 공기보다 무겁고 1보다 작으면 공기보다 가볍다.

6. 비점(沸點, Boiling Point, 약호 BP, bp)

액체의 포화증기압이 대기압과 같아지는 온도를 말하며 비점은 압력이 증가함에 따라 증가하는 특성이 있다. ‘비등점’ 또는 ‘끓는점’이라고도 한다.

※ 대기압 : 1atm = 760mmHg = 1013mb = 14.7psi

2

화학
용어
정리

7. 융점(融點, Melting Point, 약호 MP, mp)

고체의 순물질이 액체로 변하여 액상과 고상이 평형을 유지하는 온도를 말한다. '용융점' 또는 '녹는점'이라고도 한다.

8. 발열량(發熱量, Combustion Heat)

물질이 완전 연소하는 동안 발생하는 총열량으로서 물질을 구성하는 원자, 분자의 배열에 따라 영향을 받는다.

※ 발열량 단위 : $1 \text{ J/g} = 0.24 \text{ cal/g}$

9. 유해물질의 중독량

가. 고체, 액체화합물

치사량의 기호 : LD(Lethal Dose)

LD : 한 마리의 동물을 치사시키는 양

LD50 : 실험동물 1군(10마리이상)중의 50%를 치사시키는 양

LD100 : 실험동물 1군(10마리이상)중의 100%를 치사시키는 양

<예> 메탄올 : 개 경구 LD 6336mg/kg

아크로레인 : 쥐 피하 LD50 30mg/kg

나. 가스

치사농도의 기호 : LC(Lethal Concentration)

LC : 동물 한 마리를 치사시키는 농도

LC50 : 실험동물 1군(10마리이상)중에서 50%를 치사시키는 농도

<예> 시안화수소 : 개 LC 0.2mg/L(연속)

톨루엔 : 쥐 LC50 5300ppm(7hr)



10. 시간하중 평균농도(Time Weighted Average Concentration, TWA)

1일 8시간 작업을 기준으로 하여 유해요인의 측정농도에 발생시간을 곱하여 8시간으로 나눈 농도를 말한다.

$$\text{TWA농도} = \frac{C_1 T_1 + C_2 T_2 + \dots + C_n T_n}{8}$$

C = 유해요인의 측정농도(ppm 또는 mg/m³)

T = 유해요인의 발생시간(시간)

<예> 암모니아 : TWA 25ppm

11. 단시간 노출허용농도(Short Term Exposure Limit, STEL)

근로자가 1회에 15분간 유해요인에 노출되는 경우의 허용농도로 이 농도이하에서는 1회 노출간격이 1시간 이상인 경우 1일 작업시간 동안 4회까지 노출이 허용될 수 있는 농도를 말한다.

<예> 암모니아 : STEL 35ppm

12. 최고허용농도(Ceiling 농도)

근로자가 1일 작업시간 동안 잠시라도 노출되어서는 안되는 최고허용농도를 말한다.

13. 기타 용어

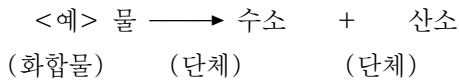
가. 단체(Simple Substance)

다른 물질로 분해될 수 없는 한 종류의 원자만으로 된 물질

<예> 산소(O₂), 수소(H₂), 마그네슘(Mg), 알루미늄(Al)

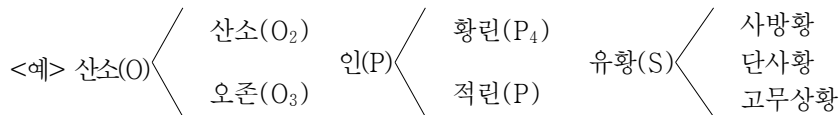
나. 화합물(Compounds)

화학적 방법에 의해 두 종류 이상의 물질로 분해할 수 있는 물질



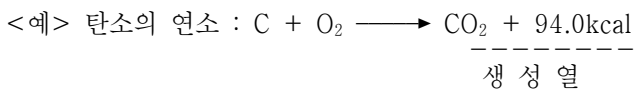
다. 동소체(Allotropy)

같은 원소로 되어 있으나 성질과 모양이 다른 단체를 말한다.



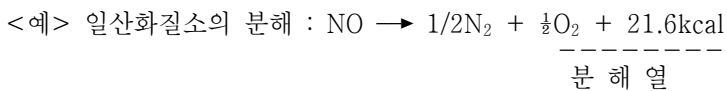
라. 생성열(Heat of Formation)

1mol의 화합물이 그 성분원소의 단체로부터 생성될 때 발생 또는 흡수되는 열량



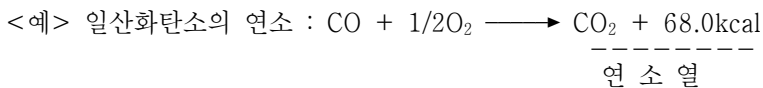
마. 분해열(Heat of Dissociation)

1mol의 화합물을 성분단체로 분해할 때 발생 또는 흡수되는 열량



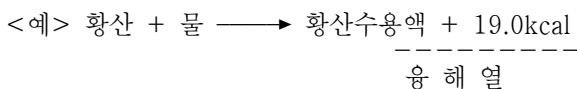
바. 연소열(Heat of Combustion)

물질 1mol이 완전연소할 때 발생하는 열량



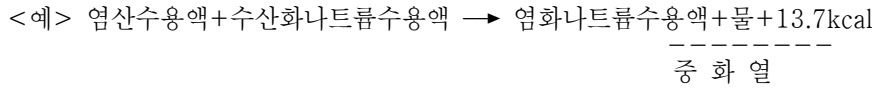
사. 용해열(Heat of Solution)

1mol의 물질에 다량의 용매를 녹일 때 발생 또는 흡수되는 열량



아. 중화열(Heat of Neutralization)

산과 염기가 중화하여 1mol의 물을 만들 때 발생하는 열량



자. 잠열(Latent Heat, 숨은 열)

용해열·기화열과 같이 물질의 상태만을 변화시키고 온도의 변화는 일으키지 않는 열.

차. 승화(Sublimation)

물질이 표면에서 증발이 일어나 고체(기체)가 액체를 거치지 않고 직접 기체(고체)로 되는 현상

<예> 나프탈렌, 드라이아이스(CO₂)

카. 조해

물에 잘 녹는 고체물질이 공기 중의 수분을 흡수하여 스스로 녹는 현상

<예> NaOH, MgCl₂

타. 풍해

결정수를 가진 결정이 공기 중 결정수를 잃고 흰분말로 되는 현상

<예> Na₂CO₃ · 10H₂O → Na₂CO₃

파. 용해(Dissolution)

용질의 분자나 이온이 용매에 균일하게 녹아 들어가는 현상.

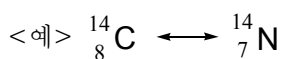
하. 동위체(Isotope)

원자번호가 같고 질량수가 다른 원소, 동위원소라고도 한다.



거. 동중원소(Isobar)

질량수는 같고 원자번호가 다른 원소



2

화학
용어
정리

너. 방사능(Radioactivity)

방사선을 방출하는 성질을 말한다. 온도, 압력 등에 관계없이 사진작용, 전리작용, 형광작용을 하는 광선(방사선)을 내는 원소를 방사성원소라 한다.

<예> 방사성 원소 : ${}_{92}^{238}\text{U}$, ${}_{90}^{232}\text{Th}$

더. 이성질체(Isomer)

분자식은 같으나 성질이 다른 물질

<예> $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(\text{에탄올}) \\ \text{CH}_3\text{OCH}_3(\text{디메틸에테르}) \end{array} \right.$

러. 라디칼(Radical)

화학변화가 일어날 때 분해되지 않고 다른 분자로 이동하는 원자의 무리, 기(基) 또는 원자단

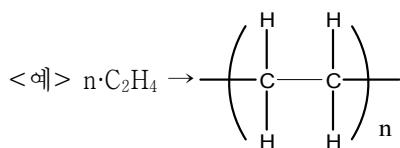
<예> $\text{Zn} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{ZnSO}_4 + \text{H}_2$
황산이온라디칼

머. 왕수(Aqua Regia)

HCl과 HNO_3 을 3 : 1의 부피비로 혼합한 용액으로 금이나 백금도 녹인다.

버. 중합(衆 合)

분자량이 작은 분자 몇 개가 결합하여 큰 분자 하나를 만드는 것이며 중합 생성물을 중합체(Polymer)라 하며, 중합체의 단위로 된 분자량이 작은 물질을 단위체 또는 단량체(Monomer)라 한다.



에틸렌
(단위체)

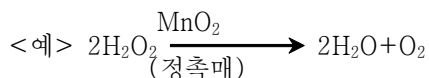
폴리에틸렌
(중합체)



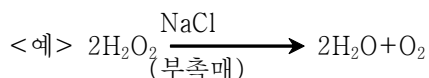
서. 촉매(Catalyst)

어느 반응에서 적은 양이 관여하여 반응의 속도만을 변화시키고 자신은 반응 전후에서 변화가 없는 물질.

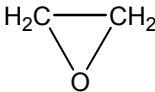
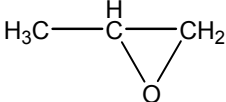
1) 정촉매(Positive Catalyst) : 반응속도를 빠르게 함.



2) 부촉매(Negative Catalyst) : 반응속도를 느리게 함.



제2절 화학식 약호

MEK	Methyl Ethyl Ketone(메틸에틸케톤)	$\text{CH}_3\text{COC}_2\text{H}_5$
MEKPO	Methyl Ethyl Ketone Per Oxide (메틸에틸케톤퍼옥사이드) ($\text{CH}_3\text{COC}_2\text{H}_5$) ₂ O ₂	
BTX	Benzene(벤젠) Toluene(톨루엔) Xylene(크실렌)	C_6H_6 $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$ $\text{C}_6\text{H}_4(\text{CH}_3)_2$
BPO	Benzoyl Peroxide(벤조일퍼옥사이드)	($\text{C}_6\text{H}_5\text{CO}$) ₂ O ₂
EG	Ethylene Glycol(에틸렌 글리콜)	$\text{C}_2\text{H}_4(\text{OH})_2$
AN	Acrylo Nitrile(아크릴로니트릴)	$\text{CH}_2=\text{CHCN}$
AN	Ammonium Nitrate(질산암모늄)	NH_4NO_3
EO	Ethylene Oxide(산화에틸렌)	
PO	Propylene Oxide(산화프로필렌)	

2

화학
용어
정리

IPA	Iso Propyl Alcohol(이소프로필알콜)	$\begin{array}{c} \text{H}_3\text{C}-\text{CH}-\text{CH}_3 \\ \\ \text{OH} \end{array}$
MMA	Methyl Metha Acrylate(메틸메타아크릴레이트)	$\begin{array}{c} \text{H}_2\text{C}=\text{C}-\text{CH}_3 \\ \\ \text{COOCH}_3 \end{array}$
PMMA	Poly Methyl Metha Acrylate(메틸메타아크릴레이트폴리머)	
EDC	Ethylene Di Chloride(이염화에틸렌)	$\text{CH}_2\text{Cl}-\text{CH}_2\text{Cl}$
VCM	Vinyl Chloride Monomer(염화비닐모노머)	$\text{CH}_2=\text{CHCl}$
PVC	Poly Vinyl Chloride(염화비닐 폴리머)	$(\text{CH}_2=\text{CHCl})_n$
LDPE	Low Density Poly Ethylene(저밀도 폴리에틸렌)	$\left(\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & - & \text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{H} \end{array} \right)_n$
MDPE	Middle Density Poly Ethylene(중밀도 폴리에틸렌)	
HDPE	High Density Poly Ethylene(고밀도 폴리에틸렌)	
EPR	Ethylene Propylene Rubber(에틸렌 플로필렌고무)	$\text{---}(\text{H}_2\text{C}-\text{CH}_2)_m\text{---}(\text{CH}_2-\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}})_n\text{---}$
PP	Poly Propylene(폴리프로필렌)	$\text{---}(\text{CH}_2-\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}})_n\text{---}$
ABS	Acrylo nitrile(아크릴로 니트릴)	$\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CN}$
	Butadiene(부타디엔)	$\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}_2$
	Styrene(스티렌)	$\text{C}_6\text{H}_5-\text{CH}=\text{CH}_2$
BR	Cis Poly Butadiene Rubber(부타디엔 고무)	
SBR	Styrene Butadiene Rubber(스티렌부타디엔 고무)	
ABR	Acrylonitrile Butadiene Rubber(아크릴로니트릴 부타디엔 고무)	
PS	Poly Styrene(폴리스티렌)	$(\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}=\text{CH}_2)_n$
DMT	Di Methyl Terephthalate(디메틸테레프탈레이트)	$\text{H}_3\text{COOC}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{COOCH}_3$
TDI	2,4 Tolyrene Diisocyanate(톨리렌 디이소시아네이트)	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{C}_6\text{H}_3 \\ \\ \text{NCO} \end{array}$



TPA	Terephthalic acid(테레프탈산)	
HMDI	Hexa Methylene Di Isocyanate(헥사메틸렌다이소시아네트) OCN-(CH ₂) ₆ -NCO	
MOH	메탄올 Methanol(Methyl Alcohol)	CH ₃ OH
EOH	에탄올 Ethanol(Ethyl Alcohol)	C ₂ H ₅ OH
DME	디메틸에테르 Di Methyl Ether	CH ₃ OCH ₃
DEE	디에틸에테르 Di Ethyl Ether	C ₂ H ₅ OC ₂ H ₅
TEL	사에틸납 Tetra Ethyl Lead	Pb(C ₂ H ₅) ₄
DMP	프탈산디메틸 Di Methyl Phthalate	C ₆ H ₄ (COOCH ₃) ₂
DBP	프탈산디부틸 Di Butyl Phthalate	C ₆ H ₄ (COOC ₄ H ₉) ₂
DOP	프탈산디옥틸 Di Octyl Phthalate	C ₆ H ₄ (COOC ₈ H ₁₇) ₂
DPT	디니트로소 펜타메틸렌 테트라민 Dinitroso Pentamethylene Tetramine	C ₅ H ₁₀ N ₆ O ₂
AOS	Alpha Olefin Sulfonate(α-올레핀술폰산염)	
AS	Alkyl Sulfate(알킬황산 에스테르염)	
ES	Ester Sulfate(알킬옥시에탄올 황산에스테르염)	
LAS	Linear Alkylbenzene Sulfonate(알킬벤젠술폰산염)	
CP	Chemical Pulp(화학펄프)	
CR	Chloroprene Rubber(클로로프렌고무)	
SCP	Single Cell Protein(석유단백)	
SNG	Substitute Natural Gas(대체천연가스)	
LPG	Liquefied Petroleum Gas(액화천연가스)	
TMA	Tri Methyl Aluminium	(CH ₃) ₃ Al
TEA	Tri Ethyl Aluminium	(C ₂ H ₅) ₃ Al
NTPA	Normal-Tri Propyl Aluminium	(C ₃ H ₇) ₃ Al
ITBA	Iso-Tri Butyl Aluminium	(C ₄ H ₉) ₃ Al

EADC	Ethyl Aluminium Di Chloride	$C_2H_5 AlCl_2$
DEAH	Di Ethyl Aluminium Hydride	$(C_2H_5)_2AlH$
DEAC	Di Ethyl Aluminium Mono Chloride	$(C_2H_5)_2AlCl$
MTBE	Methyl tert-Butyl Ether	$CH_3OC(CH_3)_3$
MIBK	Methyl Iso Butyl Ketone	$(CH_3)_2CHCH_2COCH_3$

제3절 화합물 읽기

1. 무기화합물 읽기

가. 2성분 화합물

1) 음성원소를 앞에 쓰고 「화」(-ide)기재 후 양성원소의 이름을 뒤에 쓴다.

단, 음성원소가 소로 끝나면 소를 생략할 수 있으나 수소는 반드시 소를 붙인다.

<예> NaCl	염화나트륨	Sodium Chloride
Mg ₃ N ₂	질화마그네슘	Magnesium Nitride
CaO	산화칼슘	Calcium Oxide
NaH	수소화나트륨	Sodium Hydride

2) 비금속 화합물인 경우 음성이 큰 쪽을 먼저 부른다.

<예> HCl	염화수소	Hydrogen Chloride
NF ₃	플로오르화질소	Nitrogen Fluoride
AsH ₃	수소화비소	Argenic Hydride

3) 2성분 화합물에서 원자수를 구별할 필요가 있을 때, 이, 삼을 붙인다.

<예> CO	일산화탄소	Carbon Monoxide
CO ₂	이산화탄소	Carbon Dioxide
N ₂ O ₃	삼산화이질소	Dinitrogen Trioxide
N ₂ O ₅	오산화이질소	Dinitrogen Pentaoxide
Fe ₃ O ₄	사산화삼철	Tri Iron Tetraoxide



4) 원소의 산화상태를 표시할 때 산화숫자를 표시하여 ()에 넣는다.

<예> FeO	산화철(Ⅱ)	Iron(Ⅱ) Oxide
Fe ₂ O ₃	산화철(Ⅲ)	Iron(Ⅲ) Oxide

5) 수소화합물중 관용명인 경우 그대로 허용한다.

<예> N ₂ H ₄	히드라진	Hydrazine
PH ₃	포스핀	Phosphine
SiH ₄	실란	Silane
H ₂ O	물	Water
NH ₃	암모니아	Ammonia
CH ₄	메탄	Methane

나. 이온 및 라디칼

1) 양이온

<예> H ⁺	수소이온	Hydrogen Ion
Al ³⁺	알루미늄이온	Aluminium Ion
NH ₄ ⁺	암모늄이온	Ammonium Ion

2) 음이온

<예> Cl ⁻	염화이온	Chloride Ion
N ³⁻	질소화이온	Nitrogen Ion
OH ⁻	수산화이온	Hydro Oxide Ion

<예> $\overset{2-}{\underset{2}{\text{O}}}$	과산화이온	Peroxide Ion
--	-------	--------------

3) 라디칼

<예> CO	카르보닐	Carbonyl
ClO ₃	과클로릴	Perchloryl

4) 양, 음라디칼의 화합물은 2성분 화합물에 준하여 읽는다.

<예> H ₂ O ₂	과산화수소	Hydrogen Peroxide
BaO ₂	과산화바륨	Barium Peroxide
CaCl ₂	염화칼슘	Calcium Chloride
HCN	시안화수소	Hydrogen Cyanide

2

다. 산

1) 수소산 : 수소를 포함한 2성분 화합물로서 수용액에서 산으로 작용하는 경우 끝에 「산」을 붙여 읽는다.

<예> HCl	염화수소산	Hydrochloric Acid
H ₂ S	황화수소산	Hydrosulfuric Acid

2) 산소산

<예> H ₂ SO ₄	황산	Sulfuric Acid
HClO ₃	염소산	Chloric Acid
HClO ₄	과염소산	Perchloric Acid
HMnO ₄	과망간산	Permanganic Acid
HNO ₄	과산화질산	Peroxyntiric Acid

라. 염

<예> (NH ₄) ₂ SO ₄	황산암모늄	Ammonium Sulfate
KNO ₃	질산칼륨	Potassium Nitrate
Fe(NO ₃) ₂	질산철(Ⅱ)	Ferrous Nitrate
NaHCO ₃	탄산수소나트륨	Sodium Hydrogen Carbonate
KH ₂ PO ₄	인산이수소칼륨	Potassium Dihydrogen Phosphate
Mg(OH)Cl	염화수산화마그네슘	Magnesium Hydroxide Chloride
LiAlH ₄	수소화알루미늄리튬	Lithium Aluminium Hydride

마. 착화합물

<예> K ₂ PtCl ₆	육염화백금산칼륨	Potassium Hexa Chloro Platinate
Na ₂ SiF ₆	육플루오르규산나트륨	Sodium Hexa Fluoro Silicate

바. 부가화합물

<예> CaCl ₂ ·6H ₂ O	염화칼슘-6수화물	Calcium Chloride-6-water
	염화칼슘-수화물	" " Hexahydrate
AlCl ₃ ·4C ₂ H ₅ OH	염화알루미늄-4에탄올	Aluminiumchloride-4-Ethanol

화학 용어 정리

2

화학
용어
정리

chapter 2 핵심요약

- 약어를 표현할 때는 대문자로 표현하여야 한다.
- 무기화합물의 명명법과 유기화합물의 명명법은 다르며 때에 따라 관용명을 사용한다.

Chapter 2 학습가이드

- 01 각각의 용어별로 어떠한 의미인지 학습하고 숙지한다.
- 02 화학식 약호에 다뤄진 화합물에 대한 구조와 성질에 대해 학습한다.
- 03 관용명과 IUPAC명 모두 숙지하는 것이 바람직하다.



화재조사실무 I



제2편 기초전기

제1장 전기의 이해

제2장 전기의 사용 및 안전

1

전기의 이해

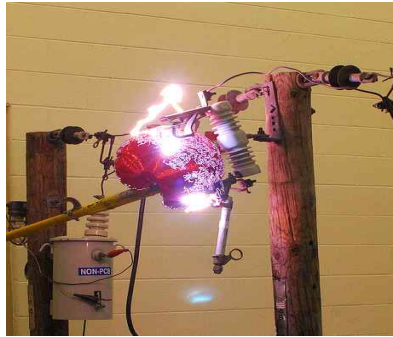
전기의
이해

제1절 전기 에너지

주유소 정전기 화재



7500V & 알루미늄 풍선



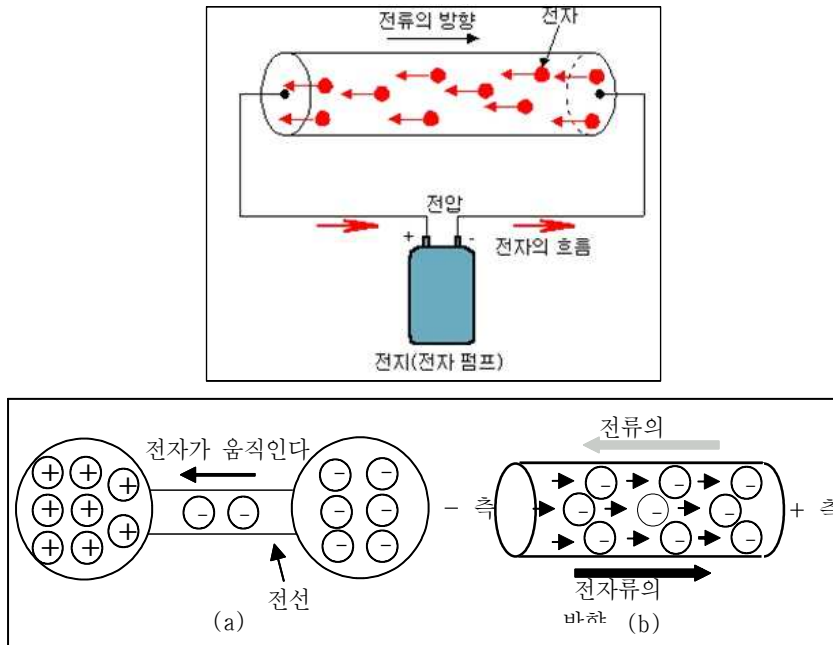
콘센트에서의 트래킹 화재



※ 전기는 작은 입자가 흘러가면서 발생시키는 에너지로서 화재를 일으킨다.

1. 전기는 무엇인가?

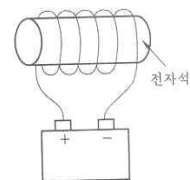
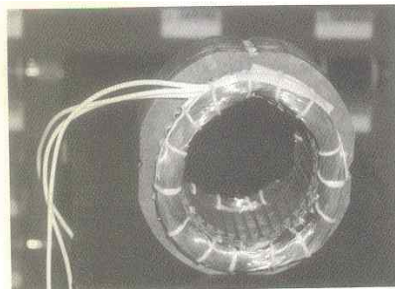
전기는 물체, 자기작용, 압력 등 외부로부터 받아 생성되는 에너지로서 플러스(+)와 마이너스(-)입자(전기)가 있는데 이 작은 입자가 빛과 열, 힘을 발생시킨다.



2. 전기의 3가지 성질

가. 발열작용 : 금속에는 전류의 흐름을 억제하는 전기저항이 있고 이 저항에 전류가 흐르면 열이 발생하게 된다. 열이 발생하는 부분의 온도를 높게 하면 빛이 발생하게 되는데 이를 이용한 기기가 전등, 다리미, 전기히터 등이 있다.

나. 자기작용 : 도선을 감아서 만든 코일에 전류를 흘리면 그 속에 자계가 발생하고 자계 속에서 도선에 전류를 흘리면 도선은 힘을 받아 일을 하게 된다. 즉, 전기 에너지를 기계에너지로 바꾸고 기계에너지를 전기에너지로 바꾸는 작용을 한다.



다. 화학작용 : 묽은 황산용액에 전류를 흐르게 하여 일어나는 화학작용을 이용하여 전기 에너지를 화학에너지로 변환하여 저장할 수 있다.

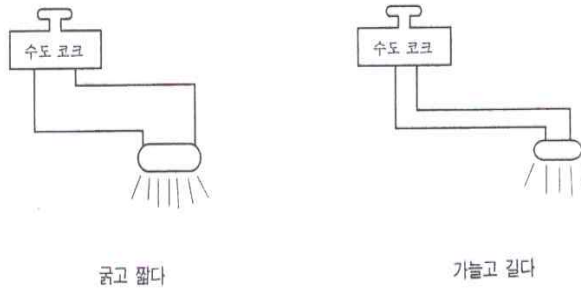
전기의
이해

3. 전기의 기본 개념

가. 저항

저항이란 전류의 흐름을 방해하는 요소로써 송배전선이나 옥내배선에 사용된 전선의 저항은 전기에너지를 열에너지로 변환되어 손실된다. 그 때문에 되도록 저항치가 적은 전선을 써야 효율적이다. 그러나 한편으로는 전기가 통과하는 길에 저항이 없어서는 안 되는 경우도 있다.

전열기의 니크롬선이나 백열전구의 필라멘트가 그 좋은 예로서, 말하자면 전선의 저항은 전류가 흐르는 통로의 역할을 하기도 한다.



전기저항은 옴의 법칙에 따라 전류를 제한하거나 전압을 내리기도 한다. 또한 중요한 성질로서 전기 에너지를 열에너지로 바꾸기도 하는데 이때 열(주울)을 발생시킨다. 전열기나 다리미와 히터가 설치되어 있는 전기기기는 모두 저항에 의한 주울 열을 이용한 것이다. 주울 열에 의하여 발열체의 온도가 높아질수록, 파장이 짧은 것이 많이 나오게 된다. 따라서 적외선램프는 필라멘트의 온도를 낮게 억제해서 파장이 긴 빛인 적외선을 많이 나오도록 고안한 전구이다.

여기서 도체의 전기저항의 성질에 대해서 설명하고자 한다. 같은 재료의 도체에서도 길이와 단면적이 저항에 관계됨은 쉽게 알 수 있다.

일반적으로 도선의 전기저항은 도선의 길이에 비례하고 단면적에 반비례한다. 도선의 길이를 $L(m)$, 단면적을 $A[m^2]$ 라고 하면 저항 R 은 다음과 같이 설명할 수 있다.



$$R = \rho \frac{\ell}{A} [\Omega]$$

이때 비례상수 ρ 를 저항률이라고 하는데, 물질에 따라 정해지는 상수로 그 단위는 옴(기호는 $\Omega \cdot m$)으로 나타낸다.

- 저항과 비저항(resistivity)

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad L: \text{길이}, A: \text{단면적}$$

그런데 도체의 저항은 온도에 따라 또한 변한다. 금속의 저항은 온도가 올라가면 커진다. 그것은 금속원자의 열진동이 심해져서 자유전자의 운동을 방해하기 때문이다.

온도가 1도 상승하는 데 따른 저항의 증가비율을 저항의 온도계수라고 한다.

또 탄소, 반도체, 전해질, 방전관 등은 온도가 상승하면, 반대로 저항이 감소한다. 이것을 부정저항이라고 한다.

나. 저항의 접속법

실제로 전기회로는 2개 이상의 저항을 접속하여 구성하는 경우가 많다. 저항의 접속 방법에는 기본적으로 직렬접속, 병렬접속, 직·병렬접속이 있다.

1) 직렬접속

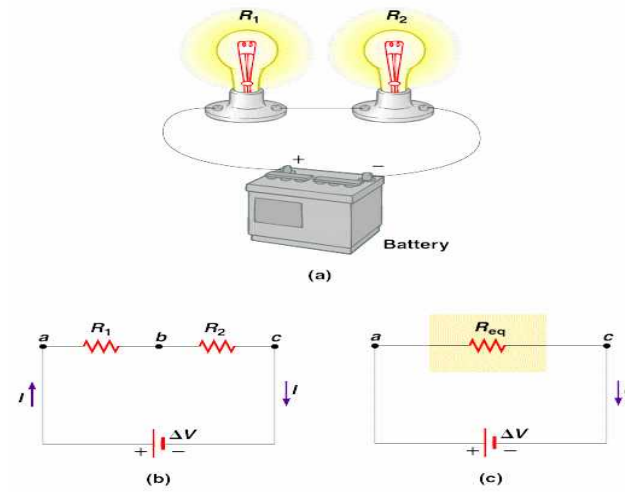
저항의 직렬접속에서는 전체 저항값이 직렬 접속된 저항들의 합이 되므로 전체 저항은 각 저항값의 합이 된다. 이 전체저항을 이 직렬접속의 합성저항 또는 등가저항이라 부른다.

직렬접속의 각 저항 $R_1[\Omega]$, $R_2[\Omega]$, $R_3[\Omega]$ 의 합성저항 $R[\Omega]$ 은 다음과 같이 된다.

$$R = R_1 + R_2 + R_3 [\Omega]$$

1

전기의
이해

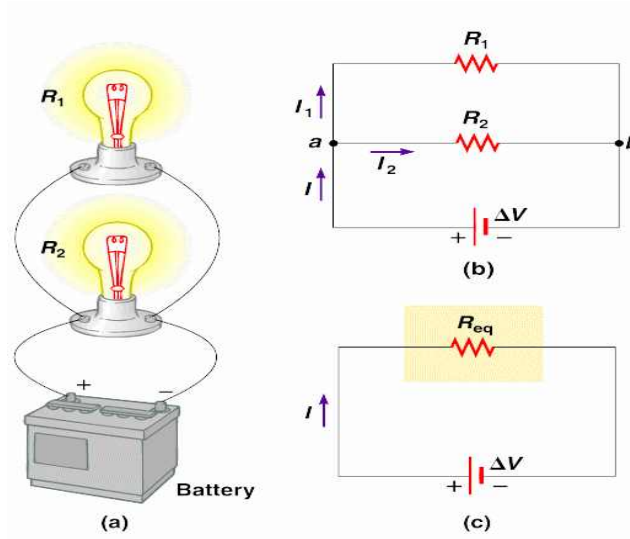


2) 병렬접속

저항의 병렬접속에서는 전체 저항값이 직렬 접속된 상태와는 달리 다소 복잡하게 계산된다. 병렬접속은 전체 저항값이 작아진다.

병렬접속의 각 저항 $R_1[\Omega]$, $R_2[\Omega]$, $R_3[\Omega]$ 의 합성저항 $R[\Omega]$ 은 다음과 같이 된다.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} [\Omega] = \frac{A}{B} \quad \therefore R = \frac{B}{A}$$





3) 직·병렬접속

직·병렬 접속은 직렬접속과 병렬접속을 조합한 것이다.

$R_1[\Omega]$, $R_2[\Omega]$ 를 병렬로 접속하고 여기에 $R_3[\Omega]$ 을 직렬로 접속하면 저항 $R_1[\Omega]$, $R_2[\Omega]$, $R_3[\Omega]$ 의 합성저항 $R[\Omega]$ 은 다음과 같이 된다.

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3[\Omega]$$

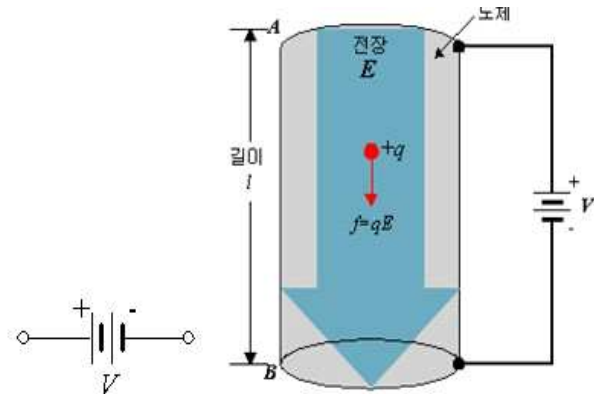
다. 임피던스

교류회로에서 R,L,C가 갖는 합성저항값 단위를 임피던스라 하고 단위는 ohm(옴)을 사용한다. 교류회로에 있어서 임피던스는 저항값과 마찬가지로 전류가 흐르기 방해하는 값이다. 단위는 Ω 기호는 Z 를 사용하며 전압과 전류의 실효값을 사용하고 임피던스 량을 표현하기 위해 벡터량으로 표현한다. 벡터량을 복소수로 표기할 때 실수부분은 저항값이고, 허수부분은 리액턴스 값이다.

라. 전압

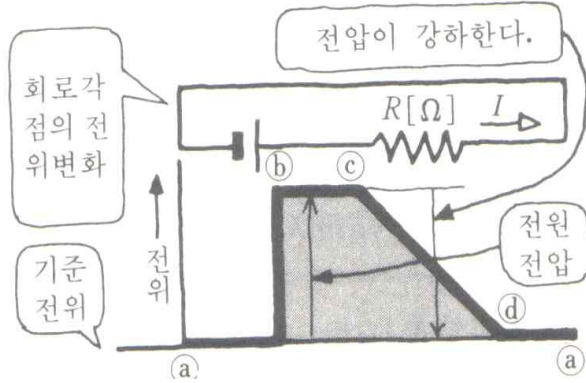
전압이란 도체 내에 있는 두 점 사이의 전기적인 위치에너지의 차이로(전위차) 물이 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐르는 것처럼 전하의 흐름 즉 전류는 전위가 높은 곳에서 낮은 곳으로 이동시킬 수 있는 물리적인 에너지 값이다.

낮은 곳보다 높은 곳에서 떨어지는 물이 더 많은 에너지를 갖고 있듯이, 전압이 클수록(전위차가 클수록) 더 많은 전기에너지를 갖고 있다. 그리고 높이 차이가 없으면 물이 흐르지 않듯이 전압이 0이라면 전류가 흐르지 않는다.



1

전기의 이해



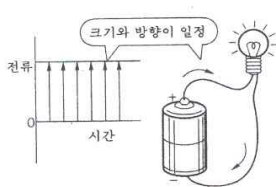
1) 전압의 단위

전압의 크기를 나타내는 단위는 V(볼트)다. 1V는 1C(쿨롱)의 전하가 두 점 사이에서 이동하였을 때에 하는 일이 1J(줄)일 때의 전위차이다.

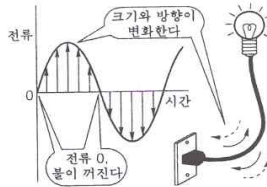
마. 교류

전류가 흐르는 방향이 시간에 따라 주기적으로 변하는 전류 또는 전압을 말한다. 교류는 교번전류 또는 교번전압이라고도 하며 전류 흐름의 방향이 일정한 직류와 다르게 시간에 따라 크기와 방향이 변화하는 성질을 갖고 있다.

대표적인 교류는 사인파의 파형을 가지는 전류 및 전압이다. 1개의 파형이 끝나는 시간을 주기라 하고, 주기의 역수, 즉 1초 동안의 파형의 수를 주파수[Hz]라 하며 파형이 최대가 되는 값을 최대값 또는 진폭이라 한다.



직류(건전지 전원)



교류(콘센트 전원)



바. 교류전력

교류전류가 단위 시간동안 한 일의 양을 가리킨다. 일률의 단위인 W를 사용하고 순간전력을 이용하여 평균전력을 구할 수 있다. 단위는 W이다. 어느 순간의 전압과 전류의 곱을 순간전력, 그것을 주기적으로 평균한 것을 평균전력이라고 한다.

전압·전류의 실효값을 각각 V , I , 그 사이의 위상차를 ϕ 라고 하면 평균전력은 $VI \cos \phi$ 로 주어지며, VI 를 피상전력, $\cos \phi$ 를 역률(力率)이라고 한다. 따라서 피상전력 중 $\cos \phi$ 만큼 일을 하고 나머지는 일을 하지 않는 무효전력이 된다. $VI \sin \phi$ 를 무효전력이라 한다.

사. 교류의 장점과 이용

교류를 직류와 비교하면, 변압기를 사용해서 효율적으로(대형의 것은 99%) 자유롭게 전압을 바꿀 수 있다는 점이 최대의 장점이다. 또 교류용의 전동기·발전기에는 정류(整流)가 필요하지 않고, 전기화학작용이 적으며, 도선(導線)의 부식 등이 잘 일어나지 않는 등의 이점이 있다.

대체로 사용되는 전기에너지의 대부분은 50Hz 또는 60Hz의 사인파인 3상 교류로 발전되고, 송·배전 선로를 통하여 전송된다. 이용하는 말단에서는 3상 교류를 그대로 사용하는 경우도 있고, 일반 가정에서는 대부분 단상으로 사용한다. 또 전기철도의 대부분이나 전기화학공업에서는 직류로 바꾸어서 사용하기도 한다. 통신 분야에서는 10~109Hz의 광범한 주파수로 변환되어 각종 시설에 이용된다.

아. 부하

부하란 전기적 에너지를 소비하는 기기이다.

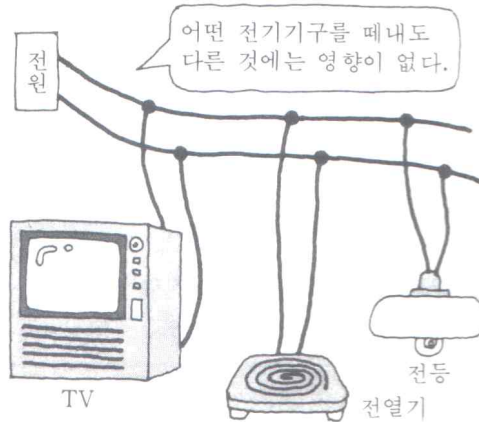
아래 그림에서 TV, 전열기, 전등과 같은 부하기기는 전원과 병렬로 연결되어 있다.

대부분 부하는 전원과 병렬로 연결되어 전원으로부터 각각의 부하를 떼어내도 다른 것에는 영향이 없다. 그러므로 우리가 사용하는 전열기·전등·전동기 등은 전원에서 본 부하이므로, 또 전동기와 같은 동력원으로부터 동력을 받은 발전기·펌프·팬 등은 동력원에서 본 부하이다.

넓은 뜻으로는 자동차·선박·철도 등에서 적재화물이나 인원 및 자동차나 선체 자신은 원동력원에서 보면 부하라고 할 수 있다.

또 많은 발전소의 발전기가 병렬로 연결되어 구성되어 있는 전력계통에서는 그 계통으로부터 전력을 끌어들이는 모든 전기설비, 더욱이 이들에 전력을 공급하기 위한 배전

선로 그 자체도 포함하여 전력계통에서 본 부하라고 할 수 있다.



4. 옴의 법칙 [Ohm's Law]

※ 전류의 흐름은 배관 내에 흐르는 물의 흐름과 같습니다.

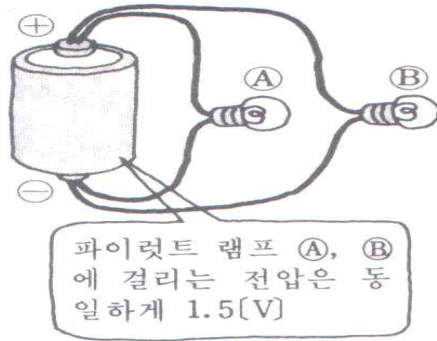
옴의 법칙은 전기회로 내의 전류, 전압, 저항 사이의 관계를 나타내는 매우 중요한 법칙으로 1826년 독일의 물리학자 G. S. Ohm(옴)이 발견했다. 전압의 크기를 V , 전류의 세기를 I , 전기저항을 R 라 할 때, 다음의 관계가 성립한다.

$$V = I \times R$$

또한 부하에 전압이 인가되었을 때 흐르는 전류의 크기는 전압의 크기에 비례하고 저항의 크기에 반비례한다.

$$I = \frac{V}{R}, \quad R = \frac{V}{I}$$

여러 개의 부하가 직렬로 연결된 직렬회로에서 저항을 통과하는 전류가 같다. 그러므로 각각의 부하에 걸리는 전압이 전기저항에 비례한다. 병렬회로에서는 부하에 걸리는 전압이 같으므로, 각각의 부하에 흐르는 전류가 전기저항에 반비례한다.



예를 들어, 직렬회로에 흐르는 전류가 10A라면 5Ω의 저항의 양 끝에 걸린 전압은 50V다. 10Ω의 저항에는 100V의 전압이 걸린다.

병렬회로에서 전압이 100V라면, 10Ω의 저항에 흐르는 전류는 10A고, 20Ω의 저항에는 5A의 전류가 통과한다.

<전기장치 기호>

기 호	호 칭
	저항
	직류전원(전지)
	교류전원(콘센트)
	콘덴서
	코일(인덕터)
	가변저항
	스위치
	접지(어스)
	전선(도선)
	단자

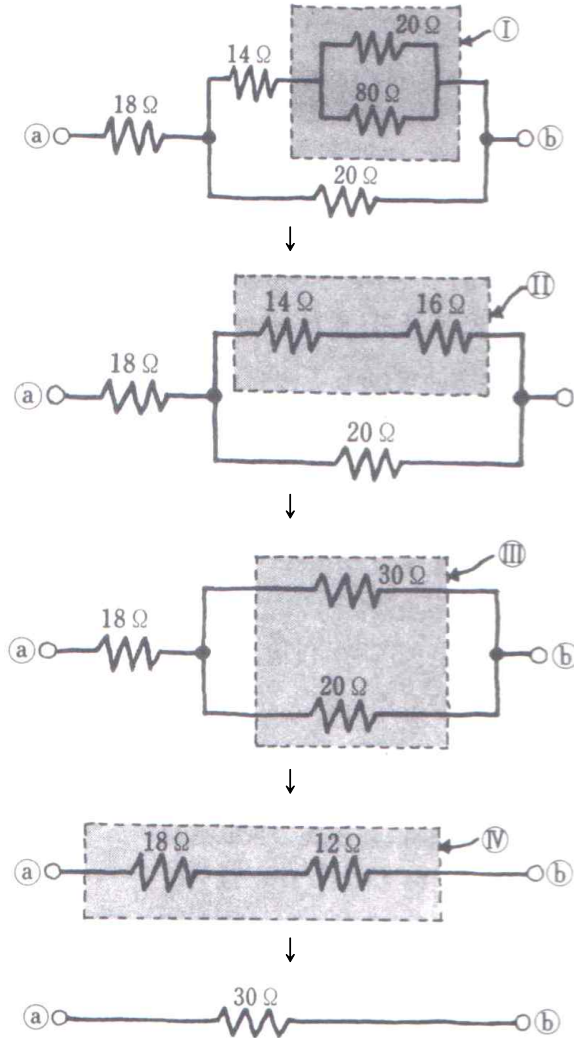
기 호	호 칭
	전선의 교차
	전선의 접속
	전구
	변압기
	퓨즈
	발전기
	전동기(모터)
	전류계
	전압계
	다이오드

<합성 저항 예>

※ 아무리 복잡한 회로도 합성저항(등가회로)를 통하여 간략화 할 수 있다.

1

전기의
이해





5. 전력

전력은 단위 시간 동안의 전기 에너지를 나타내는 의미로 1[sec] 동안에 1[J]의 일을 할 때 1[W]의 전력이 된다. 따라서 전력이 크다는 것은 단위시간에 소비하는 전기 에너지가 큰 것을 뜻한다. 그러므로 1[W]는 1[J/sec]와 같은 단위이다.

V[V]의 전압을 가하여 I[A]의 전류가 t[sec]동안 흘러서 Q[C]의 전하가 이동되었을 때의 전력 P는 다음과 같다.

$$P = \frac{VQ}{t} = VI, \quad V = RI, \quad I = \frac{V}{R} \quad \therefore P = VI = I^2R = \frac{V^2}{R} [W]$$

이와 같이 단위시간의 전기에너지를 전력이라 하고 단위시간의 기계에너지는 동력 또는 공률이라 한다. 전동기와 같은 기계동력의 단위로 사용되는 마력[HP]과 [W]사이에는 1[HP]=746[W]의 관계가 있다.



한일전기 EHV-1100

최저가 | 44,150원 이 가격 상품보기

· 상품평 : 179개 (4.9) ★★★★★

제조사 : 한일전기
등록일 : 2007년 10월

리모컨 : 미지원
발열량 : 860kcal/h
안전장치 : 전도안전장치
화력맞은도조절 : 2단온도조절
크기 : 320 x 120 x 750mm
무게 : 3kg
소비전력 : 1000W



※ 화재의 발열량도 전기기기와 같이 전기 에너지로 표현됨



가연물	크 기(mm)	열방출율(kW)
책상	150×50×80	1200
책꽂이	60×30×120	500
의자	40×40×85	200
소파	80×70×90	300
탁자	90×60×40	300
TV	40×40×40	300
냉장고	60×50×70	200
총열방출율		3MW

1

6. 전력량

전력량은 전기에너지(일)를 나타내는 말이다. 즉, $V[V]$ 의 전압에서 $I[A]$ 의 전류를 $t[\text{sec}]$ 동안 흘릴 때의 전력량은 다음과 같다.

$$W = VI \times t = P \times t [J]$$

따라서 전력량은 전력에 시간을 곱한 것이라고 할 수 있으며, 단위로는 보통 $[J]$ 보다 $[W \cdot \text{sec}]$ 를 사용하고 있다. 그러나 실용적으로는 이보다 큰 단위인 $[kWh]$ 의 단위가 주로 사용되고 있다.

7. 줄의 법칙

저항 $R[\Omega]$ 에 전류 $I[A]$ 가 $t[\text{sec}]$ 동안 흘렀다면 이 저항에서 소비되는 에너지는 전부 열 에너지로 바뀐다는 것이 줄(Joule J.P.)에 의하여 실험적으로 확인되었다. 이것을 줄의 법칙이라 하고 이 때 발생하는 열을 줄열 또는 저항열이라 한다. 열량은 칼로리(cal)라는 단위를 사용하므로 전기에너지에 의한 발생 열량 H 는 다음과 같다.

$$H = I^2 R t [J], \quad H = 0.24 I^2 R t [cal]$$

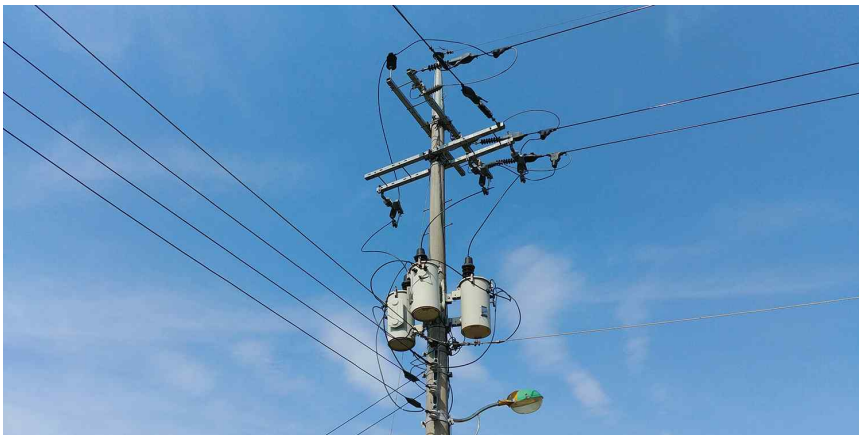
전기의
이해



제1절 전기 사용

1. 전기 사용 개념

우리가 사용하고 있는 전기는 직류(DC:Direct Current)와 교류(AC:Alternating Current)로 구분되며 우리는 상용전원으로 교류를 사용하고 있다. 수력, 화력, 원자력 발전소에서 발생된 전기는 교류전력으로 송전선, 변전소, 배전선 등의 수송설비를 통하여 가정, 공장 등에 전력을 공급하고 있다. 발전소에서 수송가까지 공급하는 전체 전력설비를 전력계통이라 하며 이중 발전소에서 수송가까지 수송을 담당하는 설비를 송배전설비라 한다. 발전소에서 발생된 전기는 6.6~24[kV]로 전력을 수송하기에는 낮은 전압이므로 발전단에 승압변압기를 설치하여 154~765[kV]로 송전단 전압을 승압하여 송전선로(철탑)를 통해 수송가 부근의 변전소(1차 변전소)까지 송전하게 된다. 부하조건에 따라 1차변전소에서 154~345[kV] 정도의 전압으로 강압하여 2차 송전선로를 통해 수송지 근처의 2차 변전소 또는 3차 변전소로 보내진다. 최종적으로는 22,900[V]로 낮추어 배전선로 또는 배전용 변압기를 통하여 수송가에 전력을 공급하게 된다.



공급전력은 전압의 제곱에 비례하여 전력을 전송할 수 있으며 전압은 저압, 고압, 특별고압으로 분류하며 특히 특별고압은 다시 초고압, 초초고압으로 분류할 수 있다.

구분	전압[V]
저압	직류750V이하, 교류600V이하
고압	직류750V초과 7000V이하 교류600V초과 7000V이하
특별고압	7000V초과
초고압	200kV초과
초초고압	500kV초과

2. 전기재해

전기재해는 인체에 전류가 흘러 발생하는 감전재해와 전기가 점화원으로 작용하여 발생하는 화재, 폭발 등이 있다. 특히 전기는 눈에 보이지 않으며 냄새도 맡을 수 없고 신체적 접촉에 의한 확인도 어렵기 때문에 인간의 감각기관으로 전기의 위험성 감지가 불가능하다. 그러나 전기는 우리 일상생활 및 산업현장에서 각종 기계기구 의 동력원이나 열에너지로 사용하기 때문에 취급상의 부주의로 인해 전기재해를 일으킬 위험이 매우 높다. 일반적으로 나타나는 전기재해는 감전, 화재, 폭발, 설비파괴, 기기오동작 등이 있다.

전기재해는 다른 사고에 비하여 일단 사고가 발생하면 사망할 위험이 높으며 생명을 건졌다 하더라도 불구가 될 가능성이 매우 높다. 감전이란 대지와 접지상태인 작업자가 충전부와 접촉하는 경우 전류가 작업자의 인체를 통하여 대지로 흐르는 경우 발생한다. 감전사의 직접원인은 심실세동이나 질식, 화상 등을 들 수 있으며 간접원인은 고소작업 시 쇼크로 인한 추락사, 감전 시 불안전 행동으로 인한 2차 재해로 사망하는 경우가 있다. 감전사고 형태는 다음과 같다.

- 전선로에 인체가 접촉되면 인체에 전류가 통과하면서 지락전류가 흐른다.
- 통전기에 인체가 접촉하여 지락전류가 흐른다.
- 인체가 두 선로에 접촉하여 인체를 통하여 전류가 흐른다.
- 고전압 선로에 근접한 경우 공기절연 파괴현상으로 아크로 인해 화상을 입는다.
- 초고압선로에 근접하여 정전유도작용에 의해 대전된 전하가 접지된 금속체를 통하여 통전 시 감전될 수 있다.



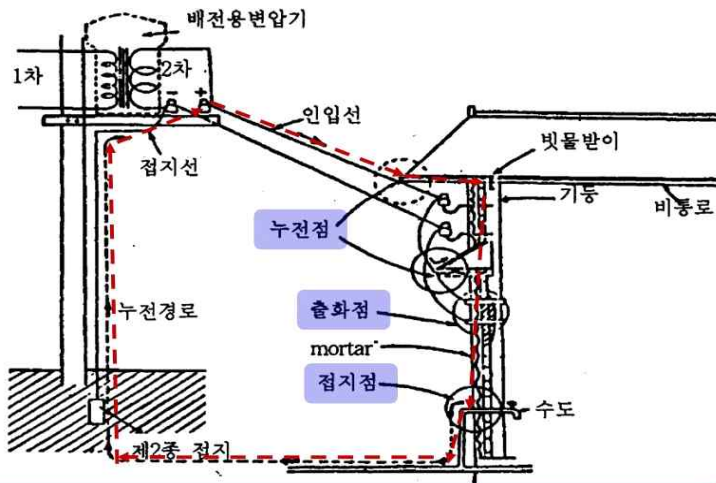
제2절 전기 사고 및 대책

1. 전기사고의 원인과 대책

가. 누전

누전이란 옥내배선이나 전기기계 기구의 전선피복이 손상되어 건물의 철근이나 전기기계 기구 외함 등의 금속부분을 통해 전기가 흐르는 현상이다.

- 1) 누전의 피해 : 전선의 손상 부위와 금속체의 접촉부분에 신체의 일부가 닿으면 감전사고를 일으킨다. 아울러 전선과 접촉된 금속체 부위에 열이 발생하여 인화물질에 발화되어 화재가 발생하기도 한다.
- 2) 누전의 예방대책 : 220V 전압 공급지역에서는 누전차단기를 반드시 설치하여야 하며, 110V지역에서도 누전차단기를 설치하면 안전하게 사용할 수 있다.



나. 합선

전선이 남아 (+)선과 (-)선이 맞닿은 상태로, 이때 아크와 동시에 고열이 발생하는 경우를 말한다.

- 1) 합선의 피해 : 전기의 양극과 음극으로 된 두전선이 합선되면서 발생하는 고열과 아크로 인해 주위의 인화물질에 착화되어 화재가 발생하게 된다.
- 2) 합선의 예방대책 : 용량이 큰 전기기계기구를 동시에 여러 개 사용하지 말아야 하며, 특히 노후배선에서 선이 벗겨져 합선되는 경우가 많으므로 전기설비 관리에 유의해야

하고 과전류 발생 시 전기를 차단하는 정격용량의 퓨즈 또는 차단기를 사용해야 합니다.

◆ 용량초과로 인한 피해 : 옥내배선이나 배선기구의 용량을 무시한 채 문어발배선 등으로 많은 전기기구를 사용하게 되면 과전류로 인해 전선피복이 녹아 두 전선이 맞붙어 아크와 함께 고열을 발생시켜 화재를 일으키게 됩니다.

예방대책 : 열을 발생하는 전기기구는 반드시 한 콘센트에 한 개의 기구를 사용해야 하며 전선은 규격전선을 사용해야 합니다. 특히 비닐전선은 용량 초과 사용 시 위험이 크므로 반드시 규격전선을 사용합시다.

2. 허용전류

허용전류란 전선의 단면적에 대응하여 안전하게 흘릴 수 있는 전류용량의 한도를 의미하며 이 한도 이내의 전류를 안전전류라고 한다. 전선에 전류를 흐르게 하면 전기저항 때문에 발열해서 전선재료가 약화되거나 전선의 피복 재료가 변질되어 절연 성능이 열화할 우려가 있으므로, 그 전선에 따른 안전전류를 지켜야 한다.

그러나 단면적이 같다고 할지라도 나선이나 피복선이나에 따라 허용전류가 달라진다. 예컨대 단면적이 2mm²인 절연구리선에서는 허용전류가 27 A이지만, 경질 비닐파이프에 수용하였을 때는 27 A의 60 % 정도 밖에 흘릴 수가 없다. 따라서, 옥내배선은 전기설비에 따라 아래와 같이 부하설비에 충분한 굵기 이상의 전선을 사용해야 한다.

가. 단선일 경우(IV 전선 경우)

전선의 굵기	허용전류	MCCB 차단기	사용전압	사용가능 전력[kW]	
				단상	3상
1.6mm	19A	15A	110V	2.09	
			220V	4.18	7.24
			380V		12.50
2.0mm	24A	20A	110V	2.64	
			220V	5.28	9.15
			380V		15.80
2.6mm	34A	30A	110V	3.63	
			220V	7.26	12.57
			380V		22.38
3.2mm	43A	30A	110V	4.73	
			220V	9.46	16.38
			380V		28.30



나. 연선일 경우 (CV 전선 경우)

전선의 굵기	허용전류	MCCB 차단기	사용전압	사용가능 전력[kW]	
				단상	3상
8mm ²	54A	50A	220V	11.88	20.58
			380V		35.54
14mm ²	76A	75A	220V	16.72	28.96
			380V		50.02
22mm ²	100A	100A	220V	22.00	38.11
			380V		65.82
38mm ²	140A	125A	220V	30.80	53.34
			380V		92.15
60mm ²	190A	150A	220V	41.80	72.40
			380V		125.10

3. 접지공사

전기회로의 한 끝에 구리판이나 금속관을 접속하여 땅에 묻는 것을 접지(earth)라고 한다. 전기기기의 외함 등을 접지하면 절연이 나빠져서 전류가 누설되더라도 감전사고의 위험성이 적어진다. 접지에 사용되는 구리판이나 금속관을 접지전극이라 하고 접지전극과 대지 사이에 저항을 접지저항이라 한다. 전기기기를 사용할 때에는 위험방지를 목적으로 접지공사를 하도록 법령으로 정해져 있다.

- 1) 400[V] 미만의 저압용 ----- 제 3종 접지공사
- 2) 400[V] 이상의 저압용 ----- 특별 제 3종 접지공사
- 3) 고압용 또는 특별 고압용 ----- 제 1종 접지공사
- 4) 습기가 많은 장소에 동판(300×300×0.7[mm] 이상)이나 동봉(지름 8[mm], 길이 90 [cm] 이상)을 깊이 매설하여야 한다.

2

<접지공사의 종류>

접지종별	접지저항값	접지선의 굵기
제1종 접지공사	10[Ω] 이하	2.6[mm] 이상
제2종 접지공사	150/1선지락전류 (2초 이내 자동차단장치가 있는 경우 300)	고압→저압 2.6[mm] 이상 특고압→저압 4.0[mm] 이상
제3종 접지공사	100[Ω] 이하	1.6[mm] 이상
특별 제3종 접지공사	10[Ω] 이하	1.6[mm] 이상

전기의
사용 및
안전

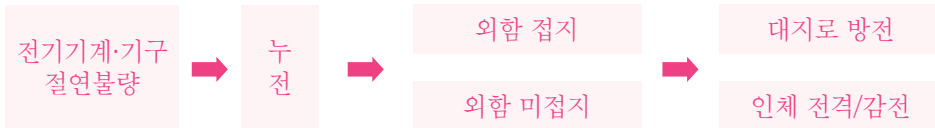
4. 절연저항

절연물은 절연저항이 큰 값을 가지는 부도체로써 전류를 흘리지 않는 것이지만, 매우 적기는 하나 절연물의 표면 또는 내부를 통하여 전류가 흐를 때가 있는데 이와 같은 전류를 누설전류(leakage current)라 하고 절연저항 단위는 [MΩ]단위로 표시한다. 또 절연물에 가하는 전압이 높을수록 절연 저항은 적게 된다.

5. 전기 기계, 기구의 안전

가. 접지의 필요성

접지는 전기기계·기구 절연불량 등으로 누전 발생 시 인체로 흐르는 전류를 경감시켜 감전재해를 예방하는 역할을 한다. 또한, 누전이라 하는 것은 전선의 절연이 파괴된 부분이 빗물받이 등에 접촉하여 전류가 흐르는 경우로서 감전이나 화재의 원인이 된다.



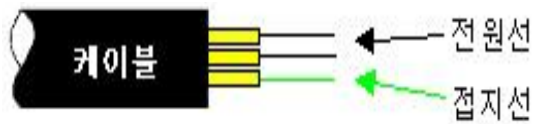


나. 접지의 요령

꽃음접속기(플러그, 콘센트)는 반드시 접지극(단자)이 부착된 것을 사용하여야 한다.



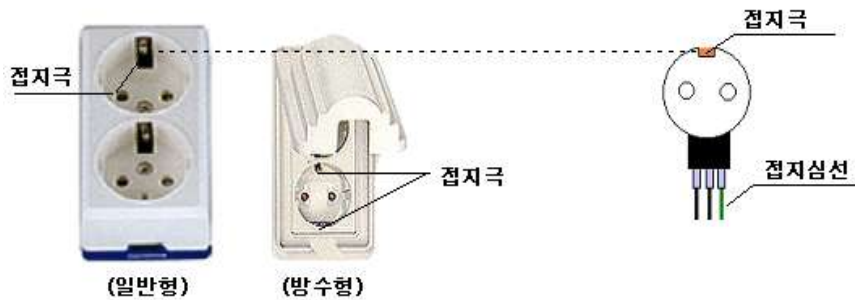
전선은 반드시 접지선이 포함된 것을 사용해야 한다.



- 단상 : 3가닥 (전원2, 접지1)

- 삼상 : 4가닥 (전원3, 접지1)

※ 1가닥(선)은 접지용이므로 접지극(단자)에 접속

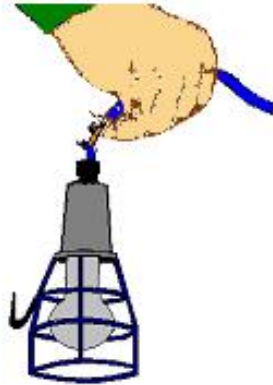


□ 접지대상 전기 기계·기구 및 확인사항

▣ 전기기계·기구 외함접지 확인

- 접지선이 외함이나 터미널에 견고하게 고정 되어 있는지 확인
- 접지극이 있는 플러그와 콘센트 사용

- 접지선이 접지극과 대지(땅속)에 잘 연결되어 있는지 확인
- 전선 피복손상으로 충전부 노출 여부 확인
- 노출된 충전부는 방호망이나 절연덮개 설치 또는 폐쇄형 외함구조 사용
- 충전상태의 전선로, 배전반 또는 제어반 접근금지



■ 충전부 격리조치

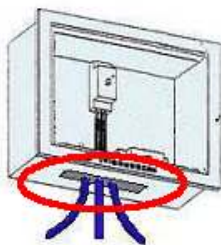
- 외함에 접지선 연결여부
- ※ 이중절연기구는 접지 생략가능
- 인입전선의 피복손상 여부
- 정기적인 절연저항 측정·확인
- 접지극이 있는 콘센트의 사용 여부
- 케이블 피복 손상여부
- 케이블 릴 드럼에 접지선 연결 여부
- 접지 전용 버스바 또는 단자, 콘센트 접지극 및 외함의 접지 여부
- 접지극(봉)과 버스바 연결상태
- ※ ①번 분전반 접지는 필요시 추가
- 접지 저항치의 적합성
- 접지전용 버스바 설치 및 접지선 접속 여부
- ※ 접지는 전기기계·기구에서 접지봉까지 전기적으로 연결되어야 함



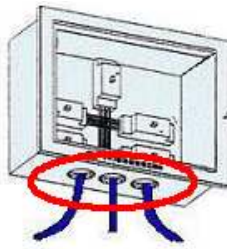
- 접지극(봉)과 버스바 연결 상태
- 접지 저항치의 적합성
- 코드의 접지선 유무

<케이블 인입요령>

- 제어반, 분전반 외함의 바닥면 또는 측면으로 인입한다.
- 케이블 인입 시에는 케이블 그랜드를 사용한다.
 - ※ 강관, 가요전선관 인입 시에는 허브 사용
- 사용하지 않는 천공된 빈 구멍은 반드시 플러그로 밀봉한다.
 - ※ 금속분진, 먼지, 이물의 퇴적으로 절연열화에 의한 고장, 오동작, 또는 화재·폭발의 원인이 됨



케이블 그랜드
미사용



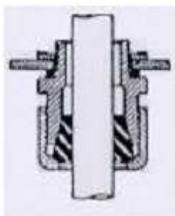
케이블 그랜드
사용



케이블 그랜드

○ 금구류 선택

1. 케이블 인입시

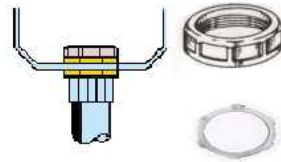


[케이블 그랜드]



[플러그]

2. 전선관 인입시



[내부아암처리용]

□ 충전부의 방호



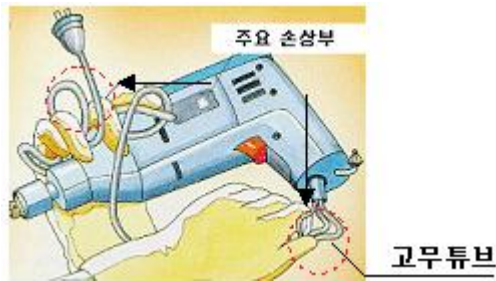
버스바 절연처리
코팅/열수축튜브
충전부 보호판
(아크릴판/금속제보호판)

<전동공구 감전예방>

□ 위험요인

- 전선 접속부 절연불량 또는 심선 노출
- 인입선 절연피복손상 및 꽂음접속기 절연파괴
- 전동공구 본체 또는 케이블 릴 누전으로 인한 감전

□ 감전방지 대책



- 전원 접속은 접지극이 포함된 3극의 꽂음접속기(콘센트, 플러그) 사용
- ※ 옥외는 반드시 방수형 사용



- 인입선 절연손상방지를 위한 고무튜브 사용



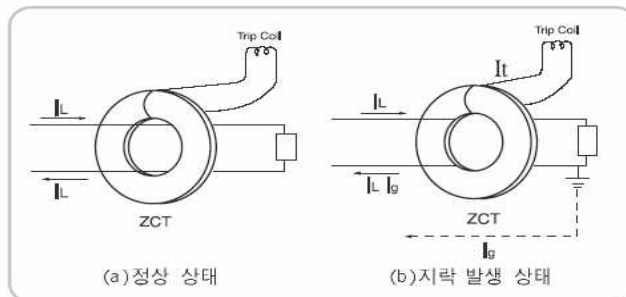
누전 차단기

- 사용 전 절연피복상태 확인 및 절연저항 측정
- 이중 절연구조의 전동공구 사용(명판의 · 표시확인)
- 누전차단기에서 전원 인출
- 땀으로 젖은 손 또는 면장갑 착용 상태로 작업금지
- 올바른 전선접속 방법에 의한 전선접속

누전검출 원리 (누전차단기에만 적용)

누전차단기는 부하단의 누전에 의하여 지락전류가 발생할 때, 이를 검출 하여 회로를 차단하는 방식의 전류동작형 누전차단기이며 검출기구로 영상 변류기(ZCT)를 사용하고 있습니다. 그림(a)와 같이 회로가 정상 상태에서는 영상변류기(ZCT)를 통과하는 부하전류(I_L)가 평형을 이루게 되어 ZCT 2차측에 출력이 나타나지 않게 됩니다.

그림(b)와 같이 지락이 발생한 상태에서는 지락전류(I_g)가 흐르게 되어 ZCT를 통과하는 부하전류(I_L)는 불평형 상태로 되고 이로 인하여 ZCT 2차측에 유도전류(I_t)가 나타나게 되어 Trip Coil을 여자 시켜 회로를 차단합니다.

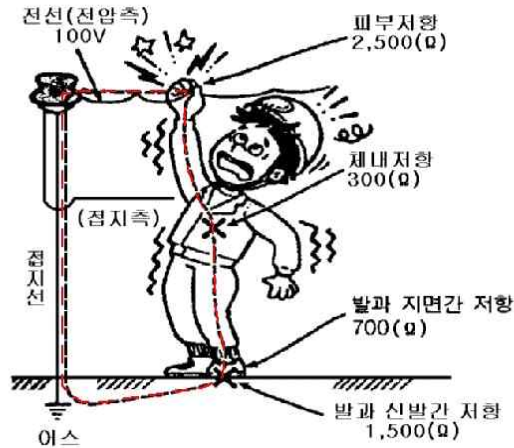


6. 전기기기의 시설 및 안전한 사용법

- 가. 전기기기는 공업표준규격 표시품, 형식 승인을 받은 전기용품을 사용하여, 전기기술 기준에 따라 시설해야 한다.
- 나. 습한 장소에서의 전기사용은 금한다. 습한 상태에서는 감전의 위험이 높다.
- 다. 기계 기구류의 점검이나 보수 시에는 반드시 전원을 내리고 실시한다.
- 라. 전기회로가 밖으로 드러나지 않게 방호시설이나 절연을 충분히 하여 사용한다.
- 마. 콘센트는 사용전압을 확인하고 과부하가 걸리지 않도록 용량을 고려한다.
- 바. 분전반에 전기회로의 사용유무를 표시하여 점검 중에 스위치류를 올리지 않도록 한다.
- 사. 누전 차단기(Leakage Current Circuit Breaker)는 전원과 부하를 확인하여 접속한다.
- 아. 고주파를 발생하는 기기(방전가공기)의 전원 측에 콘덴서 등을 설치하여 전파 장애를 방지해야 한다.

7. 전기감전의 위험성

- 가. 인체에 전류가 흐르면 극히 미약한 전류에서는 아무런 느낌이 없으나 통과전류를 조금씩 증가시키면 짜릿짜릿한 느낌이 들고 좀 더 증가시키면 참을 수 없게 된다. 이와 같이 전기적 충격(전격)을 느끼게 되거나 상처를 입는 현상을 “감전”이라 한다.
- 나. 인체에 전류가 흘러 “전류의 크기×흐른 시간”이 어느 정도 이상이 되면 전류의 열작용으로 전기의 유입구와 유출구에 화상을 입게 되고 신체내의 세포를 파괴하거나 혈구를 변질시키게 된다. 특히 문제가 되는 것은 전류의 자극에 의한 근육수축으로 호흡작용의 정지 또는 질식사 하거나 심장 경련으로 심실세동을 일으켜 체내의 혈액순환이 정지되어 버린다.
- 다. 사람이 감전 되었을 때 나타나는 생리작용은 전류의 크기, 통전경로, 통전시간 등에 따라 크게 다르다.



감전 시 인체에 흐르는 전류 : $I = \frac{220 V}{5000 \Omega} = 0.04 [A]$

<감전현상별 전류치>

최소감지전류	1~2mA	짜릿하게 느끼는 정도
고통전류	2~8mA	참을 수는 있으나 고통을 느낀다.
이탈가능전류	8~15mA	안전하게 스스로 접촉된 전원으로부터 떨어질 수 있는 최대한의 전류. 참을 수 없는 정도로 고통스럽다.
이탈불능전류	15~50mA	전격을 받았음을 느끼면서도 스스로 그 전원으로부터 떨어질 수 없는 전류. 근육의 수축이 격렬하다.
심실세동전류	50~100mA	심장의 기능을 잃게 되어 전원으로부터 떨어져도 수분 이내에 사망한다.
징후	전격	- 맥박이 점점 빨라졌다. 일정기간 후 급격히 약해져 결국은 느끼지 못하게 됨
		- 피부가 거칠어지고 윤기가 없음 - 이마에 식은땀이 흐름
	심실세동	- 후두부 맥박이 정지됨 - 동공이 확대 됨 - 눈동자가 불빛에 반응을 보이지 않음

<인공호흡의 개시시간에 따른 소생률>

개시시간(분)	소생률(%)
1	95
3	75
5	25
6	10



화재조사실무 I



제3편 화재학

제1장 서론

제2장 열전달 (Heat Transfer)

제3장 점화와 화염전파

제4장 연소율과 발열량

제5장 연소생성물 (Combustion products)

제6장 화재 플럼 (Fire Plume)

제7장 구획화재 (Compartment Fire)

1 서론

서론

화재역학(Fire Dynamics)은 화재역학, 화재유동학, 화재현상학 등 다양한 명칭으로 불리고 있으며 기본적으로 화재발생으로 인한 열 및 물질전달과 연소반응을 중심으로 화재의 발생과 성장에 대한 물리적, 화학적 특성을 이해하는 학문분야로 화재현상을 이해하는데 가장 기본이 되는 학문이다. 화재학에서 다루는 대상인 불(fire)은 일반적으로 공기 중의 산소와 가연성 연료에 의한 다양한 형태의 화학반응을 통칭하는 것으로 기본적으로 인간의 생존에 필요한 열에너지를 제공할 뿐만 아니라 열을 기계적인 일로 변환하여 인간의 삶을 윤택하게 하는 동력원으로 사용되어 왔다. 그러나 이러한 불이 사람에 의해 적절히 제어되지 않았을 때 엄청난 인적, 물적 피해를 야기해왔다. 따라서 불에 의한 피해, 즉 화재에 적절히 대처하기 위해서는 화재 자체에 대한 원천적인 접근방식이 필요하며 이러한 접근(이해)은 공학적인 관점에서 화재거동의 상세한 이론을 기본으로 한다. 본 장에서는 화재 및 화재학에 대한 정의 및 범위를 설정하고 화재사고 사례 및 국내외 화재연구를 통하여 화재학의 필요성에 대해 설명하고 화재역학을 이해하는데 기본적으로 필요한 단위와 차원 및 기초적인 화염특성에 대해 소개한다.

제1절 화재 현상

- 학습** 01 화재 및 화재역학의 정의
목표 02 연소의 3요소 및 4요소

1.1 화재 및 화재역학의 정의

일반적으로 화재는 ‘제어되지 않는 연소반응(uncontrolled combustion)’으로 가연성물질의 급속한 산화반응을 통해 빛과 열 그리고 다양한 연소생성물을 발생시키는 과정을 의미한다. 국내의 경우 화재에 대한 정의는 행정자치부 훈령 제 17호에 의해(1998. 11. 7) 다음과 같이 정의하고 있다.



“화재란 사람의 의도에 반하거나 고의에 의해 발생하는 연소현상으로서 소화시설 등을 사용하여 소화할 필요가 있는 것을 말한다.”

여기서 “반하거나”의 뜻은 과실에 의한 화재를 의미하며 화기 취급 중 발생하는 실화뿐만 아니라 부주위에 의한 자연발화도 포함한다. “고의에 의해”라고 하는 것은 일정한 대상에 대하여 피해발생을 목적으로 화재발생을 유도하였거나 직접 방화한 경우를 말한다. “연소현상”은 함은 가연성물질이 산소와 결합하여 열과 빛을 내며 급속히 산화되어 형질이 변경되는 화학반응을 말한다. ‘소화시설 등을 사용하여 소화할 필요가 있는 것’의 의미는 화재란 연소현상으로서 소화의 필요성이 있어야 하며 소화의 필요성의 정도는 화재의 규모적인 측면에서 소화시설이나 그와 유사한 정도의 시설을 사용할 수준 이상이어야 한다는 것이다. 그러나 구체적 정의가 어떠한지 간에 일상에서 우리가 알고 있는 화재의 개념과 크게 다르지 않으며 의도되지 않은 연소현상으로 인명과 재산상의 피해를 유발할 우려가 있는 것으로 포괄적으로 이해할 수 있다.

화재로 인한 피해규모는 작고 단시간에 제어가 가능한 것에서부터 도시화재와 같이 오랜 시간동안 지속되며 대규모 피해를 야기하기도 한다. 역사적인 대규모 화재사례를 살펴보면 런던 대화재(great fire of London)은 1666년 9월 2일 새벽에 제빵공장에서 화재가 시작되어 5일 동안 런던 시내 전체로 화재가 확산되었으며 런던건물의 80%가 전소되었고 당시 인구 8만 명 중 7만 명이 집을 잃었다. 시카고 대화재는 1871년 10월 8일 밤 시카고 거리에서 발생한 원인 모를 화재는 소나무 보도를 따라 도시전역으로 확산되었으며 사흘간 계속된 화재로 9만여 채의 건축물이 소실되었고 300 여명의 사망자와 9만여 명의 이재민이 발생하여 당시 화폐로 2억 2,200만 달러(현재 가치로 약 250억 달러)의 재산피해를 가져왔다.

[그림 3-1] 런던 대화재와 시카고 대화재 그림



(a) 런던 대화재 (1666)



(b) 시카고 대화재 (1871)

1

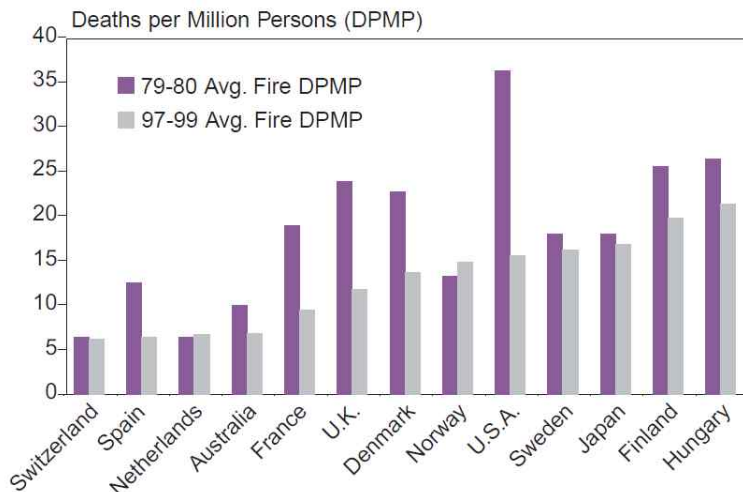
[그림 3-2] 그리스 산불과 위성사진(미항공우주국 NASA의 아쿠아 기상관측 위성)

서론

2007년 8월 24일에 발생한 그리스 대화재는 최초 펠레폰네소스 반도의 작은 민가에서 화재가 시작되어 9월초까지 그리스 전국토의 약 50%가 소실되었으며 사망 64명 이재민 5000여명을 포함한 천문학적인 피해를 야기했다.

일반적으로 화재로 인한 인명피해를 나타내는 기준으로 [그림 3-3]과 같이 인구 백만 명당 한해 화재사고로 사망하는 사람의 수를 나타내는 연간 화재사고 사망률(annual fire death rate)이 있다. 국내의 경우 1997년~1999년 사이 인구 100만 명당 약 10.7명~12.1명의 사망자를 보이고 있으며 평균은 약 11.5 명이다. 이는 동일시기의 다른 나라와 비교했을 때 영국과 비슷한 수준이다. 그러나 우리나라의 경우 도시 집중화가 심각한 수준이고 주거형태가 아파트와 같이 공동주택이 주된 주거형태이기 때문에 대형 화재사고의 우려가 상존하고 있다.

[그림 3-3] 연간 화재사고 사망률의 국가 간 비교





화재역학은 이러한 화재현상에 대한 열 및 유체유동, 물질전달, 연소현상 등의 물리적, 화학적 현상에 대한 이해를 함께하는 학문분야로서 화재현상에 대한 상세한 지식을 기초로 하여 화재안전을 확보하는 것을 목적으로 한다. NFPA 921에서는 연소반응을 이해하기 위한 화학을 비롯한 화재거동과 상호작용하는 열전달 및 유체유동의 공학적인 학문분야를 화재역학(fire dynamics)로 정의하고 있다.

[그림 3-4]에서 제시하는 바와 같이 화재현상은 다양한 길이규모(length scale)에서 일어나는데 화재현상에서 가장 작은 길이규모는 연소과정에서 생성되는 매연(soot)입자로서 길이규모가 나노크기($10^{-8} \sim 10^{-9} \text{m}$) 정도이다. 화재의 확산화염(diffusion flame)의 화염편의 두께는 밀리미터 크기($\sim 10^{-3} \text{m}$) 정도이며 가연물에서 발생된 화염의 높이는 미터크기($10^{-1} \sim 10^0 \text{m}$)의 크기 정도를 가진다. 한편 완전 발달된 건축물의 경우 화재크기는 수십미터($1 \sim 10 \text{m}$)까지 성장하고 산불의 경우 수십 킬로미터($\sim 10^4 \text{m}$) 이상의 길이규모를 가지기도 한다.

이와 같이 화재현상은 물리적 현상자체가 복잡할 뿐만 아니라 다른 학문분야의 연구 대상 길이규모에 비해 매우 폭넓은 길이규모에 걸쳐 연소현상이 이루어지기 때문에 다양한 물리적 현상이 존재하고 이를 명확히 이해하는데 어려움이 적지 않다. 따라서 화재현상의 이해는 물리적 현상을 지배하고 있는 기본적인 이론을 바탕으로 화재에 대한 다양한 경험적인 방법을 접목함으로써 화재현상의 구조적 특성을 이해할 수 있다.

[그림 3-4] 화재현상에서 발생하는 다양한 길이규모

soot particle - $O(10^{-8} \sim 10^{-9} \text{m})$

flame thickness - $O(10^{-2} \sim 10^{-3} \text{m})$



wildland fire - $O(10^1 \sim 10^4 \text{m})$



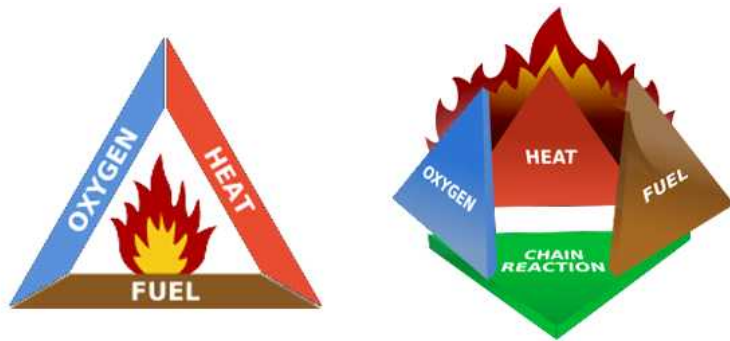
structure fire - $O(10^0 \sim 10^1 \text{m})$

1.2 연소의 3요소와 4요소

서론

화재가 일어나기 위해서는 가연성 연료가 있어야 하고 연료와 반응할 수 있는 적정량의 산소가 필요하고 화재를 형성하기 위한 점화에너지 즉 열이 공급되어야 한다. 이를 연소의 3요소(fire triangle) 혹은 화재의 3요소라 한다. 화재를 소화한다는 것은 화재의 3요소 중에 최소한 하나 이상을 제거하거나 차단하는 것을 의미한다.

[그림 3-5] 연소의 3요소와 4요소



연소 즉, 화재가 시작되기 위해서는 연소의 3요소가 필요하지만 연소의 3요소만으로는 화재가 지속되기에 어려운 경우가 적지 않다. 따라서 화재의 3요소와 함께 화재가 유지되기 위해서는 지속적인 연쇄반응이 이루어져야 하는데 이것이 연소의 4요소 즉, 화재의 4요소(fire tetrahedron)가 된다. 즉, 화재는 초기 외부에너지의 공급과 함께 연료와 산소가 반응하여 열에너지와 연소생성물을 방출하고 이 열에너지는 가연물에 전달되어 지속적으로 연료증기(fuel vapor)를 형성하여 다시 반응이 일어남으로써 외부의 에너지원이 제거된 후에도 계속적으로 연쇄반응(chain reaction)이 일어나야 함을 의미한다.



제2절 기본적인 물리량

- 학습 목표**
- 01 단위와 차원
 - 02 일과 열량
 - 03 밀도, 비중량, 비체적, 압력
 - 04 기체반응법칙과 상태방정식

2.1 단위와 차원

자연현상을 나타내는 물리량은 차원으로 표시할 수 있고 유체유동과 열전달이 기본이 되는 화재역학에서는 질량(mass) M, 길이(length) L, 그리고 시간(time) T를 기본량으로 하여 각각의 물리량의 차원을 유도하게 된다. 국제 표준단위계(SI unit)은 질량에 대해 kg(킬로그램), 길이에 대해 m(미터), 시간에 대해 s(초) 을 이용하는 MKS 단위계를 사용한다.

가) 속도(Velocity)

속도(velocity)는 단위시간당의 변위 변화로 정의되는 벡터량으로 크기와 방향을 동시에 가지는 물리량이다.

$$u = \frac{dx}{dt}, v = \frac{dy}{dt}, w = \frac{dz}{dt} \quad (\text{식 1-1})$$

$$\vec{V} = \frac{d\vec{X}}{dt}$$

여기서 x, y, z 는 각방향의 변위이며 u, v, w 는 각 방향으로의 속도를 나타낸다. \vec{X} 는 변위벡터(displacement vector), \vec{V} 는 속도벡터를 각각 나타낸다. 따라서 속도의 차원은 [길이/시간]이 되어 [L/T] 즉 [LT⁻¹]의 차원을 가지고 단위는 [m/s]이다.

나) 가속도(Acceleration)

가속도(acceleration)는 단위시간당의 속도변화로 정의되는 벡터량이며 동일한 방법으로 차원을 유도해보면

$$a_x = \frac{du}{dt}, a_y = \frac{dv}{dt}, a_z = \frac{dw}{dt} \quad (\text{식 1-2})$$

$$\vec{a} = \frac{d\vec{V}}{dt}$$

서론

가속도의 차원은 [속도/시간]이 되어 $[LT^{-1}/T]$ 즉, $[LT^{-2}]$ 의 차원을 가지고 단위는 $[m/s^2]$ 이다.

다) 힘(Force)

힘(force, 외력)은 뉴턴의 제 2법칙에 의해 질량과 가속도의 곱으로 표현되는 벡터량으로 차원을 유도해보면

$$F_x = ma_x, F_y = ma_y, F_z = ma_z \quad (\text{식 1-3})$$

$$\vec{F} = m\vec{a} = m \frac{d\vec{V}}{dt}$$

다시 말해 물체에 외력이 가해지면 운동이 발생하고 물체의 운동은 외력과 균형을 이루고 있음을 나타낸다. 힘의 차원은 [질량×가속도]로서 $[MLT^{-2}]$ 이 된다. 따라서 힘을 나타내는 MKS 단위는 $[kg \cdot m/s^2]$ 이다. 이 힘을 나타내는 다른 표준 단위로써 N (Newton)이 널리 이용되는데 1 N의 물리적 의미는 1 kg의 물체가 $1 m/s^2$ 의 가속도를 받을 때의 힘을 의미한다. 즉, $1N = 1kg \times 1m/s^2 = 1kgm/s^2$ 이 된다.

한편 물체가 지구로 당겨지는 힘을 무게 또는 중량(weight)로 정의하고 1 kg의 물체가 지구의 중력가속도(gravitational acceleration, g)를 받을 때의 힘(무게)을 $1 kg_f$ 로 표기한다.

$$1kg_f = 1kg \times 9.81m/s^2 = 9.81kgm/s^2 \quad (\text{식 1-4})$$

$$1kg_f = 9.81N$$

일반적으로 일상의 무게를 나타낼 때는 kg_f 단위를 의미한다.

2.2 일과 열량

가) 일과 에너지

일(work)은 물체에 가해진 외력과 이동거리의 곱으로 나타낸다.

$$W = F \times s \quad (\text{식 1-5})$$



여기서 s 는 이동거리[m]를 나타낸다. 일의 차원은 [힘/길이]로써 $[ML^2T^{-2}]$ 이 되고 단위는 $[kg \cdot m^2/s^2]$ 혹은 $[N \cdot m]$ 이다. 이 일의 물리적인 의미는 1 N의 힘을 작용하여 물체를 1 m 이동시킨 것을 의미하고 다른 표준단위로 줄[J]을 보편적으로 이용한다. 에너지(energy)는 일을 할 수 있는 능력을 나타내기 때문에 일과 에너지는 상호 전환될 수 있다. 일은 열에너지의 형태로 전화되기도 하고(마찰열), 열 에너지는 일로 변환되기도 한다(자동차 엔진). 열과 일사이의 비례관계를 열의 일당량(mechanical equivalent of heat)으로 정의하고 다음과 같은 관계를 가진다.

$$1 \text{ cal} = 4.184 \text{ J}$$

나) 동력과 열량

동력(power)은 단위시간당의 일량으로 정의되고 일율이라고도 한다.

$$P = \frac{dW}{dt} \quad (\text{식 1-6})$$

동력의 차원은 [일/시간]으로써 $[ML^2T^{-3}]$ 되고 단위는 $[J/s]$ 이다. 동력의 표준 단위는 와트[W]로서 1초 동안에 한 일량으로 정의된다. 단위시간당의 일량은 단위시간당의 열량과 동일한 개념이 되기 때문에 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} \quad (\text{식 1-7})$$

따라서 화재공간에서 열이 전달된 양이나 화재에서 발생된 열량은 모두 W 로 표시하게 된다. 열전달량은 주로 단위면적당 전달된 열량 즉 열 유속(heat flux)의 개념을 널리 이용하므로 단위는 $[W/m^2]$ 이 되고 화재에서 발생된 열량은 단위시간당 방출되는 열에너지의 개념이기 때문에 $[W]$ 의 단위를 이용한다.

다) 비열(Specific heat)

비열(specific heat)은 어떤 물질 1kg을 1°C 올리는데 필요한 열량을 나타낸다. 일반적으로 질량이 $m[\text{kg}]$ 인 물질이 $Q[\text{kJ}]$ 만큼의 열량을 받아서 온도가 $\Delta T[^\circ\text{C}]$ 만큼 변화했다면 비열은 정의에 의해 다음과 같이 구해진다.

$$C_p = \frac{Q}{m \Delta T} \quad (\text{식 1-8})$$

비열의 단위는 $[kJ/kg^\circ\text{C}]$ 혹은 $[kJ/kgK]$ 로 표시된다. 비열은 실험에 의해 결정되는데 실험조건에 따라 일정한 압력 하에서 측정된 비열을 정압비열이라 하고 일정한 체적상태에서 측정된 비열을 정적비열이라 한다. 유체의 열을 가하면 체적이 일정하게 유지되기 어렵기 때문에 화재학에서는 일정압력(대기압) 상태에서의 비

열인 정압비열을 널리 사용한다.

라) 온도(Temperature)

온도는 물체가 가지고 있는 에너지의 수준으로 물리적으로는 열평형상태를 나타내는 척도이다. 온도의 단위는 섭씨온도, 절대온도, 화씨온도 등이 있다. 섭씨온도는 표준 1기압 하에서 물의 녹는점을 0 °C, 끓는점을 100 °C로 하여 그 사이를 100등분한 온도 단위이며 일상에서 널리 이용된다. 절대 온도는 켈빈[K]로 표기하고 국제표준으로 사용되는 온도 체계이다. 이상적으로 기체의 부피가 0이 되는 절대영도 0 K (-273.15°C)를 기준으로 한 온도를 의미한다. 따라서 절대온도 = 섭씨온도 + 273.15 가 된다. 한편 미국이나 영국에서는 1기압에서 물의 녹는점을 이2 °F, 물의 끓는점을 212°F로 하고 그 사이를 180 등분한 화씨온도를 널리 이용하며 섭씨온도와 화씨온도 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$T_F = \frac{9}{5} T_C + 32 \quad (\text{식 1-9})$$

2.3 밀도, 비중량 그리고 비체적

가) 밀도(Density)

단위체적당의 질량을 밀도(density)라 하고 ρ 로 표기한다.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{식 1-10})$$

여기서 m 은 질량, V 는 체적을 나타낸다. 밀도의 차원은 [질량/부피]로써 [ML⁻³]이 되고 단위는 [kg/m³]이 된다. 1 atm하의 20°C 공기의 밀도는 1.205 kg/m³ 이다. 밀도 차는 부력(buoyancy)과 관련되어 있고 화재유동의 근원이 부력에 기인하기 때문에 화재역학에서 매우 중요한 물성으로 인식 된다.

나) 비중량(Specific weight)

비중량은 단위체적당의 중량을 비중량(specific weight)라 한다.

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g \quad (\text{식 1-11})$$

여기서 W 는 중량(무게)를 나타낸다. 비중량의 차원은 [힘/부피]로써 [ML⁻²T⁻²]이 되고 단위는 [kg/m²s²] 혹은 [kgf/m³]이 된다. 비중량은 유체의 정압력을 산정할 때 널리 이용되며 4°C, 1atm인 상태에서 물의 비중량은 $\gamma_w = 9,800 \text{ N/m}^3$ 혹은 $\gamma_w = 1,000 \text{ kgf/m}^3$ 이다.



다) 비체적(Specific volume)

단위질량당의 체적으로 밀도의 역수이다.

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (\text{식 1-12})$$

비체적의 단위는 [부피/질량]으로 $[M^{-1}L^3]$ 이 되고 단위는 $[m^3/kg]$ 이다. 특히 열역학에서는 상태량을 단위질량당으로 표현하는 경우가 많기 때문에 열역학과 관련된 부분에서 널리 이용된다.

2.4 압력(Pressure)

유체에 작용하는 힘은 크게 2가지로 분류되는데 체적력(body force), 표면력(surface force)등으로 구분된다. 체적력은 유체의 질량에 작용하는 힘으로 예를 들어 무게, 부력, 전자기력 등이 여기에 포함되며 물체의 체적전체에 작용하는 힘이다.

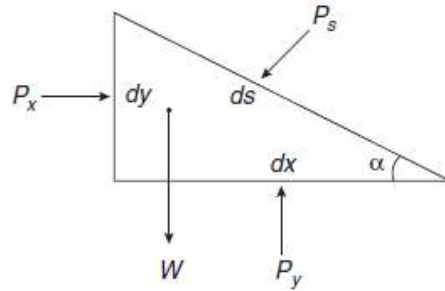
표면력은 물체의 표면에 작용하는 힘으로 표면의 면적에 비례한다. 표면력은 면에 수직 방향으로 작용하는 힘과 접선방향으로 작용하는 힘으로 나뉘는데 수직방향으로 작용하는 대표적인 힘인 압력과 접선방향으로 작용하는 전단력으로 구분된다. 이밖에도 선력은 표면에는 평행하지만 선에 대해 수직인 선력(line force)이 있고 표면장력이 대표적인 예이다.

유체가 유동하여 임의의 유체층이 다른 인접층과 다른 속도로 움직이게 되면 유체 내에는 전단력이 발생한다. 이러한 응력은 속도구배에 비례하고 정지된 유체 속에서는 전단응력은 작용하지 않는다.

압력은 단위면적당 표면에 수직방향으로 작용하는 힘으로 정의된다. 평형상태에서 압력은 스칼라량이고 방향에 무관하다. 그림과 같이 정지된 유체내 췌기모양의 가상의 요소에 체적력과 표면력이 작용하고 있을 때 유체는 평형상태에 놓여있기 때문에 합력은 0 이 된다.

$$\sum F_x = 0, \sum F_y = 0 \quad (\text{식 1-13})$$

[그림 3-6] 쉐기 모양의 유체요소에 작용하는 힘



서론

수평방향으로 작용하는 힘의 합력은

$$P_x dy - P_s \sin\alpha ds = 0 \quad (\text{식 1-14})$$

수직방향으로 작용하는 힘

$$P_y dx - P_s \cos\alpha ds - W dx dy = 0 \quad (\text{식 1-15})$$

따라서 $P_x = P_y = P_s$ 가 되는데 즉 평형상태에 있는 유체 내 한 점에 작용하는 압력은 모든 방향으로 같다고 하는 파스칼 법칙(Pascal's law)이 유도된다.

따라서 정지한 유체 내의 임의의 위치에 대한 정압력의 변화는 다음과 같다.

$$\frac{dP}{dz} = -\rho g \quad (\text{식 1-16})$$

$$P = -\rho g z + C \quad (\text{식 1-17})$$

여기서 높이를 h 라 하고 $\gamma = \rho g$ 이므로 식 1-17은 다음과 같이 나타낼 수 있고 정지된 유체 내 압력은 깊이에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

$$P = \gamma h \quad (\text{식 1-18})$$

한편, 유체유동은 압력변화를 야기하는데 Bernoulli정리는 유체의 운동과 속도사이의 관계를 나타낸다.

$$\frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + z = C \quad (\text{식 1-19})$$

여기서 $\frac{P}{\gamma}$ 을 압력수두(pressure head), $\frac{V^2}{2g}$ 을 속도수두(velocity head), z 는 위치수두(position head)를 각각 나타낸다. [그림 3-7]에서 보는 것처럼 관의 직경이 감소하여 유속이 빨라지게 되면 압력이 감소하여 압력차가 발생하게 된다. 두 지점 사이의 높이가 같다고 가정하고 Bernoulli 방정식을 적용하면,

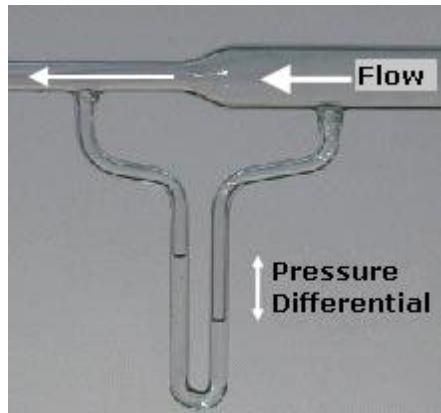


$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} \quad (\text{식 1-20})$$

$$V_1^2 - V_2^2 = \frac{P_2 - P_1}{\rho} = \frac{\Delta P}{\rho} \quad (\text{식 1-21})$$

각 위치에서의 속도는 압력차에 의해 나타낼 수 있다.

[그림 3-7] 유속변화에 따른 압력변화



2.5 기체반응법칙과 상태방정식

기체의 반응과정에 관해 다음과 같은 두 개의 기본 법칙이 있다.

- Gay-Lussac의 법칙
기체가 반응할 때 같은 온도, 같은 압력하에서 소모된 부피와 생성된 부피 사이에 간단한 정수비의 관계가 있다.
- Avogadro의 법칙
같은 온도, 압력 하에서 부피가 같은 모든 기체는 동일한 수의 분자를 가진다. 즉, 단위체적당 분자 수는 일정하다.

$$\frac{N}{V} = C \quad (\text{식 1-22})$$

즉, 표준상태에서 22.4 liter의 체적에는 6.02×10^{23} 개의 분자(즉, 1 mole)를 가진다.

한편, 이상기체의 상태방정식을 유도하기 위하여 기체의 압력, 온도, 체적에 관한 상관관계를 이해할 필요가 있다.

보일의 법칙(Boyle's law)은 일정온도상태에서 기체의 압력과 부피는 서로 반비례함을 나타낸다.

$$V \propto \frac{1}{P} \quad (\text{식 1-23})$$

서론

샤를의 법칙(Charles's law)는 압력이 일정할 때 기체의 부피는 종류에 관계없이 온도가 1°C 올라갈 때마다 0°C일 때 부피의 1/273씩 증가한다는 법칙으로 온도와 체적사이의 비례관계를 나타낸다.

$$V \propto T \quad (\text{식 1-24})$$

아보가드로의 법칙(Avogadro's law)는 같은 온도와 압력 하에서 모든 기체는 같은 부피 속에 같은 수의 분자가 있다는 법칙으로 다음과 같이 나타낸다.

$$V \propto n \quad (\text{식 1-25})$$

위의 세 법칙을 적용하면

$$V \propto n \left(\frac{1}{P} \right) T \quad (\text{식 1-26})$$

$$V \propto \frac{nT}{P}$$

관계식을 정량화하기 위해 일반기체상수 R_u (universal gas constant)를 도입하면

$$V = \frac{nR_u T}{P}, \quad PV = nR_u T$$

$$PV = NR_u T \quad (\text{식 1-27 a})$$

$$PV = mRT \quad (\text{식 1-27 b})$$

$$Pv = RT \quad (\text{식 1-27 c})$$

$$P = \rho RT \quad (\text{식 1-27 d})$$

기체상수 R은 일반기체상수를 분자량으로 나눈 값이므로 $R = R_u / MW$ 이므로

$$P = \rho \frac{R_u}{MW} T \quad (\text{식 1-27 e})$$

표준상태의 조건을 이상기체의 상태식에 대입하여 R_u 를 산정해보면

$$P = 101.324 \text{ kPa} = 101,325 \text{ N/m}^2$$



$$V = 22.4 \text{ Liter} = 0.0224 \text{ m}^3$$

$$n = 1 \text{ mol}$$

$$T = 273 \text{ K}$$

$$R_u = \frac{PV}{nT} = \frac{101,325 \times 0.0224}{1 \times 273} = 8.314 [J/molK] \text{이 된다.}$$

(예제 1-1) 물 H₂O 10 g을 1 atm, 120 °C에서 기화시킨 후의 체적은 얼마인가?

이상기체의 상태방정식에 의해

$$PV = nRT$$

기체의 몰수는 다음과 같이 질량을 분자량으로 나누어 계산된다.

$$n = \frac{m}{MW} = \frac{10}{18} = 0.56 \text{ mol}$$

따라서 기화후의 체적은 다음과 같다.

$$V = \frac{nRT}{P} = \frac{0.56 \times 8.314 \times 393}{101,325} = 0.018 \approx 18 \text{ l}$$

2.6 혼합기체

화재역학에서 고려되는 대부분의 기체는 순수물질이라기보다 여러 물질이 섞인 혼합물 (mixture)의 형태를 띠고 있다. 예를 들어 화재에서 발생된 연기는 공기의 주성분인 질소와 산소 그리고 연소과정에서 생성된 이산화탄소, 수증기를 비롯해 불완전 연소 시에 발생하는 일산화탄소, 그을음 등. 다양한 가스종과 입자 등으로 이루어진 혼합물질이다. 이러한 혼합물에 각각의 인자들이 얼마나 포함되어 있는지를 정량적으로 표현하기 위해 전체에 대한 상대적인 분율로 혼합물의 조성을 표현해야 하는 경우가 많다. 혼합물의 조성을 나타내는 방법에는 크게 질량에 기초한 조성비와 체적이나 혹은 몰수에 기초한 조성비로 나눌 수 있고 전자를 질량분율(mass fraction), 후자를 몰분율(mole fraction)로 정의한다.

여러 가스종이 섞여 있는 혼합기체를 고려할 때 각 개별종의 몰수를 $N_1, N_2, N_3 \dots N_i \dots$ 라 하고 각 종의 질량을 $m_1, m_2, m_3 \dots m_i \dots$ 라고 할 때 임의의 가스종의 몰분율 (x_i)과 질량분율 (m_i)는 전체 몰수 혹은 전체질량에 대한 임의의 인자들의 몰수 혹은 질량으로 정의된다..

서론

$$\chi_i = \frac{N_i}{N_1 + N_2 + \dots + N_i + \dots} = \frac{N_i}{N} \quad (\text{식 1-28})$$

$$Y_i = \frac{m_i}{m_1 + m_2 + \dots + m_i + \dots} = \frac{m_i}{m} \quad (\text{식 1-29})$$

전체 가스중에 대한 몰분율과 질량분율의 합은 1이 되어야 한다.

한편, 질량분율과 몰분율 사이에 분자량을 도입하면 두 분율 사이에 관계를 도출할 수 있다.

$$Y_i = \chi_i \frac{MW_i}{MW_{mix}} \quad (\text{식 1-30})$$

$$\chi_i = Y_i \frac{MW_{mix}}{MW_i} \quad (\text{식 1-31})$$

이때 혼합물의 분자량은 다음과 같이 계산된다.

$$MW_{mix} = \sum_i \chi_i MW_i$$

$$MW_{mix} = \frac{1}{\sum_i \left(\frac{Y_i}{MW_i} \right)} \quad (\text{식 1-32})$$

(예제 1-2) 공기 중의 질소와 산소의 몰분율이 $N_2=79\%$, $O_2=21\%$ 인 경우 공기의 분자량은 얼마인가?

$$\chi_{N_2} = 0.79, \chi_{O_2} = 0.21$$

질소와 산소의 분자량을 각각 $MW_{N_2} = 28$, $MW_{O_2} = 32$

$$MW_{air} = \sum_i \chi_i MW_i = 0.79 \times 28 + 0.21 \times 32 = 28.84$$



제3절 기본적인 화염의 특성

- 학습** 01 예혼합 화염 (Premixed flame)
목표 02 확산화염 (Diffusion flame)

일상에서 가연물질은 기체, 액체, 고체상태로 존재하지만 일반적으로 화염을 동반한 급격한 연소반응은 대부분 기체상태에서 반응이 이루어진다. 액체의 경우 증발과정을 통해, 고체의 경우 열분해(pyrolysis)를 통해서 기체상태인 연료증기(fuel vapor)를 형성한다. 따라서 기체상태의 연료에 대한 연소특성을 이해하는 것이 화재발생으로 인한 화염특성을 이해하는 기본이 된다. 그러나 연소현상에 대한 전반적이고 상세한 내용은 화재역학과 분리되어 다루어지며 본 절에서는 화재역학의 이해에 기초가 되는 화염형태인 예혼합화염과 확산화염의 특성에 대한 간단히 소개한다.

3.1 예혼합 화염 (Premixed flame)

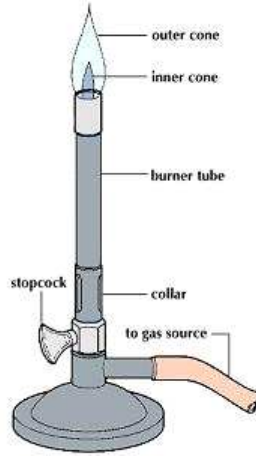
[그림 3-8]에서 보는바와 같이 분젠버너에서 형성되는 예혼합화염은 가연성 연료와 산화제가 점화이전에 미리 잘 혼합되어 있는 상태에서 점화가 이루어지는 것으로 화염이 급속히 전파되는 특징을 가진다. 점화를 위해서는 충분한 외부 에너지(전기스파크, 작은 화염)가 제공되어야 하고 연소속도가 빠르고 연료와 산화제의 혼합과정보다는 연료와 산화제의 화학반응기구에 더 많이 의존한다.

일반적으로 예혼합 화염은 가연한계(flammability limit)를 가지는데 공기/연료의 혼합물이 연소가 일어날 수 있는 연료의 농도를 의미하고 25°C에서 체적 퍼센트로 표시한다.

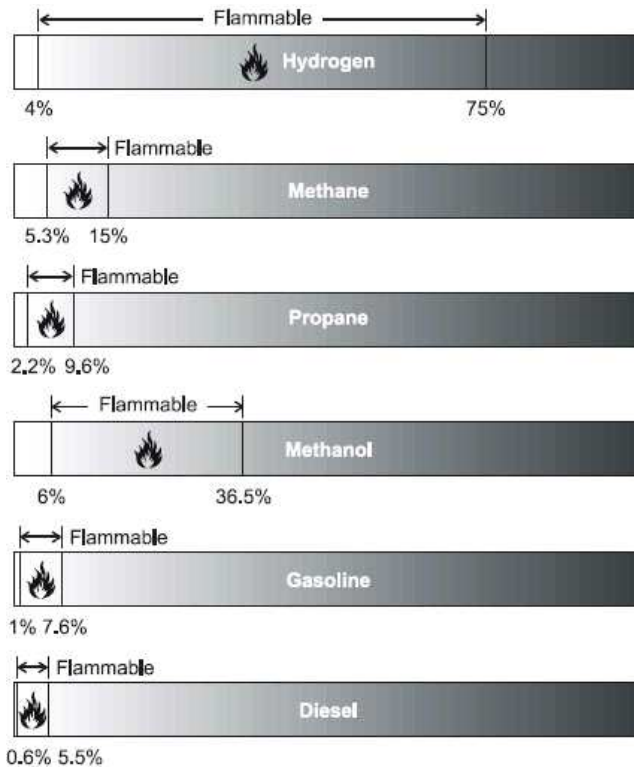
1

[그림 3-8] 분젠버너

서론



[그림 3-9] 주요연료의 가연한계

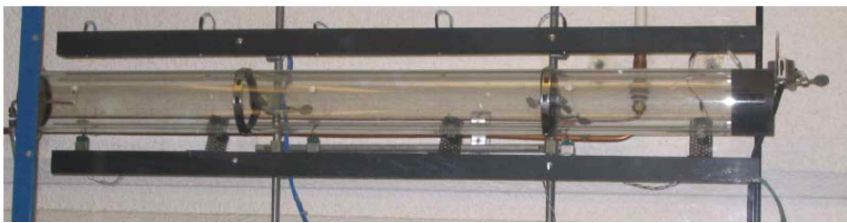




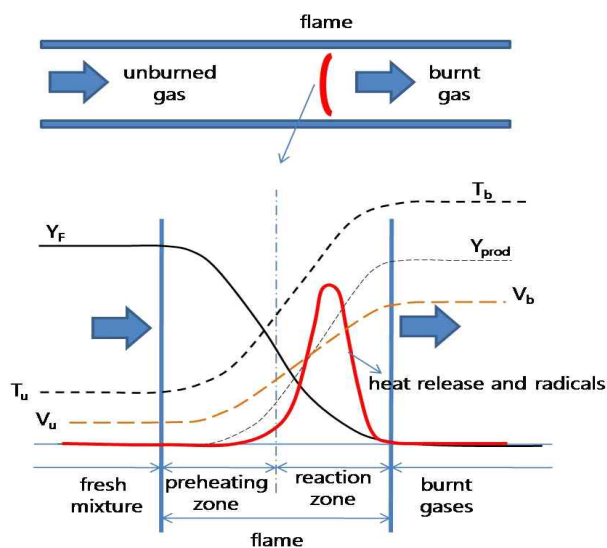
예를 들어 메탄의 경우, 25°C에서 점화가 일어날 수 있는 연료의 농도범위는 5%~15% 사이에서만 점화가 일어난다. 여기서 점화가 일어나는 최소농도를 가연하한(lower flammability limit)이라하고 점화가 일어나는 최대농도를 가연상한(upper flammability limit)이라 한다. [그림 3-9]은 대표적인 연료의 가연한계를 도식적으로 나타낸다.

예혼합화염은 화염부근에서 유체유동이 난류인지 층류인지에 따라 층류예혼합화염과 난류예혼합화염으로 구분된다. 일반적으로 혼합기(연료+산화제)의 유동이 난류와 됴에 따라 화염의 두께와 화염전과 속도가 증가한다. [그림 3-10]과 같이 관내 연료와 산화제가 혼합되어 연소중인 예혼합화염의 구조를 파악해 보면 화염영역은 예열영역(preheating zone)과 반응영역(reaction zone)로 구분되며 화염의 두께는 약 0.1~1mm 정도이다.

온도가 T_u 인 혼합기체가 예열영역으로 들어가면 반응영역으로부터 열을 받아 온도가 상승하기 시작하고 반응영역에서는 본격적인 연소반응이 일어남에 따라 반응열에 의한 급격한 온도상승이 이루어진다.



[그림 3-10] 예혼합화염의 구조



예열영역에서의 연료의 농도는 산화반응이 일어남에 따라 서서히 감소하고 반응영역에서는 연소반응이 진행되어 연료의 농도가 급격히 감소한 후 반응의 종료와 함께 연료는 소진된다. 반면에 연소생성물의 농도를 살펴보면 연소반응이 이루어지기 이전에는 연료와 산화제만 존재하기 때문에 연소생성물의 농도는 0 이 되지만 반응영역에서의 급격한 연소반응으로 인해 다양한 연소생성물과 반응기(radicals)가 생성된다.

연료와 공기의 혼합기체는 화염영역에서 온도상승에 의한 체적팽창이 이루어지기 때문에 가스의 속도는 증가하게 된다(U_b). 정상상태일 경우 혼합기체가 소모되는 속도는 화학반응 속도(연소속도)와 같게 된다.

3.2 확산화염 (Diffusion flame)

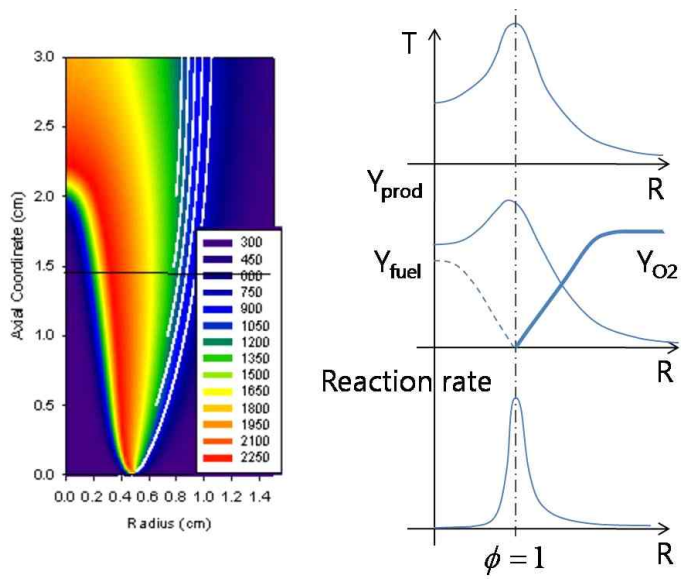
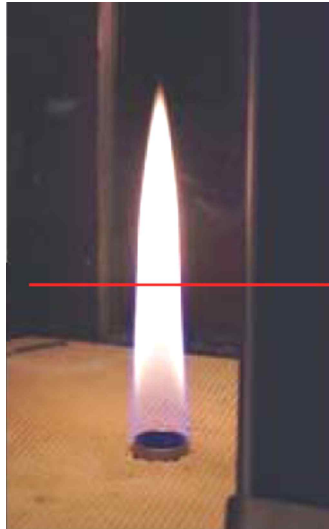
확산화염은 연료와 산화제가 미리 섞여있지 않고 연료와 산화제가 경계를 이루는 위치에서 확산에 의해 형성된 화염형태를 의미한다. 일반적으로 연료와 산화제사이의 화학반응은 분자단위에서 발생하기 때문에 화학반응의 속도는 매우 빠르지만 연소속도는 혼합과정(mixing process)에 의해 제한되기 때문에 상대적으로 느리며 연료와 산화제의 혼합과정이 확산화염에서의 중요한 메커니즘이 된다. 따라서 연소반응이 일어나는 화염의 두께가 매우 얇고 화염두께가 거의 없다고 가정하고 반응속도는 무한히 빠르다고 가정하는 방법이 널리 이용된다.

[그림 3-11]는 화염면의 위치나 온도, 화염높이등과 같은 확산화염의 구조를 보여준다. 가운데 노즐부분에서는 연료만 공급되고 외부에서는 산화제만 유입되기 때문에 연료농도는 노즐의 중앙에서 가장 높고 화염면에서 연소되어 소멸된다. 반면에 산화제의 농도는 외부에서 가장 높고 화염대에서 연료와 반응하여 소멸되기 때문에 화염내부에는 산화제가 존재하지 않는다. 연료와 산화제가 만나 적절한 혼합기를 생성하는 위치에서 화학반응이 가장 활발하게 일어나고 반응율이 높은 곳에서 연소반응이 활발하기 때문에 화염의 온도가 높다.

연소생성물의 농도는 산화반응이 일어나는 곳에서 높게 나타난다. [그림 3-12]은 일반적으로 연소반응에 의해 발생하는 빛에 의해 화염으로 인식되는 부분, 즉 확산화염의 미세 화염면(flame sheet)내부에서의 주요 화학종의 생성, 소멸과 최대온도 위치를 보여준다.



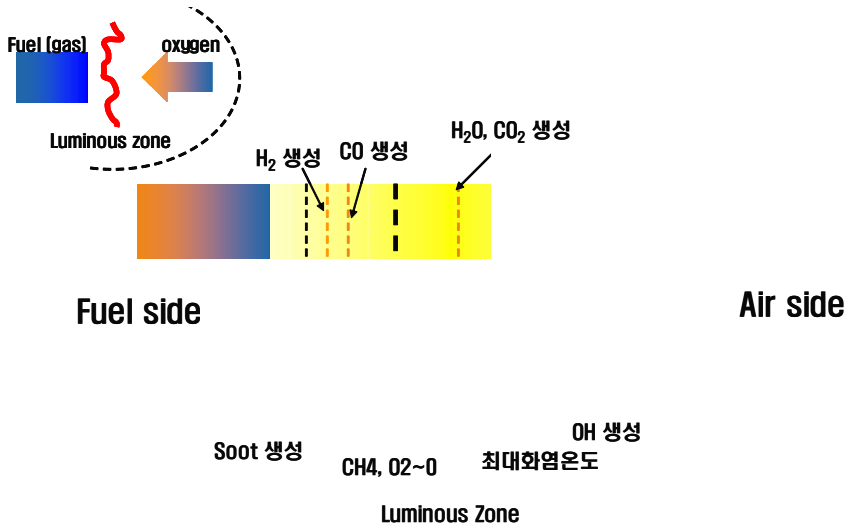
[그림 3-11] 확산화염의 구조



1

[그림 3-12] 화염편의 미세 구조

서론



연료와 산소가 완전히 0인 영역을 기준으로 산소에 보다 가까운 쪽에서 주요 연소생성물인 수증기와 이산화탄소가 생성되고 화염온도는 이보다 더 산화제가 가까운 쪽에서 최대 화염온도를 나타낸다. 한편 화염편에서 연료가 가까운 쪽에서는 불완전 연소과정에서 주로 생성되는 그을음이나 일산화탄소가 생성되고 있으며 특히 그을음은 가연물의 농도가 더 높고 불완전한 연소과정에서 주로 나타나고 생성됨을 알 수 있다. 화염 실험에서 확산화염의 미세화염편에 대한 구조적 이해는 공간화재에서 연료와 산화제의 조성에 따른 연소생성물의 생성 메커니즘과 물리적 특성을 이해하는데 도움이 된다.

2

열전달 (Heat Transfer)



화재로 인해 발생된 열은 다양한 형태로 주변으로 전달되고 이러한 열의 흐름은 기본적인 화재현상의 이해뿐만 아니라 화재안전설계 및 감지설비등과 같은 응용분야에 있어서 매우 중요한 요소가 된다. 본 장에서는 화재현상을 이해하기 위한 기초적인 학문분야로서 열전달에 대한 기본적인 개요와 열전달의 3가지 기본 모드인 전도(conduction), 대류(convection), 복사(radiation)에 대해 소개한다.

제1절 열전달의 개요

- 학습 목표**
- 01 열전달의 기본모드
 - 02 열전달의 기본용어 및 차원

1.1 열전달의 기본모드

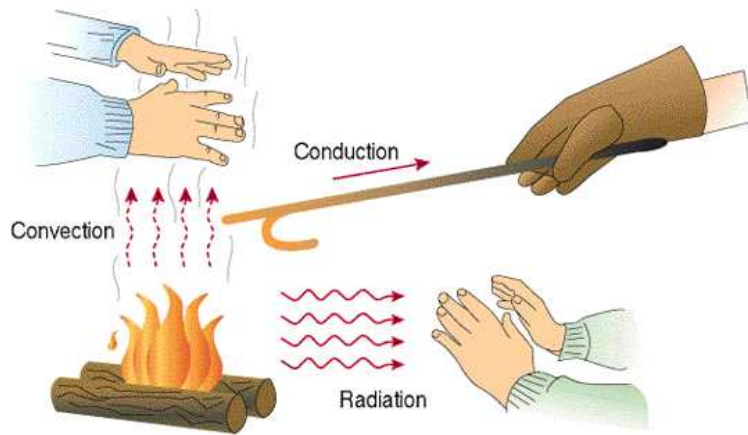
열(heat)은 일상에서 비교적 널리 사용되는 용어이지만 눈에 보이거나 만져지지 않는 물리량으로써 일반적으로 열전달은 온도차에 기인하여 한 물체에서 다른 물체로의 에너지 전달과정을 의미한다. 이러한 열의 흐름을 열전달로 정의하고 기본적으로 3가지 형태의 열전달 모드가 존재한다.

[그림 3-13]에서 보는바와 같이 붕을 불에 가열하면 고체 매질인 붕을 따라 열이 전달되어 붕을 잡은 손이 뜨거워지게 되는데 이는 전도열전달에 기인한 것이고, 화염부에서는 연소반응에 기인한 열기류(thermal flow)에 의해 상승유동이 발생하고 주변기체와의 혼합 등을 통해 열이 유동에 의해 직접 상부로 전달되는데 이와 같은 유체의 유동(bulk flow)에 의한 열전달을 대류열전달이라 한다. 한편 화염 근처에서 고체매질을 통하지 않고, 유체 유동에 의해 열이 전달되지 않음에도 화염으로부터의 온기를 느낄 수 있는데 이는 태양으로부터 지구로의 열전달과 같이 복사열에 의해 서로 다른 온도의 물질사이에 일어나는 복사열전달에 기인한다.

일상에서 열전달 현상은 어느 한 가지 모드에 의해서만 일어나는 것이라기보다는 두 개 이상의 복합적인 모드에 의해 열전달이 이루어지는 것이 대부분이고 다양한 형태의 열전달 가운데 어떠한 열전달 모드가 물리적 현상을 지배하고 있는지를 파악하는 것이 보다 현실적인 접근방법이 되는 경우가 많다.

예를 들어, 화재 발생 초기에는 화재실 내부의 온도가 상대적으로 낮고 화재강도가 크지 않기 때문에 화재실 내부의 열전달을 지배하는 모드는 대류열전달이 된다.

[그림 3-13] 열전달 모드의 예



그러나 화재가 성장하여 화재실 내부 온도가 상승하여 전실화재(flashover)단계에 도달하게 되면 화재실 내부의 주요 열전달 메커니즘은 대류열전달에 의한 영향에 비해 복사열전달에 의한 영향이 점차 증가하게 된다. 이와 같이 열전달 특성은 항상 일정한 것이 아니라 여러 가지 조건에 따라 지속적으로 변화하기 때문에 각 조건에 대한 정량적인 평가를 통하여 주요 열전달 메커니즘을 이해하는 것이 중요하다.

1.2 열전달의 기본 용어 및 차원

열전달에서는 주로 단위시간당 전달된 에너지량을 정의하기 때문에 항상 시간을 고려하게 되고 단위시간당의 에너지 단위인 동력의 단위를 적용하게 되고 와트(Watt, W)를 이용하여 열의 흐름을 정량화 한다.

$$q = \frac{\Delta E}{\Delta t} [J/s] \quad (\text{식 2-1})$$

단위면적당 열전달량을 열 유속(heat flux)으로 정의하고 다음과 같이 나타낸다.



$$\dot{q}'' = \frac{q}{A} [W/m^2] \quad (\text{식 2-2})$$

때때로 물리량은 시간당 혹은 면적당과 같이 단위량에 기초한 표기가 편리한 경우가 많다. 예를 들어 질량(m)에 대하여 단위시간당의 질량은 질량유량(mass flow)로 정의되고 다음과 같이 점(dot)을 이용하여 표기한다.

$$\dot{m} = \frac{\Delta m}{\Delta t} [kg/s] \quad (\text{식 2-3})$$

단위 면적당의 물리량은 더블프라임(“)을 이용하여 표기하고 질량유량의 경우 질량플럭스(mass flux)가 된다.

$$\dot{m}'' = \frac{\dot{m}}{A} [kg/m^2s] \quad (\text{식 2-4})$$

절대온도(absolute temperature): 절대영도인 -273.15°C 를 기준으로 온도단위를 나타내는 온도로써 섭씨온도와 절대온도 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\text{절대온도} = \text{섭씨온도} + 273.15^\circ\text{C}$$

제2절 전도열전달

에너지 확산(diffusion)은 유동이 없는 분자간의 불규칙적인 운동에 의한 에너지 전달을 의미하며 전도는 분자나 전자크기의 매체에 의해 전달되는 열흐름에서 열확산(thermal diffusion)이라고 한다. 현대 물리학에 따르면 고체에서의 전도는 격자파(lattice wave)에 의해 이루어지는 것으로 알려져 있다.

[그림 3-14]에서 보는 것과 같이 가열되는 팬의 경우 열원에 의해 가해진 열은 바닥의 고체면의 전도에 의해 팬 내부로 전달된다.

판의 바닥면을 통한 열흐름은 바닥면의 두께와 바닥면 내외부의 온도차에 의존하게 되며 이 경우 열전달량은 두께가 얇을수록, 온도차가 클수록 증가한다. 푸리에(Fourier)의 연구에 따르면 전도에 의한 단위시간당의 열전달량은 온도차와 면적에 비례하고 두께, 거리에 반비례한다.

$$\dot{q}'' = k \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (\text{식 2-5})$$

$$\dot{q} = kA \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (\text{식 2-6})$$

전도 열전달은 온도차와 두께에 의해서만 결정되는 것이 아니라 물질에 따라서 다르기 때문에 비례상수 k 를 고려하여 열전달량을 고려하게 되고 k 를 열전도율(thermal conductivity)이라고 한다. 열전도율은 일반적으로 온도에 따라 변화하는 $k = k(T)$ 형태로 주어지고 열전도율의 단위는 [W/mK]가 된다. [표 3-1]은 대표적인 물질에 대한 열전도율의 물성값을 나타낸다.

열이 흐르는 방향을 x 좌표라 하고 단위길이당의 온도변화, 즉 온도기울기, 온도구배를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (\text{식 2-7})$$



[표 3-1] 대표적인 물질에 대한 열전도 계수

Material	Thermal conductivity [W/m.K]	Material	Thermal conductivity [W/m.K]
air	0.025	Ice	2
Wood	0.04 - 0.4	Stainless steel	12.11 ~ 45.0
Rubber	0.16	Aluminium	220
Water (liquid)	0.6	Gold	318
Glass	1.1	Copper	380
Soil	1.5	Silver	429
Concrete, stone	1.7	Diamond	900 - 2320

따라서 x 방향으로의 열전달량과 열 유속은 각각 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{q}_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (\text{식 2-8})$$

$$\dot{q}_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (\text{식 2-9})$$

이것을 푸리에의 전도법칙 (Fourier's law of conduction)이라 한다. 전체 부호가 음인 것은 온도가 감소하는 방향으로 열이 흐르게 된다는 것을 의미한다. 즉 $\dot{q}_x > 0$ 것은 면적과 열전도율은 항상 양이기 때문에 온도구배가 음이 되는 것을 의미하고 음의 온도구배에 대해서 $T_1 > T_2$ 가 되어 1점에서 2점으로 열의 흐름이 발생하게 된다. 또한 열전달은 3차원 공간에 대해서 이루어지기 때문에 각 방향으로의 전도열전달이 다르게 일어날 수 있다.

(예제 2-1) 화재가 발생한 공간내부의 온도가 400 °C로 가정하고 외부의 온도가 -20 °C 인 경우 두께 20 cm, 면적 4 m² 인 콘크리트 천정을 통한 열전달량은 얼마인가? (콘크리트 벽의 열전도율은 1.7 W/mK이다.)

▶ 푸리에의 법칙에 의해 전도되는 열전달량은

$$\dot{q} = kA \frac{T_1 - T_2}{L} = 1.7 \times 4 \times \frac{400 - (-20)}{0.2} = 14,280 \text{ W} \sim 14 \text{ kW}$$

제3절 대류열전달

열전달
(Heat
Transfer)
학습 01 화재유동의 대류열전달
목표

전도 열전달에서는 매질의 유동이 없기 때문에 온도차와 물성값인 열전도율에 의해 해석이 가능하다. 유체내부에서의 온도분포는 유체유동과 관련되어 있기 때문에 열전달 해석이 매우 복잡하게 된다. 즉 열전달 특성이 유동에 따라서 크게 달라지기 때문에 전도열전달과 같이 열전달이 매질 특성 보다는 유체의 유동특성에 크게 의존하게 된다. 따라서 대류열전달은 단순히 고체 표면의 온도와 유체 온도사이의 온도차에 비례하는 형태로 정의할 수 있다.

$$\dot{q}_w'' = h(T_w - T_\infty) \quad (\text{식 2-10})$$

[그림 3-15] 수평평판위에서의 대류열전달

이를 뉴턴의 냉각법칙 (Newton's law of cooling)이라고 하고 이때 비례상수 h [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]를 대류열전달 계수(convective heat transfer coefficient)로 정의한다. 대류열전달 계수는 열전도율과 달리 물질마다 고유한 값을 가지는 물성 값이 아니라 유동형태에 의존하기 때문에 유체 유동에 대한 상세한 이해를 필요로 한다.

대류열전달은 경계층 내부에서의 불규칙적인 분자운동과 유체의 집단운동에 기인하고 총 열전달은 분자들의 불규칙적인 운동에 의한 에너지 전달과 유체의 집단 운동에 의한 에너



지 전달이 함께 일어난다. 일반적으로 대류라는 의미는 확산에 의한 영향과 유동에 의한 영향을 함께 고려해야 한다.

대류열전달은 크게 자연대류(natural convection)와 강제대류(forced convection)로 나뉜다. 자연대류는 강제적인 외부의 유동이 없이 온도차나 압력차에 의해 생긴 부력에 의한 대류현상을 의미하고 강제대류는 외부의 인위적인 유동에 의해 형성되는 대류현상을 의미한다.

[표 3-2] 열전달 과정에 대한 대류열전달 계수의 범위

Heat transfer process	h (W/m ² K)
Natural convection	
gas	2-25
liquid	50-1,000
Forced convection	
gas	25-250
liquid	50-20,000

예를 들어, 커피 잔에 뜨거운 물을 부은 후 가만히 두게 되면 상대적으로 온도가 높은 유체는 위로상승하고 표면에서 식은 유체는 다시 하강하는 큰 순환유동을 형성하는데 이는 외부의 강제적인 유동이 없기 때문에 자연대류로 간주할 수 있다. 그러나 스푼으로 커피 잔의 물을 저으면 내부에는 인위적인 유동이 형성되기 때문에 강제대류 현상으로 간주하게 된다. 기체의 대류현상에 대하여 대류열전달 계수의 크기정도(order of magnitude)는 자연대류의 경우 약 $10^0 \sim 10^1$ [W/m²K] 정도이며 강제대류의 경우 $10^1 \sim 10^2$ [W/m²K] 정도이다.

3.1 화재유동의 대류열전달

화재와 관련된 대부분의 유동과 화재특성은 공간내부의 자연대류 현상에 의해 지배된다. 일반적으로 자연 대류에 있어서 특성속도는 다음과 같이 나타낸다.

$$u \approx \sqrt{gl \left(1 - \frac{T_\infty}{T_s} \right)} \quad (\text{식 2-10})$$

여기서 유동의 특성길이가 약 1 m 정도이고 $1 - \frac{T_\infty}{T_s}$ 의 크기정도는 약 0.5~0.7 인 경우 속도는 약 1~3 m/s의 크기정도를 가진다.

대류열전달을 해석하기 위한 무차원수로서 Nusselt 수(Nu)는 열전달 과정중의 전도에 대한 대류의 기여분을 나타낸다.

$$Nu = \frac{hl}{k} \quad (\text{식 2-11})$$

Nusselt 수와 함께 대류열전달 해석에 널리 이용되는 무차원수로 열확산(thermal diffusivity)에 대한 운동량확산(momentum diffusivity)의 비를 Prandtl 수(Pr)라 한다.

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (\text{식 2-12})$$

여기서 ν 는 동점성계수(kinematic viscosity), α 는 열확산계수(thermal diffusivity)로써 $\alpha = k/\rho C_p$ 이다.

한편 자연대류에 대해 부력에 대한 점성력의 비를 나타내는 무차원수로 Grashof 수(Gr)가 널리 이용된다.

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)l^3}{\nu^2} \quad (\text{식 2-13})$$

여기서 β 는 체적팽창계수를 의미하고 $\beta = \frac{1}{T}$ 로 나타낸다.

자연대류 현상은 온도가 높고 가벼운 유체가 상대적으로 차갑고 무거운 유체에 대해 수직방향으로 유동하는 형태로서 열적불안정성(thermal instability)에 기인한다. 자연대류에서의 유동형태는 유체에서의 부력과 점성력의 크기에 따라 결정되는데 이와 관련된 무차원수로 Rayleigh 수(Ra)가 있고 다음과 같이 정의된다.

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)l^3}{\nu\alpha} \quad (\text{식 2-14})$$

가열된 수직벽에 대한 난류 자연대류의 경우 Nusselt 수는 다음과 같은 경험식에 의해 얻어질 수 있다.

$$N = \frac{hl}{k} = 0.1 Ra^{1/3}, Ra > 10^9 \quad (\text{식 2-15})$$

여기서 k, ν, α 등의 유체 물성값은 평균온도 $T = \frac{T_s + T_\infty}{2}$ 을 기준으로 계산된다.

한편 일부 화재학자들은 축대칭 난류화재플럼으로부터 천정으로의 열전달 문제와 같은 단순화된 조건에 대하여 대류열전달을 계산하고자 하는 시도를 하였다. 천정에 화염이 도달하는 경우 전체 열 유속 중 약 50% 정도가 복사열 유속의 기여분이고 이 경우 전체 열 유속의 범위는 자유화염높이(flame height in free burning)가 천정높이의 3배에 이르는 지점까지 약 60 kW/m^2 으로 비교적 일정하다.



Veldman등은 수냉식 열유소계를 이용하여 화재공간의 천정에서 대류열 유속을 측정하였으며 다음과 같은 상관식을 제시하였다.

$$\dot{q}_c'' = h_c (T_{ad} - T_w) \quad (\text{식 2-16})$$

$$h_c = C \rho_\infty C_p \sqrt{gH} Q^{*1/3}$$

$$Q^* = \frac{\dot{Q}_c}{\rho_\infty C_p T_\infty \sqrt{gHH^2}}$$

여기서 \dot{Q}_c 대류 발열량(convective heat release rate)이다. 수냉식 열 유속계가 천정제트의 온도에 영향을 미치지 않는다고 가정하면 단열 벽온도 T_{ad} 는 천정제트의 평균온도를 나타내고 T_w 는 냉각수의 온도를 나타낸다. 대류열전달 계수를 산정하는 과정에 적용된 상수 C는 천정과 화염이 충돌하는 지점으로부터 거리의 함수이나 천정높이의 0.4배 이내에서는 약 0.025 정도로 일정하다.

제4절 복사열전달

학습 01 복사열전달 목표

복사열전달은 중간 매체가 없이 물질에 의해 방사되는 에너지이며 절대온도 0 K (켈빈, Kelvin)보다 높은 온도를 가진 모든 물체는 복사에너지를 방사한다. 복사열전달은 중간 매체가 없이도 일어나며 태양복사에너지와 같이 멀리 떨어진 물체사이에서도 일어나기 때문에 전도나 대류와는 완전히 다른 형태의 열전달 모드가 된다. 열복사는 파동적인 특성을 가지는 전자기파(electro-magnetic wave)인 동시에 입자의 성질을 가지는 양자의 특성을 모두 가지고 있기 때문에 파장에 따른 영향을 받게 된다. [그림 3-16]와 같이 전자기파는 파장에 따라 다양하게 분류되고 그중 열복사(thermal radiation)는 0.1~100 μm 파장대의 전자기파와 관계되며 바깥영역의 전자기파는 열복사와는 무관하다.

물질의 표면에서 방사되는 복사에너지는 스테판-볼츠만법칙 (stefan-boltzmann's law)에 의해 다음과 같이 계산된다.

2

열전달
(Heat
Transfer)

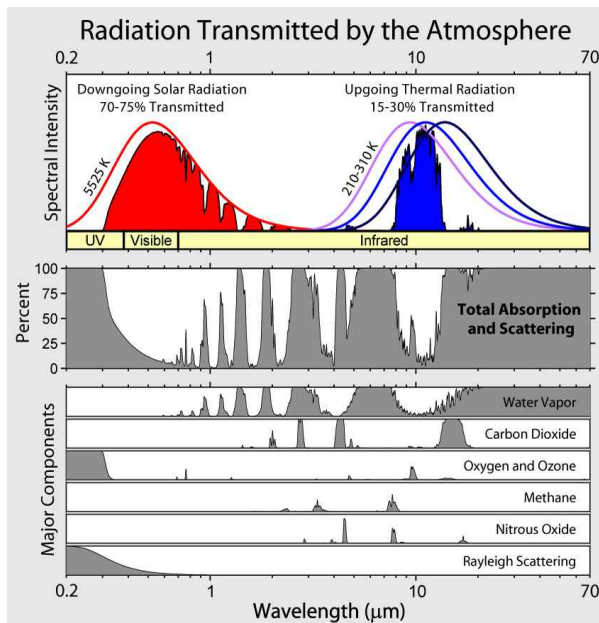
$$\dot{q}_R'' = \epsilon\sigma(T_w^4 - T_\infty^4) \quad (\text{식 2-17})$$

여기서 σ 는 스테판-볼츠만 상수를 의미하고 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ [W/m}^2\text{K}^4]$ 이다. ϵ 은 방사율(emissivity)로 정의하고 표면특성에 따라 0에서 1사이의 방사율을 가진다. 흑체 복사(black body radiation)에서는 방사율이 1이 된다. 스테판-볼츠만 법칙에서는 반드시 절대온도(absolute temperature)를 사용해야 한다.

[그림 3-16] 전자기파 스펙트럼과 열복사 파장범위(www.schoolnotes.com)

thermal radiation

[그림 3-17] 대기 중 복사에너지의 파장대별 투과율





일반적으로 화재에서의 복사열전달은 화염내부의 에너지 피드백을 통한 가연물의 연소율에 직접적으로 관계할 뿐만 아니라 외부 물체로의 에너지 공급원으로써 중요한 역할을 한다. 화염과 연소가스는 다양한 방식으로 복사열전달과 관계하게 되는데 대부분의 가스는 특정 파장대에서 복사열을 흡수하거나 방사하는 것으로 알려져 있다.

[그림 3-17]는 대기를 통과하는 복사에너지의 투과율과 주요 가스성분에 대해 파장대별 복사에너지의 투과율을 나타낸다. 기체의 종류마다 복사에너지를 흡수하는 고유의 파장대를 가지고 있으며 CO₂의 경우 14 μm 정도의 파장에서 많은 복사에너지를 흡수하고 있음을 보인다. 화염의 대표적인 연소생성물인 CO₂와 H₂O의 경우 고온 영역의 CO₂는 화염복사의 중요 근원이 되고 고체나 액체연료 표면과 같이 상대적으로 낮은 온도에서의 H₂O는 화염으로부터 연료표면으로의 복사열을 차단하는 역할을 하기도 한다.

[그림 3-18] 등방성 복사열전달

이와 대조적으로 화염에서 발생된 그을음(soot)은 일반적으로 전체 파장영역에 걸쳐 복사열을 흡수 혹은 방출하는 특성을 가진다. 따라서 화염에서의 복사는 온도, 파장, 혼합물의 조성 및 농도에 따라 크게 영향을 받기 때문에 직접적인 해석방법보다는 근사적인 해법을 통해 화재로부터의 복사에너지를 계산하는 방식이 널리 이용된다.

일반적으로 화재에서 임의 표면에 도달하는 복사열 유속을 계산하는데 널리 이용되는 근사식은 참여매체(연기)에 의한 복사열의 흡수나 방사를 고려하지 않고 단순 화원에서 방사되어 표면에 도달하는 복사에너지만을 평가한다. 일반적으로 널리 쓰이는 근사식은 화원을 점원(point source)으로 가정하고 점원으로부터 복사에너지는 등방(isotropic)하게 방사된다고 가정하여 주변으로 전달되는 복사열 유속은 Modak의 단순식에 의해 다음과 같이 계산한다.

$$\dot{q}_R'' = \frac{\chi_r \dot{Q}}{4\pi R_o^2} \quad (\text{식 2-18})$$

여기서 \dot{Q} 는 화재의 발열량(heat release rate), R_o 는 화염의 중심으로부터 표면까지의 거리이고 χ_r 은 복사분율(radiative fraction)으로써 화원에서 방출되는 전체 에너지 가운데 복사열의 형태로 방출되는 분율을 의미한다. 일반적으로 복사분율은 연료의 종류나 화원의 크기에 따라 변화한다. [표 3-3]는 몇몇 연구자들에 의해 측정된 연료별 복사분율값을 비교하여 나타낸다.

[표 3-3] 연료종류별 복사분율 측정값 비교

Fuel	Brzustowski	Burgess and Hertzberg	Tan	Kent	McCaffrey
Hydrogen	0.2	0.17	—	—	—
Methane(C1)	0.2	0.23	0.2	0.19	0.22
Ethylene(C2)	0.25	0.36	0.26	0.25	0.38
Propane(C3)	0.3	—	0.32	0.32	0.3
Butane(C4)	0.3	0.3	0.37	0.37	—
C5 and higher	0.4	—	—	—	—

(예제 2-2) 휘발유를 연료로 사용하는 자동차에서 화재가 발생하여 발열량이 5 MW까지 상승한 경우 화원에서 10 m 떨어진 위치에서 화재진압중인 소방관이 받는 복사열 유속은 얼마인가?
(복사분율은 0.4로 가정한다.)

▶ 복사열 유속 계산에 대한 Modak의 단순식을 적용하면

$$\dot{q}_R'' = \frac{\chi_r \dot{Q}}{4\pi R_o^2} = \frac{0.4 \times 5000}{4\pi \times 10^2} = 1.6 \text{ kW/m}^2$$

점화와 화염전파



점화(Ignition)는 화재의 시작인 동시에 지속적인 화염전파 및 일정한 연소상태를 유지하기 위한 초기 화재성장에서 매우 중요한 단계로 인식된다. 점화에 따른 가연물의 안정적인 연소는 인접 가연물로의 열전달을 통하여 가연성기체의 생성을 증가시키고 이러한 가연성기체의 증가는 화염의 성장 및 화염경계의 확대를 야기하게 된다. 따라서 본 장에서 점화와 화염전파를 지배하는 기본적인 메커니즘과 주요 영향인자에 대해 소개함으로써 화재성장의 초기단계에 대한 물리적 이해를 돕고자 한다.

제1절 점 화(Ignition)

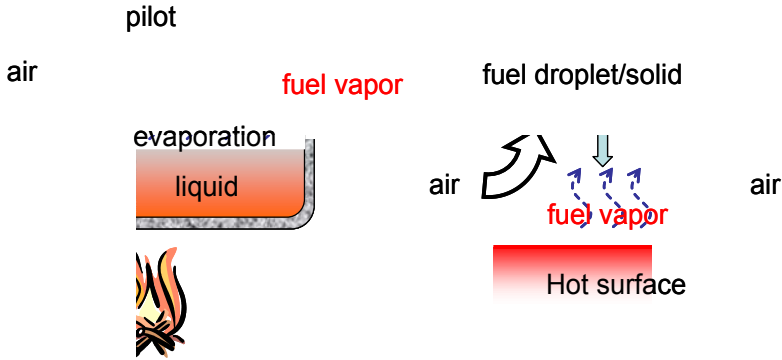
- 학습 목표**
- 01 점 화(Ignition)
 - 02 화염의형태와 가연한계
 - 03 가연성액체연료의 점화
 - 04 고체가연물의 점화

화재에서의 점화는 크게 파일럿 점화(pilot ignition)과 자연점화(spontaneous ignition)의 두 가지 형태로 구분된다. [그림 3-19]에서 보는 것처럼 파일럿 점화는 가연성 연료와 공기의 혼합기(mixture gas)에 스파크나 작은 화염과 같은 순간적인 외부 에너지원이 공급되어 화염을 초기화하는 과정을 말하고 자연점화는 특정 연료농도와 온도상태에서 스파크나 외부의 부가적인 화염 없이 자연적으로 화염을 형성하는 과정을 의미한다. 두 점화과정 모두 증발이나 열해리 등에 의해 연소 가능한 농도이상의 혼합기를 형성해야 하고 연소반응이 이루어지기 위해서는 손실열 이상의 에너지가 외부로부터 지속적으로 공급되어야 한다.

3

[그림 3-19] 파일럿 점화와 자연점화

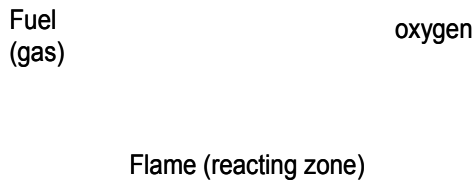
점화와
화염전파



1.1 화염의 형태와 가연한계

화염의 형태는 크게 예혼합화염(premixed flame)과 확산화염(diffusion flame)으로 구분된다. 1장에서 언급한바와 같이 예혼합 화염은 화염을 형성하기 이전에 연료와 공기가 미리 섞인 후 연료/공기의 혼합기에 점화가 일어나 화염을 형성하는 것이고 확산화염은 [그림 3-20]와 같이 연료와 산소가 미리 섞여있지 않고 연료와 공기가 만나는 곳에 화염을 형성하는 것을 의미하고 반응영역에서는 주로 연료와 산소가 농도차이에 의한 확산에 의해 물질의 이동이 이루어지기 때문에 확산(diffusion)이라는 용어를 사용한다. 일상에서 예혼합 화염의 대표적인 예는 휘발유 엔진이나 가스버너 등이 있고 대부분의 화재나 촛불 등이 확산화염에 속한다.

[그림 3-20] 확산화염의 형성



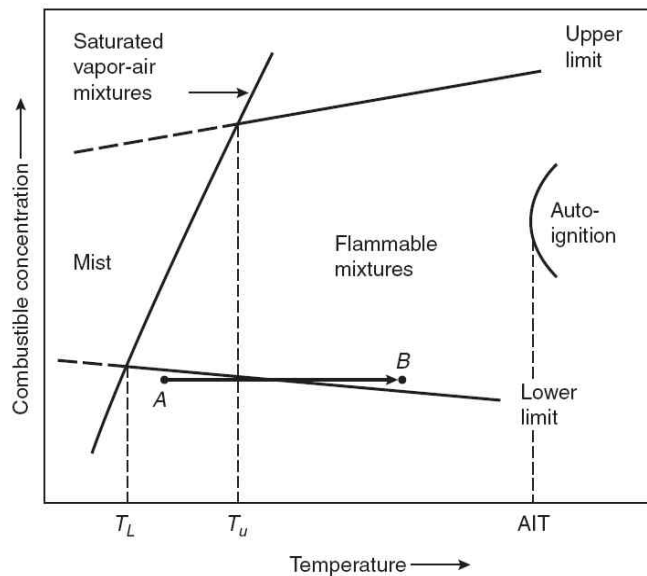
일반적으로 가스연료는 공기 중에서 점화가 일어날 수 있는 농도범위를 가지게 되는데 이를 가연한계(flammability limit)이라고 한다. 가연한계는 연소 가능한 연료의 농도범위를 나타내기 때문에 가연상한(upper flammability limit, UFL)과 가연하한(lower flammability limit, LFL)로 구분되고 가연상한과 가연하한 사이에서 점화가 이루어진다. 가연한계 측정



은 일반적으로 대기압, 25°C 상태에서 이루어지며 점화원은 스파크나 작은 파일럿 화염을 이용한다.

[그림 3-21]에서 보는 것처럼 온도가 상승할수록 가연상한은 증가하고 가연하한은 감소하여 전체적인 가연범위는 넓어진다. 혼합물의 포화증기선 이하에서는 기체연료는 작은 액적의 형태로 응축되고 이 액체도 가연한계를 가진다. 일반적으로 가연하한상태에서 연료가 액체로 응축되는 온도(T_L)를 인화점(flash point)로 정의된다. 따라서 인화점은 작은 에너지 공급원에 의해 점화가 일어날 수 있는 최소온도를 의미한다. 반면에 가연성 혼합물의 온도가 지속적으로 상승하면 다른 외부에너지의 공급 없이 점화가 일어나는데, 자연발화가 일어나는 최소온도를 자연점화온도(auto-ignition temperature)로 정의한다.

[그림 3-21] 온도에 따른 가연한계의 변화



[표 3-4]은 대표적인 가연성 연료의 가연한계와 자연점화온도를 보여준다.

다양한 가연성 연료기체의 혼합물의 가연하한에 대해서는 르샤틀리에(Le Chatelier)가 제시한 경험적인 법칙에 의해 예측이 가능하다.

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{LFL_i} \geq 1 \quad (\text{식 3-1})$$

여기서 C_i 는 연료-공기 혼합물중 i 번째 연료의 농도이고 LFL_i 는 i 번째 연료의 공기 중 가연하한농도를 나타낸다. 따라서 C_i/LFL_i 의 합이 1 보다 큰 경우 혼합물의

3

농도는 가연하한보다 위에 있다. 가연성 연료혼합물의 가연하한 농도는 다음과 같이 계산된다.

$$LFL_m = \frac{100}{\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{LFL_i}} \quad (\text{식 3-2})$$

점화와
화염전파

[표 3-4] 주요 가연성 연료의 가연한계와 자연발화온도



Combustible	LFL	UFL	AIT(°C)
Acetone	2.6	13	465
Ammonia	15	28	-
Benzene	1.3	7.9	560
n-Butane	1.8	8.4	405
Carbon monoxide	12.5	74	-
n-Decane	0.75	5.6	210
Diesel fuel			225
Diethyl ether	1.9	36	160
n-Dodecane	0.6		205
Ethane	3	12.4	515
Ethyl alcohol	3.3	19	365
Ethylene	2.7	36	490
Gasoline	1.3	7.1	440
n-Heptane	1.05	6.7	215
n-Hexadecane	0.43	-	205
n-Hexane	1.2	7.4	225
Hydrogen	4	75	400
Hydrogen cyanide	5.6	40	
JP-4	1.3	8	240
JP-6	-	-	230
Kerosene			210
Methane	5	15	540
Methyl alcohol	6.7	36	385
n-Octane	0.95		220
n-Pentane	1.4	7.8	260
Propane	2.1	9.5	450
Propylene	2.4	11	460
Styrene	1.1		
Toluene	1.2	7.1	480

(예제 3-1) 50%의 프로판과 30%의 수소, 20%의 메탄이 공기 중에서 혼합되어 있다.
이 연료가스의 가연하한을 계산하라.

프로판의 가연하한: 2.1 %,

수소의 가연하한: 4 %,

메탄의 가연하한 5 % 이다.

$$LFL_m = \frac{100}{\frac{50}{2.1} + \frac{30}{4} + \frac{20}{5}} = 2.83\%$$

따라서 가연하한상태의 연료-공기 혼합물의 조성은 다음과 같다.

$$C_{C_3H_8} = 2.83 \times 0.5 = 1.415\%$$

$$C_{H_2} = 2.83 \times 0.3 = 0.849\%$$

$$C_{CH_4} = 2.83 \times 0.2 = 0.566\%$$

1.2 가연성 액체연료의 점화

[그림 3-19]과 같이 액체연료를 가열하면 액체의 온도가 상승하여 액체연료 내 분자 간 운동이 활발해지고 증발(vaporization)이 일어난다. 연료표면 근처에서는 증발된 연료증기와 공기가 혼합기를 형성하고 가연하한농도에 도달하게 되며 지속적으로 가열할 경우 연료 표면에서의 연료농도는 증가하여 연료증기의 농도가 100% 되는 온도에 도달하는데 이를 끓는점(boiling point)이라 한다. 따라서 액체연료의 점화는 증발과 이에 따른 연료혼합기의 형성에 큰 영향을 받는다.

[그림 3-22] 인화점의 시험방법

uniform concentration	non-uniform concentration
	low
	high
(a) closed cup	(b) open cup

액체연료의 점화에 관한 표준실험은 개방된 용기시험(open cup test)과 폐쇄된 용기시험(closed cup test)방법이 사용되고 있다. 밀폐된 용기실험은 공간내부의 연료의 농도와 온도를 비교적 균일하게 할 수 있고 외부로의 열손실이 상대적으로 적기 때문에 개방된 용기실험에 비해 인화점이 낮게 나타난다. 그러나 개방된 용기시험은 표면에서 높이방향으로 갈수록 농도와 온도가 상대적으로 낮아지나 개방된 공간으로 인해 지속적으로 외부 공기가



유입되어 점화이후의 연소특성을 관찰할 수 있다.

액체연료에 대해서는 화재점(fire point)이라는 용어가 널리 이용되는데 액체연료의 화재점은 개방된 용기시험에서 연료증기의 점화를 유도하고 화염을 지속할 수 있는 최소온도로서 정의된다.

[표 3-5]는 주요 액체연료의 시험방법에 따른 인화점과 화재점을 나타낸다.

[표 3-5] 주요연료의 시험방법에 따른 인화점과 화재점

Fuel	T_{FP} (close cup)	T_{FP} (open cup)	Fire point
Gasoline(100 Octane)	-38	-	-
n-Hexane	-22	-	-
n-Octane	13	-	-
n-Decane	46	52	61.5
n-Dodecane	74	-	103
Methanol	11	1	1
Ethanol	13	6	6
Propanol	26	16.5	16.5

일반적으로 가연성 액체연료의 위험정도는 인화점에 따라 분류되는데 대표적으로 미국의 국가 표준제도인 ANSI(American National Standards Institute)나 미방화협회 NFPA(National Fire Protection Association)규정에 따르면 액체연료의 가연성 정도를 인화점과 끓는점을 이용하여 분류하고 있다. [표 3-6]에서 보는 것처럼 ANSI 규정의 경우 극도의 가연성연료(Extremely Flammable Liquid)를 인화점이 $-6.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이하이거나 인화점이 $60.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이하고 끓는점이 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이하인 액체로 분류하고 있다. NFPA에서는 인화점과 끓는점에 따라 3단계로 구분하고 가연성이 높은 순에 따라 Class I에서 Class III까지 구분하고 있다.

3

점화
와
화염전파

[표 3-6] 인화점과 끓는점에 따른 가연성 연료의 분류

ANSI (Z129.1-2006)	
Extremely Flammable Liquid	$T_{FP} < -6.7^{\circ}\text{C}$ OR $T_{FP} < 60.5^{\circ}\text{C}$ and $T_{BP} < 35.0^{\circ}\text{C}$
Flammable Liquid	$35^{\circ}\text{C} < T_{FP} < 60.5^{\circ}\text{C}$
Combustible Liquid	$60.5^{\circ}\text{C} < T_{FP} < 93.3^{\circ}\text{C}$
NFPA 30(Flammable and Combustible Liquids Code)	
Class IA	$T_{FP} < 23.0^{\circ}\text{C}$, $T_{BP} < 38^{\circ}\text{C}$
Class IB	$T_{FP} < 23.0^{\circ}\text{C}$, $T_{BP} \geq 38^{\circ}\text{C}$
Class IC	$T_{FP} \geq 23.0^{\circ}\text{C}$, $T_{BP} < 38^{\circ}\text{C}$
Class II	$T_{FP} \geq 38.0^{\circ}\text{C}$, $T_{BP} < 60^{\circ}\text{C}$
Class IIIA	$T_{FP} \geq 60.0^{\circ}\text{C}$, $T_{BP} < 93^{\circ}\text{C}$
Class IIIB	$T_{FP} \geq 93.0^{\circ}\text{C}$

외부 열원에 의해 가열될 때 정상상태에서의 연료의 증발율은 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{m}''_{evap} = \frac{\dot{q}''_E - \dot{q}''_L}{L_v} \quad (\text{식 3-3})$$

여기서 L_v 는 증발 잠열(latent heat of evaporation), \dot{q}''_E 는 단위면적당 연료표면으로 도달하는 열에너지의 공급율, \dot{q}''_L 은 단위면적당의 열손실율을 나타낸다. 화염이 연료표면에 형성될 경우 화염으로부터 추가적인 열에너지가 공급되기 때문에 연료표면에서의 질량감소율(mass loss rate)은 다음 같다.

$$\dot{m}''_{loss} = \frac{f\Delta H_c \dot{m}''_f + \dot{q}''_E - \dot{q}''_L}{L_v} \quad (\text{식 3-4})$$

f 는 연소된 연료에서 방출된 열에너지 중 다시 연료표면으로 공급되는 에너지의 분율을 나타내고 f 는 복사열전달에 의한 분율 f_r 과 대류열전달에 의한 분율 f_c 로 구분하여 $f = f_c + f_r$ 이 된다. 또한 환기량이 충분하여 증발된 연료가 모두 연소한다고 가정하면 $\dot{m}''_{loss} = \dot{m}''_f$ 가 된다. 따라서 위 식을 정리하면

$$((f_r + f_c)\Delta H_c - L_v)\dot{m}''_f + \dot{q}''_E - \dot{q}''_L = S \quad (\text{식 3-5})$$

정상상태인 경우 $S=0$ 이 된다. f_r 과 f_c 는 화재의 크기에 따라 변화하는데 화재점 근처에서는 화염의 빛이 매우 약하기 때문에 f_r 이 매우 작아 무시할 수 있고 f_c 는 최대값(ϕ)을 가진다. 화재점에서 가연물의 임계유량은 \dot{m}''_{cr} 로 정의하고 $f_c = \phi$, $f_r = 0$, $\dot{m}''_f = \dot{m}''_{cr}$ 을 대입하면



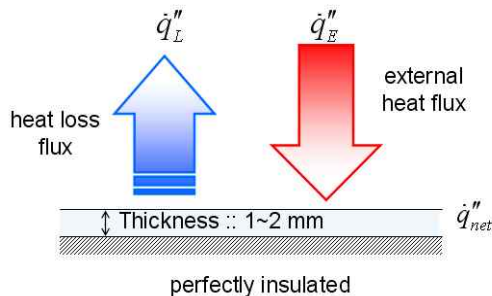
$$(\phi\Delta H_c - L_v)\dot{m}_{cr}'' + \dot{q}_E'' - \dot{q}_L'' = S \quad (\text{식 3-6})$$

점화이후의 지속적인 연소는 $S > 0$ 일 때 이루어지는데 충분한 열이 연료표면으로 공급됨에 따라 표면의 온도는 상승하고 증발율은 증가하여 화염의 강도는 증가하게 된다. 반대로 $S < 0$ 이면 에너지 공급에 비해 열손실이 더 크기 때문에 화원부는 냉각되어 화재는 점차 쇠퇴하여 소화된다.

1.3 고체가연물의 점화

화재가 발생하기 위해서는 가연성 물질을 가열하여 연료증기가 생성되어야 하고 기상에서 지속적인 반응이 이루어져야 한다. 고체가연물의 경우 연료증기를 생성하기 위해서 기화과정과 증발된 연료와 산화제 사이의 지속적인 연소반응을 일으킬 수 있는 조건이 요구된다. 즉 연료표면에서의 열적조건이 고체물질의 점화를 결정하는 중요한 요소가 되는데 이러한 열적조건은 표면온도로 표현되는 경우가 많다. 고체 가연물의 점화를 결정하는 주요요소는 표면의 온도, 재료의 물성, 재료의 두께 등이 있다. 특히 가연물의 두께는 점화나 화염전파와 밀접한 관계를 가지는데 예를 들어 나무판과 나무판을 깎아낸 대패밥을 동일한 열적조건에서 점화시켜보면 대패밥의 점화가 쉽게 일어남을 관찰할 수 있다. 이는 재료의 물성은 동일하나 두께가 다르기 때문에 내부로의 열전달의 영향이 고려되기 때문에 점화온도의 차이를 보이게 된다. 일반적으로 점화에 미치는 두께의 영향은 크게 두 가지로 나뉘는데 열적으로 두꺼운(thermally thick) 것과 열적으로 얇은(thermally thin) 것으로 구분하여 고려한다. 일상의 가연물에 대해 열적으로 얇은 것은 물리적 길이가 약 1~2 mm 정도의 두께를 의미하고 그 이상은 열적으로 두꺼운 것으로 간주한다.

[그림 3-23] 열적으로 얇은 두께를 가진 물질의 가열



가) 열적으로 얇은 물질의 점화

[그림 3-23]는 열적으로 얇은 물질의 가열과정에 대해 나타낸다. 재료의 두께가

얇기 때문에 재료내부에서의 온도차는 거의 없는 것으로 가정하여 표면과 내부의 온도는 균일하다. 외부로부터 표면으로 도달하는 열 유속은 \dot{q}_E'' , 표면으로부터의 손실되는 열 유속은 \dot{q}_L'' 로 나타낸다. 물질의 온도가 상승하기 위해서는 $\dot{q}_E'' > \dot{q}_L''$ 이 되어야 하고 발화가 일어나기 위해서는 공급된 열 유속과 손실되는 열 유속의 차가 커야한다. 순열 유속(net heat flux)은 외부에서 공급 열 유속과 손실 열 유속의 차로 정의되고 재료내부에 저장되는 에너지를 의미한다. 여기서 재료의 밀도 ρ , 비열을 C_p , 두께를 l 로 정의한다.

Δt 시간동안 내부에 저장된 에너지는 두께 l 인 재료의 온도를 상승하는데 기여하였으므로 이를 수식화하면

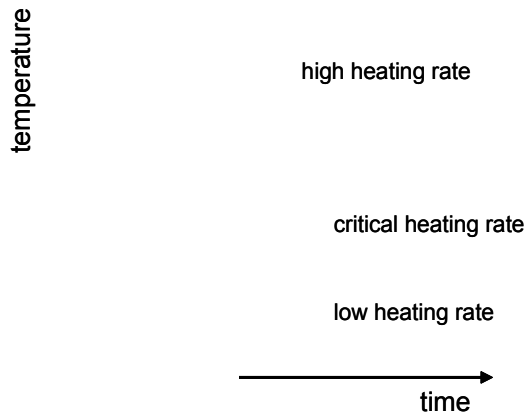
$$\dot{q}_{net}'' \Delta t = \rho C_p (T - T_\infty) l \quad (\text{식 3-7})$$

따라서 가해진 열에 의해 재료의 온도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = T_\infty + \frac{\dot{q}_{net}''}{\rho C_p l} \quad (\text{식 3-8})$$

재료의 표면온도가 물질의 점화온도(ignition temperature, T_{ig})에 도달하면 물질은 점화가 일어날 조건에 해당되고 이때 표면온도가 점화온도까지 상승하는데 걸리는 시간을 점화시간(ignition time)으로 정의한다.

[그림 3-24] 가열율에 따른 점화온도와 점화시간



시간당 물질내부에 저장되는 열에너지양을 가열율(heating rate)로 정의하면 가열율이 작은 경우 내부에 축적되는 에너지양이 적기 때문에 점화하는데 오랜 시



간이 걸리거나 점화가 일어나지 않을 수도 있다. 반면 가열율이 매우 큰 경우 물질내부에 저장되는 열에너지의 양이 크고 표면온도는 빠르게 상승하여 점화온도에 도달하면 점화가 일어나게 된다. 만일 물질내부의 온도가 점화온도 직전까지 가열될 경우 이를 임계 가열율(critical heating rate)로 정의한다.

물질의 점화가 일어나는 점화온도에 도달하게 하는 열 유속을 임계 열 유속(critical heat flux, \dot{q}_{crit}'')으로 정의하고 외부에서 가해지는 열 유속(\dot{q}_E'')이 임계 열 유속보다 큰 경우($\dot{q}_E'' > \dot{q}_{crit}''$), 점화조건을 초과한 열 유속은 다음과 같고 이를 식 3-7에 대입하면 주어진 열 유속 조건에서 점화시간을 계산할 수 있다.

$$\dot{q}'' = \dot{q}_E'' - \dot{q}_{crit}'' \quad (\text{식 3-9})$$

$$\Delta t = t_{ig} = \frac{\rho C_p l (T_{ig} - T_\infty)}{\dot{q}''} \quad (\text{식 3-10})$$

결론적으로 열적으로 얇은 물질의 점화는 점화온도에 선형적으로 비례함을 알 수 있다.

(예제 3-2) 밀도가 800 kg/m^3 , 비열이 2.38 kJ/kgK , 두께가 1 mm 인 어떤 목재판의 임계 열 유속이 20 kW/m^2 이다. 이 목재의 점화온도를 400°C 로 가정할 경우 가열조건이 $60 \sim 30 \text{ kW/m}^2$ 으로 변화할 때 점화시간을 비교하라.

임계 열 유속을 초과하여 제공된 열 유속은

$$\rho C_p l (T_{ig} - T_\infty) = 800 \times 2.38 \times 0.001 \times (400 - 20) = 724 \text{ kJ/m}^2$$

$$\dot{q}_E'' = 60 \text{ kW/m}^2 \text{인 경우, } t_{ig} = \frac{\rho C_p l (T_{ig} - T_\infty)}{\dot{q}''} = \frac{724}{60 - 20} \approx 18.1 \text{ s}$$

$$\dot{q}_E'' = 50 \text{ kW/m}^2 \text{인 경우, } t_{ig} = \frac{\rho C_p l (T_{ig} - T_\infty)}{\dot{q}''} = \frac{724}{50 - 20} \approx 24.1 \text{ s}$$

$$\dot{q}_E'' = 40 \text{ kW/m}^2 \text{인 경우, } t_{ig} = \frac{\rho C_p l (T_{ig} - T_\infty)}{\dot{q}''} = \frac{724}{40 - 20} \approx 36.2 \text{ s}$$

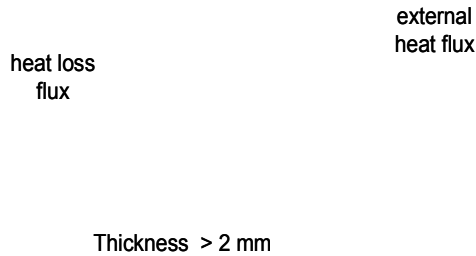
$$\dot{q}_E'' = 30 \text{ kW/m}^2 \text{인 경우, } t_{ig} = \frac{\rho C_p l (T_{ig} - T_\infty)}{\dot{q}''} = \frac{724}{30 - 20} \approx 72.4 \text{ s}$$

따라서 이를 도식적으로 나타내면 아래 표와 같다.

3

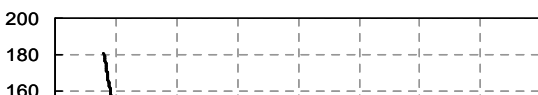
점화와
화염전파

[그림 3-25] 열적으로 두꺼운 물질의 가열



나) 열적으로 두꺼운 물질의 점화

[그림 3-25]는 열적으로 두꺼운 물질의 가열과정에 대해 나타낸다. 재료의 두께가 두껍기 때문에 재료내부에서 온도차가 존재하고 두께에 걸쳐 전도열전달이 이루어지기 때문에 표면과 내부의 온도는 균일하지 않다. 물질 표면에서의 외부로부터 공급되는 열 유속과 손실되는 열 유속의 차이인 순열 유속은 물질로 전도되어 표면의 온도를 상승시킨다. 가열되는 반대쪽 표면의 온도를 초기온도 (T_{∞})로 고정하고 2장에서 배운 열전도식에 대입하고 표면온도가 점화온도 일 때까지의 열 유속을 고려하면





$$\dot{q}'' = k \frac{dT}{dx} = k \frac{T_s - T_\infty}{dx} \approx k \frac{T_{ig} - T_\infty}{dx} \quad (\text{식 3-11})$$

$$l \sim dx = \frac{k(T_{ig} - T_\infty)}{\dot{q}''} \quad (\text{식 3-12})$$

식 3-12를 점화시간을 계산하는 식에 대입하면

$$\begin{aligned} t_{ig} &= \frac{\rho C_p (T_{ig} - T_\infty)}{\dot{q}''} \frac{k(T_{ig} - T_\infty)}{\dot{q}''} \\ &= k \rho C_p \left(\frac{T_{ig} - T_\infty}{\dot{q}''} \right)^2 \end{aligned} \quad (\text{식 3-13})$$

위의 식은 이론식으로 실제 점화시간과는 다소 차이가 발생하기 때문에 경험상수를 도입하여 위의 식을 다시 정리하면

$$t_{ig} = C k \rho C_p \left(\frac{T_{ig} - T_\infty}{\dot{q}''} \right)^2 \quad (\text{식 3-14})$$

C 값으로 $\frac{\pi}{4}$ 가 널리 이용되는데 C 값은 10^{-1} 의 크기 정도로 크게 변화하지 않는다. 반면에 $k \rho C_p$ 의 온도증가에 따라 열전도율과 비열이 증가하기 때문에 C의 영향은 $k \rho C_p$ 나 T_{ig} 의 영향에 비해 상대적으로 작다. [표 3-7]는 열적으로 두꺼운 고체 가연물의 열 유속에 따른 점화시간을 나타낸다. 열 유속이 증가함에 따라 점화시간은 단축되는데 $t_{ig} \propto \left(\frac{1}{\dot{q}''}\right)^2$ 의 관계를 가진다. 화재공간에서 전실화재(flashover)에 도달한 경우 연층의 평균온도는 약 500~600°C 정도이고 이때 연층으로부터의 복사열 유속은 약 20 kW/m² 정도이다. 따라서 20 kW/m²인 경우 바닥의 카펫재료는 약 2분 이내에 점화가 일어날 수 있음을 보여준다.

[표 3-8]는 일반적으로 널리 적용되는 건축재료의 점화온도와 임계 열 유속을 나타낸다. 목재가연물의 점화온도를 약 400°C 정도로 $k \rho C_p$ 를 약 0.5 정도로 가정하면 식 3-14에 의해 5분 이내에 점화가 일어나기 위해서 외부에서 가해져야 할 열량은 약 14 kW/m² 정도로써 임계 열 유속의 측정값과 비슷한 크기 정도를 보인다.

[표 3-7] 두꺼운 고체 가연물의 열 유속에 따른 점화시간

\dot{q}_E'' (kW/m ²)	t_{ig} [s]	materials
10	300	Plexiglas, Polyurethane foam, acrylate carpet
	70	Wool carpet
20	150	Paper on gypsum board
	250	Wood particleboard
30	5	Polyisocyanurate foam
	75	wool/nylon carpet
	150	Hardboard

점화와
화염전파

[표 3-8] 대표적인 건축 내장재료의 점화 물성

Materials	$k\rho C_p$ [kW.s/m ⁴ K ²]	T_{ig} [°C]	\dot{q}_{crit}'' [kW/m ²]
Plywood, plain(1.27 cm)	0.54	390	16
Plywood, FR(1.27 cm)	0.76	620	44
Hardboard(3.175 cm)	0.88	365	14
Hardboard(nitrocellulose paint)	0.79	400	17
Particleboard(1.27 cm stock)	0.93	412	18
Douglas Fir Particleboard(1.27 cm)	0.94	382	16
Fiber insulation board	0.46	355	14
Polyisocyanurate(5.08 cm)	0.02	445	21
Foam, rigid(2.54 cm)	0.03	435	20
Foam, flexible(2.54 cm)	0.32	390	16
Polystyrene(5.08 cm)	0.38	630	46
Polycarbonate(1.52 mm)	1.16	528	30
PMMA type C(1.27 cm)	1.02	378	15
Carpet #1(wool, stock)	0.11	465	23
Carpet(wool/nylon blend)	0.68	412	18
Carpet(aerylic)	0.42	300	10
Gypsum board, (common)(1.27 cm)	0.45	565	35
Gypsum board, wallpaper	0.57	412	18
Asphalt shingle	0.7	378	15
Fiberglass shingle	0.5	445	21
Glass reinforced polyster(2.24 mm)	0.32	390	16
Glass reinforced polyster(1.14 mm)	0.72	400	17
Aircraft pamel, epoxy fiberite	0.24	505	28

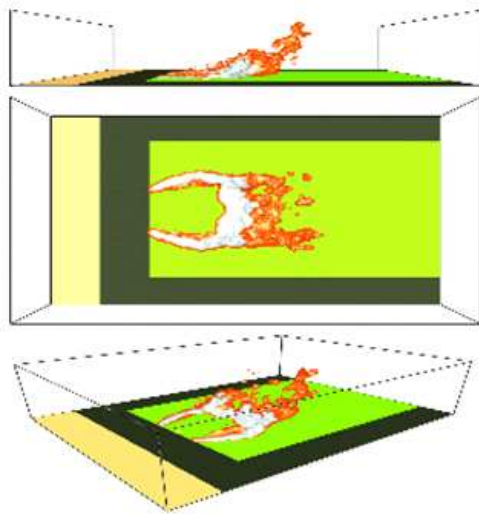


제2절 화염전파

- 학습 목표 01 고체가연물의 화염전파
- 02 액체연료의 화염전파

화재의 전개과정은 최초 점화가 일어난 점에서 화염이 가연물을 따라 얼마나 빠르게 전파되는지의 정도에 의존한다. 화염 전파과정은 점화이후의 화재가 가연물의 표면을 따라 확산되어 가는 비정상적인(unsteady) 연소과정이다. 화염전파는 재료의 화학적 조성과 같은 물리적 물성에 크게 의존할 뿐만 아니라 외기의 영향이나 중력에 대한 가연물의 방향등 다양한 인자에 의해 영향을 받는다. [그림 3-26]에서 보는 바와 같이 바람의 영향은 화염의 형상은 변화시키고 가연물로의 열적 피드백의 변화를 가져오기 때문에 가연물의 연소율에 직접적인 영향을 미치게 된다.

[그림 3-26] 외기에 의한 화염전파



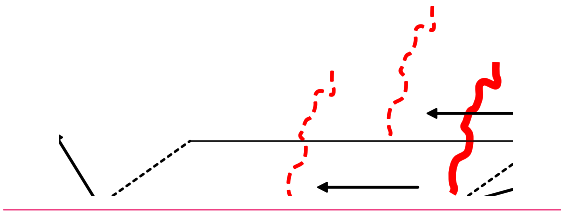
화염의 전파과정은 외풍 조건이 강제대류인 경우와 자연대류인 경우로 나눌 수 있고 강제대류인 경우, 외풍의 순방향 화염전파와 역방향으로의 화염전파로 구분할 수 있다. 한편 수직방향의 화염전파의 경우 부력에 의해 유입되는 공기가 외풍의 역할을 하기 때문에 상방향(upward) 화염전파와 하방향(downward)으로의 화염전파가 진행된다.

3

점화와
화염전파

화염확산을 모델링하는데 기본적인 인자는 점화온도(T_{ig})와 외부로부터의 가연물로 전달되는 에너지량에 기초한다. [그림 3-27]와 같이 화염으로부터 영향을 받지 않는 가연물의 온도를 T_s 라 하고 점화온도를 T_{ig} , 가연물의 두께 l , 가연물의 단면적 $A = W \cdot l$, 가연물의 밀도와 비열은 각각 ρ 와 C_p 로 표시한다. 이때 연소중인 영역으로부터 가연물로 전달되는 열에너지는 $\dot{q} = \dot{m} C_p \Delta T$ 이다.

[그림 3-27] 화염전파의 이상적인 모델



화염이 존재하는 부분의 온도는 점화온도(T_{ig})로 간주하여 화염이 V 라는 전파속도를 가지기 위해서는 공급되어진 열량이 단위시간당 AV 만큼의 체적을 점화시키는데 적용되어야 한다.

$$\dot{q} = \dot{m} C_p \Delta T = \rho A V C_p (T_{ig} - T_s) \quad (\text{식 3-15})$$

즉, 공급된 열에너지는 일정체적에 해당되는 가연물의 온도를 점화시키는데 필요한 온도까지 상승시키는 열에너지와 균형을 이루어야 한다. 따라서 화염의 전파속도는 다음과 같이 정리된다.

$$V = \frac{\dot{q}}{\rho A C_p (T_{ig} - T_s)} \quad (\text{식 3-16})$$



2.1 고체가연물의 화염전파

[그림 3-28]과 같이 외부유동에 의해 화염이 기울어진 경우 연소가 진행되고 있는 구간인 X_p 와 화염에 의해 가열되고 있는 구간인 δ_f 로 구분할 수 있다. 여기서 δ_f 는 외풍이 불어오는 방향으로 화염전파가 이루어지는 경우 화염 선단 앞쪽에 존재하기도 하고 기울어진 화염에 의한 열전달의 영향을 받는 길이가 되기도 한다. 가연물로 가해지는 열에너지는 가열영역으로 도달하는 화염면으로부터의 열 유속 \dot{q}'' 에 의존한다.

[그림 3-28] 역풍방향과 순풍방향으로의 화염전파

wind

wind



$$\dot{q} = \dot{q}'' \delta_f W \quad (\text{식 3-17})$$

식 3-16에 대입하여 화염전파 속도를 계산하면

$$V = \frac{\dot{q}'' \delta_f W}{\rho A C_p (T_{ig} - T_s)} = \frac{\dot{q}'' \delta_f}{\rho C_p l (T_{ig} - T_s)} \quad (\text{식 3-18})$$

중력의 방향이나 외풍의 영향은 가연물의 길이방향에 대해 화염에 의해 가열되는 길이 δ_f 와 화염의 열 유속 \dot{q}'' 에 의존한다. 외풍에 역방향으로의 화염전파에 대해 가열 길이는 수 mm 크기 정도이며 열 유속은 약 70 kW/m²이다. 반면 외풍에 순방향으로의 화염전파는 화염의 길이나 기하학적 형태, 화염에서 방출되는 복사에너지의 양등에 의존하고 일반적으로 화염영역에 0.2~2 m 정도까지 확장되는 화염에 대해 화염으로부터의 열 유속은 약 25 kW/m² 정도이다.

열적으로 얇은 물질에 대해 점화시간은 식 3-10에 언급한바와 같이

$$t_{ig} = \frac{\rho C_p l (T_{ig} - T_S)}{\dot{q}''}$$

이를 화염전파 속도식에 대입하면 화염전파는 가열 길이와 점화시간에 따라 결정됨을 알 수 있다.

$$V = \frac{\delta_f}{t_{ig}} \quad (\text{식 3-19})$$

열적으로 두꺼운 물질에 대해 적용하면, 열적으로 두꺼운 물질의 점화시간은 식 3-14와 같이 계산되고 이를 적용하면

$$V = \frac{\delta_f}{\frac{\pi}{4} k \rho C_p \left(\frac{T_{ig} - T_S}{\dot{q}''} \right)^2} = \frac{\frac{\pi}{4} (\dot{q}'')^2 \delta_f}{k \rho C_p (T_{ig} - T_S)^2} \quad (\text{식 3-20})$$

벽면의 아래방향이나 측면으로의 화염이 확대되는 경우 [그림 3-29], 두꺼운 벽면의 화염전파는 $(\dot{q}'')^2 \delta_f$ 에 의존하고 이는 외기 유동과 연료의 물성에 의존한다. 외기 유동의 영향이 없는 경우 $(\dot{q}'')^2 \delta_f$ 는 연료의 물성에만 의존하고 이를 Φ 라고 하면

$$V = \frac{\Phi}{k \rho C_p (T_{ig} - T_S)^2} \quad (\text{식 3-21})$$

역풍방향으로의 화염전파는 표면온도가 어떤 임계온도 이상에서만 일어나고 임계온도 이하의 표면온도에서는 화염전파가 일어나지 않는다. 따라서 역풍 방향으로의 화염전파가 일어나기 위한 최소표면온도를 $T_{S,\min}$ 정의한다.

[그림 3-29] 측면으로의 화염전파 실험





2.2 액체연료의 화염전파

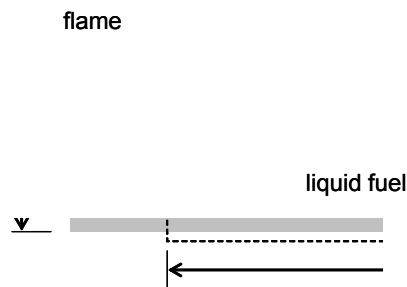
[표 3-9] 측면 화염전파에 관한 물성값 (ASTM E 1321)

Materials	T_{ig} [°C]	$k\rho C_p$ [kW ² s/m ⁴ K ²]	Φ [kW ² /m ³]	T_{Smin} [°C]
Wood fiber board	355	0.46	2.3	210
Wood hardboard	365	0.88	11	40
Plywood	390	0.54	13	120
PMMA	380	1	14.4	< 90
Flexible foam plastic	390	0.32	11.7	120
Rigid foam plastic	435	0.03	4.1	215
Acrylic carpet	300	0.42	9.9	165
Wallpaper on plasterboard	412	0.57	0.8	240
Asphalt shingle	378	0.7	5.4	140
Glass reinforced plastic	390	0.32	10	80

액체연료의 수평적인 화염전파는 액체연료내부에 대류열전달이 존재하고 열해리 과정이 없이 열역학적인 증발에 의해 연료증기를 생성하기 때문에 고체가연물의 화염전파 메커니즘과 구별된다. 특히 액체연료의 온도상승에 따라 액체의 표면장력은 감소하게 되고 이로 인해 화염이 가열되지 않은 액체 쪽으로 이끌리게 된다.

[그림 3-30]에서 보는 것처럼 정상상태의 얇은 연료두께 l 에 대해 제어체적(control volume)내 점성력은 표면장력과 균형을 이루고 있다.

[그림 3-30] 액체표면을 따른 화염전파 메커니즘



액체 연료 내 깊이방향으로의 전단응력(shear stress)는 연료표면을 따라 표면장력 구배와 균형을 이루고 있으므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau = \frac{d\sigma}{dx} = \frac{d\sigma}{dT} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{식 3-22})$$

액면의 두께(l)가 매우 얇은 경우 표면장력의 영향은 연료두께에 대해 전단력이 거의 일정한 Couette flow의 형태를 보인다.

$$\tau = \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0} \approx \mu \frac{V}{l} \quad (\text{식 3-23})$$

여기서 μ 는 액체의 점성계수를 나타낸다. 전단력은 표면에서의 표면장력의 구배이므로

$$\frac{d\sigma}{dx} = \mu \frac{V}{l} \quad (\text{식 3-24})$$

따라서 표면장력은 액체의 온도의 함수이므로 표면의 길이 δ_f 에 따른 화염전파속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

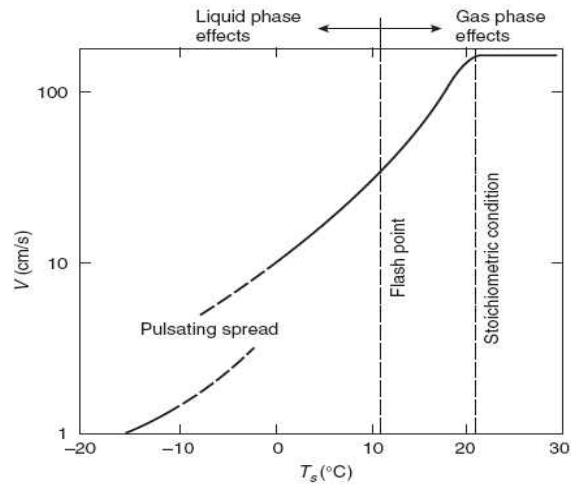
$$V = \frac{\sigma(T_s) - \sigma(T_{ig})l}{\mu \delta_f} \quad (\text{식 3-25})$$

액면의 두께가 두꺼운 경우 l 은 다음과 같이 계산된다.

$$l = \sqrt{\left(\frac{\mu}{\rho} \right) \left(\frac{\delta_f}{V} \right)} \quad (\text{식 3-26})$$

[그림 3-31]은 액체 메탄올의 표면을 따른 화염전파 특성을 나타낸다. 액체 표면의 온도가 인화점보다 낮은 경우 화염전파는 액체연료내의 수송현상에 따라 이루어지고 액체 표면 온도가 인화점 이상인 경우 액체의 표면상에서 가연성 혼합기가 형성되기 때문에 화염전파는 기상의 화염전파 메커니즘에 의해 이루어진다.

[그림 3-31] 메탄올 액체 표면을 따른 화염전파



4 연소율과 발열량

연소율과 발열량

점화는 화재 성장의 시작단계로서 점화 이후 형성된 화염의 연소과정으로 인해 가연물의 질량은 지속적으로 감소하게 된다. 지속적인 화염의 성장은 화염전파(flame spread)로 이어지고 화염의 경계는 확대된다. 일반적으로 단위시간당 화재에서 연소되는 연료의 질량을 연소율(burning rate)로 정의하고 연소율은 화재강도(fire size)와 직접적으로 관련되어 있기 때문에 화재를 정량적으로 평가하는데 매우 중요한 인자이다. 화재의 발열량(heat release rate)는 화재의 크기 혹은 강도를 나타내며 단위시간당 화재로부터 방출된 에너지로 정의된다. 본 장에서는 발생한 화재의 규모를 정량적 나타내는 인자인 연소율과 발열량에 대해 설명하고 화재 강도를 정량화 하는 방법에 대해 학습한다.

제1절 연소율(burning rate)과 연소열(burning heat)

- 학습 목표**
- 01 연소율의 기본개념
 - 02 액체 풀화재 (liquid pool fire)
 - 03 연소열(heat of combustion)

1.1 연소율의 기본 개념

점화에 의해 생성된 화염은 가연물에 지속적인 열에너지를 공급하고 가연물로부터 연료증기(fuel vapor)를 생성하며 화염을 유지하게 된다. 이러한 연료증기는 가연물로부터의 증발이나 열해리 등에 의해 발생된 것으로 화재가 지속됨에 따라 가연물의 질량은 감소하게 된다. 따라서 가연물에서 생성된 연료증기의 양은 가연물의 질량감소와 같아야 하며 이러한 시간에 따른 가연물의 질량변화를 질량감소율(mass loss rate)로 정의한다.

연소율(burning rate)는 단위시간당 화재에서 연소된 연료의 양을 의미하는 것으로 질량감소율과 매우 유사한 개념이나 가연물에서 생성되는 연료가 모두 연소되지 않고 타지 않은 연료증기형태로 존재하는 경우에는 질량감소율과 연소율이 차이를 보인다. 두 가지 용어



모두 유사한 의미로 사용이 되지만 질량감소율은 가연물의 관점에서, 연소율은 연소되는 화염의 관점에서 타는 양을 정량적으로 표현하는 용어이다. 특별한 언급이 없는 한 대부분의 경우 두 용어는 혼용해서 사용하며 본 교재에서도 감소된 질량은 모두 연소된다고 가정하여 질량감소율과 연소율일 동일하게 취급한다.

[그림 4-32]에서와 같이 가연물을 저울에 두고 점화시킨 후 저울을 이용하여 질량변화를 관찰하는 경우 가연물의 연소율은 다음과 같이 산정된다.

[그림 3-32] 연소율과 화염전파

Flame spread

Ignition

Burning rate

$$\dot{m}_f = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad [kg/s] \quad (\text{식 4-1})$$

여기서, Δm 은 t_1 과 t_2 시간동안의 질량변화를 나타낸다.

[그림 4-33]에서 보는 것처럼 점화에 의해 화염이 형성된 이후 지속적인 에너지순환 (energy feedback)을 통해 가연물로의 열전달이 이루어진다. 즉, 연료표면에서는 화염으로부터의 대류 및 복사열전달과 함께 외부로부터의 지속적인 열전달이 이루어지게 된다. 연료표면에서는 복사열의 반사나 온도상승에 따른 재복사(re-radiation)가 일어나고 연료표면의 열은 전도열전달을 통해 가연물 내부로 전달된다. 이러한 에너지 전달 메커니즘에 의해 가연물로의 에너지 공급이 증가하게 되면 가연물에서의 증발이나 열해리가 증가하기 때문에 연소율도 함께 증가하게 되는데 공급되는 에너지에 비해 손실되는 에너지가 커지는 경우에는 연소율이 감소하게 된다. 따라서 가연물의 연소율은 시간에 따라 변화하는 비정상 (unsteady)적인 형태를 보이는데 일반적으로 연소율은 가연물의 물성, 타는 방향이나 연소 형태 그리고 위치에 따라 달라진다. 가연물의 연소율은 시간뿐만 아니라 위치에 따라서 차이가 나기 때문에 타고 있는 면적에 대한 평균적인 연소율을 적용하는 것이 편리한 경우가

많다. 연소플럭스(burning flux)는 단위면적당의 연소율($\text{kg/m}^2\text{s}$)로 정의되고 다음과 같이 나타낸다.

$$\dot{m}_f'' = \frac{\dot{m}_f}{A} \quad (\text{식 4-2})$$

연소율과
발열량

[그림 3-33] 연료표면에서의 에너지 전달

fuel vapor
(gas)

여기서 A 는 연소면적(m^2)을 나타낸다. 다시 말해, 가연물의 연소율은 미소면적에 대한 연소플럭스를 전체 타는 면적에 대해 적분함으로써 얻을 수 있다.

$$\dot{m}_f = \int \dot{m}_f'' dA \quad (\text{식 4-3})$$

일반적인 고체 혹은 액체 연료의 확산화염에 대한 연소율은 가연물의 표면으로부터의 생성되는 가연성기체(volatile gas)의 생성율과 같고 이는 [그림 3-33]에서 설명한바와 같이 화염으로부터 연료로의 열전달과 직접적인 관련이 있다. 연료표면에서의 에너지 균형을 고려하면 화염으로부터 공급되는 열 유속(\dot{q}_F'')과 연료표면에서의 열손실(\dot{q}_L'')의 차는 순수하게 연료표면으로 공급되는 순 열전달량이 되고 그 만큼의 열량이 가연성 기체를 생성하게 된다. 연료표면에서의 에너지 균형을 고려하여 연소열은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{m}_f'' = \frac{\dot{q}_F'' - \dot{q}_L''}{\Delta h_g} \quad (\text{식 4-4})$$

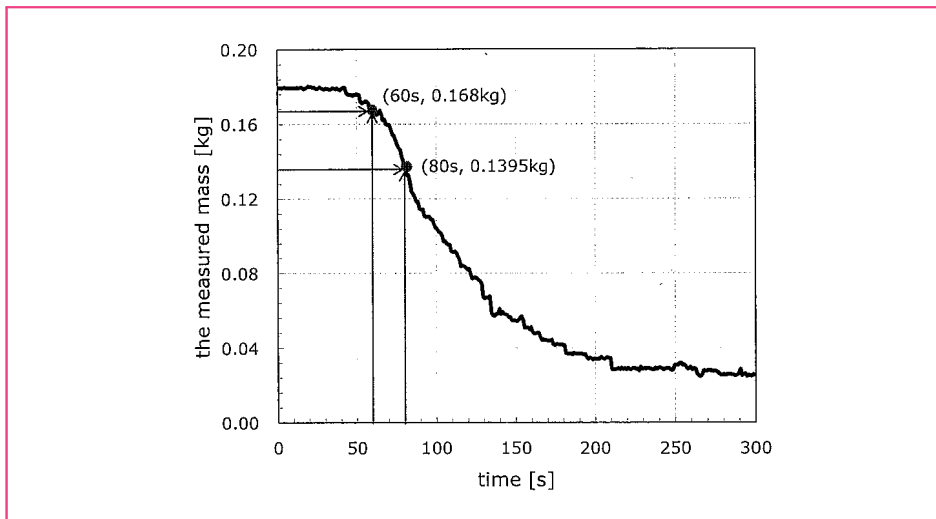
여기서 Δh_g 는 가연성 기체를 생성하는데 필요한 열로써 연료가 고체일 경우 기화열(heat of gasification)으로, 액체연료의 경우 증발잠열(heat of vaporization)로 표현된다.



대부분의 경우 연소율을 직접 측정하고자 하는 경우 로드셀(load cell)을 이용하여 가연물 시편을 직접 연소시키고 시간에 따른 질량변화를 계측함으로써 연소율을 측정한다.

(예제 4-1) 가연물의 질량이 약 180 g 인 물질을 로드셀 위에서 연소시켜 [그림 3-34]에서 보는바와 같이 시간에 따라 질량변화를 측정했을 때 60초 와 80초 사이의 시간변화는 20 초이고 이 시간동안의 질량변화가 0.0285 g 이면 이 시간간격 동안의 연소율은 다음과 같이 계산된다.

[그림 3-34] 가연성 물질의 시간에 따른 질량변화의 측정값



$$\dot{m}_f = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1} = \frac{0.0285 \text{ kg}}{20 \text{ s}} = 0.001425 \text{ kg/s}$$

따라서 연소율은 0.001425 kg/s 가 된다.

1.2 액체 풀화재 (liquid pool fire)

산업설비나 차량등과 같이 액체 연료를 에너지원으로 사용하는 시스템에서 연료가 누출 될 경우 일부연료는 대기 중에서 증발되어 혼합연료의 가연성 혼합기를 형성하거나 외부 에너지에 의해 점화하여 급속한 화염확산을 야기하기 때문에 매우 위험한 화재의 형태로 간주된다. 뿐만 아니라 화재실험에서는 물성이 잘 알려진 액체연료를 이용하여 제한된 용기 내에 화재를 발생시켜 모의 화재를 구현하는 풀화재(pool fire)가 널리 사용된다. 풀화재는 화재의 크기가 연료의 종류와 화원의 크기(풀의 직경)에 의해 결정되기 때문에 원하는 규모

의 화재크기를 인위적으로 만들 수 있다. 또한 화원의 면적이 풀의 크기로 제한되어 정량적인 화재를 형성할 수 있을 뿐만 아니라 비교적 짧은 시간에 정상상태의 화재를 형성할 수 있기 때문에 많은 화재관련 연구 및 시험방법에 널리 이용되고 있다. 화원의 직경이 0.2 m 이상인 대부분의 풀화재에서의 연소율은 [그림 3-35]에서 보는 것과 같이 화원의 직경이 증가함에 따라 증가하고 일정크기 이상에서는 연소율이 화원에 직경에 변화에 독립적인 최대연소율(\dot{m}_f'' , maximum burning rate)에 도달하게 된다.

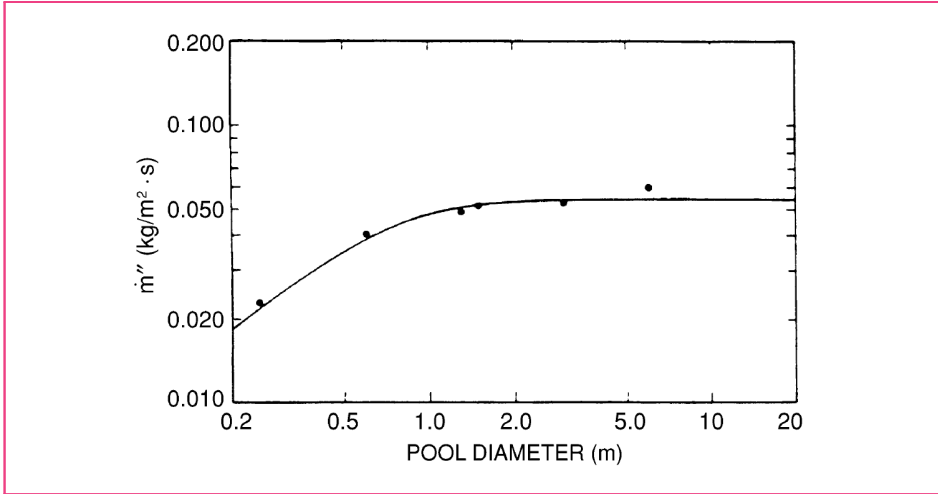
일반적으로 자유연소(free burning)상태에서 풀화재의 연소율은 화원의 직경뿐만 아니라 화염으로부터 연료표면으로의 복사열 유속과 관련된 화염의 소멸-흡수계수(κ , extinction absorption coefficient)와 연료의 특성과 관련된 평균 관경로 보정계수(θ , mean beam length corrector)에 의해 결정된다. 대부분의 경우 소멸-흡수계수와 평균 관경로 보정계수는 곱의 형태로 연료의 물성처럼 인식된다. 많은 자유연소상태의 실험으로부터 Zabetakis와 Burgess는 액체연료의 직경에 따른 연소율은 다음과 같은 관계식을 제시하였다.

$$\dot{m}_f'' = \dot{m}_{f,\infty}'' (1 - e^{-\kappa\theta D}) \quad (\text{식 4-5})$$

여기서 \dot{m}_f'' 와 $\kappa\theta$ 는 연료의 종류에 의존하는 것으로 실험에 의해 측정된 값을 적용한다. [표 3-10]은 가연성 연료의 주요 물성값을 나타낸다.

알콜계열의 연료의 경우 화염에서 생성되는 그을음(soot)이 거의 없어 화염에서 연료표면으로의 복사열전달이 매우 적기 때문에 연소율은 직경에 관계없이 거의 일정하고 연소효율(combustion efficiency)은 매우 높다. 그러나 절연유나 중유(heavy fuel)등과 같이 그을음이 상대적으로 많은 화염에서는 연소율이 화원의 직경에 크게 의존하고 연소효율은 상대적으로 낮게 된다.

[그림 3-35] 휘발유 화재의 풀직경에 따른 연소율변화



(예제 4-2) 직경이 2 m 인 드럼통에 헵탄이 가득 차 있고 드럼통의 상부는 개방되어 액체 표면에서 연소가 일어나고 있다. 드럼통에 100 리터의 헵탄이 차 있는 경우 헵탄화재의 연소율과 드럼통내에 모든 헵탄이 연소되는데 걸리는 시간은 얼마인가?

헵탄의 밀도 675 kg/m^3 , 최대연소율은 $0.101 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $\kappa\theta$ 는 1.1 이다.

헵탄의 연소율은 Zabetakis와 Burgess의 상관관계식을 적용하여

$$\dot{m}_f'' = \dot{m}_f''(1 - e^{-\kappa\theta D}) = 0.101 \times (1 - e^{-1.1 \times 2}) = 0.0898 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

단위시간당 단위면적당 0.0898 kg 씩 연소된다.

단위시간당 연소되는 헵탄의 질량

$$\dot{m}_f = \dot{m}_f'' A = 0.0898 \times \frac{\pi 2^2}{4} = 0.282 \text{ kg/s}$$

드럼통에 들어있는 전체 헵탄의 질량

$$m_{CHM6} = \rho V = 675 \text{ kg/m}^3 \times 0.1 \text{ m}^3 = 67.5 \text{ kg}$$

단위시간당 0.282 kg씩 소모되기 때문에 67.5 kg 의 연료가 모두 연소되는데 걸리는 시간

$$t = \frac{m_{CHM6}}{\dot{m}_f} = \frac{67.5}{0.282} \approx 240 \text{ s}$$

연소율이 드럼통의 기하학적 조건에 제약을 받지 않는다고 가정할 경우 정상상태의 연소율을 적용하여 드럼통내의 연료가 모두 연소되는 데는 약 240초 정도가 걸릴 것으로 예상된다.

[표 3-10] 가연성 연료의 주요 물성값

Material	Density (kg/m ³)	heat of gasification (kJ/kg)	heat of combustion (MJ/kg)	max. burning rate (kg/m ² s)	$\kappa\theta$ (1/m)
Cryogenics					
Liquid H ₂	70	442	120	0.017 (±0.001)	6.1 (±0.4)
LNG(CH ₄)	415	619	50	0.078 (±0.018)	1.1 (±0.8)
LPG(C ₃ H ₈)	585	426	46	0.099 (±0.009)	1.4 (±0.5)
Alcohols					
Methanol(CH ₃ OH)	796	1195	20	0.015 (D<0.6m)	
Ethanol(C ₂ H ₅ OH)	794	891	26.8	0.022 (0.6m<D<3m)	
				0.029 (3.0m<D)	
Simple organic fuels					
Butane(C ₄ H ₁₀)	573	362	45.7	0.078 (±0.003)	2.7 (±0.3)
Benzene(C ₆ H ₆)	874	484	40.1	0.085 (±0.002)	2.7 (±0.3)
Hexane(C ₆ H ₁₄)	650	433	44.7	0.074 (±0.005)	1.9 (±0.4)
Heptane(C ₇ H ₁₆)	675	448	44.6	0.101 (±0.009)	1.1 (±0.3)
Xylenes(C ₈ H ₁₀)	870	543	40.8	0.090 (±0.007)	1.4 (±0.3)
Acetone(C ₃ H ₆ O)	791	668	25.8	0.041 (±0.003)	1.9 (±0.3)
Dioxane(C ₄ H ₈ O ₂)	1035	552	26.2	0.018	5.4
Diethyl ether(C ₄ H ₁₀ O)	714	382	34.2	0.085 (±0.018)	0.7 (±0.3)
Petroleum products					
Benzine	740	—	44.7	0.048 (±0.002)	3.6 (±0.4)
Gasoline	740	330	43.7	0.055 (±0.002)	2.1 (±0.3)
Kerosene	820	670	43.2	0.039 (±0.003)	3.5 (±0.8)
JP-4	760	—	43.5	0.051 (±0.002)	3.6 (±0.1)
JP-5	810	700	43	0.054 (±0.002)	1.6 (±0.3)
Transformer oil, hydrocarbon	760	—	46.4	0.039	0.7
Fuel oil, heavy	940-1000	—	39.7	0.035 (±0.003)	1.7 (±0.6)
Crude oil	830-880	—	42.5 - 42.7	0.022 - 0.045	2.8 (±0.4)
Solids					
PMMA	1184	1611	24.9	0.020 (±0.002)	3.3 (±0.8)
Polypropylene(C ₃ H ₆) _n	905	2030	43.2		
Polystyrene(C ₈ H ₈) _n	1050	1720	39.7		



1.3 연소열(heat of combustion)

연소열(Δh_c)은 단위질량의 연료가 완전연소(complete combustion)하는 과정에서 발생하는 열에너지를 의미하고 kJ/kg 의 차원을 가진다. 일반적으로 연소열은 물질의 물성(property)으로 생성물(products)와 반응물(reactants)의 생성엔탈피차(enthalpy of formation)에 의해 이론적으로 계산할 수도 있고 bombe열량계를 이용하여 직접 측정이 가능하다. 따라서 어떤 물질이 탈 때 연소열을 알 수 있다면 그 물질의 연소열을 적용하여 화재로부터 방출되는 에너지, 즉 이론적인 발열량을 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$\dot{Q} = \dot{m}_f \Delta H_c = \dot{m}_f A \Delta H_c \quad (\text{식 4-6})$$

일반적으로 탄화수소계 연료(hydrocarbon fuel)의 완전연소과정은 연료의 탄소원자가 CO₂로, 수소원자는 H₂O(water vapor)로 변환된다. 그러나 대부분의 화재는 불완전 연소과정으로 이산화탄소와 수증기이외에 일산화탄소나 그을음(soot)과 같은 부가적인 연소생성물을 형성하게 된다. 따라서 실제 화재의 경우 완전연소과정에서 산정된 연소열을 직접 적용하기에는 무리가 있고 불완전 연소상태에서의 연소열을 고려하는 것이 보다 합리적이다. 실제화재의 경우 개략적으로 연료 질량 대비 약 70~80% 정도의 만이 완전연소 되는 것으로 알려져 있기 때문에 연소열을 산정하는 과정에 불완전 연소과정에 대한 고려가 필요하다. 따라서 실제화재의 연소열은 이러한 연소과정의 불완전성을 연소효율(η , combustion efficiency)로 고려한 유효연소열($\Delta H_{c,eff}$, effective heat of combustion)을 사용한다.

$$\Delta H_{c,eff} = \eta \Delta H_c \quad (\text{식 4-7})$$

다시 말해 연소효율은 완전연소열에 대한 유효연소열의 비로 정의되고 항상 1보다 작은 값을 가지게 된다. 앞서 연소열에서 언급한 바와 같이 알콜계열의 연료나 메탄(CH₄)과 같이 거의 그을음(soot)을 형성하지 않는 연료의 화재 시 연소효율은 1에 가깝지만 다른 연소열의 그을음을 형성하는 대부분의 탄화수소계 연료나 유류 등의 자연연소의 경우 연소효율은 크게 감소하여 약 0.6~0.7 정도의 값을 가연료의 그러나 공간이 제한되고 공급되는 공기의 양이 상대적으로 적은 경우 연소효율은 이보다 더 작은 값을 가진다. 따라서 가연물의 유효 발열량은 유효연소열이나 연소효율의 개념을 적용하여 산정한다.

$$\dot{Q} = \dot{m}_f \Delta H_{c,eff} = \dot{m}_f \eta \Delta H_c \quad (\text{식 4-8})$$

(예제 4-3) 휘발유를 수송하던 탱크로리에서 사고가 발생하여 연료 누출과 함께 화재가 발생하였다. 탱크로리 내에 있던 휘발유의 양은 10,000 리터이고 탱크에서 새어나온 연료가 원형으로 도로면 10 m²에 걸쳐 연소되고 있다고 가정할 경우 이 화재로부터 방출되는 유효 발열량과 탱크로리의 연료가 모두 연소되는데 걸리는 시간은 얼마인가? (휘발유의 밀도는 740 kg/m³, 최대연소율은 0.055 kg/m²s, $\kappa\theta$ 는 2.1, ΔH_c 는 43,700 kJ/kg, 연소효율은 0.7로 가정한다)

유효발열량은

$$\dot{Q} = \dot{m}_f \eta \Delta H_c$$

10 m²의 면적에서 연소되는 경우 연소되는 직경은

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 10}{\pi}} = 3.57 \text{ m}$$

휘발유의 연소율은 Zabetakis와 Burgess의 상관관계식을 적용하여

$$\dot{m}_f'' = \dot{m}_f'' (1 - e^{-\kappa\theta D}) = 0.055 \times (1 - e^{-2.1 \times 3.57}) = 0.055 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

발열량을 계산하면

$$\dot{Q} = 0.055 \times 10 \times 0.7 \times 43,700 \approx 16,800 \text{ kW}$$

따라서 화재로부터 방출되는 열은 약 17 MW 정도이다.

제2절 발열량(heat release rate)과 화재성장(fire growth)

- 학습 목표**
- 01 발열량 (HRR, heat release rate), 발열량의 측정
 - 02 실제 가연물의 발열량
 - 03 화재의 성장

2.1 발열량 (HRR, heat release rate)



화재의 크기정도를 나타내는 발열량은 화재 위험의 정도를 평가하고 방화설계를 위한 가장 기본적이고 필수적인 인자로 인식되고 있다. 발열량은 단위시간당 화재로부터 방출되는 열량(에너지량)으로 정의되고 단위는 kJ/s 즉, 동력의 단위인 kW를 사용한다. 발생한 화재의 규모에 따라서 W(watt), kW(kilowatt), MW(megawatt)의 단위를 이용하여 정량적으로 나타낸다. [표 3-11]는 몇 가지 화원 및 에너지원에서 방출되는 에너지의 크기정도를 개략적으로 나타낸다.

대부분의 일반건축물 화재의 경우 발열량의 크기정도는 화재공간의 크기와 기하학적 형상, 가연물의 종류와 양에 따라 다르지만 개략적으로 1~10² MW 크기정도를 가진다. 이러한 발열량은 화염 높이나 주변으로의 복사열전달, 화재성장이나 전실화재로의 발달등과 직접적으로 관련이 있을 뿐만 아니라 화원으로부터 생성되는 연기의 양이나 연소가스의 생성량과도 관련 있기 때문에 화재위험에 대한 잠재적 지표로 인식된다.

일상에서 사용되는 대부분의 고체가연물은 [그림 3-36]에서 보는바와 같이 초기 발화로 인해 화재가 시작되고 화염으로부터의 열순환(heat feedback)이 증가함에 따라 가연물의 연소율은 증가하며 초기 화재의 발열량 증가를 유도한다. 초기화재는 열순환의 확대 및 연소율 증가로 인해 발열량이 급격히 증가하고 최대발열량에 도달하여 약 100초 정도 동안 최성기화재를 유지한다. 그러나 탈 물질의 양이 감소함에 따라 발열량은 감소하고 최종적으로 화재는 소화된다.

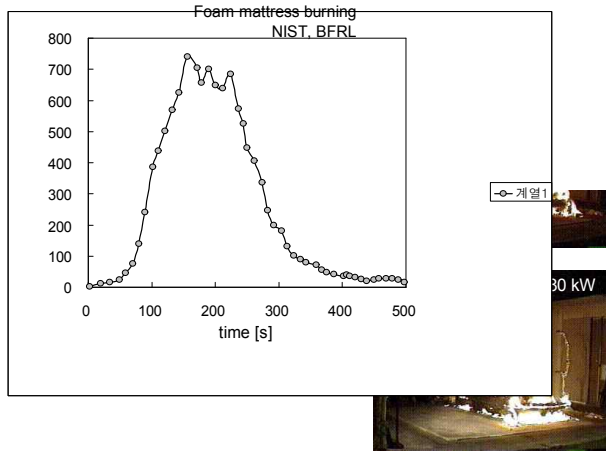
[표 3-11] 다양한 에너지원에서 방출되는 에너지정도

방출되는 에너지원	에너지 정도
타고 있는 담배에서 방출되는 에너지	5 W
백열등에서 방출되는 에너지	60 W
정상적인 활동상태의 사람에서 방출되는 에너지	100 W
직경이 20 cm인 휘발유 풀에서의 발열량	25 kW
직경이 1 m인 휘발유 풀에서의 발열량	1.5 MW
승용차 화재의 최대발열량(PIARC)	~5 MW
탱크로리 화재에서 방출되는 최대발열량(PIARC)	~100 MW
핵발전소의 한 개 반응로에서 방출되는 에너지	500~1000 MW

[그림 3-36] 매트리스 연소과정중의 발열량 변화와 화재성상 (미국립표준기술연구원)

4

연소율과
발열량



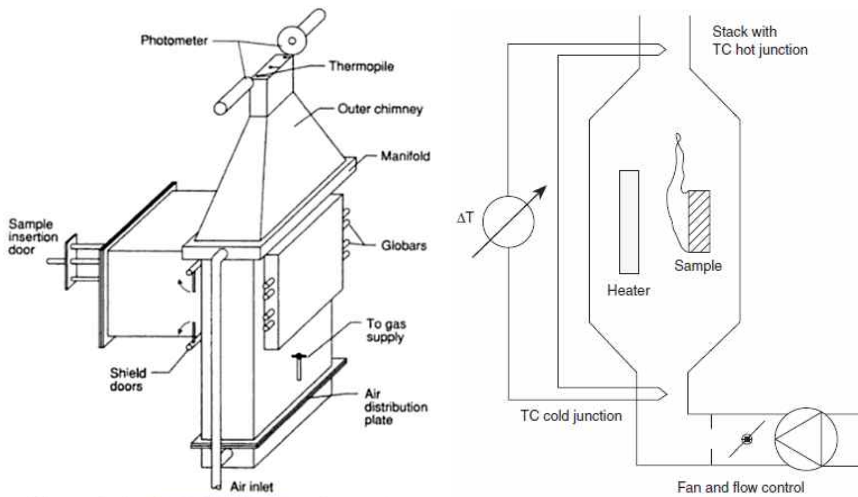


2.2 발열량의 측정

발열량을 평가하는 가장 손쉬운 방법은 앞서 언급한바와 같이 가연물의 연소열을 측정하고 가연물의 연소열을 고려하여 산정하는 것이다. 이러한 가연물의 물성에 기초한 발열량 산정방법은 가연물이 단일 물질이거나 물성이 잘 알려진 경우에는 비교적 효과적으로 화재 발열량을 산정할 수 있으나 가연물이 복합물질로 이루어진 경우 그 복합물질을 이루고 있는 개별 물질들 가운데 어떤 물질이 얼마나 타고 있는지 산정하기 어렵고 이로 인해 정확한 발열량을 산정하는데 한계가 발생하게 된다.

가연물이 연소되는 동안 발열량을 측정하는 장치를 칼로리미터(calorimeter)라 한다. 화재로부터의 발열량을 측정하는 방법에는 크게 두 가지 방법이 있는데 화재로부터 발생한 열을 직접 계측하는 엔탈피 상승법(sensible enthalpy rise method)을 적용하는 경우와 연소과정 중에 소모된 산소의 양을 측정하고 산소의 연소열을 고려하여 발열량을 산정하는 산소소모법(oxygen consumption method)으로 나눌 수 있다.

[그림 3-37] OSU 칼로리미터의 개략도 (ASTM E 906)



엔탈피 상승법을 적용한 대표적인 칼로리미터는 1972년 E. E. Smith에 의해 고안된 OSU 칼로리미터(Ohio State University Calorimeter)로써 ASTM E 906 시험법으로도 불린다[그림 3-37]. 엔탈피 상승법은 기본적으로 잘 단열된 폐쇄형 공간내의 가연물에서 발생된 열은 연소과정을 거친 후 발생된 연소생성물의 엔탈피와 공간으로 유입되는 공기의 엔탈피의 차로써 나타낼 수 있다. 그러나 실제로는 가연물에서 발생된 복사열의 영향이 상대적으로 큰 경우, 연소과정을 통해 방출된 열이 모두 엔탈피 상승에 기여하는 것은 아니기

때문에 공간내부의 고체에 흡수되거나 외부로 유출될 수 있으므로 엔탈피 차이가 정확히 실제 발열량이 되지는 않는다. 따라서 이러한 열손실의 영향은 연소가스의 유량을 알고 있는 기준버너(calibration burner)를 이용하여 보정계수(calibration factor)를 산정하고 이를 적용함으로써 실제 가연물의 발열량을 측정하게 된다.

연료가 산소와 만나 연소과정을 통해 연소생성물을 형성하는데 연료의 연소율에 기초한 접근방법은 연료의 소모량에 연료의 연소열을 고려하여 발생된 열량을 평가하였다. 이는 연소과정에서 소모된 산소의 양에 산소의 연소열을 고려하면 마찬가지로 반응과정에서 발생된 열량을 산정할 수 있다.

$$\dot{Q} = \dot{m}_{O_2} \Delta H_{c,O_2} \quad (\text{식 4-9})$$

여기서 \dot{m}_{O_2} 는 산소의 질량유량, $\Delta H_{c,O_2}$ 는 산소의 연소열을 나타낸다. 1917년 Thornton은 대부분의 유기연료에 대해 완전 연소 시 소모된 산소의 단위 질량당 발생된 열량(산소의 연소열)이 거의 일정하다는 사실을 발견하였다. 이후 Hugget은 대부분의 유기물질의 연소과정에서 산소의 단위질량당 발생하는 열(산소의 연소열)이 거의 일정하다는 사실을 파악하였다. 특히, 연료가 C, H, N, O 등으로 이루어진 유기물의 경우 산소의 연소열이 약 13,100 kJ/kg정도로 일정하며 이 값은 대부분의 유기물에 대해 약 $\pm 5\%$ 의 정확도를 가지는 것으로 알려져 있다. 이러한 원리에 기초하여 연소과정 중에 소모된 산소의 양을 계측하여 발열량을 측정하는 산소소모법이 제시되었다. 이 방법은 화재에서 발생된 열을 직접 측정하는 방법이나 연소된 연료의 양을 측정하는 방법에서 벗어나 연소과정 중에 소모된 산소의 양을 측정함으로써 연소 상태에 관계없이 화재의 발열량을 측정할 수 있고 이러한 방식으로 측정된 발열량을 화학적 발열량(chemical heat release rate)라고도 부른다.

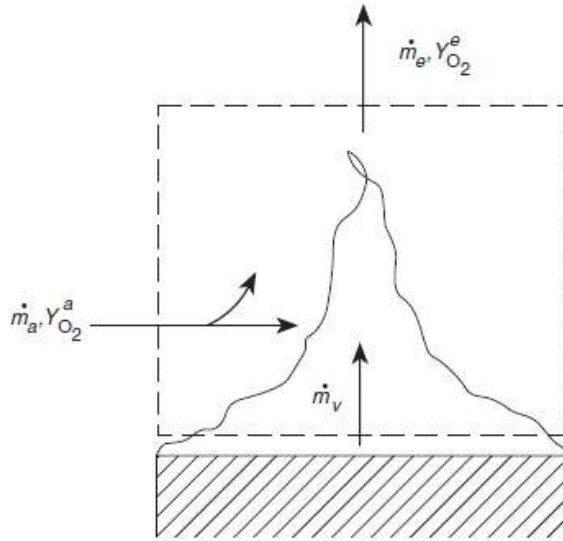
산소소모법에서 발열량은 다음과 같이 정의된다.

$$\dot{Q} = \Delta H_{c,O_2} (\dot{m}_{O_2}^o - \dot{m}_{O_2}^e) = \Delta H_{c,O_2} (\dot{m}_a Y_{O_2}^a - \dot{m}_e Y_{O_2}^e) \quad (\text{식 4-10})$$

여기서 $\Delta H_{c,O_2}$ 는 산소의 연소열(kJ/kg)을 나타내고 \dot{m}_a 는 유입되는 공기의 질량유량, \dot{m}_e 는 배기시스템을 통해 유출되는 배기가스의 질량유량을 나타낸다.



[그림 3-38] 화원부에서의 산소의 유입과 유출



$\dot{m}_{O_2}^o$ 와 $\dot{m}_{O_2}^e$ 는 화원으로 유입되는 산소의 질량유량과 화재에서 발생한 연소가스가 배기시스템을 통해 시스템을 빠져나가는 산소의 질량유량으로 정의되고 $Y_{O_2}^a$ 는 유입 공기중의 산소의 질량분율, $Y_{O_2}^e$ 배기가스 내 산소의 질량분율을 나타낸다. 일반적으로 개방 시스템의 경우 유입되는 산소의 질량유량을 산정하는데 어려움이 있기 때문에 대부분의 경우 산소소모계수(oxygen depletion factor) 개념을 도입한다. 이는 외부에서 화재로 유입되는 공기의 양을 직접 측정하는 것이 거의 불가능하기 때문에 공기 중 질소가 연소과정에 참여하지 않고 배기시스템에서 연소생성물이 N_2 , CO , CO_2 , H_2O , O_2 만 존재한다고 가정하면 산소소모계수는 측정 가스의 체적분율에 의해 다음과 같이 정리된다.

$$\phi = \frac{\dot{m}_{O_2}^o - \dot{m}_{O_2}^e}{\dot{m}_{O_2}} = \frac{X^{o_{O_2}} \cdot (1 - X_{CO_2} - X_{CO}) - X_{O_2} \cdot (1 - X_{CO_2}^o)}{(1 - X_{O_2} - X_{CO_2} - X_{CO}) \cdot X_{O_2}^o} \quad (4-11)$$

여기서, X_i 는 측정위치에서의 측정된 i 종의 체적분율을 나타내고 X_i^o 는 외기에서 유입되는 공기내 i 종의 체적분율을 나타낸다. 이와 함께 연소과정중의 연료의 화학적 팽창계수(chemical expansion factor)를 고려하여 화재에서 발생한 발열량은 다음과 같이 산정한다.

$$\dot{Q} = \Delta H_{c,O_2} \cdot \phi \cdot \frac{\dot{m}_e}{1 + \phi(\alpha - 1)} \cdot (1 - X_{H_2O}^o) \cdot X_{O_2}^o \cdot \frac{MW_{O_2}}{MW_{air}} \quad (4-12)$$

여기서 MW_i 는 i 종의 분자량을 나타낸다. 최종적으로 산소소모법에서는 배기되는 질량 유량과 산소소모계수 산정을 위한 각 기체의 농도를 계측함으로써 연소가스 분석을 통해 화재로부터 발생된 발열량을 직접적으로 측정할 수 있다.

일반적으로 화재의 복사열이 상대적으로 작은 소규모 화재실험(bench scale fire test)의 경우 OSU 칼로리미터가 여전히 사용되고 있으나 최근의 대부분의 칼로리미터는 산소소모법에 기초한 열량계가 널리 이용되고 있는 추세이다. 특히 대형 화재 발열량계 (Large Scale Fire Calorimeter)의 경우 대부분의 경우 산소소모법을 채택하여 화재로부터의 발열량을 계측하고 있다.

2.3 실제 가연물의 발열량

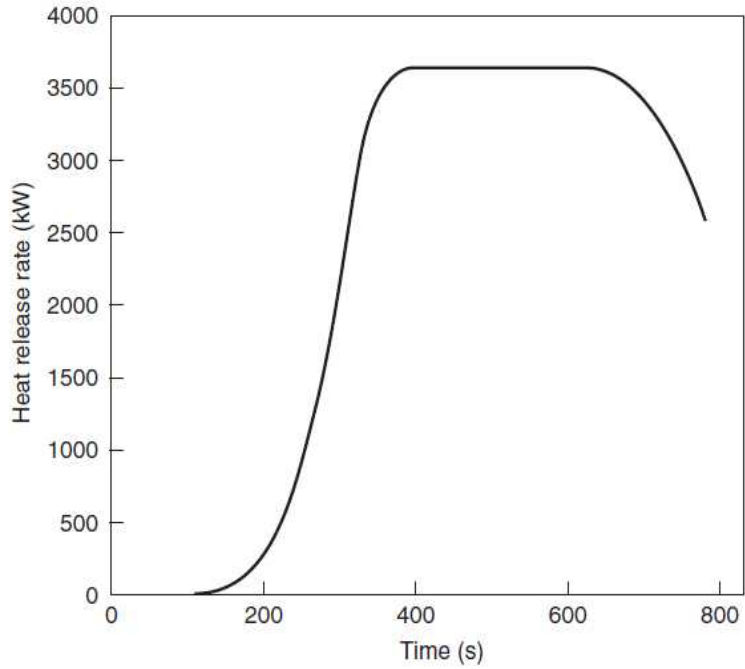
소파나 책상등과 같은 일상생활에 사용되는 대부분의 물건에 대한 화재시 발열량은 물건을 이루고 있는 물질의 성분이나 종류, 크기 등에 따라 다르기 때문에 특정한 값으로 정해지는 것이 아니라 필요에 따라 직접 계측해야만 정확한 발열량을 알 수 있다. 그러나 매번 모든 물건에 대한 발열량을 측정할 수 없기 때문에 기존에 계측된 유사 가연물에 대한 실험 결과로부터 실제 가연물에 대한 개략적인 발열량을 평가 할 수 있다.

[그림 3-39]는 한 변의 길이가 1.22 m 크기의 목재 적재화재(wood crib fire) 동안 시간에 따른 발열량 변화를 나타낸다. 그림에서 보는바와 같이 최대 발열량은 약 3,500kW 정도이며 점화 후 약 3분 경과 후부터 발열량은 급격히 증가하고 화재발생 후 약 6분 경과 후에 최대발열량에 도달한다. 이후 약 5분 정도 준정상상태(quasi-steady state)의 연소 특성을 보이며 이후 가연물의 질량감소로 인하여 발열량은 감소함을 보여준다. 이와 같이 가연물에 대하여 시간변화에 따른 발열량 변화나 최대발열량에 대한 정보를 파악하는 것은 가연물의 연소특성을 이해하는데 큰 도움이 된다. [그림 4-40]은 직물류 가구와 차량의 실제 차량의 화재실험을 통해 얻은 발열량의 대표적인 예를 보여준다. 직물류 가구 중 1인용, 2인용, 3인용 소파의 연소 시 최대발열량은 약 2~3MW 정도에 도달하며 스쿨버스나 지하철 차량 등은 약 35MW 정도의 열을 방출하는 것으로 알려져 있다.

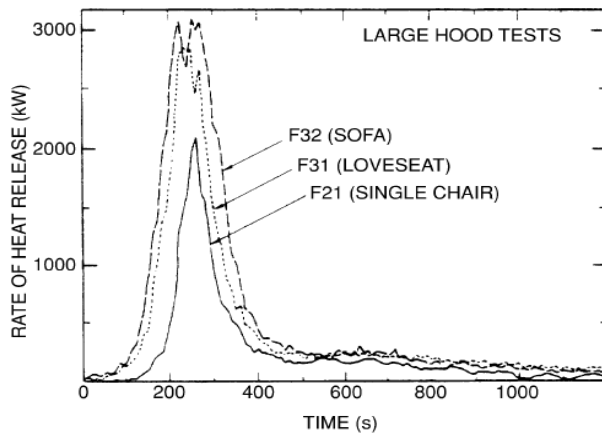
따라서 실제 일상에서의 가연물에 대한 발열량 정보는 화재진압대책을 마련하거나 방화설계를 하는데 있어서 가장 기본이 되는 중요한 인자로서 많은 실험을 통해 지속적인 데이터베이스를 구축해 나가는 것이 매우 중요하다.



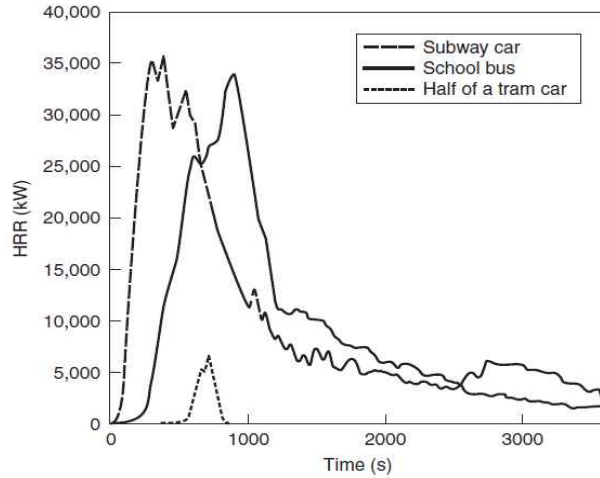
[그림 3-39] 목재화재의 발열량 (1.22 m×1.22 m×1.22 m)



[그림 3-40] 실제 화재실험을 통한 가연물의 발열량 변화



(a) 대표적인 직물류 가구의 발열량 곡선



(b) 실제차량의 발열량 곡선

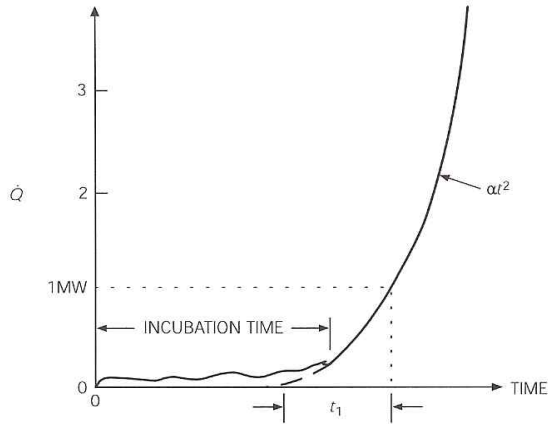
2.4 화재 성장

점화이후 시간변화에 따라 화재 강도의 변화정도를 화재성장(fire growth)으로 나타내 일반적으로 시간변화에 따른 발열량변화를 화재성장률(fire growth rate)로 정의하며 화재 성장과정은 점화과정(화염전파율, 연소율) 등에 의존하는데 일상에서 사용되는 대부분의 가연물의 경우 화재성장과정이 단순한 형태의 관계식으로 정의되지는 않는다. 그러나 많은 실험을 통해 가연물들이 비교적 일정한 화재성장률을 가지고 있다는 사실을 알게 되어 이를 적용의 관계식에 따른 발열량변화로 화재성장과정을 정량적으로 나타내어 화재해석에 적용하고자 하였고 화재성장률에서 화재성장을 정량화하는 방법에는 몇 가지가 있으나 일반적으로 화재의 발열량이 관계식에 대해 지수함수적(e^t)으로 성장 내 가정하는 계식화로 화재성장모드(t^2 fire growth mode)내 널리 적용돼 있다. 그중에서 t^2 화재성장 모드는 가장 널리 이용되는 화재성장 모드이다.

[그림 3-41]에서 보는바와 같이 점화이후 화재는 본격적인 화재성장이전의 잠복기(incubation period)를 거친 후 열적순환과정이 활성화되면 본격적으로 화재성장이 이루어지게 된다. t^2 화재성장모드에서는 본격적인 화재성장이 이루어진 시간부터 화재 발열량이 1MW에 도달하는데 걸리는 시간을 통해 화재성장률을 정의한다.



[그림 3-41] t^2 화재성장 곡선



$$\dot{Q} = \alpha t^2 \quad (4-13)$$

여기서 \dot{Q} 는 발열량(W), t 는 시간 (s), α 는 성장률(W/s^2)을 나타낸다. 예를 들어 어떤 화재에서 1MW에 도달하는데 걸리는 시간이 100초라면 성장률은 $1,000,000W/100^2$ 이 되어 $100 W/s^2$ 의 화재성장률을 가지는 화재가 된다.

[표 3-12] 다양한 일상 생활용품의 화재성장률(NIST 칼로리미터 실험)

Description	time to reach 1MW fire, t_1 (s)	fire growth rate(W/s^2)
Metal wardrobe 41.4 kg (total)	50	422.0
Chair F33 (trial loveseat) 39.2 kg	400	6.6
Chair F21 28.15 kg (initial stage of fire growth)	175	34.4
Chair F21 28.15 kg (later stage of fire growth)	50	422.0
Metal wardrobe 40.8 kg (total) (average growth)	250	16.9
Metal wardrobe 40.8 kg (total) (later growth)	120	73.3
Metal wardrobe 40.8 kg (total) (initial growth)	100	105.5
Chair F25 27.8 kg (later stage of fire growth)	60	293.1
Chair F25 27.8 kg (initial stage of fire growth)	100	105.5
Chair F31 (loveseat) 39.6 kg	60	293.1
Chair F31 (loveseat) 40.40 kg	80	164.8
Chair F32 (sofa) 51.5 kg	100	105.5
1/2-in. Plywood wardrobe w/ fabrics 68.8 kg	35	861.2

Description	time to reach 1MW fire, t1(s)	fire growth rate(W/s ²)
1/2-in. Plywood wardrobe w/ fabrics 68.32 kg	35	861.2
1/8-in. Plywood wardrobe w/ fabrics 36.0 kg	40	659.4
1/8-in. Ply. wardrobe w/ fire-ret. (int. fin. initial)	70	215.3
1/8-in. Ply. wardrobe w/ fire-ret. (int. fin. later)	30	1172.2
Repeat of 1/2-in. Plywood wardrobe 67.62 kg	30	1172.2
1/8-in. Ply. wardrobe w/ F-R., latex paint 37.26 kg	90	130.2
Chair adj. back metal frame, foam cush. 20.8 kg	170	36.5
Easychair CO7 11.52 kg	175	34.4
Easychair 15.68 kg (F-34)	200	26.4
Chair metal frame minimum cushion 16.52 kg	200	26.4
Chair molded fiberglass no cushion 5.28 kg	120	73.3
Molded plastic patient chair 11.26 kg	275	14.0
Chair metal frame w/ padded seat and back 15.5 kg	350	8.6
Loveseat metal frame w/ foam cushions 27.26 kg	500	4.2
Chair wood frame w/ latex foam cushions 11.2 kg	500	4.2
Loveseat wood frame w/ foam cushions 54.60 kg	350	8.6
Wardrobe 3/4-in. particleboard 120.33 kg	150	46.9
Bookcase plywood w/ aluminum frame 30.39 kg	65	249.7
Easychair molded flexible urethane frame 15.98 kg	1000	1.1
Easychair 23.02 kg	75	187.6
Mattress and boxspring 62.36 kg (later fire growth)	350	8.6
Mattress and boxspring 62.36 kg (initial fire growth)	1100	0.9

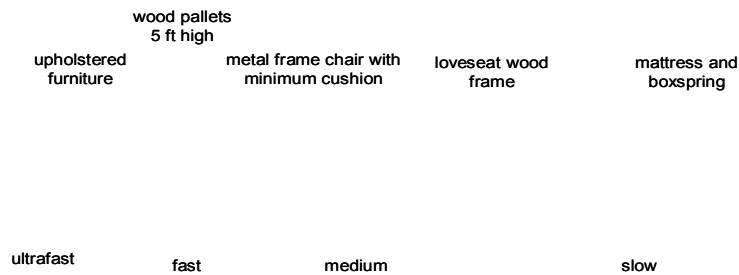
[표 3-12]는 미 국립표준기술연구원(NIST)의 건축화재연구실(Building and Fire Research Lab.)에서 대형 칼로리미터를 이용하여 일상생활에 사용되는 다양한 물품에 대해 화재성장율을 측정한 자료이다. 일반적으로 섬유계 쿠션과 합판을 사용한 가구류의 화재성장율이 매우 크게 나타났으며 많은 가연물이 화재발생 초기와 후기에 대해 각각 다른 화재성장율을 가지는 것으로 나타났다. 이와 같이 다양한 화재성장 특성을 분류하기 위하여, 미국방화협회(NFPA)에서는 t^2 화재성장모드를 적용하고 1055kW에 도달하는데 걸리는 시간에 따라 화재성장을 크게 다음의 4가지 형태로 분류하고 있으며 연기제어시스템 설계나 화재감지설비 설계 시 직접 활용하고 있다.



[표 3-13] t^2 화재의 분류 (NFPA)

fire growth mode	time to reach 1MW fire, t_1 (s)	fire growth rate (W/s^2)
slow	600	2.8
medium	300	11.1
fast	150	44.4
ultrafast	75	177.8

[그림 3-42] t^2 화재분류 및 대표적인 가연물의 성장률 크기 정도.



[그림 3-42]는 화재성장 모드에 따른 시간별 발열량 변화곡선과 [표 3-12]의 대표적인 일상용품들의 연소 시 화재성장율의 크기정도를 나타낸다. 이러한 화재성장율 곡선은 화재 성장단계에서의 발열량 변화를 의미하는 것이고 화재가 최성기 화재에 도달한 후 가연물의 질량이 소진됨에 따라 발열량은 다시 감소하게 된다.

[표 3-14]는 일상의 거주공간에 따른 개략적인 화재성장율을 보여준다.

[표 3-14] 건축공간의 형태에 따른 화재성장 정도

Building area providing fuel	Growth rate
Dwelling	Medium
Office	Medium
Shop	Fast
Warehouse	Ultrafast
Hotel bedroom	Medium
Hotel reception	Medium
Assembly hall seating	Medium-fast
Picture gallery	Slow
Display area	slow-medium

연소율과
발열량



연소생성물(Combustion products)

사람의 인체가 유기물을 섭취하고 호흡을 통해 공기를 흡입하여 체내에서 화학적인 산화 반응의 결과로 일을 할 수 있는 에너지와 체온을 유지하는 열을 생성하고 이산화탄소와 노폐물을 외부로 방출하는 것처럼 화재에 의한 연소현상도 이와 매우 유사하다. 소모된 연료와 공급된 산소에 의한 연소반응의 결과로써 다량의 빛과 열에너지를 발생함과 동시에 여러 가지 새로운 화학종(chemical species)인 연소생성물(combustion products)을 형성하게 된다. 앞서 언급한 발열량의 개념은 연소과정을 통해 발생된 열에너지를 정량화하는 과정이라면 본 장에서는 화학반응의 결과로 생성되는 연소가스의 종류와 생성율에 대해 학습하고 화재학의 관점에서 이러한 연소가스의 생성에 영향을 미치는 인자와 연소생성물에 의한 영향에 대해 소개한다.

제1절 연소반응

- 학습 목표 01 화학반응식과 이론공연비
- 02 환기상태와 당량비

1.1 화학반응식(chemical equation)과 이론공연비(stoichiometric air to fuel ratio)

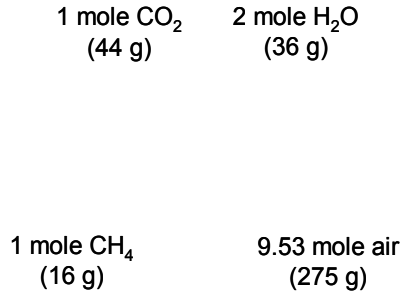
일반적으로 타고 있는 물질에서 생성되는 연소생성물의 양적인 측면은 화재의 크기 혹은 발열량에 따라서 큰 영향을 받지만 연소생성물의 질적인 측면, 즉 연소생성물의 조성은 가연물의 종류와 연소가 일어나는 조건 혹은 과정에 따라 크게 영향을 받는다. 만일 동일가연물에 대하여 연소생성물의 조성은 결국 연소조건에 따라 결정되게 된다. 이러한 연소조건에는 열적 환경, 환기량 등 여러 가지 변수가 있지만 연료와 반응하는 산소의 양에 의해 크게 의존하는 것으로 알려져 있다. 탄화수소계연료(hydrocarbon fuel)에서 완전연소(complete combustion)의 의미는 연료 내 모든 탄소원자는 CO_2 로, 모든 수소원자는 H_2O 로 전환되는 연소과정을 의미한다. 예를 들어 탄화수소계 연료로 가장 간단한 구조를 가진 메탄

(CH₄)의 경우, 완전연소상태에서 1 몰의 메탄은 2 몰의 산소와 반응하여 1 몰의 이산화탄소와 2몰의 수증기를 생성하게 된다. 이를 화학방정식으로 나타내면 다음과 같다.

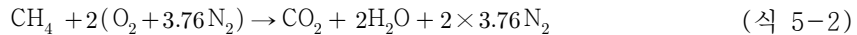


연소생성물
(Combustion
products)

[그림 3-43] 메탄의 완전연소반응



그러나 특수목적의 연소과정을 제외하고는 대부분의 연료는 공기 중에서 연소되기 때문에 공기의 조성이 21%의 산소와 79%의 질소로 이루어진 것으로 가정하면 산소 대 질소의 몰비는 1 : 3.76이 된다. 따라서 1몰의 메탄과 반응하는 2 몰의 산소를 얻기 위해서는 9.53몰의 공기를 필요로 하고 [그림 3-43]에 기초하여 식 5-1을 다시 정리하면



공기 중에서 메탄의 완전연소과정에서 발생하는 연소생성물은 이산화탄소(CO₂)와 물(H₂O)이 생성되고 질소는 연소반응에 참여하지 않는 불활성기체(inert gas)로 취급된다. 이때 반응되는 양을 질량단위로 환산해보면 메탄의 분자량은 16 g/mol 이므로 1 몰의 메탄은 16 g 이 된다.

$$m_{\text{CH}_4} = N_{\text{CH}_4} \times MW_{\text{CH}_4} = 1 \times 16 = 16 \text{ g}$$

여기서 m 은 질량, N은 몰수, MW는 종의 분자량(molecular weight)를 나타낸다.

16 g의 메탄은 공기의 질량은 2 몰의 산소와 7.52몰의 질소와 반응하므로 산소의 분자량 32 g/mol 과 질소의 분자량 28 g/mol 을 적용하면 반응하는 공기의 질량은 다음과 같이 계산된다.



$$m_{air} = N_{O_2} \times MW_{O_2} + N_{N_2} \times MW_{N_2} = 2 \times 32 + 7.52 \times 28 = 274.56 \text{ g}$$

즉, 16 g의 메탄은 완전연소상태에서 275 g의 공기와 반응하게 된다. 따라서 완전연소 상태에서 연료와 공기가 반응하는 질량 비율, 다시 말해 단위질량의 연료를 완전 연소시키는데 필요한 공기양을 이론공연비(stoichiometric air to fuel mass ratio)로 정의하고 다음과 같이 나타낸다.

$$s = \left(\frac{A}{F} \right)_{st} = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} \quad (\text{식 5-3})$$

메탄의 경우 이론공연비는 약 17.2 정도이다. 이와 동일한 개념으로 공기에 대한 연료의 비를 이론연료공기비로 정의하고 이론공연비의 역수로 나타낸다.

$$\left(\frac{F}{A} \right)_{st} = \frac{m_{fuel}}{m_{air}} = \frac{1}{s} \quad (\text{식 5-4})$$

한편, 1몰의 메탄과 2몰의 산소가 반응하여 1몰의 이산화탄소와 2몰의 물이 생성되었으므로 생성된 연소가스의 질량은 동일한 방법으로 계산할 수 있다.

$$m_{CO_2} = N_{CO_2} \times MW_{CO_2} = 1 \times 44 = 44 \text{ g}$$

$$m_{H_2O} = N_{H_2O} \times MW_{H_2O} = 2 \times 18 = 36 \text{ g}$$

결론적으로 1 몰의 메탄(16 g)이 완전 연소할 경우 64 g의 산소가 소모되고 생성되는 이산화탄소의 양은 44 g, 물의 양은 36 g 이다. 이러한 방법으로 연료의 화학조성을 알 경우 완전연소상태에서 생성되는 연소생성물의 양이나 필요한 공기량 등을 이론적으로 산정할 수 있다. 주요 연료에 대한 이론공기연료비는 [표 3-15]을 참조한다.

[표 3-15] 주요 연료별 분자량과 이론공연비

Fuel	Molecular weight, MW [g/mol]	(A/F) _{st} , s
Methane	16.0	17.2
Propane	44.1	15.6
n-Butane	58.1	15.4
n-Hexane	86.2	15.2
n-Heptane	100.2	15.1
n-Octane	114.2	15.8
Methanol	32.0	6.5
Ethanol	46.1	9.0
Hydrogen	2.0	34.5

5

연소생성물
(Combustion
products)

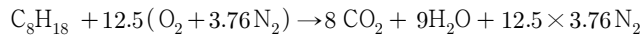
Fuel	Molecular weight, MW [g/mol]	(A/F) _{st} , s
Benzene	78.1	13.2
Acetone	58.1	9.5
Propene	42.1	14.7
Toulene	92.1	13.5
Jet fuel JP1	150.0	14.7
Jet fuel JP5	170.0	14.5

(예제 5-1) 소방차가 사고현장에 도착하는데 5 liter의 휘발유를 소모했다면 이론공연비와 발생한 총 CO₂의 양은 몇 kg 인가? (단, 휘발유의 화학식은 C₈H₁₈, 밀도는 703 kg/m³, 엔진 내 연소과정은 완전연소로 가정한다.)

$x \text{ kg CO}_2$

5l gasoline

휘발유의 화학반응식은



휘발유의 분자량 114 g/mol, 1몰의 휘발유 = 114 g 휘발유

1몰의 휘발유와 반응하는 공기의 질량 = $12.5 \times 32 + 12.5 \times 3.76 \times 28 = 1716 \text{ g}$

따라서 이론공연비 $s = 1716/114 \approx 15$

1몰의 휘발유 연소과정을 통해 생성되는 CO₂의 질량 = $8 \times 44 = 352 \text{ g}$

연소된 휘발유의 질량 = 체적 \times 밀도 = $5 \text{ l} \times 703 \text{ kg/m}^3$

= $0.005 \text{ m}^3 \times 703 \text{ kg/m}^3 = 3.515 \text{ kg}$

연소된 휘발유의 몰수 = 질량/분자량

= $3.515 \text{ [kg]} / 0.114 \text{ [kg/mol]} = 30.8 \text{ mole}$

따라서 생성된 총 CO₂의 양은 $m_{\text{CO}_2} = 30.8 \text{ [mol]} \times 0.352 \text{ [kg/mol]} = 10.853 \text{ kg}$



1.2 환기상태와 당량비(ventilation condition and equivalence ratio)

대부분의 경우 연소생성물의 종류나 생성율은 가연물 자체뿐만 아니라 환기상태에 의존하기 때문에 가연물로 유입되는 공기의 양이 부족한 경우 일산화탄소(CO), 매연(soot), 미연탄화수소(unburned hydrocarbon)등 다양한 연소부산물들이 생성된다. 따라서 이론공연비는 연소과정에 공급되는 공기량을 평가하는 기준으로써 화재의 환기상태를 평가하는 매우 중요한 요소가 된다. 만일 이론공연비보다 연료의 양이 많고 공기의 양이 상대적으로 부족할 경우 연소상태는 연료과잉상태(fuel rich)가 되고 이를 화재역학에서는 환기부족상태(under-ventilated condition)로 부른다. 반대로 이론공연비 보다 공기의 양이 상대적으로 많은 경우 연소상태는 연료부족상태(fuel lean)가 되고 환기과잉상태(over-ventilated condition)로 정의한다. 따라서 연소과정의 공기과잉 혹은 연료과잉의 정도를 정량적으로 나타내기 위해 이론공연비에 대한 연소과정의 연료공기비를 당량비(equivalence ratio, ϕ)로 정의한다.

$$\phi = \frac{(F/A)}{(F/A)_{st}} = \frac{m_{fuel}}{m_{air}} \times s \quad (\text{식 5-5})$$

$\phi > 1$: 연료과잉, 공기부족 (under-ventilated), 불완전연소

$\phi = 1$: 이론공연비상태, 이상적인 연소상태, 완전연소

$\phi < 1$: 공기과잉(over-ventilated), 완전연소상태

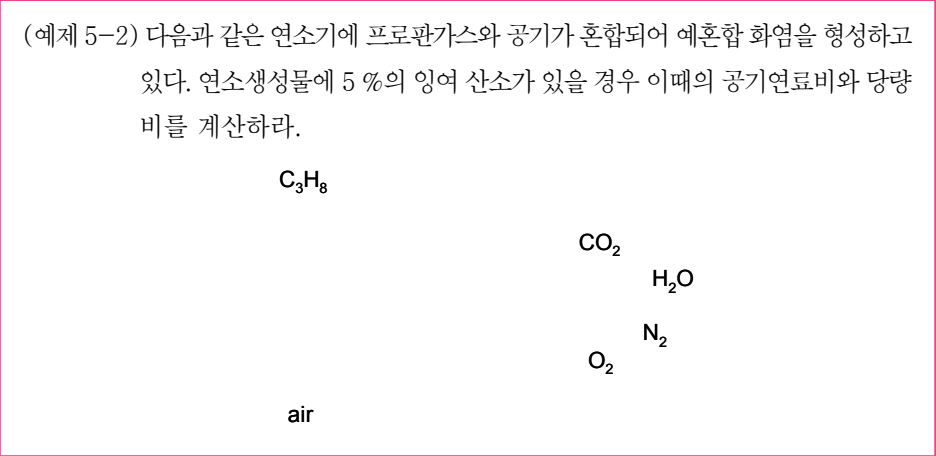
대부분의 화재는 초기 화재발생시 $\phi < 1$ 은 상태로 시작해서 화재가 성장함에 따라 ϕ 는 증가하고 화재성장단계를 거치는 동안 $\phi > 1$ 상태가 된다. 따라서 화재가 성장함에 따라 불완전연소는 심화되어 복잡한 연소과정을 보이기 때문에 이론적인 해석이 거의 불가능하고 대부분의 경우 실험적인 자료를 통해 각 연료에 대한 연소생성물의 특성을 정량화하게 된다.

한편 탄화수소계연료와 달리 대부분의 일상의 가연물의 연료조성은 탄소(C), 수소(H), 산소(O), 질소(N) 이외에 염소(Cl), 불소(F), 브롬(Br)과 같은 성분이 포함되어 있고 이러한 성분의 산화과정에서 시안화수소(HCN), 염화수소(HCl), 불화수소(HF), 브롬화수소(HBr) 등 다양한 연소부산물을 형성한다. 대부분의 이러한 유독성 가스의 생성은 가연물의 성분과 열해리가 일어나는 과정에서 공급되는 공기의 양과 열적조건에 따라 크게 의존하게 된다.

5

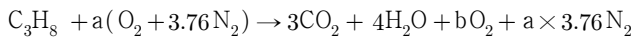
연소생성물
(Combustion products)

(예제 5-2) 다음과 같은 연소기에 프로판가스와 공기가 혼합되어 예혼합 화염을 형성하고 있다. 연소생성물에 5%의 잉여 산소가 있을 경우 이때의 공기연료비와 당량비를 계산하라.



$$MW_{fuel} = 44.1 \text{ g/mol}, MW_{air} = 28.84 \text{ g/mol}$$

화학반응식



$$\text{산소원자의 보존관계서 } 2a = 10 + 2b, \quad a = 5 + b \tag{1}$$

연소생성물중에 5%의 잉여산소가 존재하므로

생성물 전체의 몰수에서 산소의 몰수가 차지하는 비율을 계산하면

$$X_{O_2} = \frac{N_{O_2}}{N_{CO_2} + N_{H_2O} + N_{O_2} + N_{N_2}} = \frac{b}{3 + 4 + b + 3.76a} = 0.05 \tag{2}$$

(1)과 (2) 관계에서 $a = 6.7, b = 1.7$

공기연료비는

$$(A/F) = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} = \frac{N_{air} MW_{air}}{N_{fuel} MW_{fuel}} = \frac{6.7 \times 4.76 \times 28.84}{1 \times 44.1} \approx 20.8$$

당량비는

$$\phi = (F/A) \times s = \frac{1}{20.8} \times 15.6 = 0.75$$



제2절 생성율(Yield rate)

학습 목표 01 당량비에 따른 연소생성물의 생성율

화재역학의 관점에서는 공간내부의 연소생성물의 종류와 농도는 화재감지 설비나 공간내부 인명안전의 평가, 제연시스템 설계 등의 실제 응용분야 뿐만 아니라 화재자체를 이해하는데 직접적으로 활용될 수 있기 때문에 매우 중요한 인자로 인식된다. 앞에서 언급한 바와 같이 완전연소상태에서는 연소가스의 생성을 이론적으로 예측할 수 있지만 대부분의 일상의 화재에서는 가연물의 화학적 조성에 대한 정보가 부족하고 화재성장과정에서 불완전 연소상태가 심화되기 때문에 화재로부터 생성되는 연소가스의 종류와 그 양을 이론적으로 평가하는 것이 거의 불가능하다. 따라서 화재역학에서는 실험적인 접근을 통하여 어떤 가연물의 연소과정에서 발생하는 연소가스의 종류와 양을 생성율(yield rate)을 통해 정량화하고 이를 확장하여 화재로부터 발생하는 연소생성물의 양을 평가하는 방식을 사용한다. 화재로부터 발생된 연소생성물의 양은 연료의 질량감소율(mass loss rate)에 기초하여 정량화 된다.

어떤 가연물에서 발생한 연소가스의 생성율은 다음과 같이 정의된다.

$$y_i = \frac{m_i}{m_{fuel}} \quad (\text{식 5-6})$$

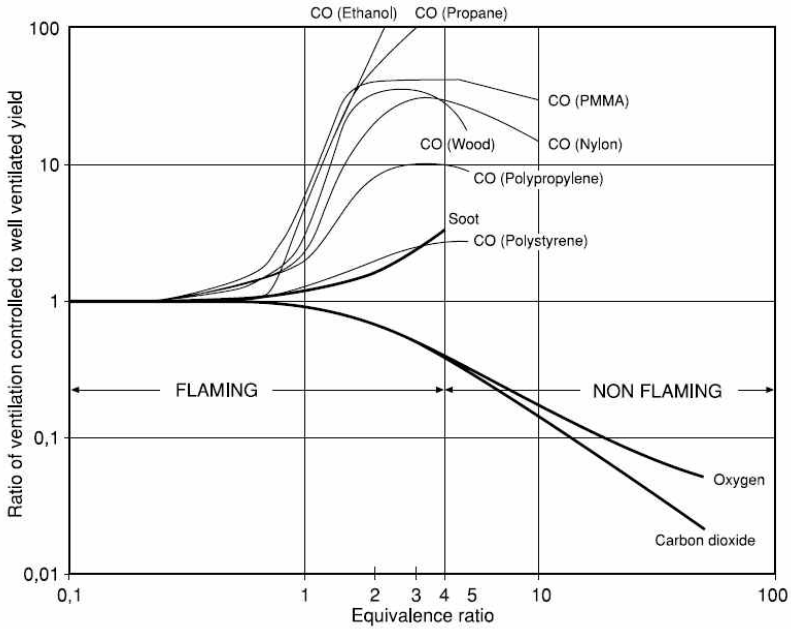
여기서 m_i 는 생성된 i 종의 연소가스의 질량, m_{fuel} 은 소모된 연료의 양을 나타낸다. 연료가 액체인 경우 가해진 열에 의해 증발된 연료는 모두 가연성기체(fuel vapor)를 형성하기 때문에 연료의 질량감소율과 가연성기체의 생성량이 같게 된다. 그러나 고체화재의 경우 가해진 열에 의해 증발된 연료는 열해리(pyrolysis)를 통해 가연성기체와 함께 재(char), 불활성가스등을 형성하기 때문에 질량감소율과 가연성기체의 생성량이 반드시 같지는 않다. 따라서 생성율을 정의하는 과정에는 소모된 연료의 질량 즉, 질량감소율을 통해 연소가스의 생성율을 정량화 하게 된다.

[그림 3-44]는 환기조건에 따른 생성율의 비, 즉 환기량이 충분한 상태에서의 생성율에 대한 환기조건에 따른 생성율의 비를 당량비의 변화에 대해 나타내고 있다. 일반적으로 공기공급이 충분한 경우($\phi \ll 1$) 가연물에서 발생하는 연소가스의 생성율은 [그림 5-2]에서 보는 바와 같이 거의 일정하다. 그러나 화재상태가 공기공급이 부족한 상태($\phi > 1$)가 되면 생성율이 일정하지 않고 환기상태에 따라 변화하게 된다.

5

[그림 5-44] 당량비에 따른 연소생성물의 생성율

연소생성물
(Combustion products)



산소나 일산화탄소, 그을음(soot) 등의 경우 환기상태에 따른 생성율의 비가 연료의 종류에 따라 크게 변화하지 않지만 일산화탄소의 경우 환기상태뿐만 아니라 연료의 종류에 따라서도 큰 차이를 보이고 있다. 많은 종류의 가연물에 대해 당량비 2정도에서의 일산화탄소의 생성율은 환기량이 충분한 상태에서의 생성율에 비해 10배 이상 많은 일산화탄소를 생성하고 있으며 심지어 에탄올의 경우 거의 100배까지 증가함을 보여준다.

몇가지 종류의 연료에 대하여 환기조건에 따른 일산화탄소의 생성율이 당량비에 대한 경험식으로 간략화되어 사용된다.

$$\begin{aligned}
 y_{CO} &= 0 && \text{for } \phi > 0.5 \\
 y_{CO} &= 0.3\phi - 0.15 && \text{for } 0.5 < \phi < 1.2 \\
 y_{CO} &= 0.21 && \text{for } \phi > 1.2
 \end{aligned}
 \tag{식 5-7}$$

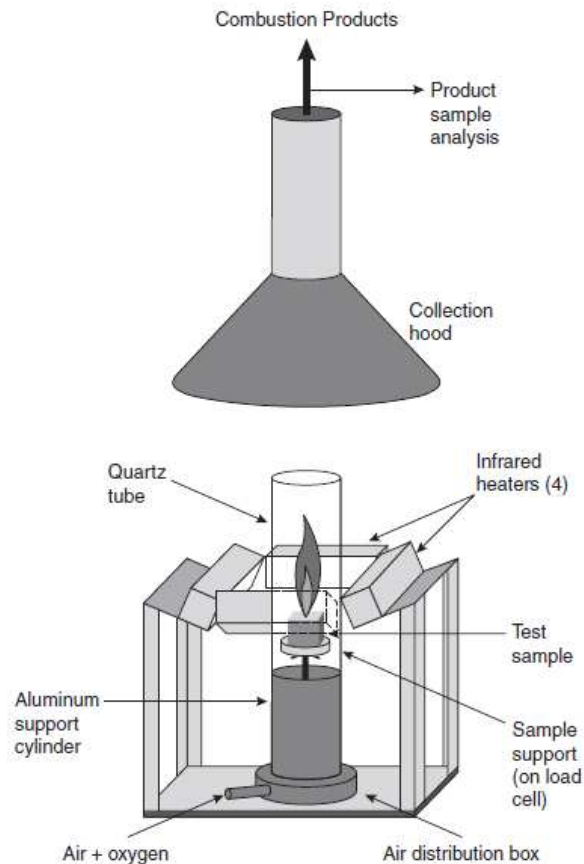
그러나 화재로부터 발생하는 연기의 유독성을 평가할 때 가장 일반적인 연소생성물이 일산화탄소이지만 화재로부터 발생하는 일산화탄소의 생성율은 연소조건과 가연물의 종류에 따라 크게 차이를 보이기 때문에 정확한 예측이 여전히 어려운 일이며 앞으로도 많은 연구를 필요로 한다.

화재에서 생성되는 연소가스의 종류는 매우 다양하지만 모든 연소가스에 대하여 생성율



을 정의할 필요는 없다. 일반적으로 화재역학에서 관심을 두는 연소생성물은 인명에 영향을 미치는 이산화탄소나 일산화탄소, 시안화수소, 염화수소와 같은 독성가스나 가시거리에 영향을 미치는 연기(Smok) 정도이다. 대부분의 연소가스의 생성율은 가연물의 시편을 직접 연소시켜 생성된 연소생성물의 농도를 측정하여 산정하는데 미국의 FMRC(Factory Mutual Research Corp.술편을 개발한 표준시험방법인 ASTM-2058 방법이 가장 널리 적용된다(가연물의 3습. 이 방법은 고체가연물을 석영관내에 로드은 위에 두고 적외선히터를 이용하여 임계 열 유속(critical heat flux)이상의 열을 외부로부터 유도하여 점화를 유도한다. 로드은편을 측정된 질량감소율과 후드편을 측정된 연소가스의 농도와 배기유량(exhaust flow rate)로부터 생성율을 산정한 표준시험방법 [표 3-16]는 ASTM-2058 시험법에 의해 측정된 주요연료의 CO₂, CO, soot에 대한 생성율을 나타낸다.

[그림 3-45] ASTM-2058 표준 시험장치



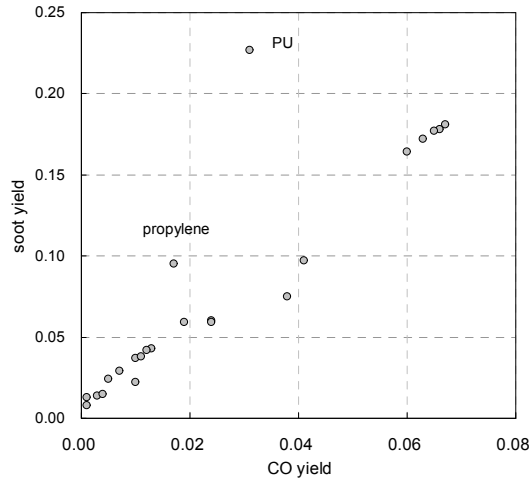
[그림 3-45]은 [표 3-16]를 기초로 하여 CO 생성율과 그을음(soot) 생성율 사이의 관계를 보여준다. 많은 연료에 대해서 CO 생성율이 높은 경우 그을음(soot) 생성도 함께 증가하고 있으며 비교적 선형적인 증가를 보이고 있다. 그러나 폴리우레탄(PU)이나 프로필렌 등은 다른 연료들에 비해 일산화탄소 생성보다는 다량의 그을음(soot)을 생성하는 연료임을 보여준다.

[표 3-16] 연료별 연소가스의 생성율

Fuel	yCO ₂	yCO	ysoot
Methanol	1.31	0.001	—
Ethanol	1.77	0.001	0.008
Methane	2.72	—	—
Ethane	2.85	0.001	0.013
Propane	2.85	0.005	0.024
Butane	2.85	0.007	0.029
Ethylene	2.72	0.013	0.043
Propylene	2.74	0.017	0.095
Acetone	2.14	0.003	0.014
Heptane	2.85	0.01	0.037
Octane	2.84	0.011	0.038
Kerosene	2.83	0.012	0.042
Benzene	2.33	0.067	0.181
Toluene	2.34	0.066	0.178
Styrene	2.35	0.065	0.177
Hydrocarbon	2.64	0.019	0.059
Mineral oil	2.37	0.041	0.097
Wood(Red oak)	1.27	0.004	0.015
Wood(Douglas fir)	1.31	0.004	—
Wood(Pine)	1.33	0.005	—
PMMA	2.12	0.01	0.022
PE	2.76	0.024	0.06
PP	2.79	0.024	0.059
PS	2.33	0.06	0.164
Nylon	2.06	0.038	0.075
PVC	0.46	0.063	0.172
PU(flexible foam)	1.51	0.031	0.227



[그림 3-46] 일산화탄소 생성율과 soot 생성율 사이의 관계



제3절 연기밀도와 가시거리

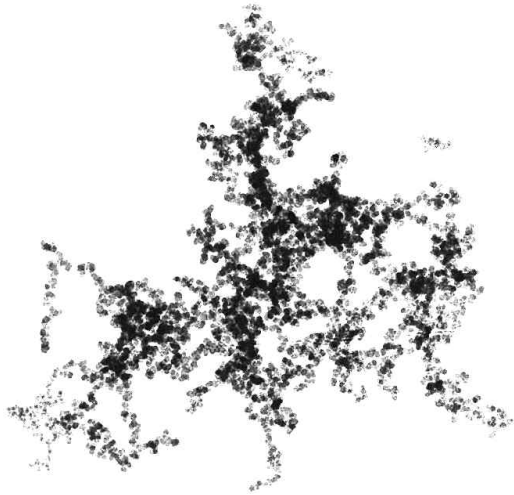
- 학습 01 연기의 밀도
- 목표 02 가시도(visibility)

3.1 연기밀도

일반적으로 화재역학에서 연기(smoke)는 연소과정에서 발생된 연소생성물중 더 이상 반응을 하지 않는 연소가스나 입자(smoke particulate)로 정의된다. 연기의 존재는 공간내부의 거주자의 피난이나 소방관의 화재진압 활동에 장애를 가져오는 가시도에 직접적인 영향을 주기 때문에 화재와 관련된 가장 근본적인 위험요소로 분류되기도 한다. 화재에서 발생하는 연기입자의 대부분은 연소과정에서 발생된 그을음(soot)이며 공간내부에서의 그을음(soot)의 존재는 입자에 의한 투과광의 강도를 감소시키기 때문에 가시도(visibility)에 직접적인 영향을 미친다. 뿐만 아니라 화염내부의 그을음(soot)의 존재는 화염으로부터 방사되는 복사에너지의 강도에 지배적인 영향을 미친다. 연기 중에서 빛을 차단하는 주요매체는 그을음(soot) 입자이며 본 절에서 언급하는 연기밀도는 단위체적당 존재하는 그을음(soot)

의 양에 의해 정의된다. [그림 3-47]에서 보는 것처럼 연소과정에서 발생된 개별 그을음(soot) 입자는 성분이 대부분 탄소로써 덩어리의 형태를 띠고 있는데 나노크기($10^{-8} \sim 10^{-9}$ m)의 개별입자들이 뭉쳐져 그을음(soot) 덩어리를 형성하고 있으며 크기는 가연물에 따라 다르지만 대개 수 마이크로미터(μm) 크기인 것으로 알려져 있다.

[그림 3-47] soot 입자의 덩어리



연기밀도를 정량화하기 위해서는 다양한 물성과 측정방법이 존재하지만 가장 널리 적용되는 연기의 물성은 광소멸상수(light extinction coefficient)이다. 광소멸법(light extinction method)은 특정파장대(wavelength)를 가진 단색광원의 기준강도(I_λ^o)에 대한 연기를 통한 광원의 강도(I_λ)의 비가 주어진 경로길이(L)에 대해서 지수적으로 감소하는 Bouguer's 법칙에 의해 나타낸다.

$$\frac{I_\lambda}{I_\lambda^o} = e^{-\kappa L} \quad (\text{식 5-8})$$

$$\kappa = \frac{\ln(I_\lambda^o/I_\lambda)}{L} \quad (\text{식 5-9})$$

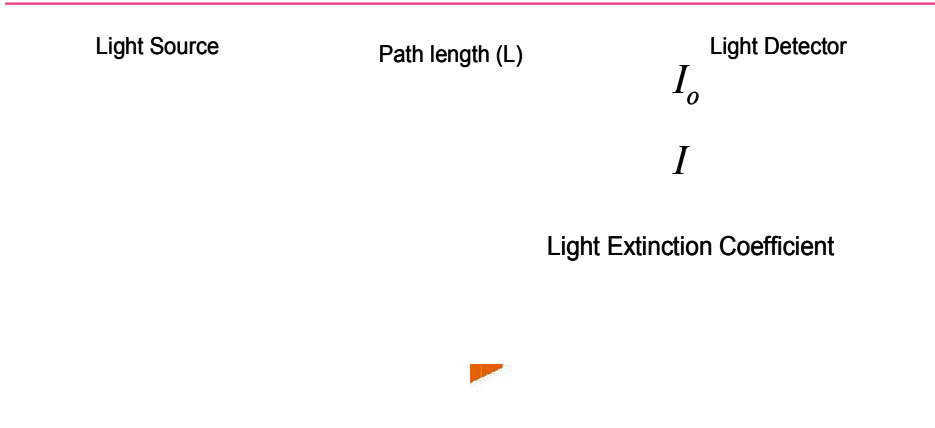
여기서 κ 는 광소멸상수로써 10의 지수승으로 표시하면 다음과 같다.

$$\frac{I_\lambda}{I_\lambda^o} = 10^{-DL} \quad (\text{식 5-10})$$

$$D = \frac{\ln_{10}(I_\lambda^o/I_\lambda)}{L} \quad (\text{식 5-11})$$



[그림 3-48] 광소멸법에 의한 연기밀도 측정



여기서 D는 K/2.3과 같고 단위길이당의 광학적 연기밀도(optical density)로 정의된다. 연기의 질량농도(mass concentration)은 광소멸상수에 대해 비광소멸상수(specific extinction coefficient)를 적용하여 다음과 같이 계산된다.

$$m_s = \frac{\kappa}{\kappa_m} \quad (\text{식 5-12})$$

일반적으로 비광소멸상수는 연기입자의 크기분포와 광물성에 의해 결정되는 것으로 플라스틱이나 목재의 연소과정중에 발생하는 연기에 대해 κ_m 은 약 7.6 m²/g (seader & Einhorn, SFPE 2-263)정도로 보고 되고 있으며 열해리과정 중에 생성되는 연기에 대해서는 약 4.4 m²/g의 값이 보고되고 있다.

(예제 5-3) 연소중인 목재에서 생성된 연기밀도를 계측하기 위해 0.3 m의 경로길이에 대해 광원의 투과율을 측정하였더니 $\frac{I_\lambda}{I_\lambda^0} = 0.2$ 로 나타났다. 이때 연기밀도는 얼마인가?

연기밀도를 계측하기 위해 광소멸상수를 계산하면

$$\kappa = \frac{\ln(I_\lambda^0/I_\lambda)}{L} = \frac{\ln(1/0.2)}{0.3} = 2.81m^{-1}$$

따라서 연기밀도는 다음과 같다.

$$m_s = \frac{\kappa}{\kappa_m} = \frac{2.81}{7.6} = 0.37g/m^3$$

5

연소생성물
(Combustion products)

3.2 가시도(visibility)

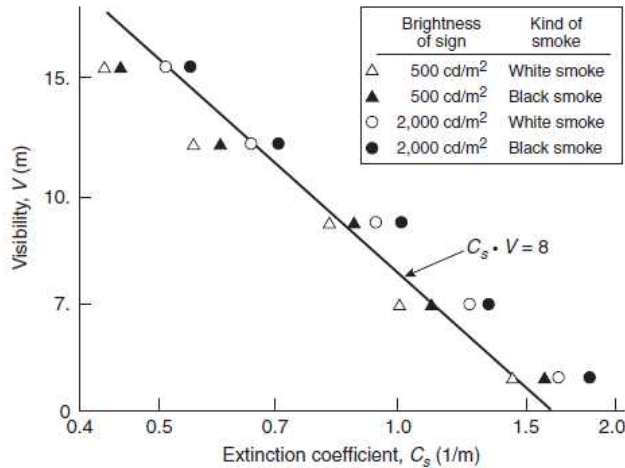
가시거리는 혹은 가시도는 연기밀도 뿐만 아니라 목표(target) 혹은 표식(sign)의 상태에 의존하게 된다. 사람이 물체를 보기 위해서는 배경과 물체 사이의 일정값 이상의 대비(contrast) 수준을 요구하게 된다. 균일하고 넓은 배경에 둘러 쌓인 물체의 대비(contrast, C) 는 다음과 같이 정의된다.

$$C = \frac{B}{B_o} - 1 \tag{식 5-13}$$

여기서 B는 물체의 밝기, B_o는 배경의 밝기를 나타낸다. 주광(daylight)인 경우 흰색 배경에 대한 검정색 물체를 인식할 수 있는 임계대비값(contrast threshold)으로 C=-0.02를 널리 사용한다. 따라서 물체의 가시도(S)는 대비값이 -0.02까지 감소하는 거리로 정의된다.

가시도는 연기내 입자의 광흡수(light absorption) 혹은 광산란(light scattering)정도, 대상 물체의 밝기와 대상물체로부터 반사되거나 발광된 빛의 파장, 물체를 보는 사람의 시각능력 등 여러 가지 인자에 의해 영향을 받게 된다. Jin 등은 연기의 광소멸상수와 가시도 사이의 많은 실험을 통하여 표식(sign)의 조건에 따른 편리한 상관식을 제시하였다.

[그림 3-49] 발광표식에 대한 광소멸상수와 가시거리 사이의 관계

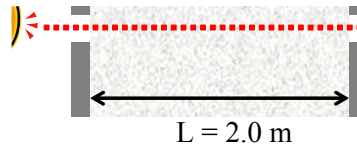


$$S = \frac{C_{vis}}{\kappa} \tag{식 5-14}$$

가시거리 S (m)는 광소멸상수에 반비례하고 C_{vis}는 표식의 상태에 따른 경험상수값으로

발광표식(light emitting sign)인 경우 5~10정도이며 보통 $C_{vis}=8$ 을 널리 이용한다. 표식이 반사표식(light reflecting sign)인 경우 C_{vis} 값은 2~4 정도이며 보통 3이 널리 적용된다.

(예제 5-4) 광원으로부터 광감지기 사이가 연기로 가득 차 있고 경로 거리 2.0 m 이다. 이때 광감지기에서 연기가 있을 경우와 없을 경우에 대한 투과 광소멸율 (I/I_0)이 0.2로 나타났다. 이러한 연기농도 상태를 발광표식(light emitting sign)에 대한 가시거리로 산정하라.



가시거리 $S = \frac{C_{vis}}{\kappa}$ 로 나타낸다. 여기서 대상이 발광표식이므로 $C_{vis}=8$ 정도의 값을 적용하면 광소멸 계수만 산정하면 가시거리를 평가할 수 있다.

$$\kappa_s = -\frac{\ln(I/I_0)}{L} = -\frac{\ln(0.2)}{2} = 0.8$$

$$S = \frac{C_{vis}}{\kappa} = \frac{8}{0.8} \approx 10 \text{ m}$$

제4절 독성기체

연소생성물
(Combustion
products)

- 학습** 01 독성가스별 노출에 따른 영향
목표 02 열적 노출조건에 따른 인체의 화상손상 정도

화원으로부터 발생된 연소가스는 확산과 대류 등의 물질전달 과정에서 주변기체와 혼합되어 공간 내에 분포하고 연소가스에 의한 위험정도는 연기 내에 포함된 개별 독성가스의 농도(concentration)에 의해 평가된다. 일반적으로 농도는 혼합물의 구성하고 있는 양의 정도를 나타내며 질량농도 혹은 질량분율(mass concentration or mass fraction)의 경우가 양의 기준이 질량이 되고 체적분율 혹은 몰분율(volume fraction)은 양의 기준이 체적 혹은 몰수가 된다.

질량농도는 전체 혼합물의 질량에 대한 어떤 종이 차지하고 있는 질량비로써 다음과 같이 정의된다.

$$Y_i = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_{smoke}} \quad (\text{식 5-15})$$

여기서 Y_i 는 질량농도, \dot{m}_i 는 i 종의 질량농도, \dot{m}_{smoke} 연기의 질량유량을 나타낸다. 일상에서 사용되는 농도개념은 질량개념이 아니라 체적개념의 농도로써 예를 들어 20%의 산소농도라는 것은 공기 중에 산소의 체적이 20%를 차지하고 있음을 의미한다. 체적분율은 혼합물의 체적유량에 대한 어떤종의 체적유량으로써 다음과 같이 정의된다.

$$X_i = \frac{\dot{V}_i}{\dot{V}_{smoke}} \quad (\text{식 5-16})$$

체적분율은 질량분율과 분자량(molecular weight)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$X_i = \frac{\dot{m}_i/MW_i}{\dot{m}_{smoke}/MW_{smoke}} = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_{smoke}} \frac{MW_{smoke}}{MW_i} \quad (\text{식 5-17})$$

화원에서 발생된 연소가스는 상승하면서 지속적으로 주변공기와의 혼합이 이루어지게 된다. 따라서 대부분의 화재에서 연기층 내 연기의 주성분은 대부분이 연소생성물가스와 유입된 공기이다. 따라서 연기의 분자량대신 공기의 분자량($MW_{air}=28.84 \text{ g/mol}$)을 적용하여 식 5-16을 다시 쓰면



$$X_i \approx \frac{28.84}{MW_i} Y_i \quad (\text{식 5-18})$$

실제로 대부분의 연소가스의 농도는 매우 낮기 때문에 분율을 그대로 사용하지 않고 ppm(parts per million) 단위를 사용하여 원래의 체적분율에 10^6 을 곱한 값을 널리 사용한다. 예를 들어 100 ppm은 체적분율로는 $100/10^6=0.0001$ 이 된다.

일반적으로 화재로 인해 거주자에 작용하는 위험요소는 크게 열에 의한 위험, 독성가스에 의한 위험, 연기밀도에 의한 가시거리 감소로 인한 위험으로 분류되고 위험정도는 연소가스의 종류와 노출된 시간에 따라 달라진다. 공간내부의 산소농도감소나 일산화탄소(CO), 시안화수소(HCN), 염화수소(HCL)와 같은 독성가스의 농도증가는 호흡을 통해 직접적으로 인체에 작용하여 신진대사에 영향을 주게 된다. [표 3-17]은 연소생성물의 종류별로 독성가스의 노출시간에 따라 행동장애와 사망에 이르는 농도를 나타내고 있다. 일산화탄소의 경우 사람이 5분간 노출되어 사망에 이르는 농도가 12000 ppm 정도인데 반해 시안화수소는 250 ppm으로 매우 독성이 높다.

[표 3-17] 독성가스별의 노출시간에 따른 영향

Combustion product	Exposure time			
	5 minutes		30 minutes	
	Incapacity	Death	Incapacity	Death
CO [ppm]	6,000	12,000	1,000	2,500
HCN [ppm]	150	250	90	170
HCL [ppm]	500	16,000	200	<12%
Smoke organic irritants, K [m-1]	1.2	7	1.2	12

독성가스뿐만 공간내부의 화재특성에 따른 열적환경에 거주자가 노출된 경우 직접적인 영향을 인체에 미치게 되는데 [표 3-18]는 열적노출조건에 따른 임계온도와 인체에 미치는 영향을 요약하여 나타낸다. 금속물체를 1초간 접촉했을 때 피부화상을 유발할 수 있으며 대류열전달이 지배적인 조건에 5분정도 노출되면 피부나 폐에 손상을 유발하게 된다.

[표 3-18] 열적노출 조건에 따른 인체의 화재손상 정도

5

연소생성물
(Combustion
products)

Type and period of exposure	Effect	Temperature [°C]
radiation [2.5 kW/m ²]	Severe skin pain	185
conduction (metal, 1 second)	Skin burns	60
convection (30 minutes)	Hyperthermia	100
convection (< 5 minutes)	Skin/lung burns	120
convection (< 1 minutes)	Skin/lung burns	190



화재 플럼(Fire Plume)

무거운 유체 속에 가벼운 유체(물체)가 잠겨 있는 경우 밀도 차에 의해 가벼운 유체가 중력의 반대방향으로 상승하려는 힘이 존재하는데 이를 부력(Buoyancy)라 한다. 한편, 화재에서 화학반응에 의해 발생된 열은 연소가스와 상대적으로 낮은 온도의 주위기체에 열을 공급하여 온도를 상승시키고 온도가 상승함에 따라 밀도는 감소하여 가벼운 기체를 형성하게 된다. 주변보다 가벼워진 고온기체는 상대적으로 차가운 주변기체와의 밀도차이에 의해 수직으로 상승하는 고온연소가스 유동을 형성하게 되는데 이를 화재플럼(fire plume)이라고 한다. 화재플럼은 연소과정을 통해 생성된 열과 연소가스가 전달되는 시작점이며 화재로 인한 열과 물질전달을 해석하는데 있어서 가장 기본적인 과정을 나타내기 때문에 화재역학에서 매우 중요하게 인식된다. 본 장에서는 화재에서 발생된 화재플럼의 특성에 대해 설명하고 화재플럼을 해석하기 위한 몇 가지 모델을 기초로 하여 플럼의 거동에 대해 소개한다.

제1절 난류 화재플럼

- 학습 목표
 - 01 난류 화재플럼
 - 02 화재플럼의 형성
 - 03 난류 확산화염의 구조

1.1 화재플럼의 형성

가연물과 산화제와의 연소반응은 빛과 열을 동반한 화학반응으로 반응과정중에 많은 열 에너지를 방출하고 화원부근의 기체를 가열하게 된다. 연소 과정중에 생성된 고온의 연소가스와 가열된 주위기체의 밀도는 차가운 공기의 밀도에 비해 상대적으로 낮고 가벼워진 기체는 중력의 반대방향으로 상승하고자 하는 부력유동(buoyant flow)이 형성된다. 밀도 차에 의해 화원주변에서 형성되는 상승 열기류를 화재플럼(fire plume) 혹은 부력플럼(buoyant plume)이라 한다. 화재플럼은 상승하며 주위공기를 유입하고 차가운 공기와의 혼합을 통

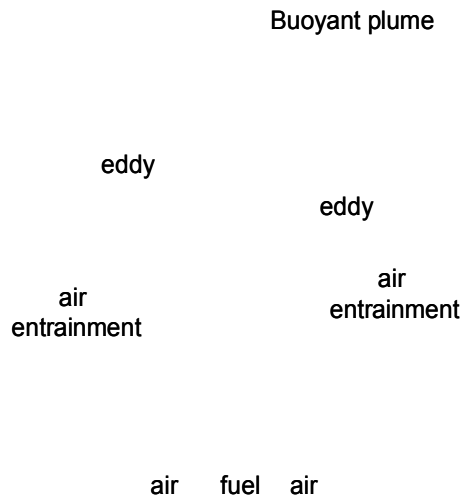
6

화재 플럼
(Fire Plume)

해 내부 온도는 하강하며 동시에 부력이 약화되어 상승력을 상실하게 된다.

[그림 3-50]과 같이 대부분의 화재플럼은 화원에서 발생된 열과 유입된 주변공기에 의해 매우 불안정한 형태의 난류유동(turbulent flow)을 형성하게 되며 이는 화염면 근처에서의 와류(eddy)와 관련된다. 화재플럼 내에 고온의 가스가 상승함에 따라 주변의 공기는 상승유동에 이끌려 화재플럼으로 들어오게 되는데 이를 공기유입(air entrainment)라 한다.

[그림 3-50] 난류 확산 화염의 구조



주변공기가 화재플럼으로 유입되는 것은 연소반응에 공급되는 산소의 양과 관련 있기 때문에 연소상태 및 연소생성물의 형성뿐만 아니라 화염높이나 화재플럼의 특성에도 직접적으로 영향을 미치게 된다.

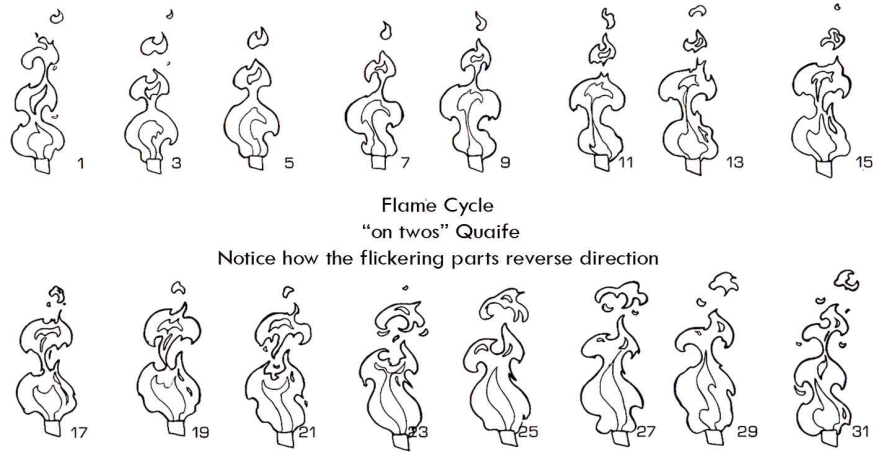
대부분의 화재유동은 특성길이의 크기정도가 1m 이상 난류유동(turbulent flow)으로써 유동형태가 무작위적(random)이고 불안정성을 띄게 된다. 주변공기와 화염이 만나는 화염 가장자리에서는 주위공기의 유입에 의해 화염이 급격히 냉각되어 상승력이 둔화됨과 동시에 중앙부와의 속도차가 발생하고 이로 인해 비교적 큰 규모의 와동(eddy)를 형성하게 된다. 이러한 난류화염에서 나타나는 대와동(large eddy)의 영향은 화재플럼의 화염높이 뿐만 아니라 화염의 거동특성에도 직접적으로 영향을 미친다.

연소과정의 진행과 함께 화염 내 연료가 모두 연소될 때까지 화염과 함께 상승하는 와동은 화염을 확장시키고 화염 내 연료의 소진 및 새로운 와동의 도입에 의해 화염은 다시 작아지게 되는 과정을 반복하게 된다[그림 3-51]. 따라서 화염높이는 주기적인 특성을 가지



게 되는데 이를 화염의 간헐성(intermittency) 혹은 퍼핑 화염(puffing flame)이라고 한다. 따라서 화염의 높이는 비정상적이고(unsteady) 불규칙적이기 때문에 적절한 정의를 통해 평균적인 값으로 나타내게 된다.

[그림 3-51] 난류 확산화염의 주기적인 거동



[그림 3-52]와 같이 화염의 가장자리에서 발생된 와동은 화염둘레를 따라 고리(ring)의 형태를 띠게 되는데 이를 와류(vortex)라고 한다. 화재플럼의 주기적인 특성은 화재플럼 바닥에서의 와류의 특성길이정도(order of magnitude of characteristic length)와 밀접한 관련이 있는데 일반적으로 화원의 직경에 의존하는 것으로 알려져 있다.

[그림 3-52] 화염부에서 발생되는 와류의 형태

(François-Xavier in the Aerodynamics and Energetics Modeling Department)



6

화원의 직경(D)에 대하여 신장과 수축을 반복하는 화염의 주기는 개략적으로 다음과 같은 관계를 가진다.

$$f = \frac{1.5}{\sqrt{D}} \quad (\text{식 6-1})$$

화재 플럼
(Fire Plume)

여기서 f 는 화염의 섭동주기(puffing frequency)이며 Hz 단위를 가진다.

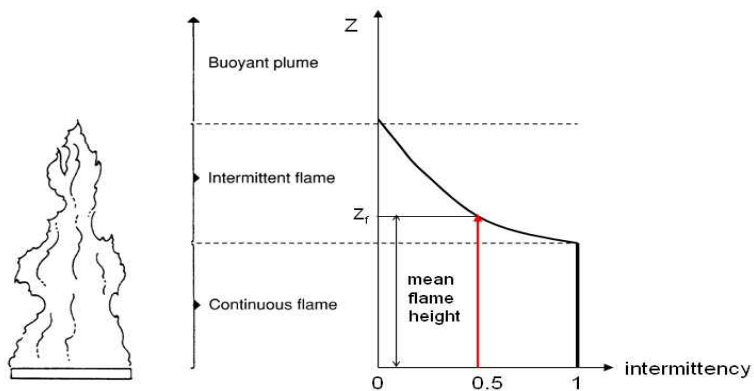
제2절 화염 높이

- 학습 목표
 - 01 화염높이의 정의
 - 02 제트화염의 높이
 - 03 일반적인 화재의 화염높이

2.1 화염높이의 정의

일반적으로 화원부에서 눈으로 보이는 가시화염(visible flame)은 연소반응이 일어나고 있는 영역으로 화염의 아래쪽 부분은 비교적 정상상태(steady state)이지만 위쪽으로 갈수록 비정상적인 화염 거동을 보이게 된다. [그림 3-53]과 같이, 화염의 아래쪽은 지속적으로 화염이 관측되는 연속화염부(continuous flame)로 화염부의 가시적 변화가 거의 없는 부분이다.

[그림 3-53] 화재플럼의 세부 영역과 평균화염높이 (McCaffrey)





그 윗부분은 간헐적으로 화염이 관측되는 부분으로 화염 끝단의 높이가 지속적으로 변화하는 간헐화염부(intermittent flame)이 존재하고 가시화염의 윗부분에는 연소반응에 의해 생성된 고온의 열기류가 주위 공기의 유입을 동반하며 상승하는 부력플럼(buoyant plume)부를 형성하고 있다. 따라서 순간적인 화염의 높이는 일정한 것이 아니라 [그림 3-51]에서 설명한 바와 같이 시간에 따라 변화하게 되기 때문에 적절한 방법으로 평균 화염의 높이를 정의할 필요가 있다.

높이에 따라 화염이 존재하는 빈도를 화염 간헐정도(flame intermittency)라고 할 때 연소화염부에서의 간헐정도는 1로써 항상 화염이 존재하지만 간헐화염부에서는 간헐정도가 약 0.1에서 0.9 사이의 값을 가지며 간헐화염부의 시작부에서 가장 큰 값을 가지고 높이가 증가함에 따라 감소하게 된다. 따라서 화염의 간헐정도값이 0.5인 높이를 평균화염 높이로 정의된다. 이러한 간헐화염부는 화염의 높이에 대한 화원직경의 비가 약 1~3 사이일 때 전체 화염높이 중 상당부분을 차지하게 된다. 평균화염높이는 연소반응이 완료되고 부력플럼이 시작되는 높이뿐만 아니라 화재성장에 중요한 인자인 복사에너지와 연층온도 및 독성가스의 생성 등에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 화재학에서 중요한 물성 중에 하나로 여겨진다.

2.2 제트화염 높이

가스라이터와 같이 제트에 의해 형성되는 화염높이는 노즐에서 분사되는 연료가스의 분출속도 즉, 관성에 의해 자유연소과정의 화염 높이와 차이를 보이게 된다.

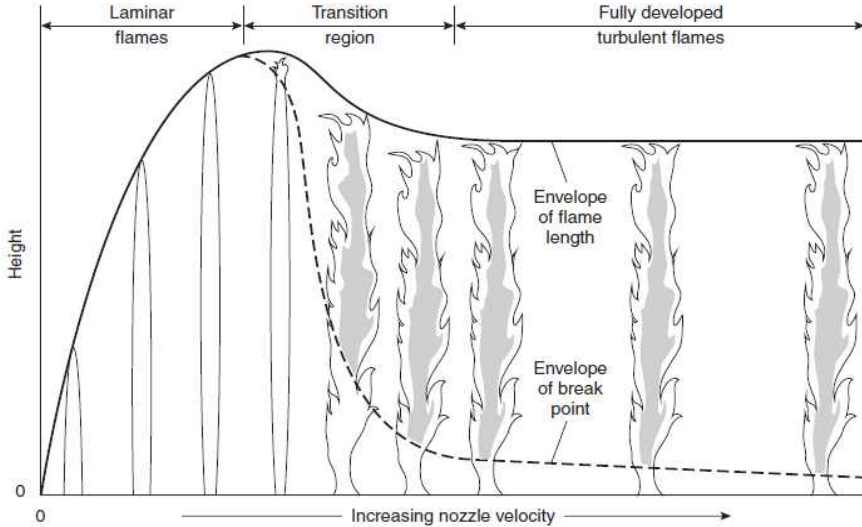
노즐의 직경이 D 이고 분출되는 연료 제트의 속도가 V 인 경우 [그림 3-54]에서 보는바와 같이 층류 화염의 높이는 분출속도의 증가에 따라 증가한다. 층류화염에서 최대높이는 노즐 직경의 약 200~300배까지 증가하게 된다.

제트속도가 증가함에 따라 화염의 꼭대기 끝단에서 난류화염이 시작되고 제트의 속도가 증가함에 따라 난류화염의 정도는 증가하며 화염높이는 감소한다. 제트의 속도가 더욱 증가하여 완전발달된 난류화염(fully developed turbulent flame)이 되면 화염의 높이는 거의 일정하게 유지된다. 이러한 특성은 화염으로의 주위공기의 유입과정과 직접적으로 관련이 있다. 연료는 화염의 바닥부에서 공급되기 때문에 화염의 높이는 연료가 완전히 연소되는 위치가 된다. 따라서 연소과정의 종료는 유입되는 공기의 양에 의해 결정되고 노즐에서 공급되는 연료의 질량유량은 노즐 직경과 연료제트의 속도에 의해 결정된다.

6

[그림 3-54] 노즐에서의 연료속도에 따른 화염높이변화 (Hottel and Hawthorne)

화재 플럼
(Fire Plume)



$$\dot{m}_f = \rho_a V_e \frac{\pi D^2}{4} \quad (\text{식 6-2})$$

화염으로 유입되는 공기의 질량유량은 분출되는 제트의 속도와 화염높이, 노즐직경 등에 의존한다.

$$\dot{m}_a \sim \rho_a D L_f V_e \quad (\text{식 6-3})$$

완전연소반응을 일으키기 위해 필요한 공기와 연료비는 이론 공연비(stoichiometric air fuel ratio, s)로 정의되고 제트화염의 경우 노즐에서 분출된 연료가 모두 연소되기 위해서는 이론 공연비에 비해 훨씬 더 많은 공기량이 필요하지만 적어도 공급되는 연료의 양과 유입되는 공기의 양이 이론공연비의 관계를 유지해야 한다.

$$\frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} \sim \frac{\rho_a D L_f V_e}{\rho_f \frac{\pi D^2}{4} V_e} \sim s \quad (\text{식 6-4})$$

$$\frac{L_f}{D} \sim s \frac{\rho_f}{\rho_a} \quad (\text{식 6-5})$$

따라서 주어진 노즐직경에 대하여 화염높이는 이론공연비와 연료의 밀도에만 의존하기 때문에 난류제트화염의 경우 노즐출구의 속도에 관계없이 화염의 높이는 거의 일정하게 된다.



2.3 일반적인 화재의 화염높이

연료의 운동량의 영향이 강한 제트화염과 달리 대부분의 가연물에 의해 발생한 자연적인 화재의 경우 부력에 의해 상승유동이 결정된다. 일반적으로 연료표면 근처에서 화염으로 공급되는 연료증기의 증발속도는 부력이나 주변공기의 유입등과 같은 전체적인 화염의 거동에 영향을 주는 인자들에 비해 매우 작다. 연소율은 연료표면에서 증발되는 연료증기의 증발속도와 연료의 밀도에 의해 산정할 수 있다.

$$\dot{m}''_f = \rho_f V_e \quad (\text{식 6-6})$$

연료표면에서 증발되는 연료의 속도는 다음과 같다.

$$V_e = \frac{\dot{m}''_f}{\rho_{f,v}} \quad (\text{식 6-7})$$

따라서 가연물 표면에서 증발되는 연료의 최대 증발 속도는 최대연소율에 대한 연료증기 밀도를 고려함으로써 산정할 수 있다. 일반적으로 연료의 증기밀도는 공기밀도에 대하여 약 1~5배 정도를 보이고 있으며 분자량이 큰 연료일수록 높은 증기밀도를 가지는 경향이 있다. [표 3-19]는 대표적인 액체연료의 최대연소율과 증기밀도 그리고 식 (6-7)에 의해 계산된 최대연소율에 해당하는 연료증기의 증발속도를 나타낸다. 대부분의 경우 연료의 증발 속도는 수 10^{-2} m/s의 크기정도를 가지고 있다. 이는 일반적으로 화재플럼의 속도 크기정도 $10^0 \sim 10^1$ m/s에 비해 1/100 혹은 1/1000배 이상 속도크기 정도의 차이를 나타내기 때문에 연료의 증발속도는 부력플럼이나 유입유동의 속도크기에 비해 무시할 정도로 작게 된다.

[표 3-19] 액체연료의 최대증발속도 크기 정도

Fuel type	Max. Burning rate [kg/m ² s]	vapour density [air=1]	fuel vapor velocity [m/s]
Methanol	0.020	1.1	0.018
Hexane	0.074	2.9	0.026
Heptane	0.101	3.5	0.029
Acetone	0.041	2	0.021
Gasoline	0.055	3~4	0.016
Kerosene	0.051	4.5~5	0.011

따라서 일반적인 가연물의 자유연소의 경우 화재플럼의 유동장은 주변공기의 유입과 온도차에 기인한 부력에 의해 지배되고 연료의 운동량에 의한 영향을 거의 무시할 정도이다.

난류화염의 특성상 화염의 높이를 정확하게 예측하는 이론식을 유도하는 것이 매우 어려운 일이기 때문에 화염높이에 영향을 미치는 인자를 우선적으로 조사하고 화염높이를 수식화하는데 필요한 주요 인자들에 관해서 실험적 데이터를 사용한다.

화재 플럼
(Fire Plume)

대부분 경우 화염영역내의 유동과정은 발열량에 의존하기 때문에 직접 화염유동을 스케일링하는 것이 매우 복잡하다. 대신 화염높이와 주요인자들 사이에 관련식을 유도하기 위해 발열량이 화염으로 유입되는 공기나 산소의 유입량에 비례한다는 가정을 하는데 이 가정은 화염의 아래 부분에서 측정된 온도가 약 1200K~1300K로 거의 일정하기 때문에 외형적으로는 비교적 타당한 가정으로 알려져 있다.

화염의 길이는 화원의 직경과 발열량 등 여러 가지 변수에 영향을 받기 때문에 화염길이에 관한 일반화된 관계식을 얻기 위해서는 무차원 변수를 이용한다.

화재의 부력유동에 대한 관성유동의 영향을 평가하기 위해 연료속도에 기초한 프루드수(Froude No., Fr)를 사용한다.

$$Fr = \frac{V_f}{(gD)^{1/2}} \quad (\text{식 6-8})$$

여기서 V_f 는 연료의 증발속도, D 는 화원의 직경, g 는 중력가속도이다. 4장에서 설명한 바와 같이 발열량은 연료의 연소율(\dot{m}_f)과 연소열($\Delta H_{C,f}$)에 의존하므로

$$\dot{Q} = \dot{m}_f \cdot \Delta H_{C,f} \quad (\text{식 6-9})$$

연료표면에서의 연소율은 연료의 증발속도와 화원의 직경에 의존하며 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{m}_f = \rho_f V_f \frac{\pi D^2}{4} \quad (\text{식 6-10})$$

식 6-10을 식 6-9에 대입하고 V_f 에 관해서 정리하면

$$V_f = \frac{\dot{Q}}{\Delta H_{C,f} \rho_f \frac{\pi D^2}{4}} \quad (\text{식 6-11})$$

식 6-11을 6-8의 Fr의 속도를 정의하는데 대입하면

$$Fr = \frac{\dot{Q}}{\Delta H_{C,f} \rho_f \frac{\pi D^2}{4} (gD)^{1/2}} \quad (\text{식 6-12})$$

여기서 발열량과 화원의 직경을 제외하고 나머지 변수는 연료에 따라 알려진 값이기 때



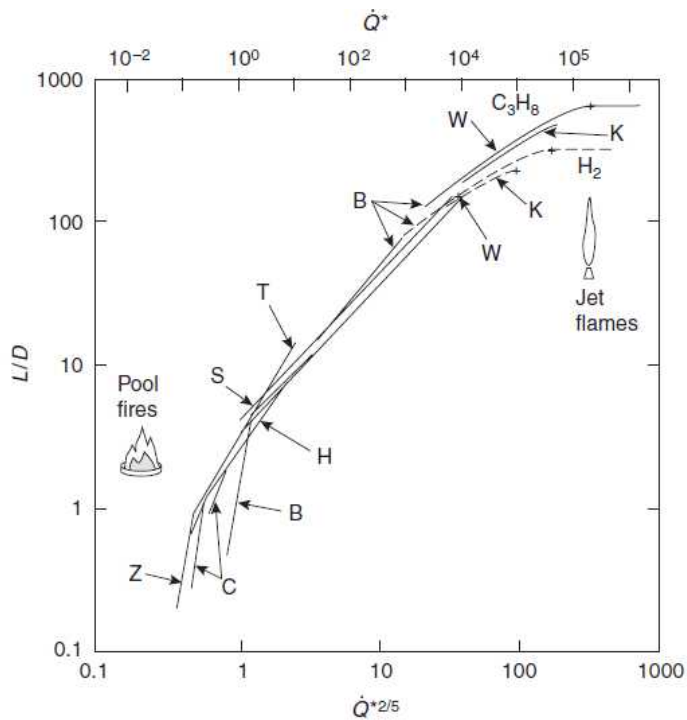
문에 Fr 수는 다음과 같이 관계된다.

$$Fr \sim \frac{\dot{Q}}{D^{2/5}} \quad (\text{식 6-13})$$

난류 화염의 기하학적인 형상은 Fr 수에 의해 의존하게 된다. 따라서 화염높이를 화원의 직경으로 나눈 무차원 화염높이는 Fr 수와 관련된다.

$$\frac{L_f}{D} \sim \frac{\dot{Q}}{D^{2/5}} \quad (\text{식 6-14})$$

[그림 3-55] 화원의 직경과 발열량에 따른 화염높이 (McCaffrey)



화원의 직경과 발열량에 대하여 화염의 높이를 연관 짓기 위해 많은 실험적 연구가 수행되었으며 그 결과 화염의 기하학적 특성을 해석하는데 무차원 발열량으로써 나타내는 것이 편리하다는 사실을 파악하였다.

무차원 발열량(nondimensional heat release rate)은 다음과 같이 산정된다.

$$Q^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty C_p T_\infty \sqrt{g D D^2}} \quad (\text{식 6-15})$$

여기서 ρ_∞ 는 공기의 밀도($\sim 1.205 \text{ kg/m}^3$), C_p 는 공기의 비열($\sim 1.015 \text{ kJ/kgK}$), T_∞ 는 공기의 외기 온도($\sim 298\text{K}$), g 는 중력가속도(9.81 m/s^2), \dot{Q} 은 발열량을 나타낸다. [그림 3-55]에서 보는 바와 같이 많은 연구자들의 실험에서 무차원 발열량은 평균화염높이를 화원의 직경으로 나눈 무차원 화염의 높이와 매우 밀접한 관련이 있으며 화염의 기하학적 특성을 평가하는데 있어서 매우 중요한 인자로 여겨진다. 그림의 오른쪽 부분의 제트화염의 경우 연료의 속도가 크기 때문에 Fr 수(즉, Q^*)가 크고 화원의 직경에 대한 화염높이가 100 이상의 값을 가진다. 반면에 왼쪽의 액체 풀화재의 경우 무차원 발열량의 크기가 작고 화원의 직경에 대한 화염의 높이가 거의 비슷한 크기정도를 가지며 부력이 지배하기 때문에 Fr 수는 작다.

일반적인 화재에서 Q^* 는 10 이하의 값을 가지고 대부분의 대규모 화재에서는 2보다 작은 값을 가지는 것으로 알려져 있다. 한편, 무차원 화염높이는 매우 폭넓은 범위의 $(\dot{Q}^*)^{2/5}$ 에 비례하는데 무차원 발열량을 2/5승하면

$$(Q^*)^{2/5} = \frac{\left(\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty C_p T_\infty \sqrt{g}} \right)}{D} \quad (\text{식 6-16})$$

좌변이 무차원이기 때문에 우변도 무차원이 되어야 한다. 따라서 우측항의 분자는 무차원이 되어야 하고 이를 무차원특성길이(nondimensional characteristic length)로 정의한다.

$$D^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty C_p T_\infty \sqrt{g}} \quad (\text{식 6-17})$$

화염의 높이를 계산하는 많은 경험식들이 제시되었는데 가장 일반적인 방법은 무차원특성길이를 이용하여 화염높이를 산정하는 방식이 가장 널리 이용된다. Heskestad는 $(Q^*)^{2/5}$ 이 매우 큰 제트화염부분을 제외하고 대부분의 영역에서 비교적 화염높이를 잘 예측하는 다음과 같은 관계식을 제시하였다.

$$\frac{L_f}{D} = 3.7 \dot{Q}^{*2/5} - 1.02 \quad (\text{식 6-18})$$

이 식의 보다 편리한 형태는 무차원 발열량 대신 화원의 발열량을 직접 적용하여 평균 화염 높이를 산정하는 식이다.

$$L_f = 0.235 \dot{Q}^{2/5} - 1.02D \quad (\text{식 6-19})$$

실제로 위의 관계식은 잘 제어된 풀화재나 연료의 물성이 매우 잘 알려진 연료에 대하여 반복적인 실험을 통해 얻어진 경험식이다. 그러나 대부분의 실체가연물은 연료의 물성이 잘 알려져 있지 않고 기하학적 형상이 매우 복잡하기 때문에 실험식의 조건과는 다소 차이가



있으나 실제화재의 화염높이를 예측하는데 유용한 경험식으로 사용되고 있다.

(예제 6-1) 직경이 1 m 인 드럼통에 휘발유가 50 liter 들어 있다. 이 드럼통에 점화가 일어난 경우 화염높이는 얼마정도인가?

휘발유의 최대연소율은 $0.055 \text{ kg/m}^2\text{s}$, 연소열은 $43,700 \text{ kJ/kg}$, $\kappa\theta$ 는 1.1이다.

휘발유의 연소율은 Zabetakis와 Burgess의 상관관계식을 적용하여

$$\dot{m}_f'' = \dot{m}_f'' (1 - e^{-\kappa\theta D}) = 0.055 \times (1 - e^{-2.1 \times 1}) = 0.0483 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

발열량은 연소율에 화원의 단면적과 연료의 연소열을 고려하여 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{Q} = \dot{m}_f'' \cdot \Delta H_c \cdot A = 0.0483 \times 43,700 \times \frac{\pi \cdot 1^2}{4} = 1,656 \text{ kW}$$

따라서 화염의 높이는

$$L_f = 0.235 \cdot \dot{Q}^{2/5} - 1.02 D = 0.235 \times 1656^{2/5} - 1.02 \times 1 = 3.53 \text{ m}$$

따라서 평균화염높이는 약 3.5 m 정도로 예측된다.

제3절 플럼 이론 (Plume theory)

- 학습 목표 01 난류 화재플럼의 특성
- 02 점원모델 (Point source model)

3.1 난류화재플럼의 특성

화재시나리오에 따라 다양한 형태의 화재플럼이 존재하지만 화재학에서 적용되는 가장 일반적인 화재플럼의 형태는 자유롭게 연소되는 확산화염에 의해 생성되는 축대칭 부력 플럼(axisymmetric buoyant plume)이다.

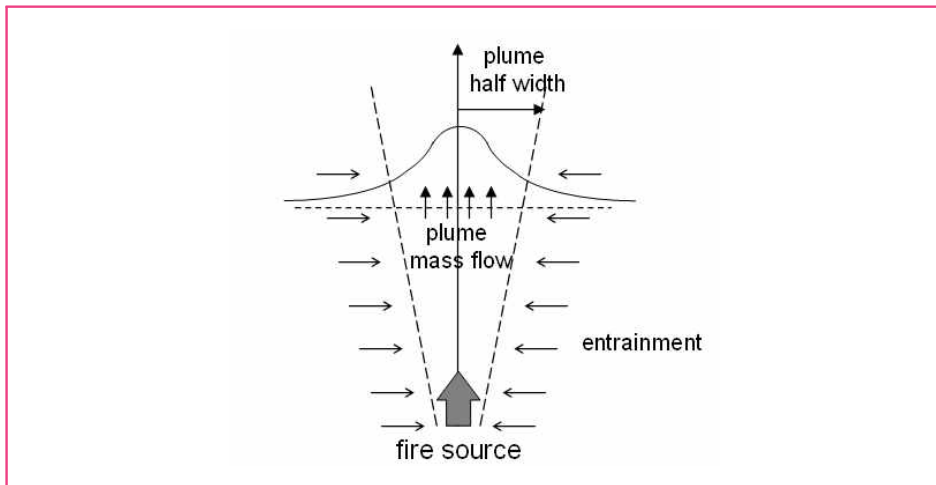
[그림 3-56]과 같이 축대칭 부력플럼은 중앙축을 중심으로 회전방향에 대해 대칭을 이루기 때문에 동일 높이(z)에 대해 플럼의 중심축에서의 속도와 온도가 가장 크고 가장자리

로 갈수록 유입공기와의 혼합으로 속도와 온도는 낮아진다.

연속화염부가 존재하는 연료표면 근처에서는 지속적인 연소반응이 일어나기 때문에 온도가 상대적으로 높고 화염의 높이방향으로 올라감에 따라 주위 공기의 유입으로 인해 높이에 따른 중심축에서의 온도는 감소한다. 중심축에서의 속도는 연속 화염부에서는 높이증가에 따라 상승속도도 함께 증가하지만 그 위쪽에서는 공기유입에 의해 플럼이 냉각됨에 따라 부력의 약화로 인해 상승속도는 둔화된다.

플럼의 질량유량(\dot{m}_p)은 연소반응에 의해 생성된 연소생성물의 질량유량과 유입된 공기의 질량유량의 합으로 표현된다. 플럼이 상승함에 따라 주변공기의 유입은 지속적으로 이루어지기 때문에 플럼의 질량유량은 높이에 따라 증가하는 경향을 보이게 된다.

[그림 3-56] 축대칭 부력 플럼의 구조



앞에서 언급한바와 같이 연료표면에서의 연소율은 유입되는 공기의 양에 비해 매우 작기 때문에 부력플럼을 구성하고 있는 대부분의 성분은 유입된 공기로 이루어져 있다. 한편 임의 높이에서 플럼의 폭은 온도차에 의해 정의되는데 중심축의 온도와 외기온도차를 다음과 같이 정의한다.

$$\Delta T = T_c - T_\infty \quad (\text{식 6-20})$$

따라서 플럼의 폭은 중심축에서부터 반경방향으로 온도가 $0.5\Delta T$ 까지 하강하는 위치까지의 거리로 정의된다. 일반적으로 화재플럼이 상방향으로 퍼져나가는 각도는 약 15° 정도로 알려져 있다.

부력플럼의 거동을 해석하기 위해서 많은 연구가 진행되어 왔고 화원을 모사하는 방법에



따라 점원모델(point source model), 선원모델(line source model), 원형소스모델(circular source model)등 다양한 모델이 제시되고 있으나 본 교재에서는 가장 기초적이고 해석방법이 간단한 점원모델을 중심으로 플럼이론을 소개한다.

3.2 점원모델 (Point source model)

가. 점원모델 가정

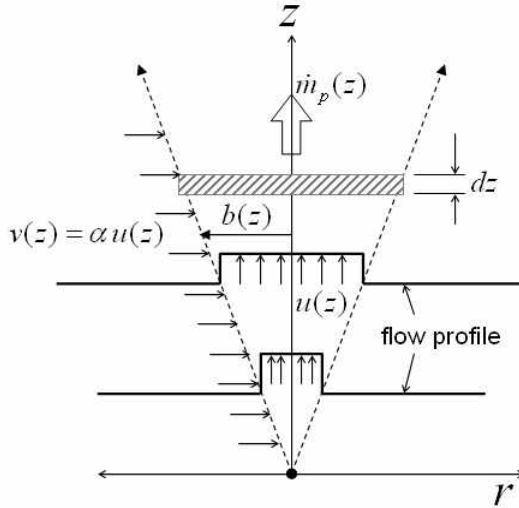
화재플럼의 속도, 온도 등에 대한 해석을 얻기 위해서는 단순화된 화재플럼에 대하여 연속방정식, 운동방정식등과 같은 기본적인 방정식을 구성해야 한다. [그림 3-57]에서 보는바와 같이 점원모델(point source model)은 부력플럼의 시작이 화원의 한 점에서 시작되고 모든 에너지는 플럼 내에서 전달되며 점원으로부터 복사열을 방출되지 않는다고 가정한다. 플럼의 상승력은 주변기체와의 온도차에 의한 부력에 기인하고 임의 높이에서의 유동분포는 단면에 대해 일정한 모자형분포(top hot profile)를 가정한다. 따라서 플럼의 상승속도는 플럼의 폭에 걸쳐서 일정하고 플럼의 바깥쪽에서는 0 이다.

플럼의 속도와 온도 등은 높이에 따라 변화하기 때문에 높이에 따른 플럼의 속도와 온도 그리고 반폭은 $u(z), T(z), b(z)$ 로 각각 표시하고 플럼 내의 속도와 온도는 u_0, T_0 로 표시한다. 플럼의 바깥쪽의 속도와 온도는 u_∞, T_∞ 등으로 표기하고 주변온도와 플럼 내부의 온도차는 ΔT 로 나타낸다. 또한 플럼의 상승유동에 따른 주위공기의 유입은 플럼의 상승속도의 함수로 표현되고 유입계수(entrainment coefficient)를 도입하여 유입속도를 다음과 같이 나타낸다.

[그림 3-57] 부력플럼의 이상적인 가정

6

화재 플럼
(Fire Plume)



$$v(z) = \alpha u(z) \tag{식 6-21}$$

점원모델을 이용하여 부력플럼의 해석해를 얻기 위해서 도입된 가정을 정리하면 다음과 같다.

플럼내의 모든 에너지는 점원에서 공급되며 플럼 내에서만 전달된다.

실제 화재플럼의 경우 전체 화원에서 방출된 에너지의 약 20~40%의 에너지가 복사분율이지만 플럼의 복사열전달에 의한 에너지 손실은 무시한다.

높이에 따른 플럼의 밀도변화는 비교적 작다고 가정하기 때문에 부력항을 제외한 나머지 항에서는 $\rho \approx \rho_\infty$ 라고 가정하고 밀도변화는 부력항에서만 고려하는 Boussinesq 가정을 도입한다. 이 가정은 주변 공기와의 온도차가 큰 연료표면 근처에서는 타당하지 않지만 화원표면에서 떨어진 상승플럼에 대해서는 비교적 타당한 결과를 제공한다.

임의 높이에서의 속도, 온도 등의 분포는 모자형 분포로 유사한 형태를 가지는 것으로 가정하고 플럼의 바깥에서는 $u = 0, T = T_\infty$ 이다.

플럼의 가장자리에서 유입되는 공기의 속도는 상승유동속도에 비해하고 유입속도는 상승속도의 약 15%로 가정한다. 즉, 유입계수 $\alpha = 0.15$ 로 가정한다.

임의 높이 z 에서의 플럼의 반경이 b 이고 단면적이 πb^2 인 단면을 통과하는 질량유량은 다음과 같이 나타낸다.

$$\dot{m}_p = \rho u \pi b^2 \tag{식 6-22}$$



임의 높이 z 위치에서 미소 높이 dz 만큼에 해당되는 미소체적 dV 는

$$dV = \pi b^2 dz \quad (\text{식 6-23})$$

임의 높이 z 와 $z + dz$ 사이의 미소체적의에 작용하는 부력 dF_B 는

$$\begin{aligned} dF_B &= \gamma_\infty dV - \gamma dV = g(\rho_\infty - \rho) dV \\ &= g(\rho_\infty - \rho) \pi b^2 dz \end{aligned} \quad (\text{식 6-24})$$

여기서 g 는 중력가속도(m/s^2)를 나타낸다. 임의 높이 z 에서 운동량의 시간변화율은 다음과 같이 정리된다.

$$\dot{m}_p u = \rho u^2 \pi b^2 \quad (\text{식 6-25})$$

화재유동에서 밀도차를 야기하는 근원은 화재에서 발생된 열에너지에 있다. 따라서 발열량과 밀도 차 사이의 관계를 도출할 필요가 있다.

화재플럼에서 복사열손실이 없다는 가정에 의해, 임의 높이 z 위치에서 플럼가스의 열에너지는 다음과 같이 나타낸다.

$$\dot{Q} = \dot{m}_p C_p \Delta T = \rho u \pi b^2 \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (\text{식 6-26})$$

여기서 C_p 는 플럼가스의 정압비열(kJ/kgK)을 나타내고 ΔT 는 임의 높이에서의 온도차를 나타낸다. 밀도는 온도에 반비례하기 때문에 온도차와 밀도 차 사이의 관계를 유도하면

$$\rho T = \rho_\infty T_\infty, \quad \frac{T}{T_\infty} = \frac{\rho_\infty}{\rho} \quad (\text{식 6-27})$$

여기서, $\Delta T = T - T_\infty$, $T = \Delta T + T_\infty$ 를 식 6-27에 대입하면

$$\begin{aligned} \frac{\Delta T + T_\infty}{T_\infty} &= \frac{\rho_\infty}{\rho}, \quad \frac{\Delta T}{T_\infty} = \frac{\rho_\infty}{\rho} - 1 \\ \Delta T &= \frac{\rho_\infty - \rho}{\rho} T_\infty, \quad \Delta T = \frac{\Delta \rho}{\rho} T_\infty \end{aligned} \quad (\text{식 6-28})$$

여기서 밀도 차 $\Delta \rho = \rho_\infty - \rho$ 이다. 식 6-26의 에너지 관계식에 적용하면

$$\dot{Q} = \rho u \pi b^2 \cdot C_p \cdot \frac{\Delta \rho}{\rho} T_\infty \quad (\text{식 6-29})$$

따라서 밀도 차와 발열량 사이에는 다음과 같은 관계식이 성립된다.

6

화재 플럼
(Fire Plume)

$$\Delta\rho = \frac{\dot{Q}}{\pi b^2 u C_p T_\infty} \quad (\text{식 6-30})$$

이상과 같은 부력플럼에 대한 기본관계식을 바탕으로 높이변화에 따른 질량, 운동량 및 부력에 대한 지배방정식을 도출한다.

나. 점원모델의 지배방정식

부력 플럼에서 임의 높이 z 위치의 미소높이 dz 구간동안의 질량증가는 높이 dz 만큼의 둘레를 통해 유입된 질량에 기인한다. dz 높이 구간동안의 질량변화율은 식 6-22에 기초하여 다음과 같다.

$$\frac{d\dot{m}_p}{dz} = \frac{d(\rho u \pi b^2)}{dz} \quad (\text{식 6-31})$$

dz 높이의 둘레를 통해 유입되는 공기의 질량유량은 밀도와 미소둘레면적 ($2\pi b dz$), 그리고 수평방향의 유입속도 ($v = \alpha u$)의 곱으로 나타낸다. 따라서 미소높이에 대한 유입공기의 질량유량은 다음과 같다.

$$\dot{m}_e = \frac{\rho \alpha u 2\pi b dz}{dz} = \rho \alpha u 2\pi b \quad (\text{식 6-32})$$

플럼 내 dz 구간동안의 질량 변화 = dz 구간에 대한 유입공기량

$$\frac{d(\rho u \pi b^2)}{dz} = 2\rho \alpha u \pi b \quad (\text{식 6-33})$$

여기서 높이에 따른 밀도차가 매우 작다고 가정하면(weak plume assumption) 높이에 따라 밀도변화는 거의 없기 때문에 밀도를 상수로 간주할 수 있다. 따라서 플럼이 미소높이 dz 구간에 대한 연속방정식(질량보존)은 다음과 같다.

$$\frac{d(ub^2)}{dz} = 2\alpha u b \quad (\text{식 6-34})$$

높이 dz 구간에 대한 운동량변화는 미소요소 dz 에 작용하는 단위높이 당 부력과 같다. 단위높이 z 에 대한 운동량변화율은 식 6-25에 기초하여 다음과 같다.

$$\frac{d(\dot{m}_p u)}{dz} = \frac{d(\rho u^2 \pi b^2)}{dz} \quad (\text{식 6-35})$$

미소요소에 작용하는 단위높이당의 부력은 식 6-24에 의해 다음과 같이 나타낸다.

$$\frac{dF_B}{dz} = g(\rho_\infty - \rho)\pi b^2 \quad (\text{식 6-36})$$



밀도변화 $\Delta\rho = \rho_\infty - \rho$ 를 로 나타내면 부력변화에 기인한 운동량 변화율은 다음과 같다.

$$\frac{d(\rho u^2 \pi b^2)}{dz} = g \Delta\rho \pi b^2 \quad (\text{식 6-37})$$

높이에 따른 밀도변화는 매우 작다고 가정하고 식 6-30의 밀도 차와 발열량사이의 관계식을 적용하면

$$\begin{aligned} \pi\rho \frac{d(u^2 b^2)}{dz} &= g \frac{\dot{Q}}{\pi b^2 u C_p T_\infty} \pi b^2 \\ \frac{d(u^2 b^2)}{dz} &= g \frac{\dot{Q}}{\rho \pi u C_p T_\infty} \end{aligned} \quad (\text{식 6-38})$$

여기서 weak plume 가정에 의해 높이에 따른 밀도변화는 거의 없다고 가정하므로 $\rho \approx \rho_\infty$ 이며 이를 식 6-28에 적용하면 운동량-부력 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d(u^2 b^2)}{dz} = \frac{g \dot{Q}}{\pi u C_p T_\infty \rho_\infty} \quad (\text{식 6-39})$$

다. 점원모델에 의한 지배방정식의 해법

점원모델에서의 높이에 따른 유동형태를 지배하는 방정식은 식 6-34의 연속방정식(질량보존)과 식 6-38의 운동방정식이 된다. 따라서 주어진 조건인 발열량, 주변 온도와 밀도 등에 대하여 미분방정식(differential equation)을 해석하여 미지수인 플럼의 폭(b)와 상승속도(u)를 계산한다. 점원 모델에 대한 플럼의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{d(ub^2)}{dz} &= 2\alpha u b \\ \frac{d(u^2 b^2)}{dz} &= \frac{g \dot{Q}}{\pi u C_p T_\infty \rho_\infty} \end{aligned}$$

우선 플럼의 폭과 상승속도는 높이의 멱승에 비례한다고 가정하면 해는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} b &= C_1 z^m \\ u &= C_2 z^n \end{aligned}$$

이를 지배방정식에 각각 대입하면 다음과 같다.



화재 플럼
(Fire Plume)

$$\frac{d(C_2 z^n C_1^2 z^{2m})}{dz} = 2\alpha C_2 z^n C_1 z^m \quad (\text{식 6-40})$$

$$C_1^2 C_2 (2m+n) z^{2m+n-1} = 2\alpha C_1 C_2 z^{m+n}$$

$$\frac{d(C_2^2 z^{2n} C_1^2 z^{2m})}{dz} = \frac{g \dot{Q}}{\pi C_2 z^n C_p T_\infty \rho_\infty} \quad (\text{식 6-41})$$

$$C_1^2 C_2^2 2(m+n) z^{2m+2n-1} = \frac{g \dot{Q}}{C_2 \pi C_p T_\infty \rho_\infty} z^{-n}$$

각각의 식에 대하여 미지수 z 의 차수는 같아야 하므로 m 과 n 은 다음과 같이 계산된다.

$$2m+n-1 = m+n \Rightarrow m=1$$

$$2m+2n-1 = -n \Rightarrow n = -\frac{1}{3}$$

각 식의 미지수 z 의 차수가 같기 때문에 상수항 전체가 같아야 하므로 상수 C_1 과 C_2 는 다음과 같이 계산된다.

$$C_1^2 C_2 \left(2 - \frac{1}{3}\right) = 2\alpha C_1 C_2 \Rightarrow C_1 = \frac{6}{5}\alpha$$

$$C_1^2 C_2^2 2 \left(1 - \frac{1}{3}\right) = \frac{g \dot{Q}}{C_2 \pi C_p T_\infty \rho_\infty} \Rightarrow \left(\frac{6}{5}\right)^2 \alpha^2 C_2^3 \frac{4}{3} = \frac{g \dot{Q}}{\pi C_p T_\infty \rho_\infty}$$

$$C_2 = \left(\frac{25}{48 \alpha^2} \frac{g \dot{Q}}{\pi C_p T_\infty \rho_\infty} \right)^{1/3}$$

따라서 계산된 차수와 상수를 각각 플럼의 폭과 상승속도에 대입하여 해석해를 얻을 수 있다.

$$b = C_1 z^m \Rightarrow b(z) = \frac{6}{5}\alpha \cdot z \quad (\text{식 6-42})$$

$$u = C_2 z^n \Rightarrow u(z) = \left(\frac{25}{48 \pi \alpha^2} \frac{g \dot{Q}}{C_p T_\infty \rho_\infty} \right)^{1/3} z^{-1/3} \quad (\text{식 6-43})$$

가정에서 언급한바와 같이 유입계수(α)는 약 0.15정도의 값을 가진다고 가정 하였으므로 이 값을 적용하여 정리하면 플럼상승 속도에 관한 유용한 식을 얻을 수 있다.

$$u(z) = 1.94 \left(\frac{g}{C_p T_\infty \rho_\infty} \right)^{1/3} \dot{Q}^{1/3} z^{-1/3} \quad (\text{식 6-44})$$



한편 플럼의 질량유량은 식 6-22에서 정의한 바와 같이 플럼의 폭과 상승속도의 함수이다.

$$\dot{m}_p = \rho u \pi b^2 \Rightarrow \dot{m}_p = \rho \cdot 1.94 \left(\frac{g}{C_p T_\infty \rho_\infty} \right)^{1/3} \dot{Q}^{1/3} z^{-1/3} \cdot \pi \left(\frac{6}{5} \alpha z \right)^2$$

$$\dot{m}_p = 0.20 \rho \left(\frac{g}{C_p T_\infty \rho_\infty} \right)^{1/3} \dot{Q}^{1/3} z^{5/3} \quad (\text{식 6-45})$$

weak plume 가정에 의해 $\rho \approx \rho_\infty$ 를 적용하면

$$\dot{m}_p(z) = 0.20 \left(\frac{\rho_\infty^2 g}{C_p T_\infty} \right)^{1/3} \dot{Q}^{1/3} z^{5/3} \quad (\text{식 6-46})$$

한편 플럼의 온도차 ΔT 는 플럼의 열에너지 관계식 6-26으로부터 계산된다.

$$\Delta T = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_p C_p}$$

$$\Delta T(z) = 5.0 \left(\frac{T_\infty}{\rho_\infty^2 g C_p^2} \right)^{1/3} \dot{Q}^{2/3} z^{-5/3} \quad (\text{식 4-47})$$

플럼의 질량유량은 발열량의 1/3승과 높이의 5/3승에 비례하고 플럼의 온도차는 발열량의 2/3승과 높이의 -5/3에 비례한다.

결론적으로 플럼의 폭과 상승속도, 질량유량, 온도차에 관한 식을 정리하면 다음과 같은 최종식을 유도할 수 있다.

$$b(z) = \frac{6}{5} \alpha z$$

$$u(z) = 1.94 \left(\frac{g}{C_p T_\infty \rho_\infty} \right)^{1/3} \dot{Q}^{1/3} z^{-1/3}$$

$$\dot{m}_p(z) = 0.20 \left(\frac{\rho_\infty^2 g}{C_p T_\infty} \right)^{1/3} \dot{Q}^{1/3} z^{5/3}$$

$$\Delta T(z) = 5.0 \left(\frac{T_\infty}{\rho_\infty^2 g C_p^2} \right)^{1/3} \dot{Q}^{2/3} z^{-5/3}$$

6

화재 플럼
(Fire Plume)

(예제 6-2) 땅속 가스배관에서 가스가 누출되어 연소가 일어나고 있고 발열량은 약 200 kW 정도이다. 플럼의 높이에 따른 온도분포와 질량유량 분포를 계산하고 가스 누출부에서 5 m 높이에 전신주에서 작업 중인 인부가 있을 때 그 높이에서 온도를 구하라.

5 m

외기의 온도 $T_\infty = 293 K$, 밀도는 $\rho_\infty = 1.205 kg/m^3$, 비열 $C_p = 1.015 kJ/kgK$ 이며 중력가속도 $g = 9.81 m/s^2$ 이다.

$$\Delta T(z) = 5.0 \left(\frac{293}{1.205^2 \times 9.81 \times 1.015^2} \right)^{1/3} 200^{2/3} z^{-5/3}$$

$$\dot{m}_p(z) = 0.20 \left(\frac{1.205^2 \times 9.81}{1.015 \times 293} \right)^{1/3} 200^{1/3} z^{5/3}$$

위 식을 z 에 대한 함수로써 도식적으로 나타내면 다음과 같다.



한편 인부가 작업 중인 5 m 위치에서의 온도는

$$\begin{aligned}\Delta T(z) &= 5.0 \left(\frac{293}{1.205^2 \times 9.81 \times 1.015^2} \right)^{1/3} 200^{2/3} 5^{-5/3} \\ &= 31K\end{aligned}$$

따라서 온도는 $T = 293 + 31 = 324 \text{ K} = 51 \text{ }^\circ\text{C}$

제4절 플럼식의 실험적 검토

화재 플럼
(Fire Plume)

- 학습 목표**
- 01 Zukoski 플럼 (The Zukoski plume)
 - 02 McCaffrey 플럼 (The McCaffrey plume)
 - 03 Thomas 플럼 (The Thomas plume)

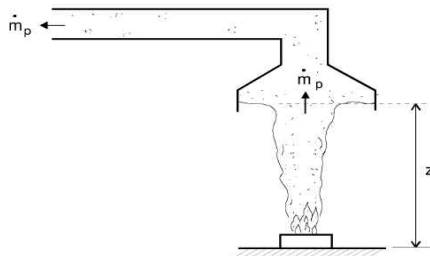
플럼이론은 기본적으로 여러 가지 제한적인 가정을 적용하여 플럼 유동에 대한 가장 기본적인 관계식을 제공한다. 그러나 실제 부력플럼은 플럼이론에서 얻어진 해석해와는 다소 차이가 있다. 따라서 플럼이론이 실제 현상에 보다 잘 맞는 관계식이 되기 위해서는 실험적인 비교, 검토를 통해 실제 현상의 영향을 관계식에 도입할 필요가 있다. 본 절에서는 실험에 기초하여 화재역학에서 널리 적용되는 대표적인 플럼식과 각 모델의 특징에 대해 소개한다.

4.1 Zukoski 플럼 (The Zukoski plume)

Zukoski는 기본적인 플럼이론을 기초로 하여 실험적인 비교검토를 통해 이상적인 플럼 모델의 타당성을 평가하고 플럼이론에 기초하여 플럼의 질량유량에 관한 경험식을 유도하고자 하였다. [그림 3-58]과 같이 후드(hood) 실험을 통하여 후드의 배기부에서의 유량을 제어하여 후드 내 고온 연층높이를 일정하게 유지하였다. 따라서 연층의 경계높이에서 플럼의 질량유량은 배기덕트를 통해 빠져나가는 질량유량과 같아지기 때문에 주어진 발열량에 대하여 임의 높이에서의 질량유량을 측정하였고 실험에 기초하여 이상적인 플럼이론을 수정한 플럼식을 제시하였다.

$$\dot{m}_p(z) = 0.21 \left(\frac{\rho_{\infty}^2 g}{C_p T_{\infty}} \right)^{1/3} \dot{Q}^{1/3} z^{5/3} \quad (\text{식 4-48})$$

[그림 3-58] 후드를 이용한 플럼 질량유량의 측정





이 식은 이상적인 가정의 플럼식과 비교할 때 상수가 0.2에서 0.21로 조정된 것을 제외하고는 동일하다. Zukoski의 실험결과 이상적인 가정의 플럼식이 실험에서 측정된 질량유량에 비해 다소 낮게 예측하고 있으나 플럼의 전반적인 높이에 대해서 비교적 타당한 결과를 제공하고 있다. Zukoski 플럼에 관한 보다 일반적인 식은 대기조건을 적용한 다음식이 널리 적용된다.

$$\dot{m}_p(z) = 0.071 \dot{Q}^{1/3} z^{5/3} \quad (\text{식 4-49})$$

4.2 McCaffrey 플럼 (The McCaffrey plume)

McCaffrey는 메탄(CH₄) 화재 플럼의 중앙부 온도에 따라 3개 영역 연속화염영역, 간헐화염영역, 부력플럼으로 나누었고 차원해석(dimensional analysis)와 실험을 통해 플럼의 상승속도와 온도에 관한 상관식을 유도했다.

$$\Delta T = \left(\frac{\kappa}{0.9 \sqrt{2}} \right)^2 \left(\frac{z}{\dot{Q}^{2/5}} \right)^{2\eta-1} \cdot T_\infty \quad (\text{식 4-50})$$

$$u_o = \kappa \left(\frac{z}{\dot{Q}^{2/5}} \right)^\eta \dot{Q}^{1/5} \quad (\text{식 4-51})$$

여기서 κ 와 η 는 경험상수로서 [표 3-20]에 나타난 바와 같이 플럼의 각 영역마다 다른 값을 가진다.

식 4-50과 식 4-51의 경험식은 [그림 3-59]의 (a)와 (b)에 실선으로 표시되었다. 그림에서 보는 것처럼 $z/\dot{Q}^{2/5}$ 가 0.02보다 큰 영역에서는 경험식과 실험결과가 매우 잘 일치하고 있다.

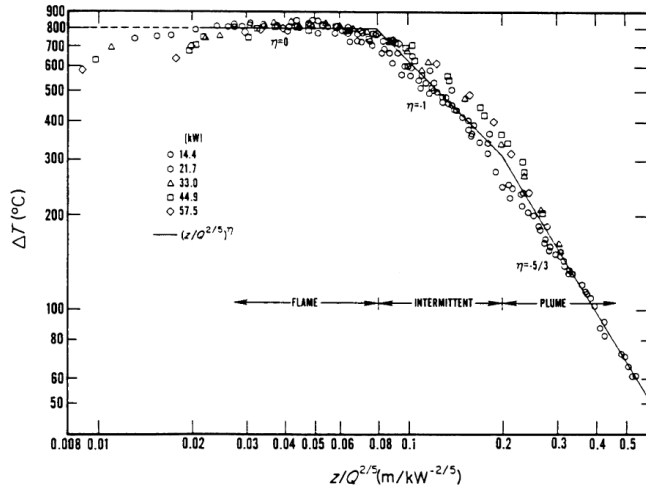
[표 3-20] McCaffrey 플럼식에 사용되는 상수

region	$z/\dot{Q}^{2/5}$	η	κ
continuous flame	< 0.08	1/2	6.8
intermittent	0.08 - 0.2	0	1.9
buoyant plume	> 0.2	-1/3	1.1

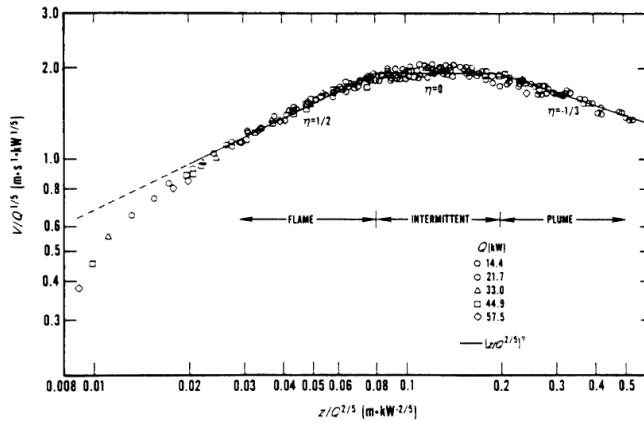
6

[그림 3-59] 높이에 따른 플럼중앙부에서의 온도 및 속도변화 (McCaffrey)

화재 플럼
(Fire Plume)



(a) 높이에 따른 온도 변화



(b) 높이에 따른 상승속도 변화

그러나 McCaffrey 플럼 관계식은 화재의 발열량에만 의존하고 연료의 종류에 대해서는 고려하지 못하고 있는데 연료들마다 복사분율이 다르기 때문에 연속화염영역에서 화염온도는 연료종류에 의존하게 된다. 뿐만 아니라 McCaffrey 관계식은 연속화염영역의 온도가 800 °C로 맞추어져 있지만 대형화재의 화염온도는 1200 °C 이상 상승하기 때문에 연속화염영역에서 차이가 있을 수 있다. 그러나 McCaffrey 관계식은 실험에 기초하여 유도된 관계식이기 때문에 많은 경우에 있어서 비교적 타당한 결과를 제공하는 것으로 알려져 있어 널리 이용된다.



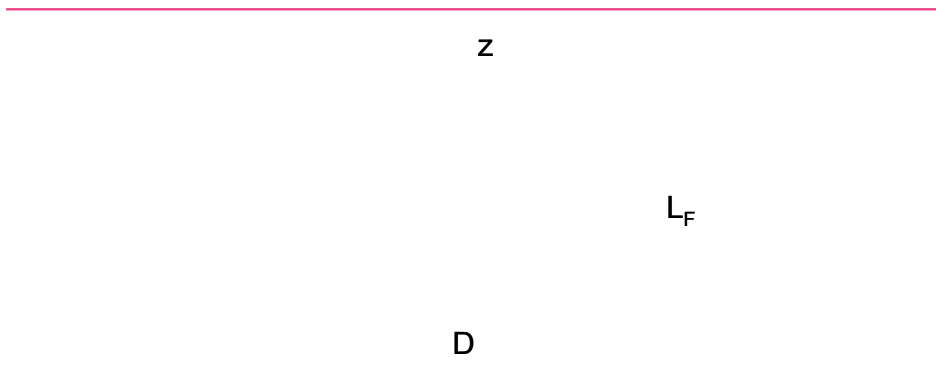
4.3 Thomas 플럼 (The Thomas plume)

Thomas등은 연속화염영역이나 그 근처에서는 플럼의 질량유량이 발열량에 상대적으로 덜 의존하고 화원위의 임의 높이 z 에서의 화재둘레에 의존한다는 사실을 파악하였다. 특히 [그림 3-60]과 같이 평균화염높이가 화원의 직경에 비해 비교적 작은 경우 이러한 경향은 더욱 두드러진다는 사실을 파악하였다. 이러한 사실에 기초하여 Thomas는 플럼이 질량유량에 대한 상관식을 다음과 같이 제시하였다.

$$\dot{m}_p = 0.188 P z^{3/2} = 0.59 D z^{3/2} \quad (\text{식 4-52})$$

여기서 P 는 화재둘레(πD)를 나타낸다. 화원의 직경에 비해 화염높이가 높지 않기 때문에 플럼은 원추형이기 보다 원통형에 가깝게 된다. 이러한 경향은 화염높이가 화원크기에 비해 상대적으로 작은 대형화재에서 일반적으로 나타나는 현상이다. 화원의 형상이 원인 경우 $P = \pi D$ 를 적용하면 플럼의 질량유량은 화원의 직경과 높이의 함수로 나타낼 수 있다.

[그림 3-60] Thomas 플럼의 개략도



일반적으로 식 4-52에 의해 예측된 질량유량은 화염높이정도까지만 타당하지만 더 높은 영역에 대해서도 실험결과와 매우 잘 일치하는 것으로 알려져 있다. 식 4-52는 화원이 원형이 아니고 $L/D < 1$ 인 경우에 대해 매우 유용한 관계식이다.

제5절 화재플럼과 천정/벽과의 상호작용

화재 플럼
(Fire Plume)

- 학습 목표**
- 01 천정제트(Ceiling jet)
 - 02 플럼과 벽과의 상호작용
 - 03 천정에서의 화염확장
 - 04 개구부에서의 수직벽을 따른 플럼거동

1. 천정제트(Ceiling jet)

화재플럼이 천정과 충돌하면 고온의 플럼가스는 충돌점(stagnation point)을 중심으로 축대칭으로 퍼져나가게 되는데 이를 천정제트(ceiling jet)라 한다. 일반적으로 천정제트는 연기선단(smoke front)의 수평적 이동과 관련되어 공간내부의 연기확산을 이해하는데 매우 중요한 인자일 뿐만 아니라 대부분의 화재감지장치나 소화설비가 천정아래 설치되어 있기 때문에 이들 장치의 작동 및 반응시간을 해석하는데 있어서 천정제트의 열유동 특성을 파악하는 것은 매우 중요하다.

천정제트의 초기 두께는 플럼에 직경에 비해 상대적으로 작지만 상승플럼으로 유입되는 공기는 주변 공기유동을 플럼 쪽으로 향하게 하고 천정제트에 유동을 공급하는 역할을 하기 때문에 화재가 진행됨에 따라 천정제트의 두께는 증가한다. 예를 들어 약 200 kW 정도의 화재는 플럼이 3 m 정도까지 상승하는 동안 약 2.6 kg/s의 주변공기를 유입하고 이는 평균온도는 약 400 K 정도에서 약 3 m³/s의 체적유량에 해당된다.

플럼이 천정과 충돌하는 가장자리 근처에서는 천정에 충돌한 이후의 정체점을 중심으로 형성된 빠른 유동이 천정제트의 비교적 느린 유동으로 변함에 따라 수력도약(hydraulic jump)현상이 발생하고 천정제트나 혹은 벽제트의 발달은 제트유동과 주변기체와의 밀도차, 열전달, 벽과의 마찰 등에 의해 결정된다.

[그림 3-61] 천정제트의 구조

Hydraulic jump



천정제트에 의해 형성된 상부 고온가스, 하부 저온공기의 유동형태는 비교적 안정화된 유동형태로서 난류유동이 억제되는 경향이 있기 때문에 천정제트의 하류를 따라 유입되는 공기의 양은 부력플럼에 의해 유입되는 양에 비해 크지 않다.

[그림 3-61]은 천정제트의 전체적인 구조를 나타낸다. 화원에서 천정까지 높이는 H [m], 발열량은 \dot{Q} , 플럼의 중심에서 반경방향으로의 거리 r 로 정의된다.

초기에 형성된 천정제트의 두께는 화원과 천정사이 거리의 약 5~12% 정도이고 천정제트의 속도분포와 온도분포의 형태는 매우 유사하다. 천정제트의 속도는 천정벽면에서 거의 0 이고 천정에서 멀어짐에 따라 급격히 증가하여 최대속도에 도달한 이후 서서히 감소한다. Alpert(1972)등에 따르면 천정제트의 온도가 가장 높은 위치는 $Y_{T=\max} > 0.01H$ 이며 대략적으로 화원과 천정사이의 높이의 1 % 정도 천정으로부터 떨어진 위치가 최대 온도점이 된다.

Alpert는 정상상태의 구속되지 않은 천정제트에 대해 정체점에서부터 r 만큼 떨어진 위치에서의 천정제트의 최대온도에 대한 관계식을 다음과 같이 2개 영역으로 분리하여 제시하였다.

$r \leq 0.18H$ (플럼이 천정과 충돌하는 영역)

$$T_{\max} - T_{\infty} = \frac{16.9 \dot{Q}^{2/3}}{H^{5/3}} \quad (\text{식 5-53})$$

$r > 0.18H$ (천정제트의 하류영역)

$$T_{\max} - T_{\infty} = \frac{5.38 (\dot{Q}/r)^{2/3}}{H} \quad (\text{식 5-54})$$

위 식은 고체와 액체 등 다양한 연료, 발열량범위 500 kW~100 MW, 천정높이 4.6 m~15.5 m까지 다양한 화재로부터 수집된 데이터를 이용한 경험식이다.

한편 천정제트의 최대속도도 2개영역에 대해 다음과 같은 관계식으로 나타낸다.

$r \leq 0.15H$ (플럼이 천정과 충돌하는 영역)

$$u_{\max} = 0.96 \left(\frac{\dot{Q}}{H} \right)^{1/3} \quad (\text{식 5-55})$$

$r > 0.15H$ (천정제트의 하류영역)

$$u_{\max} = \frac{0.195 \dot{Q}^{1/3} H^{1/2}}{r^{5/6}} \quad (\text{식 5-56})$$

6

2. 플럼과 벽과의 상호작용

화재 플럼
(Fire Plume)

화원근처에 벽이 존재할 경우 플럼으로의 유입율을 비롯한 다른 플럼의 물성이 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 원형 버너가 수직 벽에 접하게 높여 있는 경우 화원직경의 3배 정도의 높이까지 화재플럼이 형상과 유입에 큰 변화가 없는 것으로 알려져 있다. 그러나 반원버너의 직선모서리가 벽과 나란하게 위치하게 되면 플럼은 벽을 향해 기울어진다.

Cetegen(1982)나 Sargent(1983)과 같은 화재학자들은 벽이나 모퉁이에 접한 축대칭 플럼의 특성을 반사원리(reflection principle)을 적용하여 해석하고자 했다. 실험결과에 따르면 [그림 3-62]의 (b)와 같이 수직한 벽에 위치한 반원 버너에서 형성된 플럼은 벽으로 둘러싸이지 않은 원형버너에서 형성되는 플럼의 비해 약 2배정도의 발열량을 가지고 질량유량은 절반인 플럼으로 발전한다. 또한 [그림 3-62]의 (c)와 같이 수직하는 두 벽에 의해 둘러싸인 1/4원 크기의 화원은 발열량이 4배이고 질량유량이 1/4인 플럼이 된다.

반원 버너의 경우 발열량은 2배가 되고 질량유량은 1/2이 되므로 Zukoski의 질량유량식에 대입하면

$$\begin{aligned} \dot{m}_{p,1/2} &= \frac{1}{2} \dot{m}_p = \frac{1}{2} 0.071 (2\dot{Q})^{1/3} z^{5/3} \\ &= 0.045 \dot{Q}^{1/3} z^{5/3} \end{aligned} \tag{식 4-57}$$

[그림 3-62] 벽과 모퉁이 근처의 화원

(a)	(b)	(c)
-----	-----	-----

1/4 원 버너의 경우 발열량은 2배가 되고 질량유량은 1/4이 되므로

$$\begin{aligned} \dot{m}_{p,1/4} &= \frac{1}{4} \dot{m}_p = \frac{1}{4} 0.071 (4\dot{Q})^{1/3} z^{5/3} \\ &= 0.028 \dot{Q}^{1/3} z^{5/3} \end{aligned} \tag{식 4-58}$$

한편 화염의 높이는 발열량의 2/5승에 비례하는 한다는 사실을 식 6-20에서 보였다.

$$L_f \propto \dot{Q}^{2/5} \tag{식 4-59}$$

따라서 벽에 접한 반원 버너에서 형성되는 화염의 높이는 벽으로 둘러싸이지 않고 원형 버너에서 형성되는 화염높이와 다음과 같은 관계를 가진다.



$$L_{f,1/2} \propto (2\dot{Q})^{2/5} \simeq 1.32 \dot{Q}^{2/5} \quad (\text{식 5-60})$$

$$L_{f,1/2} \propto 1.32 L_f$$

즉, 반원버너에서 형성되는 화염의 높이가 원형 버너에서 형성된 화염높이에 비해 약 1.32배 정도 더 높게 형성됨을 알 수 있다. 마찬가지로 방법으로 1/4원 버너의 화염높이를 추정해보면

$$L_{f,1/4} \propto (4\dot{Q})^{2/5} \simeq 1.74 \dot{Q}^{2/5} \quad (\text{식 5-61})$$

$$L_{f,1/4} \propto 1.74 L_f$$

즉, 1/4원 버너에서 형성되는 화염높이는 원형버너에서 형성되는 화염높이에 비해 약 1.74배가량 높음을 알 수 있다. 이와 같이 화염높이가 증가하는 이유는 벽에 접한 면이 증가할수록 유입공기의 양은 작아지지만 벽면으로부터 연료표면으로의 복사열전달의 증가로 인해 더 많은 연료증기가 생성된다. 따라서 유입공기량은 감소하고 연소율은 증가한 상태에서 생성된 연료증기가 완전 연소되기 위해서는 더 긴 경로를 이동하며 산소와 반응이 이루어지기 때문에 화염높이는 증가하게 된다. 또한 화원 둘레를 따라 비대칭적인 유입으로 인해 화재플럼은 대칭성을 상실하고 벽 쪽으로 기울지게 된다.

3. 천정에서의 화염확장

화염이 천정에 충돌하면 미연가스는 충돌점을 중심으로 반경방향으로 퍼지고 유입된 공기에 의해 연소가 지속되며 천정아래에서 원형화염이 형성된다. [그림 3-63]과 같이 화염이 천정에서 충돌한 지점에서부터 반경방향 확장된 길이를 r_f [m]라 하고 L_f [m]은 자유연소 시 평균화염높이이며 D [m]는 화원의 직경, H [m]는 화원과 천정사이의 높이를 나타낸다.

[그림 3-63] 천정 아래 화염확장의 형태

r_f

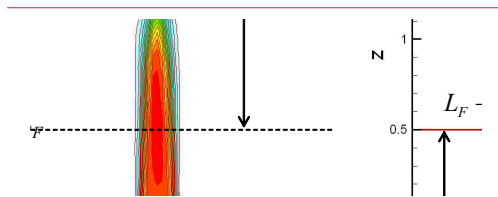
D

You 와 Faeth는 실험실 규모의 매우 작은 화염을 이용한 실험을 통해 화원직경에 대한 천정에서의 화염확장길이를 다음과 같은 근사식으로 나타내었다.

$$\frac{r_f}{D} = 0.5 \left(\frac{L_f - H}{D} \right)^{0.96} \quad (\text{식 5-62})$$

화재 플럼
(Fire Plume)

[그림 3-64] 자유연소 화염높이와 천정에서의 확장화염 길이의 비교



윗 식에서 개략적인 화염확장거리는 자유연소 시 평균화염 높이에서 천정높이를 뺀 값의 절반, 즉 자유연소 시 화염높이가 천정높이를 초과한 거리의 절반정도이거나 그보다 작게 된다. [그림 3-64]는 화원직경 $D=0.2m$, 천정높이 $H=0.5m$, 발열량이 $\dot{Q}=80kW$ 인 화재에 대하여 전산유체해석(CFD, Computational Fluid Dynamics)기법을 통해 계산된 자유연소 화염과 천정에 충돌하여 확장된 화염을 비교하여 보여준다. 해석결과 자유연소화재에서 화염의 높이 $L_f \approx 1.5m$ 이며 평균화염높이에서 천정높이를 뺀 값의 절반, 즉 $0.5(L_f - H) \approx 0.5m$ 정도로써 천정의 충돌지점으로부터 천정을 따라 확장된 화염의 길이가 $r_f \approx 0.5m$ 인 점을 감안할 경우 비교적 잘 일치하고 있음을 보여준다.

한편 Babrauskas는 발열량이 500 kW이고 높이가 2m인 공간에 대한 실험에서 $(L_f - H)$ 와 확장된 화염길이 r_f 사이에 다음 표와 같은 관계를 얻었다.

[표 3-21] Babrauskas에 의한 천정아래 화염확장 길이



configuration	$r_f / (L_F - H)$
Unrestricted plume, unbounded ceiling	1.5
Full plume, quarter ceiling(corner)	3
Quarter plume, quarter ceiling	12
Corridor	Dependent on width

한편, Heskestad와 Hamada는 비교적 큰 규모의 화재실험을 수행하여 천정아래 평균 화염 확장 길이는 다음과 같은 실험식을 제시하였다.

$$r_f = C(L_f - H) \quad (\text{식 5-63})$$

여기서 C 는 실험상수로서 약 0.88~1.05 범위의 값을 가지고 평균값으로 0.95정도의 값을 사용한다.

5.4 개구부에서의 수직벽을 따른 플럼거동

수직벽이 있는 개구부로부터 형성된 부력플럼은 개구부 상단에 형성된 벽의 지배적인 영향을 받는다. 수직벽 아래의 개구부에서 누출된 연기는 수직벽을 따라 위 층으로 전파될 수 있기 때문에 수직방향의 화재전파에 중요한 영향을 미친다.

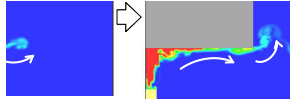
창문과 같은 수직벽에 위치한 개구부를 통해 유출되는 유동은 대부분 3차원 유동형태로써 천정제트의 초기 운동량에 의해 플럼은 벽에 부착되지 않고 벽으로부터 떨어져 상승한다.

그러나 [그림 3-65]에서 보는바와 같이 플럼이 2차원적이 되면 벽 쪽에서 플럼으로 유입은 이 영역에서 유체를 제거하는 역할을 하게 되고 부가적인 외기의 공급이 없는 경우 이 영역에서 정압력(static pressure)는 감소하게 된다. 벽 쪽과 외기 쪽의 압력차에 의해 플럼은 벽 쪽으로 기울게 되고 시간이 경과함에 따라 벽으로의 재부착(reattachment)이 일어나는데 이를 코안다 효과(Coanda effect)라고 한다. 재부착 후에 플럼은 벽에 근접한 상태로 상승을 지속하게 된다. 이러한 재부착유동은 벽을 따라 상승하기 때문에 복사나 대류열전달에 의한 많은 열에너지가 벽으로 전달되지만 유입은 자유상승플럼에 비해 절반만 일어나기 때문에 외기유입에 의한 플럼의 냉각은 크게 감소한다.

[그림 3-65] 수직벽면을 따른 재부착 유동

6

화재 플럼
(Fire Plume)



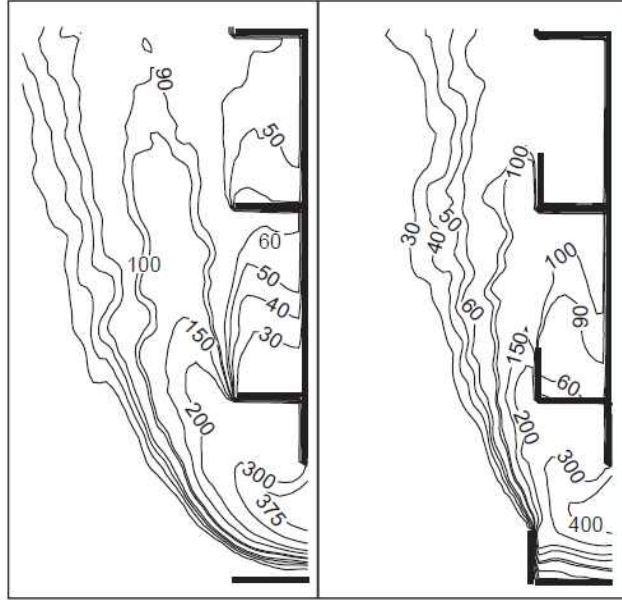
이러한 고온 플럼의 재부착이나 박리(separation)현상은 건물의 외부가 가연성 물질로 이루어진 경우 건물외벽을 따른 수직적 화염전파를 야기할 수도 있고 외부의 유리창이 있는 경우 열응력(thermal stress)에 의해 파손이 일어날 수도 있다. 이러한 유리창의 파손은 건물외부를 통한 상층부로의 직접적인 연기확산을 유도하기 화재안전에 있어서 매우 중요한 문제이다.

Yokoi는 건물외벽에 돌출부(spandrel)을 설치해서 플럼의 재부착유동을 막는 방법을 제안하였는데 상승플럼과 건물벽 사이에 공간을 형성하고 유입이 지속적으로 이루어지게 함으로서 플럼의 재부착을 막고 유입을 증가시켜 플럼의 냉각을 도모함으로써 건축물 외벽이나 유리창에 작용하는 열응력을 감소시키는 역할을 한다.

특히 건축물의 벽이 전부 유리로 이루어진 고층건물의 경우 이러한 고온 플럼의 재부착 유동에 매우 취약하기 때문에 방화 및 내화설계에 세심한 주의를 기울여야 한다.

[그림 3-66] 돌출부 형태에 따른 화재플럼 거동

(John H. Mammoser III and Francine Battaglia)



7

구획화재(Compartment Fire)

구획화재
(Compartment
Fire)

자유연소화재(free burning fire)와 달리 구획화재(compartment fire)는 벽이나 천정 등 기하학적인 요소에 의해 제약된 공간에서의 화재를 말한다. 화재현상 자체가 물리적, 화학적으로 매우 복잡하기 때문에 명확한 해석에 어려움이 있다. 구획화재에서는 공간특성이 화재에 직접적인 영향을 미치기 때문에 화원의 크기나 연료의 종류등과 같은 화재자체의 특성이외에 공간특성에 따른 유입공기량변화, 열 및 물질전달과정의 복잡함이 존재하게 된다. 일상의 대부분의 화재는 구획화재이기 때문에 많은 화재관련 분야에서 구획화재에 대한 이해를 필요로 한다. 본 장에서는 구획화재에 관한 일반적인 현상과 화재의 발달 단계 그리고 구획화재특성에 영향을 미치는 인자들에 관해 소개하고 공간내의 화재특성을 평가하는 경험식을 소개한다.

제1절 구획화재의 개요

- 학습 목표**
- 01 화재안전과 구획화재
 - 02 구획화재의 일반적 특성
 - 03 구획화재의 발달

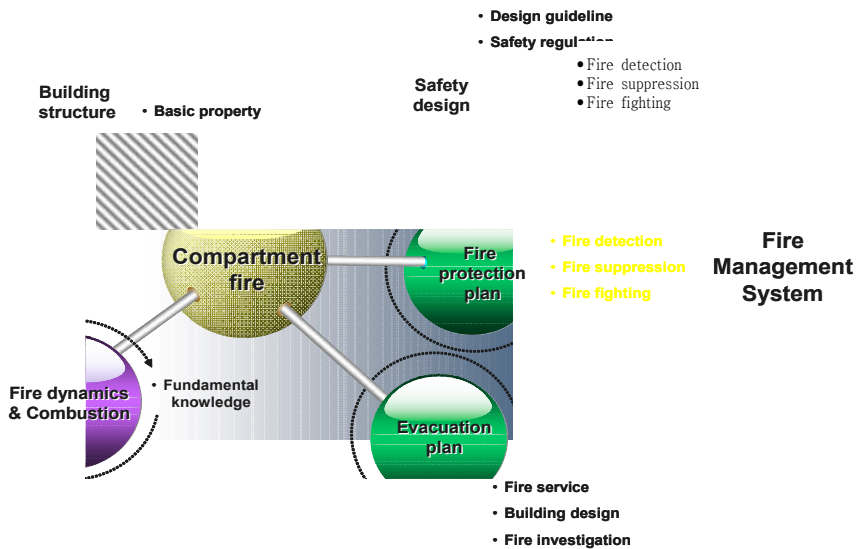
1.1 화재안전과 구획화재

구획화재는 효율적인 화재운영시스템을 구축하기 위해서 가장 핵심적인 부분으로 화재현상에 관한 기초적인 분야와 응용분야를 이어주는 매개체 역할을 한다. 구획화재 현상을 이해하기 위해서는 기본적으로 화재 현상 자체를 잘 이해하고 있어야 하며 이는 주로 유체유동, 열전달등과 같은 기본적인 학문분야 이외에 연소공학이나 화재역학과 같은 화재현상에 직접적으로 관련된 학문분야에 대한 지식을 필요로 한다. 또한 구획화재가 제한된 공간 내에서 발생하기 때문에 화재공간의 재료 및 구조적 특성뿐만 아니라 화재공간내의 가연성 물질에 대한 기초지식을 요구하게 된다. 따라서 구획화재를 화재특성과 공간특성을 고려하



여 화재현상을 이해하는 것이 중요하다. 이러한 구획화재에 대한 상세한 이해는 건축물의 화재안전설계에 직접적으로 적용되는데 화재안전을 고려한 건축물의 설계지침이나 화재안전관련 규정을 마련하는데 기초자료가 된다. 또한 건축물 내 화재감지 및 화재진압시스템, 소방활동 설비 등과 같은 방화계획을 수립하는데 직접적으로 적용되며 건축물 내 화재에 대비한 피난경로를 설정, 제연설비를 구축, 피난계획수립등과 같은 거주자의 안전한 대피를 위한 시스템을 구축하는데 활용된다. 따라서 체계적이고 효율적인 화재대응시스템을 구축하기 위해서는 화재안전설계와 방화 및 피난계획을 수립의 기초가 되는 구획화재에 대한 이해가 무엇보다 중요하다.

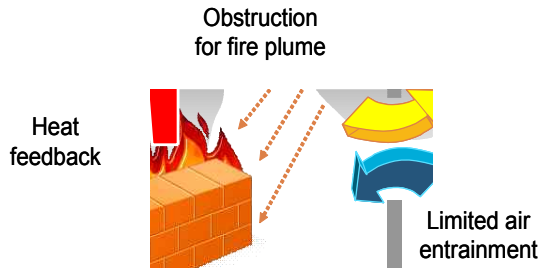
[그림 3-67] 구획화재와 화재안전 관계



1.2 구획화재의 일반적 특성

구획화재가 자유연소화재(free burning fire)와 구별되는 점은 화재플럼이나 연기유동이 천정이나 벽, 출입구등과 같은 공간의 기하학적 요소에 의해 제한되고 그로 인해 화재에서 발생된 열과 연기가 외기로 전파되는 것이 아니라 공간내부에서 연층을 형성하고 주변의 온도를 상승시키는 역할을 하게 된다. 따라서 벽이나 연층으로부터의 공급되는 열전달에 의해 화재특성이 영향을 받는다.

구획화재
(Compartment
Fire)

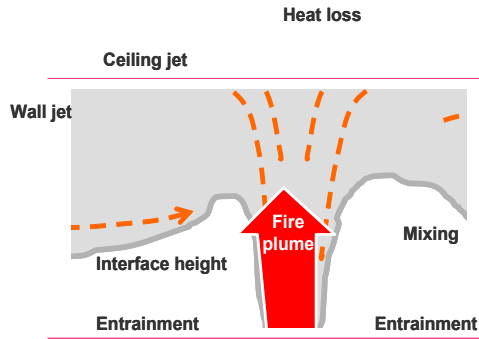


구획공간은 화재에서 발생된 열과 연기의 유출이 제한적일뿐 아니라 외기의 유입이 자유롭지 못하고 공간내의 개구부를 통해 이루어지기 때문에 연소과정에 필요한 산소공급이 제약 받게 되는 경우가 발생한다. 따라서 공기유입이 대칭적인 것이 아니라 개구부의 위치에 따라 영향을 받기 때문에 화재플럼은 대칭적이지 못하고 유동에 영향을 받는다. 구획화재는 화재와 개별적인 요소들 간에 매우 복잡한 상관관계를 가지고 있기 때문에 직접적인 해석보다는 경험적인 방법에 의존하고 있으며 화재공간내의 지배적인 현상을 파악하는 것이 중요하게 된다.

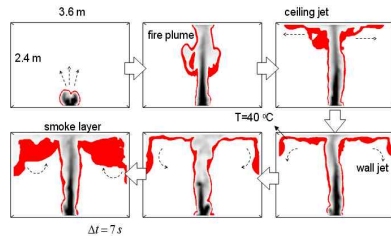
[그림 3-69]는 일반적인 구획화재의 열 및 유동형태를 나타낸다. 6장에서 설명한바와 같이 연소반응에 의해 발생된 열과 연소생성물은 밀도 차에 기인한 부력에 의해 상승유동을 야기하며 화재플럼을 형성한다[그림 3-70]. 화재플럼의 상승과 함께 주변공기는 지속적으로 유입 되고 상승 플럼은 천정과 충돌하여 부력은 상실되는 대신 관성력은 증가하여 [그림 3-71]에서 보는 것과 같이 충돌점을 중심으로 반경방향으로 진행되는 천정제트(ceiling jet)를 형성한다. 천정을 따라 전파되는 연기는 벽과 만나 [그림 3-72]와 같이 벽제트(wall jet)를 형성하며 하강하지만 벽면과의 마찰로 인해 벽제트의 관성에너지가 지속적으로 감소하고 온도가 주변기체에 비해 상대적으로 높기 때문에 다시 부력이 작용하여 제트의 하강은 둔화되고 상승플럼 쪽으로 형성된 유동에 이끌려 다시 화재플럼 쪽으로 유입된다. 이러한 과정을 반복하며 고온의 연층(hot smoke layer)이 형성된다.



[그림 3-69] 일반적인 구획화재의 열유동 특성

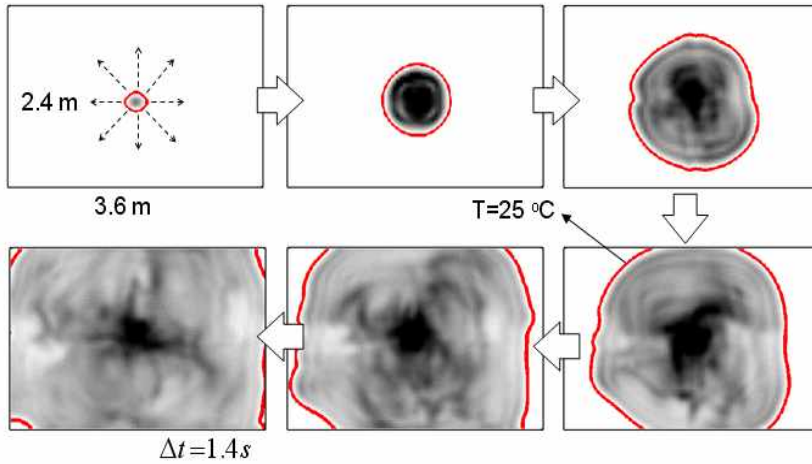


[그림 3-70] 구획화재에서 화재유동 형성과정

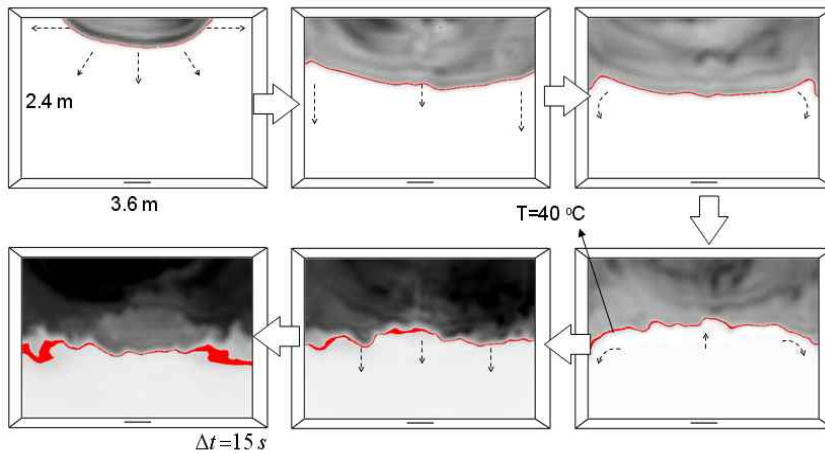


Neutral
height

[그림 3-71] 구획화재에서 천정제트의 전파과정

구획화재
(Compartment
Fire)

[그림 3-72] 구획화재에서 벽면을 따른 연기의 하강과정



이 과정에서 연층부의 천정과 벽면에서는 고온의 연층과 벽면사이의 온도차에 기인한 열전달이 지속적으로 이루어지고 고온의 연기층과 아래쪽의 공기층사이에는 난류혼합(turbulent mixing)에 의해 상대적으로 낮은 온도의 공기가 연층으로 유입되어 연층을 냉각시키는 역할을 하게 된다. 바닥에서부터 고온의 연기층과 저온의 공기층 사이의 경계까지의 높이를 경계높이(interface height) 혹은 안전높이(clear height)로 정의한다.

한편 출입구 쪽에서는 화재플럼이 부력에 의해 상승함에 따라 주위공기의 유입이 발생하고 외부공기의 유입은 출입구를 통해 이루어진다. 상승한 화재플럼은 천정제트와 벽제트를



형성한 후 출입구를 통해 외부로 유출되며 출입구의 상부에서는 연층의 연기가 배출되고 하부에서는 외부의 공기가 화재실로 공급된다. 이때 출입구를 통해 연기의 배출과 공기의 유입이 일어나는 경계점까지의 높이를 중립높이(neutral height)로 정의한다.

유출되는 연기의 질량유량(\dot{m}_s)는 유입공기의 질량유량(\dot{m}_a)와 연료의 연소율의 합과 같다.

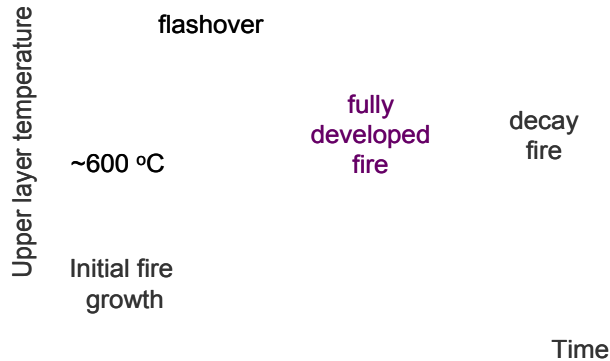
$$\dot{m}_s = \dot{m}_f + \dot{m}_a \quad (\text{식 7-1})$$

화재가 성장함에 따라 경계높이와 중립높이는 지속적으로 감소하고 화재실로부터 유출되는 연기의 질량유량이 증가한다.

1.3 구획화재의 발달

구획 공간 내에서의 화재발달 과정은 화재강도(발열량)에 의해서 나타내기도 하지만 연층부의 온도로 나타내는 경우가 많다. 일반적으로 구획화재의 진행단계는 크게 초기화재성장단계(initial fire growth), 전실화재(flashover), 완전발달화재(fully developed fire), 감쇠화재(decay fire)로 분류할 수 있다 [그림 3-73].

[그림 3-73] 구획화재의 화재성장 과정



화재의 시작은 스파크나 발화원에 의한 파일럿 점화나 자연발화 등에 의해 이루어진다. 가스나 액체연료등과 같이 짧은 시간에 화재성장이 이루어지는 경우도 있으나 대부분의 일상의 가연성 물체는 비교적 긴 시간의 초기 화재성장단계를 거치게 된다. 점화이후 생성된 화염은 잠복기(incubation period)를 거치게 되는데 열적 피드백(heat feedback)이 원활하지 못한 경우 화염은 저절로 소멸되기도 한다. 뿐만 아니라 훈소(smouldering combustion)가 일어나는 경우에도 비교적 긴 초기화재성장 단계를 거치게 된다.

그러나 열적 피드백이 원활하고 적절한 산소공급이 이루어질 경우 점화에 의해 형성된 화염은 점진적으로 성장해 나가는데 가연물의 표면을 따라 화염이 전파되기도 하고 인접 가연물을 점화시키기도 한다. 이때의 화재성장은 연료의 종류, 연소형태, 산소공급상태 및 주변과의 상호작용에 의존한다. 화염전파가 이루어지고 연료표면에서의 열적 피드백이 순조롭게 이루어지면 화재 성장은 빠르게 이루어지고 구획공간내의 온도는 빠르게 상승한다.

화재전파와 함께 연층부의 온도가 500~600℃ 정도에 이르면 화재 공간 바닥에서의 열 유속이 고체 가연물의 점화가 가능한 임계 열 유속(critical heat flux)을 초과하게 된다. 따라서 화염의 직접적인 전파가 아닌 연층으로부터의 복사열에 의해 공간내부의 가연물이 점화하게 되고 화재실 내부의 온도는 급격히 상승하게 되는 전실화재(flashover)에 도달한다. 국제표준기구(ISO)에서는 전실화재에 대해 “공간내의 가연성물질의 화재가 전체 가연물 표면으로 급속한 전이가 이루어지는 단계”로 정의하고 있다. 화재공학에서는 전실화재를 화재 단계를 구분하는 분기점으로 고려하고 있으며 전실화재를 기준으로 전실화재 이전단계(pre-flashover)와 전실화재 이후단계(post-flashover)로 구분한다.

전실화재 단계에 도달하면 공간내의 많은 가연물에서 연소가 이루어지고 많은 양의 연소 생성물과 열이 화재공간으로부터 방출되어 구획화재공간은 완전발달화재(fully developed fire)에 도달하게 된다. 완전발달화재 단계에서 화재는 최성기화재에 도달하고 가연물과 공기공급이 충분할 경우 구획공간뿐만 아니라 인접공간으로 화재가 전파된다. 그러나 외기공급이 충분하지 못한 경우 공간내부에는 가연물로부터 생성된 연료는 충분하지만 환기량이 부족한 환기부족상태(under-ventilated)가 되고 외기공급 원활한 위치에 화염이 형성된다. 일반적으로 완전발달화재에서의 화재실 내부 온도는 약 700~1200℃까지 상승한다.

한편 환기부족상태의 화재에서 외부공기의 유입은 가연물에서 생성된 타지 않은 연료증기(unburned fuel vapor)와 혼합되어 폭발이나 급격한 연소반응을 일으키는데 이를 역화(backdraft)라 한다[그림 3-74]. 역화는 매우 짧은 시간에 일어나는 위험한 현상이기 때문에 소방관의 생명을 위협하는 주요 위험요소가 된다.

전실화재와 완전발달화재 단계를 거치면서 화재실내부의 가연물이 소진되기 시작하면 가연물로부터의 발열량은 감소하여 공간내부의 온도는 하강하는 감쇠화재(decay fire)로 접어든다. 가연물이 더 이상 공급되지 않은 한 화재실 내부의 화재성장은 진행되지 않고 화재 발달단계를 마감하게 된다.



[그림 3-74] 완전발달단계에서 형성된 역화



제2절 구획화재에 영향을 미치는 인자

- 학습 01 구획공간과 관련된 인자
- 목표 02 화원과 관련된 인자

구획화재에서의 화재성장은 여러 가지 요소에 의해 영향을 받는데 화재공간의 기하학적 형상, 출입구의 위치와 크기, 화재공간을 구성하고 있는 재료등과 같이 구획 공간 자체와 관련된 인자와 점화원의 위치와 크기, 연료의 양과 종류, 면적, 방향등 화원과 관련된 인자로 구분된다.

2.1 구획공간과 관련된 인자

구획화재실 내에서는 고온 연층이나 가열된 벽면으로부터 방출된 복사에너지에 의해 공간내의 물체가 가열되고 화염부에서는 연료의 연소율이 증가하게 된다. 따라서 연층의 두께나 온도 및 가열된 벽면의 온도 등은 화재성장에 상당한 영향을 미친다. 또한 외부로부터 공급되는 공기량은 연소반응이나 화재실의 냉각과 직접적으로 관련된다. 일반적으로 구획화재에 영향을 주는 인자 중 공간자체와 관련된 부분은 크게 다음과 같은 요소들이 있다.

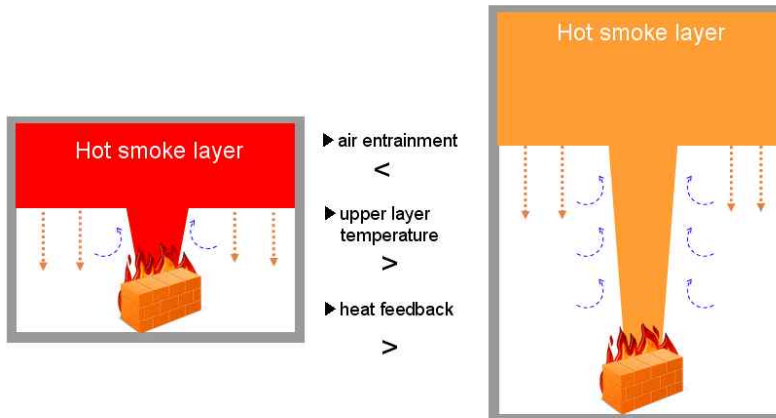
7

구획화재
(Compartment
Fire)

- 화재공간의 형상, 체적
- 천정높이와 바닥면적
- 개구부의 위치와 크기, 형상
- 공간 내장재

화재공간의 체적이나 형상은 포괄적이기는 하지만 구획화재성장에 지배적인 영향을 미치기 때문에 대단히 중요하다. 화재공간이 작은 경우 화재실내 연층이 빠르게 형성되고 공간 내부의 온도상승도 빠르게 일어난다. 그러나 화재공간이 클 경우 화재실 내부에 고온연층부를 형성하는데 상당한 시간이 소모되고 외부로부터의 공기온도이나 공간내부의 잔존공기량이 많기 때문에 온도상승은 느리게 일어난다. 공간의 형상이나 체적과 관련된 부분 중 화재공간의 높이인자는 화재플럼으로 온도되는 공기량에 영향을 미친다. 즉, 화재플럼으로 온도되는 공기는 바닥에서 연기층의 경계까지의 높이에 걸쳐서 이루어지기 때문에 화재공간의 높이가 높은 경우 플럼이 상승하는 동안 많은 온도가 발생하여 연층의 높이는 상대적으로 빠르게 하강한다. 반면 화재공간 높이가 낮은 경우 온도가 상대적으로 적고 연층 온도는 빠르게 상승한다. 이 연소층과 화원사이의 거리가 가깝기 때문에 많은 열이 연료표면으로 전달되고 화재는 매우 빠르게 성장한다.

[그림 3-75] 화재공간의 높이에 따른 화재유동 특성



천정이 높고 바닥면적이 넓은 화재공간의 경우 화원과 연층사이의 거리가 상대적으로 멀고 유입이 활발히 일어나기 때문에 연층의 온도는 상대적으로 낮다. 따라서 화재공간내부의 온도가 상대적으로 높지 않기 때문에 화염전파는 인접 가연물로의 직접적인 열전달에 의해 이루어진다.



그러나 바닥면적이 넓고 천정이 낮은 공간의 경우 고온연층으로부터 바닥으로의 열전달이 활발히 일어나기 때문에 공간내의 가연물이 급속히 가열되고 넓은 공간에 걸쳐 화재전파가 급속히 일어날 수 있다.

화재공간의 천정이나 벽면은 전도열전달에 의해 연층에서 흡수한 열을 외부로 전달하는 역할을 수행한다. 구획공간의 내장재를 통한 열손실과 관련된 물성은 전도열전달계수(k), 밀도(ρ), 비열(C_p)이며 보통의 경우 이들 개별물성을 동시에 고려한 열적 관성(thermal inertia, $k\rho C_p$)을 이용하여 재료의 열전달 특성을 고려한다. 열적 관성이 큰 경우 외부로의 열전달이 잘 이루어지는 물질을 의미한다.

그러나 대부분의 내장재는 구획공간과 외부와의 열전달을 최소화하기 위해 단열재료를 사용하기 때문에 화재공간의 열이 외부로 빠져나가지 못하고 열손실에 의한 연층의 온도하강은 크지 않다.

한편 화재공간이 완전히 밀폐되거나 외부와의 차단율이 높은 경우 화재실 내부의 산소는 연소과정에 소모되어 지속적으로 감소하고 화재강도는 감소하여 소화에 이르게 될 것이다. 개구부는 연소과정이 지속적으로 이루어지도록 공기를 공급하고 발생된 연소생성물과 열을 외부로 배출함과 동시에 화재공간을 냉각시키는 역할을 수행한다. 예를 들어 연층부에 위치한 개구부는 고온의 연기를 외부로 배출시키고 연층부의 온도 및 연층두께가 감소하기 때문에 연층으로부터 화원으로의 열전달이 감소하여 화재성장은 둔화된다. 출입구를 통한 외부공기의 유입질량유량은 출입구의 면적과 높이에 의존하는 것으로 알려져 있다.

$$\dot{m}_a = KA_o \sqrt{H_o} \quad (\text{식 7-2})$$

유입 질량유량에 관한 상세한 내용은 3절에서 소개한다. 일반적으로 화재의 형태는 환기량에 따라 연료지배형화재(fuel controlled fire) 혹은 환기적정화재(well ventilated fire)와 환기지배형화재(ventilation controlled fire) 혹은 환기부족화재(under-ventilated fire)로 구분된다. 특히 환기량이 부족한 상태에서는 공간내부에 가연성 연료 증기의 양은 충분하지만 공급되는 공기의 양이 부족하기 때문에 화재성상이 유입되는 공기의 양에 의존한다. 따라서 개구부를 통한 공기유입은 화재의 성장에 매우 중요하며 제 4절에서 좀 더 자세히 논의한다.

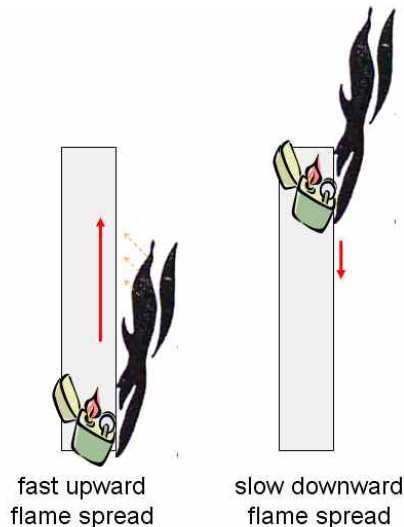
2.2 화원과 관련된 인자

구획화재의 발달은 화원자체에 의해서도 큰 영향을 받게 되는데 크게 다음과 같은 인자들에 의존한다.

- 점화원
- 연료의 종류와 양
- 연료의 방향, 면적

점화원은 스파크나 고온표면, 파일럿화염등과 기계적, 전기적, 화학적에너지원이 모두 점화원이 될 수 있다. 초기 점화원의 에너지가 큰 경우 발화된 가연물은 화염연소를 일으키며 빠른 시간에 화염전파와 화재 성장이 이루어진다. 초기 점화원의 에너지가 어떤 경우 화염연소에 오랜 시간이 걸리는 훈소과정을 거치기도 하고 이 과정 중에 열의 방출은 작지만 다량의 독성가스를 생성하기도 한다. 뿐만 아니라 점화원의 위치도 매우 중요한 역할을 하는데 수직으로 세워진 가연물의 아래쪽에서 점화가 이루어지는 경우 화염은 부력에 의해 상승하며 빠른 화염전파가 이루어지는 반면에 점화가 가연물의 위쪽에서 이루어지는 경우 아래방향으로의 화염전파는 매우 느리기 때문에 화재성장은 상대적으로 둔화된다.

[그림 3-76] 점화위치에 따른 화염전파

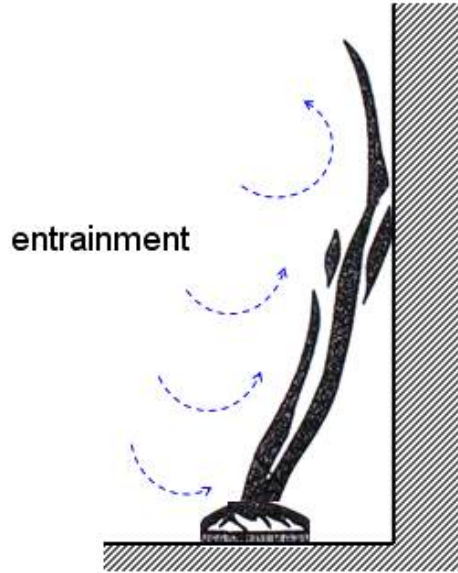


연료의 종류와 양은 환기조건과 함께 공간내부의 화재발달을 결정하는 가장 중요한 인자 중의 하나이다. 일반적으로 고체 가연물의 화염전파 속도는 가볍고, 얇고, 수분이 적으며, 표면이 거칠고, 열전도율이 작을수록 빠르다.

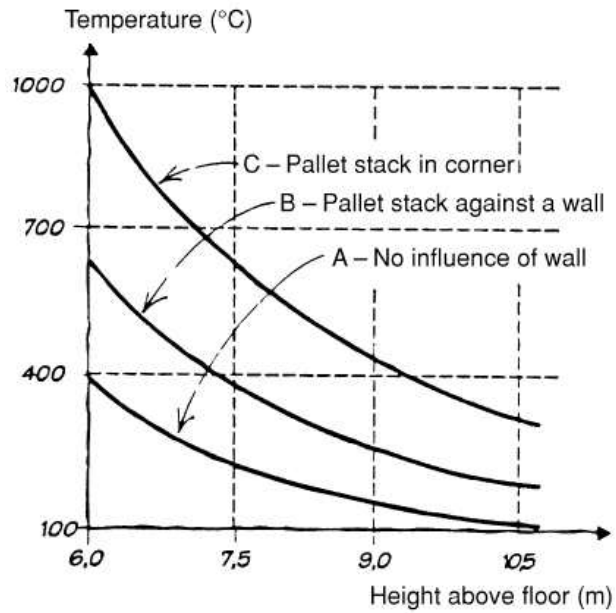
[그림 3-77]에서와 같이 연료의 위치가 벽에 가까운 경우 공기의 유입이 제한되기 때문에 유입감소로 인한 화재플럼의 온도가 상대적으로 높을 뿐만 아니라 벽으로부터 화원으로의 열전달이 증가하여 연소율이 증가한다.



[그림 3-77] 수직벽 근처의 화염 거동



[그림 3-78] 화재플럼의 온도에 미치는 벽의 영향



7

구획화재
(Compartment
Fire)

뿐만 아니라 증가된 연소율에 의해 연료증기의 생성량은 증가하는 반면에 공기의 유입은 제한적이기 때문에 플럼을 따라 지속적으로 상승하며 연소가 이루어지기 때문에 화염 높이가 길어진다. [그림 3-78]은 1.22 m 높이의 목재화재(wood crib fire)에 대하여 벽의 존재에 따른 화재플럼의 온도를 나타낸다. 그림에서 보는 것처럼 화재가 두 벽이 만나는 모서리 근처에서 진행되는 경우의 화재플럼 온도가 단일벽면근처에서 화재가 진행될 때 보다 높고 벽이 없는 경우에 비해 약 2.5배 이상 높게 나타났다. 따라서 화재 주변에 존재하는 벽이 많을수록 화재플럼의 온도는 크게 증가함을 알 수 있다.

또한 연료의 면적이 넓은 경우 화염으로부터 연료표면으로 도달하는 열전달이 증가하기 때문에 화재성장은 빠르게 이루어지며 가연물 사이의 거리나 가연물이 위치하고 있는 방향에 따라서 화재성장은 큰 차이를 보인다.

제3절 구획화재의 유동특성

- 학습 목표**
- 01 Bernoulli 정리를 이용한 환기유동 해석
 - 02 화기구를 통한 질량유량
 - 03 화재실의 압력분포
 - 04 One zone model
 - 05 Two zone model

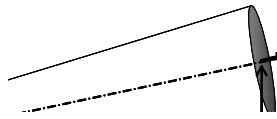
대부분의 구획공간은 출입구나 창문, 화기구등과 같은 개구부 통해 외기나 인접공간과 연결되어 있다. 이러한 개구부를 통칭해서 일반적으로 화기구(vent)라 부르고 화기구에서의 유동은 화기구내부와 외부의 압력차에 기인한다. 구획화재실로 외부공기의 유입이나 내부 연기의 배출은 화기구를 통해 이루어지고 화재실내부의 열적특성이나 연소특성을 파악하기 위해서는 화기구를 통한 유동특성에 대한 상세한 이해를 요구한다. 본 절에서는 환기량이 충분한 구획화재(well ventilated compartment fire)에 대해 화기구에서의 유동특성을 파악한다.



3.1 Bernoulli 정리를 이용한 환기유동 해석

공간 내에서 유동을 야기하는 원동력은 압력이며 유체유동은 압력이 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐른다. 따라서 압력과 유동사이의 관계를 파악하는 것이 환기구를 통한 유동특성을 해석하는 시작점이 된다. Bernoulli 방정식은 유체유동에서 유동속도와 압력사이의 관계를 나타낸다. 벽과의 마찰을 무시하고 1과 2지점 사이에 Bernoulli 정리를 적용하면

[그림 3-79] Bernoulli 정리



$$P_1 + \frac{\rho_1 V_1^2}{2} + \rho_1 g z_1 = P_2 + \frac{\rho_2 V_2^2}{2} + \rho_2 g z_2 \quad (\text{식 7-3})$$

여기서 P 는 정압력[Pa], ρ 는 밀도[kg/m³], V 는 속도 [m/s], g 는 중력가속도 [m/s²]을 각각 나타낸다.

Bernoulli 정리를 [그림 3-80]와 같이 화재실 내부와 외부에서의 속도는 없다고 가정하고 공간 내 환기구를 통한 유동장에 적용해보면

$$\begin{aligned} P_1 + \rho_1 g z_1 &= P_3 + \rho_3 g z_3 \\ P_1 - P_3 &= \rho_3 g z_3 - \rho_1 g z_1 \end{aligned} \quad (\text{식 7-4})$$

[그림 3-80] 환기구를 통한 유동

여기서 1과 3위치의 높이가 h_u 로 같다고 하면 ($z_1 = z_3 = h_u$), 상층부에서의 압력차 ΔP_u 는 다음과 같다.

$$\Delta P_u = gh_u(\rho_3 - \rho_1) = gh_u(\rho_a - \rho_g) \quad (\text{식 7-5})$$

화재실 내부와 환기구사이에 Bernoulli 정리를 적용하면

$$P_1 + \frac{\rho_1 V_1^2}{2} + \rho_1 g z_1 = P_2 + \frac{\rho_2 V_2^2}{2} + \rho_2 g z_2 \quad (\text{식 7-6})$$

여기서 화재실 내부에는 유동속도가 0 이고 환기구를 통해 빠져나가는 속도를 V_g ($V_2 = V_g$), 화재실 내부와 환기구를 통해 빠져나가는 가스의 밀도는 같다고 가정하고($\rho_1 = \rho_2 = \rho_g$), 1과 2위치의 높이도 h_u 로 같다고 하면 ($z_1 = z_2 = h_u$)

$$P_1 + \rho_g g h_u = P_2 + \frac{\rho_g V_g^2}{2} + \rho_g g h_u \quad (\text{식 7-7})$$

$$P_1 - P_2 = \Delta P_u = \frac{\rho_g V_g^2}{2}$$

따라서 환기구를 통해 빠져나가는 고온가스의 속도는

$$V_g = \sqrt{\frac{2\Delta P_u}{\rho_g}} \quad (\text{식 7-8})$$

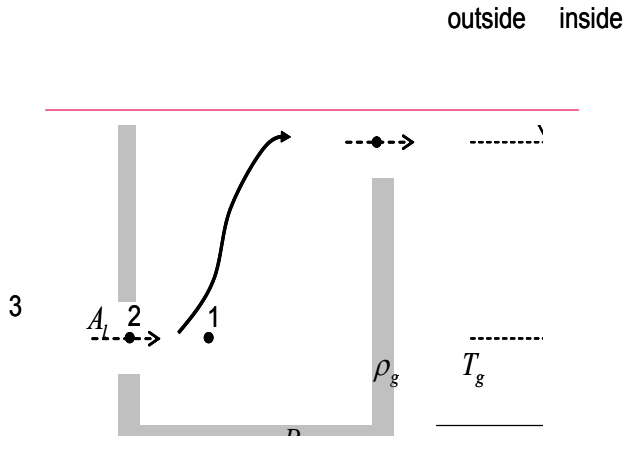
식 7-5에서 상층부에서 화재실 내부와 외부의 압력차 $\Delta P_u = gh_u(\rho_a - \rho_g)$ 이므로 이를 식 7-8에 대입하면

$$V_g = \sqrt{\frac{2gh_u(\rho_a - \rho_g)}{\rho_g}} \quad (\text{식 7-9})$$

이번에는 [그림 3-81]와 같이 하층부와 상층부에 환기구가 있는 경우를 고려해 본다. 하층부에서 외부공기가 유입되기 위해서는 외부압력에 비해 하층부의 압력이 낮아야 하고 상층부에서 고온가스가 유출되기 위해서는 내부압력이 외부압력에 비해 높아야 한다. 구획공간내부의 압력은 거의 선형적으로 변화한다고 볼 수 있으며 이때 압력차가 0 이 되는 위치를 중립면(neutral plane)으로 정의한다.



[그림 3-81] 하층부를 통한 공기유입



마찬가지 방법으로 화재실 내부와 외부(1과 3위치사이)에 대해 Bernoulli 정리를 적용해 보면 (내부와 외부의 속도는 0 으로 가정)

$$P_1 - P_3 = \rho_g g z_3 - \rho_g g z_1 \quad (\text{식 7-10})$$

$$\Delta P_1 = g h_1 (\rho_a - \rho_g)$$

화재실 외부(3위치)와 외부공기가 유입되는 환기구(2위치) 사이에 Bernoulli 정리를 적용하면

$$P_3 + \rho_a g h_1 = P_2 + \frac{\rho_a V_a^2}{2} + \rho_a g h_1 \quad (\text{식 7-11})$$

$$P_3 - P_2 = \Delta P_1 = \frac{\rho_a V_a^2}{2}$$

하층부에서 화재실 내외부의 압력차를 식 7-10으로부터 대입하면 하층부 환기구에서 유입되는 속도는

$$V_a = \sqrt{\frac{2g h_1 (\rho_a - \rho_g)}{\rho_a}} \quad (\text{식 7-12})$$

7

3.2 환기구를 통한 질량유량

구획화재
(Compartment
Fire)

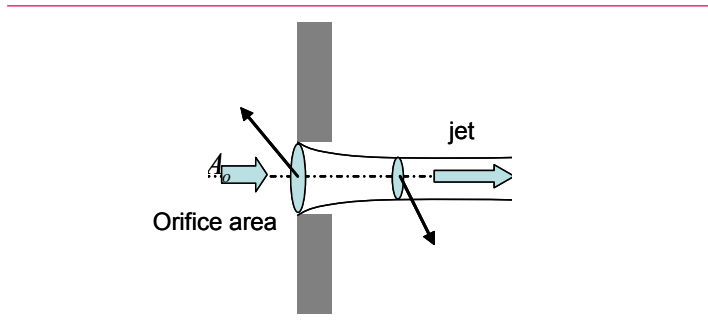
일반적으로 단면에서 평균속도를 알고 있는 경우 단면적과 유체의 밀도를 적용하여 이상적인 질량유량을 산정할 수 있다.

$$\dot{m} = \rho AV \tag{식 7-13}$$

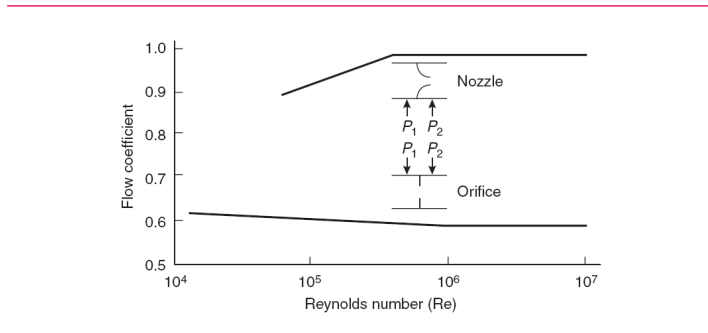
그러나 실제 유동이 지나가는 단면적은 환기구의 기하학적인 단면적에 비해 작기 때문에 유동계수 혹은 송출계수(flow coefficient, discharge coefficient, C_d)를 고려하면 다음과 같다.

$$\dot{m} = C_d \rho AV \tag{식 7-14}$$

[그림 3-82] 오리피스 유동



[그림 8-83] 레이놀즈수에 따른 유동계수





대부분의 화재공간의 환기구는 오리피스와 유사한 유동형태를 가지며 유출되는 제트의 유효단면적(A)는 실제 환기구 단면적(A_0)의 약 60~70% 정도로 알려져 있다.

[그림 3-83]에서 보는 것처럼 일반적으로 C_d 는 레이놀즈수의 함수이다. 화재유동장에서 환기구를 통한 유체속도가 약 1~5 m/s 정도인 점을 감안하면 레이놀즈수는 약 10^6 정도가 되고 C_d 값은 약 0.6 정도가 된다. 출입구의 틈새와 같이 매우 좁은 면적을 통과하는 유동의 경우 C_d 값은 약 0.7 정도로 알려져 있다. 따라서 화재유동에 대해 환기구의 C_d 값은 약 0.6~0.7 정도를 적용하면 공학적인 해석에 큰 무리가 없다.

[그림 3-81]에서 상층부 환기구를 통해 유출되는 질량유량

$$\dot{m}_g = C_d \rho_g A_u \sqrt{\frac{2gh_l(\rho_a - \rho_g)}{\rho_g}} \quad (\text{식 7-15})$$

하층부 환기구를 통해 유입되는 질량유량

$$\dot{m}_a = C_d \rho_a A_l \sqrt{\frac{2gh_l(\rho_a - \rho_g)}{\rho_a}} \quad (\text{식 7-16})$$

따라서 질량유량은 밀도차와 중립면의 높이에 의해 결정된다. 중립면의 높이를 구하기 위해서 유입과 유출에 대한 질량보존을 적용한다.

$$\begin{aligned} \dot{m}_a &= \dot{m}_g \\ C_d \rho_a A_l \sqrt{\frac{2gh_l(\rho_a - \rho_g)}{\rho_a}} &= C_d \rho_g A_u \sqrt{\frac{2gh_u(\rho_a - \rho_g)}{\rho_g}} \quad (\text{식 7-17}) \\ \sqrt{\frac{h_l}{h_u}} &= \frac{A_u}{A_l} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_a}} \end{aligned}$$

여기서 두 환기구 사이의 거리 $H = h_l + h_u$ 이다. 밀도는 온도에 반비례하므로 중립면을 중심으로 높이비는 다음과 같다.

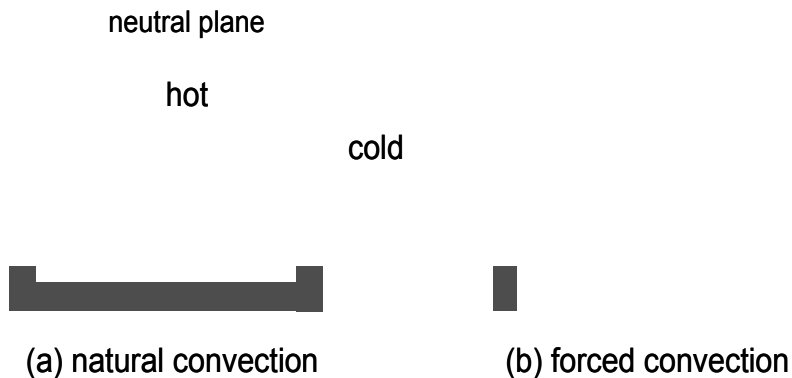
$$\frac{h_l}{h_u} = \left(\frac{A_u}{A_l} \right)^2 \frac{T_a}{T_g} \quad (\text{식 7-18})$$

3.3 화재실의 압력분포

구획화재
(Compartment
Fire)

구획 공간에서의 출입구를 통한 유동은 공간내부와 외부의 압력차, 온도차(밀도)에 의해 형성되기도 하고 부력이나 환기장치의 가동으로 인한 강제대류 등에 의해 유동이 발생한다. 출입구를 통한 유동에 가장 근본적인 원인이 되는 압력차는 화재 자체에 의해 발생할 수도 있고 환기시스템 가동에 의해서도 발생할 수 있으며 압력차에 의해 발생된 유동은 앞서 설명한바와 같이 Bernoulli 정리를 이용하여 해석할 수 있다. [그림 3-84]에서 보는바와 같이 자연대류의 경우 화재공간내부에서의 압력분포는 중력에 의해 수직적으로 변화하여 중립면을 기준으로 외부의 차가운 공기가 공간으로 유입되고 내부의 더운 공기가 외부로 유출되는 형태를 가진다.

[그림 3-84] 자연대류와 강제대류시의 출입구 유동분포

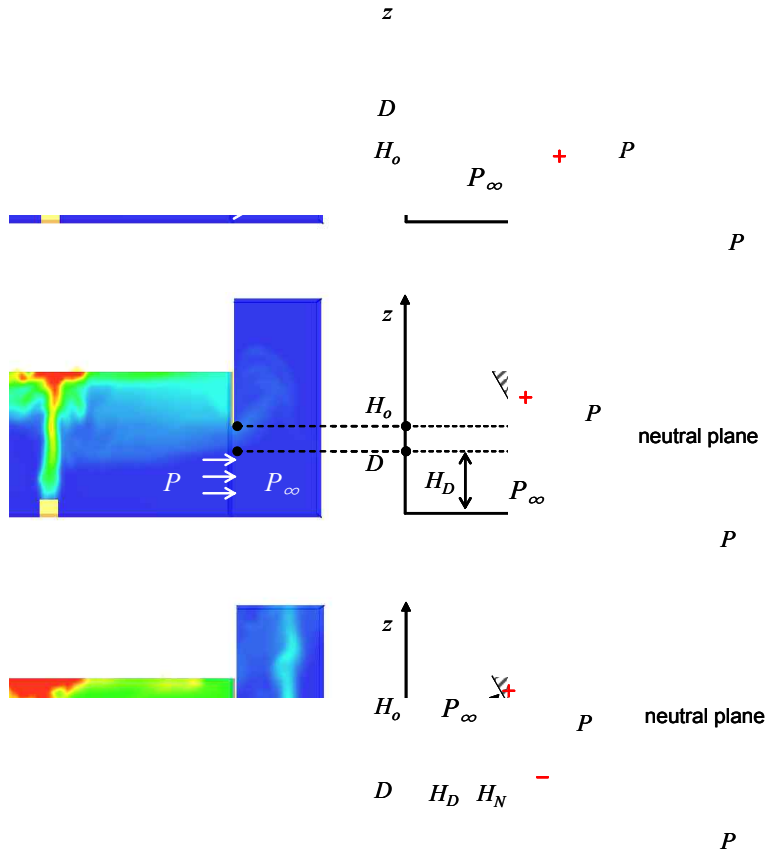


강제대류의 경우 외부의 공기가 다른 환기구를 통해 강제적으로 공간으로 공급되기 때문에 공간내부의 압력은 증가하고 출입구에서는 외부로 유출되는 유동이 형성된다. 따라서 출입구를 통한 유동특성을 파악하기 위해서는 화재발달에 따른 화재공간 내부와 외부의 압력차에 대한 상세한 이해를 요구한다.

[그림 3-85]의 (a)와 같이 화재발생의 초기단계에서는 고온연층이 출입구높이까지 내려오지 못하고 상층부에 갇혀있는 상태이고 화원으로부터 방출된 열에 열해 화재공간은 열적 팽창 상태가 된다. 이러한 열적팽창에 의해 화재공간내부의 압력은 증가하고 외기 압력에 비해 공간전체에서 압력이 더 높은 상태가 되어 출입구를 통한 유출유동이 형성된다.



[그림 3-85] 화재유동형태에 따른 출입구에서 압력분포



[그림 3-86]의 (b)에서 보는 것처럼 연기층이 출입구의 상단에 도달하여 고온의 가스가 외부로 유출되기 시작한다. 화재실 열적팽창에 의해 내부압력이 여전히 외부압력에 비해 높기 때문에 출입구 전체를 통해 유출유동이 지속된다. 그러나 고온 가스가 화재실로부터 유출됨에 따라 빠져나간 양만큼을 채우기 위해 외부공기를 유입하게 되고 질량보존을 만족시킨다.

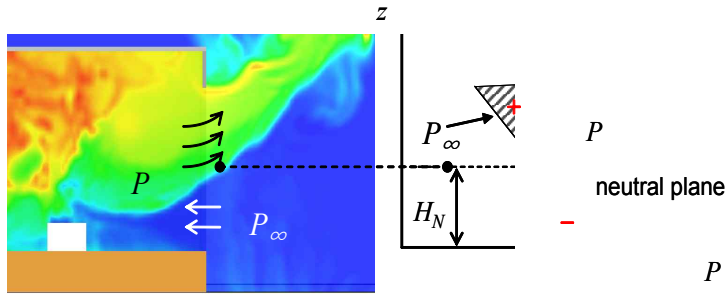
화재가 더욱 성장하면 [그림 3-86]의 (c)와 같이 출입구의 상부 쪽으로는 고온의 연소가스가 빠져나가고 아래쪽으로는 외부의 공기가 화재실로 유입된다. 따라서 출입구 상부에서의 내부의 압력이 외부에 비해 상대적으로 높지만 출입구의 하부에서는 오히려 외부의 압력이 내부에 비해 높게 형성된다. 높이에 따라 내부와 외부의 압력차가 같아지는 지점이 존재하는데 이를 중립높이(neutral height, H_N)라 한다. 중립높이에는 압력차가 없기 때문에 유동이 거의 없다. 구획화재 공간의 상층부는 연층, 하층부는 유입공기로 명확하게 두 개의 영역으로 구분되는데 이러한 상태를 성층화된(stratified) 상태라고 하고 전실화재 이전의 연층부와 하층부에 대해 화재유동을 해석하는 two zone model이 널리 이용되고 있다.

7

구획화재
(Compartment
Fire)

이후 화재가 성장해서 완전히 발달된 화재(fully developed fire)나 전실화재(flashover) 상태가 되면 [그림 3-87]에서 보는 것처럼 고온의 연층이 바닥에 도달하고 화재실 내부의 압력분포는 거의 선형이 된다. 화재실 내부는 더 이상 연층부와 하층부로 구분되지 않고 하나의 잘 혼합된(well-mixed)영역으로 간주하게 되는데 이를 one zone model이라고 한다. one zone model은 전실화재 이후의 화재해석에 널리 이용된다.

[그림 3-86] 완전발달된 화재의 유동형태와 출입구에서의 압력분포



[그림 3-87] One zone model에서의 압력 및 유동특성



3.4 One zone model

One zone model은 공간내의 화재가 완전 발달된 상태 혹은 전실화재에 도달하여 화재 실이 고온의 가스로 채워져 있기 때문에 화재실내부의 온도나 밀도 등의 물성이 균일하다고 가정한다. 공간내부의 연층부와 하층부를 구분할 필요가 없기 때문에 비교적 간단하게 출입구를 통한 유동특성을 해석할 수 있다.

[그림 3-88]에서 보는바와 같이 화재공간내부의 온도와 밀도는 T_g 와 ρ_g 이고 출입구의 높이는 H_o , 중립면은 바닥으로부터 H_N 높이에 있으며 중립면을 중심으로 상부의 유출이 이루어지는 높이는 h_u , 유입이 이루어지는 높이는 h_l 이다. 외부의 온도와 밀도는 T_a 와 ρ_a 이고 외부로 유출되는 질량유량은 \dot{m}_g , 유입되는 질량유량은 \dot{m}_a 이다. 출입구의 상부에서의 최대 압력차는 $\Delta P_{u,max}$, 하부에서의 최대압력차는 $\Delta P_{l,max}$ 이고 출입구를 상부와 하부에서의 최대속도는 $v_{g,max}$ 와 $v_{a,max}$ 로 나타낸다.

출입구를 통한 평균유속에 의한 질량유량은 $\dot{m} = C_d \rho A V$ 로 나타낸다. 그러나 출입구에서의 속도분포가 일정하지 않기 때문에 미소면적을 통과하는 미소질량유량은 다음과 같이 나타낸다.

$$d\dot{m} = \rho v dA \quad (\text{식 7-19})$$

따라서 전체 질량유량은 미소질량유량을 전체 출입구에 대해 적분하여 구해진다.

$$\dot{m} = C_d \int_A \rho v dA \quad (\text{식 7-20})$$

출입구 폭에 대해 속도분포가 균일하다고 가정하면 출입구에서의 속도는 높이만의 함수가 되고 미소면적은 출입구의 폭(W)과 미소높이(dz)를 고려하여 $dA = W dz$ 로 나타낸다. 따라서 중립면으로부터 출입구의 임의 높이 z 에서의 질량유량은 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{m} = C_d \int \rho W v(z) dz \quad (\text{식 7-21})$$

화재실 내부와 외부의 압력차는 식 7-5와 7-10에서 계산한 것처럼 다음과 같이 나타낸다.

$$\Delta P_{u,max} = gh_u(\rho_a - \rho_g)$$

$$\Delta P_{l,max} = gh_l(\rho_a - \rho_g)$$

일반적으로 임의 높이에서의 압력차는 높이의 선형 함수로써 다음과 같이 나타낸다.

$$\Delta P(z) = gz(\rho_a - \rho_g) \quad (\text{식 7-22})$$

출입구의 상부에서의 최대속도와 하부에서의 최대속도는 식 7-9과 7-12에서 유도한 방
식과 마찬가지로 다음과 같다.

$$V_{g,\max} = \sqrt{\frac{2gh_u(\rho_a - \rho_g)}{\rho_g}}$$

$$V_{a,\max} = \sqrt{\frac{2gh_l(\rho_a - \rho_g)}{\rho_a}}$$

출입구에서의 속도는 높이에 따라 변화하므로 임의높이 z 에서의 유출속도와 유입속도는
다음과 같다.

$$V_g(z) = \sqrt{\frac{2gz(\rho_a - \rho_g)}{\rho_g}} \quad (\text{식 7-23})$$

$$V_a(z) = \sqrt{\frac{2gz(\rho_a - \rho_g)}{\rho_a}} \quad (\text{식 7-24})$$

출입구의 중립면 위 쪽을 통해 유출되는 질량유량은 식 7-21를 중립높이에서 h_u 까지 적
분함으로써 계산된다.

$$\begin{aligned} \dot{m}_g &= C_d \int_0^{h_u} \rho_g W v_g(z) dz = C_d \rho_g W \int_0^{h_u} v_g(z) dz \\ &= C_d \rho_g W \int_0^{h_u} \sqrt{\frac{2gz(\rho_a - \rho_g)}{\rho_g}} dz = C_d \rho_g W \sqrt{\frac{2g(\rho_a - \rho_g)}{\rho_g}} \int_0^{h_u} \sqrt{z} dz \end{aligned} \quad (\text{식 7-25})$$

여기서 $\int_0^{h_u} \sqrt{z} dz = \frac{2}{3} h_u^{3/2}$ 이므로 출입구를 통해 유출되는 질량유량은

$$\dot{m}_g = \frac{2}{3} C_d \rho_g W \sqrt{\frac{2g(\rho_a - \rho_g)}{\rho_g}} h_u^{3/2} \quad (\text{식 7-26})$$

한편 출입구의 중립면 아래쪽으로 유입되는 외기의 질량유량은 동일한 방법으로 계산된다.

$$\begin{aligned} \dot{m}_a &= C_d \int_0^{h_l} \rho_a W v_a(z) dz = C_d \rho_a W \int_0^{h_l} v_a(z) dz \\ &= C_d \rho_a W \int_0^{h_l} \sqrt{\frac{2gz(\rho_a - \rho_g)}{\rho_a}} dz = C_d \rho_a W \sqrt{\frac{2g(\rho_a - \rho_g)}{\rho_a}} \int_0^{h_l} \sqrt{z} dz \end{aligned}$$



$$\dot{m}_a = \frac{2}{3} C_d \rho_a W \sqrt{\frac{2g(\rho_a - \rho_g)}{\rho_a}} h_l^{3/2} \quad (\text{식 7-27})$$

중립면의 높이는 미지수로서 전체 출입구의 높이는 $H = h_l + h_u$ 이다. 유출되는 질량유량은 화원에서 생성된 연료의 질량유량(연소율)과 유입되는 질량유량의 합과 같으나 연료의 연소율은 유입공기의 질량유량에 비해 매우 미미한 수준이다. 따라서 중립면을 기준으로 유입되는 질량유량과 유출되는 질량유량이 같다고 가정하면

$$\dot{m}_g = \dot{m}_a \quad (\text{식 7-28})$$

$$\frac{2}{3} C_d \rho_g W \sqrt{\frac{2g(\rho_a - \rho_g)}{\rho_g}} h_u^{3/2} = \frac{2}{3} C_d \rho_a W \sqrt{\frac{2g(\rho_a - \rho_g)}{\rho_a}} h_l^{3/2}$$

$$\left(\frac{h_u}{h_l}\right)^{3/2} = \left(\frac{\rho_a}{\rho_g}\right)^{1/2} \quad (\text{식 7-29})$$

$h_u = H_o - h_l$ 이며 h_l 은 중립높이 H_N 과 같기 때문에 $h_u = H_o - H_N$ 을 대입하면

$$\left(\frac{H_o - H_N}{H_N}\right) = \left(\frac{\rho_a}{\rho_g}\right)^{1/3} \quad (\text{식 7-30})$$

따라서 중립높이는 다음과 같다.

$$H_N = \frac{H_o}{1 + \left(\frac{\rho_a}{\rho_g}\right)^{1/3}} \quad (\text{식 7-31})$$

(예제 7-1) 공간의 폭이 2.4 m, 길이가 3.6 m, 높이가 2.4 m이고 출입구의 폭이 0.8 m, 높이가 1.8 m 인 표준화재실에서 화재가 발생하여 전실화재에 도달하였다. 이후 화재실 내부 온도가 800°C까지 균일하게 상승하였다고 가정할 때 중립면의 높이와 화재실로 유입, 유출되는 질량유량을 계산하라. 외부공기의 온도는 20°C로 가정한다.

중립면의 높이나 유출입 유량을 계산하기 위해서는 가스의 온도에 따른 밀도를 산정해야 한다. 유입유체와 유출유체의 조성이 공기와 같다고 가정하면 밀도와 온도사이의 관계식은 다음과 같다.

$$\rho = \frac{353}{T[K]}$$

$$\rho_g = \frac{353}{(800 + 273)} = 0.329 \text{ kg/m}^3, \quad \rho_a = \frac{353}{(20 + 273)} = 1.205 \text{ kg/m}^3$$

중립면까지의 높이

$$H_N = \frac{H_o}{1 + \left(\frac{\rho_a}{\rho_g}\right)^{1/3}} = \frac{1.8}{1 + \left(\frac{1.205}{0.329}\right)^{1/3}} = 0.708 m$$

따라서 $h_l = H_N = 0.71 m$, $h_u = 1.8 - 0.71 = 1.092 m$

화재유동장에서 출입구에서 유동계수 $C_d \approx 0.6$ 정도이므로 유입유량을 계산하면

$$\begin{aligned} \dot{m}_a &= \frac{2}{3} C_d \rho_a W \sqrt{\frac{2g(\rho_a - \rho_g)}{\rho_a}} h_l^{3/2} \\ &= \frac{2}{3} \times 0.6 \times 1.205 \times 0.8 \times \sqrt{\frac{2 \times 9.81 \times (1.205 - 0.329)}{1.205}} 0.71^{3/2}. \\ &\approx 0.87 kg/s \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_g &= \frac{2}{3} C_d \rho_g W \sqrt{\frac{2g(\rho_a - \rho_g)}{\rho_g}} h_u^{3/2} \\ &= \frac{2}{3} \times 0.6 \times 0.329 \times 0.8 \times \sqrt{\frac{2 \times 9.81 \times (1.205 - 0.329)}{0.329}} 1.09^{3/2} \\ &\approx 0.87 kg/s \end{aligned}$$

참고) 밀도와 온도사이의 관계

화재에서 발생된 연기의 조성은 대부분이 유입공기가 차지하고 있다. 따라서 유출되는 연기의 열적물성치를 공기의 것으로 간주해도 크게 무리는 없다. 유입, 유출되는 밀도는 이상기체로 간주하여 이상기체의 상태방정식을 적용하면 다음과 같다.

$$P = \rho RT, P = \rho \frac{R_u}{MW} T, \text{ 따라서 } \rho = \frac{P \cdot MW}{R_u T} \text{가 된다.}$$

압력이 대기압으로 일정하고 $P = 101325 Pa$, $MW = 28.83 g/mol$, $R_u = 8315 J/molK$ 를 대입하면

$$\rho = \frac{P \cdot MW}{R_u T} = \frac{350}{T} \text{ 인 관계를 얻는다.}$$



[그림 3-88] 온도와 밀도사이의 관계 (공기)

$$\rho = \frac{350}{T}$$

3.5 출입구를 통한 유입공기의 질량유량

식 7-27에서 출입구를 통해 유입되는 외기의 질량유량은 다음과 같이 나타난다.

$$\dot{m}_a = \frac{2}{3} C_d \rho_a W \sqrt{\frac{2g(\rho_a - \rho_g)}{\rho_a}} H_i^{3/2}$$

식 7-31은 하층부높이와 밀도사이의 관계를 정의하는데 이를 h 대신 대입하면

$$\dot{m}_a = \frac{2}{3} C_d \rho_a W \sqrt{\frac{2g(\rho_a - \rho_g)}{\rho_a}} \left(\frac{H_o}{1 + \left(\frac{\rho_a}{\rho_g}\right)^{1/3}} \right)^{3/2}$$

출입구의 단면적 $A = H_o W$ 이므로

$$\dot{m}_a = \frac{2}{3} C_d \rho_a A \sqrt{H_o} \sqrt{2g} \sqrt{\frac{\left(\frac{\rho_a - \rho_g}{\rho_a}\right)}{\left(1 + \left(\frac{\rho_a}{\rho_g}\right)^{1/3}\right)^3}} \quad (\text{식 7-32})$$

$\sqrt{\frac{(\rho_a - \rho_g)}{\rho_a}} / \sqrt{\left(1 + \left(\frac{\rho_a}{\rho_g}\right)^{1/3}\right)^3}$ 를 밀도계수(density factor)로 정의한다.

7

[그림 3-89] 온도비와 밀도계수 사이의 관계

구획화재
(Compartment
Fire)

density factor

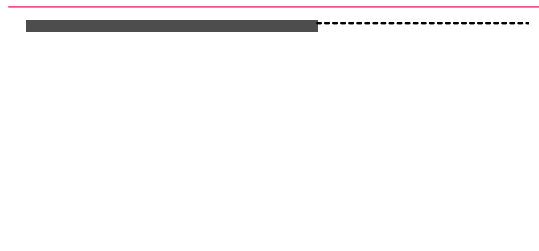


3.6 Two zone model

Two zone model은 전실화재 이전의 초기화재진행 과정중의 화재거동을 해석하는데 널리 이용된다. 화재공간 내부는 고온의 상층부와 저온의 하층부로 분리되어 있는 상태로서 각층에 대해 온도나 밀도 등의 물성이 균일하다고 가정하여 화재특성을 해석한다. Two zone model은 공간내부의 물성이 하나의 대표값으로 나타나는 것이 아니라 각층에 대해 구분해서 고려해야 하기 때문에 One zone model에 비해 상대적으로 복잡하지만 접근 방식은 거의 유사하다.

Two zone model의 경우 출입구에서의 유동 및 압력분포가 크게 3개 구간으로 나뉘게 된다.

[그림 3-90] Two zone 모델에서의 압력 및 유동특성



먼저 중립층 위의 출입구 상부에서는 고온의 연층의 존재에 의해 내부 압력이 외부에 비해 높아 외부로 유출되는 유동이 형성된다. 출입구의 하부로의 유입은 연층경계와 중립면 사이의 연층으로 유입되는 \dot{m}_{a1} 과 연층 아래로 유입되는 \dot{m}_{a2} 로 구분된다. 중립면을 기준($z=0$)으로 유출입 유량은 다음과 같이 구분되고 출입구를 통해 유입되는 외기의 질량유량은 $\dot{m}_a = \dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a2}$ 가 된다..

- $0 < z < H_c - H_N$: \dot{m}_g
- $0 < z < H_N - H_D$: \dot{m}_{a1}
- $H_N - H_D < z < H_D$: \dot{m}_{a2}

앞서 언급한 출입구를 통한 질량유량과 속도는 식 7-21과 식 7-23, 24등과 같이 나타낸다.

$$\dot{m} = C_d \int \rho W v(z) dz$$

$$V_a(z) = \sqrt{\frac{2gz(\rho_a - \rho_g)}{\rho_a}}$$

$$V_g(z) = \sqrt{\frac{2gz(\rho_a - \rho_g)}{\rho_g}}$$

여기서 중립높이의 상부($0 < z < H_o - H_N$)를 통해 빠져나가는 질량유량식에 유속을 대입하면

$$\begin{aligned} \dot{m}_g &= C_d \int_0^{H_o - H_N} \rho_g W v_g(z) dz \\ &= C_d \rho_g W \sqrt{\frac{2g(\rho_a - \rho_g)}{\rho_g}} \int_0^{H_o - H_N} \sqrt{z} dz \end{aligned} \quad (\text{식 7-36})$$

따라서 출입구의 중립면 상부를 통해 외부로 빠져나가는 유체의 질량유량은 다음과 같이 정리된다.

$$\dot{m}_g = \frac{2}{3} C_d \rho_g W \sqrt{\frac{2g(\rho_a - \rho_g)}{\rho_g}} (H_o - H_N)^{3/2} \quad (\text{식 7-37})$$

중립높이에서 연층높이 사이($0 < z < H_N - H_D$)로 유입되는 외부공기의 질량유량도 동일한 방법으로 유도된다.

$$\begin{aligned} v_{a1}(z) &= \sqrt{\frac{2gz(\rho_a - \rho_g)}{\rho_a}} \\ \dot{m}_{a1} &= C_d \int_0^{H_N - H_D} \rho_a W v_{a1}(z) dz \\ &= C_d \rho_a W \sqrt{\frac{2g(\rho_a - \rho_g)}{\rho_a}} \int_0^{H_N - H_D} \sqrt{z} dz \end{aligned} \quad (\text{식 7-38})$$

$$\dot{m}_{a1} = \frac{2}{3} C_d \rho_a W \sqrt{\frac{2g(\rho_a - \rho_g)}{\rho_a}} (H_N - H_D)^{3/2} \quad (\text{식 7-39})$$

연층높이 아래쪽($H_N - H_D < z < H_D$)에서는 높이에 따른 압력차가 거의 일정하기 때문에 출입구에서의 유속은 일정하다. 유입되는 외부공기량은 식 7-14에서 설명한 바와 같이 평균 유입속도를 이용하여 계산할 수 있다.

$$\dot{m}_{a2} = C_d \rho_a AV$$



여기서 유입면적 $A = WH_D$ 이며 높이 $z = H_N - H_D$ 에서의 속도는 다음과 같다.

$$V_{a2} = \sqrt{\frac{2g(H_N - H_D)(\rho_a - \rho_g)}{\rho_a}} \quad (\text{식 7-40})$$

$$\dot{m}_{a2} = C_d \rho_a WH_D \sqrt{\frac{2g(H_N - H_D)(\rho_a - \rho_g)}{\rho_a}} \quad (\text{식 7-41})$$

출입구의 연층아래에서의 압력차는 다음과 같이 일정하다.

$$\Delta P = g(\rho_a - \rho_g)(H_N - H_D) \quad (\text{식 7-42})$$

출입구를 통해 유입되는 전체 질량유량은 $\dot{m}_a = \dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a2}$ 이므로

$$\dot{m}_a = \frac{2}{3} C_d \rho_a W \sqrt{\frac{2g(\rho_a - \rho_g)}{\rho_a}} \left[(H_N - H_D)^{3/2} + \frac{3}{2} H_D (H_N - H_D)^{1/2} \right] \quad (\text{식 7-43})$$

여기서 $\left[(H_N - H_D)^{3/2} + \frac{3}{2} H_D (H_N - H_D)^{1/2} \right]$ 항은 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \left[(H_N - H_D)^{3/2} + \frac{3}{2} H_D (H_N - H_D)^{1/2} \right] &= (H_N - H_D)^{1/2} \left(H_N - H_D + \frac{3}{2} H_D \right) \\ &= (H_N - H_D)^{1/2} \left(H_N + \frac{1}{2} H_D \right) \end{aligned}$$

최종적으로 유입되는 질량유량은 다음과 같다.

$$\dot{m}_a = \frac{2}{3} C_d \rho_a W \sqrt{\frac{2g(\rho_a - \rho_g)}{\rho_a}} (H_N - H_D)^{1/2} \left(H_N + \frac{1}{2} H_D \right) \quad (\text{식 7-44})$$

유입되는 외기의 질량유량(식 7-44)과 유출되는 연기의 질량유량(식 7-37)을 같다고 가정하면

$$\begin{aligned} \dot{m}_a &= \dot{m}_g \\ (H_N - H_D)^{1/2} \left(H_N + \frac{1}{2} H_D \right) &= (H_o - H_N)^{3/2} \quad (\text{식 7-45}) \end{aligned}$$

유입되는 질량유량은 중립면의 높이와 연층높이에 의해 결정되는 이 두 변수 모두 미지수이다. 연층높이와 중립높이의 경우 직접해를 얻을 수 없기 때문에 연층높이를 추측하여 반복법에 의해 중립높이를 계산할 수 있다.

7

3.7 천정의 환기구를 통한 연기 배출

구획화재
(Compartment
Fire)

[그림 3-92]에서 보는 것처럼 화재공간에 연층높이가 H_D 이고 중립면 높이가 H_N 일 때 화재실의 하단부에서 유입된 공기는 천정의 환기구를 통해 배출된다. 따라서 하단부를 통해 유입되는 공기의 질량유량은 천정의 환기구를 통해 유출되는 연기의 질량유량과 같다 ($\dot{m}_c = \dot{m}_l$).

천정의 환기구에서의 압력차는 다음과 같다.

$$\Delta P_c = g(\rho_a - \rho_g)(H - H_N) \quad (\text{식 7-46})$$

하단부 출입구에서의 압력차는 다음과 같다.

$$\Delta P_l = g(\rho_a - \rho_g)(H_N - H_D) \quad (\text{식 7-47})$$

[그림 3-91] 천정의 환기구를 통한 유동특성

압력차에 의한 속도식 ($V = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$)을 적용하여 하단부와 천정의 환기구에서의 속도를 산정하면

$$V_c = \sqrt{\frac{2g(\rho_a - \rho_g)(H - H_N)}{\rho_g}} \quad (\text{식 7-48})$$

$$V_l = \sqrt{\frac{2g(\rho_a - \rho_g)(H_N - H_D)}{\rho_a}} \quad (\text{식 7-49})$$



개구부를 통한 평균속도를 적용하여 유출입되는 질량유량을 계산하면

$$\dot{m}_c = C_d \rho_g A_c V_c = C_d \rho_g A_c \sqrt{\frac{2g(H-H_N)(\rho_a - \rho_g)}{\rho_g}} \quad (\text{식 7-50})$$

$$\dot{m}_l = C_d \rho_a A_l \sqrt{\frac{2g(H_N - H_D)(\rho_a - \rho_g)}{\rho_a}} \quad (\text{식 7-51})$$

유입되는 질량유량과 유출되는 질량유량이 같다고 하면 중립높이는 다음과 같다.

$$\rho_g A_c \sqrt{\frac{(H-H_N)}{\rho_g}} = \rho_a A_l \sqrt{\frac{(H_N-H_D)}{\rho_a}}$$

$$H_N = \frac{\rho_a H_D A_l^2 + \rho_g H A_c^2}{\rho_a A_l^2 + \rho_g A_c^2} \quad (\text{식 7-52})$$

천정의 환기구를 통해 유출되는 연기의 질량유량은 유입면적이 유출면적에 비해 아주 큰 경우 ($A_l \gg A_c$) 온도의 함수로써 다음식이 널리 이용된다.

$$\dot{m}_c = C_d \rho_a A_c \frac{\sqrt{2g(H-H_D)(T_g - T_a)T_a}}{T_g} \quad (\text{식 7-53})$$

(예제 7-2) 천정의 환기구를 통한 배연 질량유량을 산정하는 식 7-53을 유도과정에 대해 설명하라.

천정의 환기구를 통한 유속은 천정과 외부의 압력차에 의해 결정되고 하단부 출입구를 통해 유입되는 외기의 속도는 하단부에서의 압력차에 의해 결정된다.

$$\Delta P_c = \frac{1}{2} \rho_g V_c^2, \quad \Delta P_l = \frac{1}{2} \rho_a V_l^2$$

천정부 환기구와 하단부 출입구 사이의 전체 압력차는

$$\begin{aligned} \Delta P_T &= \Delta P_c + \Delta P_l = g(\rho_a - \rho_g)(H - H_N) + g(\rho_a - \rho_g)(H_N - H_D) \\ &= g(\rho_a - \rho_g)(H - H_D) \end{aligned}$$

따라서 속도와 압력관계식을 대입하면

$$\frac{1}{2} \rho_g V_c^2 + \frac{1}{2} \rho_a V_l^2 = g(\rho_a - \rho_g)(H - H_D)$$

식 7-45에서 하단부 출입구를 통해 유입되는 속도를 위 식에 대입하면 환기구의 속도는 다음과 같이 나타낸다.

$$V_c^2 = 2g \frac{(\rho_a - \rho_g)}{\rho_g} (H - H_N), \quad V_c = \sqrt{2g \frac{(\rho_a - \rho_g)}{\rho_g} (H - H_N)}$$

천정의 환기구를 통해 유출되는 질량유량은 $\dot{m}_c = C_d \rho_g A_c V_c$ 이므로 환기구에서의 평균속도를 대입하면

$$\dot{m}_c = C_d \rho_g A_c \sqrt{2g \frac{(\rho_a - \rho_g)}{\rho_g} (H - H_N)}$$

식 7-52의 중립면 높이에 대한 식을 $H - H_N$ 에 대입하면

$$\begin{aligned} H - H_N &= H - \frac{\rho_a H_D A_l^2 + \rho_g H A_c^2}{\rho_a A_l^2 + \rho_g A_c^2} = \frac{\rho_a H A_l^2 - \rho_a H_D A_l^2}{\rho_a A_l^2 + \rho_g A_c^2} = \frac{H - H_D}{1 + \left(\frac{A_c}{A_l}\right)^2 \frac{\rho_g}{\rho_a}} \\ &= \frac{\rho_a (H - H_D)}{\rho_a + \left(\frac{A_c}{A_l}\right)^2 \rho_g} \end{aligned}$$

질량유량식을 정리하면

$$\dot{m}_c = C_d \rho_g A_c \sqrt{2g \frac{(\rho_a - \rho_g)}{\rho_g} \frac{\rho_a (H - H_D)}{\rho_a + \left(\frac{A_c}{A_l}\right)^2 \rho_g}}$$

여기서 제곱근 밖의 ρ_g 를 ρ_a 로 나타내면 계산이 용이하기 때문에 $\rho_g = \rho_a \sqrt{\frac{\rho_g^2}{\rho_a^2}}$ 을

위 식에 대입하면

$$\dot{m}_c = C_d \rho_a A_c \sqrt{2g \frac{\rho_g^2}{\rho_a^2} \frac{(\rho_a - \rho_g)}{\rho_g} \frac{\rho_a (H - H_D)}{\rho_a + \left(\frac{A_c}{A_l}\right)^2 \rho_g}}$$

제곱근 안을 정리하면

$$2g \frac{\rho_g^2}{\rho_a^2} \frac{(\rho_a - \rho_g)}{\rho_g} \frac{\rho_a (H - H_D)}{\rho_a + \left(\frac{A_c}{A_l}\right)^2 \rho_g} = 2g \frac{(\rho_a - \rho_g)}{\rho_a} \frac{\rho_g (H - H_D)}{\rho_a + \left(\frac{A_c}{A_l}\right)^2 \rho_g}$$

밀도로 온도의 관계식 $\rho \approx \frac{350}{T}$ 를 대입하면



$$2g \frac{(\rho_a - \rho_g)}{\rho_a} \frac{\rho_g(H - H_D)}{\rho_a + \left(\frac{A_c}{A_l}\right)^2 \rho_g} = 2g \frac{(T_g - T_a)}{T_g} \frac{T_a(H - H_D)}{T_g + \left(\frac{A_c}{A_l}\right)^2 T_a}$$

$$= 2g(H - H_D) \frac{T_a(T_g - T_a)}{T_g \left(T_g + \left(\frac{A_c}{A_l}\right)^2 T_a \right)}$$

다시 제곱근 안에 대입하면 유출되는 질량유량은

$$\dot{m}_c = C_d \rho_a A_c \sqrt{\frac{2g(H - H_D) T_a (T_g - T_a)}{T_g \left(T_g + \left(\frac{A_c}{A_l}\right)^2 T_a \right)}}$$

유입면적이 유출면적에 비해 아주 큰 경우 ($A_l \gg A_c$), $\left(\frac{A_c}{A_l}\right)^2 \rightarrow 0$ 이므로

$$\dot{m}_c = C_d \rho_a A_c \frac{\sqrt{2g(H - H_D) T_a (T_g - T_a)}}{T_g}$$

제4절 환기조건에 따른 구획화재 특성

- 학습 목표**
- 01 연료지배형 화재(fuel controlled fire)
 - 02 유효열전달 계수
 - 03 환기지배형 화재(ventilation controlled fire)

화재공간 내부의 화재거동은 주변 외기의 환기상태에 따라 크게 영향을 받게 된다. 앞서 언급한바와 같이 외부에서 유입되는 공기의 양은 화원특성에 관계없이 개구부의 기하학 적인 형상에 의존하는 것으로 알려져 있다. [그림 3-93]의 왼쪽 그림에서 보는 것처럼 화원의 크기가 상대적으로 작은 화재의 경우 화재실 내부 및 외부로부터의 공기공급에 의해 화원에서 증발된 연료는 화재플럼 내에서 거의 연소되어 연층부에 미연소가스(unburned fuel gas)는 거의 존재하지 않는 환기정상상태(well ventilated fire)를 형성한다. 즉, 화재실 내부에 연소에 필요한 공기량은 충분한 상태이기 때문에 화재특성은 연료자체에 의존하며 연료지배형 화재(fuel controlled fire)로 불린다.

7

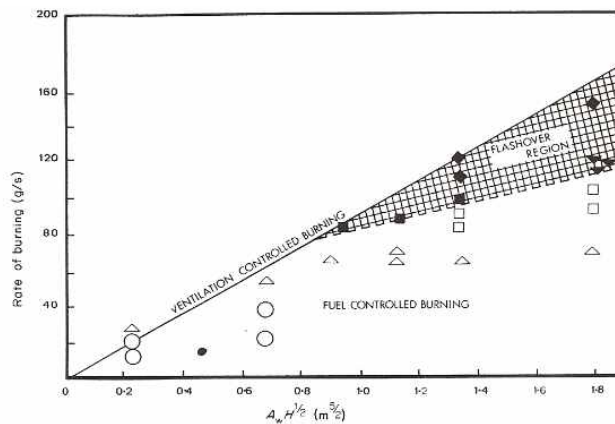
구획화재
(Compartment
Fire)

그러나 화재실 내부의 열적 피드백(heat feedback)이 증가하여 화원의 연소율이 증가하고 발열량이 지속적으로 상승하는 경우 화재실 내부는 [그림 3-93]의 오른쪽 그림과 같이, 화원에서 발생한 연료를 완전 연소시키기에 공기의 양이 부족한 환기 부족화재(under-ventilated fire)상태가 된다. 즉, 화원으로부터 생성된 연료가스는 화재실 상층부에서 미연 소가스(unburned fuel gas) 형태로 존재하고 이로 인해 공간내의 화재특성은 부족한 공기의 양에 의해 결정되기 때문에 환기제배형 화재(ventilation controlled fire)로 불린다.

[그림 3-92] 화기조건에 따른 실내화재의 성상



[그림 3-93] 연소율과 개구부를 통한 유입공기량의 관계





이러한 화재실 내부의 가연 가스 연료의 존재는 플래쉬오버(flashover), 화재폭발(fire ball), 역화(backdraft)와 같은 상황으로 발전하여 화재공간으로부터의 피난이나 구조, 소방 활동에 큰 위험요소로 작용하게 된다. 뿐만 아니라 불완전 연소과정 중에 발생하는 유독가 스인 일산화탄소(CO), 염화수소(HCl), 시안화수소(HCN) 등으로 인한 질식이나 다량의 그 을음(soot)으로 인하여 공간내 거주자들의 가시거리 감소를 유발하여 많은 피해를 야기하게 된다.

식 7-2에서 언급한바와 같이 개구부를 통해 유입되는 외부공기량은 $A\sqrt{H}$ 에 비례한다. 따라서 유입공기량에 따른 연료의 연소율을 변화시켜가며 구획화재특성을 살펴보면 [그림 3-94]의 실험결과에서 보는바와 같이 환기량에 비해 연소율이 작은 경우 연료지배형 화재가 되고 환기량에 비해 연소율이 커지면 환기지배형화재로 발전하게 된다. 따라서 본 절에서는 연료지배형 화재와 환기지배형 화재의 특성에 대해 알아보고 각각에 대한 해석방법을 소개한다.

4.1 연료지배형 화재(fuel controlled fire)

연료지배형 화재는 발화이후 전실화재(flashover)이전까지 초기화재 성장단계에서 주로 형성되고 화원에서 생성되는 연료에 비해 외기의 공급이 충분히 이루어지기 때문에 화원부 근에서 충분한 연소반응이 이루어진다.

따라서 화재실의 상층부에는 연소생성물만이 존재하고 더 이상의 연소반응은 진행되지 않으며 연층의 연기는 개구부를 통해 외부로 유출되고 동시에 외부의 공기가 화재실 내부로 유입된다. 이와 같이 연료지배형 화재에서 구획화재 공간은 연기가 존재하는 고온의 상층부(upper layer)와 저온의 하층부(lower layer)로 비교적 명확히 구분되며 화재실의 온도가 상대적으로 높지 않기 때문에 공간내부의 열전달 메커니즘은 대류열전달에 의해 지배된다.

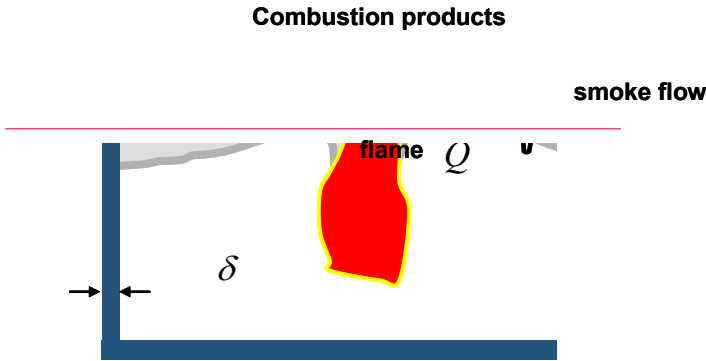
연료지배형 화재는 화원의 조건에 따라 공간내 화재특성이 결정되기 때문에 화재의 발열량이 명확한 경우 화재거동의 해석이 용이하여 다양한 해석방법이 제공되어 왔다.

[그림 3-95]에서 보는 것처럼 단일 구획공간에 대하여 연료지배형 화재가 발생한 경우를 고려해 본다. 화원의 발열량은 \dot{Q} [kW], 개구부의 면적은 A_o [m^2], 높이는 H , [m]이고 개구부를 통해 유출되는 연기의 질량유량은 \dot{m}_g [kg/s]이다. 구획화재실의 연전도계수가 k [W/mK], 밀도가 ρ_s [kg/s], 비열이 C_s [kJ/kgK]인 재료로 이루어져 있으며 벽의 두께는 δ 이다.

7

[그림 3-94] 연료지배형 구획화재

구획화재
(Compartment
Fire)



실제 화재공간내부의 에너지전달은 매우 복잡하지만 정상상태(steady state)에서의 지배적인 에너지 전달 과정을 고려해보면 화재에서 방출되는 에너지는 개구부를 통해 외부로 유출되는 에너지와 고온의 연층부에서 구획화재공간의 벽을 통해 외부로 유출되는 에너지 손실의 합으로 나타낼 수 있다.

실제 화재공간에서는 개구부를 통한 복사에너지 방출이나 공간 내 가연물의 온도나 연층의 온도상승 등 다양한 에너지전달과정이 수반되지만 연료지배형 화재에서는 화재실의 온도가 높지 않기 때문에 복사열전달에 의한 에너지 전달은 크지 않다. 따라서 지배적인 변수에 대해서 단순 에너지 보존을 고려해보면

$$\dot{Q} = \dot{m}_g C_p (T_g - T_a) + \dot{Q}_{loss} \quad (\text{식 7-54})$$

개구부를 통해 상층부 고온 연기가 외부로 유출되는 질량유량은 다음과 같다.

$$\dot{m}_g = \frac{2}{3} C_d W \rho_g \sqrt{\frac{2(\rho_a - \rho_g)g}{\rho_g}} (H_o - H_N)^{3/2} \quad (\text{식 7-55})$$

여기서 H_o [m]는 개구부의 높이, H_N [m]은 중립높이(neutral height), W 는 개구부의 폭을 나타낸다. 이상기체에서 밀도는 온도에 반비례 하므로 $\rho_a T_a = \rho_g T_g$ 를 식 7-55에 대입하면



$$\begin{aligned}
 \dot{m}_g &= \frac{2}{3} C_d W \rho_a \sqrt{2g \left(\frac{T_a}{T_g} \right)^2 \left(\frac{\rho_a}{\rho_g} - 1 \right)} (H_o - H_N)^{3/2} \\
 &= \frac{2}{3} C_d W \rho_a \sqrt{2g \left(\frac{T_a}{T_g} \right)^2 \left(\frac{T_g}{T_a} - 1 \right)} (H_o - H_N)^{3/2} \quad (\text{식 7-56}) \\
 &= \frac{2}{3} C_d W \rho_a \sqrt{2g \frac{T_a}{T_g} \left(1 - \frac{T_a}{T_g} \right)} (H_o - H_N)^{3/2}
 \end{aligned}$$

여기서 H_N 은 발열량과 개구부의 형상에 의해 결정되기 때문에 미지수이므로 알 수 있는 변수로 함수화하고 출입구를 통한 환기변수 $WH_o^{3/2} = A_o \sqrt{H_o}$ 이므로 유출되는 연기의 질량유량은 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\dot{m}_g = \rho_a \sqrt{g} A_o \sqrt{H_o} \cdot f(T_g, \dot{Q}, A_o, H_o) \quad (\text{식 7-57})$$

한편 화재공간의 벽면에서는 복사, 대류, 전도가 모두 포함된 복합열전달(conjugate heat transfer)의 형태를 보이지만 벽을 통한 열손실은 주로 전도열전달에 기인한다. 따라서 고체 경계에 대하여 유효열전달계수 h_k 를 정의하고 열전달이 고려되는 경계면적 A_T 를 적용하면 열손실율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{Q}_{loss} = h_k A_T (T_g - T_a) \quad (\text{식 7-58})$$

따라서 식 7-50은 다음과 같이 정리된다.

$$\dot{Q} = \dot{m}_g C_p (T_g - T_a) + h_k A_T (T_g - T_a) \quad (\text{식 7-59})$$

고온 연층의 온도와 유입공기의 온도차를 $\Delta T = T_g - T_a$ 로 정의하면

$$\Delta T = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_g C_p + h_k A_T} \quad (\text{식 7-60})$$

따라서 온도차는 발열량과 유효열전달계수와 유출연기량에 의존하게 된다. 고온연층온도와 유입공기의 온도차를 대기온도로 나누어 무차원화하면

$$\begin{aligned}
 \frac{\Delta T}{T_a} &= \frac{\dot{Q}}{(\dot{m}_g C_p + h_k A_T) T_a} \\
 &= \frac{\left(\frac{\dot{Q}}{\dot{m}_g C_p T_a} \right)}{\left(1 + \frac{h_k A_T}{\dot{m}_g C_p} \right)} \quad (\text{식 7-61})
 \end{aligned}$$

7

구획화재
(Compartment
Fire)

무차원 온도는 분자와 분모에 대하여 다음과 같이 두 개의 무차원 그룹에 대한 함수로 나타낼 수 있다. 이 무차원 변수는 화재조건과 외기조건, 화재실의 기하학적 형상, 재료 등에 의해 결정된다.

$$\frac{\Delta T}{T_a} = f\left(\frac{\dot{Q}}{\rho_a \sqrt{g} A_o \sqrt{H_o} C_p T_a}, \frac{h_k A_T}{\rho_a \sqrt{g} A_o \sqrt{H_o} C_p}\right) \quad (\text{식 7-62})$$

McCaffrey등은 무차원온도에 대한 식을 해석하기 위해 무차원온도가 두 개의 무차원 그룹변수와 관련 있다고 가정하고 다음과 같이 해석를 가정하였다.

$$\frac{\Delta T}{T_a} = C X^a Y^b \quad (\text{식 7-63})$$

미지수인 C와 a, b를 결정하기 위해서 McCaffrey등은 다양한 종류의 연료와 화재공간, 개구부, 구조물 재료 등에 대하여 실험을 수행하였고 실험데이터를 이용한 회귀분석을 통해 다음과 같은 최종식을 얻었다.

$$\frac{\Delta T}{T_a} = 1.63 \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_a C_p T_a \sqrt{g H_o} A_o}\right)^{2/3} \left(\frac{h_k A_T}{\rho_a C_p A_o \sqrt{g H_o}}\right)^{-1/3} \quad (\text{식 7-64})$$

[그림 3-95] 무차원 그룹변수와 연층온도상승과의 관계



a b



$$\Delta T = 6.85 \left(\frac{\dot{Q}^2}{A_o \sqrt{H_o} h_k A_T} \right)^{1/3} \quad (\text{식 7-65})$$

a고체벽면으로의 열전달을 계산할 때 실제로는 고온면과 접촉한 부분만 열전달의 유효면적이 되지만 연층높이가 시간에 따라 변화하기 때문에 연층부와 접촉하는 벽면의 면적은 지속적으로 변화한다. 따라서 연기층높이를 알 수 없기 때문에 연기층과 접촉하는 면적은 미지수가 된다. 따라서 McCaffrey 등은 화재실의 전체내부 면적(A_T)를 이용하여 상관식을 유도하였으며 내부 전체면적을 적용함으로써 발생하는 영향은 계수로 포함되었다.

결론적으로 화재발생으로 인한 연기층온도상승은 화원의 발열량과 화재실과 출입구의 기하학적 형상과 구조물의 재료 물성에 의해 계산된다.

식 7-65를 기초로 하여 전실화재에 대한 발열량 조건을 산정할 수 있다. 일반적으로 화재실내부가 전실화재에 도달하기 위해서는 연기층으로 부터 바닥으로의 열 유속이 임계 열 유속이상 제공되어야 한다. 일반적으로 고체가연물의 임계 열 유속을 약 20 kW/m^2 으로 가정할 경우 연층의 평균 온도는 500°C 이상으로 상승해야 한다. 따라서 $\Delta T = 500 \text{ K}$ 로 두고 윗식을 발열량에 대해 정리하면 전실화재가 일어나기 위한 최소 발열량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{Q}_{FO} = 610 \sqrt{h_k A_T A_o H_o^{1/2}} \quad (\text{식 7-66})$$

4.2 유효열전달 계수

고체벽면의 열전달을 계산하기 위해서는 h_k 를 결정해야 한다. 고체벽면에 대해서 반무한(semi-infinite) 두께를 가정하고 고체표면에서의 온도가 가스의 온도와 같다고 가정하면 단위면적당 벽으로 전도되는 열 유속은 다음과 같다.

$$\dot{q}'' = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{k \rho_s C_s}{t}} (T_g - T_a) \quad (\text{식 7-67})$$

여기서 k 는 벽면재료의 전도열전달 계수 [W/mK], ρ_s 재료의 밀도 [kg/m^3], C_s 는 재료의 비열 [kJ/kgK]을 나타낸다. 따라서 전체 열전달 계수는 다음과 같이 계산된다.

$$h = \sqrt{\frac{k \rho_s C_s}{\pi t}} \quad (\text{식 7-68})$$

정상상태에서 고체벽을 통해 전도되는 열전달율은 다음과 같다.

$$\dot{q}'' = k \frac{dT}{dx} = \frac{k}{\delta} (T_g - T_a) \quad (\text{식 7-69})$$

표면의 열이 고체를 통과해서 열을 전도할 때 시간에 따라 열전달량은 변화한다. 표면의 열이 고체벽면을 완전 통과하여 준 정상상태에 도달하는데 걸리는 시간을 열적투과시간(thermal penetration time)으로 정의하고 다음과 같이 계산된다.

$$t_p = \frac{\delta^2}{4\alpha} \quad (\text{식 7-70})$$

여기서 α 는 열확산계수(thermal diffusivity, m^2/s)를 나타낸다. 열적투과시간은 물리적으로 외부벽면의 온도가 화재에 노출된 벽의 온도증가에 15%까지 상승했을 때 걸리는 시간을 나타낸다. McCaffrey 등은 실험을 통해 유효열전달 계수를 열적투과시간을 기준으로 다음과 같이 분리하였다[그림 3-97].

$$h_k = \sqrt{\frac{k\rho_s C_s}{t}} \quad (t < t_p) \quad (\text{식 7-71})$$

$$h_k = \frac{k}{\delta} \quad (t > t_p) \quad (\text{식 7-72})$$

[표 3-22]은 일상에서 널리 이용되는 고체물질의 열적특성을 나타낸다.

[그림 3-96] 열적투과시간을 기준으로 한 고체벽면에서의 온도분포

solid wall



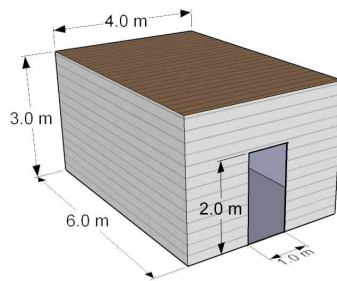
[표 3-22] 일상에서 사용되는 고체가연물의 열적 물성

(J. G. Quintere, Principle of Fire Behavior, Thomson)

material	k [W/mK]	C_s [kJ/kgK]	ρ_s [kg/m ³]	$k\rho_s C_s$ [kW ² s/m ⁴ K ²]	α [m ² /s]
Copper	387	0.380	8940	1300	1.14×10^{-4}
Steel	45.8	0.460	7850	160	1.23×10^{-5}
Brick	0.69	0.840	1600	0.93	5.2×10^{-7}
Concrete(common)	0.8-1.4	0.880	1900-2300	2.0	5.7×10^{-7}
Glass(plate)	0.76	0.840	2700	1.7	3.3×10^{-7}
Gypsum plaster	0.48	0.840	1440	0.58	4.1×10^{-7}
PMMA	0.19	1.420	1190	0.32	1.1×10^{-7}
Oak	0.17	2.380	800	0.32	8.9×10^{-8}
Yellow pine	0.14	2.850	640	0.25	8.3×10^{-8}
Asbestos	0.15	1.050	577	0.091	2.5×10^{-7}
Fiber insulating board	0.041	2.090	229	0.020	8.6×10^{-8}
Polyurethane foam	0.034	1.400	20	9.5×10^{-4}	1.2×10^{-6}
Air	0.026	1.040	1.1	3.0×10^{-5}	2.2×10^{-5}

(예제 7-3) 그림과 같이 출입구의 높이가 2.1 m, 폭이 1.0 m 인 공간에 화재가 발생하여
 준정상상태에 도달하였고 출입구의 상부로 연기가 빠져나가고 하부로 외부의
 찬 공기가 유입되고 있다. 화재로부터의 발열량이 400 kW인 경우 화재발생
 300초 이후 연층의 온도를 예측하라.

또한 전실화재가 되기 위해서는 발열량
 최소 얼마가 되어야 하는가? (벽의 두께
 는 30 cm이다.)



Material name	$k\rho c$ [kW ² s/m ⁴ K ²]	k [kW/mK]
Concrete	2	1×10^{-3}

화재실의 온도상승분은 다음과 같이 계산한다.

$$\Delta T = 6.85 \left(\frac{\dot{Q}^2}{A_o \sqrt{H_o} h_k A_T} \right)^{1/3}$$

열적 투과시간은 벽의 두께와 열확산계수에 의해 계산된다.

$$t_p = \frac{\delta^2}{4\alpha} = \frac{0.3^2}{4 \times 5.7 \times 10^{-7}} \approx 39500 \text{ s} \gg 300 \text{ s}$$

따라서 ($t < t_p$)이므로 유효열전달 계수는

$$h_k = \sqrt{\frac{k\rho_s C_s}{t}} = \sqrt{\frac{2}{300}} = 0.0816 \text{ kW/m}^2\text{K}$$

내부 벽의 면적은

$$A_T = 2(3 \times 6 + 4 \times 6 + 3 \times 4) - 2 \times 1 = 106 \text{ m}^2$$

따라서 연층의 온도상승은

$$\Delta T = 6.85 \left(\frac{400^2}{2\sqrt{2} \times 0.0816 \times 106} \right)^{1/3} = 128 \text{ K}$$

따라서 화재실 내부는 아직 전실화재가 일어나기 이전 단계로 판단된다.

전실화재로 발전하기 위해 요구되는 발열량을 계산해보면

$$\dot{Q}_{FO} = 610 \sqrt{0.0816 \times 106 \times 2 \times 1^{1/2}} \approx 2,500 \text{ kW}$$

상기와 같은 공간에서 약 2.5 MW 정도의 화재가 발생했을 경우 300초 이후에 전실화재가 일어날 것으로 판단된다.

4.3 환기 지배형 화재(ventilation controlled fire)

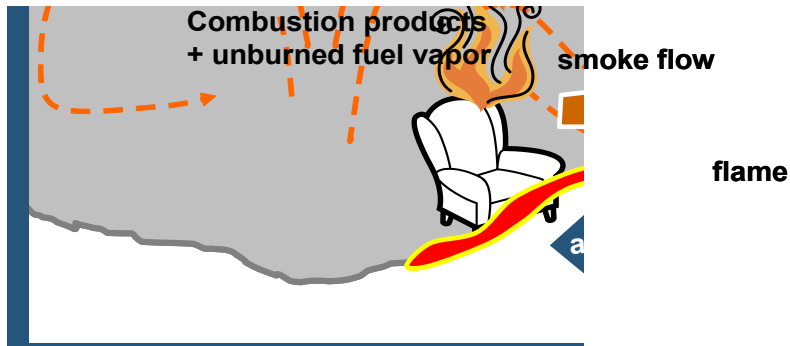
[그림 3-98]은 환기 지배형 구획화재의 전체적인 유동구조를 도식적으로 나타낸다. 초기 화재상황에서는 화재실 내부의 온도가 높지 않고 외기의 유입이 충분히 이루어지기 때문에 화재내부의 화재특성은 연료의 연소율에 의해 크게 의존하게 된다. 따라서 화재가 성장해서 전실화재(flashover)단계 이후로 접어들게 되면 공간내의 많은 가연물들에서 연료증기가 생성되지만 개구부를 통해 유입되는 공기량은 제한적이기 때문에 화재실 내부는 환기량이 부족한상태가 되고 화재실내부의 화재특성은 외기의 유입에 따라 결정되는 환기 지배형 화재(ventilation controlled fire)가 된다. 대부분의 전실화재나 완전 발달된 화재(fully



developed fire)의 경우 환기지배형 화재형태를 띄게 되고 화재실 내부는 불완전연소반응에 의해 형성된 다량의 연소가스, 그을음(soot), 미연연료가 존재한다. 화염은 주로 외기의 공급이 비교적 원활한 출입구 근처에서 형성되어 출입구를 통해 외부로 배출된 고온가스 내에 미연연료가 존재하기 화재공간 외부에서도 연소가 지속되어 화재공간으로부터 화염의 분출이 지속된다.

환기지배형 화재에서 연소반응은 개구부를 통해 유입되는 외기의 양에 의존하기 때문에 출입구의 크기와 형상에 의해 화재 특성이 결정된다. 따라서 화재실을 통해 유입되는 외기와 유출되는 연소가스의 양을 평가하는 것이 무엇보다 중요하다. 환기 지배형화재의 경우 화재실 내부가 완전발달된 형태를 띄기 때문에 3-4절에서 논의한 바대로 공간내부의 화재 특성은 균일하다고 가정할 수 있으며 이때 유입, 유출되는 질량유량은 다음과 같다.

[그림 3-97] 환기지배형 화재의 유동 구조



$$\dot{m}_a = \frac{2}{3} C_d \rho_a W \sqrt{\frac{2g(\rho_a - \rho_g)}{\rho_a}} h_l^{3/2}$$

$$\dot{m}_g = \frac{2}{3} C_d \rho_g W \sqrt{\frac{2g(\rho_a - \rho_g)}{\rho_g}} h_u^{3/2}$$

화재실 내부에서 stoichiometric 상태에서의 연소반응은 단위질량의 연료가 공기와 반응하여 연소생성물을 생성한다고 가정하고 전체적인 연소반응식은 다음과 같이 요약된다.



만일 연소가 stoichiometric 상태가 아닌 조건에서 이루어진다면 수정계수 ϕ 를 도입하여

$$1 \text{ kg fuel} + \frac{r}{\phi} \text{ kg air} \rightarrow \left(1 + \frac{r}{\phi}\right) \text{ kg products}$$

따라서 공기와 연소생성물의 질량유량비는 다음과 같다.

$$\frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_a} = \frac{1 + \frac{r}{\phi}}{\frac{r}{\phi}} = 1 + \frac{\phi}{r} \quad (\text{식 7-73})$$

유입되는 공기와 유출되는 연소가스의 질량유량을 대입하여 정리하면

$$\frac{h_l}{H} = \frac{1}{1 + \left[\left(1 + \frac{\phi}{r}\right)^2 \frac{\rho_a}{\rho_g} \right]^{1/3}} \quad (\text{식 7-74})$$

일반적인 화재에 대해서 개구부 높이에 대한 중립높이의 비, $\frac{h_l}{H}$ 은 약 0.3~0.5 정도의 값을 가진다. 유입되는 외기의 질량유량은 식 7-34에서 설명한바와 같이

$$\dot{m}_a = 0.52A\sqrt{H_o}$$

만일 화재실 내부에서 연소되는 물질이 목재($r \approx 5.7$)이고 연소상태가 stoichiometric 조건($\phi = 1$)이라고 가정하면 환기부족상태에서는 유입되는 공기량에 의해 연소되는 연료량이 결정되므로 연소율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{m}_f \approx \frac{\phi}{r} \dot{m}_a = \frac{1}{5.7} 0.52A\sqrt{H} = 0.09A\sqrt{H} \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_f \approx 5.5A\sqrt{H} \text{ kg/min} \quad (\text{식 7-75})$$

여기서 $A\sqrt{H}$ 는 환기계수(ventilation factor)로 알려져 있다. 위의 식은 Kawagoe 등이 수행한 목재화재(wood crib fire)에 대해 다양한 크기의 화재공간과 개구부 조건에 대해서 얻어진 관계식과 매우 잘 일치한다.

가) 환기지배형 화재의 화재실 온도

환기지배형 화재나 완전 발달된 화재의 경우 물리적 현상이 매우 복잡하기 때문에 화재실 내부의 온도를 예측하는 이론적 모델을 정립하는 것이 매우 어렵다. Babrauskas는 완전 발달된 화재실 내부의 온도가 몇 가지 현상을 대표하는 요소들의 급수로 나타냈다.

$$T_g = T_\infty + (T^* + T_\infty) \cdot \theta_1 \cdot \theta_2 \cdot \theta_3 \cdot \theta_4 \cdot \theta_5 \quad (\text{식 7-76})$$

여기서 T^* 는 경험상수로써 1725 K를 나타내고 θ_1 은 연소율의 양론비,



θ_2 는 정상상태의 벽으로의 열손실, θ_3 는 비정상상태의 벽으로의 열손실, θ_4 는 출입구 높이의 영향, θ_5 는 연소효율과 관련된 계수이다.

1) 연료율의 양론비 θ_1 의 결정

먼저 연소율의 양론비와 관련된 θ_1 에 대해 살펴보면, 주어진 공기공급에 대한 당량비(equivalence ratio) ϕ 는 다음과 같이 정의된다.

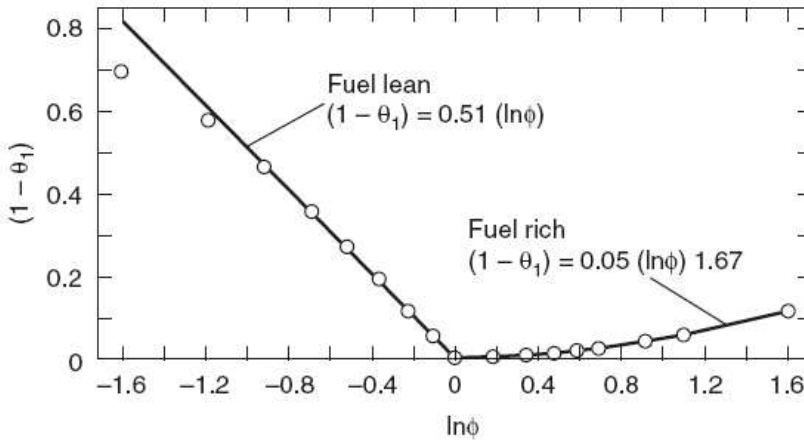
$$\phi = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_{f,st}} \quad (\text{식 7-77})$$

여기서 \dot{m}_f 는 연료의 열해리율, 즉 질량감소율을 나타내고 $\dot{m}_{f,st}$ 는 stoichiometric 상태의 연소율로써 연소과정에서의 연료나 산소의 잔량이 없이 완전 연소되는 연소율을 의미한다.

$$\dot{m}_{f,st} = \frac{0.52 A \sqrt{H}}{r} \quad (\text{식 7-78})$$

ϕ 가 1보다 크면 연료과잉(fuel rich)상태이고 ϕ 가 1보다 작으면 연료부족(fuel rich)상태가 된다. ϕ 가 기체의 온도변화사이의 관계는 컴퓨터 프로그램을 이용하여 [그림 3-99]와 같이 계산되고 이를 정량화 하면

[그림 3-98] 온도변화에 미치는 당량비의 영향(SFPE)



$$\theta_1 = 1.0 + 0.51 \ln \phi \quad (\phi < 1) \quad (\text{식 7-79})$$

$$\theta_1 = 1.0 - 0.05(\ln \phi)^{5/3} \quad (\phi > 1) \quad (\text{식 7-80})$$

만일 연료의 연소열 대신 발열량을 알고 있는 경우 당량비 ϕ 는 다음과 같다.

$$\phi = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{st}} \quad (\text{식 7-81})$$

환기부족상태에서는 stoichiometric 상태에서의 발열량이 유입공기량에 의존하므로 발열량은 소모된 산소량에 산소의 연소열을 고려하여 계산된다.

$$\dot{Q}_{st} = \dot{m}_{O_2} \Delta H_{c, O_2} \quad (\text{식 7-82})$$

산소의 질량유량은 $\dot{m}_{O_2} = Y_{O_2} \dot{m}_a$ 이며 공기 중 산소의 질량분율(mass fraction)을 0.21로 가정하고 산소의 연소열 $\Delta H_{c, O_2} \approx 13,100 \text{ kJ/kg}$ 을 고려하면

$$\dot{Q}_{st} \approx 1500 A \sqrt{H} \quad (\text{식 7-83})$$

따라서 당량비는 발열량의 함수로 다음과 같이 계산된다.

$$\phi = \frac{\dot{Q}}{1500 A \sqrt{H}} \quad (\text{식 7-84})$$

만일 풀화재의 경우 화염과 액체연료면 사이의 복사열전달이 연소열에 중요한 역할을 하기 때문에 θ_1 은 다음과 같이 계산된다.

$$\theta_1 = 1.0 - 0.092(\ln \eta)^{1.25} \quad (\text{식 7-85})$$

$$\eta = \left(\frac{A \sqrt{H}}{A_f} \right) \frac{0.5 \Delta h_v}{r \sigma (T_g^4 - T_b^4)}$$

여기서 Δh_v 는 액체연료의 증발열 [kJ/kg], A_f 는 풀의 직경 [m^2], σ 는 Stefan-Boltzmann 상수 ($5.67 \times 10^{-11} \text{ kW/m}^2\text{K}^4$), T_b 는 액체연료의 증발온도[K] 를 타나낸다.

2) 정상상태의 열손실 θ_2 의 결정

화재공간 내부의 벽면적 A_T [m^2], 벽의 두께 L [m], 벽의 밀도 ρ_w [kg/m^3], 열전도율 k [kW/mK] 그리고 비열 C_p [kJ/kgK]에 대해 θ_2 는 다음과 같이



나타낸다.

$$\theta_2 = 1.0 - 0.94 \exp \left[-54 \left(\frac{A\sqrt{H}}{A_T} \right)^{2/3} \left(\frac{L}{k} \right)^{1/3} \right] \quad (\text{식 7-86})$$

[그림 3-100]에서 보는 것처럼 개구부의 크기가 클수록, L/k 가 클수록 정상상태에서의 열손실은 증가한다.

[그림 3-99] 정상상태 열손실의 영향

θ_2

$$\frac{A\sqrt{H}}{A_T}$$

$$t = 2.92 \times 10^{-6} (k\rho_w C_p) \left(\frac{A_T}{A_o \sqrt{H_o}} \right)^{1.5} \quad (\text{식 7-88})$$

4) 출입구 높이의 영향, θ_4

주어진 환기계수 $A\sqrt{H}$ 에 대해 출입구가 높고 좁은 경우와 낮고 넓은 경우를 고려해보면 출입구의 높이가 낮아지는 경우 동일한 환기량을 유지하기 위해서는 면적이 증가해야 한다. 따라서 복사열손실은 출입구의 면적에 비례하므로 높이가 낮은 출입구에서 출입구를 통한 복사열손실이 증가한다. θ_4 에 관한 식은 다음과 같이 나타낸다.

$$\theta_4 = 1.0 - 0.205 H^{-0.3} \quad (\text{식 7-89})$$

[그림 3-100] 정상상태 출입구 높이의 영향

-3

opening height [m]

5) 연소효율의 영향, θ_5

화재실 내부에서는 공기와 연료가 완전히 잘 섞이지 않고 불완전 연소가 진행되기 때문에 이러한 불완전 연소의 영향을 고려하기 위해 최대연소효율 η 를 고려한다.

$$\theta_5 = 1.0 - 0.5 \ln \eta \quad (\text{식 7-90})$$

대부분의 화재에서 연소효율은 약 0.5~0.9 사이 정도의 값을 가지는 것으로 보고되고 있다.

(예제 7-4) 식 7-69의 중립높이 h_l 에 관한 관계식을 유도하라

식 7-68에 유입질량유량과 유출 질량유량을 대입하면



$$\frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_a} = \frac{\frac{2}{3} C_d \rho_g W \sqrt{\frac{2g(\rho_a - \rho_g)}{\rho_g}} h_u^{3/2}}{\frac{2}{3} C_d \rho_a W \sqrt{\frac{2g(\rho_a - \rho_g)}{\rho_a}} h_l^{3/2}} = \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_a}} \left(\frac{h_u}{h_l} \right)^{3/2}$$

식 7-68은 다음과 같이 정리된다.

$$\sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_a}} \left(\frac{h_u}{h_l} \right)^{3/2} = 1 + \frac{\phi}{r}$$

개구부 높이는 $H = h_u + h_l$ 이므로 $h_u = H - h_l$ 을 대입하면

$$\left(\frac{H - h_l}{h_l} \right)^{3/2} = \left(1 + \frac{\phi}{r} \right) \sqrt{\frac{\rho_a}{\rho_g}}$$

$$\frac{H}{h_l} = 1 + \left[\left(1 + \frac{\phi}{r} \right) \sqrt{\frac{\rho_a}{\rho_g}} \right]^{2/3} = 1 + \left[\left(1 + \frac{\phi}{r} \right)^2 \frac{\rho_a}{\rho_g} \right]^{1/3}$$

$$\frac{h_l}{H} = \frac{1}{1 + \left[\left(1 + \frac{\phi}{r} \right)^2 \frac{\rho_a}{\rho_g} \right]^{1/3}}$$

■ 국내문헌

- 김성찬 외 (2009) *환기부족 구획화재의 열유동특성*, 설비공학 논문집, 제 21권 1호, pp. 41-48
- 김성찬 외 (2008) *환기조건에 따른 화재거동 연구*, 대한 기계학회 논문집 B권, 제 32권 5호, pp. 367-373
- 오규형 외 (2004) *플화재의 연소특성에 관한 연구*, 한국화재소방학회지, 제 18권, 3호, pp. 39-44
- 이의주 외 (2005) *이은도, 작은 플화재에서의 연기특성*, 한국화재소방학회지, 제 19권 3호, pp. 58-63.
- 이의주 (2006) *화재연구를 위한 대형 콘칼로리미터의 설계*, 한국화재소방학회지, 제 20권 4호, pp. 65-71.
- 김찬중 (2004) *열전달의 기초*, 문운당
- 김호영 (2000) *연소이론*, 대우학술총서
- 이동명 외 (2009) *성능위주 설계를 위한 화재열전달*, 동화기술

■ 국외문헌

- Alpert, R. L and Ward, E. J. (1984) *Evaluation of unsprinklered fire hazards*, Fire Safety Journal, Vol. 7, No. 2, pp.127-143
- V. Babrauskas and R. Peacock (1992) *Heat Release Rate: The Single Most Important Variable in Fire Hazard*, Fire Safety Journal, Vol. 18, pp. 255-272.
- Huggett, C. (1980) *Estimation of Rate of Heat Release by Means of Oxygen Consumption Measurements*, Fire and Materials, Vol. 4, pp. 61-65.
- Zukoski, E. E., Kubota, T. and Cetegen B. (1980) *Entrainment in Fire Plume*, Fire Safety Journal Vol. 3, pp. 107-121.
- Alpert, R. L. (1972) *Calculation of reponse time of ceiling mounted fire detector*, Fire Technology, Nol. 8, pp. 181-195.
- Kim, S. C and Bundy, M (2008) *Numerical model of large-scale oxygen consumption fire calorimeter*, Journal of thermal analysis and calorimetry, Vol. 93, No. 3, pp. 1013-1019.
- Andersson, B. (1988) *Moel scale comparison fire tests with wall lining materials*, Report LUTVDG/TVBB-3031, Lund University
- Kawagoe, K. (1958) *Fire Behavior in Rooms*, Report No. 27, BRI.
- Sqrqvist, S., (1993) *Initial Fires: RHR, Smoke Production and CO Generation from Single Item and Room Fire Tests*, ISRN LUTVDG/TVBB-3070, Lund University
- Tewarson, A. (1995) *Flammability*, Physical Properties of Polymers Handbook, Ed. Mark.
- McCaffrey, B. J. (1979) *Purely Buoyant Diffusion Flames: Some Experimental Results*, NBSIR 79-1910, NBS.
- Thomas, P. H. Hinkley, P. L. Theobald, C. R. and Simms, D. L. (1963), *Investigations in to the flow of hot gases in roof venting*, Fire Research Technical Report No. 7.
- You, H. Z and Faeth, G. M, (1981) *An investigation on fire impingement on a horizontal ceiling*, NBS-GCR-81-304, NBS
- Quintiere, J. (1997) *Principle of Fire Behavior*, Delmar Publisher.
- Drysdale, D. (1999) *Introduction to Fire Dynamics*, 2nd Edition, A Wiley-Interscience Publication
- Cox, G. (1995) *Combustion Fundamentals of Fire*, Academic Press.
- Karlsson, B. and Quintiere, J. (1999) *Enclosure Fire Dynamics*, CRC Press.



- Kuo, K. (1986) *Principles of Combustion*, Wiley-Interscience Publication.
- NFPA (2002) *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3rd Edition, NFPA.
- Harper, C. (2003) *Handbook of Building Materials for Fire Protection*, McGraw-Hill.
- Babrauskas, V. (2003) *Ignition Handbook: Principles and Applications to Fire Safety Engineering, Fire Investigation, Risk Management and Forensic Science*, Fire Science Publisher
- NFPA (2008) *NFPA National Fire Protection Handbook*, NFPA
- Friedman, R. (2008) *Principles of Fire Protection Chemistry and Physics*, Jones and Barlett Publishers.
- Shields, T. J and Silcock, G. W. H. (1987) *Building and Fire*, Longman Scientific and Technical.
- Turns R. S (1996) *An Introduction to Combustion – Concept and Applications*, McGraw-Hill.
- ASTM E 2058 (2009) Standard Test Methods for Measurement of Synthetic Polymer Material Flammability Using a Fire Propagation Apparatus, ASTM
-



화재조사실무 I



제4편 발화개소판정

「연소강약·방향」과 『화재패턴』의 조사에
기초한

제1장 연소강약 및 연소방향의 판정

제2장 건물구조재별 연소강약 및 연소방향의
파악

제2장 화재패턴 등에 의한 발화개소의 판정

1

연소강약 및 연소방향의 판정

화재원인조사는 진화된 후에 소손된 건물 등의 「소손상황」을 조사하고, 관계자로부터 청취한 건물 구조 등에 관한 「정보」 등을 종합하여 화재현장 전체의 불이 번져 나간 경로를 고찰하여 [그림 4-1]과 같이 「발화건물 ⇨ 발화층, 발화실 ⇨ 발화범위한정(발굴·복원 전) ⇨ 발화개소(발굴·복원 후) ⇨ 발화원 ⇨ 발화원인」 등을 규명하는 업무이다.

[그림 4-1] 화재원인 판정 절차¹⁾



1) 화원(火源)이란 그 자체가 발화에 관계하거나 발화할 가능성이 있는 것을 말한다.
 발화원이란 화원(火源)중에서 발화에 직접 관계 하거나 그 자체에서 발화한 것을 말한다.
 발화개소란 화재가 시작된 개소, 즉 불이 발생한 개소를 말한다.
 발화란 발화원과 가연물이 결부되어서 발염착화(發炎着火)를 시작하는 것을 말한다.
 발화범위란 화재현장 조사결과에 기초하여 발굴·복원을 하기 위해서 한정된 범위를 말한다.



연소강약 및 연소방향의 판정

- 학습 목표**
- 01 화재원인 조사의 개념과 발화원인 판정 절차 순서를 설명할 수 있다.
 - 02 연소 강약 개념을 이해할 수 있다.
 - 03 연소강약으로 연소방향을 판정할 수 있다.

「발화개소」는 「소손상황」 조사를 통해 판단하며, 「소손상황」은 「연소강약」과 「연소방향」의 조사를 통해 파악한다.

건물별·방별(室別) 조사결과로부터 화재현장 전체의 「연소강약」을 판정하고, 이어서 「연소강약」을 비교하여 어디에서 발화하여 번져갔는지, 즉 「연소방향(燃燒方向, 불이 번져간 방향)」을 판정한다.

「연소강약」은 여러 가지 조건에 따라 좌우되는데, 최종적으로는 연소 시간, 온도, 에너지, 가연물의 양 등과 관련되어 결정된다. 고체는 열을 받아 각각 특유의 상태로 변화해 가는데, 변화 과정에서 소화시점도 「연소강약」에 영향을 미친다.

「연소강약」은 모두 비교에 기초하여 결정한다. 비교하는 대상은 재질, 형상, 상태 등이 거의 같은 조건이어야 한다.

또한 「연소강약」은 비교하는 복수의 동종 부재간(部材間, 예를 들면 기둥과 기둥)에 나타나는 경우도 있고, 판자의 표면과 안쪽 면이나 기둥 4면에 나타나는 경우도 있다. 그러므로 소손상황의 조사는 한 방향뿐만 아니라 여러 방면에서 하여야 한다.

「연소강약」의 판정을 근거로 화재현장 전체에 있어서 불의 번져간 경로를 파악한 것이 「연소방향」 판정이다. 이 방향을 치밀하게 확인하여 「연소하다 꺼지거나 멈춘」 부분에서 소손정도가 강한 방향으로 순차적으로 찾아가서 「발화개소」를 판정한다.

예를 들면 건물 각실(各室)의 「연소강약」이 [그림 4-2]에 나타난 화살표(↔)와 같다면, 건물 전체의 「연소방향」으로부터 「방1」을 발화개소(발화한 방)로 판정할 수 있다. 이와 같이 「소손상황의 조사」는 「연소강약」을 기초로 건물 전체의 「연소방향」을 파악하여 귀납적으로 발화개소([그림 4-2] 예시의 경우에는 방) 등을 판정하기 위해서 한다.

그러나 국부적으로 이 방향과 모순된 부분이 있거나 발화개소에 가까운 쪽의 소손정도가

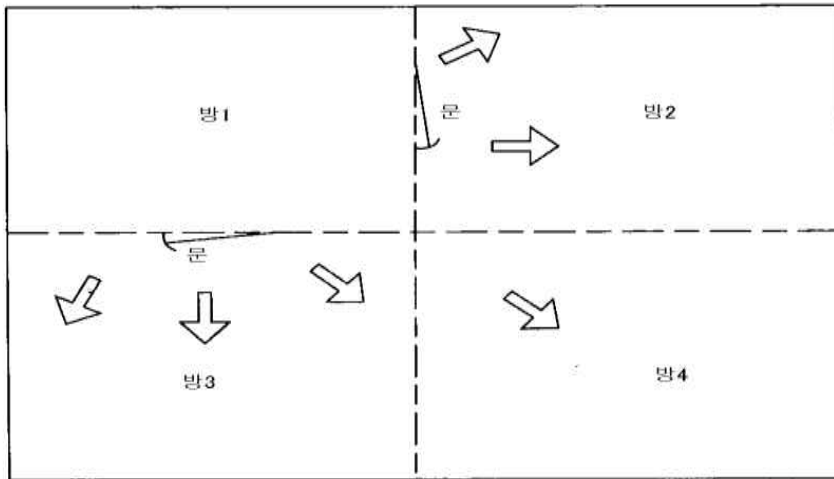
1

연소강약 및 연소방향의 판정

약한 경우도 있으므로 「연소방향」은 아래와 같은 각종 조건을 고려하여 판정한다.

- ① 1국면에 집착하지 말고 전체적으로 연소하여 번져간 방향을 파악한다.
건물구조 등에 따라서는 발화개소에서 떨어진 부분이 국부적으로 강한 소손을 나타내는 경우가 있다.
- ② 연소조건에 의한 판정
 - 창문 등 개구부에 가까운 개소는 연소공기의 공급량이 많으므로 강한 소손을 나타내기 쉽다.
 - 휘발유 등 위험물이나 다량의 가연물이 있으면 발화개소에서 떨어져 있어도 그 개소는 강한 소손이 되기 쉽다.
 - 소방대 소화수의 방수개시가 늦은 부분은 연소시간이 길어지므로 강한 소손을 나타낸다.

[그림 4-2] 연소강약, 연소방향으로부터 발화개소(방)를 판정하는 예



- 화살표 방향(⇨)이 소손정도가 약한 방향이다.



[그림 4-3] 연소방향이 명확한 방



○ 이 방은 벽의 소손상황을 볼 때 좌측 방에서 연소되어왔음을 알 수 있음

[그림 4-4] 연소 방향이 명확한 반자



○ 반자의 탄화상태 등을 볼 때 안쪽에서 앞쪽으로 연소되어왔음을 알 수 있음

1

[그림 4-5] 연소 방향이 명확한 복도

연소강약
및
연소방향의
판정



- 복도는 천장의 탄화상태를 볼 때 안쪽에서 앞쪽으로 연소되어왔음을 알 수 있음
- 이와 같이 「연소방향」 을 파악하여 발화한 실(室) 등을 압축해 간다.



chapter 1 핵심 요약

- 화재원인조사는
발화층, 발화실 ⇨ 발화범위한정 ⇨ 발굴 ⇨ 발화원 ⇨ 발화원인결정 순으로 이루어진다.
- 연소강약으로 연소방향을 판정한다,
- 연소방향 판정은 전체적으로 파악하되, 다음사항을 고려하여 종합적으로 판단한다
 - 건축물 등의 개구부 위치 등
 - 인화성 물질의 존재 여부
 - 소방대의 진화 가 빠른 부분과 늦은 부분 등

chapter 1 학습가이드

화재조사 및 보고규정 (소방청 훈령)

제2조(용어의 정의)

- “발화”란 열원에 의하여 가연물질에 지속적으로 불이 붙는 현상을 말한다.
- “발화열원”이란 발화의 최초원인이 된 불꽃 또는 열을 말한다.
- “발화지점”이란 화재가 발생한 부위를 말한다.
- “발화장소”란 화재가 발생한 장소를 말한다.

제30조(화재의 소실정도) ① 건축·구조물화재의 소실정도는 3종류로 구분하며 그 내용은 다음의 각 호에 따른다.

- 01 전소 : 건물의 70%이상(입체면적에 대한 비율을 말한다. 이하 같다)이 소실되었거나 또는 그 미만이라도 잔존부분을 보수하여도 재사용이 불가능한 것
- 02 반소 : 건물의 30% 이상 70% 미만이 소실된 것
- 03 부분소 : 전소, 반소 화재에 해당되지 아니하는 것

2

건물구조재별 연소강약 및 연소방향의 파악

건물
구조재별
연소강약
및
연소방향의
파악

- 학습 목표**
- 01 목재, 금속, 콘크리트, 유리 등 재질에 따른 연소특성을 이해 할 수 있다.
 - 02 재질 별 연소 특성으로 연소방향을 알 수 있다.
 - 03 단락흔과 열흔을 구별하고, 도괴방향의 원리를 설명 할 수 있다.

「연소강약」의 고찰 전제는 「발화개소에 가까울수록 화염의 영향을 오래 받는다. 즉, 발화개소에 가까울수록 열의 영향을 깊게 남긴다」는 것이다.

또한 「연소방향」이란 [그림 4-2]와 같이 국면별로 나타난 「연소강약」을 통해 판단되는 화재현장 전체적으로 불이 번져나간 방향을 말한다.

아래에서는 목재, 금속재, 콘크리트, 유리, 합성수지, 도료, 내화보드 등 건물 구조재 소재별 「연소강약」과 「연소방향」에 대하여 구체적으로 설명한다.

1. 목재류

가. 연소강약

많은 가구류는 목재로 되어 있으며, 내화구조 건물 내부에도 목재를 많이 사용하고 있다. 목재류는 「소손상황」을 파악하는데 가장 기본적인 대상물이다.

목재는 열을 서서히 가해 가면 온도상승에 따라 [표 4-1]과 같이 상태·형상이 변화한다.



[표 4-1] 목재의 수열(受熱)에 의한 상태·형상 변화

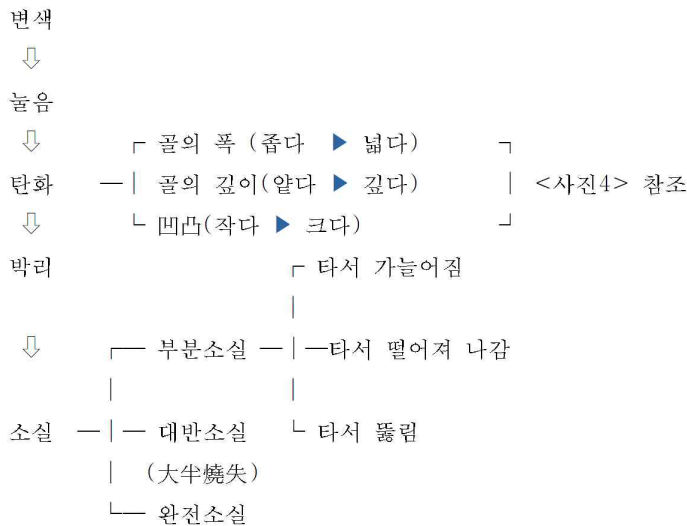
온도(℃)	상태·형상
100미만	세포의 틈새에 들어 있는 수분이 서서히 증발하여 건조된다.
100	100℃인 채로 수분 증발이 계속된다.
160	○ 분해가스가 갈색이 되며, 휘발성의 에스테르가 나오기 시작한다. (늪은 판자나 마디 등은 화원(火源)이 있으면 착화되는 상태) ○ 목재의 표면이 갈색으로 늙는다.
220	표면이 흑갈색이 되며 거스러미 등은 조그만 불씨에도 착화된다.
260	○ 급격하게 분해되며 다량의 가스가 발생한다. ○ 다른 화원(火源)이 있으면 확실하게 착화된다. (목재의 인화온도)
300~350	탄화가 완료된다.
420~470	다른 화원(火源)이 없어도 타기 시작한다. (목재의 발화온도)

목재는 타기 시작한 후에는 표면에서 중심을 향해 탄화가 진행하며, 탄화모양과 형상이 다음과 같이 변화해 간다.

- 표면은凹凸이 많고 거칠어진다.
- 탄화된 골은 폭이 넓고 또한 깊어진다.
- 표면이 박리와 회화(灰化)²⁾를 반복한다.
- 즉, 연소가 계속되면서 타서 가늘게 되고 박리되어 소실되어 간다.

목재의 연소경과에 수반되는 상태·형상의 변화를 도식화하면 [그림 4-6]과 같다.

[그림 4-6] 목재의 연소경과에 수반되는 형상변화



2) 회화(灰化) : 물질을 완전히 태워서 재가 되는 것.

위와 같이 목재는 화재열의 영향을 외관에 남긴다.

화재조사 현장에서는 건물에 남아 있는 이러한 흔적으로부터 「연소방향」을 파악한다.

◆ 탄화

탄화된 모양을 「탄화모양」이라고 하며, 목재표면의 탄화모양은 「물고기 비늘」이나 「거북 등껍질」과 같은 모양을 하고 있으므로 「비늘모양 탄화」나 「귀갑모양(龜甲模樣) 탄화」라고도 한다.

이 「탄화모양」이 나타내는 골의 깊이 등은 「연소강약」을 판단하는 하나의 기준이 된다. 「연소강약」은 [그림 4-6]과 같이 골의 깊이 등으로부터 알 수 있다. 예를 들면 [그림 4-7]에서는 위쪽일수록 골이 깊으므로 위쪽의 소손이 강하다.

[그림 4-7] 탄화정도의 예시 - 기둥의 「소손」은 「탄화모양」을 볼 때 위쪽일수록 강하다.



◆ 박리

탄화되어 벗겨져 나가는 것을 「박리」라고 하며, 연소가 강할수록 박리부분이 깊고, 크며, 많아진다. 한편, 이 박리는 소화 시 방수압으로도 생기며, 양자는 [표 4-2]와 같이 식별할 수 있다([그림 4-8], [그림 4-9] 참조).



[표 4-2] 「연소열」 과 「소화수」 에 의한 탄화물 박리상태의 차이점

항목 \ 차이	연소박리(燃燒剝離)	소화수박리(消火水剝離)
박리면적	소	대
표면의 거칠기	대	소
박리의 분포	산재	집중적
박리면	거칠다	평탄하며 윤기가 난다

注) 소방활동을 하는 대원에 의한 「접촉박리」 도 고려한다.

[그림 4-8] 연소박리



[그림 4-9] 소화수박리



2

◆ 소실

- 부분소실1 : 타서 가늘어짐

판재, 각재의 면이나 각의 일부가 부분적으로 타서 가늘어지는 것으로 가늘수록 「소손정도」가 강하다([그림 4-10] 참조). 타서 가늘어지기 전의 굵기 등 상태를 판단할 수 있으므로 같은 재료와의 비교가 용이하다.

[그림 4-10] 타서 가늘어짐



[그림 4-11] 천장 반자돌림이 타서 떨어져 나감

「타서 떨어져 나감」 부분은 다른 부분보다 「소손정도」가 강하다.





●부분소실2 : 타서 떨어져 나감

목재는 서서히 타서 가늘어지고 결국에는 타서 떨어져 나간다([그림 4-11] 참조). 타다 남아 있는 상태를 통해서 「연소강약」을 알 수 있다.

●부분소실3 : 타서 뚫림

타서 뚫림이란 천장판자나 바닥판이 부분적으로 소실된 상태를 말한다. 타서 뚫린 면적의 차이가 연소강약을 나타낸다([그림 4-12] 참조). 그러나 물리적인 외력(천장재의 낙하 등)으로 면적이 확대되거나 발화개소가 아닌 부분도 2차적으로 타서 뚫리거나 하는 경우가 있으므로 주의가 필요하다. 그리고 소방대원 등에 의한 바닥판의 「밟힘에 의한 뚫림」과 혼동하지 않도록 한다. 밟힘에 의한 뚫림은 파손된 면에 나무의 맨살이 남으므로 판별할 수 있다.

[그림 4-12] 마루판자의 타서 뚫린 예



●대반소실

대반소실(大半燒失)이란 건물 구조재 등의 대부분이 소실된 상태를 말한다. 소실범위가 많은 쪽이 소손정도가 강하다([그림 4-13] 참조).

[그림 4-13] 천장판자의 소실



- 안쪽의 천장판자가 소실되어 있음
- 「소손정도」는 안쪽이 강함

● 완전소실

완전소실이란 건물구조재의 일부 천장재 등이 완전히 소실된 상태를 말한다([그림 4-14], [그림 4-15] 참조).

이들 구조재가 타서 없어졌는가? 처음부터 없었는가? 에 따라 「연소강약」 판단은 크게 다르다.

구조재 유무를 판단하는 포인트는 다음과 같다.

- 잔존하는 못 등을 통해 화재 시 존재했는지를 판단한다.
- 사이기둥 등은 소실되어도 함석벽이나 콘크리트벽에 검은 변색을 남긴다.

[그림 4-14] 천장재



- 천장재가 거의 소실되어 있음.
- 그러나 콘크리트표면에 천장재의 흔적이 검게 부착되어 있음.

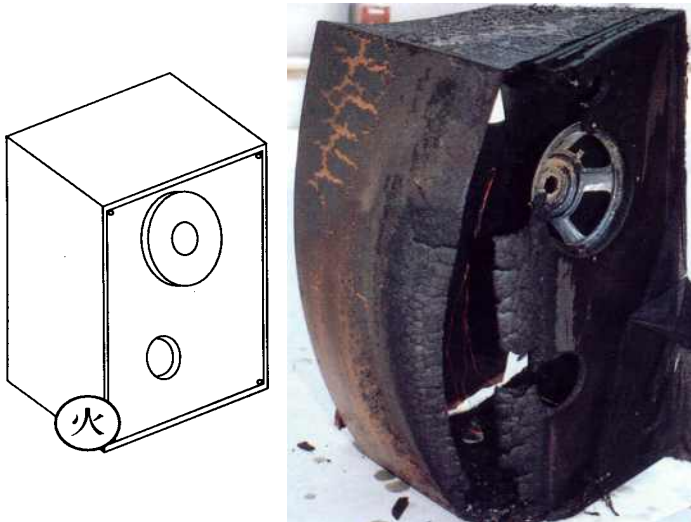


[그림 4-15] 천장반자



- 천장반자가 전부 소실되어 있음.
- 곳곳에 남은 나무의 맨살 등으로 천장반자가 있었음을 알 수 있음.

[그림 4-16] 스피커(열을 받은 방향으로 허물어짐)



가구 등 목제품은 어떤 일정방향에서 열을 받으면 소실되지 않는 한 「연소방향」 이 나타나므로 「발화개소」 를 판정하는데 유효하다.

2

나. 연소방향

「연소강약」을 기본으로 사진을 이용하여 「연소방향」을 파악하는 방법을 설명한다.

[그림 4-17] 의자가 연소방향(우→좌)을 나타내고 있는 예



[그림 4-18] 탁자와 의자가 연소방향을 나타내고 있는 예



- 탁자 아래의 각재는 탄화모양의 크기로부터 연소방향이 「우→좌」인 것으로 판단됨.
- 의자도 타서 넘어져 있는 상황을 통해 마찬가지로 연소방향이 「우→좌」인 것으로 판단됨.

건물
구조재별
연소강약
및
연소방향의
파악



[그림 4-19] 탁자가 연소방향을 나타내고 있는 예



○ 좌측이 소실·탈락되어 있어 연소방향은 『좌→우』임.

[그림 4-20] 침대가 연소방향을 나타내고 있는 예



○ 침대 좌측 앞이 타서 떨어져 탈락되어 있음. 이 방향에서부터 타 나아갔음.

2

[그림 4-21] 지붕이 연소방향을 나타내고 있는 예

건물
구조재별
연소강약
및
연소방향의
과약



- 지붕을 앞쪽과 안쪽에서 비교한다.
- 지붕 등의 잔존상황을 보면 연소방향은 「안쪽→앞쪽」으로 판단됨.

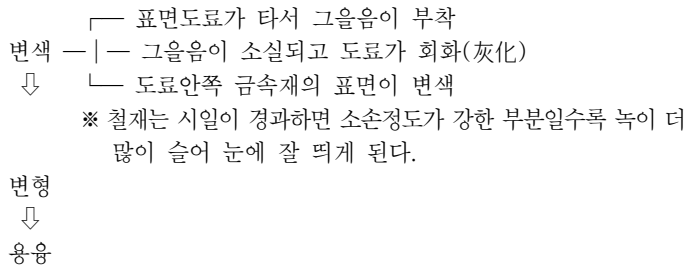
2. 금속류

가. 연소강약

금속류도 목재와 마찬가지로 화재로 받은 열의 영향을 남긴다. 수열(受熱)영향은 「외관」과 「금속조직」에 나타난다. 여기서는 「외관」 변화에 대해서만 언급한다.

철문이나 사물함 등에 사용되는 금속의 표면은 방청을 위해 보통 도료로 코팅되어 있다. 금속 외관의 수열영향은 대략 [그림 4-22]와 같이 나타난다.

[그림 4-22] 금속의 열영향에 따른 형상변화





◆ 변색

금속의 변색에 기초한 「연소강약」은 [표 4-3]과 같다.

[표 4-3] 각종 금속의 열에 의한 색변화(템퍼 칼라)

가열온도(℃)	스테인레스강(SUS304)	냉연강판
300	아주 조금 엷은 갈색	엷은 황갈색
400	조금 엷은 갈색	조금 진한 황갈색
500	엷은 적자색(赤紫色)	엷은 자색
600	적자색	암자색
700	진한 적자색	회색에 가까운 암자색
800	자색	흑자색
900	암청색(暗靑色)	회색(산화철색)
1,000	회색(酸化鐵色)	회색(산화철색)

이 열에 의한 색상변화를 활용하여 「연소강약」을 판단하여 현장에서 남은 금속류의 「연소방향」을 판단할 수 있다.

◆ 만곡

연소열을 받은 금속은 용융하기 전에 자체 중량 등으로 인해 「좌굴(座屈)」³⁾한다. 화재현장에서는 「만곡」이라는 형상으로 남아 있다.

일반적으로 금속의 만곡 정도가 수열 정도와 비례한다고 보아도 좋다. 그러나 좌굴은 수용물 중량, 화재하중에 좌우되므로 신중하게 검토할 필요가 있다.

◆ 용융

[표 4-4]와 같이 금속에 따라 용융온도 등이 다르므로 화재현장에서 용융금속의 종류를 파악할 수 있으면 그 개소의 대략적인 온도를 알 수 있다. 또한 같은 재질이면 용융이 많은 쪽이 보다 많은 열을 받은 것이므로 용융상태를 파악함으로써 「연소방향」을 판단할 수 있다.

3) 좌굴 : 축(軸) 방향에 압력을 받는 기둥이나 판이 어떤 한계를 넘으면 휘어지는 현상

2

건물
구조재별
연소강약
및
연소방향의
파악

[표 4-4] 각종 금속의 용융온도

금속명	비중	용융점(℃)	금속명	비중	용융점(℃)
아연	7.14	419.5	텅스텐	19.3	3,400
알루미늄	2.70	659.5	티탄	4.8	1,800
금	19.7	1,063.0	철	7.86	1,530
은	10.5	960.5	동	8.92	1,083
황동	8.21~8.83	900~1,050	납	11.4	327.4
스테인레스	7.6	1,520	니켈	8.90	1,455
수은	13.6	38.8	마그네슘	1.75	650
주석	7.31	231.9	몰리브덴	10.2	2,620

나. 연소방향

「연소강약」을 기본으로 사진을 이용하여 「연소방향」을 파악하는 방법을 설명한다.

용융1 [그림 4-23] 금속기둥



- 기둥A, B, C의 용융상태로부터 연소방향은 「우→좌」인 것으로 판단된다.
- 기둥A : 전부잔존, 기둥B : 화살표에서부터 상부가 용융, 기둥C : 화살표에서부터 상부가 용융.

용융2 [그림 4-24] 알루미늄 방범창살





○ 용융 상태에서부터 연소방향은 「좌→우」 인 것으로 판단됨.

변색1 [그림 4-25] 냉장고



○ 변색라인은 「右下→左上」 뻗고 있으며, 상부측이 변색이 강하다

○ 냉장고 측판의 연소방향은 「우→좌」 인 것으로 판단된다.

변색2 [그림 4-26] 냉장고 앞면과 측판



- 변색라인은 「右下→左上」 뺨고 있으며, 전면측이 변색이 강하다.
- 냉장고 의 연소방향은 「우→좌」 인 것으로 판단된다.

건물
구조재별
연소강약
및
연소방향의
과악

변색3 [그림 4-27] 드럼통



- 「우하→좌상」 변색라인이 보인다.
- 연소방향은 「우측 안쪽→좌측 앞쪽」 인 것으로 판단된다.

변색4 [그림 4-28] 드럼통





- 「앞→안쪽」 변색라인이 보인다.

변색5 [그림 4-29] 기름탱크 (연소방향은 앞⇒안쪽)



변색6 [그림 4-30] 스텐레스판



(튀김냄비로부터의 화염상승을 나타내고 있음)

건물
구조재별
연소강약
및
연소방향의
파악



○ 연소방향은 「중간→좌우측」 으로 판단된다.



변색8 [그림 4-32] 가스렌지 화구 (발화부위는 백색으로 변한 부분)



변색9 [그림 4-33] 대구지하철방화참사 현장 전동차와 덕트



건물
구조재별
연소강약
및
연소방향의
파악



- 가스렌지를 켜놓고 방치하여 화재가 발생한 예로 위쪽 가스렌지의 경우, 좌측은 변색되어 있는데, 이는 좌측 화구에 불을 켜놓고 방치한 결과임.
- 아래쪽은 우측 화구에 불을 켜놓아 화재로 변색된 것으로 스테인리스 판에 우측에서 좌측으로 변색라인이 나타나 있음.

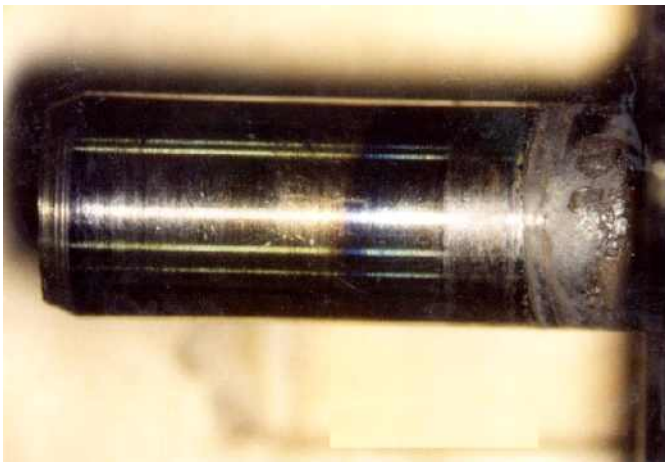


변색11 [그림 4-35] 패널



- 의자와 샌드위치패널 사이에 플라스틱 쓰레기통을 놓아두고 그 쓰레기통에 담배꽂초를 버려 발생한 화재현장에서 촬영한 사진으로, 스티로폼이 들어있는 샌드위치패널이 적색으로 변색되어 있음.

변색12 [그림 4-36] 선풍기 모터 축의 변색 상황



- 부식되지 않는 스테인레스강과 같은 부품은 과열 시 보라색으로 변색됨.

변색13 [그림 4-37] 전기관련 기기

건물
구조재별
연소강약
및
연소방향의
과약



- 위 사진의 좌측은 같은 화재현장에서 발견된 형광등 안정기의 코일을 촬영한 사진으로, 검게 변색된 코일은 단지 열을 받은 것이고, 우측의 적색으로 변색된 코일이 화재가 발생한 형광등의 것임.
- 아래 사진은 차단기 인입측 전선을 차단기의 나사로 고정하는 부분에서 접촉불량으로 화재가 발생한 사례를 촬영한 것으로, 철판이 심하게 부식되어 있음을 볼 수 있음.



탄성1 [그림 4-38] 침대매트의 스프링



- 탄성의 정도로부터 연소방향은 「우측 앞쪽→좌측 안쪽」 인 것으로 판단된다.
- 우측은 탄성이 없어져 있다.

탄성2 [그림 4-39] 소파의 스프링



- 스프링의 탄성과 소파의 소손상황을 볼 때 연소방향은 「우→ 좌」 이다.

용융 [그림 4-40] 알루미늄 냄비의 용융 상황

건물
구조재별
연소강약
및
연소방향의
파악



- 알루미늄은 용점이 590℃이며, 900℃ 정도에서는 연소하므로 많은 화재현장에서 알루미늄은 용융되어 있거나 연소되어 일부가 없어진 상태로 발견되고 있음.



3. 콘크리트·몰탈·타일류

몰탈, 타일류 등 불연성 물질은 콘크리트와 유사한 소손상황을 나타내므로, 콘크리트를 중심으로 설명한다.

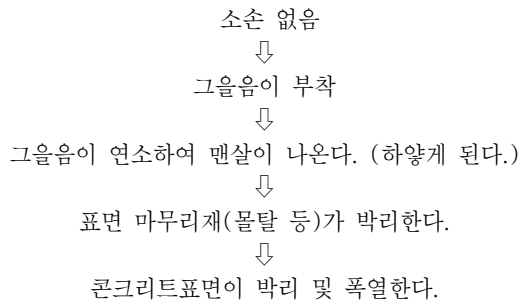
가. 연소강약

콘크리트도 목재 등과 마찬가지로 수열(受熱)의 영향에 따른 형상변화를 남긴다. 수열 영향은 「외관」 과 「물성변화」 로 나타난다. 여기에서는 외관 변화에 대해서만 언급한다. 콘크리트의 수열정도에 의한 외관관찰 결과는 [표 4-5]와 같으며, 콘크리트가 소손되면 외관은 대략 [그림 4-41]와 같이 변화한다.

[표 4-5] 콘크리트의 수열정도에 따른 외관관찰 결과

온도(℃)	금이 간 곳의 개수(개/10mm ²)	금이 간 폭(mm)	외관
450	25-27	0.03	회색 그을음
650	16-19	0.05	검은 그을음
850	10-12	0.10	그을음 없음

[그림 4-41] 콘크리트의 수열정도에 따른 형상변화



[그림 4-42] 천장슬래브가 금이 가 있음. - 화재열로 아주 작은 금이 발생해 있음.



건물
구조재별
연소강약
및
연소방향의
파악

나. 연소방향

「연소강약」을 기본으로 사진을 이용하여 「연소방향」을 파악하는 방법을 설명한다.

외관관찰 [그림 4-43] 폭열(爆裂)1



- 건물 벽의 폭열된 모습.
- 상당한 열에 노출되었음을 나타냄.



외관관찰 [그림 4-44] 폭열2



○ 대구지하철방화화재참사현장 - 중앙로역 선로 위 천장의 폭열 모습.

2

외관관찰 [그림 4-45] 폭열3 - 소파가 놓여 있던 곳의 벽 폭열 모습.

건물
구조재별
연소강약
및
연소방향의
파악



외관관찰 [그림 4-46] 폭열4 - 구리 지하전력구의 천장 폭열 모습.





외관관찰 [그림 4-47] 폭열5 송파 노래방화재로 고시원으로 올라가는 계단벽면의 폭열된 모습.



외관관찰 [그림 4-48] 변색1



- 외벽콘크리트의 변색상황
- 화염이 분출한 부분은 그을음이 소실되어 하얗게 되어 있다.
- 콘크리트의 경우, 표면이 시커멓게 된 부분보다도 하얗게 된 부분이 소손 정도가 강하다.

외관관찰 [그림 4-49] 변색2(천장) 하얗게 변색된 좌측에서 타왔음을 알 수 있음.



외관관찰 [그림 4-50] 박리의 상태



- 시멘트 본드 등으로 콘크리트 등의 표면에 시공된 타일은 열 영향으로 박리된다.
- 박리면적으로 열영향의 크기를 추정하는 것도 한 방법이다.



4. 유리

가. 연소강약

유리도 목재 등과 마찬가지로 화재로 받은 열의 정도를 남긴다. 수열의 영향은 [표 4-6]과 같이 나타난다.

[표 4-6] 유리의 수열영향에 의한 형태

수열영향 형태	내 용
낙하방향 표면의 조개껍질모양 박리 금이 가는 상태 용융상태	유리는 수열 측 보다 많이 낙하한다. 조개껍질모양 박리는 고온일수록 많고 깊다. 유리는 수열정도가 클수록 작게 금이 간다. 수열정도가 클수록 용융범위가 많아진다.

화재열을 받은 유리는 점성변화를 나타내어 방수에 의한 급격한 냉각으로 열수축을 일으켜서 「미세한 금」이 가게 하거나 「유리표면의 박리」를 일으킨다.

이 상태를 상세히 관찰하면 유리의 수열영향의 정도를 판단할 수 있다. [표 4-7]은 열영향(실험결과)에 의한 유리의 상태를 나타낸다.

[표 4-7] 열영향에 의한 유리의 상태

유리의 상태		대략적인 온도 (°C)
조개껍질모양 박리	박리가 적고 얇음	150전후
	박리가 많고 깊음	250이상
금이 감	직경 1cm 이상의 금이 감	400
	직경 1cm 미만의 금이 감	600
용융	자체중량으로 변형되며 일부가 용착됨	800
	깨진 모서리면이 용융하여 둥글게 됨	1,000
	용융하여 덩어리모양이 됨	1,600

나. 연소방향

「연소강약」을 기본으로 사진을 이용하여 「연소방향」을 파악하는 방법에 대해 설명한다. 그리고 유리는 수열방향을 나타내는 1면이 있음과 동시에 유리 바닥면 사이 소손물건의 유무나 종류에 따라 연소(延燒) 과정을 나타내는 경우도 있다. 유리와 바닥 면의 사이에 천장재 등이 낙하되어 있으면 이는 천장이 탄 후에 유리가 깨진 것을 의미하고 있으며, 전혀 아무 것도 없으면 내벽이나 천장 등이 소실되기 쉬운 베니어판과 같은 것보다도 유리가 빨리 깨진 것을 의미하고 있다. 후자인 경우 유리는 발화개소에 아주 가까운 위치에 있었음을 알 수 있다.

유리는 이와 같이 발화원인을 규명하는데 중요한 단서를 남기고 있는데, 신중하게 발굴 작업을 하지 않으면 이러한 상태를 파괴해버리므로 주의를 요한다.

건물
구조재별
연소강약
및
연소방향의
과약

낙하방향 [그림 4-51] 낙하한 유리



- 실내 측에 모여 유리가 낙하되어 있다.
- 연소방향은 「실내에서 실외」로 판단된다.

열영향1 [그림 4-52] 발화건물 인접동 유리창





- 좌측이 작게 금이 가 있음.
- 연소방향은 「좌→우」 인 것으로 판단됨.

열영향2 [그림 4-53] 그림 4-52와 같은 건물의 유리창



- 금이 간 상태에서부터 연소방향은 「우→좌」 로 판단됨.

열영향3 [그림 4-54] 가구의 유리 (연소방향은「우→좌」)



2

건물
구조재별
연소강약
및
연소방향의
파악



열영향4 [그림 4-55] 열로 깨진 유리창





- 충격에 의해 발생한 금과는 달리 불규칙적인 곡선으로 금이 생기며 금의 가장자리에는 조개껍질 모양이 나타나지 않고, 아주 매끄러운 곡선형태를 하고 있음.

[그림 4-56] 망입유리의 열에 의한 파손



- 망입유리는 충격을 가하여도 쉽게 깨지지 않지만 충격을 받은 부위는 작게 금이 가게 됨. 이 사진의 경우에는 광범위하게 작은 금이 간 것으로 보아 화재 열로 생긴 것으로 판단할 수 있음.

[그림 4-57] 뜨거운 상태에서 방수하여 깨진 유리창



- 유리가 가열되어 있는 상태에서 물을 뿌리면 작은 구멍이 생기거나 유리가 잘게 부서지는 특성이 있음. 사진과 같이 작은 구멍이 생기고 유리가 잘게 부서져 있고 충격을 가한 것처럼 방사상으로 깨진 모습이면 화재로 유리가 가열된 상태에서 소방대 등이 압력수를 뿌려서 나타난 현상이라고 판단할 수 있을 것임.

[그림 4-58] 충격에 의한 유리 파손



[그림 4-59] 유리창에 그을음이 붙은 상태에서 소방대가 바깥쪽에서 도끼로 유리창을 깬 예





[그림 4-60] 가스통을 옮겨 밸브를 열고 라이터를 켜서 폭발한 현장과 유리



- 폭발 압력파에 의해 유리가 파손된 경우에는 위 사진과 같이 기다란 파편모양을 하고 있음. 이 파편의 한쪽 면에 두꺼운 그을음이 있다면 폭발 전에 화재로 그을음이 붙었음을 나타내고, 그 그을음이 매우 희미하다면 화재 초기에 폭발이 있었음을 나타내며, 만일 기다란 파편에 그을음이 전혀 없는 경우에는 폭발 후에 화재가 발생했음을 나타냄.

2

[그림 4-61] 폭발 압력파(폭굉파)으로 깨진 유리창

건물
구조재별
연소강약
및
연소방향의
파악





[그림 4-62] 전구의 수열에 의한 변형1 (연소방향은 좌→우)



- 전구 등과 같이 일상에서 이용되는 유리제품은 불길의 이동한 방향을 알아내는데 도움이 될 수 있다. 가열된 유리 표면을 팽창시키면서 열원 쪽으로 휘거나 볼록해진다. 유리가 약 750°C에서 녹을 때에 접한 면이 우선적으로 녹게 되고 그것이 분자간의 응력을 잃을 때 그 방향으로 늘어지거나 흐르려고 하게 된다. 이는 전구가 가열될 때 팽창하는 내부 가스가 진행되는 불꽃 내에 있는 말랑말랑해진 전구의 첫 번째 지역을 부풀게 하는 과압을 만들어 낸다. 이러한 “blowout”은 다가오는 불꽃과 접한 면이 보통 먼저 말랑말랑 해지기 때문에 불길이 다가오는 방향을 가리킨다.

[그림 4-63] 전구의 수열에 의한 변형2



2

[그림 4-64] 전구의 수열에 의한 변형3



건물
구조재별
연소강약
및
연소방향의
파악

[그림 4-65] 강화유리 출입문이 열린 상태에서 화재로 깨져 있는 상황





○ 유리가 깨져 낙하되어 있는 위치와 아래 부분의 위치를 통해 화재 전의 위치를 파악할 수 있음.

5. 합성수지류

합성수지류는 일단 연소가 시작되면 외부로부터의 열 공급이 없어도 스스로 화염에 의해 열이 보급되므로 연소가 계속된다. 그러나 이 중 일부는 스스로의 화염으로부터의 열전도량이 불충분하므로 충분히 열분해를 일으키지 않아 열원을 제거하면 연소가 정지하는 것이 있다.

가. 연소강약

합성수지류도 목재와 마찬가지로 화재열의 영향을 남긴다. 그 외관은 대략 다음과 같이 된다.

변색 ⇨ 변형(연화-軟化) ⇨ 용융 ⇨ 소실

1) 변형(연화-軟化)

수열에 의해 먼저 연화되기 시작하면 하중이 있으면 급속히 그 형태가 붕괴되든지 뚫려 떨어진다. 연소강약은 자체 중량에 의한 변형정도로 비교되며, 주요 합성수지류의 연화점 및 용점은 [표 4-8]과 같다.

[표 4-8] 고분자재료의 용점 등

재료명	연화점(℃)	용점(℃)	열변형온도(℃)
폴리에틸렌	123	220	41~83
폴리프로필렌	157	214	85~110
염화비닐수지	219	-	55~75
나일론6	209	228	55~58
폴리우레탄	121	155	-
폴리카보네이트	213	305	132
ABS수지	202	313	-
불포화폴리에스테르	327	-	60~200
에폭시수지	298	-	-

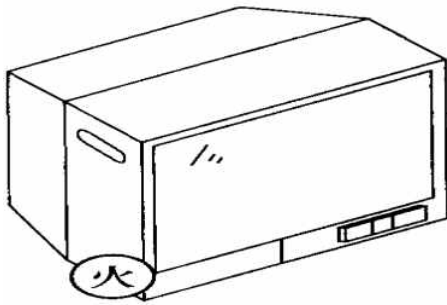
2) 용융

연화되는 합성수지류를 더욱 가열하면 점차 녹아 떨어져 내리며, 마침내는 본체에서 이탈한다.

3) 소실

난연처리가 되지 않은 합성수지류는 가연성이며 착화온도는 낮다. 열분해온도는 200~400℃이며, 이온도가 되면 용이하게 착화하여 연소가 개시되며, 소실되어 간다. TV의 왼쪽 아랫부분에 버너로 착화·연소시킨 것이 [그림 4-67]이다. 합성수지의 본체는 연소시키자 수열방향(受熱方向)으로 무너졌다.

[그림 4-66] 수열방향으로 무너진 케이스





나. 연소방향

지금까지의 「연소강약」을 기본으로 사진을 이용하여 「연소방향」을 파악하는 방법을 설명한다.

[그림 4-67] TV 케이스1 (소손되어 우측으로 넘어진 것으로 보아 연소방향은 우→좌)



[그림 4-68] TV 케이스2



- 텔레비전 위에 촛불을 켜놓아 발생한 화재 사례로 우측 위쪽에 놓아두었기 때문에 우측으로 기울어져 있음.

[그림 4-69] 사진케이스



- 우측 아래가 발화개소이며, 그 방향으로 무너져 있다.

[그림 4-70] 쓰레기통



- 좌측이 발화개소이며, 발화개소 방향으로 무너져 있다.



[그림 4-71] 가림용 염화비닐판



○ 용융상태를 볼 때 연소방향은 「좌→우」임.

[그림 4-72] 목재테이블과 컴퓨터 모니터의 소손상황



○ 테이블이 좌측은 타서 없어졌고, 모니터도 좌측으로 기울어 소실되어 있으므로 연소 방향은 「좌→우」임.

[그림 4-73] 쓰레기통과 밥통 케이스의 소손상황

건물
구조재별
연소강약
및
연소방향의
파악



○ 밥통의 소손상황으로 볼 때 연소방향은 「좌→우」임.

6. 도료류

화재현장에는 수많은 도료의 탄 흔적을 볼 수 있다. 도료류는 금속 등 표면에 막모양(膜狀)으로 도포되어 있으며, 차량의 보닛, 건물 합석지붕 등 「연소강약」의 단서가 되는 경우가 많다.

도료류의 외관은 수열에 따라 대략 다음과 변한다.

변색 ⇨ 발포 ⇨ 회화(灰化) ⇨ 소실

가. 변색

도포되어 있는 도료의 수열 전 색깔을 파악하여 「연소강약」을 판단한다.

나. 발포

발포는 열을 받아 거품 모양이 생기는 상태를 가리키며, 발포 개개의 크기나 수의 차가 「연소강약」을 나타낸다.



[그림 4-74] 철재문의 수납함 도료의 발포



- 양끝 쪽으로 갈수록 발포의 크기가 작고 발포 개수도 적은 것을 볼 때 중앙부의 소손 정도가 강한 것을 알 수 있다.

다. 소실

금속 등의 표면에 도포되어 있는 도료류는 비교적 소실되기 쉬우므로 「연소강약」은 잔존부분의 상태로부터 판단한다.

7. 내화보드

내벽 등에 사용되는 내화보드도 「변색·낙하강도」 등 다른 물질과 같은 변화를 외관에 남긴다. 특히, 열영향을 받아 강도가 약해지면 모래처럼 허물어지는 경우가 있다.

또한 소화활동 등에 의해 파괴되어 있는 경우도 있으므로 단순하게 낙하 정도가 「연소강약」 판단으로 이어지지 않는 경우가 있으므로 주의한다. 이 경우, 내화보드 안쪽 재료 소손 상황의 비교, 파단면의 상황 등에 의거 판단하면 된다.



- 우측 앞에서 안쪽으로 감에 따라 내벽의 하얀 부분이 천장 쪽으로 되어 있다.
- 우측 앞쪽일수록 열 영향이 컸던 것으로 판단된다.

8. 단락흔에 의한 연소방향

전선이나 전기기구 코드류는 통전상태(전압이 인가된 상태)에서 단락(short)하면 단락부분의 전선동이 구슬모양으로 용융된 「흔적」이 남는다. 이를 「단락흔」이라고 하며, 화재를 일으킨 단락의 경우는 물론 전압이 인가되어 있는 전기 코드류의 피복이 화재의 화염으로 타서 그 영향으로 2차적으로 단락한 경우에도 생긴다. 전자의 단락흔을 「1차 단락흔」, 후자의 단락흔을 「2차 단락흔」이라고 한다.

1차2차 단락흔의 식별은 제쳐두고 이 단락흔의 발생개소, 그 자체가 「연소방향」을 나타내고 있으며, 같은 전기회로에 여러 개소의 단락흔이 있는 경우에는 이론적으로 모순되지 않도록 「연소방향」을 판정해야 한다. 이 외에도 단순히 연소열로 인해 녹은 전선도 화재현장에 남아 있으며, 이는 「열흔(熱痕)」이라고 부른다.

이 전선류의 「단락흔」과 「열흔」은 [표 4-9]와 같이 외관이 차이가 있으므로 식별이 가능하다.

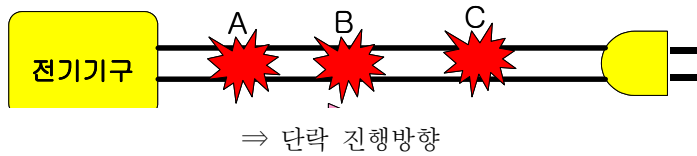


[표 4-9] 「단락혼」 과 「열혼」 의 특징

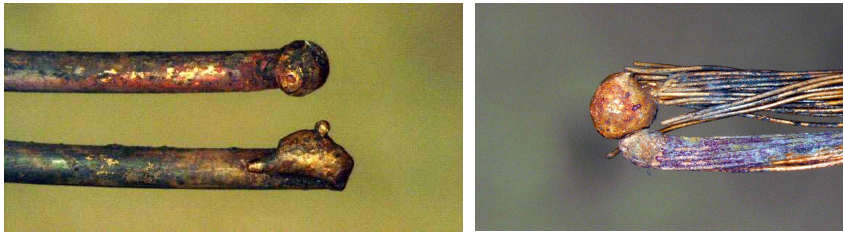
	통전	정 의	외관의 특징
1차 단락혼	있음	화재의 원인이 된 단락혼.	구슬모양으로 광택이 있다. ※ 단락혼은 연소열로 가열되면 이 특징이 없어지는 경우가 있다.
2차 단락혼		화재의 열로 전선피복 등이 타서 2차적으로 생긴 단락혼.	
열혼	없음	연소열로 용융한 것.	눈물모양으로 처져 있고 광택이 없다.

부하 전기를 소비하고 있는 쪽에 가까운 쪽이 발화개소측이므로 전원코드 등의 경로를 확인한다([그림 4-76] 참조).

[그림 4-76] 전선류의 단락혼 발생위치에 근거한 연소방향



[그림 4-77] 배선과 코드에 생긴 단락혼의 예



2

[그림 4-78] 케이블에 생긴 단락흔의 예



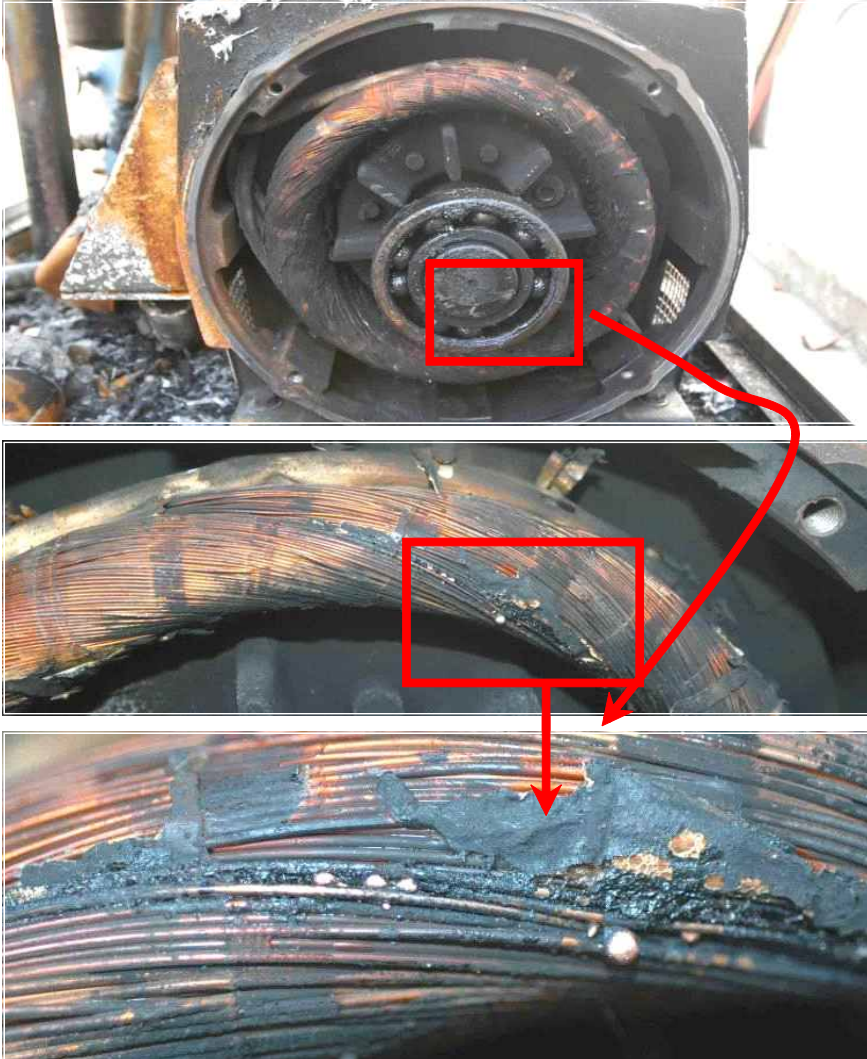
건물
구조재별
연소강약
및
연소방향의
파악

[그림 4-79] CV전선에 생긴 단락흔의 예





[그림 4-80] 모터 고정자권선의 층간 단락흔



- 고정자권선에서 층간 단락흔이 발견되며, 축에 연결된 베어링 등에서는 손상된 부위가 발견되지 않은 경우에는 최초발화는 층간 단락흔에 기인하였다고 할 수 있음. 왜냐하면 외부에서 발화된 경우에는 모터의 인입전선이 먼저 단락되며, 인입전선에서 단락이 발생되면 내부에서 단락이 발생하는 것이 불가능하기 때문임.

2

9. 변형 또는 도괴방향에 의한 연소방향 판정

건물 구조재별 연소강약 및 연소방향의 파악

화재로 인해 발생하는 압력이나 폭발로 인한 압력이 금속재 등에 가해져 변형이나 도괴를 일으키고, 이 변형이나 도괴방향이 연소방향을 나타내기도 한다. 2008년 1월 7일 09:45에 발생한 이천소재 지하냉동창고화재를 예를 들어 설명한다. 이 지하냉동창고의 내부구조는 [그림 4-81]과 같다.

[그림 4-81] 지하냉동창고의 내부구조 개략도



이 화재는 13호 냉동실 천장에서 목격되었다. 냉동실 벽체의 변형 또는 도괴상황은 [그림 4-82]와 같았다.



[그림 4-82] 13호실 주위의 벽체 파손 방향 (➡ : 넘어지거나 밀려난 방향)



※ 벽체의 파손 등 소손상황으로 볼 때 발화개소는 14호실로 추정되지만, 목격자는 13호 냉동실 천장에서 화재를 최초 발견하였다고 진술함.

[그림 4-83] 13호실 내부의 소손상황(안쪽 → 출입문 방향 촬영)



건물
구조재별
연소강약
및
연소방향의
과약

[그림 4-84] 13호실 통로측 벽으로 통로 쪽으로 기울어져 있는 모습





[그림 4-85] 13호실로 14호실과의 경계벽이 13호실 쪽으로 넘어져 있는 모습



[그림 4-86] 13호실 출입구로 통로 쪽에서 촬영한 모습



[그림 4-87] 12호 냉동실과 13호 냉동실의 경계벽으로 12호실 쪽으로 넘어져 있는 상황



건물
구조재별
연소강약
및
연소방향의
과약

[그림 4-88] 14호실 앞 통로 소손상황(좌측-15호실, 안쪽-14호실, 우측-13호실)



(내부에서 통로로 화염이 분출된 모습임)



[그림 4-89] 14호 냉동실의 소손상황



(경계벽이 15호실과 통로(출입구) 쪽으로 밀려나 있음)

[그림 4-90] 14호실로 출입구(통로 측)와 15호실 쪽으로 밀려나 있는 상황

건물
구조재별
연소강약
및
연소방향의
과약





[그림 4-91] 15호 냉동실의 출입문 측벽의 손상상황(통로 쪽으로 밀려남)



[그림 4-92] 14호실에서 15호실을 보고 촬영한 모습(패널이 15호실 쪽으로 넘어져 있음)



[그림 4-93] 교차통로에 면한 2호 냉동실의 벽체가 내측 방향으로 밀려나 파손된 상황

건물
구조재별
연소강약
및
연소방향의
파악





chapter 2 핵심 요약

- 대부분의 물질은 화재로 인하여 열을 받으면(受熱) 형상이 변한다.
 - 목재 : 탄화, 박리, 소실 등
 - 금속류 : 변색, 만곡, 용융 등
 - 콘크리트 : 변색, 박리, 폭열 등
 - 모르타르, 타일 류 : 변색, 박리 등
 - 유리 : 박리, 금, 용융 등
 - 합성수지 류 : 변형(연화 또는 경화), 용융, 소실 등
 - 도로 류 : 변색, 발포 등
 - 내화보드 : 변색, 낙하 등
- 단락흔과 열흔
 - 1차 단락흔 : 화재의 직접 원인이 된 단락흔
 - 2차 단락흔 : 화재로 전선 피복이 연소되고, 이로 인하여 단락되어 나타난 용융흔
 - 열 흔 : 단순히 화재로 인한 용융흔. (전압이 인가되지 않은 상태)

chapter 2 학습가이드

01 습식부식과 건식부식

- 습식부식 - 금속표면이 접하는 환경 중에서 습기의 작용에 의한 부식현상
- 건식부식 - 습기가 없는 환경 중에서 200℃이상 가열된 상태에서 발생하는 부식

02 폭열 현상

콘크리트에 포함되어 있는 수분이 화재 시 발생하는 급격한 온도 변화와 열로 인하여 내부에 갇혀있던 수분이 외부로 빠져나가지 못하고 팽창한 계점에 도달, 이후 폭발하여 표면의 콘크리트가 탈락되거나 박리되는 현상.

3

화재패턴 등에 의한 발화개소의 판정

화재패턴
등에
의한
발화개소의
판정

- 학습** 01 발화개소 판정을 위한 조사요령을 알 수 있다.
- 목표** 02 화재 패턴이 생기는 원리와 종류를 분류할 수 있다.
- 03 발화개소 판정에 화재패턴이 어떤 역할을 하는지 설명할 수 있다

여러 건물이 소손되어 있는 화재현장에서는 『발화건물 ⇨ 발화실의 판정 ⇨ 발화범위(보통은 室 단위)의 한정 ⇨ 한정된 발화범위의 발굴·복원 ⇨ 발화개소의 판정 ⇨ 발화원의 판정 ⇨ 발화원인의 판정』이라는 순서로 발화원인을 규명하고 있다.

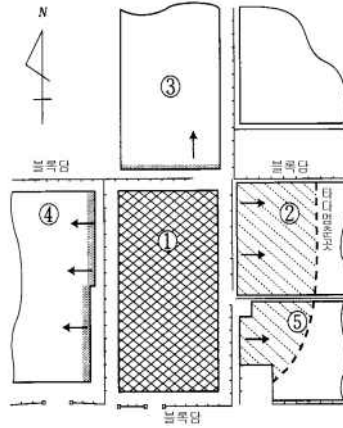
여기에서는 제1장, 제2장을 기본지식으로 하여 발화개소 등의 판정을 위한 조사요령을 설명한다. 특히, 「발화범위 한정」의 조사는 화재현장에서 발굴·복원하는 범위, 즉 발화했다고 추정되는 범위를 결정하는 것이다. 이 조사를 그르치면 발화원이 된 전자제품 등을 발견할 수 없게 되어 발화원인을 그르치게 된다.

1. 발화건물의 판정

발화건물의 판정순서는 『화재현장 전체의 「연소방향」의 파악 ⇨ 각 건물별 「연소방향」 파악 ⇨ 인접건물간의 「연소방향」 파악 ⇨ 발화건물의 판정』으로 하고 있다. 예를 들면, 5동의 건물이 아래 그림과 같은 연소방향을 나타내고 있는 경우, 화재현장 전체의 「연소방향」으로 부터 최초로 발화한 것은 「①건물」로 귀납적으로 판정할 수 있다.



[그림 4-94] 건물배치도



발화건물 판정을 위한 포인트가 되는 조사요령은 다음과 같다.

- 화재현장 전체의 「연소방향」의 파악
 화재현장 전체의 연소방향은 「높은 곳」에서 파악한다.
 높은 장소에서 화재현장을 보면, 전체적인 「연소방향」의 파악이 비교적 용이하다. 지붕재, 기타의 구조재 등의 잔존상황과 타서 무너진 방향에 건물간의 연소방향이 나타난다. ([그림 4-95] 참조)
 높은 장소가 없는 경우에는 사다리차, 헬리콥터 등을 활용한다. ([그림 4-96] 참조)
- 각 건물별 「연소방향」의 파악
 각 건물의 연소방향은 「타다 멈춘 부분」 또는 「연소강약이 명확한 부분」으로부터 파악한다.
 「타다 멈춘」 부분은 「연소방향」이 명확하므로 발화건물 판정의 유효한 단서가 된다. 연소방향은 타서 허물어진 경우에도 나타난다. 발화개소측으로 타서 허물어지는 경우가 많다. ([그림 4-97]~[그림 4-98] 참조)
- 인접건물간의 「연소방향」의 파악
 복수의 건물이 소손되어 있으면 인접동 간격, 외벽의 구조, 대면하는 개구부의 상황 등으로부터 건물간의 「연소방향」, 즉 연소경로를 명확히 하여 둔다. ([그림 4-99] 참조)

< 「높은 곳」에서의 관찰1 (인접동 건물)>

[그림 4-95] 인근의 고층건물

화재 패턴
등에
의한
발화개소의
판정



- 이는 여러 동이 소손된 화재현장이다.
- 도로측 건물에서 우측 건물로 연소 확대되었음을 나타내고 있다.

< 「높은 곳」에서의 관찰2 (헬리콥터)>

[그림 4-96] 헬리콥터에 의한 촬영 - 현장이 광범위할 때에는 공중촬영도 고려한다.





<건물별 관찰1 (연소방향이 명확한 부분)>

[그림 4-97] 지붕



- 우측 건물은 지붕재가 낙하되어 있는 안쪽에서 앞쪽으로 연소 확대되었음.

<건물별 관찰2 (타서 허물어짐)>

[그림 4-98] 지붕재



- 이 건물은 앞쪽의 지붕이 타서 허물어져 있다.
- 앞 쪽에서 안쪽을 향해 연소 확대되었음을 알 수 있다.

<건물간의 연소 확대 경로의 관찰>

[그림 4-99] 창문

화재 패턴
등에 의한
발화개소의
판정



- 연소 확대된 건물의 연소경로이다.
- 부엌 창문으로부터 연소 확대되어 왔음을 알 수 있다.

2. 발화층의 판정

화재에서 보통, 화염은 위쪽으로 성장한다. 이 때문에 화재층은 소손이 있는 가장 아래층이 되는 경우가 많다.

그러나 아래층으로 연소 확대된 화재나 소손된 층끼리의 소손규모를 비교하는 것만으로는 판별할 수 없는 화재도 있으므로 주의를 요한다.

<아래층으로 연소 확대된 화재>

내화조 8층 건물에서 6층에서 발화하여 발코니에 놓여 있던 등유가 든 통이 소손, 불이 붙은 등유가 배수구로부터 아래층으로 흘러 연소 확대된 화재. ([그림 4-100], [그림 4-101])



[그림 4-100] 연소 확대 중인 건물



○ 6층이 발화층인데, 5층의 발코니가 불타고 있다.

[그림 4-101] 연소경로인 배수관

불이 붙은 등유가 낙하한 발코니의 염화비닐제 배수관.



<연소 확대 경로가 된 「계단」 을 보는 방법>

계단의 소손상황은 발판의 표면과 이면에 나타난다. ([그림 4-102], [그림 4-103])

화재 패턴
등에
의한
발화개소의
판정

[그림 4-102] 계단발판 표면



○ 발판 표면은 현저한 탄화모양이 보이지 않음.

[그림 4-103] 계단발판 이면





- [그림 4-102]와 같은 계단이다.
- 발판 이면은 현저한 탄화모양이 보이며, 소손 정도가 강하다.

3. 발화범위의 한정 (발굴·복원 전)

발화원인규명 과정에서 발화했다고 추정되는 개소(보통은 부엌, 거실 등의 室 단위)를 발굴한다. 발굴범위를 그르치는 것은 발화원인을 그르치는 것이므로, 발굴범위의 판정은 신중을 기해야 한다.

발굴은 발화범위 내에서 하며 발화범위를 한정하는 순서는 발화건물의 판정과 유사하며,

1. 발화개소의 「연소강약」 파악 ⇨ 2. 건물 전체의 「연소방향」 파악 ⇨ 3. 발굴범위의 판정 순으로 한다. 제1장 [그림 1]에 예시한 것처럼 연소방향을 파악하여 발화한 곳은 「방1」이라고 귀납적으로 판정하여 발굴범위를 결정하고 있다.

<실별 연소 확대방향 조사>

- | | |
|-----------------|----------------------------|
| ○ 천장안쪽·천장·벽·기둥 | ([그림 4-104]~[그림 4-105] 참조) |
| ○ 가구·건구류(建具類) | ([그림 4-106]~[그림 4-109] 참조) |
| ○ 개구부를 통한 연소 확대 | ([그림 4-110]~[그림 4-113] 참조) |

<실간 연소 확대방향 조사1(경계벽 등)>

[그림 4-104] 실간 소손상황 비교



3

- 이 방은 정면 벽에서 타다 멈추었다.
- 천장의 소손상황 등을 볼 때 벽 안쪽의 건너편 방에서 타왔음을 알 수 있다.

<실간 연소 확대방향 조사2 (내벽)>

화재 패턴
등에
의한
발화개소의
판정

[그림 4-105] 내벽 - 좌측 안쪽의 하부 부근으로 부터 화염이 올라갔음이 확인된다.





[그림 4-106] 기둥



- 기둥의 「面」 에 연소방향이 나타나 있다.
- A, B, C와 안쪽일수록 소손정도가 약하다.
- 또한 B와 C에 현저하지만, 각각 우측의 면보다 정면 쪽이 소손정도가 강하다.
- 이와 같이 다른 「面」 에도 연소방향이 나오므로 주의 깊게 관찰한다.

<실간 연소 확대방향 조사3 (옷장류)>

[그림 4-107] 주택

화재패턴
등에
의한
발화개소의
판정



- 이 방은 위쪽의 소손정도가 강하다.
- 정면의 옷장, 문종이 등의 소손상황을 볼 때 인쪽의 방에서 타 건너왔음을 알 수 있다.

[그림 4-108] 그림 4-107의 안쪽 방





- 바닥면까지 소손되어 있다.
- 인접방은 이방에서 연소 확대되었음을 알 수 있다.

<실간 연소 확대방향의 조사5 (미닫이문)>

[그림 4-109] 미닫이문



- 미닫이문의 소손상황을 볼 때 연소방향은 좌측에서 우측임을 알 수 있다.

<실간 연소 확대방향의 조사6 (정리장)>

[그림 4-110] 정리장



- 표면은 좌측 아래 부분에서 우측 윗부분 쪽으로 소손되어 있다.
- 연소방향은 「좌→우」 인 것으로 판단된다.

<실간 연소 확대방향의 조사7 (개구부로부터의 연소 확대)>

[그림 4-111] 개구부



- 개구부로부터의 「화염의 불어나옴」 의 특징이 있는 소손
- 개구부의 위쪽을 중심으로 벽, 천장이 소손되어 있다.
- 안쪽에서 앞쪽으로 연소 확대되었음을 알 수 있다.



[그림 4-112] 화염이 밖으로 나온 예 1



[그림 4-113] 화염이 밖으로 나온 예 2

화재 패턴
등에
의한
발화개소의
판정





[그림 4-114] 화염이 밖으로 나온 예 3



[그림 4-115] 화염이 방안으로 들어온 예 1



[그림 4-116] 화염이 안 쪽으로 들어간 예 2

화재 패턴
등에
의한
발화개소의
판정





[그림 4-117] 부엌에서 화염이 밖으로 나간 예 4



[그림 4-118] 안 쪽에서 밖으로 나온 화염의 흔적 5



[그림 4-119] 안 쪽에서 밖으로 나온 화염의 흔적 6

화재 패턴
등에
의한
발화개소의
판정



[그림 4-120] 화염이 안 쪽에서 문을 통해 나온 예 7





[그림 4-121] 화염이 좌측 쪽 문을 통해 나온 예 8



[그림 4-122] 화염이 안 쪽에서 문을 통해 나온 예 9



[그림 4-123] 화염이 출입문을 통해 들어오고 나간 상황

화재 패턴
등에
의한
발화개소의
판정



- 아파트 방출입문으로 윗부분은 내부에서 외부로, 아래쪽은 외부에서 방안으로 들어간 소손상황임.
- 문은 열린 상태에서 연소된 형상으로, 위쪽의 화염의 확대에 의해 형성된 연소흔적 외에 하단 부분에서 국부적으로 심하게 연소 된 흔적이 식별됨.
- 문 하단의 국부적인 심하게 연소 된 형상은 방바닥 중앙 부분 및 문 외측 부분에 액체 인화성 물질 등을 이용하여 착화하였을 경우 나타날 수 있음.



이상과 같이 각 실을 조사하여 연소방향을 관찰한 후 발굴범위를 결정한다.

<타 내려간 상황의 조사>

연소 확대되어 온 실(室)은 화재열이 천장 측에서 서서히 바닥으로 향해 간다. 위쪽에서 바닥방향 쪽으로의 소손상황을 「타 내려감」 이라고 하며, 실간(室間)의 연소방향을 판단하는 핵심이다. ([그림 4-124] 참조)

[그림 4-124] 타 내려감 - 일률적으로 위쪽만 탔다.



<화염이 올라간 개소의 조사>

내벽 등의 소손상태로부터 화염이 올라간 개소를 알 수 있으면 발굴범위를 좁힐 수 있다. 그 형상은 타 오른 개소의 조건인 「벽과 발화개소의 관계, 입상재(立上材)의 질·형상·상태, 소화시기」 등에 따라 여러 가지이다.

보통은 역삼각형(▼) 도형, U형, 삼각형(▲)형이 된다 ([그림 4-125]~[그림 4-140] 참조)

▲ 발화개소에 면한 내벽 등이 전면 소손되고 연소 확대되어 천장재 등이 낙하한 경우에는 낙하된 다른 장소에서 2차적으로 화염이 올라가는 경우도 있으므로 주의 깊게 관찰해야 한다.

<화염이 올라간 개소의 조사 1>

[그림 4-125] 역삼각형 패턴





<화염이 올라간 개소의 조사 2>

[그림 4-126] 무염연소 후 화재로 진전되어 나타난 역삼각형 패턴



<화염이 올라간 개소의 조사 3>

[그림 4-127] 식용유 과열로 인해 발생한 화재의 예 2



<화염이 올라간 개소의 조사 4>

[그림 4-128] 전자레인지로 중심으로 올라간 화재 패턴

화재 패턴
등에
의한
발화개소의
판정



(전자레인지에 1회용 라이터를 놓고 가동시켜 발생한 화재로 전자레인지를 중심으로 화재가 올라간 모습을 하고 있음.)

<화염이 올라간 개소의 조사5>

[그림 4-129] 냉장고 뒤쪽 벽면의 V패턴 (벽체매입콘센트를 중심으로)





<화염이 올라간 개소의 조사 6>

[그림 4-130] V패턴



<화염이 올라간 개소의 조사 7>

[그림 4-131] 2006년 7월 20일 지하노래방화재에서 나타난 V패턴



<화염이 올라간 개소의 조사 8>

[그림 4-132] V패턴

화재패턴
등에
의한
발화개소의
판정



<화염이 올라간 개소의 조사 9>

[그림 4-133] V패턴





<화염이 올라간 개소의 조사 10>

[그림 4-134] V패턴



<화염이 올라간 개소의 조사 11, 12>

[그림 4-135] U패턴

화재 패턴
등에
의한
발화개소의
판정





<화염이 올라간 개소의 조사 13>

[그림 4-136] U패턴



<화염이 올라간 개소의 조사 14>

[그림 4-137] 평행형 (화염이 올라가서 천장에 도달하여 횡 방향으로 뻗고 있다.)



<화염이 올라간 개소의 조사 15>

[그림 4-138] 역 △패턴

화재패턴
등에
의한
발화개소의
판정



- 양초의 불꽃과 같은 형상을 하고 있으며 화재초기 단계에 소화 되었을 때의 흔적임
- 식용유와 같은 기름이나 석유류 등 연소촉진제를 사용한 경우에도 나타나는 흔적임



[그림 4-139] △패턴



- 양초 불꽃과 같은 형상을 하고 있다.
- 화재최성기 단계에서 소화되었을 때의 흔적이다.

[그림 4-140] 철재출입문에 나타난 △패턴

화재패턴
등에
의한
발화개소의
판정

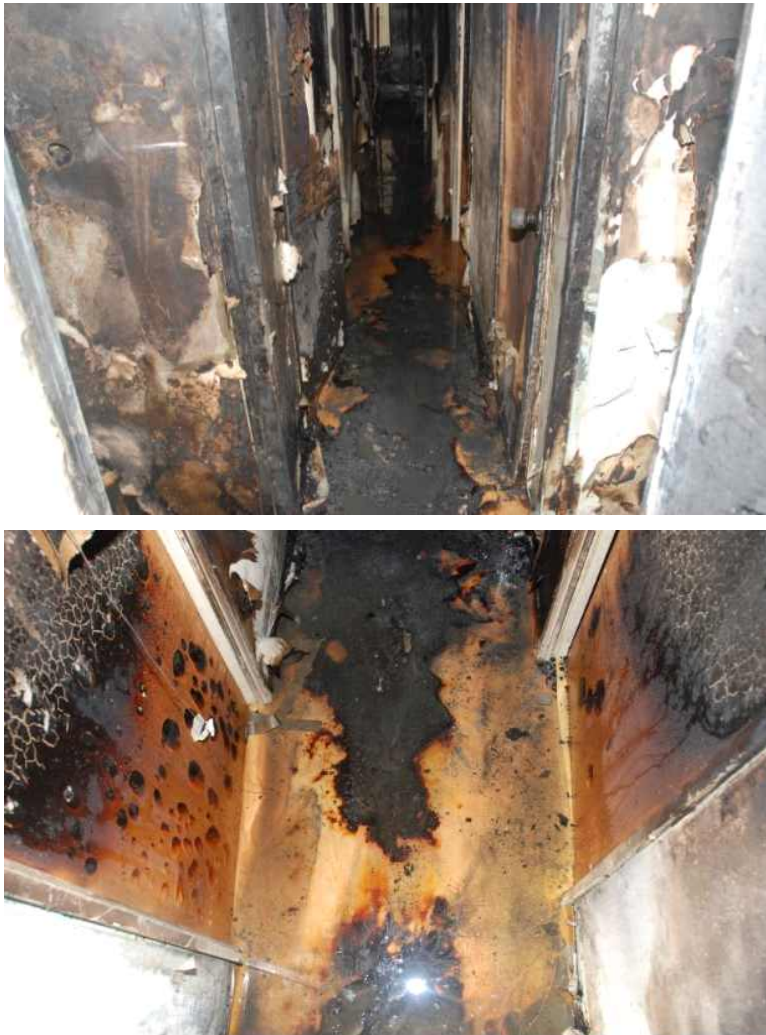




<바닥 등의 특이한 연소상황>

바닥에서 화재가 시작된 경우, 바닥에 소손상황을 남기는 경우가 있다. 특히 바닥에 시너 등 연소촉진제를 뿌리고 불을 붙인 경우에 그러하다. 화재가 확대되어 천장 가연물에 불이 붙어 떨어져 내린 낙하물로 인해 2차적으로 바닥이 소손되거나 벽을 타고르는 경우도 있으므로 주의해야 한다.

[그림 4-141] 바닥의 연소상황



○ 불규칙적인 바닥재의 연소는 바닥에 연소촉진제를 뿌린 경우에 나타남.

[그림 4-142] 연소촉진제 살포에 의한 바닥의 연소상황

화재 패턴
등에
의한
발화개소의
판정





[그림 4-143] 바닥에 석유류를 뿌린 흔적⁴⁾



4) <http://www.aeawv.com/images/fireinve2.jpg>

3

[그림 4-144] 연소촉진제 살포에 의한 바닥의 연소상황

화재 패턴
등에
의한
발화개소의
판정





[그림 4-145] 연소촉진제의 살포에 의한 바닥의 소손상황⁵⁾



[그림 4-146] 연소촉진제의 살포에 의한 바닥의 소손상황



5) 바닥 장판이 소손된 모습으로 이와 같은 연소형태는 직상부 천장에서 형광등과 같은 전기시설이 낙하하여 발화되는 경우와 바닥에 인화성 액체를 뿌려 인위적으로 불을 낸 경우에 나타날 수 있는 형태이다. 장판이 소손된 곳 직상부의 천장에 전기시설이 없는 경우에는 인화성 액체에 의한 인위적인 화재라고 판단할 수 있음.

3

[그림 4-147] 연소촉진제 살포에 의한 불연속적인 바닥의 연소상황

화재 패턴
등에
의한
발화개소의
판정



[그림 4-148] 연소촉진제의 살포에 의한 바닥의 소손상황





[그림 4-149] 도넛패턴(비닐장판과 카펫 위)⁶⁾⁷⁾

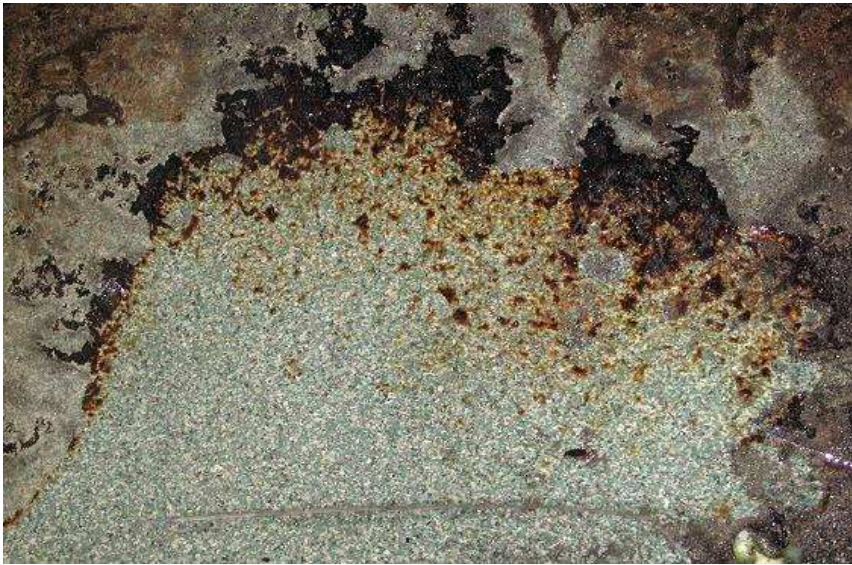


6) <http://www.interfire.com/features/burnpatterns.asp>

7) 도넛 패턴: 고리모양으로 연소된 부분이 덜 연소된 부분을 둘러싸고 있는 도넛모양 형태로 가연성액체가 웅덩이처럼 고여 있을 경우 발생. 주변부나 얇은 곳에서는 화염이 바닥이나 바닥재를 탄화시키는 반면에 깊은 중심부는 액체가 증발하면서 증발잠열에 의해 웅덩이 중심부를 냉각시키는 현상 때문에 기인한다.

[그림 4-150] 위 : 포어 패턴, 아래 : 스플래시 패턴⁸⁾

화재 패턴
등에
의한
발화개소의
판정



8) ① 포어 패턴(Pour Pattern)

인화성 액체가연물을 바닥에 쏟아 부었을 때 바닥면에서 낮은 곳으로 흐르고, 이때 액체를 따라 화염이 연소진행하게 되는데, 액체가연물이 흐른 부분과 흐르지 않은 부분의 뚜렷한 탄화 경계선을 가지게 된다. 이러한 연소형태를 포어 패턴이라고 한다.

② 스플래시 패턴(Splash Pattern)

바닥에 인화성 액체가연물이 연소 시 가연물 표면에서 액체가 끓으면서 주변으로 튀겨 국부적으로 바닥에 연소된 형태이다. 포어 패턴과 스플래시 패턴(Pour Pattern 과 Splash Pattern)은 인화성 액체 가연물을 사용한 경우에 나타는 대표적인 연소형태이다.



[그림 4-151] 유류에 의한 틈새의 연소 패턴⁹⁾



<연소방향이 모순된 화재>

발화개소에서 떨어져 있으나 산소공급이 양호한 개구부가 있는 실 쪽이 강하게 소손되어 있는 경우가 있다.

주로, 개구부가 출입구와 발코니 측에만 있는 내화구조 공동주택에서 발생한다. 그러나 목조건축물에도 조건에 따라서는 드물지 않은 현상이다.

9) 목재마루 및 타일 등의 틈새, 문지방 및 벽과 바닥의 틈새 및 모서리에 가연성 액체가 흐를 경우, 틈새를 따라서 흘러가거나 더 많은 액체가 고이게 되는데, 이 액체가 연소하면서 타 부위에 비하여 더 강하게, 더 오래 연소하게 되므로 진화 후에는 탄화정도에 따라서 구별을 할 수가 있음.

<연소방향에 영향을 미치는 개구부의 「개폐」 조사>

유리창 등 개구부가 열려 있으면 발화개소가 아니라도 산소의 공급이 양호하므로 그 방향의 소손이 강해진다. 그러므로 개구부의 「개폐」 를 확인하여 연소방향을 파악하여야한다.

<발굴범위의 한정이 곤란한 현장>

소손이 심해서 기둥 등만 남아 있는 현장에서는 발굴범위는 넓게 잡는다. 함부로 전도재(轉倒材)를 이동시키지 말고 사용되고 있던 부분을 확인하여 본래의 위치로 되돌리며, 수직재는 세우고 수평재는 나열하는 등을 하여 「연소방향」 을 본다.

4. 발화개소의 판정 (발굴·복원 후)

명확한 화염이 올라간 흔적이 보이는 경우를 제외하고는 「발굴 전」 발화범위의 한정은 실(室) 단위의 넓은 범위로 한다. 이에 비해 「발굴·복원 후」 에는 그 범위를 좁혀 아주 한정적인 부분(침대 주위, TV 주위 등)으로 압축하여 발화개소를 판정한다.

순서는 『실내의 각 가구재·건물 구조재 개개의 「연소강약」 파악 ⇨ 이들 「연소강약」 이 나타내는 실내 전체의 「연소방향」 파악 ⇨ 발화개소의 판정』 으로 한다.

chapter 3 핵심요약

- 발화건물의 판정 순서는
화재현장 전체의 연소방향 파악 ⇨ 각 건물별 연소방향 파악 ⇨ 인접건물간의 연소방향 파악 ⇨ 발화건물의 판정 순으로 한다.
- 발화범위 한정 순서는
각 실별 연소강약 파악 ⇨ 건물전체 연소강약 파악 ⇨ 발화범위 한정 순으로 한다.



chapter 3 학습가이드

화재패턴(pattern)의 종류

- 01 역삼각형(▽) 패턴 : 화염, 연기 등이 위로 갈수록 넓어지는 전형적인 연소형태, 주로 벽면과 출입문 등에 나타나는 연소 흔적.
- 02 삼각형(△) 패턴 : 화재 초기 단계에서 화재가 진화 된 경우 국부적으로 나타나는 △형 모양의 연소 흔적.
- 03 고온가스층에 의해 생성된 패턴 : 플래시오버 직전에 나타나며, 고온가스의 상승과 동반된 화염으로, 윗부분과 아랫부분으로 나누어져서 경계가 뚜렷한 연소 흔적.
- 04 완전연소 패턴 : 화재가 최성기에 이르러 구조물 등이 완전히 소실된 형태.
- 05 폴 다운 패턴(Fall down pattern) : 화재 시 고온으로 되어 있는 천장 등이 착화되고, 착화물이 바닥에 떨어져 바닥의 미연소 부분이 연소된 흔적.
- 06 드롭 다운 패턴(Drop down pattern) : 복사열 등의 영향으로 화염으로부터 멀리 떨어진 가연물이 착화되고, 착화물이 바닥에 떨어져 바닥의 미연소 부분이 연소된 흔적.
- 07 열 그림자 패턴(Heat shadowing pattern) : 화염이 장애물에 막혀 연소되지 않은 부분이 그림자 모양처럼 남아 있는 흔적.
- 08 포어 패턴(Pour pattern) 액체가연물이 바닥에 쏟아져 연소 될 때 나타나는 현상으로, 연소가 강한 액체가연물 부분과 다른 부분의 경계가 뚜렷한 흔적.
- 09 스플래쉬 패턴(Splash pattern) : 액체가연물이 연소되면서 주변으로 튀어 미연소 부분이 부분적으로 연소되어 나타난 흔적.
- 10 고스트 마크 패턴(Ghost mark pattern) : 액체가연물이 타일 바닥으로 스며들어 접착제 등과 연소하며 타일 바닥에 남긴 흔적으로 타일이 떨어져 나간 부분의 바닥에 그 흔적이 뚜렷하다
- 11 도넛 패턴(Doughnut pattern) : 가연성 액체가 웅덩이처럼 고여 있는 상태에서 연소될 때 나타나는 흔적.(가장자리 부분에서 연소가 강하다)

■ 참여한 사람들 ■

집필위원

외래교수 최돈복
외래교수 윤석호
외래교수 김유식
외래교수 류수열

검토위원

외래교수 최규출
외래교수 손원배
외래교수 천성수
외래교수 황인환

화재조사실무 I

발행일 2018년 12월

발 행 중앙소방학교

인쇄처 (주)프리비(Tel. 061-332-1492)

※ 본 교재는 2018년도 교재를 기반으로 개발되었습니다.

※ 이 책의 내용은 저자와 협의 없이 無斷再製 또는 轉載를 금합니다.

