

행정간행물 등록번호

72-6530000-100110-10



최고의 대응, 최 안전 대비
생명존중.국민안전 최우선



2025년 화재 재현실험 연구보고서



강원특별자치도 소방본부
GANGWON STATE FIRE HEADQUARTERS



2025년
화재 재현실험
연구보고서



발 간 사



소방 가족 여러분, 반갑습니다.

언제나 도민의 안전을 위해 현장을 지켜주시는 여러분과 함께
하고 있음에 든든함을 느낍니다.

화재조사는 단순한 원인 규명을 넘어, 동일·유사 화재의 재발을
방지하고 국민의 생명과 재산을 보호하는 중요한 출발점입니다.

이번에 발간하는 『2025년도 화재재현실험 연구보고서』는 실제 화재 상황을 재현하고
다양한 조건에서의 연소 특성과 발화 과정을 체계적으로 분석한 결과를 담고 있습니다.
실험을 통해 도출된 자료와 검증된 결과는 현장에서 마주하는 다양한 화재 양상을 이해
하고, 보다 정확한 판단을 내리는 데 중요한 길잡이가 될 것입니다.

앞으로도 강원소방은 화재조사관 개개인의 전문성이 곧 조직의 경쟁력이라는 인식 아래,
체계적인 교육과 연구를 지속적으로 추진해 나가겠습니다.

아울러 본 보고서가 화재조사관 여러분의 실무 능력 향상은 물론, 후배 조사관을
양성하는 데에도 유용한 교육자료로 활용되기를 바랍니다.

끝으로, 본 연구를 수행하며 현장과 연구를 연결하는 데 최선을 다해주신 화재조사관
여러분의 노고에 깊이 감사드립니다. 강원소방 가족 여러분의 건강과 안전을 기원합니다.

2026. 6.

강원특별자치도소방본부장 모 승 훈

CONTENTS

제1장

북부권

- ✓ 광역화재조사 1팀 >>>
열과 충격, 복합 요건에서의 유리 파괴 양상 비교 연구 5
- ✓ 광역화재조사 2팀 >>>
건축물의 환기 조건에 따른 발화지점 판정에 관한 연구 27
- ✓ 광역화재조사 3팀 >>>
샌드위치패널 건축물 화재 시 나타나는 연소 특성에 관한 연구 43

제2장

중부권

- ✓ 광역화재조사 1팀 >>>
주조 공정에서 발생하는 분진의 화재 위험성 연구 63
- ✓ 광역화재조사 2팀 >>> ☆'25년도 강원 화재재현실험 연구논문 발표대회 최우수
차량의 전기식 보조 히터(PTC)의 화재 위험성 연구 81
- ✓ 광역화재조사 3팀 >>>
열 축적 가능 환경에서 복사열 에너지에 의한 라텍스 제품의 발화 가능성 연구 103

제3장

동부권

- ✓ 광역화재조사 1팀 >>>
착화탄(일명 번개탄)의 연소 특성에 관한 연구 125
- ✓ 광역화재조사 2팀 >>> ☆'25년도 강원 화재재현실험 연구논문 발표대회 우수
전기 누전 시 출화점 환경에 따른 발화 가능성 연구 141





제4장

설악권

- ✓ 광역화재조사 1팀 >>> 태양광 1차·2차 집속에 의한 화재 발생 가능성 연구 161
- ✓ 광역화재조사 2팀 >>> 발화지점 판정 시 인공지능(AI) 활용 가능성에 관한 연구 181
- ✓ 광역화재조사 3팀 >>> 하이라이트 전기레인지 화재 패턴에 관한 연구 203

제5장

남부권

- ✓ 광역화재조사 1팀 >>> 파티션 히터의 비정상적 사용과 전기적 이상에 따른 발화 가능성과 감식기법에 관한 연구 219
- ✓ 광역화재조사 2팀 >>> 음식물 처리기 운전 조건별 화재 징후 분석 239
- ✓ 광역화재조사 3팀 >>> ☆25년도 강원 화재재현실험 연구논문 발표대회 우수 전열온상선 설치 방법에 따른 화재 발생 가능성 분석 259





2025년
화재 재현실험
연구보고서



제 1 장 | 북부권



✓ 광역화재조사 1팀 >>>

열과 충격, 복합 요건에서의 유리 파괴 양상 비교 연구

✓ 광역화재조사 2팀 >>>

건축물의 환기 조건에 따른 발화지점 판정에 관한 연구

✓ 광역화재조사 3팀 >>>

샌드위치패널 건축물 화재 시 나타나는 연소 특성에 관한 연구

열과 충격, 복합 요건에서의 유리 파괴 양상 비교 연구

서지혜¹⁾, 이원종, 이진무, 유정현

강원특별자치도소방본부 북부권광역화재조사 1팀

Comparative Study on Glass Destruction Patterns under Thermal, Impact, and Combined Conditions

Ji-Hea Seo[†], Won-Jong Lee, Jin-Mu Lee, Jung-hyun Yoo

Northern Wide Area Fire Investigation Team 1, Gangwon Fire Headquarters

ABSTRACT

Glass at fire scenes often breaks due to thermal stress or mechanical impact, and in many cases, both factors act simultaneously—such as heat combined with extinguishing water or physical force. Interpreting glass breakage based on a single cause is often inadequate. This study investigates the fracture behavior of different glass types—including float glass, laminated glass, and wired glass—under various conditions (heat, impact, heat + water, heat + impact). The goal is to identify distinct fracture patterns and improve the accuracy of fire scene analysis, particularly in determining the origin and cause of fires.

Keywords : Glass, Float glass, Laminated glass, Wired glass, Heat. Impact, Heat-Impact Combination

1 서론

1.1 연구의 배경 및 필요성

화재 사고 현장에서 유리는 온도 상승에 따른 열응력과 충격이라는 두 가지 주요 요인에 의해 파괴되는 경우가 많다. 열에 의한 유리 파괴는 급격한 온도 변화로 인한 열팽창과 이에 따른 내부 응력 집중에서 비롯되며, 이는 유리의 미세 균열을 유발하거나 급격한 파손으로 이어진다. 반면, 충격에 의한 파괴는 외부 물리적 힘에 의한 직접적인 손상으로, 그 파괴 형태가 열에 의한 파괴와는 차별화된 특징을 보인다. 그렇지만 실제 화재 현장에서는 열응력과 외부 충격이 단독으로 작용하기 보다는 열+소화수, 열+충격과 같이 복합적으로 작용하는 경우가 많아, 단일 요인에 의한 파괴 메커

1) E-mail : seo07090@korea.kr

니즘만으로는 현장 유리 파손 양상을 정확히 해석하는 데 한계가 존재한다.

특히 현대 사회에서는 다양한 용도와 안전성을 고려한 일반유리, 접합유리, 망입유리 등 여러 종류의 유리가 광범위하게 사용되고 있다. 각 유리 종류는 재료 특성 및 제조 방식에 따라 열과 충격에 대한 내구성이 다르므로, 본 연구에서는 이러한 다양한 유리들을 대상으로 열과 충격뿐만 아니라 열+소화수, 열+충격과 같은 복합조건 하에서의 파괴 거동을 비교 분석하고자 한다. 이를 통해 각 유리 유형별 파괴 특성을 좀 더 체계적으로 파악함으로써, 화재 현장 유리 파손 형태 해석의 정확성을 높이고, 실제 사고 원인 조사에 실질적인 도움을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

1.2 연구 목적

본 연구의 목적은 화재 현장에서 출입문이나 창문 등 파손된 유리가 바닥의 잔류물 하단에서 원형 그대로 발견되는 경우 유리가 노출되는 다양한 물리적 환경, 특히 열과 충격, 열과 소화수가 동시에 작용하는 복합 요건 하에서 유리의 파괴 양상을 체계적으로 분석하는 데 있다.

이를 위해 현대 사회에서 다양한 용도와 안전성을 고려하여 사용하는 일반유리, 접합유리, 망입유리 등 여러 종류의 유리를 대상으로 열, 기계적 충격, 열+소화수, 열+충격의 복합 영향이 각 유리 재료별로 어떻게 다르게 나타나는지를 실험적으로 규명한다. 또한, 각 유리 종류별 파괴 형태와 메커니즘을 비교·분석하여 열, 기계적 충격, 복합 요인에 따른 파괴 특성의 차이를 명확히 밝히고자 한다. 궁극적으로 본 연구는 화재 조사 현장에서 관찰되는 유리 파손 증거를 보다 정확히 해석할 수 있는 시각적 근거를 제공하며, 이를 통해 화재 발생 원인 분석에 신뢰성을 향상하는데 기여하고자 한다.

2 이론적 고찰

2.1 유리의 정의

유리는 고체 상태의 비결정질(비정질) 재료로, 일반적으로 규사(이산화규소, SiO_2)를 주성분으로 하여 고온에서 용융시킨 후 급속히 냉각함으로써 형성된다. 이 과정에서 규칙적인 결정 구조를 이루지 못하고 무질서한 내부 구조를 유지하게 되며, 이에 따라 유리는 투명성, 경도, 내화학성 등 독특한 물리적·화학적 특성을 갖는다.

2.2 유리의 역사

유리는 기원전 약 3000년경 고대 이집트와 메소포타미아에서 처음 제작되었으며, 로마 시대에는 유리 불기 기법의 발명으로 대량 생산이 가능해졌다. 중세에는 베네치아의 무라노섬이 유리 제조의

중심지로 떠올랐고, 이슬람 세계에서도 화학적 발전을 통해 유리 기술이 크게 향상되었다. 산업혁명 이후 유리 생산이 기계화되며 대형 창유리와 광학유리 등이 본격적으로 보급되었고, 20세기에는 강화유리, 복층유리, 팽섬유 등 첨단 유리가 개발되며 다양한 산업 분야로 응용이 확대되었다. 현대에는 고기능성 유리와 친환경 유리가 지속적으로 개발되며 유리의 활용은 더욱 진화하고 있다.

2.3 실험에서 사용할 유리의 종류

2.3.1 일반유리

일반유리(소다석회유리)는 이산화규소, 산화나트륨, 산화칼슘 등을 주성분으로 하는 투명한 비결정질 물질로, 주로 창유리, 병, 식기 등에서 널리 사용된다. 이 유리는 높은 압축강도를 가지고 있지만 인장강도와 충격강도가 낮아 취성이 강하고, 외부 충격에 의해 쉽게 파손된다. 열전도율이 낮아 단열성이 뛰어나지만, 급격한 온도 변화에 취약해 열충격에 의해 쉽게 파손된다. 또한, 화학적 내구성이 우수하지만, 강알칼리 환경에서는 부식될 수 있다. 가격이 저렴하고 가공이 용이하여 일상적인 용도로 널리 사용된다.

2.3.3 접합유리

접합유리(Laminated Glass)는 두 장 이상의 유리 사이에 얇은 플라스틱 필름(주로 PVB, 폴리비닐부탈알데하이드($C_8H_{14}O_2$)엔)을 삽입하여 고온과 압력으로 접합한 유리다. 이 구조는 유리가 파손될 경우 파편이 비산하지 않도록 방지하며, 파손된 유리의 조각이 필름에 붙어 있기 때문에 사람에게 상해를 줄 위험을 줄여준다. 접합유리는 특히 자동차 앞 유리, 방탄유리, 보안 유리 등 안전성이 중요한 곳에서 사용된다. 또한, 접합유리는 소음 차단, 자외선 차단, 그리고 열 차단 특성도 뛰어나 건축용 유리나 방음용 창문으로도 널리 사용된다. 이 유리는 일반 유리에 비해 물리적 강도가 높고, 충격 흡수 능력이 뛰어난 장점이 있다.

2.3.4 망입유리

망입유리(Wired Glass)는 유리 내부에 철망을 삽입하여 만든 유리로, 철망이 유리의 구조를 보강하는 역할을 한다. 이 유리는 일반 유리에 비해 강도가 높고, 파손 시 유리 조각이 날아가지 않도록 철망이 이를 지탱하여 파편 비산을 방지하는 특성이 있다. 망입유리는 주로 화재 안전유리로 사용되며, 화재 시 유리가 파손되더라도 철망이 유리를 고정시키고 화염이나 연기가 확산되는 것을 어느 정도 차단하는 기능을 한다. 또한, 건축물의 출입구, 창문, 방화벽 등에서 화재 안전성을 높이기 위해 사용된다. 망입유리는 뛰어난 내화성 덕분에 고온에서의 안정성이 요구되는 장소에 적합하다.

Table 1. Types of Glasses

Category	Float Glass	Laminated Glass	Wired Glass
Structure	Single glass pane	Two glass layers bonded with film	Glass with embedded wire mesh
Mechanical Strength	Low	Similar to float glass	Low
Thermal Shock Resistance	Low	Medium	Low
Safety	Low	Very high	Moderate
Behavior in Fire	Easily breaks under high heat	Film may degrade, but fragments are retained	Glass cracks; wire exposed under heat
Security	Low	High	Low
Common Applications	Windows, interiors, low-cost structures	Car windshields, burglar-proof or soundproof glazing	Schools, factories, fire-rated openings

2.4 유리의 열적 특성

유리는 비금속 무기재료로서 열적 특성이 유리의 내구성과 파괴 거동에 중요한 영향을 미친다. 특히 열팽창 계수는 유리 재료가 온도 변화에 따라 얼마나 팽창하거나 수축하는지를 나타내는 지표로, 급격한 온도 변화 시 유리 내부에 열응력이 발생하는 주요 원인이 된다. 일반적으로 유리는 열전도율이 낮아 외부 표면과 내부 온도 사이에 큰 온도 구배가 형성되기 쉽고, 이로 인해 열응력이 집중되어 균열이 발생할 가능성이 높아진다. 또한 유리의 열충격 저항성은 단위 시간 내에 발생하는 온도 변화량에 대한 저항 능력을 의미하며, 이 값이 낮을수록 급격한 온도 변화에 의해 쉽게 파손될 위험이 크다.

2.5 유리의 기계적 특성

유리는 일반적으로 취성 재료로 분류되며, 높은 강도에도 불구하고 충격이나 응력 집중에 매우 민감하다. 유리의 기계적 특성 중 가장 중요한 것은 인장강도와 압축강도인데, 일반적으로 유리는 압축강도가 인장강도보다 훨씬 높아 인장 응력에 취약하다. 특히 미세한 표면 결함이나 균열이 존재할 경우, 이들 결함 부위에 응력이 집중되어 쉽게 파괴가 발생할 수 있다.

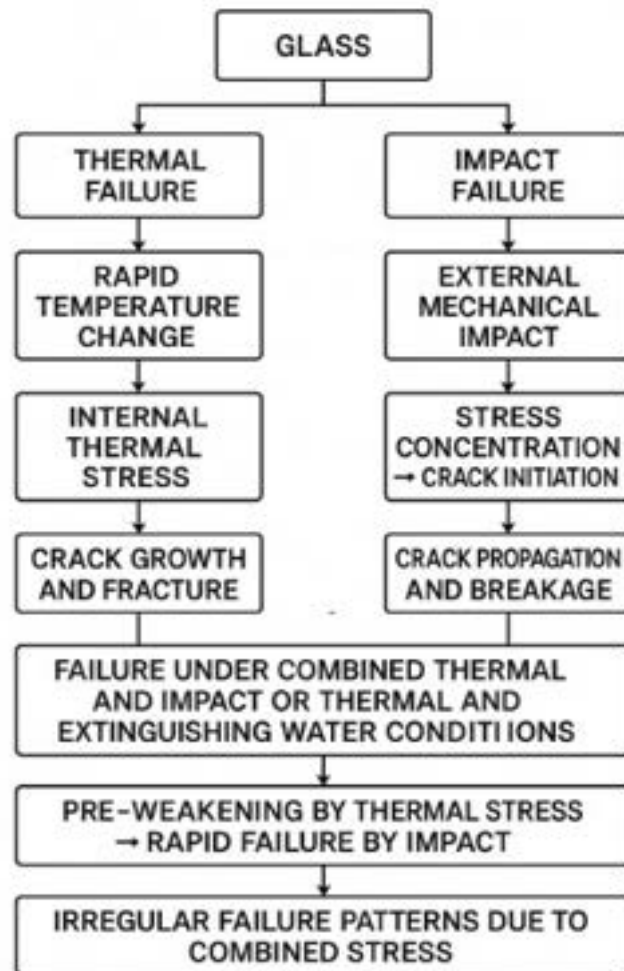
2.6. 유리의 파괴 메커니즘

유리의 파괴 메커니즘은 주로 취성 재료의 특성에 기인하며, 외부 환경과 내부 응력 상태에 따라 다양한 방식으로 나타난다. 먼저, 열에 의한 파괴는 급격한 온도 변화에 의해 유리 내부와 표면 사

이에 온도 구배가 형성되면서 발생하는 열응력에 기인한다. 이 응력이 유리의 인장강도를 초과하면 미세한 균열이 시작되고, 균열이 빠르게 확장되어 파괴로 이어진다. 특히 열충격 저항성이 낮은 유리는 온도 변화가 크고 급격할수록 쉽게 파손된다. 한편, 충격에 의한 파괴는 외부 물리적 힘이나 충격이 유리 표면에 작용할 때 발생한다. 충격 부위에서 국부적으로 응력이 집중되어 균열이 시작되며, 균열은 불규칙적이고 급격한 형태로 전파되어 유리가 파손된다. 유리의 내부 결함이나 표면의 미세 스크래치 등은 충격에 대한 취약성을 증가시키는 요인이다. 복합조건 하에서의 파괴는 열과 충격이 동시에 또는 순차적으로 작용할 때 더욱 복잡한 양상을 보인다.

Table 2. Glass Failure Mechanism

OVERVIEW OF GLASS FAILURE MECHANISM



3 화재 사례 및 분석

3.1 화재개요

- 발생일시 : 2023. 09. 30.(토) 22:51
- 발생장소 : 강원특별자치도 강릉시 ○○○읍 ○○로 ***-***
- 피해내역 : 인명피해 - 없음 / 재산피해 : 138천 원

강릉시 ○○○읍 소재 주택에서 발생한 화재로, 발화지점은 거실 바닥 전기매트 주변으로 관찰되며 <Fig. 1>~<Fig. 3>와 같이 충격에 의한 유리 파손이 관찰되며, 인위적으로 가연물을 배치하여 태운 흔적, 유리창 및 가재도구의 파손 형태를 종합할 때 관계자가 주방 가스레인지 불을 이용하여 방화한 화재로 조사됨.

3.1.1 현장감식 및 화재원인 추론

화재가 발생한 강릉시 소재 주택에서 깨진 유리가 관찰되었다.

유리는 주택 외부로 흩뿌려진 상태로 관찰되었으며 주택 내부에서는 탄화된 가연물이 발견되었다.

유리의 파편은 내부에서의 충격으로 외부에서 다량 관찰되었으며, 파손된 지점에서 직선 형태의 방사형 균열이 퍼져 나가는 양상이 관찰된 점으로 보아 충격에 의한 파손으로 추정된다.



Fig. 1 Breakage pattern



Fig. 2 Breakage pattern



Fig. 3 Breakage pattern

3.2 화재개요

- 발생일시 : 2024. 07. 17.(수) 17:20
- 발생장소 : 강원특별자치도 춘천시 ○○읍 **길 **-**(○○○리 ***-*)
- 피해내역 : 인명피해 : 1명 경상(2도 화상) / 재산피해 : 972천 원

춘천시 ○○읍 소재 단독주택에서 발생한 화재로, 발화지점은 침대 매트리스 상부 한정이며 <Fig. 4>~<Fig. 6>와 같이 발화지점과 인접한 창문이 화재로 인하여 파손되었으며 인근 쓰레기통에서 라이터가 발견되고 라이터 상부가 탄화 소실된 점으로 보아 치매를 앓고 있던 관계인의 부주의(인지 장애)로 인해 발생한 화재로 조사됨.

3.2.1 현장감식 및 화재원인 추론

화재가 발생한 춘천시 소재 주택에서 깨진 유리가 관찰되었다.

발화지점과 인접한 유리를 관찰한바 전체적으로 방사형 균열보다는 곡선형, 비정형 균열이 주를 이루었으며, 파손된 유리 파편은 대체로 크며 작은 파편은 거의 발생하지 않은 점으로 보아 화재 열에 의해 파손된 것으로 추정된다.



Fig. 4 Ignition point.



Fig. 5 Ignition point.



Fig. 6 Breakage pattern

4 선행연구 검토

Table 3. Prior Studies

No.	Title	Written	Summary
1	A Study on the Identification of the Cause According to the Broken Plane Types of Glass	Yong Soo Mun, Ha Sung Kong	Distinguish the causes of broken glass from doors or windows when it is found being originally kept among the remains on the floor in fire site-through test and the properties of the broken plane including the pattern on the plane.
2	A Study on the Shape of Glass Damage due to Flames and Destruction	Hong Ji Ho	Distinguished through the characteristics such as damage caused by water heat waves, such as destruction and destruction patterns
3	Research on Identification of Glass Breaking Pattern	Song Ji-Hun et al.	Based on the comparison of thermal and mechanical properties of pane and tempered glass, the destruction by hitting, the destruction by hydrothermal, and the destruction by waterproofing after a certain hydrothermal are compared and analyzed.

화재 사례와 선행 연구 내용을 검토한 결과 열응력과 충격력에 의해 형성된 파손 형태와 파편의 단면을 분석하여 발화 요인을 특정할 수 있다는 것을 확인하였다. 이를 바탕으로 기존의 연구에서 다루지 않았지만, 안전성을 고려한 유리 종류인 접합유리와 망입유리를 추가하여 실험을 진행하였으며 단일 조건만이 아닌 화재 현장에서 더 많이 접하는 복합 요건(열+소화수, 열+충격)에서의 실험을 통해 유리 파손 형태를 시각적으로 정형화하여 유리의 특성을 더 세밀하게 이해하고 화재조사에 유용한 감식기법을 제시하기 위해 아래와 같은 실험을 진행하였다.

5 화재재현 실험 및 결과 분석

5.1 실험개요

5.1.1. 실험준비

실험에는 일반유리, 접합유리, 망입유리 각각 4장(600mm×600mm, 두께 5mm)을 사용하여 동일한 조건의 실험 세트에서 일관되게 진행하였다. 검은색 판 위에서 망치를 사용하여 충격 실험을 하였으며, 드럼통과 석쇠 위에서 연탄불을 열원으로 하여 열응력, 복합 요건(열+소화수, 열+충격)에 따른 유리 파손 형태를 비교 분석하였다. 그 외 디지털카메라, 캠코더, 열화상카메라를 사용하여 각 실험의 파괴 형태를 촬영 기록하였으며, 실체현미경 등 기타 감식·감정 기구 등을 보조적으로 활용하였다.



Fig. 7 Materials



Fig. 8 Experimental sets.



Fig. 9 Experimental sets.

5.1.2 주요 실험 장비 및 재료



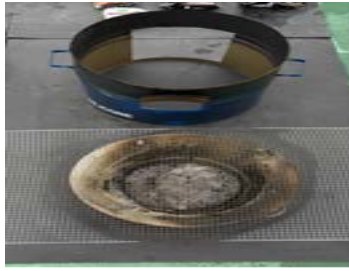
Video Camera



Infrared thermal imaging camera



Microscope



Drum can and brazier



Charcoal



Hammer



3 Types Of Glass



Extinguish water



Safety Equipment

5.2 실험 진행

실험 환경조건은 온도 33.4℃, 습도 28%, 맑은 날씨였다. 실험은 현대 우리 일상에서 상용화된 유리인 일반유리, 접합유리, 망입유리를 사용하였으며 화재 현장에서 자주 접할 수 있는 요건인 열, 충격, 복합 요건(열+충격, 열+소화수)을 가정하여 각 조건 별 유리에 나타나는 파손 형태와 파편의 단면에 관하여 실험하였다.

가. 열응력

드럼통 위에 연탄재를 사용하여 유리를 가열하였을 때 유리 종류별 파괴 온도, 파손 형태 및 파편의 단면을 관찰 후 기록하였다.

나. 충격

검은색 판 위에 유리를 망치로 타격하였을 때 유리 종류별 파손 형태와 유리 파편의 단면을 관찰 후 기록하였다.

다. 복합 요건(열+충격)

드럼통 위의 유리를 각각의 임계온도로 약 20초 정도 가열 후 망치로 타격하였을 때 파손 형태 및 파편의 단면을 관찰 후 기록하였다.

라. 복합 요건(열+소화수)

드럼통 위의 유리를 각각의 임계온도로 20초씩 가열 후 소화수로 급랭하였을 때 파괴되는 온도를 측정하였으며, 파괴 형태 및 파편의 단면을 관찰 후 기록하였다.

• 실험 순 서 •

〈실험 전〉 자료수집, 실험장비 구비 및 세트장 설치

〈실험 1〉 일반유리 열, 충격, 복합 요건(열+충격, 열+소화수)에 의한 파손 비교 실험

〈실험 2〉 접합유리 열, 충격, 복합 요건(열+충격, 열+소화수)에 의한 파손 비교 실험

〈실험 3〉 망입유리 열, 충격, 복합 요건(열+충격, 열+소화수)에 의한 파손 비교 실험

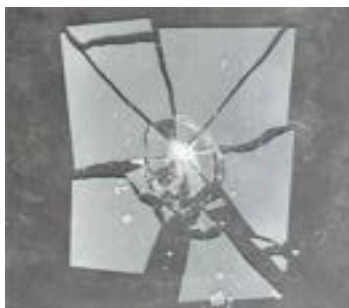
〈실험 후〉 파손 형태 관찰 · 분석, 발화 관련 특이점 감식

5.2.1 제1실험 - 일반유리 충격, 열, 복합 요건(열+충격, 열+소화수)에 의한 파손 비교 실험

5.2.1.1 일반유리 충격 실험

실험은 검은색 판 위에 유리를 올려놓고 망치를 사용하여 진행하였다. 일반 유리의 중앙부를 국소적으로 강하게 타격한 결과, 유리 중심에서 바깥 방향으로 직선 형태의 방사형 균열이 퍼져 나가는 양상이 관찰되었으며, 대부분의 파손 경계는 삼각형 형태를 띠었다. 또한, 충격 에너지가 주변으로 확산되면서 유리의 탄성 한계를 초과한 응력이 집중되어 충격 중심 주위에는 고리 모양의 곡선형 균열(동심원형 균열)도 발생하였다.

파손된 파편을 살펴본 결과, 중심부는 작고 날카로운 유리 조각들로 다수 분열되었으며, 외곽부는 상대적으로 크고 판상 형태의 파편으로 나뉘었다. 전체적으로 작은 조각의 비율은 낮고, 파편 가장자리는 예리한 형태를 보였다. 특히, 대부분의 파단된 유리 조각에서는 리플마크가 관찰되었다.



(a) Broken Shape



(b) Center of Glass



(c) Ripple Mark.

Fig. 10 Impact Test on Float Glass

5.2.1.2 일반유리 열 실험

실험은 드럼통 위 석쇠에 유리를 올려놓고 번개탄을 사용하여 진행하였다. 일반 유리를 열에 노출시킨 결과 약 300℃에서 유리가 (e)처럼 파괴된 모습이 관찰되었다. 각 균열의 길이나 굴곡도는 일정하지 않으며 자연스러운 응력 분산 양상을 보여준다. 전체적으로 방사형 균열보다는 곡선형, 비정형 균열이 주를 이루며, 균열 끝이 유리 외곽까지 도달하지 않고 중간에서 멈춘 부분도 다수 존재하였다.

파손된 유리 파편은 대체로 크고 판상 형태를 유지하고 있으며, 작고 날카로운 파편은 거의 발생하지 않았다. 이는 충격에 의한 파손과 달리, 열로 인한 점진적인 응력 누적과 파괴가 이루어진 전형적인 특성으로 보인다. 또한 파단면에서는 리플마크가 관찰되지 않았다.



(d) Broken Shape



(e) Center of Glass



(f) Ripple Mark.

Fig. 11 Heat Test on Float Glass

5.2.1.3 일반유리 복합 요건(열+충격) 실험

실험은 드럼통 위 석쇠에 유리를 올려놓고 약 240℃로 20초 정도 가열 후 망치를 사용하여 진행하였다. 일반 유리에 열을 가한 상태에서 추가로 국소적인 충격을 가하자, 중심부에는 충격으로 발생한 방사형 균열이 뚜렷하게 형성되었고, 균열은 중심에서 외곽 방향으로 비교적 직선적이며 날카롭게 뻗어 나갔다.

그러나 단순 충격 파손과 달리, 열응력에 의해 이미 내부 응력 상태가 불균일하게 형성된 상태에서 충격이 가해져 일부 균열은 비정형적이며 비대칭적인 곡선 형태가 관찰되었다. 또한 파편의 크기와 형태도 복합적이다.

중심부에는 작고 날카로운 파편이 집중되었고, 외곽부에는 판상 파편이 혼재되어 있다. 이처럼 열과 충격이 복합적으로 작용한 경우, 파손 양상은 단일 충격이나 단일 열응력과는 달리 방사형 균열과 곡선형 균열이 혼합되어 나타나며, 파편의 형태도 이질적이고, 균열 끝이 유리 외곽까지 도달하지 않고 중간에서 멈춘 부분도 다수 존재하였다. 그리고 타격 지점과 가까운 일부 파단된 유리 조각에서는 리플마크가 관찰되었다.

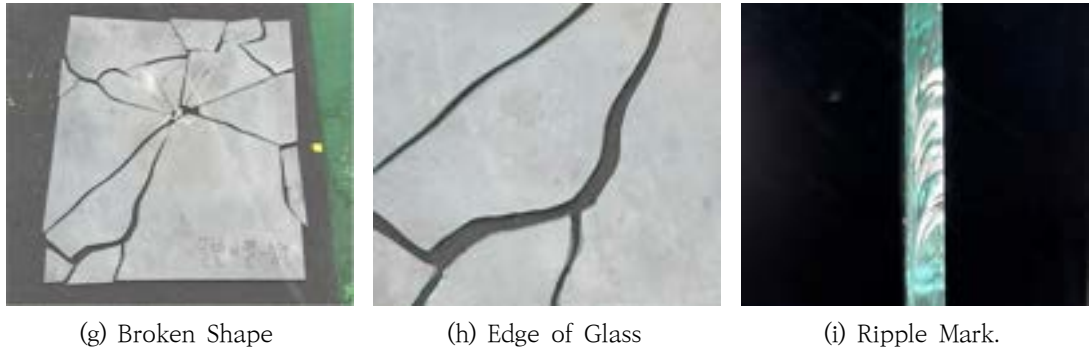


Fig. 12 Combined Heat and Impact Test on Float Glass

5.2.1.4 일반유리 복합 요건(열+소화수) 실험

실험은 드럼통 위 석쇠에 유리를 올려놓고 약 240℃로 20초 정도 가열 후 관창(소화수)을 사용하여 진행하였다. 일반유리를 고온에 노출시킨 상태에서 소화수(찬물)가 급격히 접촉되자, 급격한 온도 차에 의해 강한 열응력이 발생하면서 파손이 유발되었다.

균열은 한 방향으로 집중된 다수의 좁고 긴 균열선이 형성되었고, 일부는 평평하고 일정한 간격의 직선 형태로 확산되었다.

균열은 주로 한쪽 방향(우하단 방향)으로 치우쳐 발달하였으며, 이는 열이 가해진 상태에서 국소적으로 냉각이 이루어진 비대칭적 응력 해소 양상으로 해석된다. 특히 중심부는 응력 집중에 따라 짧은 시간 안에 파단이 발생했으며, 균열 방향이 서로 병렬적으로 정렬된 형태를 보여 단순 열 파손이나 충격 파손과는 다른 특성을 나타냈다. 파편은 전체적으로 얇고 길쭉한 형태가 많았으며, 균열선 사이의 파단면은 일정한 방향성을 유지하고 있어, 열응력과 급랭에 의한 기계적 수축응력의 복합 작용을 강하게 시사한다. 또한 파단면에서는 리플마크가 뚜렷하게 나타나기보다는, 약하게 관찰되었다.

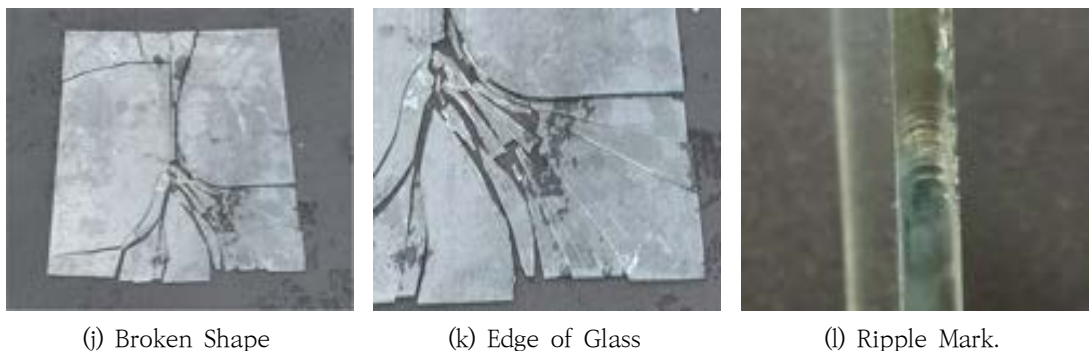


Fig. 13 Combined Heat and Water-Cooling Test on Float Glass

5.2.2 제2실험 - 접합유리 충격, 열, 복합 요건(열+충격, 열+소화수)에 의한 파손 비교 실험

5.2.2.1 접합유리 충격 실험

실험은 검은색 판 위에 유리를 올려놓고 망치를 사용하여 진행하였다. 접합유리의 중심부에 강한 외부 충격을 가하자, 충격점 중심으로부터 미세한 방사형 균열과 동심원형 균열이 매우 촘촘하게 형성되었으며, 전체적으로 유리가 거미줄(crack web) 형태로 균열되었다. 파손된 유리는 파편이 분리되지 않고 접합층(PVB 필름 등)에 의해 제자리를 유지하고 있으며, 이는 접합유리의 구조적 특성을 반영한다. 균열 양상은 중심 타격점에서 매우 세밀한 균열들이 밀도 높게 확산되었고, 외곽으로 갈수록 균열의 간격은 조금씩 넓어지며 완만한 균열 확산 패턴을 보인다. 이는 충격에 의한 급격한 응력 전달이 접합층을 통해 에너지 흡수 및 분산되면서 표면 유리층만 균열되고 전면 비산은 억제된 형태이다.



Fig. 14 Impact Test on General Glass Laminated Glass

5.2.2.2 접합유리 열 실험

실험은 드럼통 위 석쇠에 접합유리를 올려놓고 번개탄을 사용하여 진행하였다. 접합유리를 약 550℃ 고온에 장시간 노출한 결과, 유리 자체의 구조적 파손보다는 내부 접합 필름(PVB)의 열적 손상이 주로 발생하였다. 중심부에서는 고온의 복사열 또는 직접 화염의 영향을 받은 것으로 추정되는 원형의 반투명 변화 영역이 형성되어 있으며, 이 부위는 접합층이 열에 의해 팽창하거나 끊으면서 생성된 기포 및 변색 현상이 특징적으로 관찰된다.

특히 중심부로부터 외곽으로 확산되는 불규칙한 굴절광 패턴과 기포형 흔적들은 접합 필름 내부의 열팽창, 수분 증기화, 점착제 층의 열분해 반응 등을 시사한다. 이러한 형태는 일반적인 균열 중심의 파손과는 명확히 구별되며, 유리 파면은 온전하게 유지되고 있음에도 불구하고 내부에서만 변화가 진행된 비구조적 열 손상 양상이다. 또한, 가장자리를 따라 관찰되는 일부 백탁화 영역과 동심원상 열착 흔적은 고온이 장시간 작용하면서 필름층 내 수분 및 유기 성분이 열화되어 형성된 것으로 보인다.



(d) Broken Shape

(e) Center of Glass

(f) Edge of Glass

Fig. 15 Heat Test on Laminated Glass

5.2.2.3 접합유리 복합 요건(열+충격) 실험

실험은 드럼통 위 석쇠에 접합유리를 올려놓고 약 440℃로 20초 정도 가열 후 망치를 사용하여 진행하였다. 중심 타격점에는 직경이 큰 중심 파괴 영역이 형성되어 있다. 타격점을 중심으로 방사형 균열이 매우 정밀하고 밀도 높게 형성되었으며, 유리층 전체에 걸쳐 균일하게 퍼져 있는 균열망은 접합유리의 두 겹 유리가 모두 손상되었음을 보여준다. 특히 중심부에는 열의 영향으로 내부 필름(PVB)의 변색 및 탁화 현상이 동반되어 있으며, 이는 단순 충격만으로는 설명되기 어려운 열화 반응의 흔적이다. 중심부에서 발생한 방사형 균열은 열에 의해 유리 내 응력이 불균일하게 분포된 상태에서 전파되었기 때문에, 일부 구간에서는 비정형적으로 휘어진 균열도 함께 관찰된다. 또한, 유리 파편은 비산되지 않고 접합층에 의해 고정된 채 잔존하고 있으며, 이는 접합유리의 구조적 특성과 함께 충격 이후에도 비산 억제 기능이 유지되었음을 시사한다.



(g) Broken Shape

(h) Center of Glass

(i) Center of Glass

Fig. 16 Combined Heat and Impact Test on Laminated Glass.

5.2.2.4 접합유리 복합 요건(열+소화수) 실험

실험은 드럼통 위 석쇠에 접합유리를 올려놓고 약 440℃로 20초 정도 가열 후 관창(소화수)을 사용하여 진행하였다.

접합유리를 고온에 노출시킨 상태에서 소화수(찬물)가 급격히 접촉되자, 급격한 온도 차에 의해 유리 중앙부에는 백색의 원형 응력 중심부와 방사형 미세 균열망이 형성되었으며, 전반적으로 열과 급랭이 복합적으로 작용한 전형적인 파손 양상을 보여준다. 특히 중심부는 고온에 의한 필름의 팽창과 소화수에 의한 급속 냉각이 동시에 작용하며 유리 표면과 내부 필름층(PVB 등)의 박리, 기포 형성, 백탁화 등이 동반되었다.

방사형 균열은 유리층 전체에 걸쳐 정밀하게 퍼져 있으며, 일부 균열은 중심으로부터 곡선형으로 퍼지며 소화수의 흐름 방향과 일치하는 경향을 보인다. 또한 균열 간의 간격이 촘촘하고 방향성이 분명하여, 단순 열파손에서 나타나는 곡선·불규칙 균열과는 다르게, 급속 냉각에 따른 급격한 수축 응력에 의해 유리층이 파괴되었음을 시사한다. 유리 파편은 비산되지 않고 접합층에 고정되어 있다.



Fig. 17 Combined Heat and Water-Cooling Test on Laminated Glass

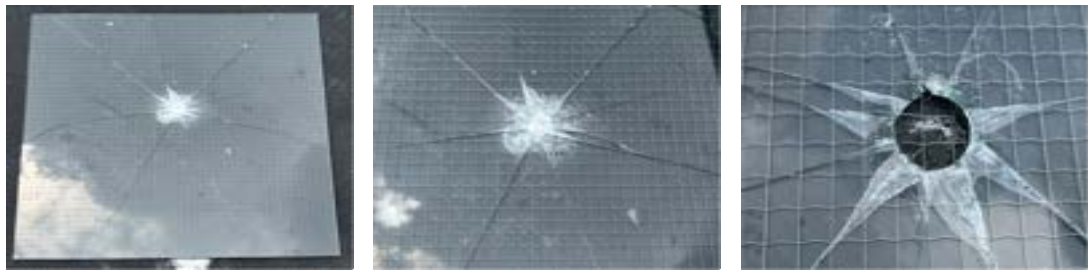
5.2.3. 제3실험 - 망입유리 충격, 열, 복합 요건(열+충격, 열+소화수)에 의한 파손 비교 실험

5.2.3.1 망입유리 충격 실험

실험은 검은색 판 위에 유리를 올려놓고 망치를 사용하여 진행하였다. 망입유리 중앙부에 강한 외부 충격이 가해짐에 따라, 충격점을 중심으로 방사형 균열이 다수 발생하였으며, 균열은 유리판 외곽까지 길게 연장되었다.

충격 중심부에는 백색의 파괴된 유리 입자와 분말 형태의 파편이 관찰되며, 균열이 철망(와이어)을 따라 억제되거나 편향되는 경향도 함께 나타났다. 충격점 주변은 일정한 각도를 이루며 뿔은 다수의 선형 균열이 형성되어 있으며, 강한 충격에 의해 중심부 일부 유리 조각은 탈락, 뚫린 구멍 형태로 관찰된다.

다만 철망 구조가 잔존 유리의 지지대를 형성하며, 전체적인 파편의 이탈이나 비산은 억제되어 있다. 근접 촬영에서 확인된 바와 같이, 철망은 일부 끊어졌거나 늘어났지만 여전히 구조체 내에 남아 있으며, 이로 인해 파손된 유리 조각들이 하나의 연속된 면을 이루며 잔존하는 모습이 관찰되었다.



(a) Broken Shape

(b) Center of Glass

(c) Center of Glass

Fig. 18 Impact Test on Wired Glass

5.2.3.2 망입유리 열 실험

실험은 드럼통 위 석쇠에 망입유리를 올려놓고 번개탄을 사용하여 진행하였다. 망입유리를 약 650℃ 이상의 고온 환경에 노출한 결과, 유리 내부에 비정형적이고 곡선 형태의 균열이 다수 발생하였다. 균열은 급격한 방사형 형태를 보이지 않고, 전체적으로 완만한 곡선 또는 S자형에 가까운 경로로 퍼져 있으며, 이는 열에 의한 파괴 특유의 점진적이고 국부적인 응력 해소 양상을 반영한다.

균열은 철망을 따라 형성되지 않고, 철망 구조를 가로지르며 형성되어 있으며, 일부 균열은 철망에서 멈추거나 방향을 바꾸는 등 응력 확산이 철망에 의해 제한되는 현상도 확인된다.

파편의 이탈이나 비산은 발생하지 않았으며, 유리는 구조적으로 유지된 채 미세한 균열만 진행된 상태로 보인다.



(d) Broken Shape

(e) Center of Glass

(f) Edge of Glass

Fig. 19 Heat Test on Wired Glass

5.2.3.3 망입유리 복합 요건(열+충격) 실험

실험은 드럼통 위 석쇠에 망입유리를 올려놓고 약 520℃로 20초 정도 가열 후 망치를 사용하여 진행하였다. 중심부 충격점에는 백색의 분말 파편과 균열 집중 지점이 형성되어 있으며, 선명한 방사형 균열이 철망을 가로질러 유리 외곽까지 뻗어 나갔다. 일반적인 충격에 의한 균열보다 방사선 균열의 수가 더 많고, 일부 곡선적 또는 비대칭적인 경향이 관찰되었다. 또한, 일부 균열은 철망에

의해 진행이 지연되거나 굴절되어, 철망 구조가 응력 해소 경로에 간섭한 흔적도 명확히 관찰된다. 중심부 유리는 부분적으로 파단되어 파편이 탈락하려는 양상을 보이지만, 철망 구조에 의해 파편의 이탈은 제한되고 있으며, 이는 망입유리의 비산 방지 기능이 여전히 작동하고 있음을 보여준다. 균열 주변부에서는 열에 의해 백탁화된 영역이나 필름 내부의 열착 흔적이 일부 관찰되었다.



(g) Broken Shape

(h) Center of Glass

(i) Edge of Glass

Fig. 20 Combined Heat and Impact Test on Wired Glass

5.2.3.4 망입유리 복합 요건(열+소화수) 실험

실험은 드럼통 위 석쇠에 망입유리를 올려놓고 약 520℃로 20초 정도 가열 후 관창(소화수)을 사용하여 진행하였다. 망입유리를 고온에 노출시킨 상태에서 소화수(찬물)가 급격히 접촉되자, 급격한 온도 차에 의해 열이 집중된 하부 우측 지점을 중심으로 방사형 균열이 형성되었으며, 균열은 유리판 전체로 불규칙하게 확산되었다.

주요 균열 지점에서는 무지갯빛 간섭무늬 및 백화 현상이 관찰되었고, 급속 냉각에 의한 파괴 특성이 뚜렷하게 드러났다. 균열은 철망을 따라 진행되거나 그에 의해 굴절되었으며, 일부 철망 교차 지점에서는 유리의 미세한 박리와 파편화 현상이 동반되었다. 중심부 균열 부근에는 깃털형 또는 터짐형 크랙 패턴이 나타났고, 국부적인 유리 표면 손상이 눈에 띄게 확인되었다. 철망 구조는 여전히 유리 내부에 잔존하며 파손된 유리 조각을 지지하고 있어 전체적인 파편의 이탈이나 비산은 억제된 상태로 유지되었다.



(j) Broken Shape

(k) Center of Glass

(l) Edge of Glass

Fig. 21 Combined Heat and Water-Cooling Test on Wired Glass

6 결론

6.1 실험결론

본 연구는 화재현장에서 빈번히 사용되는 일반유리, 접합유리, 망입유리를 대상으로 열, 충격, 복합 요건(열+충격, 열+소화수)의 네 가지 조건에서 파괴 형태를 비교·분석함으로써, 화재 현장에서 유리 파손 양상을 통해 작용 인자를 추정하고 감식 자료로 활용할 수 있는 근거를 마련하고자 하였다.

실험 결과, 일반유리는 열 및 외부 인자에 취약하여 비교적 낮은 온도 차나 약한 충격에도 파손되었으며, 복합 요건에서는 유리 전체가 조각화되며 파편의 비산이 광범위하게 발생하는 특징을 보였다. 접합유리는 중간막(PVB층)에 의해 파손 시에도 일체성을 유지하는 특성이 두드러졌으며, 특히 충격이나 복합 조건에서도 파편의 이탈이 억제되어 구조적 안정성이 높은 것으로 나타났다. 망입유리는 철망 구조로 인해 균열의 확산이 일부 억제되거나 방향이 변경되었으며, 파손 시에도 철망이 잔류 유리를 지지함으로써 파편의 비산이 제한되는 양상을 보였다. 다만, 열+충격 조건에서는 철망 일부가 늘어나거나 파단되는 현상이 관찰되었다.

복합 요건인 열+충격 및 열+소화수 실험에서는 모든 유리 종류에서 균열의 확산 양상과 파손 형태가 단일 조건에 비해 더욱 복잡하고 불규칙하게 나타났으며, 특히 열로 인해 구조적 약화가 진행된 상태에서 외력이 가해질 경우 파손 저항성이 급격히 저하되는 경향을 보였다. 또한, 열+소화수 조건에서는 급속 냉각으로 인한 백화 현상, 박리, 미세 균열 등이 공통적으로 관찰되었다.

이와 같은 실험 결과는 화재현장에서 유리 파손의 원인을 분석함에 있어, 단순한 파괴 형태만으로 판단하기보다 유리의 종류, 작용한 외부 조건, 파손 범위 및 잔류 형태 등 복합적인 요소를 함께 고려해야 함을 시사한다. 나아가, 본 연구는 향후 유리 파손 감식기법의 정량화와 파손 유형 분류 기준 마련을 위한 기초자료로 활용될 수 있으며, 실제 화재조사 과정에서 유리 잔류물 분석을 통한 발화 추정에 실질적인 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

6.2 화재 조사기법 제시

지금까지 수행한 다양한 재현실험들과 이론적 고찰을 통해, 일반유리, 접합유리, 망입유리가 열, 충격·복합 요건(열+충격, 열+소화수)에 따라 상이한 파괴 양상을 보이며, 이는 화재현장에서 발화지점 추정과 작용 요인 분석에 실질적인 감식 단서가 될 수 있음을 확인하였다. 이에 따라 유리 파손이 관찰된 화재 현장에서 반드시 확인해야 할 화재조사 중점사항을 다음과 같이 제시한다.

첫째, 유리의 종류를 명확히 식별하여야 한다.

유리의 종류에 따라 파괴 양상 및 파편 잔류 형태가 전혀 다르므로, 일반유리, 접합유리, 망입유

리를 구분하는 것은 파손 원인을 추정하기 위한 전제 조건이다. 예를 들어, 접합유리는 충격 시에도 파편이 이탈하지 않으며, 망입유리는 철망에 의해 균열 확산이 제한되는 특성이 있으므로, 이를 오인할 경우 파손 원인 분석에 오류가 발생할 수 있다.

둘째, 파손 중심 및 균열 확산 방향을 정밀하게 분석하여야 한다.

균열의 중심점을 기준으로 열 또는 충격의 작용 지점을 추정할 수 있으며, 이는 곧 발화지점 또는 외력 작용 위치의 단서가 된다. 단순히 탄화나 파편만 보고 판단할 경우 주변 열 영향에 따른 2차 손상으로 오인할 수 있으므로, 균열의 생성 방향성과 시간적 순서를 종합적으로 고려해야 한다.

셋째, 파편 잔류 상태 및 위치를 반드시 확인하여야 한다.

유리 파편이 창틀에 남아있거나 바닥에 원형 상태로 떨어져 있는 경우, 파손 당시의 위치 관계를 추정할 수 있는 중요한 정보가 된다. 특히 접합유리와 망입유리는 파편의 비산이 제한되므로, 일체화된 파편의 위치 분석을 통해 불꽃 확산 경로 및 연소 방향성을 판단할 수 있다.

넷째, 단일 파손 요인 외에 복합 작용 가능성까지 고려하여야 한다.

열과 충격, 열과 소화수의 복합 작용은 균열의 패턴을 왜곡시키거나 다중 균열을 형성시킬 수 있다. 열+충격 조건에서는 균열이 확산되며 철망이 파단되기도 하고, 열+소화수 조건에서는 백화, 박리, 미세 크랙이 증첩된다. 따라서 단일 원인에만 의존하지 않고 복합 조건을 포함한 종합적 감식이 필요하다.

이와 같은 절차는 유리 파손 감식을 보다 과학적이고 체계적으로 접근하게 해주며, 향후 화재조사 과정에서 유리 구성재의 손상 양상을 기반으로 발화 요인을 정밀하게 추정하고 오판을 방지하는데 중요한 기준점으로 기능할 수 있을 것이다.

참고문헌

- 1) 국가화재정보시스템(www.firedata.go.kr) 홈페이지, 화재현장조사서
- 2) 홍지호, “화염 및 파괴에 의한 유리 파손 형태 연구”, 한국화재감식학회 학회지, Vol.2 No2, pp. 47-51, 2010.
- 3) 문용수 외 4, “유리 파단면의 형태 식별에 따른 파손원인 감정에 대한 연구”, 한국화재감식학회 학회지, pp. 12-15, 제3권 제1호, 2003.
- 4) 송지훈 외 2명, “유리 파괴를 통한 화재패턴 분석”, 2017년도 화재재현실험 연구보고서, 강원도 소방본부, 2017.
- 5) 이승훈, “화재조사 이론과 실무-유리”, 동화기술, pp. 79-96, 2023.
- 6) 네이버 지식백과, 유리의 정의 및 역사, 종류별 특징



2025년
화재 재현실험
연구보고서



제 1 장 | 북부권



☑ 광역화재조사 1팀 >>>

열과 충격, 복합 요건에서의 유리 파괴 양상 비교 연구

☑ 광역화재조사 2팀 >>>

건축물의 환기 조건에 따른 발화지점 판정에 관한 연구

☑ 광역화재조사 3팀 >>>

샌드위치패널 건축물 화재 시 나타나는 연소 특성에 관한 연구

건축물의 환기 조건에 따른 발화지점 판정에 관한 연구

이재욱¹⁾, 심영보, 장건우, 신상민, 이승주

강원특별자치도소방본부 북부권광역화재조사 2팀

A Study on the Determination of Fire Origin Based on Ventilation Conditions in Buildings

Jae-Uk Lee[†], Young-Bo sim, Geon-Uo Jang, Sang-Min sin, Seung-Ju Lee
Northern Wide Area Fire Investigation Team 2, Gangwon Fire Headquarters

ABSTRACT

Openings in buildings, as an essential component of human shelter, play a crucial role in daily life by enabling ventilation and access. The diversity in the types, locations, and sizes of these openings leads to varying ventilation conditions, which can significantly influence fire behavior. Consequently, no two fire scenarios are identical. In fire investigations, accurately determining the point of origin is a critical element. However, complex ventilation patterns created by different openings can obscure or mislead origin analysis. This study aims to analyze combustion characteristics under various ventilation conditions caused by building openings. The ultimate goal is to provide scientific data that can assist investigators in accurately identifying the point of fire origin, thereby enhancing the reliability of fire cause determinations.

Keywords : Openings in buildings, Ventilation condition, The Point of fire origin

1 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

국가화재정보시스템에 따르면 지난 3년간 화재통계를 보면 건축·구조물에서 발생한 화재는 74,875건으로 Fig. 1과 같이 전체 화재 중 약 64%를 차지한다. 또한 건축·구조물에서 개구부는 인간이 직접 사용하거나 기반 시설을 위하여 설치되는 모든 통로로서 건축물과는 분리하여 생각할 수 없는 요소이며, 이에 따라 다양한 환기 조건이 나타나게 되고 다양한 연소 방향과 연소 특성이 나타나기 때문에, 발화지점의 명확한 판정을 위해 반드시 이해되어야 하는 부분이다. 실제 화재조사

1) E-mail : leejuk1230@korea.kr

과정에서도 개구부의 존재 여부에 따른 환기 조건이 발화지점 판정에 혼란을 주는 경우가 있으며, 이는 정확한 화재조사를 방해하는 요인으로 작용한다. 이에 따라 본 연구는 개구부의 크기와 위치에 따른 환기 조건이 화염의 이동과 연소 확대에 미치는 영향을 실험함으로써, 더욱 명확한 발화지점 판정을 위한 기초 자료를 확보하고자 한다.

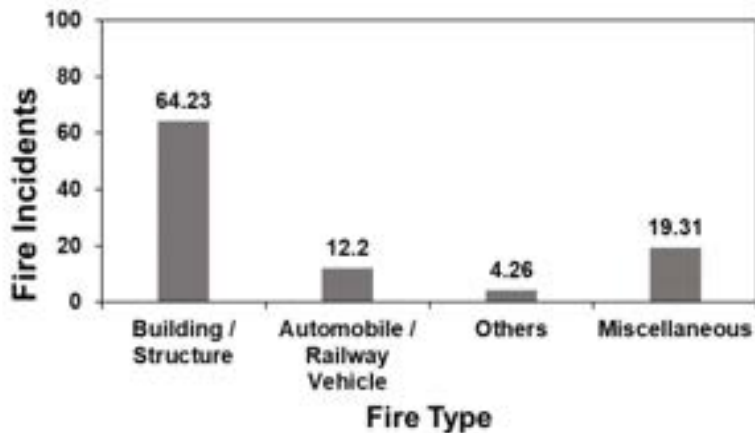


Fig. 1 Three-Year Fire Distribution Chart (2022~2024).

1.3 화재 사례 및 현황

1.3.1 화재개요

- 발생일시 : 2023. 08. 19.(토) 00:44
- 발생장소 : 강원특별자치도 화천군 ○○읍 ○○로 **-* (○리 **-*)
- 피해내역 : 인명피해 : 없음 / 재산피해 : 1,278 천원

화천군 ○○읍 ○리 소재 다가구 주택 1층 원룸에서 발생한 화재로 발화지점은 원룸 우측 이동형 행거 하단부로 추정되며, 발화원인은 실내에서 흡연 후 소화되지 않은 담배꽂이에 의해 발생한 화재로 추정된다.

1.3.2 현장감식

화재가 발생한 원룸은 다가구 주택 1층에 있는 세대였으며, 실내 흡연 후 담배꽂초 처리 과정에서 서의 부주의로 인한 화재로 조사되었다.

현장 감식 결과, 실내에서 가장 큰 소실이 발생한 위치는 Fig. 2와 같이 행거가 놓여 있던 부분이었으나 Fig. 3에서 확인되듯 주방 쪽에 설치되어 있던 에어컨이 열에 의해 소락 되었고 내벽에는

강한 탄화 흔적이 식별되었다. 해당 부위는 개구부가 존재하는 위치였으며 Fig. 4에 보이는 것처럼 연소 방향이 개구부를 향하고 있는 양상이 확인되었다.

이와 같은 사례처럼, 발화지점의 추정 위치가 두 곳 이상으로 식별될 수 있으며, 이는 환기 조건에 따라 연소의 진행 양상과 피해 정도가 다르게 나타날 때 발생할 수 있다. 이러한 특성은 화재조사관이 발화지점을 판정하는 과정에서 혼란을 초래할 수 있는 요인으로 작용한다.



Fig. 2 Ignition point.



Fig. 3 Estimated Ignition point.



Fig. 4 Directionality of Combustion.

1.3.3 화재개요

- 발생일시 : 2023. 03. 31.(금) 22:43
- 발생장소 : 강원특별자치도 춘천시 ○○○로 *** (○○동 ***-**)
- 피해내역 : 인명피해 : 없음 / 재산피해 : 77,791 천원

춘천시 ○○동 소재 음식점에서 발생한 화재로, 발화지점은 남자 화장실 천장부로 추정되며 발화 원인은 남자 화장실 천장에 설치된 전등의 미확인 단락에 의한 화재로 조사되었다.

1.3.4 현장감식

화재가 발생한 건물은 지붕 구조물 아래로 구획실이 만들어져 있는 구조로서 Fig. 5와 같이 공기의 유동이 이루어질 수 있는 구조의 건축물이다. 화재는 화장실 전등의 미확인 단락에 의한 화재로 조사되었다.

Fig. 6은 남자 화장실로 발화지점은 전등이 위치하던 남자 화장실 천장부로 조사되었으나 조사 과정에서 Fig. 7과 같이 주방의 연소 정도가 매우 강해 발화지점으로 추정되었다.

조사 결과 Fig. 5와 같은 지붕 구조물로 인해 화장실 및 주방의 천장 상부의 공간이 개구부로서 역할을 하면서 환기 조건이 형성되었고 남자 화장실 천장부에서 발생한 화재가 상부 공간을 통해 연소 확대되며 주방에도 큰 피해를 주었다. 이 사례와 같이 환기 조건에 의해 발화지점 추정부가 다수 존재할 수 있다는 것을 알 수 있다.



Fig. 5 Attic space.



Fig. 6 Ignition point.



Fig. 7 Estimated Ignition point.

2 이론적 고찰

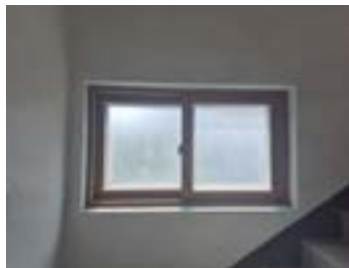
2.1 이론적 배경

2.1.1 개구부 정의

개구부란 채광, 환기, 통행, 투시 등의 목적을 위해 건물의 벽체, 지붕, 바닥 등에 형성된 트인 공간을 의미한다. 이는 사람이 직접 사용하는 문과 창문뿐만 아니라, 설비 기반의 필요 때문에 설치되는 덕트나 배관 등의 구조물도 포함된다(Fig. 8). 이러한 개구부는 화재 공학적 관점에서 공기의 유입과 유출이 발생하는 경로로 작용하여, 화재의 확산과 연소 특성에 영향을 미치는 중요한 요소이다.



(a) Door.



(b) Window.



(c) Duct.

Fig. 8 Types of Openings.

2.1.2 개구부와 관련된 연소현상

고층 화재 발생 시 개구부는 연소 확대와 공기 흐름에 중대한 영향을 미치는 요소로 작용한다. 개구부를 통한 외부 공기의 유입은 구획실 내 연소 반응을 촉진 시키며, 창문이나 문과 같은 개구부가 개방될 경우 산소 공급이 급격히 증가함에 따라 화염의 확산 속도 또한 가속화된다. 이와 함

개 고온의 연기와 열기는 개구부 상부를 통해 외부로 배출되며, 이 과정에서 형성되는 연소 흐름은 화염의 확산 방향에 직접적인 영향을 미친다. 플래시오버(Flashover) 발생 시에는 실내에 축적된 가연성 가스가 일시에 점화되어 개구부를 통해 화염이 분출되며, 백드래프트(Backdraft)는 산소가 고갈된 공간에 외부 공기가 급격히 유입되면서 폭발적인 재연소 현상을 유발한다(Fig. 9). 이처럼 개구부는 구획실 내부와 외부의 연소 현상에 밀접한 상관관계를 형성하므로, 개구부의 구조적 형태와 개방 상태에 대한 분석은 정확한 화재 역학 이해 및 원인 규명을 위해 필수적인 요소이다.

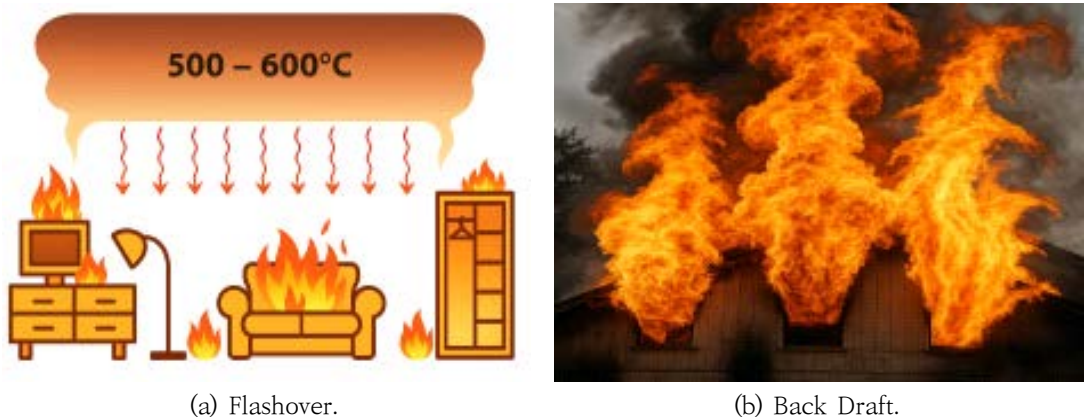


Fig. 9 Combustion Behavior

3 화재재현 실험

3.1 실험개요

본 실험은 북부권 광역조사팀 청사 내에서 실시되었으며, 축소된 구획실 모델을 제작하여 진행하였다. 화원과 가연물의 위치는 고정된 상태에서, 개구부의 크기와 위치를 달리하여 구획실의 벽면, 바닥, 천장에 형성되는 연소 정도를 분석하였다.

실험 세트는 Fig. 10과 같이 90cm×90cm 크기로 제작되었으며, 내부에는 45cm×35cm 크기의 구획실을 두 개 배치하였다. 또한, 개구부는 창문일 경우 20cm×20cm, 문일 경우 20cm×40cm 크기로 각각 제작하였다. 전면 구획실의 전면에는 가연물의 점화를 쉽게 하기 위한 연료 투입구를 제작하였다. 실험에서는 Fig. 11과 같이 전면의 구획실을 발화실(A), 후면 구획실을 구획실(B)로 지정하였으며. 또한 전면 출입구가 있는 공간을 C 구역, 후면 출입구가 있는 공간을 D 구역이라고 지정하였다.

본 실험에 앞서 예비 실험을 진행하였으며, 실험에 사용된 벽지는 일반적으로 가장 많이 사용되는 종이 벽지를 선택하였다.

도배용 밀가루 풀을 물에 희석하여 목재 합판에 도포한 후 벽지를 부착하고 건조하였으며 이후 나사못 등을 이용해 각 부재를 결합하고, 내열 실리콘으로 마감 처리하였다. 가연물은 고체 연료 2개와 동일한 종류 및 양의 종이상자를 각 실에 배치하였다.

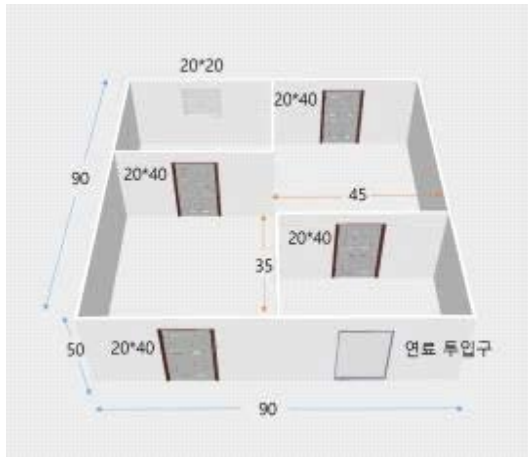


Fig. 10 Experimental setup diagram 1.



Fig. 11 Experimental setup diagram 2.

3.1.2 실험 장비

이에 본 실험에 사용된 주요 장비는 다음 Table 1과 같다.

Table 1. Experiment Equipment

Division	Picture	Model name	Specifications	Purpose of use
Video Camera		HC-VXF1	4K Ultra HD quality 25mm wide-angle lens Optical 24-fold zoom	Video recording
DSLR Camera		Canon EOS 90D	32.5MP image sensor 10-22mm zoom lens	Taking pictures
Anemometer		Kestrel 5500FW	Accurately monitor heat stress index, temp, humidity, wind speed and more	Wind speed measurement

3.2 연구 가설

과거의 화재 사례와 선행 연구 내용을 검토하여 다음과 같은 연구 가설을 설정하였다.

• 연구 가 설 •

1. 개구부의 위치로 연소의 진행이 일어난다.
2. 개구부의 크기가 다르다면 크기가 큰 쪽으로 연소의 강도가 크다.
3. 발화지점과 개구부 인접부의 연소 정도가 강할 것이며, 발화지점 추정부가 다수 존재할 수 있다.

• 실험 순 서 •

- 〈실험 전〉 자료수집, 실험장비 구비 및 세트장 설치(Fig. 12)
 〈예비 실험〉 일반 종이를 붙인 실험 세트(Fig. 14)를 이용한 연소 방향성 확인
 〈실험 1〉 세트 1(출입구 1개)의 연소 방향성 확인(Fig. 13)
 〈실험 2〉 세트 2(출입구 1개, 창문 1개)의 연소 방향성 확인(Fig. 14)
 〈실험 3〉 세트 3(출입구 2개, 창문 1개)의 연소 방향성 확인(Fig. 15)
 〈실험 후〉 연소 방향성 추적·분석, 발화지점 판정



Fig. 12 Experimental setup diagram.

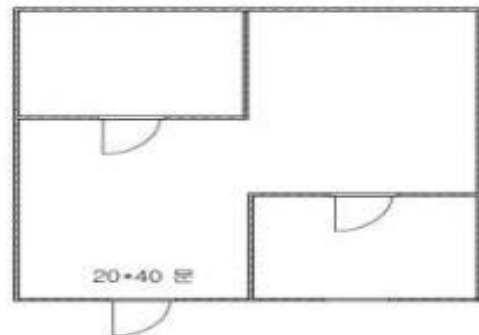


Fig. 13 Set 1 Experimental setup diagram.

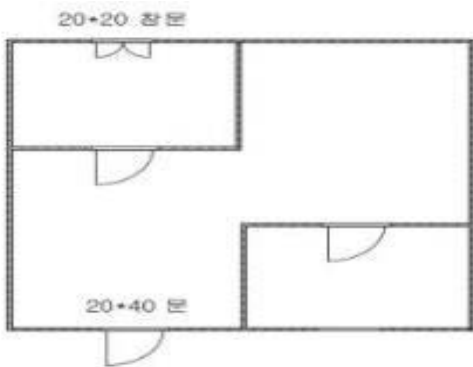


Fig. 14 Set 2 Experimental setup diagram.

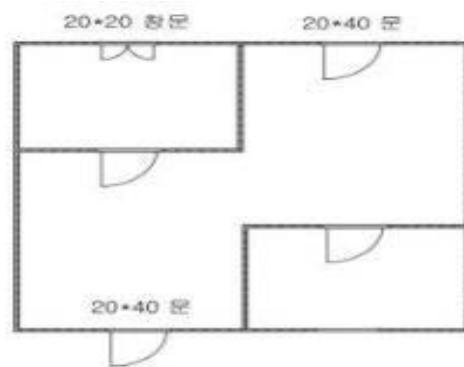


Fig. 15 Set 3 Experimental setup diagram.

3.3 예비 실험(세트 2 구조 적용)

본격적인 실험에 앞서, 나무 합판의 바닥, 천장, 벽면에 일반 벽지를 부착한 후, 정해진 발화실(A)에서 점화하였다. 약 15분간 연소를 진행한 결과, 뚜렷한 연소 진행이 확인되었고, 탄화 정도 또한 매우 강하게 나타났다. 하지만 연소 확대가 활발히 진행되어 연소 상황 분석이 제한되었다(Fig. 16-18). 이러한 예비 실험 결과를 바탕으로 본 실험에서는 연소 시간을 10분으로 줄였으며 연소 확대의 비교를 위해 각 실의 특정 위치에 가연물을 배치하기로 하였다. 또한 개구부 외의 환기 조건을 차단하기 위해 전면에 별도의 연료 투입구를 새로 제작하였다.



Fig. 16 Zone C.



Fig. 17 Zone D.



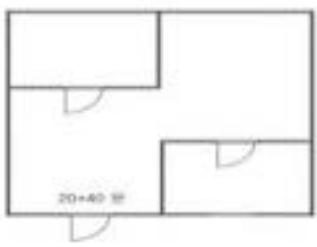
Fig. 18 Ceiling.

3.4 제1실험(세트 1 - 문 1개소)

3.4.1 실험진행

제1실험은 Fig. 19의 (a)와 같이 구성된 세트 1을 활용하여, 연소 방향성과 탄화 정도를 분석함으로써 연소 패턴을 파악하고 발화지점을 판정하기 위한 실험이다.

세트 1은 전면인 C 구역에 20cm×40cm 크기의 출입문 1개만을 개구부로 갖도록 제작되었으며, 동일한 종류의 가연물을 각 실의 지정된 위치에 배치하였다. 점화는 발화실(A)에서 실시하였다. 설계된 개구부 외의 환기 조건을 배제하기 위해, 모든 틈새는 내열 실리콘으로 밀폐 처리하였고, 외부에서 1m/s의 풍속으로 선풍기를 이용해 바람을 주입하였다. 실험 환경 조건은 온도 30℃, 습도 57%, 날씨는 맑음이었다(Fig. 19의 (b)-(c)).



(a) Set 1 Experimental setup diagram.



(b) experimental set 1.



(c) Inside Experimental Set 1.

Fig. 19 Fire Reproduction Test 1.

3.5 제2실험(세트 2 - 문 1개소, 창문 1개소)

3.5.1 실험진행

제2실험은 Fig. 20의 (a)와 같이 구성된 세트 2를 활용하여, 연소 방향성과 탄화 정도를 분석함으로써 연소 패턴을 파악하고 발화지점을 판정하기 위한 실험이다.

세트 2는 전면인 C 구역에 20cm×40cm 크기의 출입문 1개와 구획실(B)의 후면에 20cm×20cm 크기의 창문을 개구부로 갖도록 제작되었으며, 동일한 종류의 가연물을 각 실의 지정된 위치에 배치하였다. 점화는 발화실(A)에서 실시하였다.

설계된 개구부 외의 환기 조건을 배제하기 위해, 모든 틈새는 내열 실리콘으로 밀폐 처리하였고, 외부에서 1m/s의 풍속으로 선풍기를 이용해 바람을 주입하였다. 실험 환경 조건은 온도 30.5℃, 습도 63%, 날씨는 흐림이었다(Fig. 20의 (b)-(c)).



(a) Set 2 Experimental setup diagram.

(b) experimental set 2.

(c) Inside Experimental Set 2.

Fig. 20 Fire Reproduction Test 2.

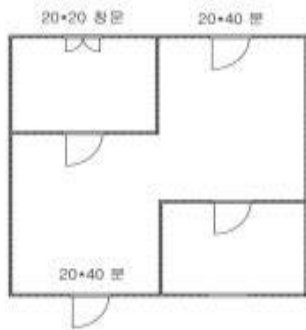
3.6 제3실험

3.6.1 실험진행(세트 3 - 문 2개소, 창문 1개소)

제3실험은 Fig. 21의 (a)와 같이 구성된 세트 3을 활용하여, 연소 방향성과 탄화 정도를 분석함으로써 연소 패턴을 파악하고 발화지점을 판정하기 위한 실험이다.

세트 3은 전면인 C 구역에 20cm×40cm 크기의 출입문 1개와 구획실(B)의 후면에 20cm×20cm 크기의 창문, 후면 D 구역에 20cm×40cm 크기의 출입문을 갖도록 제작되었으며, 동일한 종류의 가연물을 각 실의 지정된 위치에 배치하였다. 점화는 발화실(A)에서 실시하였다.

설계된 개구부 외의 환기 조건을 배제하기 위해, 모든 틈새는 내열 실리콘으로 밀폐 처리하였고, 외부에서 1m/s의 풍속으로 선풍기를 이용해 바람을 주입하였다. 실험 환경 조건은 온도 32.7℃, 습도 69%, 날씨는 맑음이었다(Fig. 21의 (b)-(c)).



(a) Set 3 Experimental setup diagram.



(b) experimental set 3.



(c) Inside Experimental Set 3.

Fig. 21 Fire Reproduction Test 3.

4 결과 및 고찰

4.1 제1실험 - 결과 고찰

1세트 실험에서는 가연물의 배치를 마친 후 덮개를 덮고, 모든 틈새를 내열 실리콘으로 밀폐한 뒤 발화실 내부의 가연물에 점화를 실시하였다.

점화 후 10분 경과 시점에 덮개를 개방하고, 내부의 연소 방향성, 탄화 정도 및 연소 패턴 등을 관찰하였다.

본 실험은 전면인 C 구역에 20cm×40cm 크기의 출입문 1개만을 개구부로 갖는 구조로, Fig. 22의 (a)와 같이 전반적인 연소 확대는 발생하지 않았다.

연소 흔적을 살펴본 결과, Fig. 22의 (b)에서 확인되듯이 발화실(A)에서 주로 연소가 진행되었으며, 인접 공간인 구획실(B)과 D 구역으로의 연소 확대는 Fig. 22의 (c) 및 (d)에서와 같이 식별되지 않았다. 발화실(B)에서는 개구부에 의한 환기 조건보다는 바닥 면을 따라 연소가 확대되는 양상이 나타났다.

이러한 현상을 종합적으로 분석한 결과, 실험 세트를 구성하는 각 실은 벽으로 구획되어 있었고, 외기와 통하는 개구부는 전면인 C 구역에 위치한 20cm×40cm인 출입문 1개소에 불과하여 발화실(A)에서 발생한 화염이 타 실 및 구역으로 확산되기 위한 충분한 환기 조건이 형성되지 못한 것으로 판단된다. 즉, 전면 개구부를 통해 유입되는 공기는 제한적으로 세트 내에 도달했으며, 이에 따라 실 내부의 산소가 부족해지면서 자연 소화되어 연소 확대가 일어나지 않은 것으로 결론지을 수 있다.



(a) Experiment 1 - Full Setup View.



(b) Experiment 1 - Ignition Room (A).



(c) Experiment 1 - Compartment Room (B).



(d) Experiment 1 - Zone (D).

Fig. 22 Fire Reproduction Test 1 - Results.

4.2 제2실험 - 결과 고찰

2세트 실험에서는 가연물을 배치한 후, 덮개를 덮고 틈새를 내열 실리콘으로 밀폐한 뒤 발화실 내부의 가연물에 점화를 실시하였다(Fig. 23의 (a)). 점화 후 10분이 지난 시점에 덮개를 개방하고, 내부의 연소 방향성, 탄화 정도 및 연소 패턴 등을 감식하였다

2 실험은 전면인 C 구역에 20cm×40cm 크기의 출입문 1개와 구획실(B) 후면에 20cm×20cm 크기의 창문 1개가 개구부로 구성된 실험 세트이다.

실험 결과, Fig. 23의 (b)와 같이 발화실(A)에서 시작된 화염은 외부의 구획실(B)과 D 구역 방향으로 연소가 확대되었다.

개구부 관련 연소 흔적을 살펴보면 C 구역과 구획실(B)의 출입문이 강하게 소실된 것으로 나타났다.

이는 전면 출입문과 구획실(B) 후면의 창문이 서로 평행하게 배치되어 내부에 공기의 흐름이 형성되었고, 그로 인해 발화실(A)에서 발생한 화염이 D 구역보다 구획실(B) 방향으로 집중적으로 확대되었기 때문으로 분석된다.

즉, 구획실(B)에 새로 설치된 창문으로 인해 실내 환기 조건이 형성되었고, 이에 따라 1 실험과는 달리 발화실의 화염이 공기 유동이 형성된 구획실(B) 방향으로 확산된 양상을 보였다. 다만, 구획실(B)의 후면 창문은 크기가 20cm×20cm로 전면 출입문(20cm×40cm)에 비해 작았기 때문에 상대적으로 공기 유입량이 제한되었고, 이에 따라 Fig. 19의 (f)와 같이 연소는 구획실(B) 내부로 깊숙이 진행되기보다는 C 구역과 구획실(B)의 출입문에 집중된 강한 연소 흔적으로 나타난 것으로 판단된다(Fig. 23의 (c)-(f)).



(a) Conducting the experiment 2



(b) Experiment 2-Full Setup View



(c) Experiment 2-Ignition Room (A)



(d) Experiment 2-Zone (D)



(e) Experiment 2-Zone (C)



(f) Experiment 2-Compartment Room (B)

Fig. 23 Fire Reproduction Test 2 - Results.

4.3 제3실험 - 결과 고찰

3세트 실험에서는 가연물을 배치한 후, 덮개를 덮고 모든 틈새를 내열 실리콘으로 밀폐한 뒤 발화실 내부의 가연물에 점화를 실시하였다(Fig. 24의 (a)). 점화 후 10분이 경과한 시점에 덮개를 개방하고, 내부의 연소 방향성, 탄화 정도, 연소 패턴 등을 감식하였다.

3 실험 세트는 전면인 C 구역에 20cm×40cm 크기의 출입문 1개, 구획실(B)의 후면에 20cm×20cm 크기의 창문, 그리고 세트 후면인 D 구역에 20cm×40cm 크기의 출입문이 개구부로 구성된 구조이다.

실험 결과 Fig. 24의 (b)와 같이 발화실(A)에서 발생한 화염은 구획실(B)과 D 구역 방향으로 연소가 확대되었으며, 특히 실험 2와 달리 Fig 24의 (d)와 같이 D 구역의 출입문 방향으로 연소 확대가 강하게 진행되는 양상이 확인되었다.

개구부 관련 분석 결과, 구획실(B)의 창문(20cm×20cm)보다 세트 후면 D 구역 출입문(20cm×40cm)의 개구부 면적이 더 크고, 발화실(A)과 직접 면해 있으며 중간에 벽체 등의 구획이 없어 공기의 흐름이 원활하였다. 이러한 조건은 활발한 연소 확대를 유도한 주요 원인으로 판단된다(Fig. 24의 (c)-(f)).

본 실험을 통해 연소 확대는 공기의 흐름이 강한 방향으로 진행된다는 사실을 확인할 수 있었다. 즉, 개구부가 단순히 존재하는 것뿐만 아니라, 개구부의 크기, 위치, 공기 유입 경로를 결정하는 벽체의 유무 등이 복합적으로 작용하여 후면 출입문 방향으로 강한 연소가 진행된 것으로 분석된다.



(a) Conducting the experiment 3



(b) Experiment 3-Full Setup View



(c) Experiment 3-Ignition Room (A)



(d) Experiment 3-Zone (D)



(e) Experiment 3-Zone (C)



(f) Experiment 3-Compartment Room (B)

Fig. 24 Fire Reproduction Test 3 - Results.

5 결 론

5.1 실험결론

본 연구에서는 구획실의 개구부에 따라 나타나는 환기 조건에 따른 연소 현상을 이해하기 위해 재현실험을 진행하였고 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 전면인 C 구역에 하나의 출입문(20cm×40cm)만 존재하는 밀폐된 구조에서는 환기 조건이 제한되어 실 내부의 산소가 빠르게 소모되었고, 이에 따라 연소 확대 없이 발화실(A)에서의 국부적인 연소 후 자연 소화되는 현상이 나타났다. 즉, 제한된 개구부로 인해 연소 확대가 발생하지 않았다.
- (2) 전면 출입문 외에 구획실(B) 후면에 창문이 추가되어 양방향 공기 흐름이 형성되면서, 발화실(A)에서 발생한 화염이 구획실(B) 방향으로 확대되었다. 그러나 구획실 창문의 면적이 작아 산소 공급이 제한되었고 이에 따라 구획실(B) 내부보다는 C 구역과 구획실(B)와 연결되는 벽에 연소 흔적이 집중되었다. 즉, 제한적이지만 환기 흐름이 형성되어 연소 확대가 부분적으로 일어났다.
- (3) 전면 출입문, 구획실(B)의 창문, 세트 후면인 D 구역에 출입문이 모두 존재하는 구조로, 다수의 개구부를 통한 공기 흐름이 형성되면서 활발한 연소 확대가 일어났다. 특히 D 구역 출입문은 면적이 크고 발화실과 직접 연결되어 있어, 공기 유입이 원활하고 벽으로 차단되지 않아 연소가 집중적으로 확대되었다. 즉, 개구부의 위치, 크기, 공기 흐름의 방향성에 따라 연소 확대 경로가 결정되며, 환기 조건이 좋을수록 화염의 확산 범위가 커진다.

5.2 화재 조사기법 제시

본 실험을 통해 건축물 내부 화재에서 개구부의 위치, 크기, 구조적 배치에 따라 환기 조건이 달라지고, 이에 따라 연소 확대 방향과 범위가 결정된다는 사실을 확인할 수 있었다. 발화지점은 일반적으로 최초 착화된 공간이나, 환기 조건이 양호한 방향으로 화염이 확대되면서 연소 흔적이 더 심화되는 경우가 있으므로, 연소 흔적의 강도만으로 발화지점을 단정하는 것은 위험하다.

이에 따라 발화지점 판정을 위한 화재조사 기법으로는 다음 네 가지 요소의 교차분석이 필요하다.

- ① 연소 흔적의 분포 및 강도
- ② 환기 조건(개구부의 위치 및 공기 흐름)
- ③ 연소 확대 패턴 및 자연 소화 여부
- ④ 바닥, 벽 천장 등 건축물의 구조

특히 환기 흐름이 제한된 공간에 나타난 국부적인 탄화 흔적과 연소 패턴은 발화실의 주요 단서가 될 수 있으며, 환기 조건이 양호한 방향의 강한 연소 흔적은 연소 확대 부분일 가능성이 높다. 따라서 구조적 특성과 개구부 조건을 종합적으로 고려한 입체적 분석 기법을 통해 발화지점을 더욱 정밀하게 판정할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- 1) 국가화재정보시스템(www.firedata.go.kr) 홈페이지, 화재통계.
- 2) 화재발생종합보고서(춘천 2023-03-087), 강원특별자치도소방본부, 2023
- 3) 화재발생종합보고서(화천 2023-08-037), 강원특별자치도소방본부, 2023
- 4) 김성찬, “환기조건에 따른 화재거동 연구”, 대한기계학회논문집 B권, 제32권 제5호, pp.367-368, 2008.
- 5) 최원상, “건물 내 공기유동 해석에 외부 바람이 미치는 영향의 분석”, 한국공조냉동공학회지, 제28권 제2호, pp.59-60, 2016.
- 6) 이승훈, “화재조사 이론과 실무”, pp. 36-42, 2019.



제 1 장 | 북부권



☑ 광역화재조사 1팀 >>>

열과 충격, 복합 요건에서의 유리 파괴 양상 비교 연구

☑ 광역화재조사 2팀 >>>

건축물의 환기 조건에 따른 발화지점 판정에 관한 연구

☑ 광역화재조사 3팀 >>>

샌드위치패널 건축물 화재 시 나타나는 연소 특성에 관한 연구

샌드위치패널 건축물 화재 시 나타나는 연소 특성에 관한 연구

김성민¹⁾, 최천용, 이은관, 이상협

강원특별자치도소방본부 북부권광역화재조사 3팀

A Study on the Combustion Characteristics of Sandwich Panel Building Fire

Seoung-Min Kim[†], Cheon-Yong Choi, Eun-Gwan Lee, Sang-Hyeob Lee

Northern Wide Area Fire Investigation Team 3, Gangwon Fire Headquarters

ABSTRACT

Sandwich panels are widely used in logistics warehouses, factories, and refrigeration warehouses due to their insulation, ease of construction, and reusable properties, but the insulation inside the iron plate is vulnerable to flames and quickly reaches flashover in case of fire. As a result, it has already reached its peak before the fire brigade arrives, making it difficult to investigate the fire and extinguish the fire, and there is a limit to determining the ignition point due to severe damage to the remaining structure, and there is also a lack of scientific investigation techniques for sandwich panel fires. Therefore, this study aims to provide basic data that can be used to determine the ignition point by analyzing the combustion characteristics and patterns in the event of a sandwich panel fire.

Key words : Sandwich panels, Insulation, Iron plates, Patterns

1 서론

1.1 연구의 배경

샌드위치패널은 내부나 외부에 별도의 마감이 필요 없고 단열재가 포함되어 단순 공정으로 처리할 수 있는 간편함과 해체 후 재사용이 가능하여 공사비를 대폭 절감할 수 있다는 점에서 물류창고, 공장, 냉동창고 및 임시 건축물 등 건축에 널리 사용되고 있다.

샌드위치패널 특성상 화염에 취약한 중간 단열재가 철판으로 감싸져 있어 화재 시 온도가 빠르게 상승하여 플래시오버에 이르기까지 시간이 약 5~7분밖에 소요되지 않아 소방대가 도착 전에 최성기에 이르러 화재조사 및 진압과정에 있어 큰 어려움을 가지고 있는 현실이다.

1) E-mail : smkim5154@korea.kr

그러나 이처럼 화재조사와 진압과정 등 어려움이 지속적에도 샌드위치패널 화재에 대한 규격화된 조사 기법 및 과학적 근거는 상당히 부족한 실정이다. 샌드위치패널 건축물 화재의 특성상 단시간에 플래시오버에 이르러 현장이 심하게 소손된 상태에서 발화지점을 판정하는 것은 쉽지 않으며 감식자에 따라 주관적인 해석이 될 수 있다는 문제가 있다. 하지만 화재 원인 규명의 전제 조건은 명확한 발화지점을 찾는 것으로 화재조사관은 발화지점을 판정하기 위해 연소의 방향성, 벽면의 화재 패턴 등 건축 구조물에 남은 연소 특성 등을 감식 및 분석하는 방법을 활용하고 있다.

1.2 연구의 필요성 및 목적

샌드위치패널에 관한 선행 연구는 주로 예방 목적과 건축학적 측면의 분석에 관한 것이 대부분이었으며 화재조사 및 감식에 대한 연구는 부족한 실정이다. 화재조사관들은 실제 화재 현장에서 조사 과정에 있어 발화지점 판정에 혼란을 일으키는 연소 경로와 패턴 등을 경험한 적이 있을 것이다. 본 실험 결과를 바탕으로 화재 발생 시 나타나는 샌드위치패널의 연소 특성을 분석하여 화재 현장 조사 및 화재 감식에 사용할 수 있는 자료와 샌드위치패널 화재 시 나타나는 특이 연소 양상이나 화재 패턴을 정리함으로써 화재조사 시 발화지점 판정 및 연소 경로 추정에 활용이 가능한 자료를 마련하는 것을 목적으로 한다.

2 이론적 고찰

2.1 샌드위치패널 개요

2.1.1 샌드위치패널

샌드위치패널(sandwich panel)은 주로 산업시설, 물류창고, 축사, 냉동창고, 임시 건축물 등 다양한 곳에서 외벽 또는 지붕 재료로 사용되는 건축 자재의 일종으로 샌드위치라는 이름처럼 두 겹의 금속판 사이에 단열성을 갖춘 충진재를 삽입하여 일체형으로 제작된 형태를 가지며 외부의 금속판은 구조적 안정성과 기밀성 확보, 충격 등 환경요소에 대한 방어 역할을 하고 내부의 충진재는 단열성, 방음, 경량성의 기능을 갖춘다.

2.1.2 샌드위치패널 역사

샌드위치패널은 오늘날 다양한 건축 및 산업분야에서 사용되는 자재이지만 그 기원은 건축이 아닌 항공우주 산업에서 시작되었다. 샌드위치 구조의 개념은 2차 세계대전 당시 항공기 개발 과정에서 처음 도입되었으며 고강도이면서 가벼운 소재에 대한 수요가 커지자 견고한 외피 사이에 가벼운

재료를 넣어 구조적으로 안정적인 복합재를 만드는 기술이 도입되었다. 이 구조가 오늘날 샌드위치 패널의 원형으로 이후 이러한 복합재 기술은 민간 건축 분야까지 도입되었고 조립식 구조물과 산업용 건축물에 효율적으로 적용되어 경량성, 단열성, 시공의 편의성 등의 장점 덕분에 점차 건축 자재로서의 입지를 넓히게 되었다.

한국에서는 1970년~80년대 산업화와 도시화 과정에서 본격적으로 도입되기 시작했으며 당시 경제 성장과 급증하던 산업시설 수요에 대응하기 위해 조립식 건축이 빠르게 보급되었고 대중화되었다. 이 시기부터 건설업계에서는 값싸고 빠르게 지을 수 있는 외장재로 인식되었고 오늘날의 샌드위치패널은 단순한 단열재를 넘어 내화, 방음, 미관 개선 등 다양한 기능을 갖춘 제품으로 기술개발이 활발하게 진행되고 있다.

2.1.3 샌드위치패널 특성과 위험성

샌드위치패널은 간편한 설치와 시공 기간이 짧아 경제적으로 매우 효율적인 자재로 활용되고 있으나 금속판 내부의 충진재는 대표적으로 폴리스티렌폼(EPS), 폴리우레탄폼(PU), 글라스울 미네랄울 등이며 이들 소재는 대부분 가연성 물질로 구성되어 있어 화재에 매우 취약하다는 단점을 함께 지닌다. 난연성의 충진재를 사용하면 화재로부터 비교적 안전하다는 장점이 있으나 가격이 비싸며 특히 저렴한 폴리우레탄이나 폴리스티렌폼 계열은 불꽃에 노출될 경우 급격한 연소가 시작되고 유독가스를 다량으로 방출하므로 인체에 치명적인 영향을 미칠 수 있다. 패널 내부의 연소는 구조적으로 밀폐된 공간 안에서 진행되기 때문에 산소의 공급이 원활하지 않아 일산화탄소와 같은 불안전 연소 생성물이 발생하며 내부 압력의 증가로 인해 화염이 급격하게 분출되거나 확대되는 백드래프트나 플래시오버 상황이 발생하기도 한다. 또한 금속판 사이 밀폐된 공간 안에서의 연소 확산으로 인하여 소화수의 공급이 어려워 샌드위치패널 건축물에서 발생한 화재는 진화가 매우 어렵고 진압대원의 내부 진입도 위험을 수반하며 급격한 연소 확산으로 발화지점이나 연소 경로의 조사도 복잡하게 만든다.

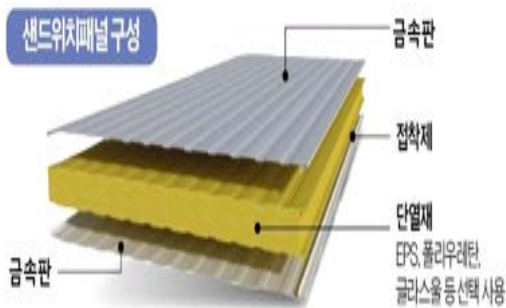


Fig. 1 Sandwich panel composition.

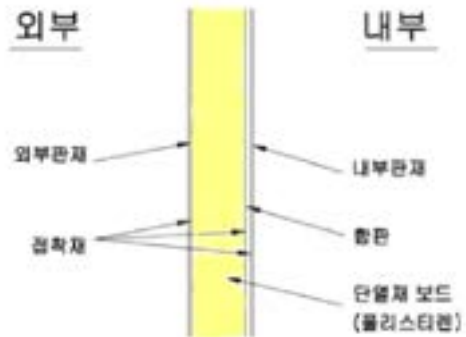


Fig. 2 Sandwich panel structure.

2.2 선행연구 검토

Table 1. 선행연구 정리

순번	제 목	저 자	주요 내용
1	현장사례분석의 비교 감식을 통한 화재원인 분석 조립식 샌드위치패널 화재사례를 중심으로	김용운	조립식 건축물인 샌드위치패널 건축물의 화재 사례를 중심으로 화재원인 분석과 감식방법에 대한 고찰과 발화 개연성 비교 검토
2	콘칼로리미터를 사용한 샌드위치패널 연소특성에 대한 실험적 연구	박수영 외 2명	샌드위치패널의 화재안전성능 평가를 위하여 KS F 2271(건축물의 내장재료 및 구조의 난연성 시험방법)이 사용되었으나 본 연구에서는 샌드위치패널의 연소특성을 ISO 5660-1 콘칼로미터 시험방법을 사용하여 국내에서 일반적으로 사용되는 샌드위치패널 4종의 착화시간, 열 방출율, 총 열방출량을 검토하여 시험결과를 분석
3	외부화염에 의한 샌드위치패널 충전재 연소시험	홍이표 외 2명	폴리스티렌폼 패널과 우레탄 패널, 글라스울 패널에 외부화염에 의한 샌드위치패널의 연소시험을 실시하여 비교 분석

샌드위치패널 선행 연구 내용을 검토한바 샌드위치패널 내장재 종류에 따라 화재 확산 비교실험 및 연구를 진행하여 예방 목적으로 건축법 규제, 단열재 사용 기준 강화 등 건축학적으로 접근한 연구가 대다수로 화재 발생 시 나타날 수 있는 연소 특성, 연소 패턴 등 특이점을 기준으로 한 재 현실험 및 연구가 더 필요하다고 판단된다.

3 화재 사례 및 분석

3.1 화재 사례 1

3.1.1 화재개요

도내에서 2025. 04. 15.(화) 17:45경 단독주택 보일러실에서 발생한 화재로 발화지점은 심야보일러 온수탱크 하부로 조사되었으며 인입선에서 절연열화에 의한 단락이 발생한 화재로 추정된다.

3.1.2 화재 사례 분석

화재가 발생한 샌드위치패널로 지어진 보일러실 외부의 모습은 발화지점과 인접한 우측 샌드위치패널 하부(Fig. 4)에서 강한 수열흔이 식별되나 후면의 샌드위치패널(Fig. 3)에서 더 강한 수열흔이 식별된다.

이는 바닥에서 시작된 화염이 샌드위치패널 접합부와 벽면을 타고 상승하였고 뜨거운 열기류가 부력에 의해 상승하여 샌드위치패널 접합부 상부에 축적되면서 후면부로 다시 하강하며 후면에 있는 화재하중이 큰 매트리스에 연소 확대되어 후면부에 강한 수열흔이 발생한 것으로 추정되며 발화 지점 판정에 대한 오인의 가능성이 있다.

샌드위치패널 건축물 구조, 접합부의 형태, 가연물의 양에 따라 나타나는 연소 흔적과 패턴 등을 주의해야 한다.



Fig. 3 The rear part.



Fig. 4 The right side.



Fig. 5 Ignition point.

3.2 화재 사례 2

3.2.1 화재개요

도내에서 2023. 04. 14.(금) 21:26경 육류 가공공장에서 발생한 화재로 발화지점은 식자재 창고 캐비닛 후면부로 추정되며 컴프레서 전원선에서 미확인 단락에 의해 발생한 화재로 추정된다.

3.2.2 화재 사례 분석

화재가 발생한 공장은 샌드위치패널 구조로 외부의 모습이 2층 및 지붕에서 강한 피해가 관찰된다. 식자재 창고 내부(Fig. 7)의 사진 우측 벽면에서 좌측 벽면으로 강한 수열로 소훼된 방향성이 식별되며 발화지점이 2층 또는 우측 벽면으로 판정을 할 수 있으나 발화장소의 연소상황과 내부 및 외부의 영상기록장치를 분석한 결과 발화지점은 같은 벽면 좌측에 위치한 캐비닛 후면부로 추정된다.

일반적으로 벽면에 화재가 발생할 시 하부에서 상부로 'V' 연소 패턴을 그리며 확대되지만 현장의 샌드위치패널 벽면에서는 하부에서 상부로 진행된 형태와 다시 상부에서 하부로 진행되는 형태와 같이 특이한 연소패턴이 관찰되었으며 이는 샌드위치패널 간 이어지는 접합부의 형태와 가연물의 배치 구조에 따라 특이한 연소 형태를 나타내는 것으로 추정된다.



Fig. 6 Roof and a second floor.



Fig. 7 Inside the food pantry.



Fig. 8 Ignition point.

위의 두 화재 사례와 같이 현장에서 샌드위치패널의 연소된 모습을 보았을 때 강한 수열 흔적, 연소의 방향성, 벽면의 화재 패턴 등 건축 구조물에 남은 연소 특성으로 발화지점을 특정하기 위한 많은 자료가 수집되고 있으나 샌드위치패널에 나타나는 강한 수열흔과 방향성이 발화지점이라고 오인하게 만드는 연소 흔적이 발생하는 경우가 있으며 단순히 강한 수열흔이 식별되는 지점이 발화지점이 아닐 수도 있다는 것을 알 수 있다. 또한 연소경로가 특이한 경우도 있으며 외부 철판의 탄화 형태, 내부 내장재의 탄화 형태, 가연물의 양, 주변의 발화 원인 존재 여부 등을 종합하여 발화지점 판정을 해야 할 것으로 판단된다.

4 화재 재현실험

4.1 실험 개요

이 연구는 샌드위치패널을 연소시켜 화재조사 감식 시 활용 가능한 자료를 수집하기 위한 실험이다. 샌드위치패널 각 실험 세트의 구조를 변경하여 축소 제작하고 화원 위치(발화 지점)를 변경하여 나타나는 연소의 흔적, 방향성, 잔류물 등 탄화 양상과 연소의 특이점 등의 분석을 중심으로 한 실험을 실시하고자 한다.

4.1.1 실험 방법

본 실험에 사용되는 샌드위치패널은 비난연성 EPS(Expanded Polystyrene) 충전재가 포함된 일반 패널을 사용하며 패널은 가로 1m×세로 2m 및 가로 1m×세로 1m의 크기로 두께는 50T로 통일하였다. 샌드위치패널은 각 실험마다 조립 및 제작하였으며 각 실험에 사용되는 샌드위치패널의 조립은 유바와 외부 엘바, 내부 엘바를 이용하여 접합부를 고정하였고 각 발화 지점별 종이 박스와 건조된 나뭇가지를 잘게 쪼개어 가스 토치로 착화 및 연소시켰다. 가연물인 종이박스와 건조된 나뭇가지의 양을 1kg으로 제한하여 화염의 높이와 발열량의 차이를 최소화하고자 하였으며 연

소 시간은 샌드위치패널이 더 이상 연소 확대가 진행되지 않거나 연소가 자연적으로 멈출 때까지 진행하였다.

열전대 및 열화상카메라를 활용하여 연소 중 열 확산 양상을 기록하였으며 실험 공간의 환기 조건은 자연 환기 상태에서 진행하였다.

4.1.2 실험 장비

Table 2. Equipment used in the experiment

Division	Picture	Model Name	Specifications
Sandwich panels		Non flame retardant EPS panel	1m×2m/50T 1m×1m/50T
Video Camera Set		HC-VXF1	4K Ultra HD Quality 25mm wide-angle lens
Thermal Imaging camera		FLIR T420	-20C to 1,200C Temperature Detection
Infrared thermal imaging camera		Hikmicro B10	Measurement temperature range : -20~550℃

4.2 실험 진행

4.2.1 예비 실험

본격적인 실험의 과정을 시작하기 전에 샌드위치패널 벽면 하부를 가스토치로 30초간 가열해 보았다. 가스토치 사용을 중단한 뒤 접점 부위 근처 철판에서 팽창 현상이 확인되었으며 하부로 연기가 발생하였고 30초 후 연소가 멈췄다.

철판의 경우 불꽃이 닿은 중심부가 국부적으로 변색 및 탄화되었으며 내장재는 용융되어있는 모습이 관찰되었다.

가스토치와 같이 강한 열이 한곳에 집중되면 내장재는 용융되어 내부에 가연물이 없는 상태가 되고 공기의 순환도 이루어지지 않아 연소 확대가 이루어지지 않았으며 자연 소화가 되었다.



Fig. 9 Sandwich panel Ignition point.



Fig. 10 Inside the sandwich panel.

4.2.2 제1실험 - 발화 지점별 나타나는 연소 형태 및 연소 패턴

첫 번째 실험은 샌드위치패널 벽면(1m×1m)에 화원(발화 지점)의 위치를 A, B 지점으로 하였고 상부인 A지점의 경우 벽면에 거치대를 고정하여 가연물을 적치하였다.

샌드위치패널 벽면에 숫자 1부터 4까지 열전대를 부착하여 시간에 따른 온도 상승 및 연소 진행 경로나 열 분포를 분석하였고 열화상카메라로 온도가 상승 및 이동하는 양상을 영상으로 기록하여 연소 확산 경로를 분석하였다.

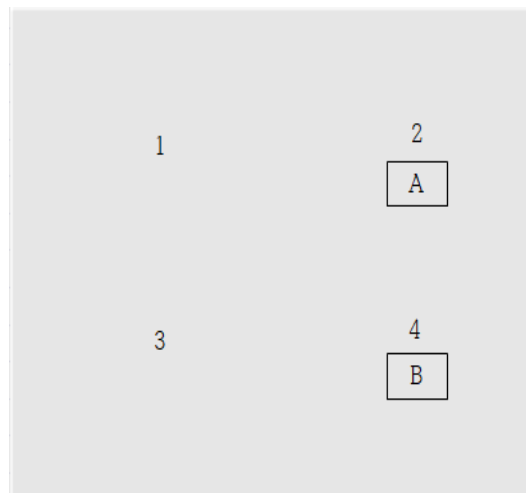


Fig. 11 An experimental set.



Fig. 12 Ignition point A.



Fig. 13 Ignition point B.

4.2.3 제2 실험 -발화 지점별 접합부에 나타나는 연소 형태 및 연소 패턴(‘ㄷ’ 구조)

제2실험은 ‘ㄷ’구조 샌드위치패널 세트(1m×1m×1m)와 샌드위치패널 세트(1m×2m×1m)를 제작하여 화원(발화 지점)의 위치를 A, B 지점으로 하였고 상부인 A의 경우 벽면에 거치대를 고정하여 가연물을 적치하였다.

샌드위치패널 벽면 숫자 위치에 열전대를 부착하여 시간에 따른 온도 상승 및 연소 진행 경로나 열 분포를 분석하였고 열화상 카메라로 온도의 상승 및 이동하는 양상을 영상으로 기록하여 연소 확산 경로를 분석하였다.

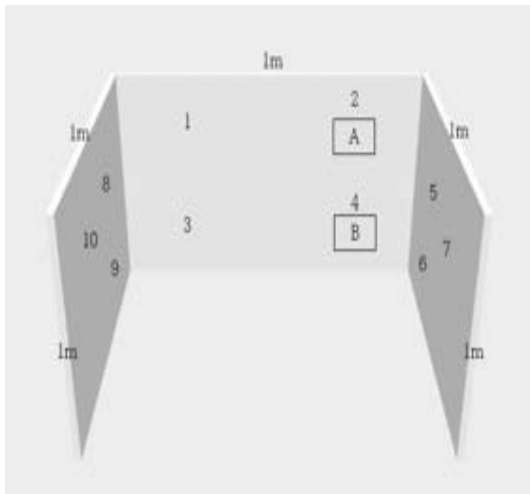


Fig. 14 1m×1m×1m set.

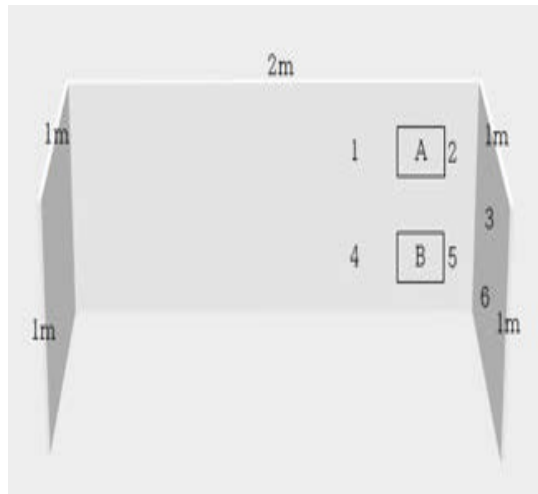


Fig. 15 1m×2m×1m set.



Fig. 16 Ignition point A.



Fig. 17 Ignition point B.



Fig. 18 Ignition point A.



Fig. 19 Ignition point B.

4.2.4 제3실험 - 지붕이 있는 경우 샌드위치패널에(1m×2m) 나타나는 연소 패턴

제3실험은 ‘ㄷ’ 구조 샌드위치패널 세트(가로 1m×세로 2m)에 지붕을 덮고 전면에 출입구가 있는 형태로 제작한 후 화원(발화 지점)의 위치를 벽면 중앙으로 하였다.

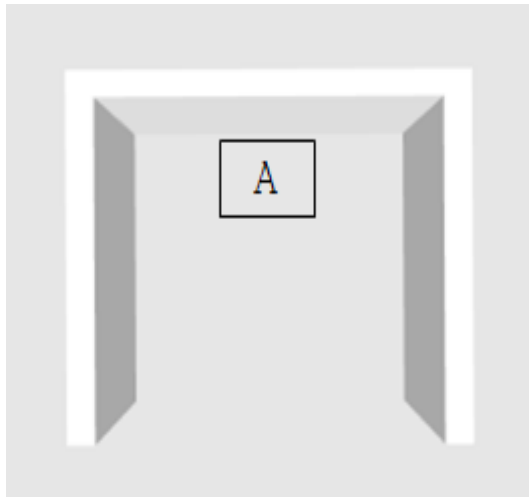


Fig. 20 Ignition point A.



Fig. 21 An experimental set.

4.2.5 제4실험 - 가연물이 다량으로 존재할 때 나타나는 연소 패턴

제4실험은 ‘ㄷ’ 구조 샌드위치패널 세트(가로 2m×세로 1m)에 지붕을 덮고 전면은 개방되어 있는 형태로 제작하였다. 화원(발화 지점)의 위치를 A 지점으로 하였고 B와 C 지점에 다량의 가연물인 종이박스와 건조된 나뭇가지를 두었다.

실험의 시간은 샌드위치패널이 더 이상 연소 확대가 진행되지 않거나 연소가 자연적으로 멈출 때까지 진행하였다.

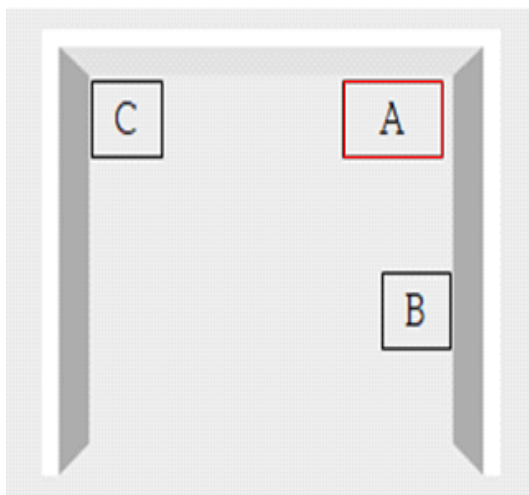


Fig. 22 Ignition point A.



Fig. 23 An experimental set.

4.3 실험 결과

4.3.1 제1실험 결과

제1실험에서 화원(발화 지점) A 지점의 경우 좌측(2sp)보다 하부(3sp)로 온도의 상승 및 이동하는 형태로 진행되었으며 실험 시작 10분 이후 화염이 사라지며 자연 소화되었고 화원(발화 지점) B 지점의 경우 초기에는 삼각형 형태로 연소가 진행되다 상부까지 확대된 순간직선 형태를 유지하며 좌측으로 이동하는 양상이 나타났다.

내장재가 2/3 정도가 연소된 순간 구조체가 불안정해지며 전도 되었고 A, B 두 지점의 화원 위치에서만 강한 수열흔이 나타났으며 상부가 발화지점인 경우 좌측보다 하부로 연소가 진행되는 것이 관찰되었다.



Fig. 24 Ignition point A.



Fig. 25 An experimental set.



Fig. 26 Ignition point A.



Fig. 27 An experimental set.

4.3.2 제2실험 결과

‘C’ 구조로 구성된 샌드위치패널 세트(1m×1m×1m)에서 A지점을 발화지점으로 설정하여 실험을 진행한 결과 내부와 외부 철판 모두 발화 지점 주변에서는 강한 수열흔이 집중적으로 관찰되었으나 나머지 철판 표면에서는 뚜렷한 열 변색이나 탄화, 변형 등 화재에 의한 영향이 관찰되지 않아 화재의 확산이 발화 지점을 중심으로 국소적인 진행이 되었음을 알 수 있다.

내장재의 연소 양상을 살펴보면 초기 발화지점에서 시작된 연소가 우측 벽면 방향으로 연소가 진행되며 ‘V’자 형태의 연소 패턴이 관찰되었다. 내장재의 연소가 하부에서 상부로 진행되었음을 보여주며 발화 지점 아래쪽으로 내장재가 용융 또는 탄화되며 소실된 흔적이 확인되었다.

하부 방향으로의 연소 이동은 중력에 따라 용융된 내장재가 흘러내리는 현상과 더불어 연소가 위에서 아래로도 일정 부분 진행되었음을 나타낸다. 그러나 연소가 더 이상 확산되지 않은 것으로 보아 상부에서부터 내장재가 이미 연소되어 가연성 물질이 더 이상 존재하지 않았던 것으로 판단되며 이에 따라 외부에서의 소화 조치 없이 연소가 자연스럽게 중단된 것으로 추정되며 화재가 전체 구조로의 확산이 이어지지 않았다.



(a) An internal steel plate.



(b) Interior material.



(c) An external steel plate.

Fig. 28 Results of point A of the first experiment.

B 지점에서 실험을 진행한 결과 외부 철판의 하부, 상부, 접합부 등에서 발화 지점으로 오인할 수 있을 정도의 강한 수열흔이 관찰되었으며 하부에 열이 국소적으로 집중되며 복수의 수열 지점을 형성하였다.

특히 우측 접합부에서는 상부와 하부 모서리 모두에서 강한 수열흔이 확인되었으며 이는 열이 접합부를 따라 상하 방향으로 이동되었음을 보여준다. 반면 좌측 접합부에서는 상부에만 연소 흔적이 제한적으로 관찰되었는데 열 확산이 하부에서 상부로 이동하며 접합부에서 연소의 이동이 멈추고 상부에만 연소 흔적을 나타냈다.

내장재의 연소 양상에 있어서는 발화지점을 중심으로 ‘V’자 형태의 전형적인 연소 패턴이 식별되었으며 이는 화염이 우측과 좌측 벽면을 타고 상승하며 퍼져나갔음을 의미한다. 또한 내부 철판을 바닥면으로 배치하였을 때 내장재의 연소 흔적이 마치 모래시계 형태와 유사한 패턴으로 나타났다.



(a) An internal steel plate.



(b) Interior material.



(c) An external steel plate.

Fig. 29 Results of point B of the first experiment.

실시한 ‘ㄷ’ 구조의 샌드위치패널 세트에서 가로 벽면(1m×2m×1m)의 길이를 기존 1m에서 2m로 변경한 후 A 지점을 발화지점으로 설정하여 실험을 실시한 결과 발화 지점뿐만 아니라 하부 철판에서도 강한 수열흔이 관찰되었다. 특히 하부에 나타난 수열흔은 실제 발화가 하부에서 시작된 것처럼 보일 정도로 뚜렷한 연소 흔적을 남겨 발화 위치에 대한 오인을 유발할 수 있는 연소 패턴이 형성되었음을 보여준다. 연소 진행 양상을 분석해 보면 화염은 상부에서 발화한 후 내장재를 녹이며 하부로 확산되었고 이 과정에서 ‘V’자 형태의 연소 패턴이 형성되었다.

상부 내장재는 고온에 의해 용융되어 액체 상태로 변한 뒤 중력에 의해 하부로 흘러내렸고 이 용융물이 하부 철판과 접촉하며 화염을 동반한 강한 수열흔을 남긴 것으로 추정된다. 이러한 과정은 연소 진행 중 발생한 열과 물질 이동이 연소 흔적에 어떠한 영향을 미쳤는지를 잘 보여준다.

상부의 내장재가 대부분 연소되어 하부로 녹아내린 이후에는 더 이상 연소 가능한 가연물이 남지 않았기 때문에 상부로의 연소 확산은 일어나지 않았으며 외부 소화 조치 없이 자연스럽게 연소가 종료되었다. 또한 우측 접합부의 경우 상부 모서리 일부에만 제한적으로 연소 흔적이 관찰되었으며 이는 연소가 구조 전체로 균등하게 확산되지 않고 하부 위주로 진행되었음을 보여준다.

본 실험에서는 상부 발화로 시작된 연소가 하부로 전이되며 뚜렷한 V자 패턴을 형성하고 용융물에 의해 하부에 강한 수열흔이 식별되었다.



(a) An internal steel plate.



(b) Interior material.



(c) An external steel plate.

Fig. 30 Results of point A of the first experiment.

B 지점을 발화지점으로 설정하여 진행한 실험에서는 발화 지점뿐만 아니라 가운데 좌측 하부에서도 강한 수열흔이 식별되었으며 실제 발화 위치를 혼동하게 할 수 있는 연소 흔적을 보여준다. 내장재의 연소 패턴을 분석한 결과 화염은 발화 지점에서 양방향으로 확산되며 전형적인 'V'자 형태의 연소 흔적을 남겼다. 내부 철판을 바닥면으로 배치하였을 때 연소 흔적이 상하로 대칭적인 모래시계 형태를 보였으며 철판 내부 발화지점 부근에서 강한 수열흔이 식별되었다. 접합부에서는 연소 확산 양상이 뚜렷하게 구분되었으며 좌측 접합부 상부 모서리에서는 연소가 일부 이동된 흔적이 확인되었으나 하부에서는 연소가 중단된 것으로 보이는 흔적이 관찰되어 연소 진행이 하부에서 상부로 발생했음을 알 수 있다. 특히 접합부를 따라 화염이 상부로 분출되면서 하부에서는 일시적으로 연소가 약화되는 현상이 관찰되었는데 이는 온도 분포나 연료 분포 구조적 영향에 의해 하부의 연소 에너지가 제한되었기 때문으로 판단된다.



(a) An internal steel plate.



(b) Interior material.



(c) An external steel plate.

Fig. 31 Results of point B of the first experiment.

종합적으로 분석해보면 발화지점을 제외한 여러 부분에서 발화지점으로 오인할 만한 연소 흔적이 식별되었다. 하지만 철판 내부와 외부 및 내장재의 탄화형태를 비교해보면 발화지점을 판정하는데 있어 연소 경로의 추정에 활용 가능한 자료가 존재하였고 화재가 우측에서 시작되어 좌측 방향으로 연소가 확산될 경우 이 과정에서 좌측 접합부 상부의 내장재가 먼저 탄화되었으며 온도가 상승함에 따라 내부 내장재가 용융되어 하부로 흘러내리는 양상이 관찰되었다.

결과적으로 이러한 용융물에 의해 하부에서 연소가 다시 확대될 가능성도 보였으며 철판 내부에서는 발화지점이 다른 부분보다 더 강한 수열흔이 식별되었다.

4.3.3 제3 실험 결과

제3 실험에서는 후면과 좌측 철판 표면에 얼룩덜룩한 변색이 관찰되었으며 하부에서는 발화 지점으로 오인될 수 있는 다수의 연소 흔적이 식별되었다.

접합부의 연소는 상부와 하부 모서리에서 시작되어 확산되었으며 내장재는 액체 상태로 용융되어 하부로 흘러내리는 동시에 화염을 분출하며 상부 방향으로 연소가 진행되었다. 외부 연소는 일정

시점에서 중단되었으나 철판과 철판 사이 내부 공간에 남아 있던 접착제가 지속적으로 연소하면서 하부에서 상부로 확산되는 양상이 나타났다. 특히 우측 내장재는 용융되었으나 외부 철판은 상대적으로 연소 흔적이 미미하거나 식별되지 않았으며 외부 철판에 뚜렷한 연소 흔적이 없었음에도 불구하고 내부 내장재는 용융 상태를 보이는 것으로 보아 연소가 주로 내부에서 진행되었음을 알 수 있다. 또한 접합부 철판에서는 하부에서 상부로 다시 연소가 시작된 흔적과 함께 접합부 중앙부에는 비교적 약한 연소 흔적이 관찰되는 특이점이 있었으며 최초 발화 지점인 철판 내부 중앙에 가연물과 접촉된 부위에서 국소적으로 강한 수열흔이 식별되었다.



Fig. 32 The results of the third experiment.

4.3.4 제4실험 결과

제4실험은 ‘ㄷ’자 구조의 지붕을 덮은 샌드위치패널 실험 세트(2m×2m×2m)를 제작하여 내부 3개 지점(A, B, C)에 가연물을 배치하고 연소 실험을 수행하였다. 실험 결과 세 지점 모두에서 철판 표면에 열에 의한 흔적(수열흔)이 관찰되었으며 특히 A 지점에서는 국부적으로 가장 강한 수열

흔이 식별되었다. 철판 좌측 및 우측 접합부 인근에서는 비교적 약한 수열흔이 관찰되었는데 이는 화염이 우측 A 지점에서 발화하여 좌측과 우측으로 확산되면서 접합부 상·하부 모서리를 따라 연소가 확대된 결과로 해석된다.

연소 과정 중 A, B 지점 방향의 지붕이 먼저 붕괴되었으며 이는 해당 부위에 상대적으로 많은 양의 가연물이 배치되어 초기 연소가 활발히 진행되었고 이로 인해 내장재 연소에 따른 구조체의 안정성 저하로 지붕의 하중을 견디지 못해 붕괴된 것으로 분석된다. 이로 인해 열기와 연기가 좌측 접합부 상부로 집중되었고(Fig. 33 (c) Early-stage roof collapse.) 연소가 접합부를 따라 확대되면서 최종적으로 전체 지붕이 붕괴되었다. 철판의 전체적인 연소 양상은 상부와 하부 여러 지점에서 강한 수열흔이 다수 식별되었으며 철판 내부에서는 A 지점에서 국부적으로 뚜렷한 수열흔이 나타나 발화지점으로 특정할 수 있는 단서가 확인되었다. 내장재의 연소 또한 가연물이 집중된 우측에서 더 강하게 나타나 연소의 집중성과 방향성을 뒷받침하였다.



Fig. 33 Results of the fourth experiment.

지붕의 연소 양상은 가연물이 위치한 지점과 접합부를 중심으로 강한 수열흔이 관찰되었으며 이는 해당 부위에서 연소가 집중적으로 발생하였음을 알 수 있다. 또한 실험 세트 내부에서 발생한 열기와 연기가 접합부 모서리를 통해 배출되었으며 접합부가 연기 및 열기의 주요 유출 경로로 작용하였음을 의미한다. 특히 최초 발화지점 상부와 접합부에서 국부적으로 강한 수열흔이 식별되어 발화지점과 연소 경로의 추정에 활용이 가능하다.



Fig. 34 Roof-related results of the fourth experiment.

5 결론 및 고찰

본 연구는 샌드위치패널의 구조 및 발화지점 위치를 변경하여 제작한 축소 실험 세트를 통해 연소 흔적 및 패턴, 방향성, 잔류물, 탄화 양상 등의 연소 특이점을 중점적으로 분석하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

첫째, 샌드위치패널은 화재 발생 시 연소 확산 속도가 매우 빠르고 다량의 유독가스가 발생함을 확인하였다. 또한 발화지점 이외의 다른 부위에서도 발화지점으로 오인될 만한 연소 흔적이 나타났으며 특히 상부에서 발화된 경우 내장재가 탄화되면서 발생한 잔유물이 하부로 흘러내리고 일부는 패널 내부 공간에 잔류하여 지속적인 연소를 유발하였다.

둘째, 패널 접합부에서는 상부와 하부 모서리로부터 연소가 시작되어 상부에서 하부 혹은 하부에서 상부로 연소가 확대되는 현상을 관찰할 수 있었다. 이러한 특이한 연소 패턴은 패널의 철판 내 외부와 내장재의 탄화 흔적을 비교 분석함으로써 발화지점 및 연소 경로를 판정하는데 활용 가능하다. 특히 접합부의 손상과 연소 방향성은 발화 위치를 역추적하는 중요한 단서로 작용할 수 있으며 연소 방향에 따라 나타나는 내장재의 탄화 형태 및 철판의 소손 양상은 초기 발화지점 및 연소 경로 분석에 실질적인 지표로 사용될 수 있다.

셋째, 급격한 연소 확산으로 인해 내장재가 소실되면 외부 철판 구조가 불안정해져 지붕 등의 구조물 붕괴가 발생하였다. 이러한 현상은 지붕 구조의 붕괴 지점을 발화지점 부근으로 판정할 수 있

으나 실제 발화지점과 다르게 판단될 가능성이 존재한다. 따라서 지붕 아래의 철판 및 내장재 탄화 형태, 잔류물의 위치, 주변 발화 요인 등을 종합적으로 조사하여 지붕 하부에 실제 발화지점이 존재할 가능성을 신중히 검토해야 한다.

마지막으로 샌드위치패널 건축물 화재 조사 시 패널 내장재의 종류와 구조를 우선적으로 파악하는 것이 필수적임을 확인하였다. 외부 연소 흔적만으로 발화지점을 판단하면 샌드위치패널의 불규칙한 연소 특성으로 인해 오인할 가능성이 크다. 단순히 강한 수열 흔적이 식별되는 부위를 발화지점으로 단정할 수 없으며 철판 및 내부 내장재의 탄화 형태, 가연물 양, 주변의 발화 요인 등을 종합적으로 고려하여 발화지점을 판단해야 한다. 샌드위치패널 건축물은 외부와 내부의 연소 양상이 불일치할 수 있으며 이러한 연소 특성은 내장재의 종류와 접합부 구조에 따라 달라질 수 있으므로 정확한 발화지점 판정을 위한 반복적인 실험과 다양한 화재 사례 분석을 통한 감식 기준 수립이 요구된다.

참고문헌

- 김용운, "현장사례분석의 비교 감식을 통한 화재원인 분석 - 조립식 샌드위치패널 화재사례를 중심으로-", 한국화재조사학회지, 제11권, 제1호, pp. 91-109, 2007.
- 박수영 외 2명, "콘칼로리미터를 사용한 샌드위치패널 연소특성에 대한 실험적 연구" 한국화재소방학회지, 제20권, 제4호 pp. 33-41, 2006
- 홍이표 외 2명, "외부화염에 의한 샌드위치패널 충전재 연소시험" 강원도소방본부
- 안병국 외 3명, "샌드위치패널 창고 소방대원 현장활동 대응력 제고 방안" 한국재난정보학회논문집, pp. 421-429, 2020



제 2 장 | 중부권



✓ 광역화재조사 1팀 >>>

주조 공정에서 발생하는 분진의 화재 위험성 연구

✓ 광역화재조사 2팀 >>>

★'25년도 강원 화재재현실험 연구논문 발표대회 최우수
차량의 전기식 보조 히터(PTC)의 화재 위험성 연구

✓ 광역화재조사 3팀 >>>

열 축적 가능 환경에서 복사열 에너지에 의한 라텍스 제품의 발화 가능성 연구

주조 공정에서 발생하는 분진의 화재 위험성 연구

김남윤¹⁾, 이준호, 김후균, 유현선

강원특별자치도 소방본부 중부권광역화재조사 1팀

Study on the fire hazard of dust generated in the casting process

Nam Yoon Kim[†], Jun Ho Lee, Hu Kyun Kim, Hyun Seon Yu

Central Wide Area Fire Investigation Team 1, Gangwon Fire Headquarters

ABSTRACT

In modern industrial society, the casting process is one of the various and widely used methods. During the work process, various types of dust are produced until the molten metal is melted and the desired shape is produced. This dust can be harmful to the health of workers, and it can also pose a fire risk due to the high temperature of the work process. In this paper, we will analyze the components of the dust generated during the work process and explain the process through which it leads to a fire, and furthermore, we will analyze the combustion pattern at the fire scene to contribute to fire investigation techniques.

Keywords : casting process, dust, combustion pattern

1 서론

1.1 연구의 배경

쇳물을 녹여 원하는 모양을 만들어 내는 주조 공정은 현대 사회에서 다양하게 사용되는 공정 중 하나이다. 용해로에서 용융된 쇳물은 최고 1,400℃까지 온도가 상승하고 공정이 진행될수록 온도는 낮아 지지만 전체적으로 공장 내부는 고온의 작업환경이다. 또한 공정 중에는 다양한 분진이 비산되는데 이것들을 포집하기 위해 집진 설비가 작동한다. 비산되는 분진은 고온의 공장 온도에 의해 활성화에너지를 얻고, 주물의 표면 온도 또는 집진설비에서 발생하는 마찰열, 정전기 등으로 인해 화재가 발생하기도 하는데, 열원의 종류와 조건에 따라 다양한 형태의 화재가 발생한다. 이 논문에서는 주조 공정에서 어떠한 열원이 발화 원인이 될 수 있는지, 그리고 발생한 연소 패턴에서 어떠한 특징들이 있는지 연구하여 화재 감식 기법에 기여하고자 한다.

1) E-mail: musthappy@korea.kr

1.2 국내 화재 사례 및 강원특별자치도 원주시 소재 ○○캐스팅 화재

1.2.1 국내 화재 사례

국내 화재 사례를 찾아본 결과 다양한 유형의 화재가 검색되었고, 화재 원인으로는 작업자 부주의, 설비 불량, 화원 방치, 정전기 등이 있었으나 가장 많은 원인을 차지하는 것으로는 정전기와 작업자 부주의가 있었다.

주조 작업 특성상 고온의 작업환경이 조성되고, 공정 중 발생하는 분진 및 먼지 등이 발생하게 된다. 여기서 조건에 맞는 발화 원이 생기게 되면 화재로 연결되게 되는데, 집진설비와 쌓여있는 금속분말 등에서 빈번한 화재가 발생한다.



Fig. 1 Domestic fire case, 2017~2025

1.2.2 ○○캐스팅 화재 사례

가. 2022. 12. 4.(일) 용접 불티에 의한 화재

해당 회사는 자동차 브레이크 관련 부품을 만드는 회사이다. 화재 당일은 Shot blast 기계의 보수를 위해 공정이 중단된 상태였고, 기계 내부를 용접하는 보수 작업을 한 후 작업자는 식사를 위해 자리를 비운 상태였다. 기계는 멈춰있었고, 전기 등의 발화 원 또한 없는 상태에서 유일한 열원 가능성은 용접 불티밖에 없는 상황이었다. 공장 내부에는 전체적으로 작업 시 발생하는 분진이 고루 쌓여있었고, 용접 위치 주변으로도 분진이 다수 있었다. 발화 추정 지점인 기계 내부에서 연소 진행된 패턴 또한 감식되는바 용접 불티에 의해서 발생한 화재 건으로 추정된다.



Fig. 2 A place of Fire



Fig. 3 Ignition source(welder)

나. 2024. 3. 21.(목) 축열에 의한 화재

주조 공정의 공작물은 컨베이어 벨트로 이동되어야 하나, 컨베이어 벨트 고장으로 특정 지점에서 공작물이 쌓이게 되었다. 하나의 공작물 표면 온도는 약 140℃ 전후인데, 여러 개의 공작물이 쌓이게 되면서 축열이 발생하였고, 주변에 있던 고무 소재의 안전 커튼에 공작물이 닿으면서 발생한 화재이다.



Fig. 4 A place of Fire



Fig. 5 Stacked injection molding

2 이론적 고찰

2.1 주조 공정의 이해

주조 공정(casting process)은 금속이나 비금속 재료를 녹여서 주형(mold)에 부은 뒤, 응고시켜 원하는 형상의 제품이나 부품을 만드는 제조 방법이다. 아주 오래된 제조 방식 중 하나이지만, 대형 구조물 제작 및 다양한 재료 사용이 가능하며, 대량 생산을 할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 공정 중 발생하는 수축, 기공, 불균질 조직 등의 결함이 발생할 가능성이 있고, 기계 가공 대비 정밀도가 낮은 편이며, 응고에 시간이 소요된다는 단점이 있다.

2.2 ○○캐스팅 회사

가. 주소

강원특별자치도 원주시 문막공단길 80 (반계리 5-45)

나. 내용

자동차 브레이크 관련 제품을 생산 (브레이크 캘리퍼, 백플레이트 등)

2.2.1 작업 공정

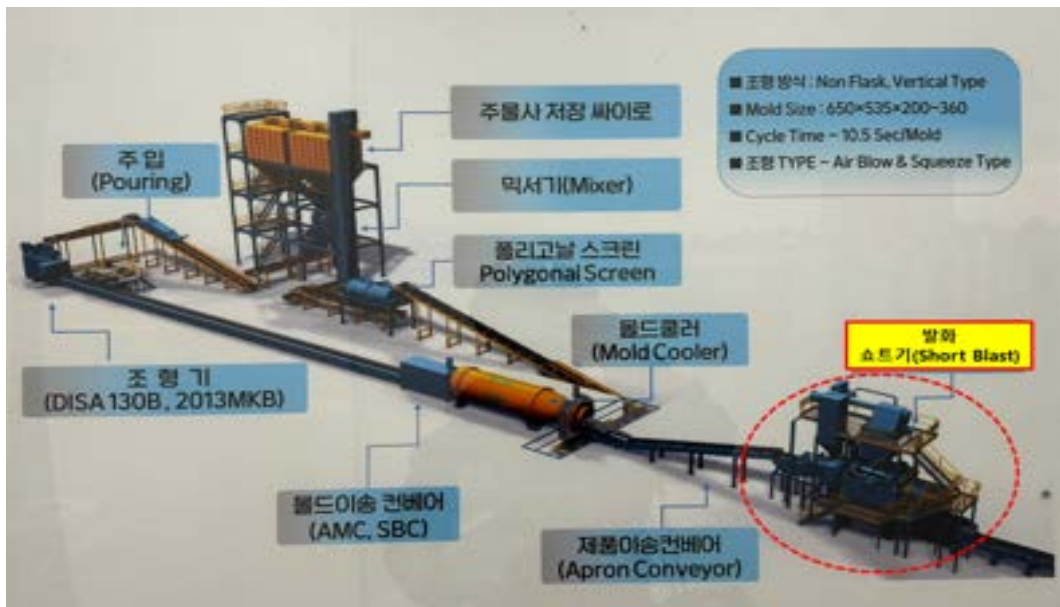


Fig. 6 Casting work process

가. 주물사 저장 싸이로

주조용 모래를 대량으로 저장하는 탑 모양의 저장소

나. 믹서기

주물사 저장 싸이로 에서 나오는 모래에 벤토나이트(Bentonite), 씨콜(Seacoal), 석유계 첨가제, 물 등을 섞어서 주형에 사용할 혼합 사를 제조

다. 폴리고날 스크린

믹서기에서 생성된 혼합 사에서 불순물이나 이물질을 제거하여, 고운 모래만 선별

라. 조형기

폴리고날 스크린에서 사출된 불순물이 제거된 혼합 사를 이용하여 주형(용해된 금속이 주입되는 틀)을 만들

마. 주입

용해된 금속을 조형기에서 제작된 주형에 부음(용해된 금속의 온도는 약 1,300℃)

바. 몰드이송 컨베이어, 몰드 쿨러

용해된 금속이 주형에 주입되고, 컨베이어를 통해 몰드쿨러로 이동하여 열을 식히는 과정(공작물의 온도는 약 140℃)

사. Shot blast

공작물 표면에 남아있는 주형모래, 산화물 등을 제거하고자 고속으로 회전하는 임펠러를 가속하여 Shot Ball(구형 금속입자)를 분사하여 표면을 깨끗하게 처리하는 과정

아. 제품 이송 컨베이어

Shot blast에서 정리된 제품을 최종 이송하는 컨베이어(최종 제품의 온도는 약 80℃)

2.2.2 Shot blast

Shot blast는 Shot이라고 하는 금속의 미세한 볼을 임펠러를 통해 매분 약 2,000회의 고속 회전으로 분사하고, 분사된 Shot은 챔버 안에서 롤링되는 공작물의 표면과 충돌하여 표면을 깨끗하게 마무리하는 공법이다. 이때 표면 가공으로 인해 분진이 발생하는데 이것은 집진 설비를 통해 포집되고 폐기된다.

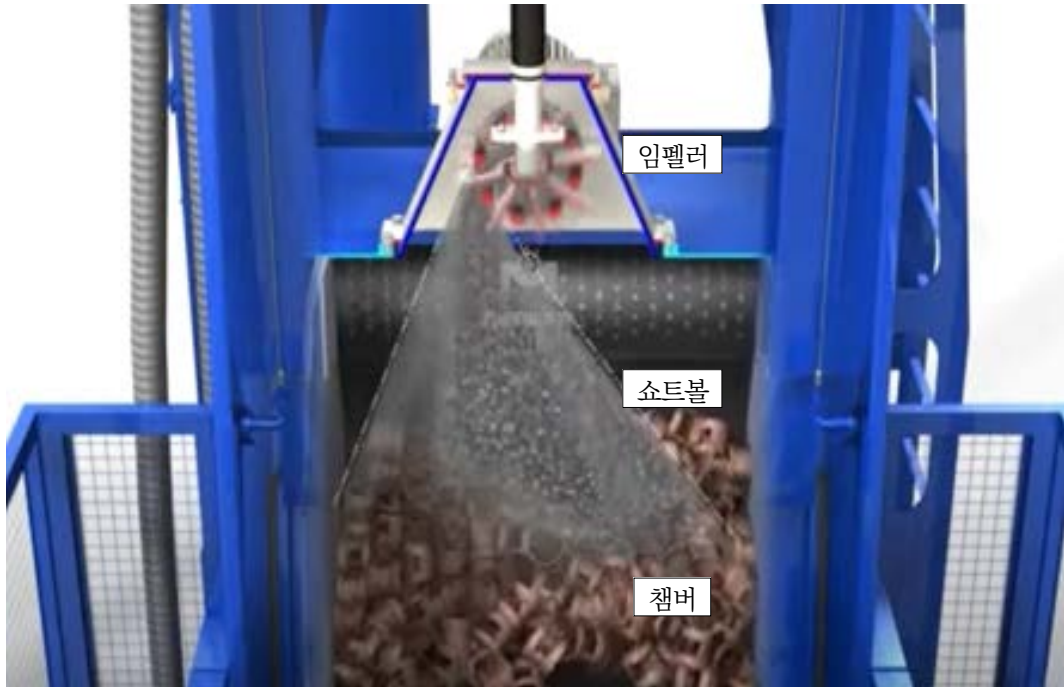


Fig. 7 Structure of Shot blast



Fig. 8 Conveyor



Fig. 9 Workpiece

2.3 주조 공정에서 발생하는 분진

2.3.1 포집된 분진 분석

○○캐스팅 공장 내에는 전체적으로 분진이 덮여 있었고, 작업 중에도 분진이 비산 중이었다. 여러 표본의 분진을 분석하기 위해 주형이 제작되는 조형기 주변과 공작물의 표면이 연마되고 발생한 분진을 Shot blast 주변에서 포집하였다. 초기 공정에서 포집되는 분진은 밝은 모래색이고, 후기

공정에서 포집되는 분진은 검은색을 띠는데, 성분 분석한바 모두 Silicon Compound로 확인되고, 이것은 모래 성분인 이산화규소(SiO_2)이다. 이산화규소의 녹는점은 약 $1,710^\circ\text{C}$ 이고 산소와 반응하지 않는 불연재이다.



Fig. 10 Dust from the initial process



Fig. 11 Dust from the post process



Fig. 12 Microscope of Fig 10

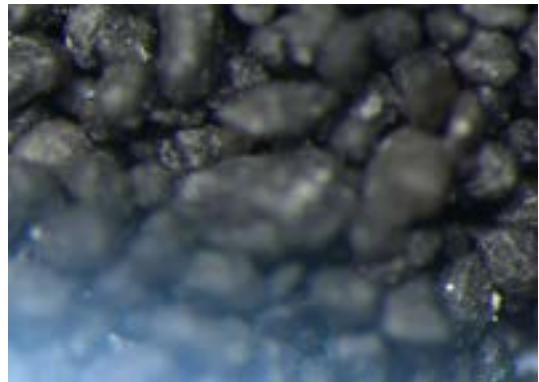


Fig. 13 Microscope of Fig 11

2.3.2 분진의 색 변화 원인

공정 초기에 포집된 분진은 밝은 모래색을 띠고, 최초의 주물사 색과 동일하다. 이 주물사에는 벤토나이트(Bentonite), 씨콜(Seacoal), 석유계 첨가제 등이 섞이는데 이것들이 공정 과정 중 탄화되어 주물사 표면에 부착될 가능성이 있고, Shot blast의 강한 마찰, 충격, 고속 투사 등으로 공작물 표면의 녹, 산화물, 탄화층이 벗겨지면서 분진 형태로 모래 입자에 부착되었을 가능성도 있다. 또한 Shot blast 공정 시 일부 모래는 고속 충돌과 마찰로 부분적인 소결이나 열 변화가 생겨 모래 알갱이 표면이 그을릴 수도 있으며, 챔버 내부에 페인트 찌꺼기 또는 기름 탄화물 등의 오염물이 부착되었을 가능성도 있다.

2.4 주조 공정 중 발생할 수 있는 열원 종류와 화재 발전 가능성

2.4.1 발생할 수 있는 열원

최초 용해된 금속의 온도는 약 $1,300^{\circ}\text{C}$ 이고 이것은 모래로 만들어진 주형에 들어가 제품 모양의 형태로 응고된다. 그리고 이동하는 과정과 몰드 쿨러를 통과하며 온도가 점점 낮아지는데 이때의 온도가 대략 140°C 이고, Shot blast를 통과한 최종 공작물은 약 80°C 의 온도를 나타낸다.

용해 금속에서부터 최종 공작물까지 고온의 작업이 연속되기에 지난 2024년 발생한 화재처럼 특정한 이유로 공작물이 적체된다며 축열되어 발화 원이 될 수 있다. 또한 집진설비에서 분진의 포집 과정 중 건조한 환경으로 인해 정전기가 발생한다면 화재 가능성이 있다.

Shot blast는 고속의 금속 볼을 제품의 표면에 분사하기에 여기서 발생하는 마찰열 또한 발화 원이 될 가능성이 있다.

2.4.2 화재 발전 가능성

가. 분진 표면에 부착된 유기 탄화물의 경우 $250\sim 500^{\circ}\text{C}$ 에 도달하게 되면 연소 된다. 공작물의 적체로 인한 축열로 대략 이 온도에 도달하게 된다면 분진 표면에 부착된 유기 탄화물을 연소시켜 화재에 이를 수 있다.

나. 집진설비에서는 비산하고 있는 분진을 포집하는데, 방식으로는 원심력을 이용한 사이클론과 필터를 사용한 백 필터 방식이 있고, 여기에서는 사이클론 방식을 기술하고자 한다.

포집된 분진은 고깔 모양의 사일로 벽을 타고 중력에 의해 아래쪽 포집 상장에 모이게 되는데 건조한 분진의 특성상 정전기가 발생할 수 있고, 이것은 화재 가능성을 야기할 수 있다.

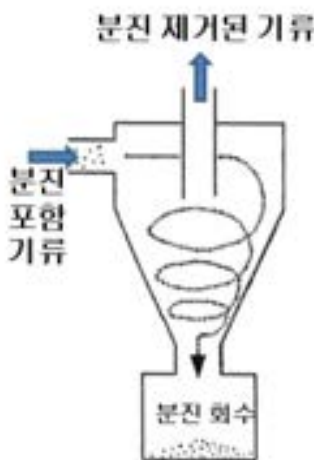


Fig. 14 Cyclone Dust Collector

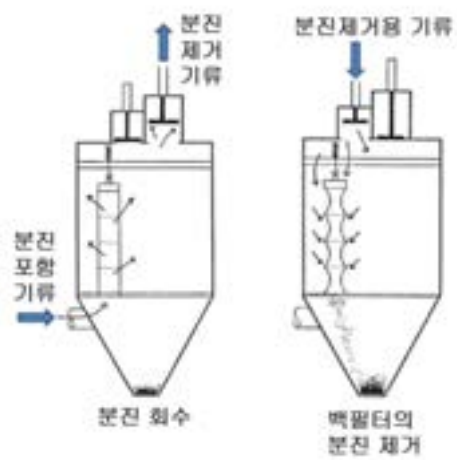


Fig. 15 White Filter Dust Collector

Table 1. MIE safety standards

MIE range (mJ)	Sensitivity	Danger	Management level
< 1 mJ	very high	Extremely danger	Ignition possible with static electricity
1-3 mJ	very high	very danger	Flammable gas level
3-30 mJ	high	danger	static electricity or Mechanical friction
30-100 mJ	middle	Needs attention	Coal, plastic dust level
100-1000 mJ	low	low stability	Strong ignition source
> 1000 mJ	very low	very stability	Ignition difficulty

다. Shot blast 내부는 무수히 많은 마찰이 생기고 열이 발생한다. 마찰열로 인해 유기 탄화물 연소 가능 온도인 250~500℃에 이르게 되면 화재 발생이 가능하다.

3 재현실험

3.1 실험 개요 및 장비

3.1.1 실험 개요

주조 공정에서 발생하는 분진의 표면에는 유기 탄화물이 부착되어 있는데, 이것은 다수 논문에 의하면 250~500℃의 온도에 착화 할 수 있다고 기술되어 있다.

이 실험에서는 공정 중에 발생할 수 있는 열원 중 축열, 마찰열, 정전기를 가정하고 각 상황에서 유기 탄화물이 착화 할 수 있는 온도까지 어떻게 상승하는지 측정하고자 한다.

가. 포집된 분진을 용량별로 용기에 담고 가열한다. 온도 상승을 측정하여 공작물이 모여 체적당 축열 되는 과정을 실험한다.

나. Shot blast 내부 챔버에 공작물의 양에 따른 온도변화를 측정하여 마찰열에 의한 화재 가능성을 실험한다.

다. 주형에 들어가는 성분들이 탄화되기에, 이것들의 최소 착화에너지(MIE)를 분석하고, 가연성 가스, 분진의 점화 가능 에너지인 1~10mJ 범위에서 정전기로 인해 화재 가능한 탄화물이 있는지 실험한다.

3.1.2 실험 장비

주조 공정의 고온, 건조한 환경과 유사하게 하기 위해 구획된 실에서 실험을 진행하였고, 내부 온도 30~40℃, 습도는 평균 10% 전후로 유지하였다.

공작물의 평균 온도인 80℃를 유지하기 위해 휴대용 부탄연소기 사용하였고, 챔버 내부 공작물 양에 따른 마찰열 온도 상승 측정을 위해 ○○캐스팅에서 사용 중인 Shot blast 사용하였다. 또한 분진 표면에 부착된 탄화물을 분석하기 위해 성분분석 현미경을 사용하였다.



1. Portable butane burner
2. Output heat: 2.3~3.5kW



1. Shot blast(DT 14-538)
2. Speed : 2960rpm



1. VHX micro scope
2. Particle analysis

Fig. 16 Experimental devices

3.2 축열로 인한 온도 상승 실험

3.2.1 실험방법

공작물은 컨베어 이송부터 최종 단계까지 1개당 약 80~140℃의 온도를 가지고 있기에, 해당 온도를 유지하기 위해 휴대용 부탄연소기로 가열하였다.

컨베어로 이동하며 공기와 접촉하며 자연스럽게 온도가 낮아지지만, 특이 경우 공작물이 한곳에 쌓이게 되고 축열되는 상황이 발생하고, 이를 재현하기 위해, 0.2m(가로)*0.2m(세로)의 2개의 스테인리스 용기에 높이 0.1m의 분진과 0.2m의 분진을 각각 채워 넣어 일정 시간 동안 온도 상승 정도를 실험해 보았다.

그리고 공작물이 겹겹이 쌓여가는 과정을 재현하기 위해, 공작물의 Shot blast 통과 시간인 4분마다 공작물의 평균 온도인 약 100℃ 분진 0.02m를 지속적으로 추가하여 최종 높이 0.3m까지 채워 온도 상승 변화를 실험한다.



Fig. 17 Volume 4L



Fig. 18 Volume 8L



Fig. 19 Add dust 0.025m

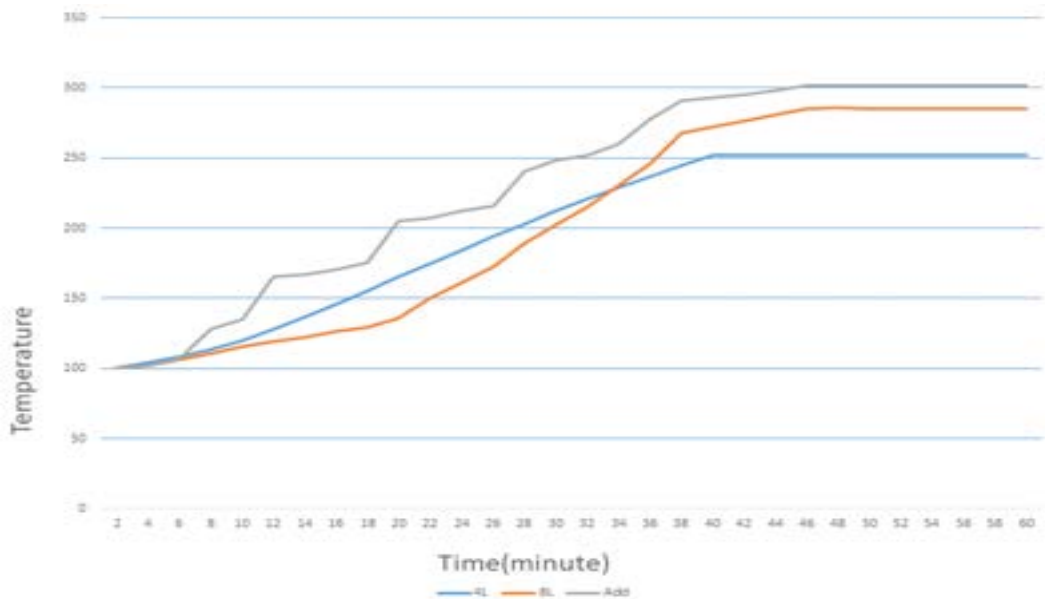


Fig. 20 Temperature change graph

3.2.2 실험 결과

약 100℃로 예열된 분진을 가열하였고, 3가지 방법 모두 처음에는 완만한 속도로 상승하였다. 부피 4L인 용기는 40분에 이르러서야 252℃까지 도달하였고, 부피 8L 용기는 더 많은 용량 관계로 초기에는 온도 상승이 느렸지만, 34분을 기점으로 더 가파른 온도의 상승을 보이며, 38분에 268℃, 48분에 최고 온도인 286.2℃까지 도달하였다.

동일한 가열 조건에 4분마다 100℃로 예열된 분진을 지속적으로 0.02m씩 추가한 실험에서는

추가 시점인 4분마다 큰 폭으로 온도 상승이 있었으며, 32분에 252℃ 도달하였고, 46분에 최고 온도 302.1℃까지 상승하였다. 가열하는 열량이 동일하다면 용량이 적은 것은 기울기가 완만하게 상승하지만, 용량이 많은 것은 온도 상승에 열량이 그만큼 많이 필요하기에 초기 온도 상승이 완만하다. 하지만 축열 효과로 인해 34분 시점을 기준으로 온도 상승 가팔라졌고, 유기 탄화물의 연소 온도인 250℃까지 38분이 소요되었으며, 최고 온도도 더 높은 286.2℃까지 상승하였다.

마지막으로 예열된 분진을 소량씩 추가하는 실험에서 4분마다 큰 폭의 온도 상승이 있었던 것은 공기와의 접촉으로 냉각되는 단계가 최소화되었기에 가능한 것으로 보이며, 최종적으로 가장 많은 양인 12L가 투입되었기에 축열 효과도 커 250℃까지 32분에 도달하였고, 최고 온도는 302.1℃까지 상승하였다.

3.3 Shot blast 내부 챔버의 공작물 양에 따른 온도 변화

3.3.1 실험방법

○○캐스팅에서 사용 중인 Shot blast는 DT 14-538 모델로써 공작물당 최대 중량 150kg, 공작물의 최대 온도 150℃이고, 연마할 수 있는 총 양은 분당 1,600kg이다. 공작물은 Shot blast에서 약 5분의 마찰 공정이 진행되기에 5분 동안 작업할 수 있는 최대 공정 양은 8,000kg이다. 챔버 내부의 공작물 양을 1,000~8,000kg까지 변화하여 볼 것이고, 공정 중 챔버의 온도 변화를 측정하여 마찰열 발생으로 인한 유기 탄화물 연소 온도까지의 도달 여부를 확인하고자 한다.

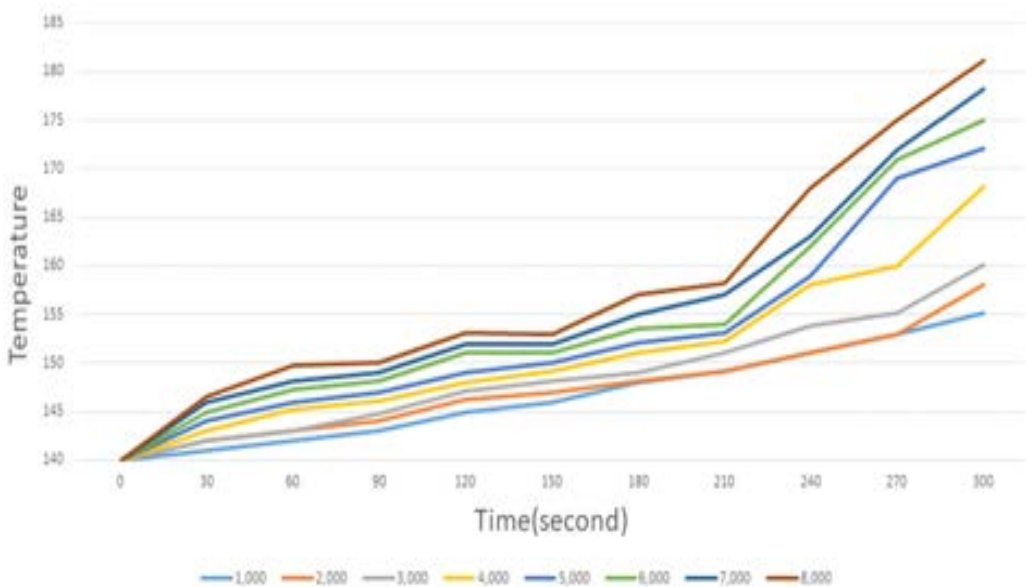


Fig. 21 Temperature change graph

3.3.2 실험 결과

투입되는 공작물의 1개당 평균 온도는 140℃이기에 8번의 실험 모두 평균 140℃에서 온도가 상승하였다. 온도 측정은 총 5분 동안 30초 간격으로 측정하였고, 초기에는 온도 상승이 완만하였으나 공정이 길어질수록 온도 상승에 속도가 붙었다.

1,000kg에서는 최고 온도 155.2℃이었고, 8,000kg에서는 최고 온도 181.1℃로 측정된 것으로 보아 내부 공작물이 많을수록 축열 효과가 발생한 것으로 추정되고, 공작물이 뒤엉키며 금속 불과의 충격 마찰이 발생하여 온도 상승이 더 빨라지고 최고 온도도 상승한 것으로 관찰된다.

공장 관계자에 의하면 shot blast 작동 시 불기둥이 종종 생겼다는 진술이 있었고, 공작물의 작업 전 온도가 140℃인 것으로 보아 최고 온도는 250℃ 이상이라고 추측하였으나, 실제 온도는 181.1℃로 측정되었다.

이것은 250m³/min 용량으로 작동하는 집진설비의 공기 순환으로 냉각 효과가 발생하여 화재 가능성을 낮춰 준 것으로 추측할 수 있다.

하지만 내부 온도가 140~181.1℃까지 상승한 것을 확인하였고 내부 온도로는 측정되지 않지만, 충격과 마찰로 인한 공작물 표면에서 발생하는 순간 온도는 상승할 수 있기에 분진 표면의 유기 탄화물 연소로 인한 화재 가능성은 남아 있다.

Table 2. Temperature changes due to weight changes

weight time(s)	1,000	2,000	3,000	4,000	5,000	6,000	7,000	8,000
0	140	140	140	140	140	140	140	140
30	141	142	142	143.1	144	145	146	146.5
60	142	143	143.1	145.2	146	147.2	148.2	149.8
90	143	144.1	144.8	146.1	147	148.1	149	150
120	145	146.2	147.1	148	149	151	152	153.1
150	146	147	148.1	149.2	150	151	152	153
180	148	148.2	149	151.1	152.1	153.5	155	157
210	149.1	149.2	151.1	152.2	153.1	154	157	158.2
240	151.1	151.1	153.8	158.1	159	162	163.1	168
270	153	153	155.1	160	169	171	172	175
300	155.2	158.1	160.1	168.1	172.1	175	178.2	181.1



Fig. 22 Shot blast input



Fig. 23 Temperature measure

3.4 주형에 섞인 성분의 최소 착화에너지 측정 및 정전기로의 화재 가능성 고찰

3.4.1 실험방법

공정 중 발생하는 분진의 표면에는 탄화물이 부착되어 있다. 분진의 대다수는 모래인 것을 보았을 때 탄화물은 모래에 섞인 특정 성분이 고온의 쇳물과 만나 연소 된 것이라 추측된다. ○○캐스팅 회사 측에 문의한바 주형에 섞이는 첨가제는 벤토나이트, 물, 씨콜(seacoal), 석유계 첨가제 등이 있다. 이들 중 탄화할 수 있는 첨가제를 찾고, 최소 착화에너지 값을 측정하여 가연성 가스, 분진 등의 점화 가능 에너지인 1~10mJ보다 작다면 공정 상 발생할 수 있는 정전기로도 화재 가능성이 있다고 추정할 수 있다.

3.4.2 실험 결과

주형에 첨가제를 섞는 것은 다음과 같은 이유가 있다. 고온에서 분해되어 가스막을 형성해 금속과의 직접 접촉을 막아 주물 표면의 품질 향상을 위해, 첨가제가 윤활 역할을 하여 주형에서 공작물이 깨끗하게 떨어지도록 하기 위해, 첨가제가 연소하며 예측 가능한 방식으로 가스 생성되어 가스 결함을 방지하기 위해, 고온에서의 주형 구조 안정성을 높이기 위해, 점결력을 높이기 위해, 공작물의 열팽창 스트레스를 흡수하여 열 균형을 유지하기 위해 사용된다. 주형에 첨가된 성분 중 탄화 가능성 있는 것들은 벤토나이트, 씨콜(seacoal), 석유계 첨가제(파라핀 오일, 납사, 페놀, 피치, 미네랄 오일, 톨루엔) 등이 있고, 최소 착화에너지 값을 구하였다. 관련 논문 및 해당 자료 분석한바 가연성 가스, 분진 등의 점화 가능 에너지는 1~10mJ이고, 정전기 에너지 범위에 해당된다. 첨가제 중 정전기 에너지보다 낮은 것은 납사와 톨루엔이 있다. 주조 공정은 고온 건조한 환경에서 작업 되기에 정전기 발생 가능성이 높으며, 분진 표면에 부착된 탄화물 중 인화성 있는 것들은 다수 있지만 그중에서도 납사, 톨루엔은 정전기 에너지보다도 낮은 최소 착화에너지 값을 가지고 있기에 정전기로도 화재 가능하다는 것을 추측할 수 있다.

Table 3. MIE of additive

Ingredient	Minimum ignition energy	Note
Bentonite	$\geq 3,000\text{mJ}$	Non-flammable
Seacoal	30~60mJ	High flammable
Paraffin oil	$\geq 1,000\text{mJ}$	Low flammable
Naphtha	0.2~0.3mJ	High flammable
phenol	13mJ	Middle flammable
pitch	$\geq 1,000\text{mJ}$	Low flammable, highviscosity
mineral oil	$\geq 300\text{mJ}$	Low flammable stable
toluene	0.2~1.0mJ	High flammable

4 결론 및 현장 감식 요령

4.1 결 론

특정 회사에서 동일한 이유로 화재가 발생하였고, 현장 직원들 진술에 의하면 신고되지 않은 화재 건수는 실제로 더 많았던 것으로 확인되었다. 발생한 화재 모두 분진과 관련 있었고, 분진의 성분을 분석한바 Silicon Compound 즉 이산화규소(SiO_2)로 확인되었다. 분진은 초기에 밝은 모래색을 띠고 있으나, 후기로 가갈수록 검은색을 나타내는데, 이것은 주물사에 첨가된 성분들이 뜨거운 쇠물에 닿으며 탄화되어 표면에 부착된 것으로 관찰된다. 수거한 분진의 성분은 이산화규소로 불연재이나, 그 표면에 부착된 탄화물은 연소 가능한 것으로써, 다수 논문에 의하면 250~500℃의 온도에서 탄화물은 연소 된다고 한다. 이번 실험을 통해 분진 표면에 부착된 탄화물이 어떠한 발화원을 만날 경우 화재로 진행되는지 알아보고자 하였고, 결과는 다음과 같다.

첫째, 생산되는 공작물은 일련의 과정을 거쳐 Shot Blast에 투입되는데, 이때까지의 온도는 약 80~140℃이다. 그러나 이송되는 컨베이어의 고장 등으로 공작물이 적체되거나, 공정상 부유하는 분진이 특정 한 지점에 많이 쌓이게 된다면 축열이 일어나게 되고, 온도가 상승하게 된다. 동일한 바닥 면적에 쌓여있는 양을 달리하여 가열한 결과 더 많은 부피를 가진 실험에서 초반 온도 상승 속도는 느렸으나, 일정 시간 후 속도가 상승하였고, 최고 온도도 더 많이 상승하였다. 하나의 공작물이라면 공기 접촉으로 인해 온도 상승 여력이 없으나 특정 사유로 인해 뭉치거나, 한곳에 쌓이게 된다면 축열로 인해 탄화물의 연소 온도까지 온도 상승할 가능성이 있기에 화재 위험이 있다.

둘째, Shot Blast는 고속의 금속 볼을 쏘아 공작물 표면에 붙은 불순물을 제거하고, 연마하기 위한 작업이다. 하지만 이러한 과정에서 공작물과 금속 볼이 부딪히면서 마찰열이 발생하게 되는데, 마찰열로 인해 기계 내부의 온도 상승 여부를 확인하고자 하였다. 기계 내부의 공작물 양에 따라 온도 변화의 차이가 있었는데, 공작물 양이 적으면 집진설비로 인한 공기 순환으로 공기 접촉이 일어나 온도 상승이 낮았다. 하지만 작업할 수 있는 최고 수준으로 공작물을 투입했을 때는 공작물이 서로 뭉쳐 축열 효과와 더불어 공기 접촉으로 인한 냉각 효과도 낮아져 전체적인 온도 상승이 일어났다. 최고 온도는 181.1°C 으로 탄화물의 연소 온도에는 미치지 못하지만, 금속 볼 충격 시 공작물 표면의 순간 온도는 상승할 수 있기에 화재 가능성을 배제 할 수 없다.

셋째, 주조 공정은 고온, 건조한 환경이기에 분진 포집 과정 또는 Shot Blast 기계 내부, 건조한 모래의 이송 과정 등에서 정전기 발생이 쉽다. 정전기는 다양한 에너지 분포를 가지고 있지만, 가연성 가스, 분진의 점화 에너지 범위인 $1\sim 10\text{mJ}$ 도 포함한다. 분진 표면에 부착된 탄화물 중 최소 착화에너지가 정전기 에너지보다도 작은 것이 있다면 정전기 발생으로도 화재 발생 가능성이 있다. 공정 중 탄화 가능성 있는 것들을 조사한바 주물사에 첨가되는 성분이 있었고, 그 중 납사와 톨루엔의 최소 착화에너지는 각각 $0.2\sim 0.3\text{mJ}$ 와 $0.2\sim 1.0\text{mJ}$ 이었다. 납사와 톨루엔 외에도 최소 착화에너지가 낮아 인화성이 높은 성분들이 다수 있는 것으로 확인되는데 정전기로 인한 화재 발생은 가능할 것으로 추정된다.

4.2 감식 요령

주조 공정에서 발생할 수 있는 발화 원으로는 축열, 마찰열, 정전기가 있을 수 있고, 가연물은 분진 표면에 부착된 유기 탄화물이다. 화재 발생 시 이산화규소인 분진은 연소 되지 않지만, 표면에 붙은 탄화물은 순간적으로 연소되고 흔적이 남지 않기 때문에 현장 감식이 쉽지 않다. 하지만 공정상 작업자는 항상 상주하기에 화재 초기를 목격하였을 가능성이 높으므로, 초기 진술 등을 토대로 발화 지점을 추리고, 해당 지점에서 발생할 수 있는 발화 원인을 유추할 수 있다. 컨베이어를 확인하여 고장으로 인한 공작물이 적체된 곳이 있는지, 부유하는 분진 등이 평소 쌓인 양보다 한 곳에 많이 쌓여있는지 등을 파악하여 축열 가능성을 의심해 볼 수 있다. Shot Blast 내부에서 초기 화염이 목격되었다면, 작업 가능한 최고 중량으로 작동 중인지 확인하여 마찰열에 의한 화재 가능성을 확인한다. 또한 건조한 모래의 이송 과정, 사이클론 방식의 분진 포집 시설 등에서 화재 발생하였다면 정전기 발생으로 인한 화재를 의심해 볼 수 있다. 주조 공장에서 발생한 화재는 직접 감식 가능한 발화 원인이 없고, 순간 연소되고 종료되는 화재 특성상 연소 패턴이 남지 않는다. 하여 이번 실험을 통해 주조 공장에서 발생할 수 있는 화재 가능성 등을 실험해 보았고, 앞으로의 현장 감식에서 도움이 되길 바란다.

참고문헌

- 1) 국가화재정보시스템(www.firedata.go.kr), 소방청 국가화재정보센터
- 2) 한우섭, “부유성 금속분체의 발화위험성 연구”, 안전보건공단, pp. 39-63, 2012.
- 3) 서동현, “정전기 착화에 의한 분진 화재폭발사고 저감 연구”, 안전보건공단, pp. 35-57, 2019
- 4) 이근원, “집진공정의 화재폭발 예방 및 개선방안 연구”, 안전보건공단, pp. 7-60, 2018.
- 5) 한우섭, “부유 분진의 정전압에 의한 최소착화에너지 위험성평가”, 한국화학공학회, pp. 359-365, 2021
- 6) 화재현장조사서(원주 2022-12-299), 강원특별자치도 화재대응조사과, 2022
- 7) 화재현장조사서(원주 2024-03-082), 강원특별자치도 화재대응조사과, 2024



제 2 장 | 중부권



☑ 광역화재조사 1팀 >>>

주조 공정에서 발생하는 분진의 화재 위험성 연구

☑ 광역화재조사 2팀 >>> ☆'25년도 강원 화재재현실험 연구논문 발표대회 최우수 차량의 전기식 보조 히터(PTC)의 화재 위험성 연구

☑ 광역화재조사 3팀 >>>

열 축적 가능 환경에서 복사열 에너지에 의한 라텍스 제품의 발화 가능성 연구

차량의 전기식 보조 히터(PTC)의 화재 위험성 연구 (커넥터 접촉 불량에 의한 아산화동 증식 중심으로)

김재혁¹⁾, 김민섭, 한주리, 이대우, 최성광
강원특별자치도 소방본부 중부권광역화재조사 2팀

A Study on the Fire Risk of Electric Auxiliary Heater(PTC) of Vehicle (Based on the Cu₂O Growth due to poor Connector contact)

Jae-hyok Kim[†], Min-seop Kim, Ju-ri Han, Dae-woo Lee, Seong-gwang Choi
Gangwon Fire Headquarters wide-area fire investigation in the central region

ABSTRACT

This study was conducted to secure a more specific and objective basis for the cause and possibility of ignition for a fire that occurred at the connector terminal connected to the electric auxiliary heater (PTC) of the vehicle during operation. After constructing a DC circuit test set that can apply a 12V voltage to an electric auxiliary heater (PTC) with the same structure as the vehicle fire in the tube, the possibility of fire and changes in temperature, voltage, and resistance were measured due to the growth of Cu₂O at the connector contact terminal. As a result of the experiment, a fire occurred at the connector connection terminal that induced contact failure due to local heat generation of 200°C to 500°C or higher. A sample of the ignition site was collected and component analysis through a multimedia image microscope could be performed to confirm the growth of Cu₂O. The results of this experiment were provided to the Korea Transportation Safety Authority's Automobile Safety Research Institute, and based on these results, a technical analysis will be conducted to determine whether the connector terminal is defective. In addition, this research paper presents a fire investigation(detection) algorithm to determine the cause of the vehicle's electric auxiliary heater (PTC) fire, ultimately contributing to the front-line fire investigator in the field to determine the cause of the ignition.

Keywords : Electric auxiliary heater(PTC), Cu₂O, Multimedia image microscope, Algorithm

1) E-mail : kotarair@korea.kr

1 서론

1.1 연구배경 및 목적

국토교통부 자료에 의하면 국내 자동차 등록 대수는 매년 증가하여 2024년 말 기준 2,630만대로 국민 2명 중 1명이 보유할 정도로 자동차는 우리 생활에 밀접하게 관련되어 있다. 또한, 최근 3년간 전국 차량 화재는 2022년 4,667건, 2023년 4,725건, 2024년 4,831건으로 매년 증가추세에 있다. <Fig. 1>은 국가화재정보시스템에서 발췌한 2020년부터 2024까지 전국에서 발생한 발화 관련 기기(차량) 요인에 의한 화재 발생 현황을 나타낸 그래프이다.

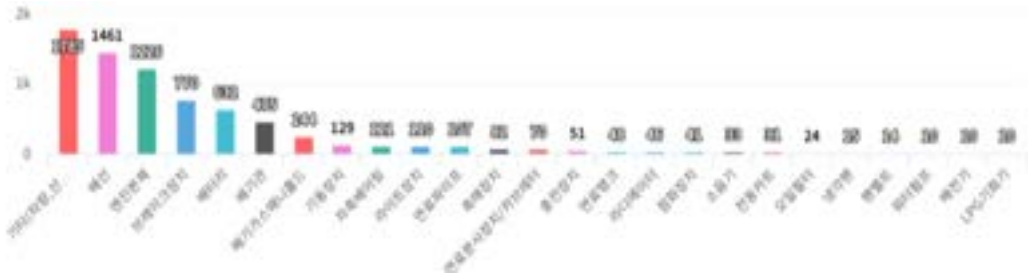


Fig. 1 Number of fires caused by vehicle ignition related devices(Total 7,545 cases)[1]

발화 관련 기기로 분류된 차량 화재 7,545건 중 차량 부품 1,785건, 배선 1,461건, 엔진 본체 1,226건, 브레이크장치 770건, 배터리 632건, 배기관 475건 순으로 나타나 부품과 배선이 전체의 43% 비중으로 화재 발생 빈도가 높음을 알 수 있다. 작년 관내에서 발생한 차량의 전기식 보조 히터(PTC)와 연결된 커넥터 접속 단자에서 아산화동 증식 발열 현상이 관찰되었으며, 최근 들어 이로 인한 화재 사례가 다수 밝혀지고 있다. 따라서, 본 실험을 통하여 전기식 보조 히터(PTC)의 커넥터 접속 단자에서의 접촉 불량에 의한 아산화동 증식 현상 규명 및 이로 인한 화재 발생 메커니즘 분석을 통하여 화재 원인 규명에 이바지하고자 한다.

1.2 연구의 흐름

통상 자동차 히터는 엔진의 열을 이용한다. 엔진룸에는 엔진 냉각을 위해 냉각수가 순환하는데 엔진 열에 의해 온도가 올라간다. 이때 뜨거워진 냉각수에서 나오는 열을 방열판과 송풍 팬 등을 이용해 차량 실내에 공급해 난방 효과를 가져온다. 하지만 추운 겨울 영하의 기온에서 엔진을 켜 뒤 냉각수가 충분히 가열되려면 시간이 걸린다. 따라서, 공조기에 발열체를 장착하여 엔진 열이 일정 온도 이상으로 상승하기 전에 전기를 이용해 실내 공기를 데워준다. 하지만, 전기저항에 의존하고 과열되어 화재를 일으킬 수 있는 기존 발열체 히터의 단점을 보완하기 위해 전기식 보조 히터

(PTC)가 채택되었으며 빠른 응답, 에너지 효율성 및 향상된 안전성을 장점으로 다양한 응용 분야인 자동차(경유차와 전기차), 가전제품, 산업용 응용 제품, 상용제품에서 널리 사용되고 있다.

하지만, 최근에 전기식 보조 히터(PTC)의 커넥터 단자의 접속부 내구성 부족으로 인해 온도가 과도하게 올라가 커넥터 접속 단자 손상으로 연결부 및 전기 배선에서 화재가 발생할 수 있는 제작 결함이 확인되어 국토교통부에서 쏘렌토('14.8.25.~'20.2.28), 스포티지('15.8.17~'21.7.9), 투싼('15.1.8.~'18.7.18.) 3개 차종 72만여 대 리콜을 2022년에 실시하였다. 또한, 관내에서 발생한 전기식 보조 히터(PTC) 커넥터 화재 건 중 리콜 차종이 아닌 타 차종에서도 화재가 발생하는데, 타 차종에 대한 전기식 보조 히터(PTC) 커넥터 내구성에 대한 제작 결함에 대한 전수조사는 현재 까지 진행되고 있지 않은 것이 현실이다.

관내에서 발생한 전기식 보조 히터(PTC) 커넥터 접속 단자의 화재 원인을 확인한바, 대부분 접속부 접속 불량에 의한 화재로 접촉저항이 증가하여 줄열(Joule heat)에 의해 국부적으로 온도가 상승하여 아산화동이 생성, 증식, 발열하는 현상에 의해 전선 피복이나 주변 가연물에 착화되어 화재가 발생한 것으로 조사되었다. 따라서 전기식 보조 히터(PTC) 커넥터 접속 단자에서의 발화 개연성을 확인하기 위해 접속 불량에 의한 아산화동의 생성, 증식, 발열에 대한 이론적 고찰을 선행하였으며, 본 실험에 앞서 아산화동 증식 원인으로 발생한 화재 사례 및 이와 관련된 선행 연구 자료를 조사하였다.

본 실험에서는 전기식 보조 히터(PTC), 커넥터 접속 단자(5핀, 4핀), 배선용 차단기, 퓨즈 박스, 배터리 계통도 2점을 제작하여 재현실험을 실시하였다. PTC 커넥터 접속 단자의 접속 불량을 유도하기 위해 모터(휴대용 선풍기)를 활용하여 떨림 현상에 의한 아산화동 형성 실험을 진행하였으며, 생성된 아산화동을 멀티미디어 영상 현미경을 통해 성분을 분석하였다. 이러한 실험 결과를 바탕으로 전기식 보조 히터(PTC) 커넥터 접속 단자에 대한 발화 원인 및 판정에 필요한 화재조사(감식) 알고리즘을 제시하였다.

2 이론적 배경

2.1 줄열(Joule heat)의 기본 이론

도체에 전류를 흐를 때 발생하는 열량은 전류의 2승과 도체 저항의 곱에 비례한다. 이것을 줄의 법칙(Joule's law)이라고 하며 이때 발생하는 열이 줄열이다. 따라서, 저항 $R(\Omega)$ 의 도체에 $I(A)$ 의 전류가 t 초간 흐르면 도체 중에 발생하는 열량 H 는 다음의 식(1)으로 표기하면 다음과 같다. [2]

$$H(J)=I^2 R \cdot t(J) = 0.24 I^2 R \cdot t(cal) \quad \text{식(1)}$$

여기서, H : 열량, I : 전류, R : 도체의 저항, t : 시간

저항 R은 도체의 길이에 비례하고 단면적에 반비례하므로 동종의 도체라 하더라도 길이가 길고, 단면적이 적으며, 저항이 커져 발열량은 증가한다. 이를 식(2)으로 표현하면 다음과 같다. [2]

$$R = \rho \times L / A \quad \text{식(2)}$$

여기서, ρ : 고유저항, L: 도체의 길이, A: 도체 단면적

2.2 아산화동의 증식 발열

(Resistance and temperature by heatde up of cupric oxide)

아산화동 증식 발열은 전기회로에서 발생하는 현상으로, 접촉부의 도체 접촉저항이 증가(불완전 접촉으로 단자대 및 전선 접속부의 나사 조임 불량, 전선과 단자 접촉 불량에서 진동이나 충격으로 주로 발생)하여 접촉부가 과열될 때 발생한다. [2]

이로 인해 접촉부 표면에 산화물의 막이 형성되는데, 도체가 동합금인 경우 주로 산화동이 생성되며 때로는 아산화동(Cu_2O)이 생성될 수 있다. 아산화동은 상온에서는 수십 K Ω 의 전기저항을 가지지만 온도가 상승하면 급격하게 저하되는 특성(1,050℃에서 약 3 Ω 으로 최소값)을 가지고 있다. [5]

이러한 특성 때문에 아산화동에 고온부가 발생하면 접촉부의 타 부분보다 고온부에만 집중적으로 전류가 흐르게 되어 줄열에 의해 온도가 상승하여 화재가 발생한다. [3]

2.3 전기식 보조 히터(PTC)의 전기적 성질

전기식 보조 히터 (PTC:Positive Temperature Coefficient)는 온도에 민감한 비례 저항 변화를 가진 티탄산 바륨계 소자(최고온도 350℃, 저항률 100~1000, 융점 1,510℃)로 고효율 디젤 엔진과 엔진이 없는 모터로 구동하는 전기자동차에 실내 난방 열원을 보충하기 위한 보조 난방 장치이다.

히터 코어 후면부에 장착하여 통과하는 공기를 PTC 소자(A) 발열체를 이용하여 가열하며 전원공급은 커넥터로 전원이 인가되어 실내를 난방하는 전기식 히터이다. 관련 사진은 <Fig. 3>를 참고하기 바란다.

전기식 보조 히터(PTC)는 ECU에서 “PTC ON SIGNAL”을 출력하여 PTC를 15초 간격으로 1단에서 3단까지 외기온도(5℃ 이하), 냉각수 온도(75℃ 이하), 배터리 전압(11V 이상), 엔진 RPM(700 이상)에서 작동한다. 전기를 공급하면 발열체 온도가 한계점 205℃ 부근까지 올라가지만 자체 저항이 커져서 공급받는 전류의 양을 줄여 적절한 온도를 유지한다.

전기식 보조 히터(PTC)는 수백W~수천W의 소비전력(내연 차량용 보조 히터 : Low Voltage, 전기차 및 수소차(400V~800V High Voltage)을 가지고 다양하게 출시되고 있다.



a.. PTC body heating element

b. PTC connector

c. PTC & connector(X-ray)

Fig. 3 Electric Auxiliary Heater(PTC) structure

2.4 선행연구 검토

본 연구에 앞서 「차량의 전기식 보조 히터(PTC)의 화재위험성 연구」를 수행하기 위하여 관련된 선행 연구를 검토하였다.

홍성호의 “전기히터의 화재위험성에 관한 실험연구”(홍성호·이복영·박상태·유현중, 방재시험연구원, 2007)에서 전기히터의 발열체는 300℃가 넘는 온도로 가연물이 접촉하게 되면 화재 발생 가능성이 높은 것으로 분석하였다.

박진영은 “아산화동 증식 발열에 의한 화재 사례의 분석”(박진영·이의평, 한국화재소방학회 논문지, 2020)에서 대학 실험실 내 전선의 접속부에서 발생한 화재 사례의 분석을 통해 케이블 접속 부분의 아산화동 증식을 확인하였고, 동 위치의 국부적인 과열로 인해 화재가 발생하였음을 언급하였다.

김상철은 “커넥터에서 접촉 불량 발생 시의 전압, 전류 및 온도 신호 특성 분석”(김상철·김두현·강신욱, 세명대학교 보건안전공학과, 충북대학교 안전공학과, 2014)에서 정상상태에 대한 접속부의 온도 분포는 1A~4A의 전류값에 대하여 26.4℃~36.5℃로 나타났으며, 접촉 불량 시에는 49.5℃~180℃였다. 그 외 다수의 선행 연구 검토 결과 아산화동에 의한 화재 위험성에 대한 연구는 많았으나 차량의 전기식 보조 히터(PTC)의 커넥터 접속부위 접촉불량에 의한 아산화동 증식 발화 위험성에 대한 연구와 이와 관련된 화재 감식 기법에 대한 선행 연구는 없었다.

국내 자동차 중 투싼, 스포티지, 쏘렌토 차량에 대한 2015~2020년식 차량의 전기식 보조 히터 커넥터 단자의 내구성 부족으로 인한 화재위험성으로 인한 리콜 사례가 있다.

하지만, 최근 카니발 차량에서 동일한 전기식 보조 히터 커넥터 단자에서도 화재 사례가 보고 되고 있다.

따라서, 카니발 차량에서 사용되어지고 있는 전기식 보조 히터(PTC)에 대한 제작 결함 연구 및 리콜 사례는 없어 본 실험을 통해 화재 위험성에 대하여 연구하고자 한다.

3 차량의 전기식 보조 히터 커넥터 단자부 출화에 의한 화재 사례

3.1 화재사례(1)

3.1.1 화재개요 및 발화지점

2024년 1월 26일 주행 중인 카니발 차량에서 타는 냄새와 함께 운전석 가속페달 우측에 한정된 화재 건으로 감식 결과 전기식 보조 히터(PTC) 커넥터 및 접속 단자의 소화가 심한 상태로 주변 부품으로 연소가 진행된 것으로 감식된다.

3.1.2 현장 감식 및 화재 원인 추론

전기식 보조 히터(PTC) 방열부와 히터 코어 표면에서 가연물의 탄화에 의한 표면 그을음 부착 이외 과열에 의한 변색 흔은 식별되지 않았으나, 전기식 보조 히터(PTC)와 연결된 커넥터 및 접속 단자의 소실이 심하며 접속 단자 배선에서 아산화동 증식과 관련한 적자색의 결정이 관찰된 점으로 보아 커넥터 접속 단자의 접속 불량으로 인한 아산화동 증식 발열 현상에 의해 발화된 화재로 추정되며, 관련 사진은 <Fig. 4>를 참고 하기 바란다.



a. combustion phenomenon



b. connector connection terminal



c. red color crystal

Fig. 4 Fire Case 1

3.2 화재사례(2)

3.2.1 화재개요

2024년 12월 23일 주차장에서 차량에 시동을 켜 놓은 상태로 운전자가 약국을 다녀오기 위하여 5분 정도 자리를 비운 사이에 뒷자리에 탑승한 자녀가 타는 냄새가 난다고 전화하여 차로 돌아와 보니 운전석 하부 우측 부분에서 발생한 화재를 목격하고 신고한 건으로, 차량 1대 전소 및 인근에 주차 중이던 차량 2대 부분소 피해가 발생하였다.

3.2.2 발화지점 및 화재 원인 추론

발화지점은 화재 초기 운전자가 목격한 운전석 하부 우측 부분으로 한정되며, 발화지점에서 전기식 보조 히터(PTC)의 커넥터 및 전선을 발견되었으며 해당 차량은 커넥터의 내구성 부족으로 화재 가능성이 있는 리콜 조치 대상으로 입고되어 수리한 이력이 없으며 이 부위에서 아크 흔이 식별되는바, 접촉 불량에 의해 접촉저항이 증가하여 줄열에 의해 발화된 제품 결함에 의해 발화된 화재로 추정되며, 관련 사진은 <Fig. 5>를 참고 바란다.

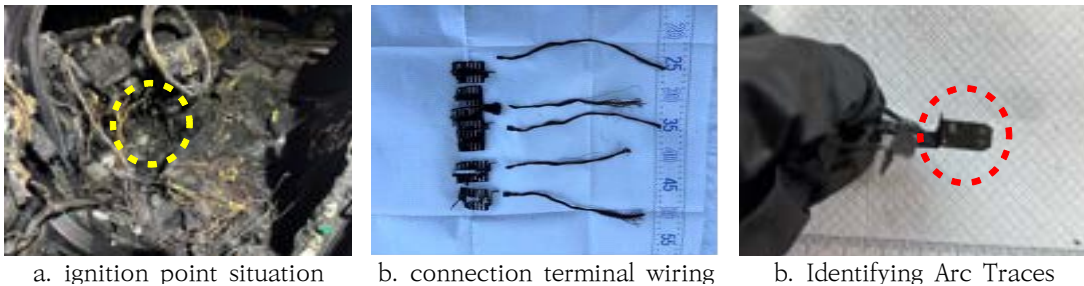


Fig. 5 Fire Case 2

3.3 화재사례(3)

3.3.1 화재개요

2025년 1월 7일 ○○대리점 내 주차장에 시동을 켜 상태로 잠시 자리를 비운 사이에 차량 조수석 하부 좌측 부분 공조기에 설치되어 있는 전기식 보조 히터(PTC) 커넥터와 접속 부위에서 화재가 발생하였다.

3.3.2 현장 감식 및 발화지점 추론

운전석 하부 공조기에 삽입되어 실내 난방을 하기 위한 전기식 보조 히터(PTC)의 커넥터 단자의 소훼 정도가 심하고 연결 접속부에 한정된 화재로, 동 지점에서 수거한 커넥터 접속 단자부에서 적자색 결정의 아산화동 증식이 식별되는 점으로 보아 전기적 요인(아산화동 증식 발열)에 의해 발화한 화재로 추정되었다. 현장 사진 및 감식 결과를 <Fig. 6>에 나타내었다.

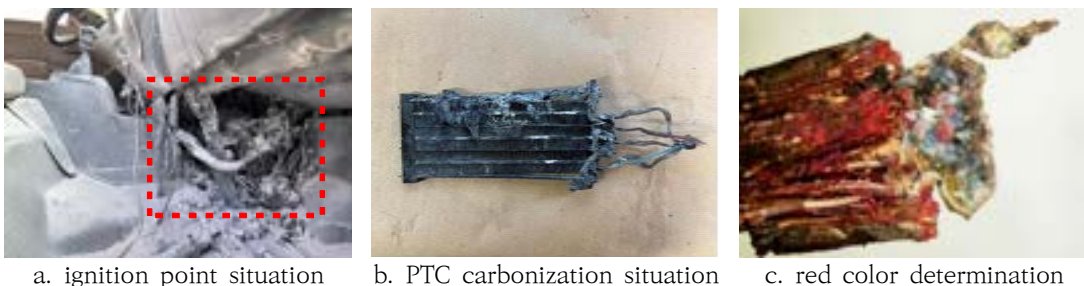


Fig. 6 Fire Case 3

상기 기술한 3건의 화재 사례 공통점을 분석하면 다음과 같은 특성을 확인할 수 있다.

차량은 디젤 차량(강제 착화 방식 진동 계수가 높다.)으로 겨울철 주행 중인 아닌 정차 상태에서 공조기에 삽입되는 전기식 보조 히터(PTC)의 커넥터에서 접속 단자부에서 출화되어 연소가 진행된 형태와 함께 접속 단자에서 적자색 결정의 아산화동 증식 현상이 식별된다.

따라서, 본 재현실험에서는 차량의 배터리에서 전기식 보조 히터(PTC)로 연결되는 계통도를 제작하여 전원 인가 시 PTC 커넥터 접속 부위에 접촉 불량률 유도(진동 및 접촉저항 증가)하여 국부 발열에 따른 아산화동 증식에 의한 발화 가능성을 입증하고자 한다.

4 전기식 보조 히터(PTC)의 커넥터 접속 단자 접촉 불량에 의한 발화 실험

4.1. 실험 개요

관내에서 발생한 화재 사례를 통하여 전기식 보조 히터(PTC)의 커넥터 접속 단자에서 화재가 발생하였으며 이 부위에서 아산화동 증식의 특이점이 관찰되어 정상 회로 세트 및 비정상 회로 세트(접속 단자의 접촉 불량률 유도를 각각 계통도를 구성하여 전원 인가 시 온도, 저항, 전류, 전압 변화를 측정하였으며 아산화동 증식 및 발화 실험을 하였다.

4.1.1. 실험 조건 및 방법

2021년 카니발과 2019년 봉고 차량의 전기식 보조 히터(PTC) 커넥터 접속 단자의 접촉 불량률에 의한 출열에 의한 국부 발열 및 아산화동의 증식을 관찰하기 위해 <Fig. 7>과 같이 차량과 동일하게 차량용 배터리, 퓨즈박스, 전원선(AEXF 내열 자동차용 배선으로 내열 온도 130도 이하, 3.0 SQ), PTC 히터(5핀 750W, 4핀 600W, 작동전압 8V~16V)를 결합한 직류회로를 구성 후 접촉 불량률 유도를 위한 선풍기 모터에 의한 진동을 유도하는 실험 세트를 제작하였다.

또한, 12V의 배터리 전압을 인가하여 아산화동 증식 발열 과정의 전류, 전압, 온도 변화를 열전대, 멀티테스터기, 열화상 카메라를 활용하여 측정한다.

이 과정에서 증식된 커넥터 접속 단자의 아산화동 시편을 멀티미디어 영상 현미경을 활용하여 성분을 분석하였으며, 아래와 같은 순서로 실험을 진행하였다.

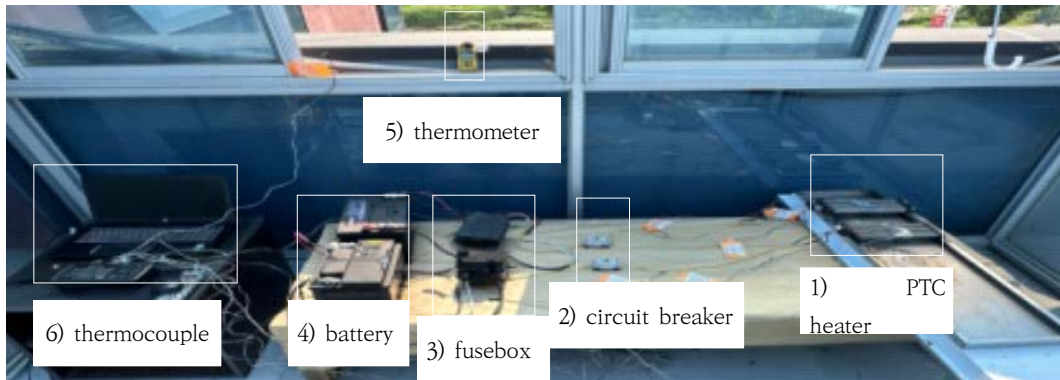
- 실험 1. PTC 히터(2종) 전원 인가 시 회로 부위별 온도, 저항 변화 측정 실험
- 실험 2. PTC 히터(2종) 커넥터 단자 접촉 불량률 유도에 의한 아산화동 출화 실험
- 실험 3. PTC 히터 발화 부위 생성물 X-RAY 및 멀티미디어 영상 현미경 분석

4.1.2. 실험장비

본 실험에서 사용한 실험 세트 및 기록 장비는 <Table 1>, 실험 세트 계통도 및 주요 장비는 <Fig. 7>에 나타내었다.

Table 1. Experimental set and recording equipment

실험 세트	기록(측정) 장비
1. PTC 히터 2점(커넥터 단자 포함) 2. 배선용 차단기 2점 3. 퓨즈박스 2점 4. 차량용 배터리 2점 5. 열전대(K type Thermocouple) 6. 온도계 7. 모터(휴대용 선풍기) 8. k타입 온도센서(-200℃~1260℃)	1. 데이터로거(GRAPHTEC midi LOOGER GL240) 2. 멀티미디어 영상 현미경(EA-300) 3. X-ray(tvx-imt300CT-L) 4. 열화상 카메라 5. 디지털 카메라 6. 비디오 카메라 7. 멀티테스터기 8. 노트북



a. Electric Auxiliary Heater (PTC) Experimental Set(PTC 4pin, 5pin)



b. Multimedia Imaging Microscopy(EA-300)

c. X-ray(tvx-imt300CT-L)

Fig. 7 Experimental Set and Analytical Equipment

4.2. 제1실험(전기식 보조 히터 정상 작동 시 온도, 저항, 전류량 측정)

4.2.1. 실험방법

첫째, 차량 실내와 유사한 구조의 밀폐 공간(가로 3m, 세로 4m, 높이 2m)에 차량용 배터리 (12V, 90AH, 납축전지), 퓨즈박스, 차단기, 전원선(하네스)을 동일하게 연결하고 PTC 히터(5핀, 4핀) 750W, 600W를 각각 연결하여 2점의 계통도(회로당 길이 2m)를 제작한다.

또한, PTC 히터 작동에 따른 배터리 전압 강하를 보완하기 위해 별도의 배터리 충전기 20A를 설치하여 방전에 대비하여 지속적으로 충전한다.

둘째, 열전대($0 \leq TS \leq 2000^{\circ}\text{C}$)의 온도 측정 단자를 각 부품(전선, 커넥터 접속 단자, PTC 히터 발열체)에 연결한 후 시간 경과에 따른 온도 변화(PTC 히터(5핀) 발열체:ch 1, 커넥터(5핀):ch 2, 전원선(5핀):ch 3, PTC 히터(4핀) 발열체:ch 4, 커넥터(4핀):ch 5, 전원선(4핀):ch 6. 실내 온도:ch 7) 및 멀티테스터기로 저항 및 전류의 변화를 측정한다. 관련 사진은 <Fig. 8>에 나타내었다.

셋째, 120분 동안 PTC 히터에 전원을 공급하여 세트. 1과 세트. 2의 소비전력 차이에 의한 온도, 저항, 전압, 전류의 차이를 관찰하고 아산화동 증식 발생 여부를 확인한다.

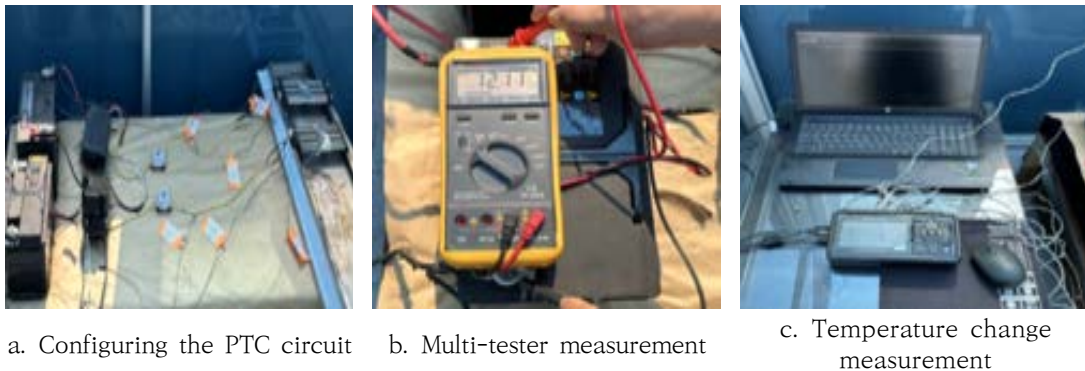


Fig. 8 Measurement of temperature, resistance, and current value changes in a normal circuit

4.2.2. 실험결과

실험 결과 전원 인가 시 세트. 1의 PTC 히터(750W) 발열체 온도 범위 $119.8 \sim 131.7^{\circ}\text{C}$, 커넥터 단자의 온도 범위 $57.8^{\circ}\text{C} \sim 79.5^{\circ}\text{C}$, 전원선 $34.4^{\circ}\text{C} \sim 46.5^{\circ}\text{C}$ 로 나타났으며 세트. 2 PTC 히터(600W) 발열체 온도 범위 $102.8^{\circ}\text{C} \sim 121.4^{\circ}\text{C}$, 커넥터 단자의 온도 범위 $38.4^{\circ}\text{C} \sim 65.4^{\circ}\text{C}$, 전원선 $32.1 \sim 44.3^{\circ}\text{C}$ 로 측정되었다.

소비전력이 높은 세트. 1의 최고온도가 세트. 2의 최고온도보다 부위별 대략 $10^{\circ}\text{C} \sim 14.1^{\circ}\text{C}$ 로 높게 측정되었다.

이는 세트. 2에 비해 소비전력이 높은 세트. 1의 발열체로 인해 회로에 흐르는 높은 전류로 저항이 높아지며 발열하여 온도가 더 높게 나타난 것으로 보인다.

40분 경과 뒤에는 온도 변화가 더 이상 없었으며 배터리 전압 강하로 인해 서서히 온도가 감소하는 경향을 나타내어 70분 경과 뒤 차단기를 작동(off)하여 실험을 종료하였다.

Table 2. Set. 1 and set. 2 Temperature change measurements for time by measurement part

Time (min)	Set. 1			Set. 2			실내온도 (ch 7)
	발열체1 (ch 1)	커넥터1 (ch 2)	전원선1 (ch 3)	발열체2 (ch 4)	커넥터2 (ch 5)	전원선2 (ch 6)	
0	27.5	28.3	29.1	26.7	27.3	26.2	25.7
5	119.8	57.8	34.4	112.7	38.4	30.9	25.1
10	130.2	68.3	37.5	102.8	48.6	33.6	25.9
15	130.6	72.5	41.2	102.9	54.3	34.1	25.8
20	131.7	75.1	40.7	120.9	56.4	36.6	27.2
25	129.1	77.7	41.4	120.7	64.2	38.2	26.5
30	128.6	78.4	42.1	121.4	65.4	40.5	26.5
35	126.6	78.4	42.6	119.4	63.1	42.8	24.4
40	130.4	79.5	46.5	115.2	65.4	44.3	28.2

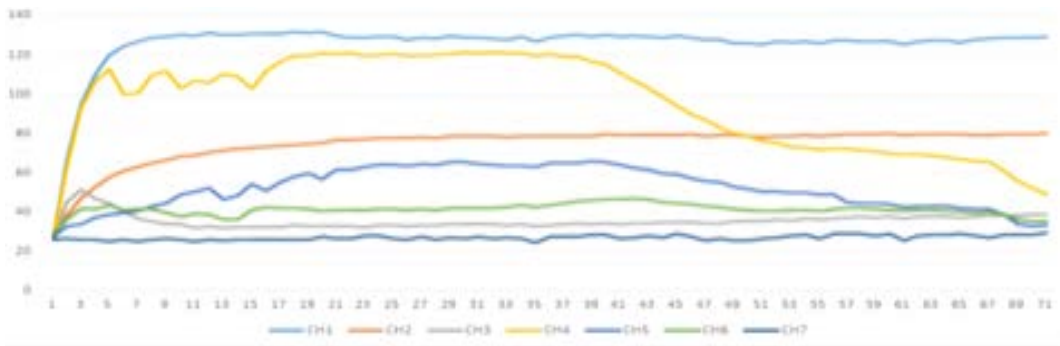


Fig. 9 Set 1 and Set 2 A graph of temperature change over time by measurement part

전기식 보조 히터(PTC) 발열체의 온도는 초기 최대 전력을 소모하여 빠르게 가열되고, 온도가 올라가면서 전력 소비가 점차 감소하여 가열 속도가 낮아지는 것으로 나타났으며 일정 온도 이상으로 올라가지 않는 이유는 온도가 상승함에 따라 전기저항이 증가하여 발열체의 열 출력을 자체 조절할 수 있게 하는 재료의 고유 특성 때문인 것으로 나타났다.

발열체는 공조기 안에 주변 부품과 이격되어 삽입되는 구조로 200℃ 이하의 온도에서 주변 가연물과 접촉 및 복사열에 의한 화재 가능성은 희박한 것으로 확인되었다. 이 실험에서 특이점은 전원선의 온도에 비해 커넥터 단자의 온도가 1.5배 높은 것으로 관찰되었다.

따라서, 본 실험에서 나타난 데이터를 일반적으로 시동이 켜진 차량의 발전기 전압(14.4V~14.6V)에서 전압과 전류가 일정하게 공급되어 운행되는 과정에서 진동에 의한 전기식 보조 히터(PTC) 커넥터 단자의 불완전 접촉으로 인한 아산화동 생성, 증식 과정에서 높은 전류가 유입되어 화재가 일어날 가능성이 있다.

Table 3. Resistance, voltage, and current measurements over time in Set. 1 and Set. 2

구분	Set. 1			Set. 2		
시간(min)	저항(Ω)	전압(V)	전류(A)	저항(Ω)	전압(V)	전류(A)
0	0.64	13.40	20.80	0.62	13.17	21.25
5	0.85	12.45	14.58	0.83	12.42	14.92
10	1.00	12.52	12.44	0.97	12.48	12.84
15	1.40	12.66	9.02	1.30	12.54	9.65
20	1.56	12.72	8.18	1.43	12.66	8.84
25	1.80	12.84	7.15	1.66	12.72	7.68
30	1.85	12.86	6.96	1.82	12.81	7.04
35	1.94	12.88	6.65	1.84	12.83	6.98
40	1.98	12.92	6.53	1.91	12.89	6.74

전기식 보조 히터(PTC) 발열체는 시간이 지날수록 온도가 상승함에 따라 저항값도 상승함을 알 수 있었으며 이로 인한 전류가 감소하며 소비전력이 낮아져 온도가 떨어지는 현상으로 40분 경과 후에는 상기 과정이 반복적으로 일어나 발열체가 안정적인 온도(120℃~130℃)를 유지하는 것을 알 수 있었으며 전압은 일정하게 유지되는 반면 전류는 급격히 감소함을 확인할 수 있었다.

4.2.3. 실험 결과 분석

소비전력이 높은 세트. 1의 최고온도가 세트. 2의 최고온도보다 부위별 대략 10℃~14.1℃ 높게 측정되었다.

이는 세트. 2에 비해 소비전력이 높은 세트. 1의 발열체로 인해 회로에 흐르는 전압은 거의 일정 하지만 발열체에서 소비되는 전류량이 많아 온도 차이가 발생한 것으로 보인다.

따라서, 본 실험에서 나타난 데이터를 일반적으로 시동이 켜진 차량의 발전기 전압(14.4V~14.6V)에서 전압과 전류가 일정하게 공급되는 과정에서 차량 운행 시 발생하는 진동 및 불완전 접촉에 의한 직렬 아크방전 및 접촉 저항 증가에 의한 아산화동 증식에 의한 발화 가능성을 예상할 수 있었다.

4.3. 제2실험(접촉 불량 유도에 따른 아산화동 증식 및 발화 실험)

4.3.1. 실험방법

첫째, PTC 히터 750W의 커넥터와 연결되는 접속 단자의 접촉 불량을 유도(접속 부위 압착 불량(+선 연선 100가닥 중 50가닥, -선 연선 50가닥 중 25가닥만 연결 및 휴대용 선풍기 날개로 진동(8,000rpm) 발생)하여 직렬 아크방전 및 접촉저항 증가에 의한 국부 발열을 유도하기 위해 세트. 1을 구성한다. 관련 사진은 <Fig. 10>에 나타내었다. 세트. 2는 PTC 히터 600W에 전원만 공급하고 정상상태로 연결하여 세트. 1의 대조군으로 설치한다.

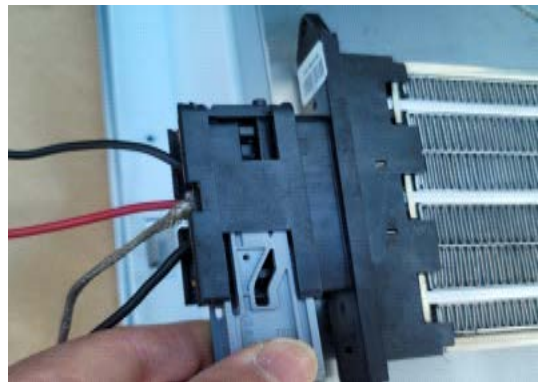
둘째, 각 부위(전선, 커넥터 접속부, PTC 히터 본체)의 시간 경과에 따른 온도 변화를 열전대 및 열화상 카메라로 기록하기 위해 준비한다.

셋째, 세트. 1. 세트. 2. 의 PTC 히터에 전원을 인가하여 커넥터의 접속 단자의 발열에 의한 온도 변화를 측정하고 출화 부위에서 아산화동 증식 발생 여부를 관찰한다.

넷째, 커넥터 단자에서의 국부 발열에 의한 발화 여부를 확인한 후 히팅건을 이용하여 온도에 따른 저항값 변화를 측정하여 아산화동 증식 여부를 관찰한다.



a. Induction of contact terminal vibration



b. Connector Incomplete Contact Induction

Fig. 10 Induction of incomplete contact for hydroxylation proliferation

4.3.2. 실험결과

실험 결과 커넥터 접속 단자의 접촉 불량을 유도한 부위(접촉 단면적을 1/2로 줄여 접촉저항을 2배로 높게 설정 후 진동을 통한 직렬 아크방전)에서 정상 온도(65.4℃~78.4℃) 범위를 넘어 80분 경과 뒤 123.1℃에서 170분 경과 305.4℃ 급격히 온도가 높아지더니 접속 부위의 절연 피복에서 연기가 발생, 180분경 520.8℃ 측정 이후 발화 이후 K-타입 온도센서 측정 온도가 “Burnout”으로 표기되어 더 이상 온도가 측정되지 않아 200분(min)에 배터리 전원을 차단하여 실험을 종료하였다.

제2장 | 중부권

열전대 및 열화상 카메라로 측정된 수치와 그래프는 <Table 4>, <Fig. 11>, <Fig. 12>에 나타내었다.

Table 4. Measurement of temperature change over time

Time (min)	Temp1 (ch. 1)	Temp2 (ch. 2)	Temp3 (ch. 3)	Temp4 (ch. 4)	Temp5 (ch.5)	Temp6 (ch. 6)	Temp7 (ch.7)
0	25.8	25.1	24.6	25.1	25.2	25.2	23.6
30	114.5	66.2	33.4	111.2	45.3	31.9	24.1
60	116.6	79.6	31.6	107.5	47.6	34.8	25.6
90	121	109.9	32	109.9	55.6	35.2	25.6
120	121.7	128.9	32.4	106.6	55.6	35.2	24.7
150	106.9	201.4	31.3	106.7	40.8	34.1	25
180	105.8	520.8	29.5	105.8	33.6	32.1	25.6

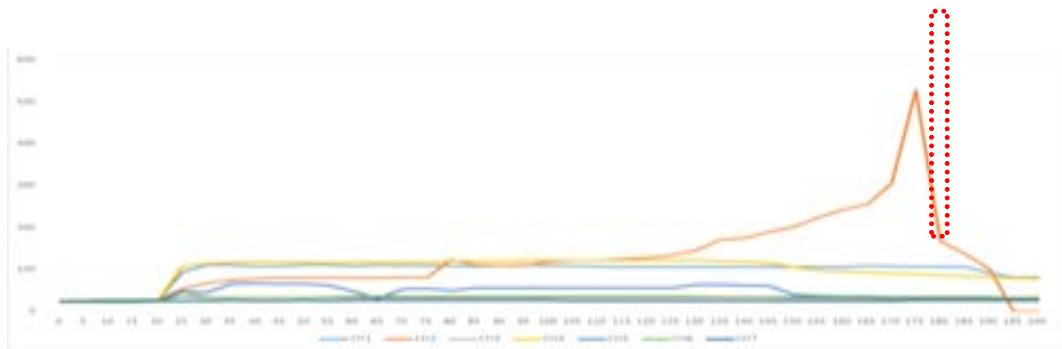


Fig. 11 Graph of temperature change for each part according to induction of contact failure



Fig. 12 Measurement of temperature change at ptc connector connection terminal

발화 이전 PTC 커넥터 접속 단자의 상온(23.6℃)에서의 최초 저항값은 0.8Ω이며 발화 이후 커넥터 접속 단자의 저항값은 108Ω으로 높게 측정되었다.

또한, 증식 부위에서 적자색 결정이 식별되어 히팅건(최고온도 600℃)으로 온도를 높여 가며 저항값을 측정하면, 저항이 108Ω에서 4.4Ω까지 내려가는 것으로 보아 커넥터 접속 단자에 아산화동이 생성, 증식(N형 반도체 성질)됨을 확인할 수 있었으며 커넥터 접속 단자 증식 부위를 열화상 카메라로 관찰한 결과를 <Fig. 13>, <Fig. 14>에 나타내었다.

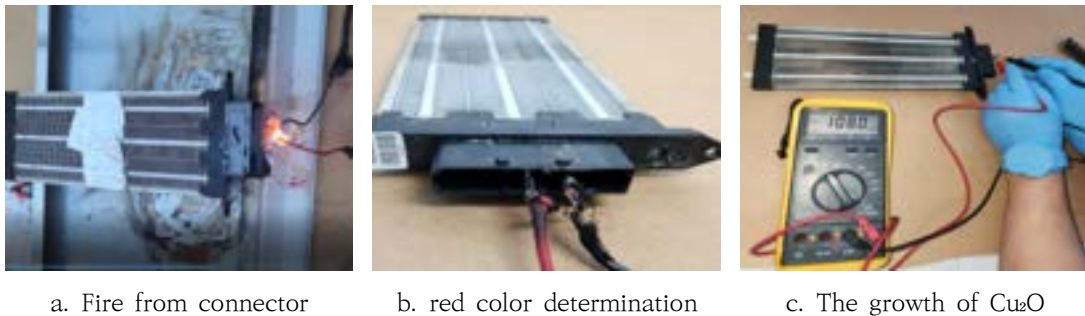


Fig. 13 Identification of suboxidation by induction of defective contact at connector terminals



Fig. 14 Measurement of resistance with increasing temperature(108Ω ▶ 22.4Ω ▶ 4.4Ω)

4.3.3. 실험 결과 분석

정상적인 상태에서 전원을 인가한 세트. 2는 제1실험과 동일하게 안정된 온도 변화를 보였으나, 접촉 불량을 인위적으로 유도한 세트. 1의 커넥터 접속 단자 온도는 150분이 경과되자 200℃ ~ 520℃의 범위로 계속해서 증가하였으며 이후 열전대와 연결한 K-타입 온도센서(최고온도 1,260℃)가 “Burnout”으로 표기되어 측정 온도를 벗어난 더 높은 온도로 올라가며 화재가 발생한 것으로 예상된다.

따라서, 접촉 불량을 유도한 접촉 부위의 저항이 증가(줄열)하여 아산화동이 생성, 증식되었으며 이 부위로 높은 전류가 급격히 유입되어 절연 피복에 착화, 화재가 발생할 개연성을 확인할 수 있었다.

4.4. 제3실험(커넥터 출화 부위 단자의 아산화동 성분분석)

4.4.1. 실험방법

첫째, 세트. 1의 전기식 보조 히터(PTC)의 커넥터 접속 단자의 탄화된 전원선<제2실험>에 형성된 아산화동 시편(시료)을 준비한다.

둘째, 커넥터의 아산화동 증식 부위를 멀티미디어 영상 현미경(EA-300)을 활용하여 시료의 표면 상태 및 성분분석을 실시한다.

4.4.2. 실험 결과

가. 구리 산화물(아산화동)의 전기적 저항값 변화 측정

전기식 보조 히터(PTC)의 실험 전 커넥터 단자의 순수 저항을 측정한 결과 상온(23.6℃)에서 0.8Ω, 제2실험에서 발화 이후 단선된 전원선의 아산화동 증식 부위에서 125.5Ω의 저항값이 관찰되었다. 저항 측정 결과를 <Fig. 15>에 나타내었다.



a. Pre-experimental connector resistance (0.8Ω)

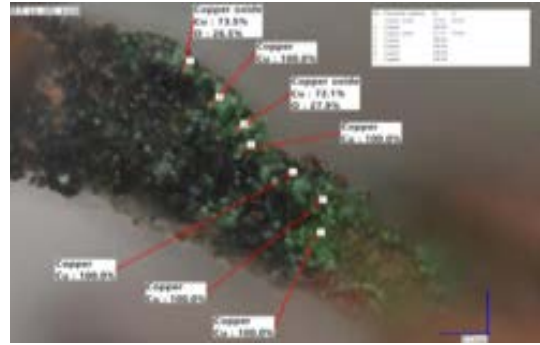


b. Connectors resistance after experiment(125.5Ω)

Fig. 15 Measurement of change in resistance value of connector terminal contact

나. 멀티미디어 영상 현미경(EA-300) 표면 관찰 결과

접촉 불량을 유도하여 화재가 일어난 커넥터 단자의 접속부 배선으로 길이 12mm 범위에서 구리 표면에 적자색의 루비 결정을 통해 아산화동 증식 흔적을 확인할 수 있었으며 실험 이후 시간이 경과함에 따라 아산화동 표면이 산화되며 녹청(綠靑) 현상이 관찰되었다. 관련 사진을 <Fig. 16>에 나타내었다.

a. Observation of Cu_2O breeding

b. Component Analysis

Fig. 16 Observation of the surface of the plot[9]

다. 멀티미디어 영상 현미경(EA-300)의 레이저 유도 붕괴 분광법을 활용한 성분분석

커넥터 접속 단자의 아산화동 특징(녹청(綠靑) 색 표면)이 식별되는 부위를 설정한 후 성분을 분석한 결과, No. 1, 3에서 일정량 이상의 산소 성분이 검출되어 전기적 요인에 의한 아산화동이 생성, 증식된 것으로 관찰되며 분석 결과를 <Fig. 17>에 나타내었다.

NO	Presumed material	Cu	O
1	Copper oxide	73.5%	26.5%
2	Copper	100.0%	100.0%
3	Copper oxide	72.1%	27.9%

Fig. 17 Cu_2O Component Analysis(EA-300 : $\times 300$)

4.4.3. 실험 결과 분석

가. 아산화동의 전기적 특이점 분석

실험 전 커넥터 접속 단자의 순수 저항값(0.8Ω)에서 실험 이후 저항값이 급격히 증가(125.5Ω)한 것으로 측정되는바, 접속 불량 유도에 의한 줄열에 의해 국부 발열로 아산화동이 생성, 증식되어 저항값도 높게 나타난 것으로 분석된다.

나. 멀티미디어 영상 현미경을 이용한 표면 관찰 결과 분석

발화 부위의 시료에 대하여 표면 관찰 결과 통전 상태에서 지속적으로 온도가 상승하며 저항도 증가되는 과정에서 발열되며 나타나는 아산화동의 적자색 결정이 관찰되었다. 또한, 공기 중에 노

출되어 시간이 경과함에 따라 아산화동 산화 과정에서 특유의 녹청(綠靑) 현상이 발생하여 아산화동이 생성, 증식된 것으로 분석된다.

다. 멀티미디어 영상 현미경을 이용한 성분 결과 분석

커넥터 접속 단자에 접촉 불량을 유도하여 생성된 아산화동 증식 표면의 구리와 산소 비율을 분석한바, 약 7:3의 성분 분포로 보아 아산화동 생성되었다. 따라서, 아산화동 증식 부위에 온도가 상승함에 따라 저항이 급격히 감소하며 국소 부위에 많은 전류가 흘러 발화된 원인 판단의 근거로 활용이 가능할 것으로 분석 결과 나타났다.

5 결 론

5.1. 실험 결론

전기식 보조 히터(PTC)에 전원 인가 시 회로별 온도, 저항 변화를 측정하였으며 화재를 재현하기 위해 커넥터 접속 단자에서 접촉 불량을 유도하여 접촉저항 증가에 의한 줄열에 의한 온도 변화 및 아산화동의 특징을 관찰할 수 있었으며 생성된 아산화동 증식 여부 확인을 위해 멀티미디어 영상 현미경으로 성분분석을 실시하였으며, 실험 결과를 <Table 4>에 요약하였다.

Table 4. Summary of Experimental Results

구 분	내 용	실 험 결 과
실험 1	PTC 히터 온도, 저항, 전류, 전압 측정	① 소비전력 차이에 의한 PTC 히터 커넥터 접속 단자 온도 차 발생 ➡ 750W가 600W에 비해 1.5배 높게 측정 ② 온도 상승 시 전압은 일정, 저항값 증가➡ 줄열에 의한 국부 발열
실험 2	접촉 불량에 의한 출화	① 커넥터 접속 단자 온도(200℃~500℃) 식별➡ 발화 개연성 확인 ② 온도 상승에 따른 저항값 감소➡ 아산화동(N형 반도체) 특징 관찰
실험 3	아산화동 생성물 성분분석	① 커넥터 접속 단자 실체현미경 관찰 ➡ 적자색 결정 확인 ② 멀티미디어 영상 현미경(EA-300) 성분분석 ➡ 아산화동 증식 확인 (구리와 산소 함유량 약 7:3 측정) 및 녹청(綠靑) 현상

첫째, 소비전력에 따라 전기식 보조 히터(PTC) 커넥터 접속 단자에 흐르는 전류의 차이로 인해 온도 차이를 보이며 온도 변화에 따라 저항이 증가하여 줄열에 의해 국부 발열을 확인할 수 있었다.

둘째, 전기식 보조 히터(PTC)의 커넥터 접속 단자에 진동 및 접촉 불량을 유도한바, 직렬 아크방전 및 접촉저항 증가에 따라 커넥터 접속 단자의 온도가 200℃~500℃로 높아져 접속 단자 배선의 내열 온도가 130℃ 이하, 커넥터의 용융온도가 240℃ 이하인 점을 고려하면 커넥터 접속 단자에서

발화할 가능성이 충분할 것으로 예상된다.

또한, 발화 부위에서 아산화동이 관찰되며 온도 상승에 따라 저항이 감소, 전류가 증가하여 발열하는 N형 반도체의 특징이 관찰되었다.

셋째, 아산화동 증식 부위 시료에 대하여 적자색 결정 확인 및 시간 경과에 따라 아산화동이 산화되며 나타나는 녹색(綠靑) 현상이 관찰되었다. 멀티미디어 영상 현미경(EA-300)으로 성분을 분석한바, 구리와 산소 비율이 7:3으로 나타나 아산화동이 생성, 증식됨을 알 수 있었다.

상기 내용을 종합해 보면, 전기식 보조 히터(PTC)의 커넥터 접속 단자에서 접촉 불량에 의한 아크방전 및 접촉저항 증가에 따라 줄열 및 아산화동 증식에 의한 전류 증가에 의해 접속 단자 배선(내열온도 : 130℃) 및 커넥터(플라스틱 용융점 : 240℃ 이하) 내열 온도보다 높게 올라가 화재위험성이 높은 것으로 나타났다. 따라서, 겨울철 차량의 내, 외부 온도 차이로 인해 커넥터 단자에 결로 현상(수분으로 인한 아크방전) 및 진동이 발생할 것으로 예상되어 커넥터의 이극 단자 간 절연 성능을 높이며 내구 성능이 뛰어난 재료로 커넥터 단자 및 배선을 (준)불연재료로 보강해야 할 것으로 사료 된다.

5.2. 화재 조사(감식) 알고리즘 개발

본 실험을 통한 연구 결과를 바탕으로 차량의 전기식 보조 히터(PTC) 화재 조사(감식) 알고리즘을 <Fig. 18>에 나타내었으며 화재 원인 규명 판정 근거로 활용되기를 바란다.

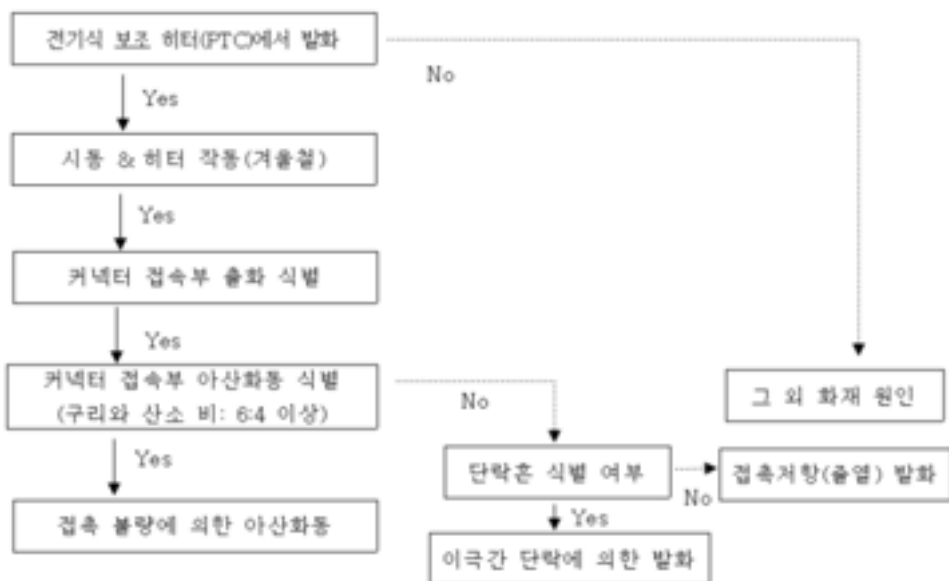


Fig. 18 Fire Investigation Algorithm(In case of electric auxiliary heater fire of vehicle)

참고문헌

1. 국가화재정보시스템(www.nfds.go.kr)
2. 최수길·최유정·김시국, “단자대 및 전선 접속부의 불완전 접촉에 따른 아산화동 증식 발열에 관한 실험적 연구”, 한국방재학회지, 22권 5호, pp. 106-107, 2022
3. 김완수·박상준·황동현, “전기적 불완전 접촉에 따른 동산화물의 발열 및 아크 특성”, 한국안전학회지, 34권 3호, pp. 15-20, 2019.
4. 김정수·허영준·정의관·변진수·김준식, “아산화동 발화 특성에 대한 실험적 연구”, 2022년 서울소방화재조사 우수 연구 논문집, pp. 59-60, 2022.
5. 박진영·이의평, “아산화동 증식 발열에 의한 화재 사례의 분석”, 한국화재소방학회 논문지, 34권 2호, pp. 54-63, 2020.
6. NAVER 지식백과(<https://terms.naver.com>)
7. 위키백과(<https://ko.wikipedia.org/wiki>)
8. 화재발생종합보고서(횡성 2024-01-012), 강원도소방본부, 2024.
9. 화재발생종합보고서(철원 2024-12-110), 강원도소방본부, 2024.
10. 화재발생종합보고서(철원 2025-01-002), 강원도소방본부, 2025.
11. Copper(I) oxide samples were analyzed with EA-300 by the National Fire Research Institute



2025년
화재 재현실험
연구보고서



제 2 장 | 중부권



☑ 광역화재조사 1팀 >>>

주조 공정에서 발생하는 분진의 화재 위험성 연구

☑ 광역화재조사 2팀 >>> ☆'25년도 강원 화재재현실험 연구논문 발표대회 최우수 차량의 전기식 보조 히터(PTC)의 화재 위험성 연구

☑ 광역화재조사 3팀 >>>

열 축적 가능 환경에서 복사열 에너지에 의한 라텍스 제품의 발화 가능성 연구

열 축적 가능 환경에서 복사열 에너지에 의한 라텍스 제품의 발화 가능성 연구

함승훈¹⁾, 한재섭, 김상만, 김찬진, 박소라
강원특별자치도 소방본부 중부권광역화재조사 3팀

Study on the ignition potential of latex products by radiant heat
energy in an environment where heat accumulation is possible

Seung Hun Ham[†], Jae Seob Han, Sang Man Kim, Chan Jin Kim, So Ra Park
(Gangwon State Fire Headquarters Central Region Fire Investigation)

ABSTRACT

This study experimentally compares the heat accumulation behavior and fire risk characteristics of natural latex and polyurethane (PU) foams under long-term radiant heat exposure. Specimens of 5 cm and 10 cm thickness were exposed to a 1000 W electric heat source, and their internal temperatures were recorded every 10 seconds for up to 500 minutes. The PU 5 cm specimen showed a rapid temperature increase, exceeding 75 °C within 120 minutes and reaching a peak of approximately 77 °C. In contrast, the Latex 5 cm specimen exhibited a slower but more sustained temperature rise, peaking at 63 °C around 200 minutes. The 10 cm latex specimen showed even more delayed heating, with temperature rising continuously over 250 minutes. Despite its slower surface response, natural latex retained heat for a longer period and demonstrated extended internal thermal storage. These findings highlight a critical distinction in fire behavior : while PU foam is more prone to early ignition due to its rapid temperature rise, natural latex may pose a greater risk of delayed ignition in thermally insulated or poorly ventilated environments due to long-term internal heat accumulation. The study emphasizes the need for fire investigations to consider not only surface temperature changes but also latent heat buildup inside porous foam materials.

Key words : ① latex ② Radiant Heat ③ Heat Accumulation ④ Fire Hazard

1) E-mail : hamxx@korea.kr

1 서론

1.1. 연구 배경 및 필요성

최근 친환경 소비트렌드의 확산에 따라 천연 라텍스(Natural latex)는 매트리스, 쿠션, 유아용품 등 다양한 생활 제품에 널리 사용되고 있다. 라텍스는 고무나무 수액을 기반으로 제작되어 인체에 무해하며, 통기성, 탄성, 항균성 등에서 우수한 물성을 지녀 고급 소재로 분류된다. 그러나 이러한 긍정적 물성 이면에는 열전도율이 낮고, 내부에 다공성 셀 구조를 갖는 고체라는 점에서 열 축적에 취약한 구조적 한계가 존재한다.

특히 여름철 강한 복사열에 장시간 노출되거나, 밀폐된 실내 및 차량 내부와 같이 외부로 열이 방출되지 않는 환경에서는 재료 내부 온도가 점진적으로 상승할 수 있다. 이러한 상황에서 라텍스는 외관상 안정적으로 보이더라도 내부에는 누적된 열이 발화점에 근접하거나, 외부 점화원에 의해 쉽게 화재로 이어질 수 있는 위험성을 내포하게 된다.

실제로 자연 발화(spontaneous ignition)는 외부 화염 없이도 일정한 온도 이상의 누적 열량에 의해 발생할 수 있으며, 라텍스와 같은 유기 고분자 물질은 이러한 조건에서 잠재적 위험군으로 분류될 수 있다.

이러한 우려는 실 사례에서도 확인되고 있다. 2024년 1월, 강원특별자치도 원주시의 한 농막에서 라텍스 매트리스를 토퍼와 겹쳐 사용하던 중, 복사열에 의해 내부에 열이 축적되어 발화로 이어진 화재가 발생하였다. 이는 외부 점화원 없이 열 누적으로 인한 화재 가능성을 보여주는 사례로서, 라텍스의 열 축적 특성에 대한 경각심을 일깨우는 계기가 되었다.

그럼에도 불구하고 현재까지 라텍스의 열 축적 및 발화 메커니즘에 대한 정량적 연구는 매우 제한적이며, 기존의 화재 안전성 실험은 대부분 폴리우레탄 폼(PU 폼), 합성 라텍스 등 석유계 소재에 집중되어 있다. 또한 라텍스를 ‘비화재성 안전 소재’로 인식하는 소비자 및 제조업체의 인식은 실질적인 위험성을 간과하게 할 수 있으며, 이는 실제 화재 발생 시 인명 및 재산 피해로 이어질 수 있는 잠재적 요소가 된다.

따라서 천연 라텍스 제품의 실사용 환경에서 발생할 수 있는 열 축적 특성과 이에 따른 화재 가능성을 과학적으로 규명하고, 이를 바탕으로 객관적인 안전성 기준을 마련할 필요가 있다. 본 연구는 단순히 라텍스 제품의 발화 여부를 확인하는 것에 그치지 않고, 복사열 조건에서의 누적 열 변화, 발화 조건, 지연 발화 메커니즘 등을 종합적으로 분석한다.

이를 통해 생활 제품 설계 시 안전 기준의 강화와 소재 선택 시 보다 신중한 접근을 유도하고자 하며, 천연 소재도 특정 조건에서 충분히 위험할 수 있다는 점을 경고하는 과학적 근거 자료로 활용될 수 있을 것이다.

1.2 라텍스의 열 축적에 의한 화재 발생 통계분석

5년간 강원도에서 발생한 라텍스의 열 축적에 의한 화재 건수는 총 22건이 발생하였으며, 장소별 농막 1건을 제외한 21건 모두 주택 내부에서 발생한 것을 볼 때 라텍스 화재는 주로 침구류로 사용하는 제품에서 발생한다는 것을 알 수 있다.

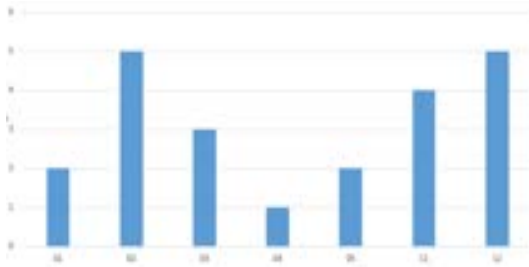


Fig 1. Number of latex heat accumulation fires per month

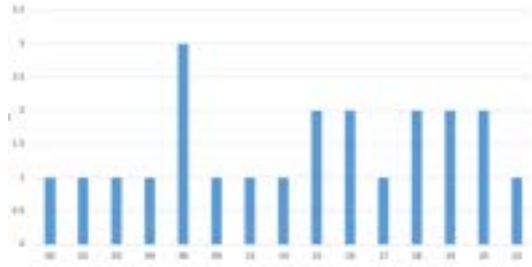


Fig. 2. Number of latex heat accumulation fires by hour

월별 발생 건수는 12월, 2월, 11월, 3월, 5월, 4월 순이며, 기온이 낮은 겨울철(11월~3월)에 107건(86%)의 화재가 발생하였다.

발생 시간대를 확인한바 모든 시간대에 고르게 분포되어 있었으며, 이는 라텍스의 열 축적에 의한 화재가 단시간의 축적이 아닌 장시간 동안 축적되어 발생한다는 것을 알 수 있었다.

1.3 연구 목적

본 연구에서는 열 축적이 가능한 환경에서 라텍스 제품이 복사열에 지속적으로 노출될 경우, 내부 온도 변화와 발화 가능성에 어떤 영향을 받는지를 실험적으로 분석하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 라텍스와 일반적으로 많이 사용되는 폴리우레탄 폼(PU 폼)을 동일한 복사열 조건 하에 노출시키고, 시간에 따른 내부 온도 변화, 표면 반응, 발화 여부 등을 비교 관찰한다.

실험을 통해 라텍스의 열 축적 특성을 정량적으로 평가하고, 실제 환경에서 발생할 수 있는 화재 가능성 평가에 활용 가능한 지표 도출을 목표로 한다. 더 나아가 본 연구는 향후 천연 소재 기반 제품의 열 안전성 설계 및 법적 기준 수립에 참고될 수 있는 기초 데이터를 제공하고, 소비자와 제조자의 안전 인식을 높이는 데 목적이 있다.

1.4 연구 범위 및 방법

실험은 밀폐된 조건을 모사한 실내 환경에서 수행되었으며, 복사열은 1000W급 전기스토브를 통해 일정 거리(50cm)에서 조사되었다. 시편은 라텍스 및 PU 폼을 각각 110cm×700cm×15cm 크기로

가공하여 동일한 조건에 배치하였고, 조사 시간 200분 후 300분 냉각 시간을 설정하였다. 온도 측정은 시편 내부에 삽입된 열전대를 통해 10초 간격으로 수행하였으며, 열화상 카메라를 병행하여 표면 온도 분포도 수집하였다.

이 데이터를 기반으로 라텍스의 열 축적 특성과 발화 조건을 정량적으로 분석하고, PU 폼과의 차이를 비교함으로써 재료의 화재 위험성을 종합적으로 평가하였다.

본 연구는 화재 직전 단계의 열 축적 특성에 중점을 두고 설계되었으며, 실제 발화까지 이어질 수 있는 열역학적 조건을 실내 환경에서 재현하는 데 그 목적이 있다.

이를 통해 생활 제품으로 사용되는 라텍스 소재의 열적 안전성 확보에 기초자료를 제공하고자 한다.

2 라텍스 매트리스 사용 실태 및 선행 연구 검토

2.1 천연라텍스 사용 현황 및 수요 추이

라텍스는 고무나무(*Hevea brasiliensis*)에서 채취한 수액을 기반으로 제조되며, 인체에 무해하고 생분해성이 뛰어난 친환경 소재로 잘 알려져 있다.

이러한 특성 덕분에 라텍스는 매트리스, 베개, 유아용 침구류, 방석, 좌욕기 등 다양한 생활용품에 널리 활용되고 있다.

국내에서는 2010년대 초반부터 ‘친환경’, ‘무독성’, ‘천연 소재’에 대한 관심이 높아지며 라텍스 제품에 대한 수요가 급격히 증가하였다.

특히 유아 및 민감성 피부 사용자층을 중심으로 ‘라돈 없는 매트리스’, ‘항균·항진드기 효과’, ‘무소음’ 등의 특성이 부각되며 소비자 선호도가 높아졌다.

시장조사기관의 발표에 따르면, 국내 라텍스 매트리스 시장은 연평균 810%의 성장률을 보이고 있으며, 2020년 기준 전체 프리미엄 매트리스 시장의 대부분을 차지하는 것으로 분석된다. 특히 코로나19 이후 위생 및 건강 관련 관심이 증가하면서, 알러지 프리(Allergy-Free) 소재로서의 라텍스 매트리스에 대한 수요도 크게 증가하였다.

또한 최근에는 온라인 유통 채널을 통한 저가형 라텍스 제품이 확산되면서, 진품 여부나 열·화학적 안전성에 대한 객관적 검증이 부족한 제품도 시장에 혼재된 실정이다.

이러한 점은 소비자 안전에 직접적인 영향을 줄 수 있으며, 특히 장시간 사용 시 제품이 복사열이나 고온 환경에 노출될 경우의 안전성 문제에 대한 정량적 연구의 필요성을 시사한다.

2.2 선행 연구 검토

기존의 라텍스 관련 연구들은 주로 기계적 특성, 즉 압축 탄성, 경도, 복원력, 내구성 등 제품의 물리적 성능 향상에 초점을 맞추고 있다. 라텍스는 구조적으로 고분자 네트워크가 잘 형성되어 있어 우수한 탄성과 복원력을 가지며, 이를 기반으로 한 인체공학적 설계 연구가 활발히 진행되어 왔다.

예를 들어, 권준민 외(2022)는 라텍스 제품이 전기장판·복사열 같은 외부 요인으로 인해 열 축적 및 화재 위험을 갖게 되는 기초 실험과 분석을 하였으며, 그 결과 라텍스 제품이 고체 내부에서 열 축적 가능한 구조임을 입증하였다.

또한 김재혁 외(2023)는 라텍스와 전기요의 혼용 사용으로 인해 발생할 수 화재의 위험성과 예방대책을 제시하였다.

특히 실제 생활환경에서 복사열에 장시간 노출될 경우 발생할 수 있는 위험성에 대한 연구는 전무한 수준이며, 라텍스가 가진 고무계 유기물로서의 연소 특성에 대한 과학적 검토도 부족하다.

따라서 본 연구는 기존의 기계적 특성 중심의 연구 범주를 벗어나, 열 축적 환경에서 라텍스의 열 반응 및 발화 가능성에 대해 다각도로 분석하고자 한다.

2.3 관련 화재사례 분석

2.3.1 발생일시

2024년 1월 18일(목) 16:29경 원주시 소재 농막

2.3.2 화재 개요

농막 전기 난방 필름 상부에 매트리스와 토퍼를 중첩 사용 중 매트리스와 토퍼 중첩 면에서 변색 및 소량의 연기가 발생한 화재로, 전기 난방 필름에서 발생한 복사열에 의해 라텍스 매트리스와 토퍼 사이에서 발생한 축열로 발화한 것으로 추정된다.



Fig 3. Inside the ignition site



Fig 4. mattress support



Fig 5. Latex Mattress Upper

3 이론적 배경

3.1 라텍스(Latex) 소재의 특성

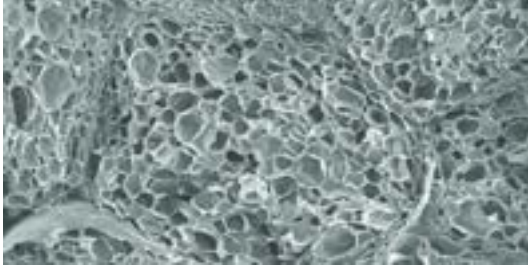


Fig 6. Internal structure of latex

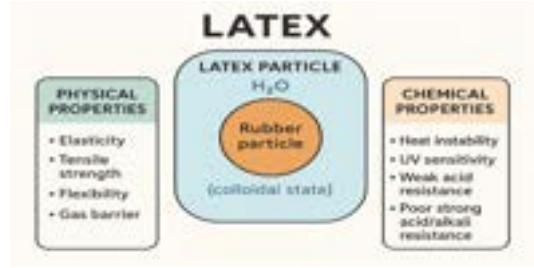


Fig 7. Characteristics of Latex Materials

가. 라텍스의 구조적 특성

오픈셀의 통로들은 초기 방열에는 유리하고, 구조적 밀도가 낮아 열이 내부까지 전달돼 내부 깊숙이 축열이 가능함. 또한 스트럿이나 셀벽이 두꺼운 구조는 열확산을 지연시켜 지연 발화 가능성을 높일 수 있다.

나. 라텍스의 물리적 특성

특성명	설 명
탄성(Elasticity)	늘어났다가 원래 형태로 돌아오는 성질이 뛰어남
인장강도	얇은 막이어도 상당한 인장 강도를 가짐
기체 차단성	산소, 이산화탄소 등의 기체를 어느 정도 차단
유연성	낮은 온도에서도 부드럽고 잘 휘어짐
투명도/불투명도	보통 반투명하거나 불투명, 착색 가능
밀도	낮은 밀도, 가벼움

다. 라텍스의 화학적 특성

특성명	설 명
주성분	라텍스는 폴리이소프렌(Polyisoprene), 합성 라텍스는 스티렌-부타디엔 등이 주성분
열 안정성	고온에서 분해되기 쉬움(60℃ 이상에서는 장기 노출 시 열화 발생)
자외선 민감성	UV 노출 시 경화되거나 노화됨
산/알칼리 내성	약한 산성에는 내성이 있으나, 강한 산 알칼리에는 취약
가소성	가공 시 유연제를 첨가하여 사용 가능
밀도	낮은 밀도, 가벼움

3.2 폴리우레탄 폼(Polyurethane foam) 소재의 특성

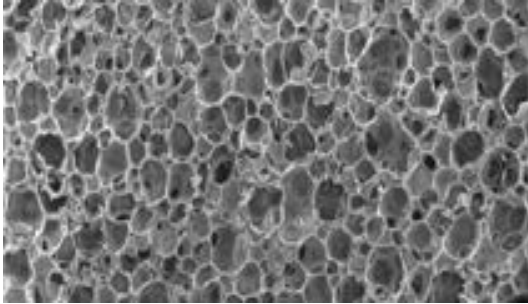


Fig 8. Polyurethane foam internal structure

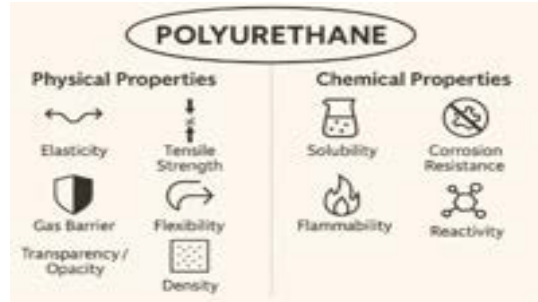


Fig 9. Properties of polyurethane materials

가. 폴리우레탄 폼의 구조적 특성

셀들이 서로 연결되어 있어 기체와 열의 이동이 비교적 자유로우며, 셀의 크기와 두께가 균일하지 않아 재료의 밀도 및 단열 특성에 중요한 영향을 준다.

나. 폴리우레탄 폼의 물리적 특성

특성명	설 명
탄성(Elasticity)	신축성과 복원력이 뛰어나 쿠션, 스펀지, 매트리스 등에 사용
인장강도	약 10~60MPa 으로 높음
기체 차단성	비교적 우수한 차단성을 보임
유연성	저온에서 경화될 수 있으나, 일반적으로 높은 유연성 유지
투명도/불투명도	대부분 불투명
밀도	가공 목적에 따라 조절 가능함

다. 폴리우레탄 폼의 화학적 특성

특성명	설 명
주성분	이소시아네이트(-NCO)와 폴리올(-OH)간의 화학 반응으로 생성된 고분자
열 안정성	100~150℃ 정도까지는 안정, 그 이상에서는 분해 시작
자외선 민감성	UV에 약함. 장시간 노출 시 변색, 노화, 균열 발생
산/알칼리 내성	약산, 약알칼리에 비교적 강하나, 강알칼리, 강산에 약함
가소성	가소성이 높음. 다양한 형태로 제조 가능.

3.3 복사열 및 열축적의 원리

열전달의 방식은 전도(Conduction), 대류(Convection), 복사(Radiation)로 구분되며, 이중 복사(Radiative Heat Transfer)는 물체의 온도에 따라 방출되는 전자기파(주로 적외선)에 의해 열이 전달되는 방식이다. 복사열은 매질이 없는 공간에서도 전달되며, 실내 환경에서는 햇빛, 적외선 히터, 조명기구 등에서 발생할 수 있다.

복사열은 표면 흡수율, 복사 강도, 노출 시간에 따라 피사체의 온도를 상승시킨다. 밀폐된 공간 또는 단열이 우수한 환경에서는 열에너지가 외부로 쉽게 방출되지 않고, 열축적이 일어나며, 일정 시간이 경과하면 발화점에 도달할 수 있다. 라텍스처럼 열전도율이 낮고, 다공성 구조를 가진 물질은 국부적인 온도 상승이 일어날 가능성이 높다.

3.3.1 용어의 정의

가. 복사열

물체에서 방출된 전자기파가 다른 물체에 열에너지의 형태로 흡수되는 현상으로, 열을 전달하는 매질이 없더라도 고온의 물체에서 저온의 물체로 직접 열이 이동하는 현상이기도 하다.

나. 열축적

물질이나 구조물 내부에 열이 저장되어 점차 축적되는 현상이다, 외부에서 열에너지가 계속 들어오고, 그 열이 바로 방출되지 못하면 물질 내부에 머물면서 온도가 점점 올라가게 된다.

3.3.2 복사열에 의한 라텍스의 열축적 및 열분해

가. 열축적

복사열 조사(적외선 히터, 햇빛 등에서 나오는 복사열이 라텍스 표면에 닿 기 시작) → 표면 흡수(라텍스는 빛보다 복사열(적외선)을 잘 흡수하는 성질이 있어서, 표면이 빠르게 가열됨 → 열전도 지연(라텍스는 열전도율이 낮아 흡수된 열이 내부로 천천히 전달됨) → 열축적(외부와의 열 발산도 잘 안되면, 내부 온도도 점차 상승하고 재료 전체가 과열 상태로 진행) → 발화 임계 도달(온도가 발화점(보통 180~200℃) 근처에 도달하면, 주변 가연물이나 먼지, 재료 자체가 자기 발화할 수 있음)

나. 열분해

가열초기(약 100~150℃ 수분이 증발하고, 겉면이 딱딱하거나 끈적하게 변하며, 아직 화학적 분해는 시작되지 않지만, 열이 점점 고무 분자에 축적됨 → 분자 사슬 분해 시작(약 200~250℃ 고무를 구성하는 고분자 사슬이 끊어지기 시작하며, 저분자 탄화수소가 만들어지고, 냄새나는 연기 발생,

C-C 결합, C-H 결합이 깨지면서 불안정한 화합물이 생김 → 열분해 본격 진행(약 250~350℃복잡한 분자 구조가 무너지며, 가연성 gas와 검은 연기가 다량 발생하며, 점점 검게 탄화되고, 끈적한 잔여물만 남게됨 → 탄화 및 발화(약 350℃ 이상 잔여물은 주로 탄소 덩어리인데, 이 상태에서 산소와 만나면 불이 붙기 쉬우며, 특히 밀폐된 곳에서 열이 계속되면 자기 발화 가능성도 있음.

3.4 훈소(Smoldering)의 이해

연소 현상은 크게 훈소(smoldering combustion)와 화염 연소(flaming combustion)로 구분할 수 있다. 라텍스와 같은 유기 고분자 물질은 열 축적이 지속될 경우 훈소 형태의 연소가 먼저 발생하고, 이후 산소 공급이나 점화원에 의해 화염 연소로 전이될 수 있다. 특히 밀폐된 환경에서는 초기 발화가 훈소 형태로 시작되어 화재로 이어지는 경우가 많다.

구 분	훈 소(Smoldering)	화염 연소 (Flaming combustion)
연소 방식	표면 산화 반응(고체와 산소의 느린 반응)	기체 연료와 산소의 고온 연소
불꽃 유무	없음	있음
온도 범위	200~500℃(상대적으로 낮음)	800℃ 이상
속도	느림(천천히 진행)	빠름(급격한 확산 가능)
산소 요구량	적음	많음
주로 발생 위치	고체 내부 또는 표면	기체상
연기 발생량	많음(지속적 유해가스 배출)	많음(초기에 급격히 증가)
전형적 예시	매트리스 내부, 전선 피복	종이, 나무, 섬유류
전이 가능성	화염 연소로 전이 가능	훈소로 전환되지 않음

4 실험 설계 및 방법

4.1 실험 목적

본 실험은 라텍스 제품이 복사열 조건 하에서 장시간 노출될 경우, 내부 온도 축적 양상과 발화 가능성을 확인하기 위해 수행되었다.

특히 일반적으로 사용되는 폴리우레탄 폼(PU 폼)과의 비교를 통해 라텍스의 상대적인 화재 위험성을 정량적으로 분석하고자 하였으며, 라텍스와 폴리우레탄 폼의 열 축적 특성을 이해하기 위해 전기장판을 사용하여 예비 실험을 실시하였다.

4.2 실험 재료

본 연구에서 사용한 시편은 다음과 같다.

Table 1. 재현실험에 사용된 재료 현황

구 분	내 용	비 고
전기장판	200mm×250mm	1구
천연라텍스	100% 천연 고무 수액 기반 매트리스	시중 제품
PU폼	일반 폴리우레탄폼 매트리스	시중 제품
전기스토브	1000W	시중 제품
온도 측정기	10채널	시편 내부 열 측정

4.3 전기장판 열 추적 실험 장치 및 환경(실험 1)

- 열원 : 상용 전기장판(1구), 최대온도 모드 설정
- 시편준비 : 천연라텍스, PU폼 각각 110cm×200cm×5cm
- 측정 시간 : 최대 550분, 30초 간격 측정
- 실험 환경 : 온도 20±3℃, 상대습도 67%, 무풍 실내
- 온도 측정기, 열화상 카메라
- 측정 위치 : 시편과 전기장판이 접촉하는 지점 중앙부



Fig 10. PU foam (left) and latex mattress (right)



Fig 11. electric stove and electric pad



Fig 12. Installation of electric pads and mattresses



Fig 13. Indoor temperature, humidity, wind speed

4.3.1 실험 진행 절차

1. 실내에 전기장판을 배치하고, 그 위에 라텍스 및 PU 폼 시편을 배치
2. 시편 내부에 온도측정기 센서를 삽입하여 중심부 온도를 측정
3. 전기장판 전원을 최대 온도 모드로 설정하여 가열 시작
4. 실험 시간은 최대 550분, 30초 간격으로 내부 및 표면 온도 측정
5. 실험 중 온도 변화를 관찰 및 기록
6. 550분 경과 시 전원 차단, 실험 종료
7. 실험 종료 후 시편의 내부 온도 변화를 촬영 및 기록

4.3.2 분석 항목

가. 온도 변화 그래프

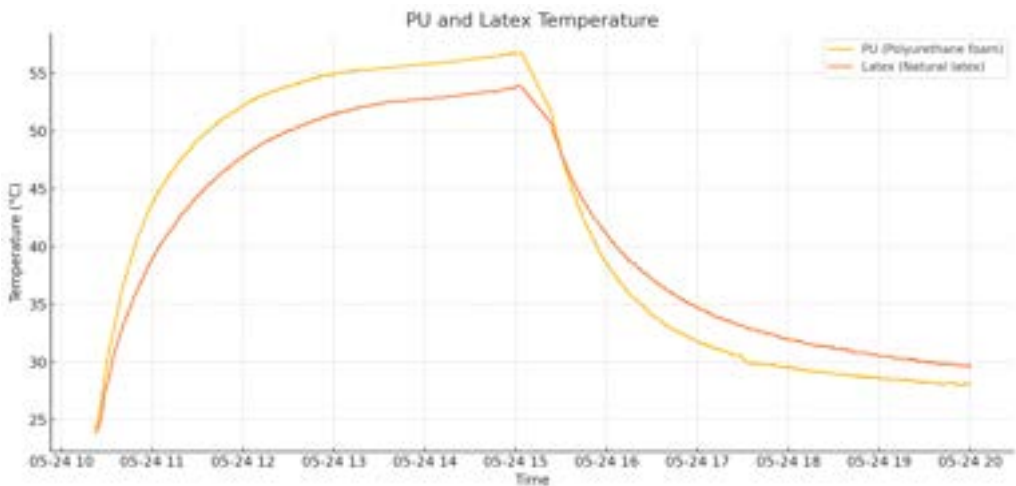


Fig 14. The temperature change curve of PU foam and latex

4.3.3 실험 결과

가. 최대 온도 도달 시간

- PU는 라텍스보다 더 빠르게 온도가 상승하고, 최대 온도에 도달함.
- 대략적으로 PU는 라텍스보다 더 빠른 열전달 특성으로 보임.

나. 최대 온도

- PU의 최고 온도는 라텍스보다 약간 높음

- 이는 PU의 열저항이 낮고 열전도율이 높아 열 축적이 더 쉽게 일어나는 특성과 연관이 있을 수 있음.

다. 냉각 속도

- PU는 냉각 과정에서도 라텍스보다 빠르게 온도가 하강.
- 즉, PU는 열을 더 빠르게 방출하고, 라텍스는 열을 더 오래 유지하는 특성.

라. 온도 유지 특성

- 라텍스는 상대적으로 온도가 천천히 오르고, 천천히 내려가는 형태를 보임 → 열축적 효과가 더 강하다고 볼 수 있음.
- 이는 라텍스의 내부 다공성 구조와 낮은 열전도율 때문일 가능성이 큼.

마. 위험성

- 라텍스는 온도 상승 속도는 느리지만, 열이 오랫동안 유지되기 때문에 장시간 열원에 노출 시 발화 위험이 있을 수 있음.
- PU는 급격히 온도가 상승하므로 단시간 고온 상황에서는 PU의 발화 위험이 클 수 있음.
- 그러나 PU의 빠른 냉각 특성은 잠재적인 위험 노출 시간을 줄이는 반면, 라텍스는 높은 온도에서 오래 머무르기 때문에 열 축적에 따른 발화 가능성이 더 높다고 볼 수 있음.

4.4 라텍스의 복사열 축적 실험 장치 및 환경(실험 2)

- 열원 : 1000W 전기스토브, 최대온도 모드 설정
- 시편준비 : 천연라텍스 110cm×70cm×5cm·10cm(시편 두께)
- 측정 시간 : 최대 200분 가열 후 300분 자연냉각, 10초 간격 측정
- 실험 환경 : 온도 $33\pm3^{\circ}\text{C}$, 상대습도 55%, 무풍 실내
- 측정 장비 : 온도 측정기, 열화상 카메라
- 측정 위치 : 시편과 전기스토브의 거리 50cm 이격



Fig 15. Latex Reproduction Experiment Set



Fig 16. Electric stove and latex mattress

4.4.1 실험 진행 절차

1. 실내에 전기스토브를 배치하고, 전면 50cm 거리에 라텍스 매트리스 설치
2. 라텍스 매트리스는 5cm 및 10cm 두께로 설정 후 각 지점에 온도측정기를 설치
3. 전기스토브 전원을 최대 온도 모드로 설정하여 가열 시작
4. 실험 시간은 가열 200분, 자연냉각 300분, 10초 간격으로 내부 및 표면 온도 측정
5. 실험 중 온도 변화를 관찰 및 기록
6. 500분 경과 시 전원 차단, 실험 종료
7. 실험 종료 후 시편의 내부 온도 변화를 촬영 및 기록

4.4.2 분석 항목

가. 라텍스 매트리스의 온도변화 그래프

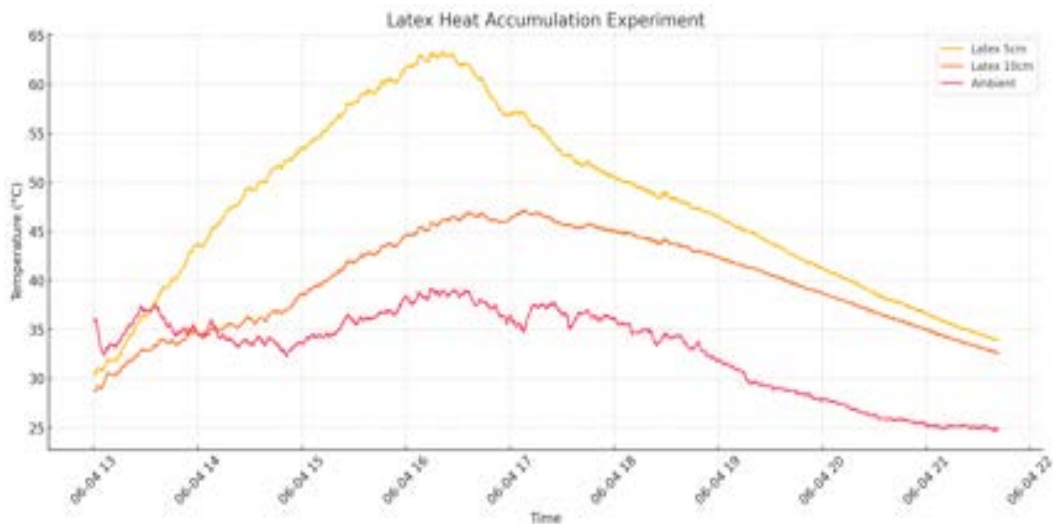


Fig 17. Curve of temperature change for latex mattresses

4.4.3 실험 결과

가. 온도 상승 특성

초기 상태에서 라텍스 매트리스 5cm 및 10cm 시편은 각각 약 30.6°C, 28.8°C의 온도를 나타냈으며, 실험이 진행됨에 따라 두 시편 모두 점진적인 온도 상승을 보였다.

실온은 대체로 35.9~36.1°C 범위로 안정적으로 유지되었으며, 이는 실험 중 외부 환경 요인의 영향이 크지 않았음을 의미한다.

나. 두께에 따른 축열 거동 비교

- 라텍스 매트리스 5cm 시편은 약 201분 경과 시점에 최고 온도 63.3°C에 도달하였다.
- 라텍스 매트리스 10cm 시편은 더 늦은 약 248분 시점에 최고 온도 47.2°C에 도달하였다.
- 이는 두께가 증가함에 따라 열이 시편 내부에 도달하기까지 시간이 지연되며, 결과적으로 온도 상승 속도가 완만해지고, 최고 온도 도달 시점도 늦어지는 축열 특성을 보인 것이다.

다. 시간대별 온도 상승률 변화

라텍스 매트리스 5cm는 실험 초기 60분 내에도 급격한 온도 상승 없이 완만한 곡선을 유지하였으며, 150분 이후부터 점진적인 누적열 증가 양상이 뚜렷하게 나타났다. 이는 외부에서 보기에는 큰 변화가 없으나, 내부적으로는 장시간 복사열이 누적되며 열이 점차 축적되는 경향을 보여준다.

반면, 라텍스 매트리스 10cm는 두께 증가로 인해 복사열이 천천히 침투하였고, 장시간 동안 열이 내부에 머물며 비교적 낮은 온도를 유지하였지만, 실험 말기에는 60°C에 근접할 정도로 온도가 상승하였다.

라. 화재안전 측면에서의 시사점

본 실험을 통해 천연 라텍스는 복사열 조사 초기에 급격한 온도 상승을 보이지 않지만, 장시간에 걸쳐 내부적으로 열이 누적되는 지연 발화(Delayed Ignition) 위험을 내포하고 있음을 확인할 수 있었다.

특히 두께가 증가할수록 외부에서는 안정적인 상태로 보일 수 있으나, 일정 시간이 지나면 내부 온도가 점진적으로 상승해 발화 임계 온도에 근접할 수 있음을 주의해야 한다.

이러한 결과는 복사열이 지속되는 환경(예 : 전기장판, 전기스토브 인접 침구류, 차량 내부 등)에서 라텍스 소재를 사용할 경우, 겉보기 안정성과는 별개로 내부 축열 특성을 고려한 화재 예방 조치가 필수적임을 시사한다.

4.5 폴리우레탄 폼(PU 폼)의 복사열 축적 실험 장치 및 환경(실험 3)

- 열원 : 1000W 전기스토브, 최대온도 모드 설정
- 시편준비 : 폴리우레탄 폼 110cm×70cm×5cm·10cm(열원으로부터)
- 측정 시간 : 최대 200분 가열 후 300분 자연냉각, 10초 간격 측정
- 실험 환경 : 온도 33±3°C, 상대습도 55%, 무풍 실내
- 측정 장비 : 온도 측정기, 열화상 카메라
- 측정 위치 : 시편과 전기스토브의 거리 50cm 이격

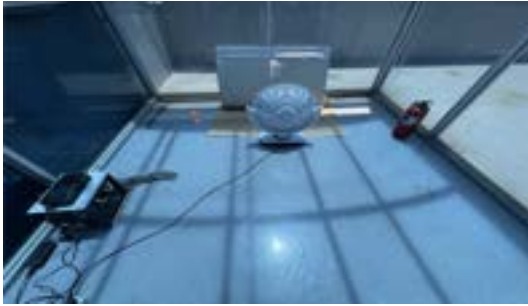


Fig 18. Polyurethane Foam Reproduction Experiment Set



Fig 19. Electric stove and polyurethane foam mattress

4.5.1 실험 진행 절차

1. 실내에 전기스토브를 배치하고, 전면 50cm 거리에 라텍스 매트리스 설치
2. 폴리우레탄 폼 매트리스는 5cm 및 10cm 두께로 설정 후 각 지점에 온도측정기를 설치
3. 전기스토브 전원을 최대 온도 모드로 설정하여 가열 시작
4. 실험 시간은 가열 200분, 자연냉각 300분, 10초 간격으로 내부 및 표면 온도 측정
5. 실험 중 온도 변화를 관찰 및 기록
6. 500분 경과 시 전원 차단, 실험 종료
7. 실험 종료 후 시편의 내부 온도 변화를 촬영 및 기록

4.5.2 분석 항목

가. 폴리우레탄 폼 매트리스의 온도변화 그래프

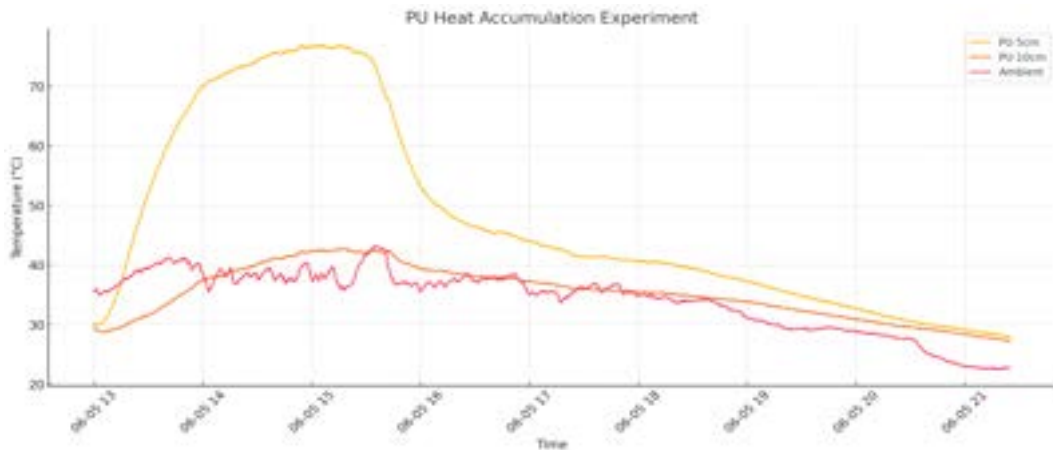


Fig 20. The temperature change curve of the polyurethane foam mattress

4.5.3 실험 결과

가. 온도 상승 특성

PU 폼 매트리스 5cm는 초기 온도 약 30.2°C에서 시작하여 실험 약 114.5분 만에 최고 온도 76.9°C에 도달하였다. 이는 복사열이 빠르게 시편 내부로 전달되며, 열이 집중적으로 누적되었음을 보여준다.

반면, PU 폼 매트리스 10cm는 초기 약 29.6°C에서 시작해, 약 135.5분 후 최고 온도 42.8°C에 도달하였다. 두께가 증가함에 따라 복사열 침투가 지연되며, 열이 분산됨에 따라 온도 상승 폭이 감소하였다.

나. 두께에 따른 축열 거동 비교

- PU 폼 매트리스 5cm는 얇은 두께로 인해 복사열이 빠르게 내부 전체에 도달하며, 짧은 시간에 고온 상태에 도달하는 특성을 보였다.
- PU 폼 매트리스 10cm는 상대적으로 완만한 상승 곡선을 보였으며, 최대 온도 자체도 낮게 형성되었다. 이는 두께 증가로 인해 열용량이 증가하고, 열의 분산 범위가 넓어졌기 때문으로 분석된다.

다. 실온 및 외부 환경 영향

실험 중 실온은 대체로 35.6°C ~ 36.1°C 범위에서 안정적으로 유지되었으며, 이는 외부 온도 변동이 실험 결과에 큰 영향을 미치지 않았음을 의미한다. PU 시편의 온도 변화는 주로 복사열에 의한 내부 열 축적 현상으로 해석할 수 있다.

라. 화재안전 측면에서의 시사점

PU 폼 소재는 특히 5cm 시편에서 짧은 시간 내에 70°C 이상 고온에 도달함에 따라 조기 발화 가능성이 매우 높은 소재로 분류될 수 있다. 실온 대비 약 40°C 이상 급격히 상승한 점은 화재 초기 온도 환경에 매우 근접한 수준이며, 열원이 일정 시간만 노출되더라도 발화 조건이 조기 충족될 수 있음을 시사한다.

PU 폼 10cm 역시 최고 온도가 42.8°C로 다소 낮게 형성되었으나, 장시간 복사열 노출 시 그 열적 민감성은 여전히 무시할 수 없는 수준이다.

특히 복사열 노출이 반복되거나 누적되는 조건에서는 축열 누적에 따른 발화 가능성도 배제할 수 없다.

5 종합 결론

본 연구는 동일한 복사열 환경 하에서 천연 라텍스(Latex) 매트리스와 폴리우레탄(PU) 폼 매트리스의 두께별(5cm, 10cm) 시편을 대상으로 열 축적 특성과 온도 상승 거동을 비교·분석하였다.

실험은 약 200분간 복사열을 조사 후 300분간 자연 냉각하며 시편 내부 온도를 실시간으로 계측하였고, 실온 센서를 병행 설치하여 외부 영향도 함께 평가하였다.

가. 라텍스(Latex)와 폴리우레탄 폼(Polyurethane foam) 매트리스의 온도 변화 그래프

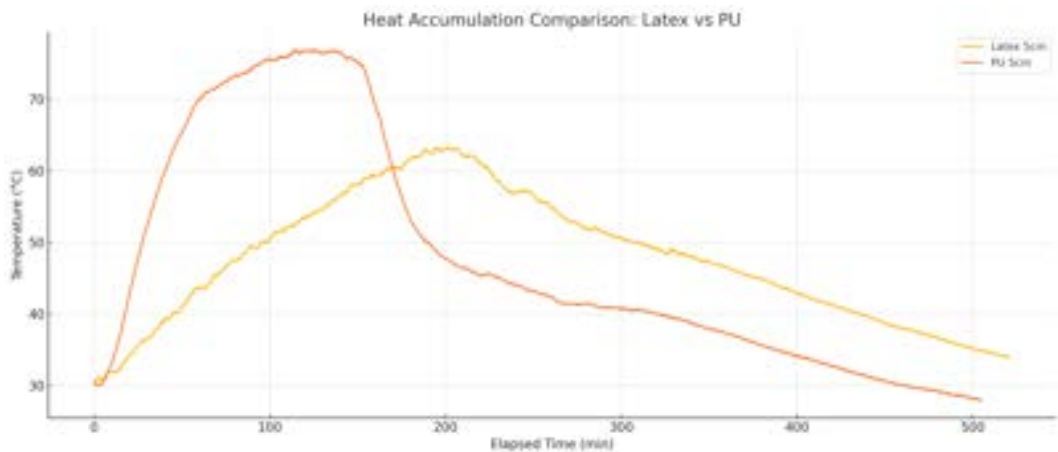


Fig 21. Comparison of temperature variations between latex and polyurethane foam mattresses

5.1 열 축적 특성 요약

Table 2. 라텍스와 폴리우레탄 폼 매트리스의 온도변화

소재	두께	최고 온도(°C)	도달 시간(min)	특성 요약
PU	5cm	76.9°C	114.5분	고온 도달 빠름, 조기 발화 우려
Latex	5cm	63.3°C	201분	온도 상승 늦지만 축열 지속
PU	10cm	42.8°C	135.5분	온도 낮지만 여전히 빠른 반응
Latex	10cm	47.2°C	247.8분	외형 안정적이거나 내부 열 누적 심화

5.2 결론 및 위험성 평가

일반적으로 PU 폼은 짧은 시간 내 빠르게 고온에 도달하여 즉시 발화 가능성이 높은 소재로 인식되어 왔으며, 본 실험에서도 그 특성이 뚜렷하게 나타났다. 하지만, 이번 실험 결과는 천연 라텍스의 축열 특성이 장시간 누적될 경우 더 심각한 화재 위험을 야기할 수 있음을 시사한다.

특히, 라텍스는 외부에서는 비교적 안정된 온도 양상을 보이나, 내부적으로는 시간이 지날수록 열이 축적되고 방출되지 않아 지속적으로 온도가 상승하며, 발화점에 근접하는 온도에 도달하는 데 이른다. 이러한 지연 발화(Delayed Ignition) 특성은 실생활에서 오히려 더 큰 화재 대응 지연과 피해 확대로 이어질 수 있는 잠재적 위협이다.

PU 폼은 사용자의 주의로 조기 차단이 가능하나, 라텍스는 겉보기 안정성 때문에 초기 발화 징후를 인지하지 못한 채 장시간 방치될 수 있어 더욱 위험하다. 특히 두께가 증가할수록 이 열 축적 현상은 심화되며, 폐쇄된 공간 또는 통풍이 어려운 구조에서 사용될 경우 누적된 내부 열이 일정 임계점을 넘는 순간 급격히 발화될 수 있는 조건을 형성한다.

6 화재 감식 적용을 위한 제언

본 실험을 통해 천연 라텍스(Latex) 및 폴리우레탄(PU) 폼의 복사열 축열 특성에 따른 발화 거동을 정량적으로 분석하였으며, 이는 실제 화재 감식 현장에서의 판단 기준 수립에 중요한 기초자료로 활용될 수 있다.

다음은 실험 결과를 바탕으로 도출된 화재감식 요령이다.

6.1 소재별 축열 특성에 따른 감식 접근

- 폴리우레탄(PU) 폼은 복사열에 대해 급격한 온도 상승 및 단기 발화 경향을 보인다.
 - 화재 초기 온도 상승이 빠르기 때문에, 조기 연소 흔적(ex. 탄화 깊이, 변색 영역, 급속 확산 방향 등)이 주변에 명확히 관찰될 수 있음.
 - 감식자는 PU 폼 존재 부위에서 단시간 내 화염성 확산이 가능한 구조를 의심해야 하며, 전기적 발열체(전기장판, 온열기기 등)와 PU 폼 간의 거리 및 접촉 흔적을 정밀히 조사해야 함.
- 천연 라텍스(Latex)는 상대적으로 느린 온도 상승을 보이나, 장시간 복사열 노출 시 지연 축열에 의한 발화 위험이 크다.
 - 겉보기에는 심한 탄화 없이 내부에서 발화한 흔적(예 : 내부 중심 탄화, 열 누적 흔)이 관찰될 수 있음.
 - 겉면에 손상이 적으면서 내부가 비정상적으로 열변형·탄화된 경우, 지연 발화 가능성을 고려해 감식해야 함.
 - 특히 밀폐된 환경(예 : 차량 내부, 침대 하부, 소파 내부)에서 발견되는 국소적 깊은 탄화 중심이 라텍스 발화의 단서일 수 있음.

6.2 두께 및 열원과의 거리 고려

- 두께가 증가할수록 외부로 드러나는 연소 흔적은 줄어들 수 있으며, 내부 중심부에서부터 축열된 흔적이 발생하므로 감식자는 단면 조사 또는 샘플 절개를 통한 분석이 필요함.
- 전기장판, 전기스토브, 온풍기 등 지속 복사열을 유발할 수 있는 전열기기의 위치와 소재의 상대 위치 및 접촉 면적을 중점적으로 검토해야 함.

6.3 감식 중점 항목 요약

Table 3. 라텍스와 폴리우레탄 폼의 감식 요령

항목	PU 폼 감식 요령	라텍스 감식 요령
온도 특성	급격한 온도 상승	지연된 축열, 서서히 상승
발화 유형	조기 발화	지연 발화
흔적 특징	빠른 탄화	내부 축열 중심 탄화
우선 감식 부위	열원과 접촉면, 표면 연소흔	내부 온도 누적 영역
추천 기법	표면 관찰	단면 절개, 열분석 병행 조사

6.4 제언

본 연구 결과는 천연라텍스 제품이 외관상 안정적으로 보이더라도 장시간 복사열에 노출될 경우 내부적으로 열을 지속적으로 축적하여 발화 위험을 가질 수 있음을 시사한다. 따라서 화재감식 시 다음과 같은 점을 고려할 필요가 있다.

가. 지연 발화의 가능성에 주목할 것

천연라텍스는 단시간에 고온에 도달하지 않더라도, 오랜 시간 복사열에 노출될 경우 내부 축열로 인해 지연 발화가 발생할 수 있다.

따라서 초동 조사에서 외상이 적은 상태의 라텍스 제품이라도 발화원 또는 화재 확대의 매개체로 작용했을 가능성을 배제하지 말아야 한다.

나. 복사열 노출 가능성 분석 강화

전기장판, 하이라이트, 난방기기 등 복사열을 방출하는 열원이 주변에 위치했는지 여부와 그 위치 관계를 철저히 분석해야 하며, 천연라텍스 제품이 해당 열원으로부터 장시간 간접 노출되었을 가능성을 감식 시 충분히 고려해야 한다.

다. 내부 발열 흔적 탐색 필요

천연라텍스 제품은 표면에 뚜렷한 열 손상이 없더라도 내부 열 축적에 의해 중심부부터 열분해가 시작될 수 있다. 따라서 라텍스 제품을 해체하여 단면 내부의 갈변, 탄화, 기포 발생 등 열분해 흔적이 있는지를 정밀히 관찰하는 것이 중요하다.

라. 밀폐·무환기 조건에서의 위험성 고려

실내 밀폐 공간이나 차량 내와 같이 열이 쉽게 빠져나가지 못하는 조건에서는 라텍스의 열 축적 속도가 더욱 빨라질 수 있으므로, 화재 당시 공간 조건과 환기 여부를 함께 조사하여 환경 요인이 발화에 기여했는지를 평가해야 한다.

참고문헌

- 권준민, 안문환, 양철영. (2022). 라텍스 제품의 외부적 요인에 따른 화재위험성에 관한 연구. 한국화재감식학회 학회지, 13(1), 1-18. <https://doi.org/10.31345/fisk.2022.13.1.1>
- 하예진 외 (2023). 폴리우레탄 폼 단열재의 화재 예측을 위한 열분해 실험 및 수치 모델링 연구. 한국연소학회지, 28(4), 1-11.
- 한국소방산업기술원. (2021). 건축 내장재의 열방출 특성 평가 보고서. 기술자료 제2021-13호.
- 소방청 화재감식 매뉴얼 개정판. (2020). 열적 발화패턴 사례집, 제3판.



2025년
화재 재현실험
연구보고서



제 3 장 | 동부권



☑ 광역화재조사 1팀 >>>

착화탄(일명 번개탄)의 연소 특성에 관한 연구

☑ 광역화재조사 2팀 >>> ☆ '25년도 강원 화재재현실험 연구논문 발표대회 우수

전기 누전 시 출화점 환경에 따른 발화 가능성 연구

착화탄(일명 번개탄)의 연소 특성에 관한 연구

고보현¹⁾, 김동환, 박은서, 안주열, 어성제
강원특별자치도 소방본부 동부권광역화재조사 1팀

A study on the Combustion Characteristics by Charcoal briquet

Bo Hyeon Ko[†], Dong Hwan Kim, Eun Seo Park, Joo Yeol An, Seong Je Eo
Eastern Wide Area Fire Investigation Team 1, Gangwon State Fire Headquarters

ABSTRACT

Charcoal briquet have similar combustion characteristics to wooden buildings. However, they have characteristics such as lower maximum temperature and longer combustion time compared to wooden buildings. Additionally, Charcoal briquet have no flames in the early stages of combustion because they are non-chlorinated. Charcoal briquet vary greatly in their maximum temperature and combustion speed depending on their surroundings.

Key Words : Charcoal briquet, Lower maximum temperature, No flames, Combustion characteristics,

1 서 론

1.1 연구의 배경

최근 유가의 고공행진으로 인한 각 가정의 난방비 부담이 증가하면서 고령 인구나 단독주택이 많은 지역을 중심으로 기름보일러나 가스보일러에 비해 상대적으로 난방비 부담이 적은 연탄보일러로 교체하는 가정이 증가하고 있는 등, 전국적으로 아직도 많은 가정에서 연탄보일러를 사용하고 있다. 또한 캠핑 인구의 증가로 인해 우리 주변에서도 쉽게 착화탄을 사용하는 모습을 볼 수가 있다.

그러나 석탄 산업의 쇠퇴와 다양한 대체 에너지의 보급, 농어촌 인구의 소멸 등으로 인해 연탄의 사용량이 감소하며, 착화탄 또한 그 사용량이 꾸준히 감소하고 있어 착화탄의 연소 특성에 관한 연구 필요성 또한 그 중요도가 낮아지고 있는 것도 사실이다. 하지만 고령층과 서민이 많은 우리 지역의 특성상 여전히 연탄은 중요한 에너지원이며, 이와 함께 착화탄 또한 일상생활에서 중요한 역할을 할 것으로 보이는 만큼, 착화탄의 연소 특성 연구를 통한 올바른 사용법 홍보의 중요성이 대두되고 있다.

1) E-mail : gobo2003@korea.kr

1.2 연구의 필요성 및 목적

연탄보일러를 사용하는 가정에서는 대부분 착화탄을 구비해 두고 있을 것이다.

연탄 교체 시 불이 살아 있다면 착화탄의 도움 없이 새 연탄에 쉽게 불을 붙일 수 있겠지만, 남아 있는 불씨가 약하거나 불이 완전히 꺼진 경우에는 착화탄을 먼저 연소시켜 연탄 아래에 두고 착화탄이 연소되며 연탄에 불을 붙이는 방법을 사용한다.

이는 발화점이 높은 연탄의 경우 직접 불을 붙이기 어려워, 상대적으로 쉽게 불을 붙일 수 있는 착화탄의 특성을 이용한 점화 방법인 것이다.

그러나 착화탄의 연소 특성 및 주변 환경을 고려하지 못한 미숙한 사용으로 인해 화재가 발생하는 경우도 있어, 이번 연구를 통해 착화탄의 연소 특성을 연구하여 화재 감시 자료 및 대국민 홍보 자료로 활용하고자 한다.

2 이론적 배경

2.1 착화탄의 정의 및 종류²⁾

착화탄이란, 마른 톱밥이나 숯가루, 점착제 등을 혼합하여 성형한 뭉친 숯의 일종으로 정식 명칭은 착화탄이지만 번개탄이라는 상표명이 널리 퍼지면서 일반명사가 되었다.

착화탄은 크게 자연탄과 성형탄으로 나눌 수 있다. 자연탄은 참숯과 비장탄 등 나무를 태워서 만든 숯이고, 성형탄은 나무를 갈아 톱밥으로 만든 후 압착하여 성형한 숯이다. 착화탄은 흔히 성형탄을 이르는 말로 사용되고, 그 종류로는 번개탄, 조개탄, 열탄, 야자숯 등이 있으며, 용도와 성분에 따라 다양한 종류가 있다.



Fig. 1 Natural coal



Fig. 2 Charcoal briquet

2) 숯 종류 세상 쉬운 설명(<https://blog.naver.com/sciencecharcoal/223662731626>)

2.2 착화탄(성형탄)의 성분 및 특징

착화탄은 연료 역할을 하는 숯과 톱밥을 주성분으로 하며, 질산바륨($\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$) 또는 질산나트륨(NaNO_3)과 같은 성분이 포함되어 있어 불이 쉽게 붙도록 하는 점화제, 밀가루 풀이나 전분 등을 사용하여 형태를 유지하는 역할을 하는 접착제, 연소 속도나 시간을 조절하거나 유해 물질의 배출을 줄이기 위한 첨가물 등이 포함되어 있다.

착화탄은 불을 붙이기 쉽고, 비교적 짧은 시간에 전면 연소가 확산되며, 일반적으로 연탄이나 숯 등에 불을 붙이기 위한 용도로 사용되고, 연소 과정에서 유해 물질을 발생시킬 수 있으므로, 밀폐된 공간에서 사용 시 주의가 필요하다.

2.3 착화탄(성형탄)의 제작 방법

착화탄의 제작 과정을 대략적으로 살펴보면, 폐목재 등을 태워 숯이나 가루로 만든 후, 불이 잘 붙도록 하기 위해 착화제 역할을 하는 질산바륨과 가공된 숯을 압착하고, 성형하기 위해 질산나트륨을 첨가하여 원하는 모양으로 성형하여 제작하며, 필요에 따라 밀가루와 전분 등을 첨가하기도 한다.

여기에 더해 모양을 갖춘 착화탄의 표면에 사용자가 쉽게 불을 붙일 수 있도록 톱밥 등을 첨가하면 우리가 흔히 알고 있는 번개탄이 되는 것이다.

2.4 화재 사례 분석

2.4.1 화재 사례 ①

2025년 2월 19일 강원특별자치도 동해시 송정동 소재의 가정집에서 발생한 화재로, 주변을 지나던 행인이 ‘핑’하는 소리와 검은 연기를 목격하고 119에 신고하였다.

2.4.2 화재 원인 추론

발화지점은 연탄보일러 앞 우측 바닥 부분으로 추정되며, 관계자가 번개탄에 착화를 시도하다 불이 붙지 않아 보일러실 바닥에 번개탄을 방치 해두고 외출하였다는 진술과 현장에서 연탄 보일러 자체의 기기적 결함, 연탄의 과열, 전기적 요인 등 타 발화요인은 식별되지 않는 것으로 보아 관계자가 불이 붙지 않았다고 생각하고 방치해둔 번개탄의 불꽃이 살아나며 화재가 발생한 것으로 추정되었다.



Fig. 3 A Place of Fire



Fig. 4 A Place of Fire

2.4.3 화재 사례 ②

2024년 10월 27일 강원특별자치도 양구군 해안면 소재의 가정집에서 발생한 화재로, 점유자가 안방에서 취침 중 타는 냄새와 함께 연기를 목격하고 119에 신고하였다.

2.4.4 화재 원인 추론

발화지점은 연탄보일러 인근 바닥 부분으로 추정되며, 해당 화재 또한 사례 ①과 마찬가지로 관계자가 번개탄에 착화를 시도하다 불이 붙지 않아 보일러실 바닥에 번개탄을 방치 해두고 다른 번개탄을 사용한 후 발생하였으며, 현장에서 타 발화요인은 식별되지 않았다.



Fig. 5 A Place of Fire



Fig. 6 A Place of Fire

위 두 화재의 사례를 자세히 살펴보면, 공통점을 한가지 쉽게 발견할 수 있을 것이다. 두 화재 모두 관계자가 번개탄에 착화를 시도하던 중, 불이 붙지 않았다고 생각하고 인근에 방치해 둔 번개탄에서 화재가 시작된 것으로 추정된다.

위 2건의 화재 사례를 통해 관계자가 불이 붙지 않았다고 착각한 이유와 번개탄의 연소 특성을 이해할 필요성을 느껴 다음과 같이 실험을 하게 되었다.

3 재현실험

3.1 실험 개요

3.1.1 실험방법 및 조건

실험은 동부권 광역화재조사팀 청사에서 진행되었으며, 구획된 실험 공간을 제작 후, 점화된 번개탄을 가정용 찜기(일명 삼발이)에 올려두고 연소 시간 및 온도 변화를 측정하는 실험을 실시하였고, 실험 조건은 다음과 같다.

예비실험. 번개탄 점화 도구에 따른 착화 특성 관찰

실험 1. 착화 위치에 따른 연소 시간 및 온도 변화 분석

실험 2. 번개탄의 중앙과 가장자리의 연소 시간 및 온도 변화 분석

실험 3. 습도가 높은 환경에서의 연소 시간 및 온도 변화 분석

실험 1. 에서는 점화된 번개탄을 가정용 찜기에 직접 닿게 올려두고 실험을 진행하였으며, 실험 2. 에서는 석쇠에 올려두고 실험을 진행하여, 점화된 번개탄의 방치 환경에 따른 연소 특성 또한 비교해 보았다.

3.1.2 예비실험

본 실험에 앞서, 다양한 점화 도구를 이용하여 번개탄에 직접 불을 붙여 보았다. 성냥, 라이터, 종이, 토치를 활용하였으며, 점화 도구에 따른 특별히 다른 점은 발견하지 못하였으나, 성냥이나 라이터와 같이 화원이 작은 도구의 경우 장기간 불씨를 유지하지 못하여 쉽게 착화하기 어려웠으며, 토치를 이용할 경우 지속적으로 점화 시도 할 수 있었다. 이에 따라 본 실험에서의 점화원은 토치로 결정하였다.



Fig. 9 Paper

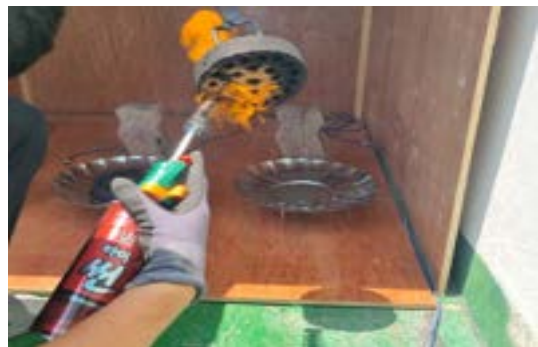


Fig. 10 Gas Torch

3.2 제1실험(착화 위치에 따른 연소 특성 분석)

3.2.1 실험방법

첫 번째 실험은 점화의 위치를 번개탄 아랫면 중앙, 번개탄 윗면 중앙, 번개탄 아랫면 가장자리로 하였으며, 온도 측정 위치는 번개탄의 중앙 부분에서 측정하였고, 연소 유지 시간은 번개탄이 모두 연소하여 재가 될 때까지로 하였다.

점화 후 번개탄 방치 환경에서의 연소 특성 분석을 병행하기 위해, 가정용 찜기에 번개탄을 직접 올려두어 번개탄의 아랫면이 바닥에 완전히 닿게 하여 실험을 실시하였다.



Fig. 11 Experimental set



Fig. 12 Experimental set



Fig. 13 Bottom center ignition



Fig. 14 Top center ignition



Fig. 15 Bottom edge ignition



Fig. 16 Temperature measurement

3.2.2 실험결과

점화된 번개탄을 가정용 찜기에 직접 닿게 방치한 경우, 점화 위치에 관계없이 연소 초기에는 급격한 온도 상승을 보인 후 서서히 쇠퇴하는 양상을 나타냈다.

아랫면 중앙에 착화한 경우, 955초(약 15분 55초)만에 가장 높은 온도인 740℃에 도달하였으며, 700℃ 전후의 고온을 약 10분간 유지한 후 서서히 쇠퇴하기 시작하였다.

윗면 중앙에 착화한 경우에는 1,962초(약 32분 42초)에 이르러 최고온도인 804.4℃를 보였으나, 이 700℃ 이상의 온도를 15분 전부터 유지하고 있었다.

아랫면 가장자리에 착화한 경우에도 앞선 두 경우와 비슷하게 연소 초기 급격한 온도상승 후 서서히 쇠퇴하는 형태를 보여주었다.

세 가지 경우를 비교해 본바, 점화 위치는 모두 다르나 온도의 측정 위치는 중앙으로 통일하였기에, 최고온도에 이르는 시간은 다소 차이를 보였다. 하지만 연소 시작 약 30~40분 후 700℃ 전후의 고온에 이르렀으며, 약 10~20분 정도 최성기를 유지한 후, 약 1시간 30분 이상 서서히 쇠퇴하는 동일한 형태의 연소 특성을 보여주었다.

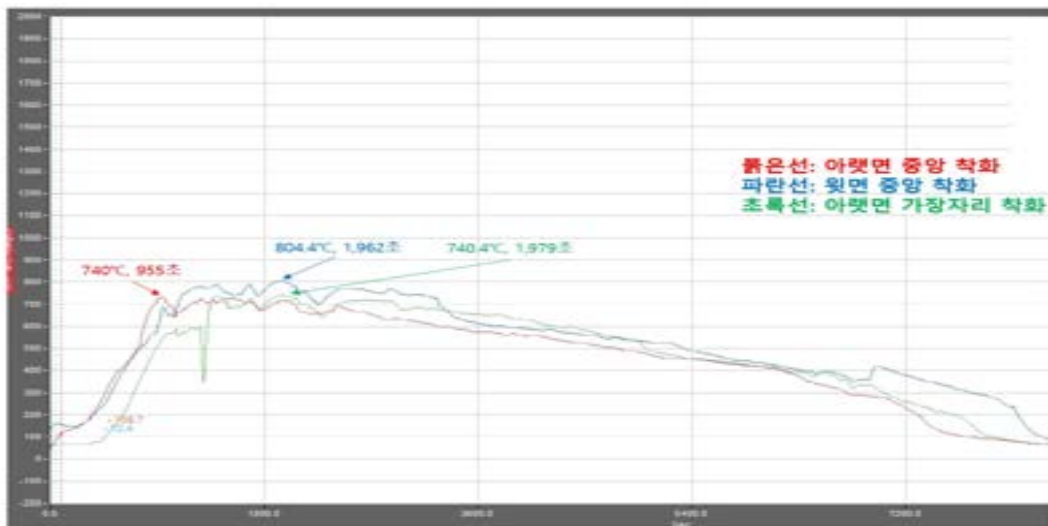


Fig. 17 Experimental results(temperature)

3.3 제2실험(번개탄의 중앙과 가장자리의 연소 시간 및 온도 변화)

3.3.1 실험방법

두 번째 실험에서는 번개탄 사용 시 점화 위치를 아랫면 중앙으로 하는 일반적인 상황을 가정하여 진행하였으며, 번개탄의 중앙과 가장자리에서 온도를 측정하였다.

첫 번째 실험과 방치 환경에 따른 연소 특성을 비교하기 위해, 점화된 번개탄을 석쇠 위에 올려

두어 번개탄의 아랫면이 개방된 상태를 유지하여 공기의 흐름이 원활하도록 조건을 부여하였다.



Fig. 18 Experimental set



Fig. 19 Experimental set

3.3.2 실험결과

점화된 번개탄을 석쇠 위에 올려두어 아랫면에 공기의 흐름을 원활하게 한 결과, 번개탄의 중앙 부분은 최고온도인 668.6℃에 도달하는데 1,341초(약 22분 21초)가 소요되었으며, 가장자리의 경우 최고온도는 651.7℃까지 상승하였고, 시간은 2,450초(약 40분 50초) 정도가 걸렸다.

실험 1. 의 첫 번째 조건(아랫면 중앙에 점화, 가정용 찜기에 직접 닿게 방치)과 비교한바, 최고 온도는 약 71℃ 정도 낮게 나타났으며, 최고온도에 이르는 시간 또한 약 5분 42초 정도 빠르게 도달하였다.

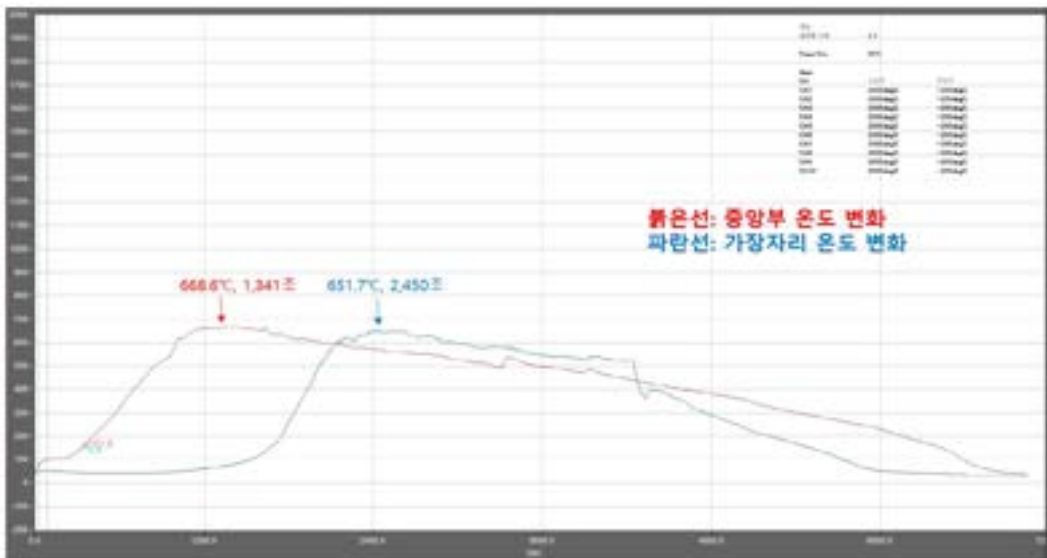


Fig. 20 Experimental results(temperature)

또한, 번개탄 중앙부의 온도가 200℃를 넘어서 연소가 안정적으로 계속 진행 중임에도 번개탄의 아랫면에서는 점화를 시도한 중앙 부분에서 하얀 재에 가려 불씨가 잘 보이지 않았으며, 윗면에서는 불씨를 육안으로 확인하기 쉽지 않았다.



Fig. 21 Experimental temperature



Fig. 22 The lower surface of the ignition

계속 연소가 진행 중, 중앙 부분의 온도가 300℃ 이상으로 상승한 후에야 불씨가 서서히 보이기 시작하였고, 350℃에 이르러서야 번개탄 윗면에서도 육안으로 명확하게 불씨가 구분되기 시작하였다.

위 실험을 통해서 추측해 본바, 일반 가정환경에서 번개탄에 점화 시도 후 방치하였을 경우, 오랜시간 불씨가 보이지 않아 점화에 실패하였다고 충분히 착각할 수 있을 것으로 보인다.



Fig. 23 Experimental temperature



Fig. 24 Embers

3.4 제3실험(습도가 높은 환경에서의 연소 시간 및 온도 변화)

3.4.1 실험방법

세 번째 실험에서는 습도가 높은 환경에서의 번개탄 연소 특성을 측정하기 위해 다음과 같이 두 가지 조건을 부여 후 실험을 진행하였다.

첫 번째 조건은 분무기를 이용하여 실험세트 및 번개탄에 강제로 수분을 공급(세트장 내 습도 약 70%)하여 진행하였다.

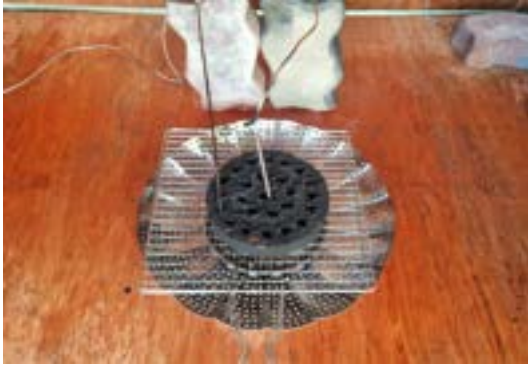


Fig. 25 Experimental set



Fig. 26 Humidity

두 번째는 실제 습도가 높은 비 오는 날(습도 약 85%) 번개탄의 포장지를 제거하여 24시간 방치 후 진행하였다. 두 가지 조건 모두 번개탄의 온도 측정 위치는 기존과 동일한 중앙과 가장자리에서 측정하였다.



Fig. 27 Moist charcoal briquet



Fig. 28 Moist charcoal briquet



Fig. 29 Experimental set



Fig. 30 Humidity

3.4.2 실험결과

실험세트에 분무기를 이용하여 강제로 습도를 높여준 후 실험을 진행한바, 번개탄 중앙 부분의 최고온도는 523.5℃까지 상승하였으며, 시간은 901초(약 15분 1초)가 소요되었다.

이에 반해 가장자리의 최고온도는 639.8℃까지 상승하였고, 시간은 2,243초(약 37분 23초)가 소요되었다.

제2실험과 비교한바 중앙 부분과 가장자리의 온도 차이가 크지 않았던 것과 다르게, 중앙 부분의 최고온도가 약 100℃ 이상 낮게 측정되었다.

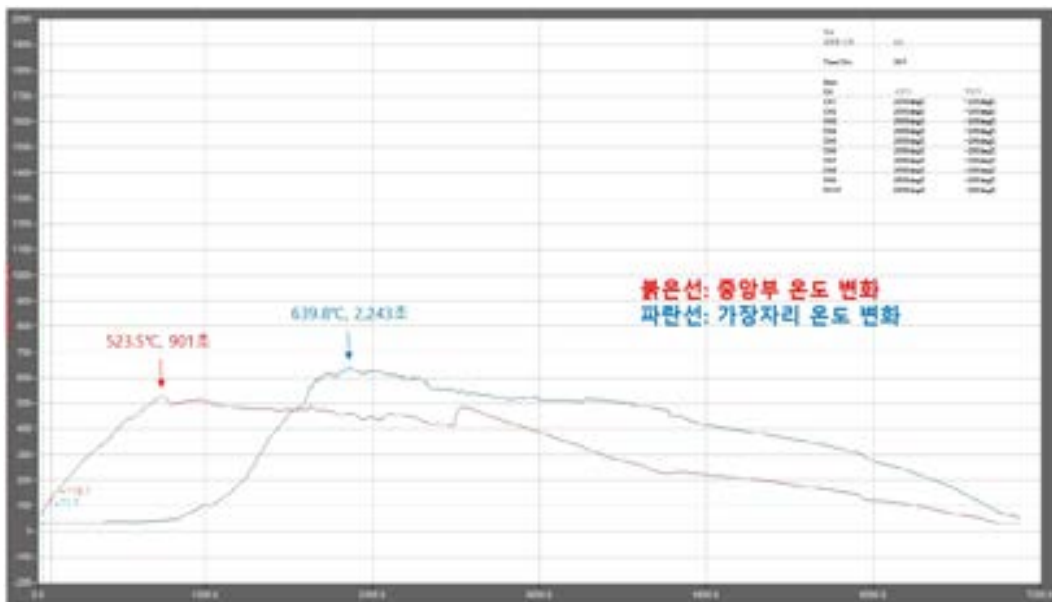


Fig. 31 Experimental results(temperature)

습도가 높은 날(실제 비가 오는 날) 포장지를 제거한 번개탄을 약 24시간 방치한 후 실험을 진행한바, 번개탄 중앙 부분의 최고온도는 563.6℃까지 상승하였으며, 시간은 2,802초(약 46분 42초)가 소요되었다.

이에 반해 가장자리의 최고온도는 692.6℃까지 상승하였고, 시간은 3,702초(약 1시간 1분 42초)가 소요되었다.

강제로 습기를 부여한 첫 번째 실험과 비교한바, 중앙 부분과 가장자리의 온도가 큰 차이를 보이는 공통점이 있었으나, 최고온도에 이르는 시간은 크게 늦어지는 것으로 측정되었다.

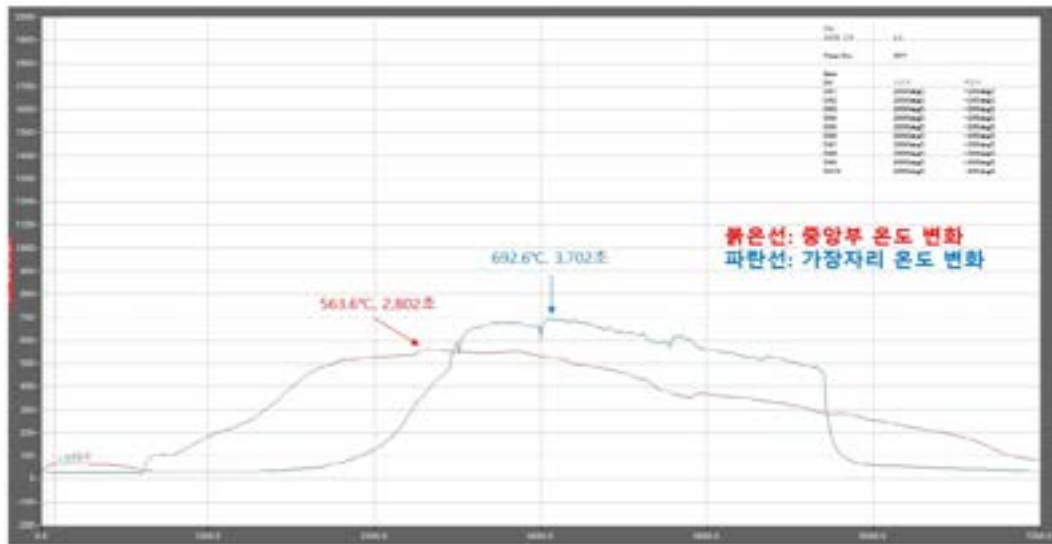


Fig. 32 Experimental results(temperature)

또한, 제2실험에서와 마찬가지로 번개탄 중앙 부분의 온도가 200℃를 넘어서고 있었으나, 육안으로는 불씨를 확인하기 쉽지 않았으며, 300℃를 넘어서자 붉은 불씨가 쉽게 확인이 되었다.(Fig 34.)



Fig. 33 After 10 minutes



Fig. 34 After 25 minutes(300℃)



Fig. 35 After 30 minutes



Fig. 36 After 60 minutes

제3실험에서 주목할 만한 점은 번개탄의 중앙 부분과 가장자리의 온도 차이이다. 제2실험과 같이 일반적인 상황에서는 중앙 부분과 가장자리의 온도차가 크게 나타나지 않는 모습을 보였으나, 습도가 높은 환경에서는 가장자리가 중앙 부분보다 100℃ 이상 높은 연소 특성을 보여주었다. 이는 습기를 머금은 번개탄의 연소 진행 과정에서 수분 함량이 줄어들며 가장자리의 온도가 크게 높게 나타난 것으로 추정된다.

3.5 점화 실패 사례 분석

실험 진행 중 여러 차례의 점화 실패 사례를 확인할 수 있었다. 원활한 점화를 위해 번개탄 아랫면에 부착 되어있는 톱밥이 모두 소실될 때까지 점화원(토치)으로 점화를 시도하였음에도 조금 상승하던 온도가 서서히 낮아지기를 반복하였다. 이때 번개탄의 온도는 100℃를 넘지 않았으며, 계속된 점화 시도로 번개탄 아랫면의 중앙 부분이 깊게 패이기도 하였다.

Fig 37., Fig 38. 은 동일한 번개탄에 약 4회 점화를 시도하였으나 실패한 사례이며, 관계자가 이러한 행동을 반복할 경우 이번 실험의 실패 사례와는 다르게 불씨가 되살아나 화재로 이어질 가능성이 충분할 것으로 보인다.



Fig. 37 Ignition failed



Fig. 38 Ignition failed



Fig. 39 Experimental results(temperature)

4 결 론

4.1 실험 결론

본 연구에서는 번개탄의 연소 특성을 3가지 조건 하에서 실험을 통해 결과를 분석하였다. 실험 결과, 번개탄의 최고온도는 방치 환경과 습도에 따라 큰 차이를 보였으며, 특히, 습도가 높은 경우 중앙 부분과 가장자리의 온도 차도 큰 것을 확인할 수 있었다. 또한 실험 중 여러 차례 반복된 점화 실패 사례와 200℃ 이상의 고온에서도 불씨가 잘 보이지 않는 점 등을 확인하여 일상생활 속에서 화재 발생 가능성이 높음을 알 수 있었다.

제1실험과 제2실험을 통해 점화된 번개탄의 방치 환경에 따라 최고온도와 연소 지속 시간이 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있었으며, 제3실험을 통해 습도 또한 연소에 큰 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다.

Table 1. Experimental results(Environment)

Sortation	First experiment			Second experiment	
	Center of the lower surface	Center of the upper surface	Edge of the lower surface	Center	Edge
Highest temperature(℃)	740	804.4	740.4	668.6	651.7
Time of arrival(S)	955	1,962	1,979	1,341	2,450

Table 2. Experimental results(Humidity)

Sortation		Third experiment	
		Center	Edge
Highest temperature(℃)	Spray	523.5	639.8
	Rain	563.6	692.6
Time of arrival(S)	Spray	901	2,243
	Rain	2,802	3,702

3가지 실험을 통해 공통적으로 확인할 수 있는 번개탄의 연소 진행 과정은 우리가 흔히 알고 있는 목조건물의 화재 진행 과정과 유사한 점을 알 수 있다. 화재 원인, 무연착화, 출화, 성장기, 쇠퇴기, 쇠퇴기를 거쳐 완전 소화하는 목조 건물의 화재 진행 과정과 유사하다고 볼 수 있으며, 목조 건물 화재와 다른 점은 최고온도가 상대적으로 낮고, 연소 지속시간이 길다는 점이다.

Table 3. Theoretical comparison

Sortation	Wooden building ³⁾	Charcoal briquet
Highest temperature(℃)	1,100~1,300	500~800
Combustion duration Time(M)	30	120

4.2 화재조사 착안사항

번개탄은 목재 및 숯 등과 마찬가지로 비교적 쉽게 연소하고, 전소된 화재 현장의 경우 그 형태가 거의 남아 있지 않는 특징을 보여준다. 소방대 출동 전 관계자의 자체진화 과정과 소방활동 중 소방대원의 화재진압 과정에서 쉽게 훼손될 수 있으며, 탄화된 번개탄만으로 발화 관련성을 입증하기 쉽지 않다. 그렇다고 번개탄의 연소 특성을 분석하지 않을 수는 없다. 기본적 특성을 알지 못하는 상태에서의 화재조사관의 어떠한 추론도 그 신빙성을 의심 받을 수 밖에 없기 때문이다. 번개탄의 연소 특성을 완전히 이해한다면, 복잡한 화재 현장에서 발화 원인을 특정하는데 훌륭한 길잡이가 될 것이다.

참고문헌

- 국가화재정보시스템
- 화재발생종합보고서(동해 2025-02-017), 강원특별자치도소방본부, 2025
- 화재발생종합보고서(양구 2024-10-036), 강원특별자치도소방본부, 2024
- “2025 소방전술 1-1(화재)”, 중앙소방학교, pp. 8-35
- “2025 소방전술 1-2(화재)”, 중앙소방학교, pp. 8-35

3) 건축물(목조)의 화재성상(<https://m.blog.naver.com/ok1659/222915872699>)



제 3 장 | 동부권



☑ 광역화재조사 1팀 >>>

착화탄(일명 번개탄)의 연소 특성에 관한 연구

☑ 광역화재조사 2팀 >>> ☆ '25년도 강원 화재재현실험 연구논문 발표대회 우수
전기 누전 시 출화점 환경에 따른 발화 가능성 연구

전기 누전 시 출화점 환경에 따른 발화 가능성 연구

김주혁¹⁾, 강태영, 황성재, 한규호, 김정년
강원특별자치도 소방본부 동부권광역화재조사 2팀

A Study on the Ignition Possibility According to the Environmental Conditions at the Point of Origin in Electrical Leakage

Ju-Hyeok Kim[†], Tae-Young Kang, Seong-Jae Hwang, Kyu-ho Kim, Jung-Nyun Kim
Gangwon State Fire Headquarters wide-area fire investigation in the eastern region Team 2

ABSTRACT

The utilization of electricity, which enhances the convenience of daily life and significantly contributes to scientific and economic advancement, continues to increase. However, improper handling or misuse of high-risk electrical systems can lead to serious incidents such as electric shocks and electrical fires. Among the primary causes of such incidents, electrical leakage has been identified as a critical risk factor. Fires resulting from leakage can originate at any point along the path between the leakage point and the grounding terminal.

This study aims to experimentally investigate how environmental conditions surrounding potential ignition points influence the likelihood and characteristics of ignition. By analyzing the ignition and combustion behavior at the origins of electrical leakage fires and identifying the environmental factors that may accelerate combustion, the findings of this study are expected to provide valuable insights for fire investigation methodologies and serve as practical resources for public fire safety education and awareness.

Keywords : electrical leakage, Ignition point, environmental conditions, Fire investigation.

1 서 론

1.1 연구의 목적

누전(leakage current)은 전기장치의 결함, 노후 전선의 절연 파괴, 전선 피복 손상 등으로 인해 전류가 정상적인 회로를 벗어나 외부로 비정상적으로 흐르는 현상을 의미한다. 이러한 누전 전류는 감전 사고를 유발할 수 있을 뿐만 아니라, 국부적인 발열이나 스파크를 통해 인근의 가연물에 착화

1) E-mail : jhkim3342@korea.kr

되어 화재로 확산될 수 있다. 일반 가정에서는 이를 예방하기 위해 정격 전압 AC 220V/60Hz, 감도 전류 30mA 사양의 누전차단기(Electric Leakage Breaker, ELB)를 통상적으로 설치하고 있으나, 30mA 이하의 미세 누전 전류는 누전차단기의 감도 한계를 벗어나 차단되지 않을 가능성이 존재한다. 이와 같은 경우, 출화 지점 주변의 환경 조건(접촉 저항, 가연물의 종류 및 분포 상태 등)에 따라 실제 화재 발생 가능성이 증가할 수 있다. 따라서 본 연구는 저전류 누전 조건에서 출화점 환경 요소가 발화에 미치는 영향을 실험적으로 분석하고자 하며, 이를 통해 누전 화재의 발화 및 연소 특성에 대한 과학적 이해를 제고하고자 한다. 아울러 본 연구 결과는 향후 화재 감식 기초자료로 활용될 수 있을 뿐 아니라, 전기 안전 정책 및 대국민 예방 홍보자료 개발을 위한 실질적인 시사점을 제공하는 데 그 목적이 있다.

1.2 연구의 범위

본 연구는 누전차단기(Electric Leakage Breaker, ELB)가 작동하지 않는 감도 전류 30mA 이하의 저전류 누전 조건에서, 출화 지점 주변의 환경 요인이 화재 발생에 미치는 영향을 실험적으로 분석하는 것을 주요 목적으로 한다. 누전 발생 시 형성되는 국부 발열 또는 전기적 스파크가 인근의 가연물에 착화될 수 있는 환경을 설정하고, 접촉 저항, 가연물의 종류 및 분포 상태 등 다양한 조건을 변수로 조작하여 발화 특성을 계측함으로써 전기화재의 발생 메커니즘을 보다 정밀하게 규명하고자 한다.

- 1) 주택용 전기설비를 기준으로 정격전압 AC 220V 및 감도 전류 30mA 이하의 저전류 누전 조건을 설정하고, 누전차단기가 동작하지 않는 실제 상황을 실험적으로 모사한다.
- 2) 절연이 손상된 전선을 금속판(함석판)에 접촉시키는 방식으로 누전 상황을 재현하고, 이로 인해 형성되는 출화 조건을 구조적으로 구현한다.
- 3) 연탄 분진, 톱밥 분진, 철분말 등 다양한 가연물에 대한 착화 여부, 발화 시간, 표면 온도, 연소 범위 등의 데이터를 계측하여 위험 인자를 정량적으로 도출한다.
- 4) 누전 조건에서 전원 특성의 차이를 비교하기 위하여 AC(교류) 및 DC(직류) 전원을 적용한 비교 실험을 실시한다.
- 5) 실험 결과를 바탕으로 누전 화재의 발생 메커니즘을 분석하고, 향후 화재 감식 시 활용 가능한 기초자료를 제시함과 동시에 전기화재 예방을 위한 기술·제도적 개선 방안을 제안한다.

1.3 연구의 흐름

저전류 누전에 의한 발화 가능성을 분석하기 위해, 본 연구에서는 먼저 누전의 정의와 발생 메커니즘, 그리고 전기화재와의 연관성에 대한 이론적 고찰을 수행하고, 실제 주택 및 건물 내에서 발

생한 누전 화재 사례를 수집·분석하였다. 이를 토대로, 누전차단기(ELB)가 동작하지 않는 감도 전류 이하(30mA 이하)의 누전 조건에서 화재로 이어질 수 있는 환경적 요인을 실험적으로 검증하기 위한 조건들(접촉 저항 상태, 가연물의 종류 및 분포, 누전 위치 및 구조 등)을 설정하였다.

실험 설계에 앞서 관련 선행연구 및 화재 감식 보고서를 검토하고, 출화 가능성이 높은 조건을 선별하였다. 실험 회로는 가정용 전기설비의 일반적인 사용 환경을 반영하여 정격전압 AC 220V, 주파수 60Hz를 기준으로 구성하였으며, 누전은 절연이 손상된 전선을 합석판에 접촉시키는 방식으로 유도하였다. 출화점 주변에는 연탄 분진, 톱밥 분진, 철분말 등 실제 누전 환경에서 착화 가능성이 높은 가연성 분진을 배치하였다. 실험 장치는 열화상 카메라, 전류 센서, 표면 온도 센서 등을 포함하여 발열 및 착화 현상을 정밀 계측할 수 있도록 구성하였고, 가연물의 배치 상태(밀착 또는 이격)와 접촉 저항의 유무에 따라 발화 경향성을 비교·분석하였다. 특히, 정격 이하의 전압·전류 조건에서도 누전 상태가 누적될 경우 발열 및 화재로 발전할 수 있는지를 중점적으로 검토하였다. 연구의 구체적인 실험 흐름 및 분석 절차는 Fig. 1에 제시된 실험 설계도를 참고하기 바란다.

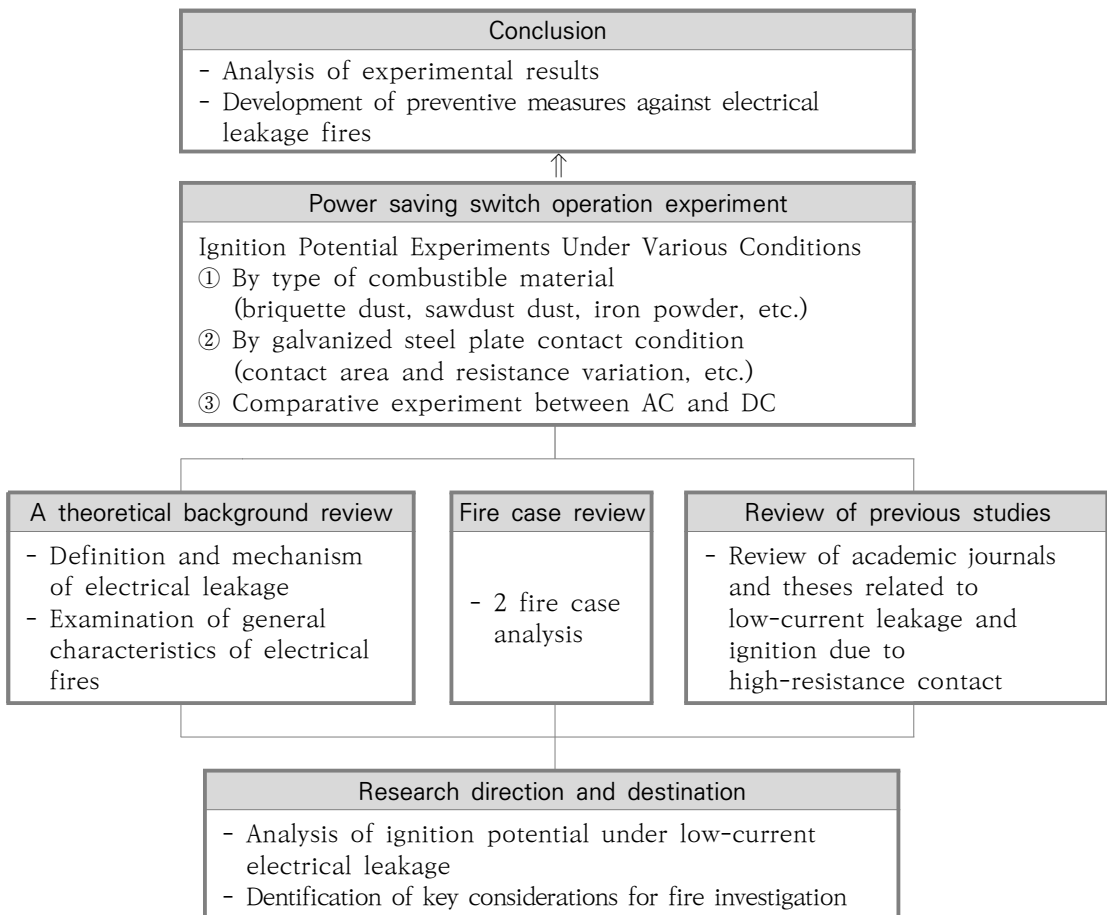


Fig. 1 The flow of research

1.4 화재 발생 통계²⁾

2024년 강원특별자치도 화재통계에 따르면, 총 1,900건의 화재 중 전기적 요인에 의한 화재는 663건(34.9%)으로, 두 번째로 높은 발생 원인으로 집계되었으며, 이 중 상당수가 누전, 지락, 트래킹 등 누전 관련 하위 요인으로 분류되었다. 특히 작동기기 화재 954건 중 653건(68.4%)이 전기적 원인에서 비롯되었고, 전기·전자기기에서 최초 착화된 화재도 602건(31.7%)에 달해 누전을 포함한 전기설비 관련 위험이 생활공간 전반에 광범위하게 분포하고 있음을 보여준다. 전기화재로 인한 재산 피해액은 약 87억 원으로 전체 피해의 33.1%를 차지하며, 경제적 손실 측면에서도 가장 큰 비중을 차지하는 요인으로 나타났다.

2 이론적 배경

2.1 누전의 개념 및 발생 원인

누전(leakage current)이란 전기 회로 내 전류가 정상 경로를 벗어나 외부 도전체나 대지로 흐르는 현상을 말한다. 이러한 현상은 주로 전선의 절연 파괴, 노후화, 설비의 구조적 결함, 습기 침투 등에 의해 발생한다.

일반적으로 절연 상태가 불완전해질 경우, 전류는 전기 회로 외부의 금속 구조물(메탈라스, 철제 지지물, 함석판 등)로 유입되며, 접촉 저항이 높은 부위에서 국부적인 발열이 발생하게 된다. 이로 인해 인근에 존재하는 가연성 물질(스티로폼, 목재 골조, 섬유 내장재 등)에 착화되어 화재로 이어질 수 있다.



a. Deteriorated electrical equipment



b. Insulation-failed wire

Fig. 2 Typical causes of leakage current

2) 국가화재정보시스템(<http://www.firedata.go.kr>), 화재통계

2.2 누전으로 인한 피해

2.2.1 기능적 장애

누전이 발생하면 누전차단기(ELB)가 정상적으로 작동하여 회로를 차단하게 되며, 이로 인해 일시적인 정전이나 전기설비의 작동 중지가 발생할 수 있다. 또한 콘센트나 플러그 등에서 누전이 지속될 경우, 해당 전기제품에 반복적인 과부하가 누적되어 기기의 오작동 또는 고장으로 이어질 수 있다. 이러한 1차 피해는 시스템 운영의 불안정성과 설비 수명 저하로 이어질 수 있다.

2.2.2 감전 및 화재 사고

누전으로 인한 가장 심각한 2차 피해는 감전과 화재이다. 누설 전류가 인체와 접촉할 경우, 전류의 경로, 세기, 지속 시간에 따라 심각한 감전 사고로 이어질 수 있으며, 이는 전기 안전에서 가장 핵심적인 사고 유형 중 하나이다. 또한 누전이 발생한 전선이나 단자부가 가연성 물질(스티로폼, 목재, 먼지 등)과 접촉하거나, 접촉 저항이 큰 지점에서 발열이 누적될 경우 실제 화재로 확산될 가능성이 높다. 이러한 화재는 주택이나 상업시설 등 다양한 공간에서 광범위한 재산 피해와 인명 피해를 초래할 수 있다.

2.3 누전차단기의 역할

누전차단기(ELB)는 전선이나 전기기기에서 발생하는 누설 전류를 감지하여 회로를 자동으로 차단하는 전기 안전장치이다. 주로 AC 600V 이하의 저압 전기설비에 설치되며, 가정, 상업시설, 산업시설 등 다양한 환경에 적용된다. 누전 발생 시, 누전차단기는 전류가 인체나 금속 구조물 등을 통해 흐르기 전에 이를 신속하게 차단함으로써 감전이나 화재 등 2차 피해를 효과적으로 예방할 수 있다. 감전 보호용 누전차단기는 일반적으로 인체에 유해한 30mA 이상의 누설 전류를 기준으로 작동하도록 설계되어 있으며, KS C 4613 기준에 따르면 이들 차단기의 정격 감도 전류는 30mA 이하, 동작 시간은 0.03초 이하로 규정되어 있다. 누전차단기는 감전 사고는 물론, 누전으로 인한 화재 및 전기설비 손상을 방지하는 데 있어 핵심적인 역할을 수행하는 안전장치이다.



Fig. 3 Residential electric leakage breaker

2.4 선행연구 검토

본 연구에 앞서 「전기 누전 시 출화점 환경에 따른 발화 가능성」을 실험적으로 분석하기 위해 관련 선행연구를 검토하였다. 이승빈(2014)의 「누전의 원인과 전기화재 상관관계에 관한 연구」와 김성빈(2023)의 「누전 사례연구를 통한 전기안전관리 개선에 관한 연구」는 전기 누전의 발생 메커니즘과 화재로의 확산 과정을 중심으로 실험을 수행하였으며, 절연저항 측정 및 누전차단기 작동 시험을 통해 누전과 전기화재 간의 상관관계를 규명하였다. 또한 두 연구 모두 사고 사례 분석을 바탕으로 전기 안전 대책과 보호장치 설치 방안을 제시함으로써, 전기화재 예방을 위한 실질적인 시사점을 제공하였다. 그러나, 해당 연구들에서는 누전차단기가 감지하지 못하는 30mA 이하의 미세 전류 구간에서의 전기적 위험성에 대해 일부 언급은 있었으나, 이러한 조건에서 출화점 주변 환경 변화(접촉 저항, 가연물 종류 및 분포 등)에 따른 발화 가능성에 대한 체계적인 실험적 접근은 없었다. 따라서, 본 연구는 선행연구에서 다루지 않았던 30mA 이하 미세 전류 누전 조건에서의 출화 가능성을 중심으로, 접촉 저항 상태, 가연물의 종류 및 배치 상태, 교류(AC)/직류(DC) 전원 조건 비교 등 다양한 환경 변수를 설정하여 실험을 수행하고자 한다.

Table 1. 선행연구

No	Title	Author	Main content
1	A Study on the Correlation of Cause Electrical Fires of Leakag	Seungbin Lee (Gachon-University)	The purpose of this study is to analyze the mechanism of electrical leakage and its progression to fire through experiments, and to investigate the correlation between electrical leakage and electrical fires by testing insulation resistance and the operation of leakage breakers.
2	Research on Improving Electrical Safety Management according to a Case Study of Leakage Current	Seongbin kim (Chosun-University)	This paper proposes practical electrical safety measures to prevent leakage and fire by analyzing accident cases and suggesting management guidelines and protective device installations.

3 화재사례 분석

3.1 화재사례(1)³⁾

3.1.1 화재개요

2024년 6월 1일 12:25경 강릉시 주문진읍 소재 단독주택에서 발생한 화재로, 거주자가 휴식 중 타는 냄새가 나 확인한바, 보일러실 내부에 보관 중이던 물품 주변에서 불꽃과 연기를 목격 후 신고를 한다.

3) 화재발생종합보고서(강릉 2024-06-108)

3.1.2 발화지점 및 화재원인 추론

화재가 발생한 보일러실 내부에서는 발화열원이 식별되지 않으나, 지붕 및 벽면 등에서 전류가 흐르는 것이 확인되며, 고정틀 못 주변에서 국부적인 탄화흔이 식별되고 화재 당일 비가 내린 것으로 보아 누설된 전류로 인해 최초 발화한 전기적 요인(누전)의 화재로 추정됨.



Fig. 4 Site overview



Fig. 5 Ignition location



Fig. 6 Fire origin point

3.2 화재사례(2)⁴⁾

3.2.1 화재개요

2024년 8월 27일 08:28경 강릉시 강동면 소재 마을회관 건물에서 발생한 화재로, 2층 거주자가 TV 시청 중 타는 냄새가 나 확인한바, 보일러실에서 연기 및 화염을 목격 후 신고를 함.

3.2.2 발화지점 및 화재원인 추론

발화지점은 보일러실 출입문 벽체 우측 하부로 추정되며, 발화 원인은 지붕의 천공에 의해 가공 인입선이 손상되어 지붕 및 벽체로 누전된 전기가 보일러실 벽면(샌드위치패널) 접지 지점 주변의 연탄 가루 등과 접촉되어 발화된 전기적(누전) 요인에 의한 화재로 추정됨.



Fig. 7 Site overview



Fig. 8 Ignition location



Fig. 9 Fire origin point

4) 화재발생종합보고서(강릉 2024-08-164)

4 실험

4.1 실험개요

4.1.1 실험조건 및 방법

주택용 전기설비 기준(정격전압 AC 220V)에 따라 회로를 구성하고, 누전차단기가 동작하지 않는 감도 전류 30mA 이하의 저전류 누전 조건을 설정하였다. 이러한 조건 하에서 절연이 손상된 회로가 금속판(함석판)과 접촉하는 상태를 구현하였으며, 출화 지점의 주요 환경 변수인 접촉 면적, 가연물의 종류 및 분포 상태에 따라 발화 가능성을 실험적으로 비교·분석하였다.

실험1 전류량에 따른 시료(연탄 분진, 톱밥 분진, 철분말)의 온도 및 상태 변화 측정

실험2 동일한 시료를 사용하여 금속판 간 접촉 면적 차이에 따른 온도 및 상태 변화 측정

실험3 AC(교류)와 DC(직류) 전원을 적용하여 전원 유형에 따른 발화 경향성 비교

본 실험을 통해 저전류 누전 조건에서 출화점의 환경 조건에 따른 발화 요인 및 위험성을 분석하고, 화재 조사관들의 화재 현장 감식 시 참고할 수 있는 착안사항을 제시하고자 한다.

4.1.2 실험준비 및 장비

본 실험에서 사용한 실험세트(Experimental set)는 Fig 10, 11, 12와 같으며, 주요장비(Major experimental equipment)는 Table 2를 참고하기 바란다.



Fig. 10 Experimental set



Fig. 11 Ground rod



Fig. 12 DC Power Supply

Table 2. Major experimental equipment

No	Experimental set & Recording device	No	Experimental set & Recording device
1	Electric fan(SIF-14LKD, 48W)	7	Galvanized steel plate(0.5mm)
2	Electric Leakage Breaker (ELB)	8	Ground rod, Ground wire
3	Clamp meter(HIOKI CM-4371)	9	DC Power Supply(EX100-6)
4	Digital multimeter(Chekman TK-201)	10	Digital camera(Canon EOS 90D)
5	Thermal imaging camera(IGNIS-H10)	11	Video camera(Panasonic HC-VXF1)
6	Sample(Briquette dust, Sawdust dust, Iron powder)	-	-

4.2 제1실험(전류량에 따른 시료의 온도 및 상태 변화 측정)

정격전압 AC 220V 회로에서 인위적인 접지를 통해 30mA 이하의 누전 전류를 유도하고, 누전 경로에 함석판을 삽입하여 주택의 함석 벽면에서 누전이 발생하는 상황을 재현하였다. 이후, 약 2mm 간극의 함석판 사이에 세 종류의 시료(연탄 분진, 톱밥 분진, 철분말)를 주입하고, 열화상 카메라를 이용하여 온도 변화와 시료의 상태 변화를 관찰하였다.



Fig. 13 Experimental setup



Fig. 14 Galvanized steel plate



Fig. 15 Thermal imaging camera



a. Briquette dust



b. Sawdust dust



c. Iron Powder

Fig. 16 Three types of samples

4.2.1 누전 전류 실험(19.55mA)

인위적인 접지를 통해 19.55mA의 미세 전류를 유도한 후, 연탄 분진, 톱밥 분진, 철분말의 세 가지 시료를 함석판 틈 사이에 주입하고, 열화상 카메라를 활용하여 온도 변화와 시료의 상태 변화를 관찰하였다.



Fig. 17 Current value(19.55mA)

4.2.2 실험결과(19.55mA)

미세 전류(19.55mA) 누전 상태에서, 함석판 사이 약 2mm 간극에 세 가지 시료(연탄 분진, 톱밥 분진, 철분말)를 각각 주입한 후, 열화상 카메라를 이용하여 온도 변화와 시료의 상태 변화를 측정하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

첫째, 연탄 분진(Briquette dust)을 시료로 사용한 경우, 접촉 부위에서 간헐적인 스파크 현상이 시각적으로 확인되었으며, 최고 온도는 30.1°C로 측정되었다. 온도의 급격한 상승은 관찰되지 않았으나, 불꽃 발생 가능성이 있다는 점에서 주의 깊게 검토할 필요가 있다.

둘째, 톱밥 분진(Sawdust dust)을 사용한 경우, 실험 전후의 온도 변화 및 시료 상태 모두에서 특이사항은 관찰되지 않았으며, 최고 온도 역시 안전 기준 범위 내에 머물렀다. 해당 조건에서는 연소 반응 가능성이 낮은 것으로 분석된다.

셋째, 철분말(iron powder)을 사용한 경우, 연탄 분진과 유사하게 간헐적인 스파크 현상이 관찰되었고, 최고 온도는 28.9°C로 측정되었다. 물리적 변화는 크지 않았지만, 금속 분진의 전도성 특성으로 인해 국부 발열 또는 불꽃 발생 가능성이 존재하는 것으로 판단된다.

이상의 실험 결과는 미세 전류 누전 조건(19.55mA)에서도 함석판 접촉 환경과 시료의 특성에 따라 스파크가 발생할 수 있으며, 이는 가연성 분진이 화재 유발 요인이 될 수 있음을 시사한다.



Fig. 18 Experimental results(state change)

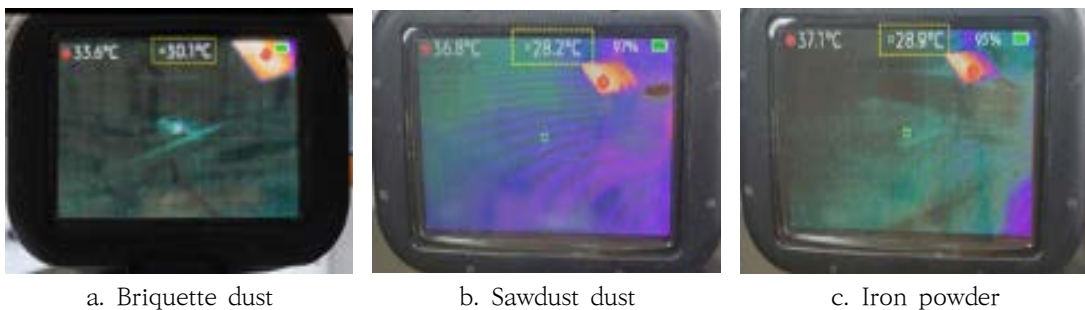


Fig. 19 Experimental results(maximum temperature)

4.2.3 누전 전류 실험(10.85mA)

인위적인 접지를 통해 10.85mA의 미세 전류를 유도한 뒤, 연탄 분진, 톱밥 분진, 철분말 등 세 가지 시료를 함석판 사이의 틈에 각각 주입하였다. 이후 열화상 카메라를 활용하여 시료별 온도 변화를 계측하고, 시간에 따른 시료의 물리적 상태 변화를 관찰함으로써 발열 및 발화 가능성을 분석하였다.



Fig. 20 Current value(10.85mA)

4.2.4 실험결과(10.85mA)

미세 전류(10.85mA) 누전 상태에서, 함석판 사이 약 2mm 간극에 세 가지 시료(연탄 분진, 톱밥 분진, 철분말)를 각각 주입한 뒤, 열화상 카메라를 활용하여 온도 변화 및 시료의 상태 변화를 측정하였다. 그 결과는 다음과 같다.

첫째, 연탄 분진(Briquette dust)을 사용한 경우, 접촉 부위에서 간헐적인 스파크 현상이 시각적으로 식별되었으며, 최고 온도는 29℃로 계측되었다. 온도의 급격한 상승은 관찰되지 않았지만, 불꽃 발생 가능성이 내재된 환경적 반응으로 판단된다.

둘째, 톱밥 분진(Sawdust dust)을 사용한 실험에서는 실험 전후의 온도 변화나 시료 상태에서 뚜렷한 특이점이 관찰되지 않았으며, 최고 온도 또한 안전 기준 범위 내에 머물렀다. 해당 조건에서는 연소 반응의 가능성이 낮은 것으로 분석된다.

셋째, 철분말(Iron powder)을 활용한 경우, 연탄 분진과 유사하게 간헐적인 스파크 현상이 확인되었고, 최고 온도는 25.3℃로 측정되었다. 뚜렷한 물리적 변화는 나타나지 않았으나, 금속 분진의 전도성 특성으로 인해 국부적인 발열 또는 불꽃 발생의 잠재성이 존재하는 것으로 판단된다.

이상의 실험 결과는 미세 전류 누전 조건(10.85mA)에서도 함석판의 접촉 환경과 시료의 물리·화학적 특성에 따라 스파크가 발생할 수 있으며, 이로 인해 가연성 분진이 화재 유발 요인으로 작용할 수 있음을 시사한다. 두 차례에 걸친 미세 전류 누전 실험을 종합해 보면, 30mA 이하의 저전류 누전은 일반적인 누전차단기(ELB)로는 감지되지 않음에도 불구하고, 특정 조건에서는 화재를 유발할 수 있는 위험 요소로 작용할 수 있음을 확인할 수 있다.

제3장 | 동부권



a. Briquette dust

b. Sawdust dust

c. Iron powder

Fig. 21 Experimental results(state change)



a. Briquette dust

b. Sawdust dust

c. Iron powder

Fig. 22 Experimental results(maximum temperature)

4.3 제2실험(금속판 접촉 면적 차이에 따른 온도 및 상태 변화 측정)

4.3.1 실험방법

4.2.3 누전 전류 실험(10.85mA)과 동일한 미세 전류를 유도한 후, 연탄 분진, 톱밥 분진, 철분말의 세 가지 시료를 앞선 실험과는 다른 접촉 면적을 가진 함석판 사이에 주입하고, 열화상 카메라를 활용하여 온도 변화와 시료의 상태 변화를 관찰하였다.

4.3.2 실험결과

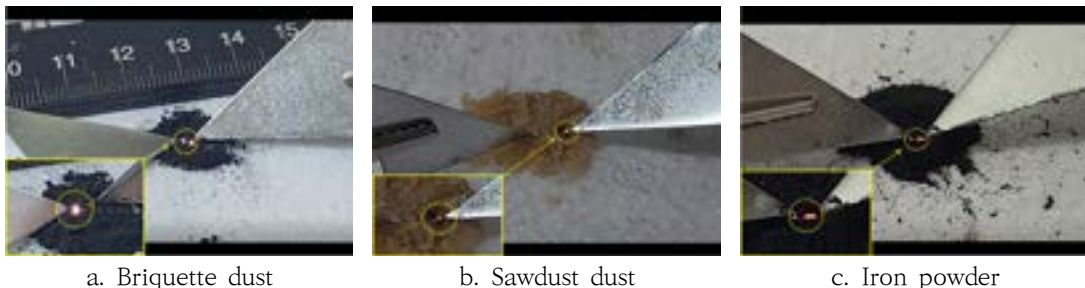
미세 전류(10.85mA) 누전 상태에서, 함석판 사이 약 1~2mm의 간극을 유지한 채 세 가지 시료(연탄 분진, 톱밥 분진, 철분말)를 각각 주입하고, 열화상 카메라를 활용하여 온도 변화 및 시료 상태의 변화를 측정하였다. 이번 실험은 앞선 조건과 비교하여, 함석판의 접촉 면적 변화가 발화 반응에 미치는 영향을 평가하고자 하였으며, 이를 위해 함석판 끝단을 뾰족하게 가공하여 접촉점이 집중되는 구조를 실험적으로 구현하였다. 접촉 면적을 제한함으로써 전류 밀도가 집중되는 환경을 모사하였고, 국부적인 발열 반응의 유무를 정량적으로 확인하고자 하였다. 실험 결과는 다음과 같다.

첫째, 연탄 분진(Briquette dust)을 시료로 사용한 경우, 접촉 부위에서 강한 스파크 현상이 시각적으로 명확히 관찰되었고, 최고 온도는 31℃로 측정되었다. 급격한 온도 상승은 나타나지 않았으나, 스파크에 의해 일부 연탄 입자에서 불꽃이 직접 확인되어, 실제 발화 가능성이 내재되어 있는 것으로 분석된다.

둘째, 톱밥 분진(Sawdust dust)을 사용한 실험에서는 미세한 스파크 현상이 시각적으로 식별되었으며, 최고 온도는 28.5℃로 측정되었다. 뚜렷한 열 폭주는 없었으나, 접촉 부위 주변의 일부 시료에서 탄화 반응이 나타나 가연성 미세 입자와의 반응 가능성이 명확하게 확인되었다.

셋째, 철분말(Iron powder)을 활용한 실험에서도 연탄 분진과 유사하게 강한 스파크 현상이 반복적으로 관찰되었으며, 최고 온도는 29.2℃로 측정되었다. 온도 변화는 비교적 완만했지만, 일부 철분말 입자에서 불꽃이 육안으로 식별되어 금속성 미세 물질의 전도성에 따른 위험 요소가 존재함을 시사하였다.

이상의 결과를 종합하면, 30mA 이하의 미세 전류 누전 조건은 누전차단기(ELB)로 감지되지 않는 전류 범위임에도 불구하고, 함석판의 접촉 구조와 시료의 특성에 따라 국부적인 스파크 및 발화 반응이 발생할 수 있음을 확인하였다. 특히 접촉 면적이 좁고 날카로운 구조로 집중된 접촉 환경에서는 스파크 강도 및 시료 반응 정도가 더욱 두드러지는 경향을 보였다. 이는 누전 회로에서의 구조적 조건이 발화 개연성을 증폭시킬 수 있는 중요한 인자임을 의미하며, 나아가 가연성 분진이 축적된 환경에서의 누전은 실제 화재로 이어질 가능성이 존재함을 시사한다.



a. Briquette dust

b. Sawdust dust

c. Iron powder

Fig. 23 Experimental results(state change)



a. Briquette dust

b. Sawdust dust

c. Iron powder

Fig. 24 Experimental results(maximum temperature)

4.4 제3실험(전원 유형에 따른 발화 경향성 비교)

4.4.1 실험방법

4.2.1 AC 누전 전류 실험(19.55mA)과 유사한 조건에서 DC 100V, 20mA의 미세 전류를 유도하고, 연탄 분진, 톱밥 분진, 철분말의 시료를 약 2mm 간극의 함석판 사이에 주입하였다.

열화상 카메라를 활용해 각 시료의 표면 온도 변화 및 물리적 상태를 관찰하고, AC 실험 결과와 비교 분석하였다.

DC 전류는 연속적인 에너지 전달 특성으로 인해 국부 발열 및 스파크 발생 가능성이 크며, 동일 조건에서도 더 높은 화재 위험을 유발할 수 있다. 본 실험은 전원 유형(AC/DC)에 따른 누전 환경의 발화 경향성을 비교하는 데 목적이 있다.



Fig. 25 DC Power Supply(100V/20mA)

4.4.2 실험결과

직류(DC) 100V 조건에서 20mA의 미세 전류를 인위적으로 유도한 후, 함석판 사이 약 2mm 간극에 세가지 시료(연탄 분진, 톱밥 분진, 철분말)를 각각 주입하고, 열화상 카메라를 이용하여 온도 변화와 시료 상태의 변화를 측정함으로써 직류 누전 환경에서의 발화 반응 특성을 분석하고자 하였다.

이 실험은 앞선 교류(AC 19.55mA) 조건과의 비교 분석을 목적으로 하며, 실험 결과는 다음과 같다.

첫째, 연탄 분진(Briquette dust)을 시료로 사용한 경우, 접촉 부위에서 간헐적인 스파크 현상이 명확히 관찰되었으며, 이는 교류 조건보다 상대적으로 활발한 반응을 보였다. 최고 온도는 28.4℃로 측정되었고, 급격한 온도 상승은 나타나지 않았으나 일부 시료 입자에서 불꽃 발생 가능성이 확인되었다.

둘째, 톱밥 분진(Sawdust dust)을 사용한 경우, 실험 전후의 온도 변화 및 시료 상태 모두에서 특이사항은 관찰되지 않았으며, 최고 온도는 28.6℃로 계측되어 연소 반응 가능성은 매우 낮은 것으로 분석되었다.

셋째, 철분말(Iron powder)을 시료로 사용한 실험에서도 간헐적인 스파크 현상이 관찰되었으며, 반응 역시 AC 누전 전류 실험 대비 활발한 경향을 보였다. 최고 온도는 28.4℃로 계측되었으며, 물리적 변화는 미미하였으나 금속 분진의 전도성 특성에 따라 국부적인 발열 또는 불꽃 발생 가능성이 일부 존재하는 것으로 판단된다.

이상의 결과를 종합하면, DC 누전 실험(20mA)은 동일 조건의 AC 누전 실험(19.55mA)에 비해 시각적으로 더 활발한 상태 변화와 반응을 유도하였음을 확인하였다.

이는 직류(DC)가 교류(AC)에 비해 연속적인 에너지 전달 특성을 가지므로, 접촉 저항이 큰 조건에서는 열이 쉽게 누적되고, 결과적으로 발열 및 발화 가능성도 상대적으로 증가할 수 있음을 시사한다.



Fig. 26 Experimental results(state change)



Fig. 27 Experimental results(maximum temperature)

5 결 론

5.1. 실험 결론

본 연구는 주택용 누전차단기(ELB)의 감지 한계인 30mA 이하의 미세 전류 조건에서도, 출화 지점 주변의 환경 요인에 따라 스파크 발생 및 발화 가능성이 증가할 수 있음을 실험을 통해 입증하였다.

제1실험에서는 인위적으로 유도한 교류(AC) 전류 약 20mA 및 10mA 조건에서 세 가지 시료(연탄 분진, 톱밥 분진, 철분말)를 함석판 간극(약 2mm)에 주입하여, 온도 변화 및 시료 상태 변화를 관찰하였다. 그 결과, 특히 연탄 분진과 철분말 시료에서는 간헐적인 스파크 현상과 불꽃 발생 가능성이 확인되었으며, 10mA의 저전류 조건에서도 시료의 종류에 따라 화학적·물리적 반응이 촉진되는 양상을 보였다.

제2실험에서는 동일한 미세 전류 조건에서 함석판의 접촉 면적을 조절하고, 이에 따른 시료 반응 변화를 비교하였다. 실험 결과, 접촉 면적이 좁고 구조적으로 날카로운 접촉 환경에서는 접촉 저항이 집중되어 스파크 발생 강도와 시료 반응이 더욱 뚜렷하게 나타났다. 이는 누전 회로의 구조적 조건이 발화 개연성에 직접적인 영향을 미칠 수 있음을 시사하며, 특히 가연성 분진이 축적된 환경에서는 누전된 열과 불꽃이 결합되어 실질적인 화재로 이어질 수 있음을 의미한다.

제3실험에서는 동일한 미세 전류 조건(20mA)에서 AC(교류) 및 DC(직류) 전원 유형에 따른 시료 반응을 비교하였다. 그 결과, 직류(DC) 환경에서는 연탄 분진과 철분말 시료가 교류(AC)보다 시각적으로 더 활발한 상태 변화와 스파크 반응을 보였으며, 이는 DC 전류의 연속적이고 안정적인 에너지 전달 특성으로 인해 접촉 저항이 존재하는 조건에서 열 축적과 국부 발열이 상대적으로 크게 나타남을 시사한다.

이상의 실험 결과를 종합하면, 누전차단기로 감지되지 않는 30mA 이하의 저전류 누전 조건에서도 접촉 구조, 가연물의 종류 및 분포, 전원 유형 등 출화 지점의 환경적 조건에 따라 실질적인 발화 가능성이 존재함이 확인되었다. 이러한 결과는 향후 누전차단기의 감도 향상 및 설계 개선, 출화 환경에 대한 안전 기준 강화, 그리고 전기화재 감식 기법의 정밀화 및 차세대 안전장치 개발을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

5.2 화재감식 착안사항

30mA 이하의 저전류 누전 조건에서도 발화가 가능하다는 점에서, 전형적인 고전류 아크 흔적이거나 전선의 용융 흔적이 없더라도 금속 접촉부 주변에서 발생할 수 있는 미세한 탄화 흔적, 국부적인 발열 자국, 산화 흔적 등을 면밀히 관찰할 필요가 있다. 이러한 미세 흔적은 열원이 작더라도

발화를 유도할 수 있는 잠재적인 조건이 될 수 있으므로, 화재 감식 과정에서 간과해서는 안 된다. 특히 합석판과 같이 접촉 구조가 날카롭거나 접촉 면적이 매우 좁은 경우, 전류가 집중되어 스파크 발생 가능성이 높아지고, 이는 발화 개연성을 증가시키는 요인이 된다. 따라서 전선 단자부, 금속판의 끝단 등 구조적 형상은 감식 과정에서 중요한 판단 기준으로 고려되어야 한다. 또한, 연탄 분진이나 철분말과 같이 전도성을 지닌 가연성 분진이 현장에 존재할 경우, 이는 직접적인 화재 유발 요인이 될 수 있다. 이때는 해당 분진의 탄화 흔적, 분포 범위, 축적 상태 등을 종합적으로 조사해야 한다. 아울러, DC 전원 회로가 사용된 경우에는 AC 회로에 비해 열 축적과 스파크 반응이 더욱 강하게 나타날 수 있으며, 이는 직류 전류의 연속적인 에너지 전달 특성에 기인한다. 이러한 경우에는 회로 주변의 미세 손상, 전선 피복의 파손 흔적 또한 감식 항목에 반드시 포함되어야 하며, 누전 위치와 주변 물질의 물리적 상태를 정밀하게 분석해야 한다. 나아가 누전차단기의 설치 유무, 정격 감도 전류, 실제 작동 여부 등을 확인하고, 차단기가 미작동된 상태에서 발생한 누전이 현장 환경(습기, 절연 파괴, 분진 축적 등)과 어떤 상관관계를 가지는지에 대한 종합적인 분석이 필요하다. 이러한 점을 종합적으로 고려할 때, 저전류에 의한 누전 화재는 기존의 전기화재 감식 기준만으로는 놓칠 가능성이 높으며, 실험적 근거에 기반한 세밀한 관찰과 분석이 수반되는 감식 접근이 요구된다.

5.3 예방 대책

주택용 누전차단기(ELB)의 감지 한계인 30mA 이하의 미세 전류 조건에서도 발화 가능성이 존재함이 본 실험을 통해 확인된 만큼, 보다 낮은 정격 감도 전류를 갖는 고감도 누전차단기의 보급 및 적용 확대가 필요하다. 특히 직류(DC) 회로는 교류(AC)에 비해 연속적인 에너지 전달 특성을 가지므로, 동일 조건에서 더 높은 열 축적과 스파크 발생 가능성을 나타낸다. 이에 따라 태양광 발전 설비나 배터리 충전장치 등 DC 전원이 사용되는 환경에서는 직류 전용 고감도 차단기(RCD Type B 등)의 설치가 요구된다. 또한 실험 결과에서 확인된 바와 같이, 접촉 구조가 날카롭고 접촉 면적이 좁은 합석판과 같은 금속 구조물은 국부적인 발열과 스파크 집중을 유발할 수 있어, 전기설비의 구조적 설계 개선과 절연 보강 대책이 병행되어야 한다. 아울러 연탄 분진, 철분말 등 전도성을 지닌 가연성 분진이 누전 회로와 접촉할 경우 실제 화재로 이어질 수 있으므로, 해당 물질의 전기설비 인근 배치를 제한하는 지침 마련과 함께 정기적인 청소 및 안전 점검 체계의 강화가 요구된다. 현재 누전차단기의 설치는 법적으로 의무화되어 있으나, 대부분 30mA 감도 전류 기준으로 일괄 적용되고 있어, 미세 전류 누전 상황에서는 화재 예방의 한계가 존재한다. 이에 따라, 각 부하별로 정격 감도 전류 10mA 이하의 고감도 누전차단기가 내장된 매립형 콘센트의 도입을 제안할 수 있으며, 이를 통해 누전이 발생한 회로만 국부적으로 차단되어 전기 사용의 불편을 줄이고 2차 사고를 예방할 수 있을 것으로 기대된다. 감식 측면에서는, 저전류 조건에서 발생할 수 있는 국부 발열

이나 미세한 탄화 흔적 등을 감별할 수 있도록 저전류 발화에 대한 감식 기준의 정비와 화재조사자의 전문 역량 강화를 위한 교육 확대가 필요하다. 본 실험 결과는 누전차단기의 감도 향상뿐만 아니라, 전기설비 관련 기술기준과 화재예방 관련 법령의 개선을 위한 기초자료로 활용될 수 있으며, 저전류 누전 환경에서의 화재를 사전 예방하기 위한 기술적·제도적 대책 마련에 기여할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 국가화재정보시스템(<http://www.firedata.go.kr>), 화재통계
2. 화재발생종합보고서(강릉 2024-06-108), 강원특별자치도소방본부, 2024
3. 화재발생종합보고서(강릉 2021-08-164), 강원특별자치도소방본부, 2024
4. 최승호, “누설전류에 의한 열적 특성 분석”, 충북대학교, 2010
5. 최기옥, “누전차단기의 트래킹 특성과 트래킹화재 방지대책에 관한 연구”, 서울과학기술대학교, 2012
6. 이승빈, “누전의 원인과 전기화재 상관관계에 관한 연구”, 가천대학교, 2014
7. 김성빈, “누전 사례연구를 통한 전기안전관리 개선에 관한 연구”, 조선대학교, 2023



2025년
화재 재현실험
연구보고서



제 4 장 | 설악권



☑ 광역화재조사 1팀 >>>

태양광 1차·2차 집속에 의한 화재 발생 가능성 연구

☑ 광역화재조사 2팀 >>>

발화지점 판정 시 인공지능(AI) 활용 가능성에 관한 연구

☑ 광역화재조사 3팀 >>>

하이라이트 전기레인지 화재 패턴에 관한 연구

태양광 1차·2차 집속에 의한 화재 발생 가능성 연구

최진영¹⁾, 박제승, 김정섭, 최휘림, 이주열

강원특별자치도 소방본부 설악권광역화재조사 1팀

Study on Fire Occurrence Possibility by Primary and Secondary Solar Radiation Concentration

Jinyoung Choi[†], Jeseung Park, Jeongseop Kim, Hwirim Choi, Juyeol Lee

Seolak Wide Area Fire Investigation Team 1, Gangwon State Fire Headquarters

ABSTRACT

This study examines the potential for fire ignition resulting from both primary and secondary concentration of solar radiation, focusing on how reflective or refractive surfaces intensify sunlight and create localized heating capable of igniting combustible materials.

Key Words : Solar concentration, Primary concentration, Secondary concentration, Solar radiation, Refractive surfaces.

1 서 론

1.1 연구의 배경

현대 건축물과 차량 등 다양한 구조물에서 유리, 거울, 금속판과 같은 반사성·굴절성 재료의 사용이 증가함에 따라 태양광 집속(집광)에 의한 화재 사고가 점차 주목받고 있다. 이러한 화재는 일반적으로 1차 집속과 2차 집속이라는 두 가지 경로를 통해 발생할 수 있다.

1차 집속은 볼록 유리, 곡면 창문, 렌즈 등 단일 구조물에 의해 태양광이 특정 지점으로 직접 집중되는 현상을 의미한다. 반면 2차 집속은 1차적으로 모인 태양광이 인근의 반사성 구조물이나 곡면을 추가로 거치면서 다시 한번 집중되는 과정을 말한다.

이러한 집속 현상은 통상적인 기상 조건에서도 가연물의 착화온도를 초과하는 국부적 고온을 유발할 수 있으며, 실제로 화재로 이어진 사례가 보고되고 있다. 그러나 태양광 집속 화재는 전기적·기계적·화학적 요인이나 명확한 발화원이 존재하지 않기 때문에 원인 규명이 어렵고, 종종 원인 미

1) E-mail : cji1354@korea.kr

상으로 분류되거나 다른 원인으로 오인되는 사례가 발생한다. 특히 1차 집속에 따른 화재 발생 메커니즘은 실험적 데이터가 존재하지만, 2차 집속에 따른 화재 발생 메커니즘과 연소 특성에 관한 연구는 여전히 부족한 실정이다.

따라서 본 연구는 태양광의 1차 및 2차 집속이 화재를 유발할 수 있는 조건과 메커니즘을 이론적·실험적으로 규명하고, 이에 따른 연소 형상의 특성을 분석하는 것을 목표로 한다. 이를 통해 태양광 집속 화재에 대한 이해를 심화하고, 향후 화재 예방 및 조사 활동에 활용할 수 있는 기초 자료를 제공하고자 한다.

1.2 연구의 필요성 및 목적

태양광의 반사나 굴절을 통해 집중된 태양광의 열로 인해 화재가 발생하는 사례들이 보고되고 있고 유리창, 곡면 반사체, 차량 유리 및 외벽 재질 등 일상 환경에서 태양광이 1차적으로 집속된 후, 인근 반사체에 의해 2차적으로 재집속되면서 국부적인 고온이 형성되고, 이로 인해 화재가 발생하는 경우가 있다.

이러한 화재는 명확한 점화원이 존재하지 않으며, 전기적·기계적·화학적·인적 부주의 요인 등이 배제된 상태에서 발생하는 경우가 많아 화재조사 과정에서 그 원인이 규명되지 않거나 오인될 가능성이 높으며, 기상 조건, 태양의 위치, 집속 물건의 방향, 착화물의 존재 및 위치 등의 모든 조건이 맞추어질 때 발생할 수 있으므로 특이 화재로 여겨지고 있다.

그러나 현재까지 태양광의 1차 및 2차 집속에 의한 화재 발생 가능성과 연소 형상에 대해 과학적이고 체계적으로 분석한 연구는 드문 실정이다. 이로 인해 실증적 자료와 분석 기준이 부족하며, 화재 예방과 조사 활동에 있어 실질적인 한계가 존재한다.

따라서 본 연구는 태양광 집속에 의한 화재의 위험성과 특성을 규명함으로써, 향후 실효성 있는 화재 예방 대책과 조사 기준을 마련하는 데 기여하고자 한다.

2 이론적 배경

2.1 태양광 복사와 열 에너지

태양광은 전자기파의 형태로 지구 표면에 도달하며, 그 중 가시광선과 근적외선이 대부분을 차지한다. 이 복사 에너지는 물체의 표면에 흡수되면 열에너지로 전환되어 표면 온도를 상승시키는 역할을 한다.

일반적으로 평면상에 분산된 태양광은 온도를 크게 상승시키기 어렵지만, 일정한 면적에 집중되면 국부적인 고온이 형성될 수 있다. 이는 곧 착화온도 이상의 온도에 도달할 경우 화재를 유발할

수 있음을 의미한다.

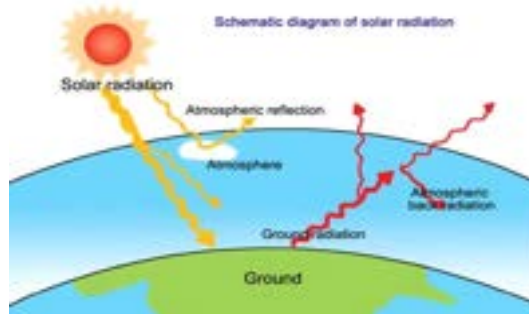


Fig. 1 Solar Radiation and Heat Transfer

태양에서 방출된 전자기파는 대기를 거쳐 지표면에 도달하며, 이 과정에서 일부는 반사되거나 산란되고, 나머지는 물체에 흡수되어 열 에너지로 전환된다. 이 열은 국부적으로 집중될 경우 가연물의 착화온도에 도달할 수 있다.

2.2 1차 집속·2차 집속 정의

2.2.1 1차 집속

1차 집속이란 곡면 유리, 볼록렌즈, 차량 유리창 등 하나의 굴절 또는 반사체에 의해 태양광이 한 점으로 집중되는 현상을 의미한다.

대표적인 예로 볼록렌즈를 이용한 종이 착화 실험에서 알 수 있듯이, 직사광선이 특정 지점에 집중되면 수백 도의 고온이 형성되어 화재가 발생할 수 있다. 볼록렌즈나 곡면 유리는 입사된 태양광을 한 점으로 모으는 성질을 갖고 있으며, 이를 통해 '1차 집속'이 이루어진다. 이 지점에서는 일반적인 일사량보다 수 배 이상의 에너지가 축적될 수 있다.

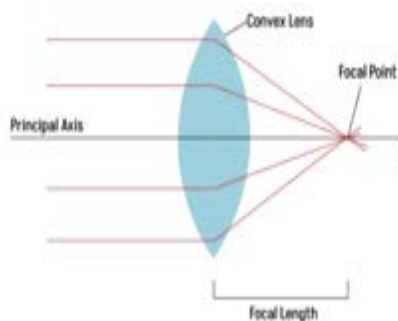


Fig. 2 Primary Concentration

2.2.2 2차 집속

2차 집속은 1차적으로 모인 태양광이 인근의 반사성 재질(예 : 금속판, 이중창 유리, 반사필름 등)을 통해 다시 반사되거나 굴절되어, 에너지가 또 한 번 집중되는 현상이다. 이는 태양광의 에너지가 중첩되어 더욱 높은 온도를 형성할 수 있어, 일반적인 환경보다 더 쉽게 가연물을 착화시킬 수 있는 조건이 된다.

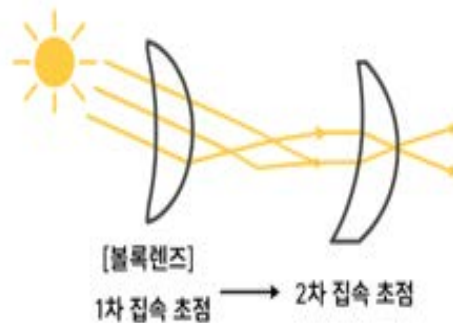


Fig. 3 Secondary concentration

2.3 착화 이론과 임계조건

모든 가연물은 연소를 시작하기 위해 일정 온도 이상의 에너지를 요구하며, 이를 착화온도라고 한다. 집속된 태양광은 외부 점화원 없이도 가연물의 착화온도에 도달할 수 있으며, 이는 외부 점화원 없이 스스로 발화하는 현상인 자착화의 형태로 구분될 수 있다. 실제로 목재, 플라스틱, 종이류 등의 착화온도는 약 200~450℃ 범위에 있으며, 실험적 조건에서 태양광 집속만으로도 이 온도에 도달한 사례가 보고된 바 있다.

2.4 화재조사 관점에서의 의의

태양광 집속 화재는 명확한 발화 요인 및 열원이 없는 상태에서 발생하기 때문에, 일반적인 화재조사 기준으로는 판단이 어렵고, 원인 미상으로 분류되는 경우가 많다. 따라서 태양광 집속에 의한 착화 메커니즘과 연소 형상의 특성을 이해함으로써 태양광 집속 화재 조사의 기준을 마련할 수 있다.

2.5 선행연구

2.5.1 태양광선의 집속에 관한 선행 연구

본 연구에 앞서 태양광 집속에 의한 화재 발생과 관련된 선행 논문을 검토한 결과, 기존 연구에서는 볼록렌즈의 역할을 하는 재료, 오목렌즈의 역할을 하는 재료를 활용하여 1차 집속에 관한 실

험을 실시하고 화재 발생 가능성을 확인한 바 있다.

본 연구에서는 이러한 선행 연구의 데이터를 바탕으로, 1차 집속 및 2차 집속에 의한 화재 발생 가능성을 검증하고, 특히 2차 집속 과정에서의 에너지 변화 양상을 규명하는 것을 목표로 한다. 이를 통해 태양광 집속 화재 메커니즘에 대한 이해를 확장하고자 한다.

3 화재 사례 및 분석

3.1 화재 사례

3.1.1 화재 사례 ①

2021년 3월 강원특별자치도 평창군 소재 국립기상과학원에서 발생한 화재로, 직접적인 화재 피해는 창고와 야적장 주변으로 한정되며, 야적장에 놓여 있던 볼록렌즈로 만들어진 확대경의 돋보기 효과로 인해 발생한 화재로 추정된다.



Fig. 4 Fire scene



Fig. 5 Direction of fire spread



Fig. 6 Convex lens



Fig. 7 Solar concentration

3.1.2 화재 사례 ②

2024년 8월 강원특별자치도 원주시 소재 건물 옥상의 창고로 이용 중인 비닐하우스에서 발생한 화재로, 폐지를 보관하는 비닐하우스 가림막 내부에 적치된 폐지에서 최초 발화된 것으로 추정되며, 비닐하우스 가림막은 경사가 완만한 상태로 철 파이프 사이에 빗물이 고여 있고 해당 지점에 볼록렌즈 형태로 돋보기 효과로 인해 발생한 화재로 추정된다.

적장에 놓여 있던 볼록렌즈로 만들어진 확대경의 돋보기 효과로 인해 발생한 화재로 추정된다.



Fig. 8 Overall view



Fig. 9 Presumed point of origin



Fig. 10 Pooled rainwater area



Fig. 11 Magnifying glass effect

3.2 화재 사례 분석

상기 두 건의 화재 사례 모두 돋보기 효과에 의한 태양광 집속 현상이 발화 요인으로 작용하였다. 집속 매개체가 태양광의 복사 에너지를 국부적으로 집중시켜, 점화원 없이도 발화가 가능함을 확인할 수 있었다. 특히 폐지와 같이 연소성이 높은 가연물이 적치된 상태에서는 피해가 더욱 커질 수 있다.

이러한 특성은 발화 흔적이 미세하고 점화원이 존재하지 않는 자연발화적 형태의 특징을 보이므로, 화재 조사 시 집속 가능 매개체(렌즈, 유리, 빗물 고임 등)의 존재 여부를 면밀히 확인할 필요가 있다.

4 재현실험 및 결과 분석

4.1 실험 개요

예비 실험으로는 인공 광원인 할로겐램프의 태양광 대체 가능성을 검증하기 위한 실험을 진행하였으며, 본 실험에서는 비닐하우스를 설치하여 비닐하우스의 돋보기 효과에 의한 화재 발생 재현실험과 2차 집속에 따른 화재 발생 가능성을 실험 및 분석하였다.

4.1.1 실험 재료

Table 1. Experiment Equipment

Division	Picture	Model name	Specifications	Purpose of use
Greenhouse		Greenhouse	(W)200X(L)200X(H)200, PE mesh canopy	Greenhouse
Infrared thermal imaging camera		Hikmicro B10	Measurement temperature range : -20~550℃	Temperature measurement
Infrared camera		Gis500	Measurement temperature range : -30~500℃	Temperature measurement
Convex lens		Convex lens	Magnification : 1.8X, 6X Lens size : Ø130 mm, 25 mm	Primary concentration

Division	Picture	Model name	Specifications	Purpose of use
Halogen lamp		AH-H3 (700W)	470XH350 Halogen lamp 350w×2	Substitute for sunlight
Mirror		Mirror	-	Secondary concentration
Stainless steel bowl		Stainless steel bowl	-	Secondary concentration
Wood board		Wood board	-	Combustible material
Vinyl		Vinyl	-	Greenhouse

4.2 예비 실험 – 인공 광원인 할로겐램프의 태양광 대체 가능성 실험

태양광 집속에 의한 화재 발생 가능성 및 정량적 데이터를 확보하기 위해 기상 조건을 고려한 실험이다. 태양광 집속 실험의 특성상 맑은 날씨, 태양의 고도, 풍속, 기온 등 다양한 기상 인자가 실험 결과에 큰 영향을 미치므로, 신뢰성 있는 데이터를 확보하기 위해서는 이러한 조건이 충족되는 시점에서 실험을 수행하는 것이 바람직하다. 그러나 기상 조건은 자연적 요인에 의해 변동성이 크고 사전에 예측하기 어렵다는 한계가 있다.

이에 따라 본 연구에서는 핵심적인 변수인 태양광을 대체하기 위해 자연 태양광과 유사한 복사 특성을 가진 할로겐램프를 광원으로 사용하여 태양광 대체 가능성을 검토하였다. 이를 통해 기상 조건의 불확실성을 보완하고, 향후 본 실험에서 안정적이고 반복 가능한 실험 환경을 구축하고자 하였다.



Fig. 12 experimental setup



Fig. 13 Halogen lamp



Fig. 14 Preliminary experiment



Fig. 15 temperature

4.2.1 실험 개요

실험은 2025. 6. 27.(금) 청사 옥상에서 진행하였으며, 당일 기상 조건은 흐림, 기온 25.1℃, 습도 76%, 풍속 동남동 2.7㎞이다.

4.2.2 예비 실험 결과

인공 광원인 할로겐램프를 활용하여, 태양광을 대체할 적절한 장비인지 확인하기 위한 실험이다. Fig 12와 같이 비닐하우스 구조물 내부에 실험 장치를 구성하고, 천장에는 할로겐램프를 설치하였

다. 이때, 할로겐램프의 빛은 직접적으로 조사(照射)되었으며, 집속 장치로는 볼록렌즈를 사용하였다. 이후 Fig 14와 같이 볼록렌즈를 이용하여 할로겐램프에서 발생하는 빛을 한 점으로 집속시켰으며, 집속 지점의 온도는 적외선 온도계를 통해 측정하였다.

실험 30분 후 결과, Fig 15와 같이 집속 지점의 표면 온도는 최대 약 47℃로 확인되었다. 이는 자연 태양광의 집속 온도(일반적으로 수백 도까지 상승 가능)와 비교할 때 상대적으로 낮은 수준이며, 할로겐램프 단독으로는 태양광 집속에 의한 화재 재현에 필요한 임계 온도에 도달하기 어려움을 확인할 수 있었다.

4.3 제1 실험(본 실험) - 비닐하우스의 빗물에 의한 돋보기 효과 화재 재현실험

본 실험은 비닐하우스 천장에 고인 빗물이 렌즈처럼 작용하여 태양광을 집속시킴으로써 특정 지점의 온도를 상승시킬 수 있는지, 나아가 화재의 발화 원인이 될 수 있는지를 검증하기 위한 실험이다.

실험 방법은 비닐하우스를 설치한 후 네 개의 실험 구간을 설정하여, 각각 250ml, 500ml, 1,000ml, 2,000ml의 물을 주입해 곡면 수막을 형성함으로써 광학적 볼록렌즈 형태를 구현하였다. 광원은 자연 태양광을 사용하였으며, 집속되는 위치에는 검정색 합판을 설치하였다. 이후 열화상 카메라를 활용하여 집속 지점의 온도를 측정하였다.

4.3.1 제1-1 실험 - 비닐하우스 2단 높이(지면에서 160cm)

4.3.1.1 실험 개요

실험은 2025. 7. 9.(수) 청사 옥상에서 여름철 태양고도가 가장 높은 정오에 실험하였다. 당일 기상 조건은 맑음, 기온 26.4℃, 습도 76%, 풍속 북동 2.8m/s이다.



Fig. 16 Two-tier height(160cm)



Fig. 17 250ml

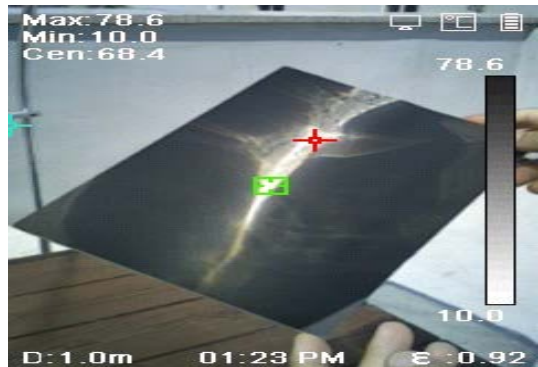


Fig. 18 500ml



Fig. 19 1,000ml



Fig. 20 2,000ml

Table 2. Experimental Results

Time	height	250ml(°C)	500ml(°C)	1,000ml(°C)	2,000ml(°C)
12:00	Two-tier	70.4	70.3	70.2	70.5
12:30		70.2	72.3	71.2	74.2
13:00		69.6	71.2	70.8	71.8
13:23		71.5	78.6	72	74.5
14:00		70.4	74.2	71.7	72.5

4.3.1.2 제1-1 실험 결과 - 비닐하우스 2단 높이

첫 번째 실험은 비닐하우스 2단 높이에서 실시되었으며, 실험 조건에 따라 구간별 물의 양을 250mL, 500mL, 1,000mL, 2,000mL로 구분하였다. 물의 양에 따라 볼록렌즈 효과로 인한 집속 형태와 온도에 차이가 발생할 것으로 가정하였으나, Table 2와 같이 시간별 측정된 온도 범위는 70℃~78℃ 수준으로 유사하게 나타났다.

이는 물의 양이 렌즈의 기능을 수행하는 데에 있어 굴절 경로나 초점 형성에 제한적인 영향을 미치며, 물방울은 일정한 곡률 범위 내에서 유사한 초점을 형성하는 경향이 있음을 의미한다. 또한, 초점의 위치는 대부분 짧은 거리에서 형성되어 바닥면까지 도달하지는 않았으나, 특정 지점에 태양광이 강하게 집중되는 현상은 일관되게 관찰되었다.

이러한 결과는 비닐하우스 외부에 맺힌 물방울이 돋보기와 유사한 집속 효과를 가질 수 있으며, 일정 조건에서는 국부적인 온도 상승을 유도할 수 있음을 보여준다. 다만, 자칫화에 이를 만큼의 임계 온도에는 도달하지 못했으며, 물의 양 변화는 광학적 초점 특성보다는 투과 면적에 제한적으로 영향을 미친 것으로 판단된다.

4.3.2 제1-2 실험 - 비닐하우스 1단 높이(지면에서 60cm)

4.3.2.1 실험 개요

실험은 2025. 7. 12.(토) 청사 옥상에서 여름철 태양고도가 가장 높은 정오에 실험하였다. 당일 기상 조건은 맑음, 기온 28℃, 습도 65%, 풍속 동남동 4.8m/s이다.



Fig. 21 One-tier height(60cm)



Fig. 22 250ml



Fig. 23 500ml



Fig. 24 1,000ml



Fig. 25 2,000ml

Table 3. Experimental Results

Time	height	250ml(°C)	500ml(°C)	1,000ml(°C)	2,000ml(°C)
12:00	One-tier	75.4	77.2	78.3	78.2
12:30		84.1	85.3	86.2	85.8
13:00		85.2	86.1	87	86.4
13:40		84.1	87.2	87	53.9
14:00		84	85	86.3	85.5

4.3.2.2 제1-2 실험 결과 - 비닐하우스 1단 높이

두 번째 실험은 비닐하우스 구조를 1단 높이로 조정하여, 태양광의 초점이 바닥 면에 직접 맺히도록 설정한 상태에서 진행되었다.

실험 결과, 물의 양에 따른 온도 변화는 유의미하지 않은 수준으로 나타났다. Table 3와 같이 시간별 측정된 온도 범위는 84℃~87℃ 사이로 유지되었으며, 물의 양이 증가함에 따라 온도가 낮아지는 경향 또한 확인되지 않았다.

1단 높이 조건에서는 초점이 바닥 면에 고정되어 형성되었고, 태양광은 특정 초점 영역에 안정적으로 집중되는 특성을 보였다. 이로 인해, 이전 2단 높이 실험과 비교했을 때 더 높은 온도 분포가 지속적으로 유지되었으며, 일부 구간에서는 화재 위험 수준의 온도(약 85℃ 이상)까지 상승하는 현상이 관찰되었다.

이러한 결과는 광학적 초점의 위치 고정이 태양광 에너지의 축적과 온도 상승에 있어 결정적인 요인으로 작용하며, 일정 조건에서는 자칫화 또는 열축적에 의한 발화 위험성도 배제할 수 없음을 확인했다.

4.4 소결론

비닐하우스 외피에 맺힌 물방울이 형성하는 광학적 볼록렌즈 효과를 통해 태양광이 국부적으로 집중될 수 있다는 가정하에, 본 연구는 비닐하우스 구조의 높이(1단, 2단)와 물의 양(250~2,000mL)에 따른 집속 온도 변화를 비교·분석하였다.

실험 결과, 2단 높이 조건(제1-1 실험)에서는 형성된 집속 초점이 바닥 면에 도달하지 못하여 온도 상승이 제한적이었으며, 온도 범위는 약 70~78℃ 범위로 관찰되었다. 반면, 1단 높이 조건(제1-2 실험)에서는 초점이 바닥에 직접 형성됨으로써 광선이 일정 지점에 안정적으로 집중되었고, 온도 범위는 84~87℃ 수준까지 상승하였다. 이는 초점의 위치가 고정될수록 열의 누적이 가능해져 화재 발생 위험성이 증가할 수 있음을 확인하였다.

또한, 실험 과정에서 태양의 자전에 따른 상(像)의 이동과 바람 등 기상 요인으로 인해 초점이 지속적으로 흔들려 충분한 축열이 이루어지기 어려움을 확인하였다. 이러한 요인은 초점의 안정성을 저해하여 집속 지점의 온도 상승을 제한적으로 만드는 중요한 변수로 작용할 수 있다.

한편, 동일한 높이 조건에서 물의 양을 변화시킨 실험에서는 온도 변화에 대한 뚜렷한 경향성이 확인되지 않았다. 250mL~2,000mL까지 구간별 물의 양을 달리하여 실험하였으나, 집속 온도는 실험 전반에 걸쳐 유사한 수준을 유지하였다.

이는 자연 상태에서 형성되는 물방울의 곡률이 일정 범위 내에서 비슷한 초점 거리와 광 집중 효과를 유도한다는 점, 그리고 물의 양이 렌즈 역할보다는 투과 면적에 제한적으로 기여한다는 점을 보여준다.

따라서 자연광 조건에서 비닐하우스 외피에 맺힌 물방울은 일정 조건에서 국소적인 고온 환경을 형성할 수 있으며, 구조물 설계 및 유지 관리 시 광학적 집속 가능성과 더불어 기상 조건에 따른 축열 한계까지 고려한 화재 예방 조치가 필요하다.

4.5 제2 실험(본 실험) - 2차 집속에 의한 화재 발생 가능성

4.5.1 실험 개요

실험은 2025. 7. 12.(토) 청사 옥상에서 여름철 태양고도가 가장 높은 정오에 실험하였다. 당일 기상 조건은 맑음, 기온 28℃, 습도 65%, 풍속 동남동 4.8m/s이다.

4.5.2 실험

본 실험은 기존 선행 연구에서 실험한 1차 집속에 의한 화재 발생 가능성 실험과 달리 1차 집속된 이후 주위 물체로 인해 2차 집속이 되어서 화재가 발생할 수 있는지를 확인하기 위한 실험이다. 실험 방법은 볼록렌즈를 이용하여 1차 집속 후 거울, 스테인리스 대야를 이용하여 2차 집속을 시킨

형태로 구성하였다. 광원은 자연 태양광이며 집속 되는 위치에 검정색 합판을 설치하여 집속을 확인하였다.



Fig. 26 Convex lens



Fig. 27 Primary concentration

Fig 26, 27과 같이 볼록렌즈를 이용해 태양광을 1차 집속하였다. 집속 결과 태양광이 볼록렌즈를 통해 1차 집속이 되고 상이 형성되는 즉시 발연하였고 국부적인 탄화 흔적으로 나타났다.



Fig. 28 Mirror



Fig. 29 Secondary concentration

Fig 28과 같이 볼록렌즈를 이용해 태양광을 1차 집속한 뒤, 거울을 이용해 태양광의 2차 집속을 형성한 결과, 에너지 손실 없이 강한 열이 국부적으로 집중되었으며, 집속 지점에서 즉시 발연 현상이 발생하였다.

Fig 29와 같이 초점 부위에는 뚜렷한 탄화 흔적이 형성되었으며, 이는 태양광이 특정 지점에 집중될 경우 발화 가능성이 실제로 존재함을 보여준다.



Fig. 30 Stainless steel bowl



Fig. 31 Temperature



Fig. 32 Temperature(~7 Minute)



Fig. 33 Temperature(~39Minute)

Fig 30과 같이 스테인리스 대야를 반사체로 활용하여 볼록렌즈를 통해 1차 집속된 태양광을 2차로 반사 및 재집속시키는 구조를 구성하였다. 온도는 시간에 따른 변화를 고려하여 열화상 카메라로 측정하였으며, Fig 31~33은 각각 1차 집속 직후, 약 7분 경과 시점, 약 39분 경과 시점의 온도를 보여준다. 그러나 실험 결과, 온도의 상승 폭은 제한적이었으며 전체적으로 큰 차이는 나타나지 않았다. 이는 2차 집속 과정에서의 에너지 집중 효율이 낮았음을 시사한다.

또한 실험 도중 상(光像)의 위치가 일정하지 않고 이동하는 현상이 관찰되었는데, 실험 시점인 13:19경~13:58경 사이 태양의 자전에 따른 입사각 변화에 기인한 것으로 판단되며, 볼록렌즈를 통해 집속된 빛이 스테인리스 표면의 곡률 및 미세한 표면 요철이 반사각의 불규칙성을 유발하였고 결과적으로 집속 효과를 감소시켜 이로 인해 집속 에너지가 저해했을 가능성이 있다.

4.6 소결론

본 실험에서는 볼록렌즈를 이용한 1차 집속 후, 반사체를 활용한 2차 집속 구조를 통해 태양광의 에너지 집중 효과와 화재 유발 가능성을 비교 분석하였다.

거울을 반사체로 사용할 경우, 입사된 빛이 평면적으로 반사되어 집속 에너지의 손실 없이 목표 지점에 집중되었으며, 이로 인해 즉각적인 발연 현상과 국부적인 탄화 흔적이 관찰되었다. 이는 반사면의 평탄성과 반사율이 높을수록 에너지 전달 효율이 향상됨과 2차 집속에 의한 에너지 손실이 없음을 보여준다.

반면, 스테인리스 대야를 반사체로 사용한 경우, 표면 곡률 및 미세한 요철로 인해 난반사가 발생하였고, 이로 인해 에너지 집중도가 낮아졌다. 그 결과, 온도 상승은 있었으나 임계 온도에 도달하지 못했으며, 화재 유발로 이어지는 수준의 열 집중은 관찰되지 않았다. 또한 태양의 일주 운동에 따른 입사각 변화로 인해 상의 위치가 지속적으로 이동하면서 에너지 집중의 안정성이 떨어지는 경향도 나타났다.

이러한 결과는 2차 집속 구조에서의 반사체 선택이 에너지 집중 효율과 화재 발생 가능성에 직접적인 영향을 미친다는 점을 보여준다. 특히, 고반사율과 평면 구조를 가진 반사체는 화재 위험성을 증가시킬 수 있으므로 설치 및 사용 시 주의가 필요하다.

5 결 론

5.1 연구 결과

본 연구는 태양광 집속이 국부적인 온도 상승을 유발하여 화재로 이어질 가능성을 검증하기 위해 인공광과 자연광을 활용한 다양한 실험을 수행하였다.

실험 결과, 볼록렌즈와 거울과 같은 인위적 광학 구조물은 태양광을 안정적으로 초점에 모아 즉각적인 발연과 국부적인 탄화 흔적을 유발할 수 있음을 확인하였다. 특히 거울을 이용한 2차 집속 구조에서는 에너지 손실 없이 태양광이 집중되어 발화 가능성을 확인하였다. 반면 스테인리스 대야와 같이 곡면을 가진 반사체는 난반사로 인해 에너지 집중도가 떨어지고 초점의 이동성이 커 발화에는 이르지 못하였다.

비닐하우스 실험에서는 빗물 고임이 볼록렌즈 역할을 하여 일정 조건에서 국부적인 온도 상승을 확인하였다. 그러나 초점이 바닥에 고정되지 않는 2단 구조에서는 온도 상승이 제한적이었고(70~78℃), 발화 온도에 도달하지 못하였다. 반면 초점이 바닥 면에 안정적으로 형성되는 1단 구조에서는 84~87℃까지 온도가 상승하여 잠재적 위험성이 확인되었다. 하지만, 이 역시 가연물의 착화온도(200℃ 이상)에는 도달하지 못했다.

실험 전반에 걸쳐 물의 양 변화(250~2,000mL)는 집속 온도에 뚜렷한 영향을 주지 않았으며, 이는 자연적으로 형성되는 물방울의 곡률이 일정 범위 내에서 유사한 초점 거리와 광 집중 효과를 가지기 때문으로 판단된다. 또한 태양의 자전에 따른 초점 이동과 바람 등 기상 요인으로 인해 초점

이 지속적으로 흔들려 축열이 어렵다는 점도 확인하였다. 이러한 요인들은 집속 지점의 온도 상승을 제한적으로 만드는 중요한 변수로 작용하였다.

종합적으로, 태양광은 발화를 유발할 수 있는 충분한 에너지를 지니고 있으나, 집속 구조의 재질과 형상, 초점의 안정성, 태양의 위치 및 기상 조건 등 다양한 요인에 의해 실제 발화 여부가 결정됨을 확인하였다.

다만, 본 연구는 자연광을 활용한 제한된 조건에서 수행되었으며, 계절별 태양고도 변화, 다양한 기상 조건과 재질의 반사체와 구조물 등 모든 변수를 포함하지 못했다는 한계가 있다. 따라서 향후 연구에서는 계절과 날씨, 반사체의 재질과 형상 등 보다 다양한 환경 조건을 고려한 후속 연구가 필요하다.

5.2 화재감식기법 제안

태양광 집속에 의한 발화 가능성을 정확하게 판단하기 위해서는 화재 조사 단계에서 다음과 같은 사항을 체계적으로 검토해야 한다.

- 1) 발화지점 주변에 볼록 유리, 반사 거울, 스테인리스 재질, 유리병, 투명 플라스틱, 빗물 고임 구조 등과 같은 광학적 구조물이 존재하는지를 면밀히 조사한다. 특히 비닐하우스, 온실, 대형 유리창, 실외 차량 및 금속 용기 등은 태양광 집속 경로에 위치할 가능성이 높으므로 발화 가능성을 염두에 두고 집중적으로 확인할 필요가 있다.
- 2) 화재 발생 시각과 태양의 고도를 분석하여 발화지점으로 태양광이 입사될 가능성을 평가한다. 이때 발화지점 주변 구조물의 위치와 형태를 함께 고려하여 태양광이 특정 지점으로 집중될 수 있었는지를 종합적으로 검토한다.
- 3) 태양광 집속에 의한 발화는 일반적인 전기적 발화나 연소 확산과는 달리 국부적인 탄화 흔적과 작은 열 중심점을 가지는 특징을 보인다. 초점이 고정된 듯한 작은 원형 탄화 영역이나 국소적인 발연 흔적이 발견될 경우 태양광 집속 가능성을 우선적으로 고려해야 한다.
- 4) 반사체의 표면 상태를 조사하여 반사율과 반사 특성을 파악한다. 반사면이 매끄럽고 평탄할수록 집속 강도가 강해질 수 있으며, 반대로 곡면이나 요철이 있는 반사체는 집속 효율이 낮아질 수 있다.
- 5) 실외 구조물에서 발생한 화재의 경우 태양의 움직임에 따라 광 초점이 특정 지점에 지속적으로 머물렀는지를 분석한다. 이를 통해 집속된 열의 축적 가능성을 평가할 수 있다.

이와 같이 발화지점 주변의 구조물, 태양광 조건, 탄화 양상, 반사체 특성 및 초점의 이동성을 종합적으로 분석함으로써 태양광 집속에 의한 화재 가능성을 보다 정확히 규명할 수 있을 것이다.

참고문헌

- 1) 이승훈, “태양광 수렴에 의한 화재위험성”, 한국화재보험협회, 2020.
- 2) 김현기 외 2명, “스테인리스강의 돋보기 효과에 의한 화재 연구,” 한국화재조사학회 학술대회지, Vol. 2017 No. 04, pp. 43-63, 2017.
- 3) 삼척소방서 “태양광선의 집속에 의한 가연물 착화 및 온도상승에 따른 발화위험성 측정 실험”, 2012.
- 4) 청주서부소방서 최종명 외 1명, “수렴화재 사례연구”.
- 5) 강진소방서 박원철 외 1명, “농촌에서 발생한 자연발화 및 수렴화재에 관한 연구”.
- 6) 부산소방재난본부, “캣타워 투명해먹 돋보기효과 화재 재현실험 결과”, 2024.
- 7) 이승훈 “화재조사 이론과 실무”, pp. 481-482



제 4 장 | 설악권



☑ 광역화재조사 1팀 >>>

태양광 1차·2차 집속에 의한 화재 발생 가능성 연구

☑ 광역화재조사 2팀 >>>

발화지점 판정 시 인공지능(AI) 활용 가능성에 관한 연구

☑ 광역화재조사 3팀 >>>

하이라이트 전기레인지 화재 패턴에 관한 연구

발화지점 판정 시 인공지능(AI) 활용 가능성에 관한 연구

김지원¹⁾, 이건희, 정철영, 이단비

강원특별자치도 소방본부 설악권광역화재조사 2팀

A Study on the Possibility of Using Artificial Intelligence (AI) in Determining the Point of Ignition

Ji-Won Kim[†], Geon-Hui Lee, Cheol-Yeong Jeong, Dan-Bi Lee

Seolak Wide Area Fire Investigation Team 2, Gangwon State Fire Headquarters

ABSTRACT

The fundamental purpose of fire investigation is to clearly determine the cause of the fire. Fires can occur due to a variety of causes, and each type of fire exhibits unique characteristics. Fire investigators utilize physical evidence and scientific methods to identify the point of origin and the path of the fire, analyzing how the fire started and how it spread.

This study aims to explore not only the investigator's experience and visual analysis in determining the point of origin—the starting point of a fire—but also how artificial intelligence (AI), which has recently been applied across various industries due to technological advancements, can analyze scene photographs to provide objective information for point-of-origin determination and how this information can be effectively utilized.

Key Words : The starting point of a fire, Artificial intelligence

1 서론

1.1 연구배경

최근 인공지능(AI) 기술은 전 세계적으로 폭발적인 성장을 이루며 업무, 문화, 산업 전반에 걸쳐 광범위하게 활용되고 있다. 2025년 3월 기준 전 세계 AI 도구 사용자는 약 3억 7,800만 명으로 전년 대비 20% 증가하였으며, 챗GPT는 누적 가입자 수 5억 명을 돌파하였다.

현재 전 세계적으로 하루 약 1억 8,000만 명이 생성형 AI를 사용하고 있으며, 주요 AI 서비스들은 하루 평균 1,020억 건의 질문을 처리하는 것으로 추정된다. 이처럼 AI는 업무 생산성 향상을

1) E-mail : soleid78@korea.kr

넘어 대중문화와 개인의 일상까지 깊숙이 스며들며 필수 도구로 자리매김하고 있다.

이에 우리는 AI를 화재 조사 분야에 활용할 수 있는 방법을 모색해 보았고 AI의 광범위한 데이터와 분석기술을 발화지점 판정에 적용할 수 있을 것으로 판단하였다.

발화지점 판정은 화재 원인 규명과 피해 확산 경로 분석의 핵심 요소임에도 불구하고, 현재까지는 조사관의 경험과 시각적 분석에 크게 의존하고 있다.

이에 따라 동일한 화재 현장을 조사하더라도 조사관에 따라 발화지점 판정 결과가 다르게 나타나는 등 주관성이 크게 작용한다.

AI 기술은 방대한 데이터를 기반으로 높은 정확성과 객관성을 확보할 수 있다는 점에서 이러한 한계를 극복할 잠재력을 가지고 있다. 최근의 생성형 AI와 이미지 분석 기술의 발전은 복잡한 화재 현장의 패턴 분석과 데이터 기반의 객관적 발화지점 판정을 가능하게 할 수 있다. 이에 따라 AI를 활용한 화재 조사 기법의 개발은 조사 결과의 신뢰성을 향상하고, 조사관의 판단 편차를 줄이는 데 이바지할 수 있을 것으로 기대된다.

1.2 연구 목적

본 연구는 인공지능(AI) 기술을 화재 조사 분야에 적용하여 발화지점 판정의 정확성과 신뢰성을 향상하는 것을 목적으로 한다. 기존의 발화지점 판정은 조사관의 경험과 시각적 분석에 크게 의존하여 주관적 편차가 발생할 가능성이 높았으며, 동일한 화재 현장에 대해서도 조사관마다 판정 결과가 다르게 나타날 수 있었다. 이에 본 연구는 AI의 대규모 데이터 분석 능력과 이미지 인식 기술을 활용하여 화재 현장의 패턴을 체계적으로 분석하고, 데이터 기반의 객관적인 발화지점 판정 기법을 개발하고자 한다.

또한, 본 연구를 통해 AI를 활용한 자동화된 발화지점 분석 시스템의 가능성을 검증하고, 조사관의 경험적 판단과 병행할 수 있는 보조 도구로서의 활용 방안을 제시함으로써 화재 조사 결과의 신뢰성 제고 및 조사 효율성 향상에 이바지하고자 한다.

2

이론적 배경

2.1 화재조사

화재조사는 화재원인, 피해상황, 대응활동 등을 파악하기 위하여 자료의 수집, 관계인 등에 대한 질문, 현장 확인, 감식, 감정 및 실험 등을 하는 일련의 행위이며 화재 조사관은 화재조사에 전문성을 인정받아 화재조사를 수행하는 소방공무원을 말한다.

화재 조사관의 주요 업무는 다음과 같다.

1. 화재원인에 관한 사항
2. 화재로 인한 인명·재산피해상황
3. 대응활동에 관한 사항
4. 소방시설 등의 설치·관리 및 작동 여부에 관한 사항
5. 화재발생건축물과 구조물, 화재유형별 화재위험성 등에 관한 사항
6. 그 밖에 대통령령으로 정하는 사항

또 화재 조사와 관련된 용어를 살펴보면 다음과 같다.

1. "발화"란 열원에 의하여 가연물질에 지속적으로 불이 붙는 현상을 말한다.
2. "발화열원"이란 발화의 최초 원인이 된 불꽃 또는 열을 말한다.
3. "발화지점"이란 열원과 가연물이 상호작용하여 화재가 시작된 지점을 말한다.
4. "발화장소"란 화재가 발생한 장소를 말한다.

2.2 인공지능(AI)

인공지능(artificial intelligence, AI)은 인간의 학습능력, 추론능력, 지각능력을 인공적으로 구현하려는 컴퓨터 과학의 세부 분야 중 하나이다. 정보공학 분야에 있어 하나의 인프라 기술이기도 하다. 인간을 포함한 동물이 갖고 있는 지능 즉, 자연지능(natural intelligence)과는 다른 개념이다.

인간의 지능을 모방한 기능을 갖춘 컴퓨터 시스템이며, 인간의 지능을 기계 등에 인공적으로 시연(구현)한 것이다. 일반적으로 범용 컴퓨터에 적용한다고 가정한다. 이 용어는 또한 그와 같은 지능을 만들 수 있는 방법론이나 실현 가능성 등을 연구하는 과학 기술 분야를 지칭하기도 한다.

인공지능(AI)은 현대 기술의 핵심으로 다양한 분야에서 혁신을 이끌고 있다. 이 중 생성형 AI와 추론형 AI는 대표적인 두 가지 유형으로 각기 다른 기능과 목적을 가지고 있다.

2.2.1 생성형 AI

생성형 AI는 새로운 정보를 생성하거나 예측하는 데 주로 사용되는 기술이다. 이는 GAN(Generative Adversarial Network)과 같은 딥러닝 알고리즘을 사용하여 학습 데이터를 바탕으로 새로운 결과물을 만들어낸다. 예를 들어, 생성형 AI는 기존 이미지를 학습하여 새로운 이미지를 생성하거나, 텍스트를 학습하여 새로운 문장을 만들어낸다.

이러한 기술은 게임 디자인, 예술, 음악 생성 등 다양한 분야에서 활용되고 있고, 생성형 AI 기술을 활용해 AI 아티스트, 크리에이터와 같은 신종 직업들도 생겨났다. 올해는 Chat GPT, 미드저니, 스테이블 디퓨전 등이 주도한 생성형 AI의 전성시대라고 해도 과언이 아니었다. 생성형 AI 기

술의 경우, 사용자는 AI 기술을 습득하지 않더라도 기능적인 측면만 잘 익힌다면 누구나 활용할 수 있다는 장점이 있다. 따라서, 생성형 AI 기술을 활용하는 사용자는 공급자도 될 수 있고, 수요자도 될 수 있다.

2.2.2 추론형 AI

추론형 AI는 주어진 데이터를 바탕으로 패턴을 찾아내고 예측하는 데 사용된다. 이는 데이터 분석, 패턴 인식, 의사결정 지원 등 다양한 분야에서 활용된다.

추론형 AI의 가장 큰 장점은 정확도와 신뢰성이다. 예를 들어, 의료 분야에서는 AI를 활용하여 질병을 진단하거나, 금융 분야에서는 주식 시장의 트렌드를 예측하는 데 사용된다. 즉, 다양한 산업 분야에 적용하도록 B2B 솔루션 형태로 제공된다. 따라서, 추론형 AI 기술은 공급자와 서비스를 이용하는 수요자가 명확하게 구분된다고 할 수 있다.

2.2.3 생성형 AI와 추론형 AI의 차이점

생성형 AI와 추론형 AI의 가장 큰 차이는 '데이터를 생성하는가' vs '데이터를 해석하는가'에 있다.

생성형 AI는 학습 데이터를 바탕으로 새로운 데이터를 생성하는 반면, 추론형 AI는 주어진 데이터를 바탕으로 패턴을 찾아내고 예측한다. 이에 따라서, 생성형 AI 기술은 지속적으로 AI 아티스트, 크리에이터를 포함해 일반인들도 진입장벽 없이 활용할 수 있는 기술이고, 추론형 AI 기술은 의료, 금융, 법률 등 다양한 산업분야에서 서비스를 공급하는 공급자와 서비스를 이용하는 수요자로 구분되어 이용된다는 차이가 있다.

2.2.4 대표적인 생성형 AI 모델

생성형 AI의 대표적인 모델과 각 모델들의 강점 및 약점은 Table 1. 과 같다.

Table 1. Types of Generative AI models

구분	내용	주요 내용
챗GPT ChatGPT	강점	• 대규모 언어 모델(LLM)에 강해, 자연스러운 자연어 기반 대화 및 다양한 목적(텍스트 생성, 번역, 코드 작성 등)에 활용 • '추론에 강한 AI', '검색에 강한 AI' 등 다양한 모델 선택 • 한눈에 알아볼 수 있는 인터페이스로 초보자 이용 • 꾸준한 데이터 업데이트로 최신 트렌드 반영 • 나만의 GPT 커스텀 및 배포
	약점	• 환각 현상(할루시네이션)에 대한 가능성 • 한국어 데이터 학습 부족

구분	내용	주요 내용
퍼플렉시티 Perplexity	강점	- 검색 증강 생성(RAG) 기반 AI로, 실시간 웹 검색에 강점이 있어 다른 AI에 비해 정확한 답변 제공 - 출처 인용으로 답변의 신뢰도가 높음 - 학술 및 연구 작업에 최적화되어 있다는 평가 - 요청 사항을 처리하기 위한 작업 과정을 보여줌
	약점	- 창의적인 답변을 요구하는 작업에 미 적합 - 검색과 요약에 초점이 맞춰져 있어, 연속적인 대화나 맥락 유지 기능이 떨어짐 - 텍스트, 이미지, 오디오 등 여러 데이터를 함께 고려해 답변하는 '멀티모달 기능' 부재
클로드 Claude	강점	- 수십만 단어에 달하는 긴 문서를 한 번에 요약·분석 가능 - 다른 AI에 비해 환각 현상이 적음 - 안전성과 윤리적 사용에 중점 - 이미지 분석 등 멀티모달 기능 - 코딩에 특화된 톨
	약점	- 챗GPT에 비해 창의적인 답변에 한계 - 데이터 크기가 커질 수록 응답 속도가 상대적으로 느림
제미니 Gemini	강점	- 구글 생태계와 연동되어 있어 접근과 사용이 쉬움 - 다양한 구글 제품 내에서 즉각 사용 가능 - 텍스트·이미지·비디오 등 다양한 데이터를 이해하고 만들 수 있는 멀티모달 기능 기반 - 갤럭시 유저의 접근성
	약점	- 한국어 지원의 상대적 부족 - 대용량 문서를 처리할 경우 속도가 느려지고 요약이 누락
노트북LM NotebookLM	강점	- 사용자가 업로드한 문서를 기반으로 질의응답이 가능해 답변의 신뢰도가 높음 - 환각 현상이 비교적 덜 일어남 - 구글의 다양한 문서를 자동으로 연결 - 어려운 외국어 논문도 쉽게 한국어 팟캐스트로 변환
	약점	- 한국어 지원의 상대적으로 부족 - 대용량 문서를 처리할 경우 속도가 느려지고 요약이 누락

2.3 선행연구 검토

화재 분야에서 AI를 활용한 사례가 몇 가지 있는데 우선 건물 내 전기 사용량, 온도·습도, 과거 화재 이력 등을 AI로 분석하여 화재 가능성을 사전에 예측하는 것으로 데이터를 기반으로 한 화재 위험을 예측하는 것이다.

그 예로는 스마트 빌딩에서 센서 데이터를 실시간 분석해 위험 구간을 파악하는 것이다. 다음으

로 위성 영상과 기상 데이터를 학습시켜 산불 발생 가능성과 확산 경로를 예측하는 산불 확산 예측 모델이다.

또 CCTV나 드론 영상에서 연기·불꽃 패턴을 AI가 분석해 조기 감지하는 영상 기반 화재/연기 인식모델, IoT 센서와 AI를 결합해 비정상적인 온도 상승, 가스 누출, 전기 불꽃(아크) 감지하는 스마트 센서 연계 모델, 건물 구조와 화재 초기 데이터를 입력해 화재 확산 경로와 시간 예측, 소방관의 진입 경로, 대피 유도 등에 활용하는 화재 확산 시뮬레이션 모델, 화재 현장에 투입된 드론 영상 분석으로 인명 위치, 구조 우선순위 결정하는 드론·로봇 AI 분석 모델, AI가 실시간 데이터를 분석해 폭발 위험물질 여부를 파악하는 연기·가스 조성 분석 모델 등이 있다. 하지만 본 실험과 유사한 연구 사례는 없었으며 우리는 본 연구를 통해 화재조사 분야에 AI를 활용할 수 있는지 알아본다.

3 재현실험 및 결과분석

3.1 실험 개요

본 실험에서는 현재 사람들이 가장 많이 사용하는 AI 모델인 챗GPT를 이용하여 실험을 진행한다. 챗GPT는 유료와 무료 버전이 있으며 응답 속도나 사용량 한도에 제한이 적은 유료 버전을 사용하고 이 외 실험을 위한 장비나 시료는 없다.

실제 다양한 화재 현장에서 촬영된 사진을 챗GPT에 업로드하여 여러 가지 실험을 진행할 것이며 이번 연구에서 우리의 가설은 ‘AI는 사진과 부가 정보를 활용 및 분석하여 해당 이미지에 대한 연소 방향성과 손상 정도를 파악할 수 있으며 화재조사관은 이를 발화지점 판정에 활용할 수 있다’이다.

이를 위해 4가지의 실험을 진행하였으며 각 실험내용은 Table 2와 같다.

Table 2. Step-by-step experiment content

구 분	내 용
1 실험	개별 사진에 대한 분석
2 실험	화재 현장의 사진정보만 제공 후 챗GPT 발화지점 분석
3 실험	화재 현장의 사진 외 관계자 진술, 현장 여건 등 추가 정보를 제공하여 챗GPT 발화지점 분석
4 실험	동일한 화재 현장 사진에 대한 화재조사관과 챗GPT의 분석 비교

3.2 (제1 실험) 개별 사진에 대한 분석

3.2.1 실험 방법

챗GPT에 각각의 낱장 사진을 업로드하여 해당 사진에 대한 화재 패턴 및 연소 확대 방향성에 대해 분석해 본다.

화재 현장에서는 여러 지점과 다양한 각도에서 사진을 촬영하여 이를 분석하고 연계하여 발화지점에 대한 정보를 추출하지만, 이번 실험에서는 단 한 장의 사진만을 제공하여 해당 사진만을 어떻게 받아들여 해석하는지 알아본다.

총 4장의 사진을 업로드하여 실험을 진행하였다.



Fig. 1 Indoor combustion photographs of houses



Fig. 2 Burn photo outside the building



Fig. 3 a photograph of the burning of a wooden building



Fig. 4 Photo of burning inside the building

3.2.2 실험 결과

3.2.2.1 Fig. 1의 챗GPT 분석 내용

1. 주요 화재 패턴 분석

가. V자 패턴

- 1) 벽면(책상 위, 커튼 부근)에서 천장 쪽으로 전개되는 뚜렷한 V자형 탄화 흔적이 관찰됨.
- 2) 특히 모니터 좌측 상단 벽체에서 형성된 V자 흔적은 발화 지점의 유력한 단서.

나. 천장 탄화 및 박리(Peeling)

- 1) 천장 전체적으로 열에 의한 강한 손상이 있으며, 그 중 왼쪽 상단(사진 기준) 벽-천장 경계 부위에서 가장 깊고 넓은 탄화 및 박리 현상 발생.
- 2) 이 지점의 천장에서는 심한 박리 현상과 함께 상부 구조재까지 노출되어 있어, 가장 높은 열 영향을 받았음을 시사함.

다. 커튼 손상

: 오른쪽 창가의 커튼은 일부 타거나 녹은 흔적이 있으며, 이는 불꽃 또는 열에 의해 점차 확대된 흔적으로 보임.

2. 연소 확대 방향성 추론

: 초기 발화는 책상 뒷벽 좌측 상단에서 시작되었고 수직 방향(벽을 따라 천장)으로 확산된 후 천장을 따라 우측(커튼과 창 쪽)으로 수평 확산된 것으로 판단됨.

3. 화재조사관으로서의 의견

: 해당 사진에서는 명확한 V자 패턴, 집중된 탄화 중심, 열기류의 확산 흔적, 그리고 천장 박리 중심의 위치를 바탕으로, "책상 좌측 상단 벽체와 천장 경계 지점이 발화지점일 가능성이 높고, 이후 화재는 천장을 따라 우측으로 확산되었으며, 커튼과 창가로 열기류가 이동하면서 추가 연소가 확대된 것으로 판단됨."

3.2.2.2 Fig. 2의 챗GPT 분석 내용

1. 주요 화재 패턴 분석

가. 좌측 벽면(금속 패널 및 우측 흰색 패널 경계 부분)

- 1) 심한 열 변색 및 탄화 흔적 존재
- 2) 벽면 중앙 하부에서 상부로 연소 흔적이 퍼져 있는 V 패턴 식별됨.
- 3) 전기 패널과 그 하부의 금속함 부근에 심한 국부 손상이 확인됨.

나. 중앙 출입구(검게 탄 출입문 상부)

- 1) 출입구 상단과 주변 벽체는 열과 연기로 인한 그을림이 심하며 Flame Plume 흔적이 있음.
- 2) 출입구 안쪽 공간은 가장 심각한 손상으로 보이며 내부는 전소 상태로 판단됨.

다. 우측 공간(발전기 부근)

- 1) 상대적으로 열 손상이 약함.
- 2) 내부 정리 상태로 미루어 연소 확대 방향의 반대편으로 판단 가능함.

2. 연소 확대 방향성 추론

- 가. 좌측 → 우측 또는 내부 공간 → 외부 방향으로 연소 확대된 것으로 판단됨.
- 나. 좌측 벽체의 심한 V 패턴 및 벽체 중심 하부에서 상부로 연소 흔적
- 다. 출입구 상단 그을음 흔적은 내부에서 발생한 화염이 외부로 확산되었음을 시사함.
- 라. 우측 공간은 연소 피해가 덜함.

3. 발화지점 가능 영역

- 가. 가장 유력한 초기 발화지점은 사진 기준으로 좌측 벽면 하부 전기 설비 인근 또는 출입구 내부 공간임.
- 나. 전기 설비 하부의 국부적 탄화 흔적은 발화 가능성이 높은 전기적 발화의 흔적일 수 있음.
- 다. 다만 내부 공간(출입문 안쪽)이 전소 상태라면 해당 공간이 발화지점일 가능성도 배제할 수 없음.

3.2.2.3 Fig. 3의 챗GPT 분석 내용

1. 주요 화재 패턴

- 가. 중심부 강한 탄화와 소실
 - : 정면 벽체 중앙 부분(원형 모양 벽장 하부 포함)은 심한 탄화 및 벽 마감재가 완전히 벗겨진 상태로, 가장 높은 열에 노출된 지점임.
- 나. V 패턴
 - : 정면 벽체의 타원형 구조물 하부에서 상단으로 전형적인 V자 모양의 탄화 확산이 보임. 이는 발화지점에서 위로 불길이 상승한 흔적일 가능성이 높음.
- 다. 동심형 탄화 흔적
 - : 해당 중심부 주변 바닥부의 방사형 탄화 흔적은 열원이 그 지점에 머물렀을 가능성을 시사함.
- 라. 건축재의 전면적 소실
 - : 지붕의 서까래 일부까지 연소가 진행되었고, 좌측 내부 공간보다 우측 정면이 더 높은 온도에 장시간 노출된 흔적이 있음.

2. 연소 확대 방향성

- 가. 초기 연소는 정면 벽체 중앙 하단에서 시작하여 수직 상승 후 양측으로 확대된 양상을 보임.
- 나. 좌측 실내공간(문 안쪽)의 연소 정도는 상대적으로 약하며, 검게 그을림은 있지만 격렬한 연소 흔적은 적음.
- 다. 반면 정면 벽체와 우측 외벽 및 처마 부위는 전소에 가까운 상태로, 연소가 외부 지붕까지 퍼졌음을 보여줌.
 - ➡ 따라서 연소 확대 방향은 사진 기준 정면 중심부에서 위로, 그리고 좌우 및 외부 지붕 쪽으로 진행된 것으로 판단됨.

3.2.2.4 Fig. 4의 챗GPT 분석 내용

1. 주요 화재 패턴 및 흔적 분석

가. 그을음 집중 부위

: 가스레인지 상단 벽면에서 시작되어 천장 쪽으로 길게 확산된 수직형 탄화 패턴이 보이고, 이는 V 패턴의 변형으로 연소 기류가 위로 빠르게 상승한 지점을 나타냄.

나. 최심부 탄화 흔적

: 벽면 일부가 완전히 그을리고 목재 부위는 깊게 탄화되어 있음. 이 부위가 가장 고온에 장시간 노출된 지점으로 보임.

다. 탄화 방향

: 수직으로 위로 퍼졌고, 좌우로의 연소 확산 흔적은 뚜렷하지 않음. 이는 열이 집중된 지점에서 천장 방향으로 급속한 연소 확대가 일어났다는 것을 시사함.

라. 그을음 농도 비교

: 주변 가전제품, 냉장고, 벽면 등은 상대적으로 손상과 그을음이 적음 → 국소적 발화 후 확대되지 않은 초기 진화 가능성 존재함.

2. 연소 확대 방향성 판단

가. 발화지점으로부터 상방(천장) 방향으로 연소 확대되었으며, 다른 방향(좌우 혹은 전방)으로의 뚜렷한 확산 흔적은 관찰되지 않음.

나. 따라서 이 사진만으로는 확산 진행은 제한적이며, 대부분의 열 피해가 벽면과 천장 사이의 국소 범위에 집중되었음을 확인할 수 있음.

3.2.3 결과 분석

상기 실험에서 4장의 사진을 챗GPT에게 분석 요청한 결과 사진 속 각 가연물의 형태와 명칭, 연소 지점과 미연소 지점을 구분할 수 있는 것으로 보인다. 또한 탄화, 박리, V 패턴 등 화재 조사와 관련된 용어를 적절하게 사용하였고 건축물의 구조나 구조재에 관해서도 일부 확인 가능하였다. 무엇보다도 불이 지나간 흔적과 그로 인해 발생한 가연물의 소실, 탄화, 그을음 등을 통하여 연소 방향성을 이끌어내고 어두워서 확인이 잘 안되거나 미세한 손상 등 사람의 눈으로 확인이 어려운 부분까지 확인 및 분석하는 점을 통해서 충분한 활용성이 있음을 알 수 있었다.

3.3 (제2 실험) 화재 현장의 사진정보만 제공 후 챗GPT 발화지점 분석

3.3.1 실험 방법

단일 건의 실제 화재 현장에서 촬영된 다수의 사진을 챗GPT에 업로드한다. 사진은 화재 현장에 서 화재 조사관이 조사를 위해 촬영하고 보고서에 첨부한 사진으로 연소 및 미연소 구역 등 발화지

점 판정을 위해 필요한 사진이다. 한 장의 사진에 비해 여러 지점에 대한 화재 조사관의 시점으로 촬영한 사진으로 이 사진들을 연계하여 발화지점 분석을 위해 어떠한 결론을 도출하는지 알아본다.



Fig. 5 a photograph of a house kitchen burning



Fig. 6 a photograph of the burning of the front door of a house



Fig. 7 House Living Room Burn Photo 1



Fig. 8 House Living Room Burning Photo 2



Fig. 9 House Living Room Burn Photo 3



Fig. 10 House living room combustion photo 4

3.3.2 실험 결과

3.3.2.1 분석 내용

1. 화재현장 전반적 관찰조건

- 가. 주택 내부 전체가 심하게 연소되었으며, 천장 및 벽체 전반에 걸쳐 열흔과 연소 잔해가 확인됨.
- 나. 출입문 주변 및 주방은 연소흔이 존재하나, 발화부 특유의 집중적 열손상(Localized Intense Heat Damage)은 확인되지 않음.
- 다. 거실 부근에서 가장 강한 열손상과 집중적 연소흔이 관찰됨.

2. 화재패턴 분석

- 가. 주방(Fig. 5)
 - 1) 상부장 및 천장부 손상이 심하나, 하부 캐비닛 및 바닥면에 발화특유의 집중 탄화흔이 없음.
 - 2) 열흔이 천장으로 퍼진 형태로, 발화부의 가능성보다는 연소확대 경로로 판단됨.

나. 출입문 주변(Fig. 6)

- 1) 벽체 손상이 존재하나 열손상 강도는 상대적으로 낮음.
- 2) 화염 유입 또는 연소 확대 흔적에 해당하며, 발화부 가능성은 낮음.

다. 거실 (Fig. 7~10)

- 1) 거실 중앙부 벽면 하단~중앙부에 집중적 열손상과 강한 탄화흔 존재.
- 2) 해당 벽면을 중심으로 상향식 열흔과 V패턴이 명확히 형성됨.
- 3) 천장부 손상 또한 동일 지점을 기점으로 방사형으로 확산된 양상이 뚜렷함.
- 4) 바닥면 연소흔은 열낙하(Hot Debris)로 인한 2차 손상으로 판단됨.

3. 발화부 추정 및 근거

가. 발화부 추정

: 발화부는 거실 중앙부 벽면 하단~중앙 부근으로 추정됨.

나. 근거

- 1) 열손상 강도 및 집중성 : 해당 지점 벽체의 탄화 깊이 및 변색이 가장 심하며 주변부로 확산되는 열흔이 관찰됨.
- 2) V패턴의 기점 : 거실 중앙부 벽체를 기점으로 명확한 V형 열흔이 상방으로 확산됨.
- 3) 연소 확산 방향성 : 주방 및 출입문 방향으로 열흔이 퍼진 양상이 확인되며, 이는 해당 벽면에서 화염이 최초 형성된 이후 주변으로 확산된 것으로 판단됨.

3.3.3 결과 분석

전반적으로 체계적이고 전문적인 수준으로 분석한다. 화재장소의 각 지점별로 연소 강도를 구분하여 분석하고 관찰 소견 → 화재 패턴 분석 → 발화부 추정 및 근거의 3단계로 명확히 구분되어 있고 논리적인 전개가 명확하다. ‘집중적 열 손상’, ‘상향식 열흔’, ‘V 패턴’ 등 용어를 사용하여 전문성을 갖추었다고 볼 수 있으며 ‘가능성이 낮음’, ‘추정됨’과 같이 확정적 단어 대신 조심스러운 표현을 사용하며 실제 화재 조사관의 표현 방식과 유사하게 작성되면서 신뢰성을 높였다. 하지만 조사 결과만 나열하는 경향이 있어 문장이 다소 딱딱하고 단락별 연결성이 약하다.

3.4 (제3실험) 화재 현장의 사진 외 관계자 진술, 현장 여건 등 추가 정보를 제공하여 챗GPT 발화지점 분석

3.4.1 실험 방법

상기 제2 실험(화재 현장의 사진정보만 제공 후 챗GPT 발화지점 분석)에 화재 조사관이 현장에서 수집한 진술 내용과 주요 감식물에 대한 정보 등 추가 정보를 업로드하여 사진만 제공하여 분석한 내용과 얼마나 달라지는지, 분석 내용의 방향이 변화하는지 등을 알아본다.

추가 정보는 다음과 같다. ‘최초 신고자, 목격자 김소방은 19:30경 202호에 도배 벽지를 마르게 하려고 등유 난로를 켜놓고 3층 집에서 식사하던 중이었으며 21:48경 식사 중 경보기 소리를 듣고 202호로 내려와 보니 연기가 가득 차 있는 상태라 환기 후 119에 신고함. 등유 난로는 전일 도배 한 벽지를 말리기 위해 202호의 창문을 모두 닫은 후 19:30경부터 21:30경까지 약 2시간가량 사용함.’

3.4.2 실험 결과

3.4.2.1 챗GPT 추가 분석 내용

제공된 진술 내용과 현장 사진을 종합하면, 신고자 진술과 현장 감식 소견이 서로 일치하며 등유 난로에서의 발화 가능성이 높습니다.

1. 근거 정리

가. 현장 정황

: 거실 좌측 벽면(등유 난로 위치) 주변에 가장 심한 열 손상, 탄화, 천장 열 파손이 관찰됨. 열 중심점이 난로 주변으로 집중돼 있고, 벽지·천장재가 상향으로 크게 연소된 점은 열원이 고정되어 장시간 작동했을 가능성을 뒷받침함.

나. 진술과 일치

: “도배 벽지를 말리기 위해 등유 난로를 켜두었다”라는 진술은 해당 위치에서 벽지가 급격히 연소 될 수 있는 조건임을 설명하고 있으며 식사 중 자리 비움 → 착화 시 즉각적인 제어 실패 → 연소 확대 가능성 있음의 연계성을 보여줌.

다. 위험 조건 충족

: 벽지 건조 목적의 난로 사용은 가연물 밀착 가열로 인한 착화 위험이 크며, 실제 화재 사례에서도 다수 발생함.

3.4.3 결과 분석

발화지점이 거실 좌측 벽면 등유 난로 주변으로 한정되어 분석 신뢰도가 높아졌으며 단순 이미 지 패턴 분석에서 벗어나 진술과 현장 정보의 교차 검증을 통해 결론을 도출함. 난로 사용 행위와 가연물(벽지)의 근접 배치, 장시간 무인 가동이라는 위험 요인을 종합적으로 설명하여 화재 원인 분석까지 확대됨. 추가 정보가 현장 관찰의 부족한 부분을 보완하면서 보고서 수준의 분석 체계로 전환됨.

추가 정보 제공은 ChatGPT 분석 결과에 결정적 영향을 미쳤으며, 발화지점과 발화 원인의 특징이 제2 실험 대비 현저히 향상됨. 제3 실험은 현장 조사 시 사진뿐 아니라 진술, 사용 환경 정보의 확보가 발화지점 및 원인 규명에 필수적임을 입증함.

3.5 (제4 실험) 동일한 화재 현장 사진에 대한 화재조사관과 챗GPT의 분석 비교

3.5.1 실험 방법

화재 현장에서 촬영된 사진을 AI와 현재 복무 중인 화재 조사관(14명)에게 각각 제공하여 분석을 진행하였다. AI가 화재 현장 사진을 전반적으로 체계적이고 전문적인 수준으로 분석하는 정도의 수준임을 확인하였는데 이를 현장을 실제로 확인하고 감식, 감정의 절차를 거쳐 화재 조사에 임하는 화재 조사관들의 분석 내용과 어떤 차이가 있는지 확인해 본다. 두 그룹 모두 동일하게 사진정보만 제공받았으며 추가 정보는 주어지지 않았다. 이러한 조건을 바탕으로 도출된 분석 결과를 상호 비교하였다.

3.5.1.1 그룹에게 제공된 사진정보 1(주택 화재)



Fig. 11 a picture of a drone 1



Fig. 12 a picture of a drone 2



Fig. 13 a picture of a drone 3



Fig. 14 a picture of a drone 4



Fig. 15 the front of a house



Fig. 16 the main entrance on the first floor



Fig. 17 aspect



Fig. 18 aspect



Fig. 19 Rear (right)



Fig. 20 Bottom of the rear



Fig. 21 Bottom of the rear



Fig. 22 a room on the first floor



Fig. 23 the veranda on the second floor



Fig. 24 a room on the first floor



Fig. 25 a workshop on the first floor



Fig. 26 a living room on the second floor

3.5.1.2 각 그룹에게 제공된 사진정보 2(컨테이너 화재)



Fig. 27 floor plan



Fig. 28 the front



Fig. 29 the back of one's head



Fig. 30 aspect



Fig. 31 the inside of a room



Fig. 32 the inside of a room



Fig. 33 the inside of a room



Fig. 34 The living room



Fig. 35 The living room



Fig. 36 Kitchen



Fig. 37 the kitchen and the bathroom



Fig. 38 Washroom

3.5.2 실험 결과

3.5.2.1 사진정보 1의 챗GPT 분석 내용

1. 발화지점 판단

: 1층 우측 외벽 하단

가. 후면 사진 분석

- 1) 검게 탄 흔적과 바닥의 강한 열 영향(융해, 변형)이 가장 심함.
- 2) 벽면에 접한 화염 흔적이 바닥 쪽부터 상부로 퍼진 전형적인 상향 연소 패턴.
- 3) 샌드위치패널이 아래에서 위로 심하게 변형 및 수축되어 있음.
- 4) 바닥과 벽 접합부에 타고 남은 재(ash) 및 소실물이 다량 집중.

나. 벽면 사진 분석

: 창문 하부 외벽의 수직 연소 흔적이 뚜렷하며, 좌우보다 정중앙 수직방향이 집중적으로 소회됨.

다. 2층 내부 발코니 사진 분석

- 1) 벽 상단 및 천장 쪽은 그을림 및 열영향이 있으나, 하단보다는 경미함.
- 2) 발화가 2층 내부가 아닌 하부로부터 열이 상승한 결과로 해석 가능.

라. 드론 사진 분석

- 1) 건물 후면 우측 외부가 가장 심하게 그을려 있고, 지붕까지 불길에 상승한 흔적이 확인됨.
- 2) 발화 추정 지점 바로 위층(2층 발코니)의 지붕과 외벽도 소실된 반면, 나머지 지붕과 벽면은 비교적 온전함.

2. 종합 판단

: 연소 잔재 분포, 외벽 손상 정도, 상부 그을림의 확산 방향 등을 종합할 때, 1층 우측 외벽 하단부에 위치한 적치물 또는 가연물(예 : 작업 자재, 폐기물 등)에서 착화가 시작되었을 가능성이 높습니다.

3.5.2.2 사진정보 2의 챗GPT 분석 내용

1. 외부 손상 양상

- 가. 정면, 후면, 우측면 사진에서 볼 수 있듯이 주방으로 추정되는 우측 부분의 외부 손상이 집중적으로 심하고 특히 우측 벽체와 지붕 하부의 용융 및 그을림이 가장 강하게 나타남.
- 나. 후면에서도 동일하게 우측 구간의 지붕 손상과 외벽 변형이 두드러짐.

2. 내부 손상 및 연소 패턴

- 가. 내부 사진에서 주방 및 화장실 부근의 연소강도가 가장 높게 확인됨.
- 나. 주방 상부의 지붕 구조재가 완전히 소실되고, 금속 배관 및 설비의 용융 흔적이 뚜렷함.
- 다. 화장실과 주방 사이의 격벽이 완전히 소실되어 해당 구간의 열에너지가 집중된 것으로 보임.
- 라. 방 내부는 벽체와 천장 일부의 그을림 흔적은 있으나, 주방부보다 상대적으로 연소강도가 낮음.

3. 발화지점 추정

- 가. 외부 및 내부 손상 패턴을 종합할 때, 주방 우측 벽체 부근이 발화지점일 가능성이 높음.
- 나. 근거
 - 1) 주방 천장 및 벽체의 연소가 가장 심함.
 - 2) 화장실 방향으로 연소가 확산된 흔적이 있음.
 - 3) 방과 거실 방향으로의 연소 강도가 점차 약화되는 패턴.

3.5.2.3 사진정보 1, 2의 화재 조사관 분석 내용

사진정보 1에 대해서는 10명 중 9명의 조사관이, 사진정보 2는 9명의 조사관이 발화지점을 동일하게 추정하였고 그 외 다른 조사관의 경우는 인접한 지점을 발화지점으로 추정하였다. 각 조사관의 사진 분석에 대한 의견은 Table. 3과 같다.

Table 3. Analysis by fire investigators

구분	내용	주요 내용
조사관 1	주택 화재	- 외부에 비해 내부의 패널 수열흔이 비교적 약하고 내부의 가재도구 또한 밖에서 안으로 연소가 확대된 경향성이 보임. - 따라서 발화지점은 '주택 후면 우측 바닥 부근'으로 추정됨.
	컨테이너 화재	- 연소 패턴을 보면 출입문을 바라보는 기준으로 후면 우측에서 화재가 발생한 것으로 보임. - 내부를 살펴보면 방>거실/주방>화장실 부근으로 갈수록 연소 피해가 강해지는 경향이 확인되고 지붕면의 수열흔, 지붕 골조의 탄화 정도, 컨테이너 내부의 수열흔 등을 종합적으로 고려하면 발화지점은 '화장실 부근'으로 추정됨.
조사관 2	주택 화재	- 건물 정면 보다는 후면에서 강하고, 후면 우측면의 연소 강도가 높지 않아 후면으로 추정됨. - 내부 샌드위치패널의 수열흔이 외부보다 약하게 관찰되고, 외부는 일그러진 형태 및 강한 수열흔이 나타남. - 철골의 변색흔을 내외부로 비교했을 때, 내부는 본연의 색을 유지하고 있는 반면 외부는 변색된 것을 확인할 수 있는데, 이는 외부에서 화염이 시작했던 것을 확인할 수 있음.
	컨테이너 화재	- 외부는 주출입문 후면이 두드러지게 화재로 인한 피해가 관찰됨. - 내부는 전체적으로 연소되었으나, 방과 거실 및 주방은 뜨거운 열기류에 의해 화재 피해를 입은 반면 화장실은 직접 소실 형태가 관찰됨.
조사관 3	주택 화재	발화지점은 주택 후면 바닥부로 추정되며, 피해가 큰 1층 방은 좌측 벽면의 탄화 및 천장 등의 피해로 보아 외부 화염에 의한 피해로 추정됨.
	컨테이너 화재	발화지점은 화장실 내 위치한 난로의 연통부로 추정되며, 난로 연통 주변에서 시작된 화재가 천장을 타고 확대되어 거실과 방쪽으로 진행된 것으로 추정됨.
조사관 4	주택 화재	- 지붕의 후면 좌측 부분에서 전면 방향으로 연소가 진행된 패턴이 식별됨. - 주출입구가 위치한 건물 전면을 기준으로 건물 후면 좌측 부분에서 강하게 수열을 받은 흔적이 식별됨 - 후면 좌측 부분에서 건물 1층 개구부가 위치한 창문 방향 및 건물 2층 베란다 방향으로 연소가 진행된 패턴이 식별됨
	컨테이너 화재	- 주출입구가 위치한 건물 전면을 기준 건물 후면 우측 부분(화장실)에서 집중적으로 수열을 받은 흔적이 식별됨 - 주방 후면 반자들의 연소 상황을 보았을 때 화장실이 위치한 우측 부분은 탄화 심도가 깊어 바닥으로 소락되었으나 방이 위치한 좌측면은 일부가 남아 있는 점으로 보아 화장실에서 주방 방향으로 연소가 진행된 것으로 추정됨.

구분	내용	주요 내용
조사관 5	주택 화재	내외부에서 화염에 의한 영향을 받은 부분으로 보아 건물 후면 외부의 철제 프레임 부근에서 발생한 화재
	컨테이너 화재	- 건물 외부의 연소 양상으로 보아 발화 장소는 우측 후면에 위치한 화장실 내부로 추정됨. - 연소 경로는 화장실에서 부엌, 천장으로 연소확대된 패턴이 식별되고 화장실 내부 격벽에 설치된 목재의 탄화된 정도와 세탁기 본체에 수열받은 흔적과 세탁기와 인접한 컨테이너 벽체 부분의 수열받은 흔적으로 보아 발화 지점은 세탁기 상부로 추정됨.
조사관 6	주택 화재	- 후면 우측 하단에서 상단으로 불길이 번진 흔적이 확인됨. - 출입구 좌측 방의 벽체가 불에 탄 상태로 미루어볼 때, 화염이 건물 후면에서 전면 방향으로 확산된 것으로 판단됨. 2층 베란다의 후면 벽 하부에서 상부 방향으로 불이 진행된 양상이 포착됨.
	컨테이너 화재	- 후면 좌측 영역이 강한 열에 의해 심하게 그을린 모습이 나타남. - 우측 외벽의 후면부는 고온에 노출되어 색상이 변한 상태임. - 내부 방, 주방은 상층에서 전도된 열로 인해 타 손상이 발생함. - 화장실의 목재 부재 및 샌드위치패널 철제 외장재의 연소 양상을 보면, 화염이 화장실 후면 하단에서 상단으로 확대된 모습이 관찰됨.
조사관 7	주택 화재	- 좌측과 전면에 비해 후면 우측에서 강한 연소 흔적이 식별됨. - 후면 우측 하부에서 상부로 연소가 진행된 형태가 식별됨. - 인접한 1층 방으로 연소가 진행된 방향성이 식별됨
	컨테이너 화재	- 전면부는 우측에서 좌측 상부로 연소가 진행된 방향성이 식별되며 출입문의 탄화 흔적을 보아 닫혀있던 상태인 것으로 추정됨. - 우측면은 사진 기준 우측에서 좌측으로 연소 진행된 방향성이 식별되며 상부 위주의 연소가 진행된 것으로 추정됨. - 거실 방향 벽체는 후면에서 전면으로 연소가 진행된 형태가 식별됨.
조사관 8	주택 화재	- 건물 후면 우측 하부에서 상부로 연소 진행한 모습이 관찰됨. - 후면 벽체에서 전면부로 연소 이동한 모습이 관찰됨. 2층 베란다의 후면 벽체 하부에서 상부로 연소 진행한 모습이 관찰됨.
	컨테이너 화재	- 건물 전면의 우측 상부가 일부 소훼됨. - 건물 후면의 좌측부가 강한 수열로 소훼됨. - 우측면의 후면부가 강한 수열로 변색됨 - 화장실 벽체 상부가 전체적으로 강한 수열로 소훼됨. - 화장실 목재 구조체 및 샌드위치 패널 철제 외장재의 연소상황을 보아 화장실 후면 하단에서 상부로 연소 이동한 모습이 관찰됨.

구분	내용	주요 내용
조사관 9	주택 화재	- 건물 우측 후면 하부에서 강한 수열 흔적 관찰되며 상부 방향으로 연소 진행된 모습이 관찰됨. - 우측 내벽에서 2층 베란다 벽체로 연소 이동한 모습이 관찰됨. 2층 베란다 좌측 벽체 하부에서 상부로 연소 진행한 모습이 관찰됨. 1층 방의 좌측 벽체에서 천장을 경유하여 실내 및 우측으로 연소 진행한 모습이 관찰됨.
	컨테이너 화재	- 건물 전면 우측 상부가 일부 소실됨. - 우측 벽체 상부가 수열에 의해 변색된 모습 확인됨. - 후면 벽체 및 지붕재가 강한 수열로 소실됨. - 화장실 목재 벽체는 소실되고 강한 수열에 의한 변색흔 확실히됨. - 화장실과 인접한 거실/주방으로 연소 진행된 모습 관찰되며 거실/주방에 있던 가재도구 일부 소실됨. - 거실/주방에서 방 출입문 연소 상황 관찰한 바 출입문 및 문틀 상부측 수열에 의해 소실된 모습 확인되며 천장에서 하부 방향으로 연소 진행된 형상임.
조사관 10	주택 화재	- 우측면 사진의 지붕 사진을 보면 좌측에서 우측으로 연소 진행되는 모습 식별됨. - 수열흔은 통해 공사 중인 방에서 주택으로 연소 진행된 것으로 추정됨.
	컨테이너 화재	- 정면 우측의 소실정도가 강함. - 우측의 후면의 소실정도가 강함. - 내부 우측의 소실정도가 강함. - 우측 상부 천장의 소실정도가 강함

3.5.3 결과 분석

AI와 조사관 모두 상향 연소 패턴, 열 영향 강도, 연소 확산 방향 등을 주요 근거로 활용하여 발화지점을 추론하였으며 외부 손상과 내부 손상 비교·분석 방식이 유사했다. AI는 샌드위치 패널 변형 등 구조적·물리적 세부 표현이 많았지만, 조사관은 화재 경험 기반의 간결한 용어를 사용하는 경향이 보였다. AI 분석은 화재조사관 판단과 매우 높은 수준의 정합성을 보인다.

4 결 론

본 연구에서는 AI(특히 대규모 언어모델 기반(ChatGPT))를 화재 현장의 발화지점 판정 과정에 활용하기 위한 가능성을 검증하고자 4단계의 실험을 수행하였다. 실험 1에서는 개별 화재 현장 사진을 제공하여 AI가 독립적으로 발화지점을 분석하도록 하였고, 실험 2에서는 동일 화재 현장의 전

체 사진만을 제공하여 통합 분석을 수행하도록 하였다. 실험 3에서는 화재 현장 사진과 함께 관계자 진술, 현장 여건 등 다양한 보조 정보를 추가로 제공하여 AI가 종합적으로 발화지점을 분석하도록 하였으며, 마지막으로 실험 4에서는 동일 화재 현장을 대상으로 화재조사관의 분석 결과와 AI 분석 결과를 비교·검증하였다.

연구 결과, AI는 제한된 정보 상황이나 잘못된 질문에서도 답을 제공하기 위해 불완전하거나 모호한 분석을 제시하는 경우가 있었으나, 여러 장의 화재 현장 사진을 연계하여 분석함으로써 다수의 조사관 의견과 동일한 발화지점을 도출할 수 있는 등 보조적 화재 감식 도구로서 신뢰성 확보가 가능하였고 화재 현장 전체 사진과 추가적인 보조 정보를 제공했을 때 발화지점 판정의 정확성과 일관성이 유의미하게 향상되는 경향을 보였다. 특히 실험 3에서는 화재조사관의 분석과 유사한 수준의 합리적 근거를 도출하였으며, 실험 4에서의 비교 결과 또한 일부 사례에서는 전문가 분석과 동일하거나 유사한 발화지점을 제시하는 등 활용 가능성을 확인할 수 있었다.

본 연구는 AI가 화재조사관의 전문적 판단을 대체하기보다는 보조적 분석 도구로서의 활용 가치가 크다는 점을 시사한다. AI는 방대한 사례 기반 학습과 신속한 분석 능력을 통해 조사관의 초기 추정이나 분석의 폭을 확장할 수 있으며, 특히 현장 정보가 충분히 확보된 경우에는 발화지점 판정의 정확도 향상에 이바지할 수 있다. 또한, 동일 현장에 대한 다양한 분석 관점을 제공하여 조사관의 편향 가능성을 줄이고, 조사 과정의 객관성과 효율성을 높이는 데 긍정적인 역할을 할 수 있음을 확인하였다.

따라서 본 연구는 AI를 화재현장 발화지점 판정의 보조 분석 도구로 체계적으로 도입할 수 있는 가능성을 제시하며, 향후 다양한 화재 유형과 실제 조사 데이터를 기반으로 한 대규모 후속 연구가 병행될 경우, AI의 신뢰성과 정확도를 한층 강화할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 소방의 화재조사에 관한 법률, 제1장 제2조 및 제2장 제5조, 시행 2022. 6. 9.
2. 화재조사 및 보고규정, 제2조, 시행 2023. 3. 8.
3. 생성형 AI vs 추론형 AI : 무엇이 다르고, 어디에 어떻게 사용되는가?, by josephline, <https://bbanzziman.tistory.com/140>
4. AI 지금 어디까지 왔어? AI 트렌드와 실전 활용 팁, NEWNEEK, <https://newneek.co/issue/ai-trend>



2025년
화재 재현실험
연구보고서



제 4 장 | 설악권



- ✓ 광역화재조사 1팀 >>>
태양광 1차·2차 집속에 의한 화재 발생 가능성 연구
- ✓ 광역화재조사 2팀 >>>
발화지점 판정 시 인공지능(AI) 활용 가능성에 관한 연구
- ✓ 광역화재조사 3팀 >>>
하이라이트 전기레인지 화재 패턴에 관한 연구

하이라이트 전기레인지 화재 패턴에 관한 연구

- 직접 발화와 외부 화염에 의한 연소 패턴의 차이를 중심으로 -

남관형¹⁾, 최웅비, 최유진, 엄재민

강원특별자치도 소방본부 설악권광역화재조사 3팀

A Study on Fire Patterns of Highlight-Type Electric Cooktops

- Focused on the Difference Between Self-Ignition and External Flame-Induced Burning -

Gwan-Hyeong Nam[†], Ung-Bi Choi, Yu-Jin Choi, Jae-Min Eom

Gangwon Fire Headquarters

ABSTRACT

This study aims to experimentally analyze the combustion patterns of fires that may occur in highlight electric ranges, in order to identify the differences between direct ignition and combustion caused by external flames. Electric range fires, one of the major types of kitchen fires, exhibit different fire patterns depending on the mode of ignition, which has a significant impact on fire investigation outcomes and the determination of responsibility.

The experimental results showed that, in cases of direct ignition, no char residue was observed at the center of the heating element, while charring was formed only along the outer region, demonstrating a distinctive pattern. In contrast, combustion caused by external flames exhibited widespread and irregular charring along with soot deposition.

Among these phenomena, the area where char at the center is eliminated due to high-temperature direct heat is defined as the Direct Thermal Clearing Zone (DTCZ). This study proposes a fire pattern identification criterion based on this concept to distinguish ignition types.

Keyword : Highlight Electric Range, Combustion Pattern, Direct Ignition, External Flame, Char Pattern

1 서 론

1.1. 연구배경 및 필요성

하이라이트 전기레인지에서 기인한 화재는 최근까지도 꾸준히 발생하고 있으며, 이는 전기레인지가 보편화된 현대 주거 환경에서 결코 간과할 수 없는 화재 유형이다. 특히 상판 주변에 킨타일,

1) E-mail : nkhjust1@korea.kr

행주, 플라스틱 용기 등 다양한 가연성 물질이 놓이기 쉬운 구조적·사용 환경적 특성상, 부주의에 의한 화재가 높은 비율을 차지하고 있다.

2024년 전국 하이라이트 전기레인지 화재 원인별 통계에 따르면, 전체 화재 369건 중 323건이 ‘부주의’에 기인한 것으로 나타났으며, 이는 전체의 약 87.5%를 차지한다. 이는 전기레인지 주변의 가연물 관리 미흡이 얼마나 높은 화재 위험을 내포하고 있는지를 보여준다.

하이라이트 전기레인지는 상판을 직접 가열하는 방식으로 작동하며, 조리 종료 후에도 장시간 고온 상태가 지속되어 잔열로 인한 화재 발생 위험이 상존한다.

특히 상판 위에 가연성 물질이 놓인 상태에서의 화재 발생 사례가 다수 보고되고 있으며, 실제 화재 조사 현장에서는 하이라이트 전기레인지 위 탄화 흔적이 기기 자체의 발화인지 외부 화염에 의한 연소인지 판단하기 어려운 경우가 많다.

그러나 두 상황에서 발생하는 탄화 및 연소 흔적의 형태적 차이에 대한 체계적인 연구나 감식 기준은 부족한 실정이다.

따라서 직접 발화와 외부 화염에 의한 연소 패턴의 차이를 분석하고 감식 기준을 도출하는 것은 향후 화재원인 판정의 정확성을 높이는 데 중요한 기초 자료가 될 수 있다.

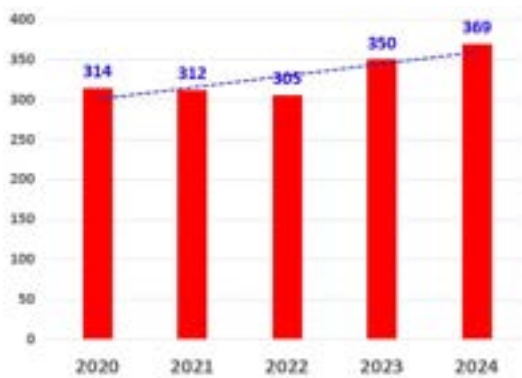


Fig. 1 Highlights Electric Range Fire Statistics (Nationwide, in the last 5 years)

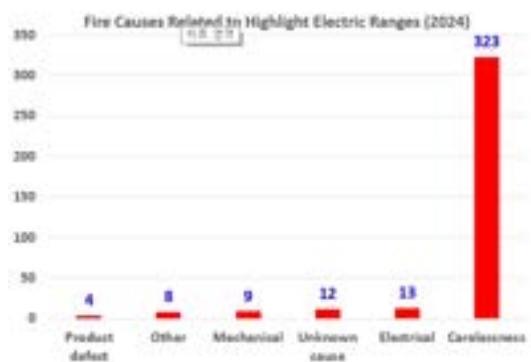


Fig. 2 Highlights Electric Range Ignition Factors Statistics (National, 2024)

1.2. 연구목적 및 기대효과

본 연구는 하이라이트 전기레인지 위에서 발생한 연소 흔적을 분석함으로써, 기기 자체의 발열에 의해 직접 발화된 경우와 외부 화염에 의해 연소된 경우 사이에 나타나는 탄화 형태, 열흔, 융착 여부 등의 차이점을 규명하는 데 그 목적이 있다. 이를 위해 실제 주방 환경에서 많이 사용하는 가연물로 실험을 수행하고, 두 발화 방식에 따른 연소 패턴을 비교·분석함으로써, 화재 조사 현장에서 실질적으로 적용 가능한 감식 기준을 제시하고자 한다.

본 연구를 통해 다음과 같은 효과를 기대할 수 있다.

첫째, 하이라이트 전기레인지 화재 감식 시 직접 발화와 외부 연소의 구분 기준을 명확히 제시함으로써, 조사관의 판단 근거를 강화할 수 있다.

둘째, 연소 패턴의 차이를 통해 정확한 화재 원인 규명이 가능해져 책임소재가 명확해지고, 조사 결과에 대한 신뢰성이 향상될 수 있다.

셋째, 축적된 실험 데이터를 바탕으로 향후 하이라이트 기기 관련 감식 기법의 표준화와 체계화에 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

1.3. 연구의 흐름

연구는 <Fig 3>과 같이 총 4단계의 절차로 구성되었다. 첫째, 하이라이트 전기레인지 구조 및 작동 원리, 열전달 특성 등 이론적 배경을 검토하였다. 둘째, 실제 화재사례 2건을 분석하여 발화지점과 연소 양상 간의 연관성을 파악하였다. 셋째, 기존 문헌 및 선행연구를 통해 연소 메커니즘과 잔열 발화 위험성, 유사 패턴 사례 등을 비교 분석하였다. 마지막으로, 실제 주방 가연물을 대상으로 실험실 조건에서 직접 발화와 외부 화염 조건을 각각 재현하여 연소 패턴, 탄화물 분포, 용착 흔적 등을 비교 분석하였다.

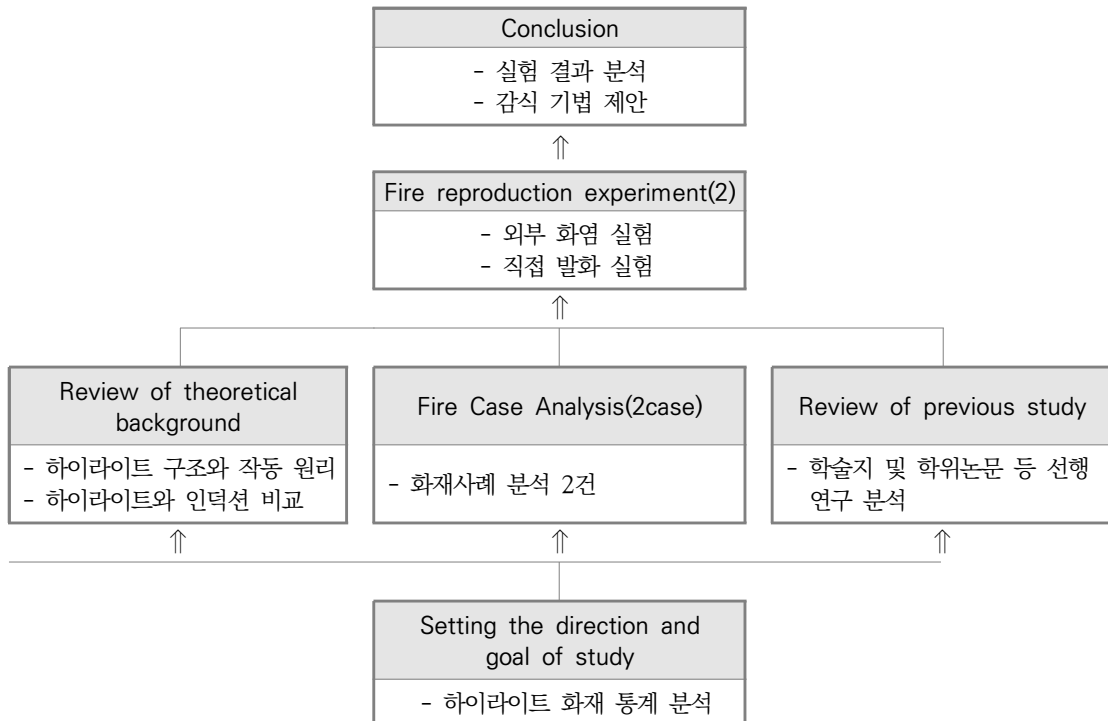


Fig. 3 a flowchart of research

2 이론적 배경 및 선행연구 검토

2.1 하이라이트 전기레인지의 구조와 작동 원리

하이라이트 전기레인지는 세라믹 글라스 상판 하부에 배치된 니크롬(Ni-Cr) 합금 발열체에 전류를 공급하여 열을 발생시키는 방식이다. 발열체에서 생성된 줄열(Joule heat)은 세라믹 상판을 통과하여 상부 조리 용기로 전달되며, 복사열과 전도열의 형태로 열전달이 이루어진다.

일반적으로 발열체의 온도는 800~1,000℃, 상판 표면 온도는 500~700℃에 이르며[1], 조리 종료 후에도 수십 분간 잔열(Residual Heat)이 지속된다. 일부 연구에서는 잔열표시등이 소등된 이후에도 150℃ 이상의 표면 온도가 유지되는 것으로 보고된 바 있다[2].

이러한 특성은 주방 내 키친 타월, 면 행주, 플라스틱 용기 등 가연성 물질이 방치된 경우 자체 발화온도에 도달하지 않더라도 열분해 또는 탄화 반응을 유도할 수 있다. 특히 상판이 파손되어 액체(예 : 국물, 기름 등)가 내부 발열체에 접촉할 경우, 아크(arc)나 단락(short)이 발생하여 전기적 발화로 이어질 위험성도 존재한다[3].

2.2 하이라이트와 인덕션 방식의 비교

전기레인지에는 하이라이트 외에도 인덕션(Induction) 방식이 대표적으로 사용된다. 하이라이트는 상판을 직접 가열하여 열을 전달하는 반면, 인덕션은 자기유도 원리를 활용하여 조리 용기 자체에 열을 발생시키는 간접 가열 방식이다.

Table 1. 하이라이트와 인덕션 방식 비교

구분	하이라이트 방식	인덕션 방식
열전달 방식	발열체(니크롬선)를 통한 직접 가열	고주파 자기장 → 용기 유도전류 발생
상판 온도	300~600℃ 이상(장시간 잔열 유지)	50℃ 이하(빠른 냉각)
사용 용기	제한 없음	자성 금속 용기만 가능
화상 및 화재 위험성	화재 발생 위험 높음	화재 발생 위험 낮음

하이라이트 방식은 표면 자체가 열원으로 작용하므로, 외부 이물질이나 가연물이 접촉할 경우 탄화 및 연소 흔적이 남기 쉽다[4]. 반면, 인덕션 방식은 상판 자체를 가열하지 않기 때문에 연소 흔적이 발생하기 어렵다. 따라서 화재 조사 시 이 두 방식의 구조적 차이를 이해하는 것은 감식 과정에서 매우 중요한 판단 기준이 될 수 있다[5].

2.3. 선행연구 검토

선행 연구에서는 하이라이트 전기레인지의 구조적 특성과 화재 발생 가능성을 중심으로, 잔열에 의한 발화, 상판 균열 시 발화 위험성, 키친 타월 등 가연물의 연소 반응 등에 대해 다양한 실험과 사례 분석이 이루어져 왔다[6].

그러나 지금까지의 연구는 대부분 발화 가능성(사용 중 물건 적치, 반려동물에 의한 스위치 작동 등) 평가에 초점을 맞추고 있으며, 하이라이트 전기레인지에서 발생한 탄화 형태, 열흔, 융착 흔적 등 연소 패턴의 세부적 비교 분석은 미흡한 실정이다.

특히 직접 발화와 외부 화염에 의한 연소 흔적의 차이를 체계적으로 검증하고 감식 기준으로 제시한 연구는 거의 전무하다.

이에 본 연구는 하이라이트 전기레인지의 실제 사용 조건과 유사한 환경에서 발화 유형별 재현 실험을 실시하고, 연소 패턴을 정량적·정성적으로 비교 분석함으로써, 향후 화재 조사 실무에서 활용 가능한 감식 기준을 도출하는 것을 목표로 한다.

3 화재사례 분석(2건)

3.1. 화재사례 1(강릉시 컨테이너 주택 화재)

3.1.1. 화재개요

2024년 5월 17일 15시 3분경, 강원특별자치도 강릉시 안현동의 컨테이너 주택에서 화재가 발생하였다. 인근 주민이 주택 내에서 발생한 연기와 화염을 목격하고 119에 신고하였다.[7]

3.1.2. 발화지점 및 연소 패턴

화재는 주택 내 싱크대 전기레인지 부근에서 시작된 것으로, 해당 부위 상판과 주변에서 집중된 탄화 및 그을음 흔적이 관찰되었다.

전기레인지 상판에는 융착된 미상의 가연물이 확인되었으며, 상부 후드필터와 주변 가연물에도 열 피해가 뚜렷하게 나타났다.

이와 인접한 좌측 책상 하부에서도 강한 탄화 흔적이 있었으나, 연소 패턴 및 국부적 보호 영역 등을 종합한 결과, 최초 발화지점은 싱크대 전기레인지로 판단된다.

현장에는 사람이 없었고, 전기레인지는 통전 상태였으며, 터치식 조작 구조였다. 화재현장에서 반려동물의 사체가 발견된 점으로 보아 반려견이 전기레인지를 작동시키고 애견용품 바구니를 넘어뜨려 착화되며 화재가 발생한 것으로 추정된다.(Fig. 4~Fig. 6 참조)

3.1.3. 화재원인 추론

본 화재는 하이라이트 전기레인지가 통전된 상태에서 상판 위 가연물(예 : 플라스틱 용기 또는 행주 등)이 방치되어 직접 발화한 것으로 추정된다. 반려견이 터치식 스위치를 작동시켰을 가능성도 배제할 수 없으며, 인적 부재와 기기 작동 상태가 이를 뒷받침한다.



Fig. 4 the point of utterance



Fig. 5 Highlights Peripheral Carbide



Fig. 6 Highlights Combustion Form

3.2. 화재사례(2)

3.2.1. 화재개요

2025년 5월 20일 9시경 강원특별자치도 양구군 양구읍 소재 공장 2층 주방에서 화재가 발생하였다. 점유자는 전기레인지 인근에서 발생한 화재를 목격하고 119에 신고하였다.[8]

3.2.2. 발화지점 및 연소 패턴

화재는 좌측 하이라이트 전기레인지 상판에서 시작된 것으로 추정된다. 해당 부위 천장과 수납장에 집중된 그을음 흔적과 상판 위 목재도마의 강한 탄화 흔적이 주요 단서였다. 상판 주변 가연물의 손상 정도와 그을음 확산 방향, 주변 기기들의 피해 유무를 종합할 때, 발화 지점은 좌측 전기레인지 상판 위로 특정되었다.(Fig. 7~Fig. 9 참조)

3.2.3. 화재원인 추론

본 화재는 점유자가 부재한 상태에서 발생하였으며, 주방 내 설치된 쥐덫의 존재로 미루어 볼 때 설치류(쥐)에 의해 하이라이트 전기레인지가 우발적으로 작동되었을 가능성이 있다. 전기레인지 상판에는 가연물인 목재 도마가 직접 접촉된 상태로 놓여 있었고, 작동 중인 상판에서 발생한 고온 열원에 의해 도마가 착화되며 화재로 이어진 것으로 판단된다.



Fig. 7 the point of utterance



Fig. 8 Highlights Peripheral Carbide



Fig. 9 Highlights Combustion Form

3.3. 사례 비교 및 시사점

두 건의 화재 사례 모두에서 하이라이트 전기레인지 상판에 특징적인 연소 흔적이 공통적으로 나타났다. 중심 발열체가 위치한 상판 직상부에는 탄화물이 부착되지 않았고, 그 외곽 영역에는 불규칙한 형태로 탄화물이 광범위하게 형성되어 있었다. 이러한 양상은 중심부의 고온 열원이 직접 작용하여 접촉 가연물이 빠르게 열분해되거나 용해되며, 상대적으로 탄화물이 잔류하지 않는 특성이 반영된 것으로 보인다.

4 하이라이트 전기레인지 화재패턴 실험

4.1. 연구 가설

본 연구는 하이라이트 전기레인지 상판에 나타나는 연소 흔적이 발화 유형에 따라 상이하다는 가설을 설정한다.

• 연 구 가 설 •

하이라이트 전기레인지의 직접 발화와 외부 화염에 의한 발화는 서로 다른 연소 패턴을 나타낸다.

4.2. 연구 범위

본 연구는 하이라이트 전기레인지에서 발생할 수 있는 직접 발화와 외부 화염 노출에 따른 연소 패턴의 차이를 규명하기 위해, 실제 주방 환경에서 사용되는 대표적인 가연물을 대상으로 재현실험을 수행하였다.

실험은 동일한 전기레인지 모델과 가연물 구성을 사용하여 각각 3회 반복 실시하였으며, 연소 양상, 탄화물의 분포 형태, 발열체 중심부의 탄화물 유무, 열흔의 방향성, 용착 흔적 등을 중심으로 정량적 및 정성적 분석을 진행하였다.

• 연 구 범 위 •

〈실험 1〉 하이라이트 전기레인지를 정상 작동시킨 상태에서 상판 위에 가연물을 놓고 발화시키는 직접 발화 실험

〈실험 2〉 하이라이트 전기레인지가 작동되지 않은 상판 위에 외부 열원(가스토탈)으로 연소시키는 외부 화염 실험

4.3. 실험세트 및 준비물

본 실험은 강원도 설악권 광역화재조사 사무실 옥상에서 수행되었으며, 실험 장비로는 정격 전압 220V, 소비전력 1.5kW 사양의 하이라이트 방식 전기레인지를 사용하였다. 해당 전기레인지의 상판은 지름 180mm, 두께 4mm의 세라믹 글라스 재질로 구성되어 있다.

실험에 사용된 가연물은 실제 주방 환경을 반영하여 키친타월, 행주(면 소재 및 부직포), 플라스틱 용기, 플라스틱 주걱을 선정하였다. 외부 화염 실험에서는 가스토탈을 열원으로 사용하여 전기레인지 상판에 직접 노출시키는 방식으로 연소를 유도하였다.



Fig. 10 experimental supplies



Fig. 11 an experimental set

4.4. 화재재현실험

4.4.1. 제1실험(하이라이트 직접 발화)

4.4.1.1. 실험방법

하이라이트 전기레인지에 정격 전원을 인가하여 정상 작동 상태로 가열한 후 수행하였다. 실험에 사용된 가연물은 하나의 플라스틱 용기에 담아 전기레인지 상판의 중심부에 배치하였다. 총 20분간 연소시킨 후, 질식 소화포를 사용하여 불을 끄고, 상판에 형성된 탄화물 분포, 열흔 및 연소 잔재물의 양상 등을 정밀 분석하였다.(Fig. 12~Fig. 14 참조)



Fig. 12 after 5 minutes



Fig. 13 after 15 minutes



Fig. 14 choking digestion

4.4.1.2. 실험결과

모든 실험에서 가연물은 연기를 방출하다가 평균 약 5분 경과 후 착화되었으며, 연소는 상판 발열체 중심부 직상부에서 시작되었다.

연소 후 상판에는 중심부에 탄화물이 존재하지 않는 소실 영역이 관찰되었고, 그 외곽부에는 불규칙한 탄화물의 융착 흔적이 형성되었다.

이러한 양상은 고온의 직열에 의해 중심부 탄화물이 소실된 것으로, ‘직열 탄화 소실 영역(Direct Thermal Clearing Zone)’으로 정의할 수 있으며, 이는 외부 화염에 의한 연소와 구분되는 특징적인 패턴이다.

또한 열흔은 발열체를 중심으로 방사형 방향성을 보였고, 상판 표면에는 탄화물 외에도 열에 의한 융착 및 응고 흔적이 확인되었다.(Fig. 15~Fig. 17 참조)



Fig. 15 the first experiment



Fig. 16 the second experiment



Fig. 17 the third experiment

4.4.1.3. 실험결과 분석

직접 발화 실험에서는 가열된 발열체 상판 위에 놓인 가연물이 평균 약 5분 내외에 착화되었으며, 연소 후에는 상판 중심부에 탄화물이 거의 남지 않고, 주변부에만 잔재물이 일부 불규칙하게 용착된 양상이 관찰되었다.

이는 발열체 중심부가 가장 높은 온도를 유지하며, 탄화물이 열분해 후 연소 또는 소실되는 반면, 상대적으로 온도가 낮은 외곽부에 탄화물이 남는 특성을 나타낸다.

또한, 연소 잔재물은 발열 중심을 기점으로 방사형으로 확산되거나 비산된 흔적이 형성되었으며, 이는 열원이 내부에서 외부로 퍼지는 형태임을 시사한다. 상판 위에는 열 중심에서 외곽 방향으로 퍼진 용착 흔이 일부 관찰되었으며, 이를 통해 열 중심부의 직접적 작용 범위와 연소 에너지의 분산 경향을 유추할 수 있었다.

이러한 연소 패턴은 기기 작동으로 인해 중심부가 극고온 상태에 도달하면서, 그 부위의 탄화물이 완전히 연소되어 소실되는 ‘직접 열화 소실 영역(Direct Thermal Clearing Zone)’이 형성되는 현상으로 해석된다. 이는 외부 화염에 의한 연소와는 뚜렷하게 구분되는 특징으로, 중심부 탄화물 부재, 방사형 열흔, 용착 방향성 등은 직접 발화 감식을 위한 유의미한 지표로 제시될 수 있다.

4.4.2. 제2실험(하이라이트 외부 화염)

4.4.2.1. 실험방법

외부 화염에 의한 연소 패턴을 확인하기 위한 실험은 하이라이트 전기레인지를 작동시키지 않은 상태에서, 상판 위에 외부 열원인 가스토치를 수평 방향으로 30초간 노출한 후 자연 연소를 20분간 유지하는 방식으로 진행되었다.

상판은 세라믹 글라스(지름 180mm, 두께 4mm)로 구성되었으며, 상판 위에는 실제 주방에서 사용되는 가연물(키친타월, 부직포 행주, 플라스틱 조각 등)을 배치하였다. 실험은 동일한 조건에서 총 3회 반복하여 재현성과 신뢰도를 확보하였다.(Fig. 18~Fig. 20 참조)



Fig. 18 an external flame



Fig. 19 after 15 minutes



Fig. 20 choking digestion

4.4.2.2. 실험결과

연소 중 상판 전면에는 불규칙한 탄화물 분포와 그을음 흔이 형성되었으며, 발열체가 위치한 중심부를 포함한 전 영역에서 탄화 잔재가 관찰되었다. 특히 탄화 경계는 불명확하고 일정하지 않았으며, 탄화물은 무작위적으로 퍼진 양상을 보였다. 직접 발화 실험에서 나타난 중심부 탄화물 부재 영역과는 달리, 외부 화염 노출 시에는 중심부까지 탄화 흔적이 형성되었으며, 특정한 방향성이나 대칭성은 식별되지 않았다. 또한 상판 표면에는 육안으로 확인되는 균열은 발생하지 않았다.(Fig. 21~Fig. 23 참조)



Fig. 21 the first experiment



Fig. 22 the second experiment



Fig. 23 the third experiment

4.4.2.3. 실험결과 분석

외부 화염 실험에서는 하이라이트 전기레인지 상판이 비작동 상태인 조건에서 외부 열원(고체연료, 가스토치)을 수평 방향으로 노출시켰으며, 이로 인해 상판 전체에 걸쳐 넓고 불규칙한 탄화 및 그을음 흔적이 관찰되었다. 특히 연소 잔재물은 상판 중심부를 포함한 전 영역에 걸쳐 분포하였으며, 중심부에도 탄화물이 일부 잔존하였다.

연소 흔적은 열원이 고르게 퍼지지 못하고, 비대칭적인 열분포를 형성하면서 중심과 외곽 모두에 다양한 열응력 균열(crazing)이 발생하였다. 이 균열은 일정한 방향성이 없이 여러 갈래로 확산되었고, 이는 중심부 열집중 현상이 아닌, 외부에서 복합적인 방향으로 작용한 열 자극에 의한 결과로 해석된다.

또한, 탄화물의 분포 범위와 그을음의 확산 정도가 일정하지 않았으며, 일부 구간에서는 열 손상과 물리적 변형이 동시에 나타났다. 이는 외부 화염이 상판 전면에 넓게 작용하면서 균일하지 않은 온도와 압력 조건이 복합적으로 영향을 준 결과로 보인다.

이러한 연소 양상은 기기 중심부의 직접 열작용에 의해 생성된 ‘직접 탄화 소실 영역(Direct Thermal Clearing Zone)’이 형성되지 않는다는 점에서, 직접 발화 실험과 뚜렷한 대비를 이룬다. 따라서 중심부 탄화물 존재 여부, 불규칙한 탄화 경계, 비대칭 열흔, 다방향 열응력 균열 등의 특성은 외부 화염 연소의 감식 지표로 유효하게 활용될 수 있다.

5 결론 및 제언

본 연구는 하이라이트 전기레인지에서 발생하는 화재의 연소 패턴을 발화 유형에 따라 비교·분석하고, 화재 조사 현장에서 유의해야 할 감식 기준을 도출하고자 실험화재 재현 실험을 수행하였다. 동일한 기기 조건, 동일한 가연물, 동일한 환경에서 직접 발화 실험과 외부 화염 실험을 각각 3회 반복한 결과, 양자 간에 명확한 연소 흔적의 차이가 존재함을 확인할 수 있었다.

5.1. 연구결과 요약

직접 발화 실험에서는 발열체 중심부에 탄화물이 부착되지 않는 고온 직열 영역이 반복적으로 형성되었으며, 이를 ‘직열 탄화 소실 영역(Direct Thermal Clearing Zone)’으로 정의하였다. 이 영역은 고온에서 탄화물이 완전히 소실되어 흔적이 남지 않는 특성을 가지며, 그 외곽으로는 일정한 방향성과 경계를 가진 탄화 흔적이 방사형으로 형성되었다.

반면 외부 화염 실험에서는 상판 전면에 걸쳐 불규칙하고 비대칭적인 탄화 흔이 관찰되었고, 중심부에도 잔존 탄화물이 남아 있었다. 연소 양상은 무작위적이었으며, 열흔의 방향성이나 특정한 패턴은 확인되지 않았다. 이는 동일한 재료와 조건 하에서 화염 유형의 차이만으로도 탄화 패턴에 차별성이 나타남을 시사한다.

Table 2. 실험 결과 분석

비교 항목	직접 발화 실험	외부 화염 실험
중심부 탄화물 부재	○ (직열 탄화 소실 영역 형성)	×(중심부 탄화물 잔존)
탄화물 분포 양상	방사형 및 대칭적	불규칙하고 전면 분포
열흔 및 융착 방향성	발열체 중심에서 외곽으로 확산	방향성 없음
탄화 경계의 명확성	선명한 경계 및 환상형	모호하고 비대칭적

5.2. 감식 지표 제언

본 연구의 결과를 바탕으로, 하이라이트 전기레인지 화재 감식 시 다음과 같은 기준이 실무에 적용 가능할 것으로 판단된다. 특히, 직열 탄화 소실 영역(Direct Thermal Clearing Zone)의 유무는 직접 발화 여부를 판단할 수 있는 중요한 지표가 된다.

탄화물의 분포 양상, 열흔의 방향성, 탄화 경계의 명확성은 발화 유형을 구분하는 데 유의미한 판단 근거가 된다. 화재 감식 시 상판 중심부와 주변부의 탄화 패턴 차이에 주목함으로써, 단순 탄

화 혼이 아닌 연소의 원인과 방향성에 대한 정밀한 해석이 가능하다.

5.3. 제언 및 향후 과제

본 연구는 제한된 기기 모델 및 재료를 기반으로 수행되었으므로, 다양한 전기레인지의 구조와 소재, 사용 환경을 반영한 후속 연구가 필요하다. 실험 조건의 정량화와 열혼 분석을 위한 고온 열화학 반응 모델과 화재 실험 표준도 추가로 마련되어야 하며, 이를 통해 KS 기준이나 실무 적용 지침 개발로 연계하는 것이 바람직하다.

또한, 연소 중 탄화물의 이동 방향, 잔열 지속 시간, 상판 재질 사이에 따른 패턴 특성, 가연물 종류와 습윤도 등의 요소를 종합적으로 분석하여 보다 정량적이고 실증적인 감식 기준을 확립할 필요가 있다.

참고문헌

1. Underwriters Laboratories, “UL 858 : Household Electric Ranges”, 2023.
2. International Electrotechnical Commission(IEC), “IEC 60335-2-6 : Household and Similar Electrical Appliances – Safety – Part 2-6 : Particular Requirements for Stationary Cooking Ranges”, 2023.
3. Kim, D. S., Lee, S. Y., & Choi, J. H., “A Study on the Surface Temperature and Fire Risk of Electric Ranges after Use,” Journal of Fire Science and Safety, 34(2), pp. 87-94, 2019.
4. National Fire Protection Association(NFPA), “NFPA 921 : Guide for Fire and Explosion Investigations”, Quincy, MA, 2021.
5. Lee, H. J., & Park, Y. S., “Comparison of Fire Characteristics between Highlight and Induction Cooktops,” Korean Journal of Safety, 35(3), pp. 42-50, 2020.
6. Choi, M. S., et al., “Thermal Behavior and Fire Risk of Kitchen Appliances,” Fire Research Institute Annual Report, 16(1), pp. 53-61, 2018.
7. Gangwon Fire Headquarters, “Fire Scene Investigation Report (Gangneung 2024-05-096),” 2024.
8. Gangwon Fire Headquarters, “Fire Scene Investigation Report (Yanggu 2025-05-021),” 2025.
9. Byung-Soo Kim et al., “A Study on the Structural Characteristics and Fire Risks of

- Electric Ranges,” Journal of Korea Fire Investigation Association, Vol.17, No.1, pp. 42-50, 2019.
10. Jeong-Il Lee, Gak-Chun Ha, Ji-Myung Kim, “A Study on the Characteristics and Fire Risks of Electric Ranges,” Journal of Korea Society of Disaster Information, Vol.15, No.3, pp. 380-390, 2019.
 11. Kwang-Mook Park, “Analysis of Accident Causes of Electric Ranges (Induction Type),” Proceedings of the Korea Fire Investigation Association Conference, Vol.2019, No.04, 2019.
 12. Maeng-Geol Kwak, “Analysis of Fire Risk from Electric Ranges Caused by Pets,” Proceedings of the Korea Association of Fire Investigation Conference, 2020.
 13. Seung-Hoon Lee, Seung-Bok Choi, Don-Mook Choi, “A Review of Analysis Techniques for Cracks in Metal Surface Coatings,” Proceedings of the Korea Fire Investigation Association Conference, Vol.2019, No.04, 2019.
 14. Statistics from the National Fire Information System.



2025년
화재 재현실험
연구보고서



제 5 장 | 남부권



✓ 광역화재조사 1팀 >>>

파티션 히터의 비정상적 사용과 전기적 이상에 따른 발화 가능성과 감식기법에 관한 연구

✓ 광역화재조사 2팀 >>>

음식물 처리기 운전 조건별 화재 징후 분석

✓ 광역화재조사 3팀 >>> ☆ '25년도 강원 화재재현실험 연구논문 발표대회 우수

전열온상선 설치 방법에 따른 화재 발생 가능성 분석

파티션 히터의 비정상적 사용과 전기적 이상에 따른 발화 가능성과 감식 기법에 관한 연구

조주영¹⁾, 고치순, 황호석, 임동건
강원특별자치도 소방본부 남부권광역화재조사 1팀

A Study on the Abnormal Use and Electrical Abnormalities of Partition Heater

Ju Yeong-Jo[†], Chi-Sun Ko, Ho-Seok Hwang, Dong-gun Lim
Southern Wide Area Fire Investigation Team 1, Gangwon Fire Headquarters

ABSTRACT

Partition heater is mainly used in space such as office, hospitals and hospitals are used to increase efficiency of space. However, there are cases where fire occurs due to overheating, electrical defects.

Unlike existing heating devices, there is a possibility that the partition itself is composed of a combustion material, there is a possibility that damage when the fire occurs.

The risk of fire risk that can occur during partition heater usage, and identify the spread characteristics of heat, heat, and identify the diffusion characteristics of combustion. In various environments, the partition heater will experimentally analyze the possibility that partition heater can cause fire.

Keywords : Fire investigation, Partition heater, overheating, electrical defects

1 서 론

1.1 연구의 배경

최근 겨울철을 중심으로 실내 공간에서 사용되는 전기 난방기기의 사용이 급격히 증가하고 있으며, 그중에서도 파티션 히터는 공간 분할과 난방을 동시에 해결할 수 있는 효율적인 장치로 각광받고 있다.

¹⁾ E-mail : jj5524@korea.kr

파티션 히터는 사무실, 병원, 민원실 등과 같이 다중 이용자가 공간을 공유하는 장소에서 개별적인 난방 수단으로 널리 사용되며, 전기를 열원으로 사용하기 때문에 기존 가스 난방기기에 비해 안전하다는 인식이 있다.

그러나 최근 파티션 히터의 비정상적 사용, 전기적 이상, 과열, 카본필름 손상 등으로 인해 화재가 발생하는 사례가 보고되고 있으며, 이에 대한 실증적 연구와 감식기법의 정립이 미비한 실정이다.

국가화재정보시스템 화재통계자료에 의하면 최근 5년간(2020년~2024년) 강원특별자치도에서 발생한 전체 화재 9,447건 중 전기적 요인에 의한 화재 건수는 2,635건, 기계적 요인은 1,054건, 제품결함은 53건으로 전기적 요인은 약 27%, 기계적 요인은 11%, 제품결함은 0.5%를 차지하며, 피해액은 약 2,373억 원에 달한다.

특히 파티션 히터는 난방 기능이 통합된 구조이기 때문에 외관상 일반 사무용 파티션과 유사하여 사용자의 주의가 미흡해지는 경우가 많고 복사열에 의해 인접한 가연성 물질이 장시간 노출되면서 탄화 및 착화의 위험성이 증가하는 특성이 있다. 또한 히터의 주요 구성 요소인 카본 필름은 국부적인 손상, 축열 등이 발생할 경우 일부 영역에 집중된 고온 상태가 형성될 수 있으며, 이로 인해 발화될 조건이 충족될 가능성이 존재한다.

1.2 연구의 필요성 및 목적

현재까지 파티션 히터의 발화 메커니즘, 전기적 이상 조건에서의 열 분포 변화, 탄화 특성 등에 대한 과학적이고 정량적인 연구는 매우 부족한 실정이다. 특히 온도센서 고장 현황이 있는 사례에서는 기존 전기화재 감식기법으로는 발화 원인을 명확히 규명하기 어려우며, 화재조사 현장에서도 구조에 대한 이해 부족으로 인해 내부 손상 흔적이 간과되고 단순히 인접 가연물 발화로 결론지어지는 경우가 적지 않다.

파티션 히터는 구조상 공간을 분할하면서 복사열을 제공하는 특성을 갖고 있으나, 사용자가 히터를 접거나 담요 등으로 덮는 등의 비정상적 사용 시 열이 효과적으로 분산되지 못하고 내부에 축적되어 국부 과열이 발생할 수 있다.

이러한 상태가 장시간 지속될 경우 내부 발열체나 인접 가연물에 착화될 가능성이 있으며, 실제 화재 사례로 이어지는 경우도 보고되고 있다.

본 연구는 이러한 위험요소를 실험적으로 검증하고, 파티션 히터의 구조적·전기적 특성을 바탕으로 정상 및 비정상 사용 조건(과열, 온도센서 오작동 등)에서의 열 거동 및 발화 개연성을 규명함으로써, 화재 감식 현장에 적용 가능한 실증적 기준을 정립하는 것을 주요 목적으로 한다.

2 이론적 배경

2.1 파티션 히터의 구조적 특성

파티션 히터는 외형적으로는 유사한 형태를 보이지만, 제조사에 따라 내부 발열체 구성, 제어 회로의 유무 및 형태, 그리고 절연·보호 구조 등에서 실질적인 차이를 갖는다.

이러한 구조적 차이는 전기적 이상 발생 시 발화 가능성과 그 양상에 중대한 영향을 미치므로, 실험적 분석에 앞서 명확한 비교가 요구된다. 본 연구에서는 국내 시판 중인 A사, B사, C사 제품을 선정하여 이들의 구조적 특성과 제어 시스템을 분석하였다.

A사 제품은 발열 구조가 비교적 정교하게 구성되어 있으며, 내부에는 카본 발열부를 중심으로 동박 부스바(Copper Busbar) 및 실버 부스바(Silver Busbar)가 함께 적용되어 있다.

이는 전류의 분포를 보다 균일하게 하고, 발열체의 효율을 높이는 역할을 한다.

발열층은 절연성과 내열성을 고려하여 베이스 필름(PET)과 외부 보호용 라이넥스필름(Lynex Film)으로 다층 구조를 형성하고 있다. 제어 시스템은 온도제어장치 1개로 구성되어 있으며, 이는 설정 온도 도달 시 전류를 차단하는 기능을 수행한다. 외관, 내부 구조, 조작부는 Fig. 1, Fig. 4, Fig. 7에 각각 제시되어 있다.

B사 제품은 구조적으로 간소화된 형태이나, 발열체에는 실버 부스바만을 적용하여 전류 분포의 균일성을 확보하고 있다. 동박 부스바나 추가 절연층은 포함되지 않았으나, 온도제어장치를 2개 탑재하여 과열 방지 기능을 이중화한 것이 특징이다.

이러한 이중 제어 구조는 이상 과열 시 전기 차단 신뢰성을 높이는 역할을 한다. 해당 제품은 Fig. 2, Fig. 5, Fig. 8에 구조가 수록되어 있다.

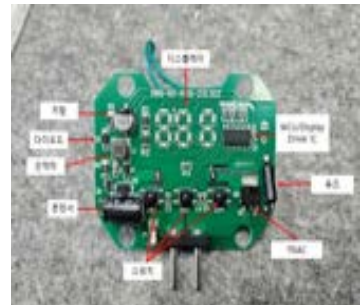
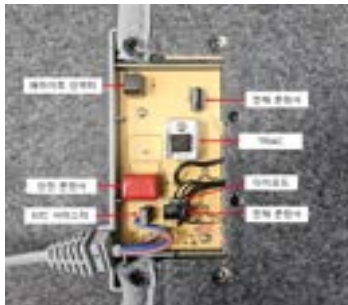
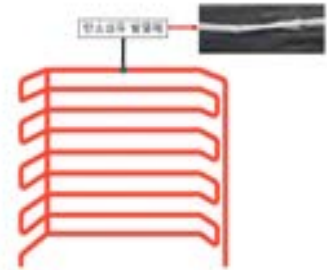
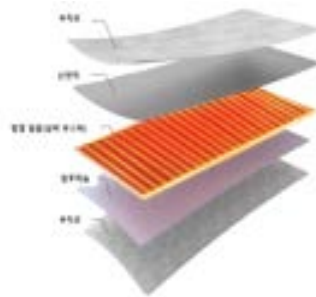
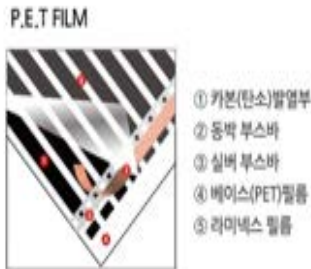
C사 제품은 상대적으로 단순한 구조를 지니며, 전통적인 필름 방식이 아닌 탄소섬유 형태의 열선(Carbon Fiber Heating Wire)을 발열체로 사용하고 있다.

이는 저항 발열 방식으로 열을 생성하는 구조이나, 발열 분포의 균일성이 떨어지고 국부 과열 가능성이 존재한다. 또한 온도제어장치가 별도로 탑재되어 있지 않아, 장시간 사용 시 과열 또는 발화 가능성에 노출될 우려가 있다.

관련 구조는 Fig. 3, Fig. 6, Fig. 9에 제시되어 있다.

이와 같이 A, B, C사 제품은 발열체 구성, 전도 전극의 종류, 절연층의 유무, 제어장치의 탑재 여부 등에서 뚜렷한 구조적 차이를 보인다.

이러한 특성은 전기적 이상 상황에서의 발화 조건, 국부 과열 발생 위치, 감식 가능 지표 등에 영향을 미치므로, 본 연구에서 수행하는 화재 재현 실험 및 감식 기준 제시를 위한 핵심 기초 자료로 기능한다.



2.2 파티션 히터의 작동 원리

파티션 히터는 전기에너지를 열에너지로 변환하는 저항 발열 원리를 기반으로 하며, 전원이 인가되면 발열체에 전류가 흐르면서 필름의 저항에 따라 열이 발생한다. 이 열은 반사판을 통해 전면으로 복사되어 공간을 가열한다. 필름은 탄소 물질이 일정한 패턴으로 코팅된 구조로, 넓은 면적에 열을 고르게 분포시킬 수 있는 장점이 있다. 그러나 필름이 손상되거나 일부 회로가 절단되면 전류가 좁은

부위로 집중되어 국부 과열이 발생할 수 있으며, 이는 주변 가연물이나 내부 부품의 발화를 유도할 수 있다. 과열을 방지하기 위해 대부분의 제품에는 NTC 서미스터나 바이메탈 등 온도센서가 내장되어 있으며, 설정 온도에 도달하면 회로를 차단하거나 전류 출력을 제어한다. 하지만 저가형이나 노후 제품에서는 센서 오작동이나 회로 손상으로 인해 발열이 지속되며, 이로 인해 열이 내부에 축적되어 발화 조건에 이를 수 있다. 또한 히터를 접거나 덮는 등의 비정상적인 사용 조건에서는 열이 효과적으로 분산되지 못하고 내부에 누적되어 장시간 작동 시 발화 위험을 크게 높이는 요인이 된다.

2.3 파티션 히터의 장단점

파티션 히터는 공간 분할과 전기 발열 기능을 결합한 복합형 난방 기기로서, 사무실이나 공공기관 등 다중 이용 공간에서 국소 난방에 적합하다. 사용자 가까이에서 직접 복사열을 제공하므로 에너지 손실이 적고, 대류식 난방보다 효율적이다. 별도의 난방기기 설치 없이 공간 분할과 난방을 동시에 만족시킬 수 있으며, 전원만 연결하면 바로 사용 가능한 간편함도 장점이다. 외관은 일반 사무용 파티션과 유사해 공간 미관을 해치지 않으며, 저소음 작동으로 업무 환경을 방해하지 않는다. 유지관리도 용이해 관리 부담이 적다.

그러나 구조적·전기적·재료적 특성상 한계도 존재한다. 발열체인 필름은 손상되거나 접힘, 접촉 불량 발생 시 전류 집중에 따른 국부 과열과 열 축적이 발생해 인접 가연물의 발화로 이어질 수 있다. 또한 외장재로 사용되는 부직포, MDF, ABS 등은 열에 취약한 가연성 재료로, 과열 시 연소되거나 유해가스를 발생시킬 수 있다.

제조사 간 설계 차이, 온도 센서 제어방식, 안전장치 정밀도 등의 차이로 인해 외형은 유사해도 성능과 안전성에는 큰 차이가 존재한다. 특히 히터를 접거나 덮개를 씌우는 등의 비정상적 사용은 열 축적을 유도하여 발화 위험을 높이며, 장시간 과열 시 실제 화재로 이어질 수 있다.

2.4 선행연구 검토

파티션 히터의 화재 위험성에 대한 연구는 국내에서 아직 초기 단계이며, 구조적 특성과 발화 메커니즘을 체계적으로 다룬 학술 연구는 매우 제한적이다. 기존 연구는 대부분 전기 난방기기의 과열, 단락, 접촉 불량 등에 초점을 맞추고 있으며, 카본 필름이나 탄소섬유 발열체를 사용하는 파티션 히터의 특수 구조와 사용 조건에 따른 발화 가능성을 직접적으로 분석한 사례는 드물다.

2022년 부산진소방서의 재현 실험에서는 파티션 히터를 접거나 밀폐된 공간에서 사용할 경우 내부 온도가 상승하고 통전 시간이 길어질수록 발화 위험이 증가함을 확인하였다. 실험은 밀폐도 변화에 따른 온도 상승, 통전 과부하, 카본 필름 절손 등의 조건에서 발화 여부를 분석하였으며, 구조적 위험 요소가 화재로 이어질 수 있음을 시사하는 기초 자료를 제공하였다. 또한 파티션 히터가 일반 히터보다 안전하다는 소비자 인식과 달리, 복사열 차단에 취약하고 비정상적 사용 시 축열이 쉽게 발생해 실제 화재 사례도 증가하는 추세다.

그러나 축열, 발열체 손상, 센서 고장, 전기 회로 불균형 등 내부 결함 조건에 대한 정량적 검증은 아직 부족하다. 이에 본 연구는 기존 연구의 한계를 보완하고, 실험을 통해 축열 조건과 발화 간의 상관성을 규명함으로써 화재 감식의 실증적 근거와 안전기준 개선을 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

3 화재사례

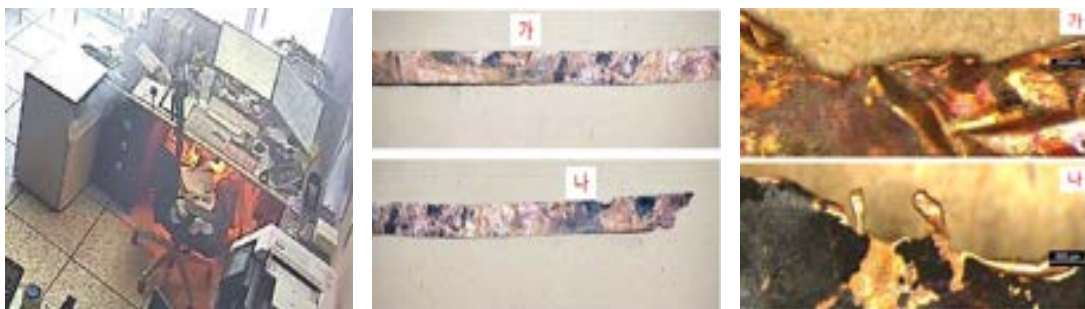
3.1 화재개요

2025년 1월 7일 13:46경 강원특별자치도 **시 **동 소재의 아파트 관리사무소에서 화재가 발생하여 관리사무소 1동 6㎡ 소실, 40㎡ 그을음 및 수손 피해가 발생하고 책상, 교환기 등 집기 비품이 소실되어 11,717천 원의 재산 피해가 발생하였다.

3.2 최초 발화지점 및 화재원인 추론

현장 조사를 통해 수집된 CCTV 영상, 감정 자료, 그리고 잔존물 분석 결과를 종합해볼 때, 최초 발화지점은 책상 하부에 설치된 파티션 히터 본체 내부로 추정된다. 특히 발열체가 위치한 하단부 중앙 영역에서 가장 심한 탄화 흔적이 집중적으로 관찰되었고, 주변 가연물의 연소 양상 역시 해당 부위를 중심으로 확산되었다.

국립과학수사연구원의 감정 결과에 따르면, 파티션 히터 내부 동박배선에서 1차 단락흔이 식별되었고, 해당 부위는 복사열 차단 환경에 장시간 노출되어 있었다. 특히 제품 손상의 가능성, 온도제어 센서의 오작동 가능성, 장시간 통전 상태, 가연성 피복물(무릎 담요)의 덮개 상태 등이 중첩되어 히터 내부의 열 축적 조건이 충분히 형성되었을 것으로 판단된다. 이에 따라 파티션 히터의 동박배선에서 원인을 알 수 없는 단락에 의해 착화된 후 인접 가연물에 연소 확대된 화재로 추정되었다. 관련 사진은 <Fig. 10>를 참고하기 바란다.



(a) Fire scene

(b) Partition heater emotional results

Fig. 10 Fire case

4 화재 재현실험

4.1 실험개요

4.1.1 실험준비

본 연구는 파티션 히터의 발화 가능성을 다양한 조건에서 재현함으로써 비정상적 사용 또는 제품 손상, 전기적 결함 등 실제 화재로 이어질 수 있는지를 검증하기 위한 실험을 수행하였다.

실험은 실내에서 파티션 히터가 실제로 설치·사용되는 환경을 유사하게 구현한 조건에서 진행되었으며, 각 제조사의 제품 특성을 반영하여 실험을 진행하였다.

실험 세트는 Fig. 11~13와 같다.



Fig. 11 Experimental Set. (A사) Fig. 12 Experimental Set. (B사) Fig. 13 Experimental Set. (C사)

실험은 실내 책상과 유사한 환경을 기준으로 하여 구성되었다. 실험용 책상은 가로 150cm, 세로 75cm, 높이 70cm의 규격으로 제작되었으며, 파티션 히터는 책상 하부에 설치하여 실제 사용 환경과 유사한 조건에서 실험하였다. 실험에는 국내에서 시판 중인 세 종류의 파티션 히터(A사, B사, C사 제품)가 사용되었다.

각 제품은 구조적·전기적 특성에서 차이를 보이며, 다음과 같은 특징을 가진다. A사 제품은 동박 부스바, 실버 부스바, 카본 발열부, 베이스 필름, 라이넥스 필름으로 구성되며, 온도제어장치 1개가 탑재되어 있다.

B사 제품은 실버 부스바만으로 구성되어 있으며, 온도제어장치 2개를 통해 과열 방지 기능이 이중화되어 있다. C사 제품은 탄소섬유 형태의 열선 구조를 사용하며, 온도제어장치가 없는 구조이다.

촬영 및 기록 장비는 Table 1과 같이 디지털카메라, 캠코더, 열화상 카메라를 사용하여 각 실험의 발열 및 발화, 연소 과정을 촬영 기록하였으며, 실체현미경 등 기타 감식·감정 기구 등을 보조적으로 활용하였다.

Table 1. Equipment used in the experiment

Division	Picture	Model Name	Specifications
Partition heater(A)		DP-PH70X	Rated : 220V~, 60Hz, 165W Maximum Heat Temperature :
Partition heater(B)		AD-3000HDF	Rated : 220V~, 60Hz, 195W Maximum Heat Temperature :
Partition heater(C)		HB-002	Rated : 220V~, 50Hz, 200W Maximum Heat Temperature :
Video Camera Set		HC-VXF1	4K Ultra HD Quality 25mm wide-angle lens
Thermal Imaging camera		FLIR T420	-20C to 1,200C Temperature Detection
Infrared thermal imaging camera		Hikmicro B10	Measurement temperature range : -20~550℃

4.1.2 실험 방법 및 순서

실험은 총 세 가지 조건으로 나누어 진행되었으며, 각 실험의 목적은 다음과 같다.

1. 정상 작동 조건에서의 온도 변화 관찰

각 파티션 히터를 정상적인 상태로 작동시켜 시간 경과에 따른 표면 온도 및 내부 발열체 온도 분포를 측정하였다. 이는 정상 사용 조건에서의 발열 특성을 정량적으로 파악하고, 구조별 차이를 비교 분석하기 위한 기초 데이터를 확보하는 데 목적이 있다.

2. 비정상 조건(축열 환경 및 온도 제어장치 고장) 실험

파티션 히터를 일부 접거나 담요 등으로 덮는 비정상적 사용 조건을 구성한 후, 통전을 시켜 열 축적과 과열 상태를 유도하고, 이 과정에서 온도제어장치가 정상적으로 작동하는지를 확인하고, 온도 제어 기능이 작동하지 않도록 설정한 조건에서도 동일한 방식으로 장시간 통전을 실시하여, 실제 화재 사례와 유사한 축열 환경에서의 발화 가능성을 실험적으로 평가하였다.

3. 부품 손상(동박 부스바, 실버 부스바, 발열필름, 열선 등)에 따른 발화 가능성 실험

각 제품의 발열체 및 전도 부품에 물리적 손상을 가한 뒤 통전하였을 때, 국부 과열, 전기적 스파크(아크), 탄화 발생 여부 등을 관찰하였다. 이 실험은 구조 손상이 발화 조건을 어떻게 유발하는지를 실증적으로 규명하고 특이 흔적을 도출하는 데 목적이 있다.

4.2 제1실험(정상 작동 조건에서의 온도 변화 관찰)

4.2.1 실험 방법

파티션 히터의 정상 작동 상태에서 온도 변화를 측정하고, 각 제품의 발열 특성을 비교 분석하기 위해 수행되었다. 실험은 가로 150cm, 세로 75cm, 높이 70cm의 일반적인 사무용 책상 아래에 파티션 히터를 설치한 후 진행되었으며, 주변 환경은 통제된 공간에서 일정한 온도 및 습도를 유지한 상태로 구성하였다.

실험 대상은 구조적 특성과 온도제어장치 구성에 따라 구분된 A사, B사, C사 제품으로 선정하였다. A사 제품은 동박, 실버부스바, 카본 발열부, 베이스 필름, 라이넥스 필름으로 구성되어 있으며, 온도제어장치는 1개가 부착되어 있고 B사 제품은 실버부스바로만 구성되어 있고, 온도제어장치는 2개가 부착되어 있으며 C사 제품은 탄소섬유 형태의 열선 구조이며, 온도제어장치는 부착되어 있지 않다.

각 제품은 전원을 인가한 후 정상 작동 상태에서 일정 시간 동안 온도계(열전대)를 이용하여 히터 표면 온도와 주변 온도를 측정하였다. 측정은 10초 간격으로 180분 동안 실시하였으며, 동일한 조건에서 3회 반복하여 평균값을 도출하였다.

4.2.2 실험 결과

A사 제품은 정상 작동 상태에서 실험한 결과, 히터의 평균 설정 온도에 도달하는 데 약 5분가량 소요되었으며, 중앙부에 해당하는 2번 센서에서 최고 온도인 62.0℃가 측정되었다.

좌측 1번과 우측 3번에서는 각각 57.6℃와 54.7℃로 비교적 균일한 발열 분포를 보였다. 4번(바닥)은 32.0℃, 5번(내부 공간)은 31.8℃, 6번(책상 후면)은 30.0℃로 기록되어 주변 구조물에 의한

온도 상승은 크지 않았다. 해당 제품은 온도제어장치가 정상적으로 작동하여 설정 온도에 도달한 이후에는 일정한 온도를 유지하며 안정적으로 발열하였으며, 실험 과정에서 발화나 과열 등의 이상 현상은 발생하지 않았다.

B사 제품은 평균 설정 온도에 약 5분 만에 도달하였으며, 중앙부 2번에서 최고 온도인 61.2℃를 기록하였다. 1번과 3번에서는 각각 58.8℃ 및 57.3℃를 나타내어 열이 전체적으로 잘 분산되는 양상을 보였다.

바닥면 4번은 31.3℃, 5번(내부 공간)은 32.1℃, 6번(책상 후면)은 30.3℃로 측정되었다. 본 제품 또한 온도제어장치가 탑재되어 있어 발열이 일정 수준에서 조절되었고, 실험 과정에서 발화나 과열 등의 이상 현상은 발생하지 않았다.

C사 제품은 정상 작동 상태에서 실험한 결과, 히터의 평균 설정 온도까지 약 5분이 소요되었으며, 중앙부(2번)에서 최고 온도 62.7℃를 기록하였다. 좌측(1번)은 45.8℃, 우측(3번)은 59.3℃로, 발열 분포에 일부 비대칭성이 나타났다. 4번 바닥은 32.4℃, 5번 내부 공간은 27.6℃, 6번 책상 후면은 32.2℃로 측정되었다.

실험에 사용된 C사 제품은 온도제어장치가 탑재되어 있지 않았으나, 축열 조건이 형성되지 않은 개방된 실험 환경과 탄소섬유 발열체의 특성으로 인해 온도는 일정 수준에서 유지되었다.

탄소섬유 형태의 열선은 발열에 따른 저항 증가로 전류가 자연스럽게 제한되는 자기제어 발열(Self-regulating) 특성을 갖는 경우가 많아, 본 제품 또한 이러한 물리적 특성에 따라 발열이 안정적으로 유지된 것으로 보인다. 실험 과정에서 발화 등 이상 현상은 관찰되지 않았다.

세 제품 모두 공통적으로 바닥면 4번과 책상 후면 6번 부위에서는 온도 상승이 제한적으로 나타났다으며, 외부 구조물의 발열 영향은 미미하였다.

또한 모든 제품은 정상 작동 조건 하에서 설정 온도에 도달한 후 안정적으로 온도를 유지하면서 발화나 이상 발열 현상은 없었다.

온도계(열전대)의 부착 위치, 실험 사진, 온도 변화는 <Fig. 14, 15>를 참고하기 바란다.

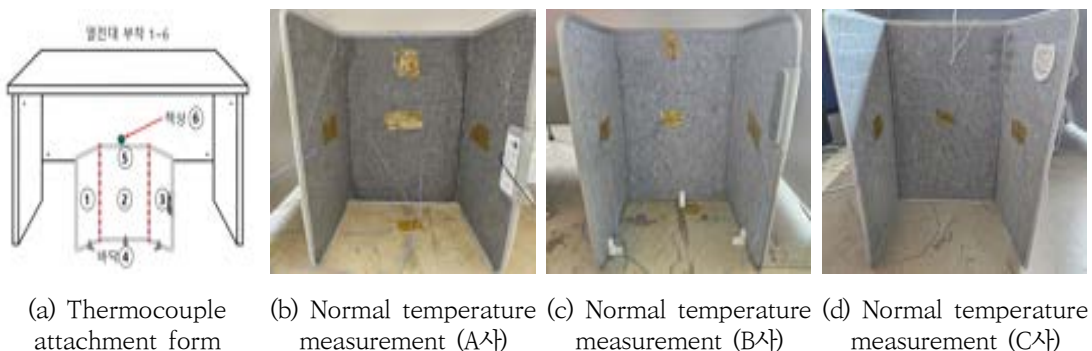
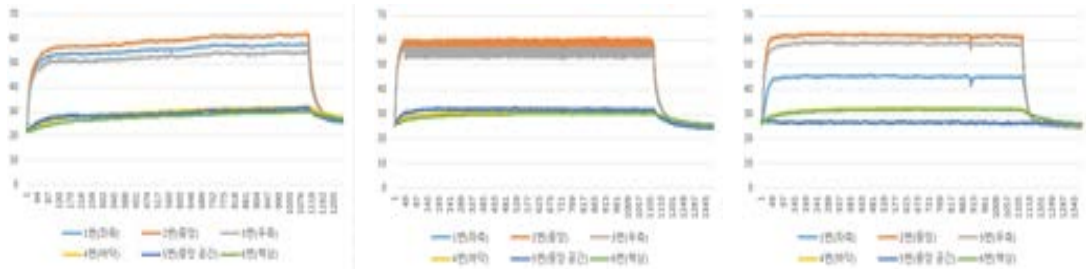


Fig. 14 Experimental photograph



(a) Temperature Graph (A사) (b) Temperature Graph (B사) (c) Temperature Graph (C사)

Fig. 15 Normal Temperature Graph

4.2.3 실험 결과 분석

모든 제품은 사용자가 설정한 온도에 도달하면 안전장치(온도조절장치 및 과열차단기 등)가 작동하여 더 이상 온도가 상승하지 않도록 발열을 제어하는 것으로 분석된다. A사 및 B사 제품은 온도 제어장치가 정상적으로 작동하여 설정 온도 도달 이후 일정한 온도를 유지하였으며, 특히 C사 제품은 온도제어장치가 부착되어 있지 않음에도 불구하고, 탄소섬유 열선의 구조적 특성과 정상적 사용의 조건의 개방성으로 인해 온도는 일정 수준 이상으로 상승하지 않았다. 이는 탄소섬유 발열체가 가지는 자기제어 발열 특성과 자연 방열 조건이 복합적으로 작용하여 과열을 억제한 결과로 보인다. 이는 파티션 히터가 정상 사용 조건에서는 자체 제어 기능 혹은 외부 환경에 의해 온도 안정화를 유지하는 구조임을 나타낸다.

4.3 제2실험(비정상 조건 - 축열 환경 및 온도 제어장치 고장) 실험

4.3.1 실험 방법

파티션 히터의 비정상적 사용 조건, 축열 환경 및 온도 제어장치의 기능이 작동하지 않는 상태를 설정하여 실제 화재 발생 가능성을 평가하기 위한 실험으로 구성하였다. 실험 세트의 구성 및 열전대 부착 위치와 온도 측정은 앞선 제1실험과 동일하게 적용하였으며, 열전대 6개를 히터의 좌·우·중앙 내부면, 바닥면, 히터 내부 공간, 책상 후면에 부착하여 온도 분포를 측정하였다. 온도 측정은 10초 간격으로 측정하였으며, 발화 또는 실험 종료 시점까지 연속으로 기록하였다.

실험 대상인 A사, B사, C사 제품은 각각 동일한 방식으로 두 조건에 따라 실험을 진행하였다.

첫 번째는 사용자가 히터를 일부 접거나 담요 등을 덮는 비정상적인 사용 상태를 구성한 후 통전하여, 축열 환경에서 제품 내 온도제어장치가 정상적으로 작동하는지를 관찰하였다.

두 번째는 위와 동일한 축열 조건을 유지한 상태에서, 온도제어장치가 작동하지 않도록 설정하여 히터가 장시간 통전되도록 함으로써 제어 불능 상태에서의 과열 및 발화 가능성을 실험하였다.

4.3.2 실험 결과(축열 - 온도 제어장치 정상 작동)

파티션 히터를 비정상적인 사용 조건(3면을 접은 후 담요로 덮은 축열 상태) 하에 통전하고, 온도 제어장치의 작동 여부에 따라 온도 상승 및 발화 가능성을 비교·관찰하였다.

A사 제품은 축열 상태에서 통전 후 약 20분 만에 5번 센서(중앙 내부 공간)에서 최고 온도 88.5℃를 기록하였다.

1번, 2번, 3번, 5번 센서에서 온도가 빠르게 상승하였으며, 최고 온도 도달 이후 온도는 일시적으로 감소하였다가 다시 소폭 상승하는 변화를 반복하며 평균 온도 수준에서 유지되는 양상을 보였다. 평균 온도는 1번 : 66℃, 2번 : 76℃, 3번 : 63℃, 4번 : 18℃, 5번 : 83℃, 6번 : 24℃로 나타났다. 온도제어장치는 정상적으로 작동하여 화재는 발생하지 않았다.

B사 제품은 통전 후 5분 만에 2번 센서(중앙부)에서 최고 온도 76.1℃에 도달하였다. 이후 온도는 일시적으로 감소하였다가 다시 소폭 상승하는 변화를 반복하며 평균 온도 수준에서 유지되는 양상을 보였다. 이는 온도제어장치가 정상적으로 작동하여 과열을 효과적으로 방지한 결과로 판단된다. 3시간 동안 측정된 평균 온도는 1번 : 54℃, 2번 : 68℃, 3번 : 53℃, 4번 : 19℃, 5번 : 51℃, 6번 : 24℃이며, 화재는 발생하지 않았다.

C사 제품은 온도제어장치가 탑재되어 있지 않은 상태에서 축열 조건으로 실험을 진행한 결과, 통전 후 5분 만에 1번 센서(좌측)에서 100℃를 초과하였으며, A사 및 B사 제품에 비해 온도 상승 속도가 매우 빠르게 나타났다. 15분 경과 시점 150℃부터 가연성 가스 특유의 냄새가 감지되었으며, 30분 경과 후에는 표면 온도가 200℃를 초과하고 히터 표면 및 담요에서 연소 흔적이 확인되었다.

40분 경과 후 1차 적으로 화재가 발생하였으며, 화재 발생 후 2차 적으로 전원선 단락이 일어나 전원이 차단되면서 실험이 종료되었다. 최종 축열 시 측정된 최고 온도는 1번 : 238.4℃, 2번 : 202.8℃, 3번 : 199.2℃, 4번 : 22.1℃, 5번 : 208.1℃, 6번 : 25.8℃로 기록되었다.

이와 같이 온도제어장치의 유무와 기능 상태는 축열 환경에서의 발화 위험성에 중대한 영향을 미쳤으며, 특히 제어장치가 없는 C사 제품은 단시간 내 고온에 도달하여 화재로 이어지는 위험성이 매우 높은 것으로 확인되었다. 실험 사진, 온도 변화는 <Fig. 16~20>를 참고하기 바란다.



(a) heat storage experiment (A사)

(b) Results of heat storage experiments (A사)

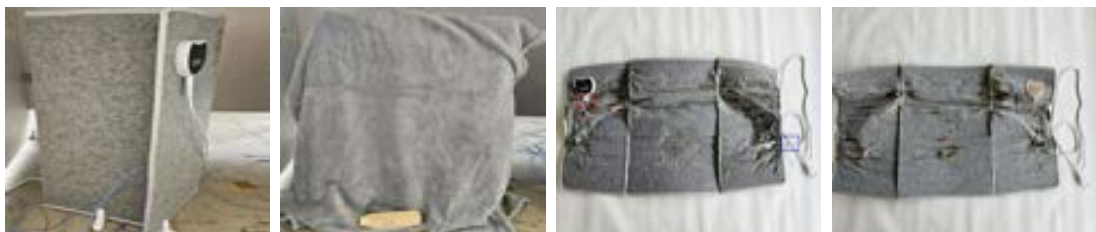
Fig. 16 Experimental photograph



(a) Heat storage experiment (B사)

(b) Results of heat storage experiments (B사)

Fig. 17 Experimental photograph



(a) Heat storage experiment (C사)

(b) Results of heat storage experiments (C사)

Fig. 18 Experimental photograph

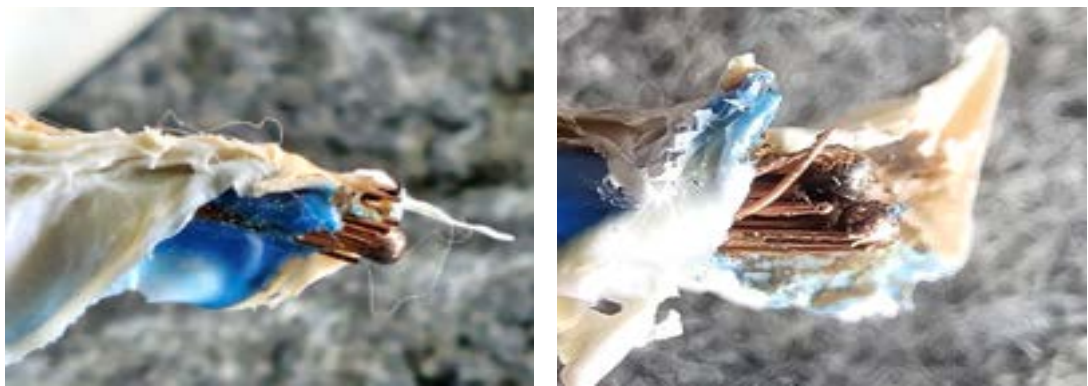
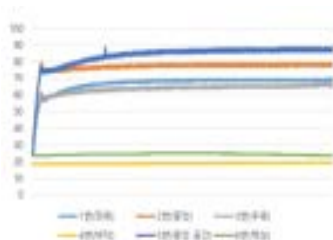
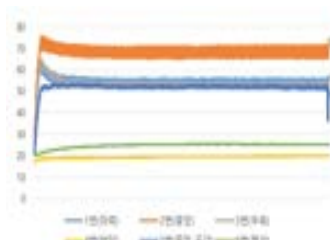


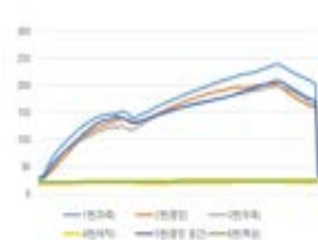
Fig. 19 Power line short circuit (C사)



(a) Temperature Graph (A사)



(b) Temperature Graph (B사)



(c) Temperature Graph (C사)

Fig. 20 Normal temperature control unit Graph

Fig. 23 Abnormal temperature control unit graph

4.3.3 실험 결과 분석

A사와 B사 제품은 축열 상태에서의 실험 결과, 정상 작동 조건보다 다소 높은 온도까지 상승하는 경미한 과열 현상은 관찰되었으나, 온도제어장치가 정상적으로 작동하면서 일정 온도 이상으로의 급격한 상승은 억제되었고, 전반적으로 안정적인 발열 상태를 유지하였다. A사, B사의 제품은 온도 변화가 반복적으로 조절되며 과열을 방지하는 제어 패턴이 뚜렷하게 나타났다. 두 제품 모두 최고 온도는 70℃~88℃ 수준으로, 가연물에 착화될 가능성이 낮은 범위에서 작동을 유지하였으며 화재 징후는 관찰되지 않았다.

반면, 온도제어장치가 없는 C사 제품은 축열 환경에서 급격한 온도 상승을 보였고, 일정 시간이 경과 하면서 연기, 가연성 가스 등 발화 전조 현상이 뚜렷하게 나타났다. 30분 경과 시 200℃를 초과하였으며, 40분 후에는 화재가 발생하였다. 이는 온도제어장치가 없는 제품이 열 축적 환경에서 자율적인 온도제어 기능이 없을 경우, 단시간 내 발화에 이를 수 있음을 명확히 보여준다.

이 실험을 통해 축열 환경은 히터 내부 온도를 급격히 상승시키는 위험 요인이며, 이를 제어할 수 있는 온도 제어장치의 유무 및 성능이 화재 발생 여부를 결정짓는 핵심인 것으로 확인되었다.

4.3.4 실험 결과(축열 - 온도 제어장치 고장)

A사와 B사 제품을 대상으로 축열 조건 하에서 온도제어장치가 정상적으로 작동하지 않는 상황을 가정하여 실험을 하였다. 두 제품 모두 히터를 일부 접고 담요로 덮은 상태에서 장시간 통전하며, 온도 상승 양상과 발화 가능성을 관찰하였다.

A사 제품은 온도제어장치가 1개만 탑재된 구조로, 본 실험에서는 해당 제어장치가 작동하지 않도록 설정하였다. 통전 후 약 10분 만에 1번 센서(좌측)에서 온도가 100℃를 초과하였으며, 이후 지속적으로 온도가 상승하여 40분 경과 시점에는 152℃를 기록하였고, 이때 부터 가연성 가스 특유의 냄새가 감지되었다.

60분 경과 시에는 히터 표면 온도가 200℃를 초과하면서 표면 소재와 담요에서 연소 흔적이 나타났다. 고온으로 인한 탄화가 진행되었다. 최종적으로 누적된 열 환경에서 측정된 최고 온도는 1번 : 222.5℃, 2번 : 230.2℃, 3번 : 193.4℃, 4번 : 23.6℃, 5번 : 239.9℃, 6번 : 30.8℃로 기록되었다. 발화 직전까지 급격한 온도 상승이 이어졌으며, 실제 화재로 이어질 가능성이 매우 높은 상태에 도달한 것으로 분석된다.

B사 제품은 온도제어장치가 2개 탑재된 구조로, 실험에서는 모두 고장 상태를 유도하였으나, 통전 중 하나의 제어장치가 예외적으로 작동하며 과열을 억제하는 역할을 일부 수행하였다. 통전 후 10분 만에 1번 센서에서 100℃를 초과하였고, 26분 경과 시 약 157℃에 도달하였다. 이후 제어장치 1개가 작동하면서 온도가 급격히 하강하여 10분 내 100℃ 이하로 떨어졌고, 40분 시점에는 59℃까지 감소하였다.

이후 다시 온도가 일정 수준까지 상승했다가 하강하는 패턴을 반복하였으며, 히터 표면에는 일부 눌음 흔적이 관찰되었으나 화재로 이어지지는 않았다. 최종 측정된 최고 온도는 1번 : 157.3℃, 2번 : 156.1℃, 3번 : 139.1℃, 4번 : 23.8℃, 5번 : 178.3℃, 6번 : 28.2℃로 기록되었다.

또한, 본 제품은 두 개의 온도제어장치가 모두 고장난 상태에서는 제품 자체의 보호 회로가 작동하여 전원이 아예 인가되지 않도록 설계되어 있다. 실험 사진, 온도 변화는 <Fig. 21~24>를 참고하기 바란다.



(a) heat storage experiment (A사)

(b) Results of heat storage experiments (A사)

Fig. 21 Experimental photograph



(a) heat storage experiment (B사)

(b) Results of heat storage experiments (B사)

Fig. 22 Experimental photograph

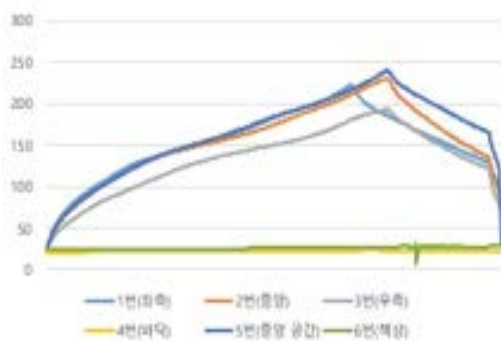


Fig. 23 Temperature Graph (A사)

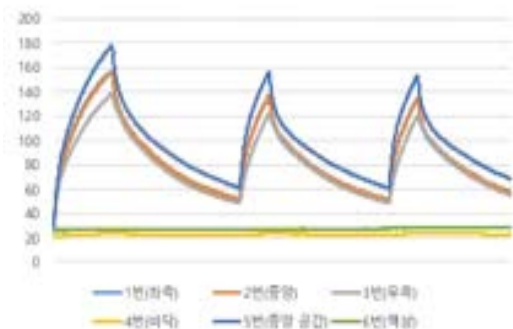


Fig. 24 Temperature Graph (B사)

4.3.5 실험 결과 분석

B사 제품이 A사 제품에 비해 상대적으로 이중 안전장치 구조로 인한 온도 제어 능력이 우수함을 나타내며, 단일 제어장치만 탑재된 A사 제품은 고장 시 발화 위험이 빠르게 증가할 수 있음을 실증적으로 보여준다. 다만 B사 제품 역시 온도제어장치 고장이 장기간 지속될 경우, 누적 축열로 인해 화재 위험으로 이어질 가능성이 존재한다.

4.4 제3실험(부품 손상 - 동박 부스바, 실버 부스바, 발열필름, 열선 등)에 따른 발화 가능성 실험

4.4.1 실험 방법

제3실험은 파티션 히터 내부 발열 구성 요소에 손상을 가하고 수분을 첨가하여, 이로 인한 전기적 이상 및 발화 가능성을 확인한다.

실험은 A사, B사, C사 제품에 대해 동일한 조건으로 진행되었고 각 제품의 발열 부위(동박 부스바, 실버 부스바, 발열필름, 탄소섬유 열선 등)를 커터칼을 이용해 국부적으로 긁는 방식으로 일부 손상시킨 후, 해당 부위에 물 분무를 균일하게 도포하였다.

이후 전원을 인가하여 통전 중 손상 부위에서의 발열 특성, 연기, 스파크, 탄화, 발화 등의 이상 반응 여부를 관찰하였다.

4.4.2 실험 결과

A사 제품은 발열필름에 국부적인 손상을 가한 후 수분을 침투시키고 통전한 결과, 손상 부위에서 최초로 연기가 발생하였고, 이어서 상처를 따라 지속적인 스파크가 관찰되었다. 해당 부위의 최고 온도는 363℃까지 상승하였다. 반면, 동박 부스바에 동일한 방식으로 손상을 가하고 수분을 침투한 실험에서는 연기나 스파크가 발생하지 않았다.

B사 제품은 실버 부스바 단일 구조로 구성되어 있으며, 부스바에 손상을 가한 후 수분을 침투시켜 통전한 결과, A사 제품과 유사하게 최초 연기가 발생한 후 손상 부위를 따라 스파크가 지속적으로 발생하였다.

스파크가 발생한 부위는 최고 온도 526℃를 기록하였으며, 매우 높은 온도에서 국부적인 과열 현상이 발생하였다.

C사 제품은 탄소섬유 열선 구조로, 손상 부위에 수분을 침투한 후 통전한 결과, 마찬가지로 초기 연기 발생 후 손상 부위를 따라 스파크가 발생하였다.

해당 부위의 최고 온도는 246℃로 측정되었으며, A사 및 B사 제품에 비해 다소 낮은 수준이지만, 국부 발열 및 스파크 현상은 뚜렷하게 나타났다. 실험 사진, 온도 변화는 <Fig. 25~29>를 참고하기 바란다.



Fig. 25 Heat Film Damage (A사)



Fig. 26 Damage to copper foil bus bar

Fig. 27 Copper foil bus bar exterior flame damage



Fig. 28 Silver Busbar Damage (B사)

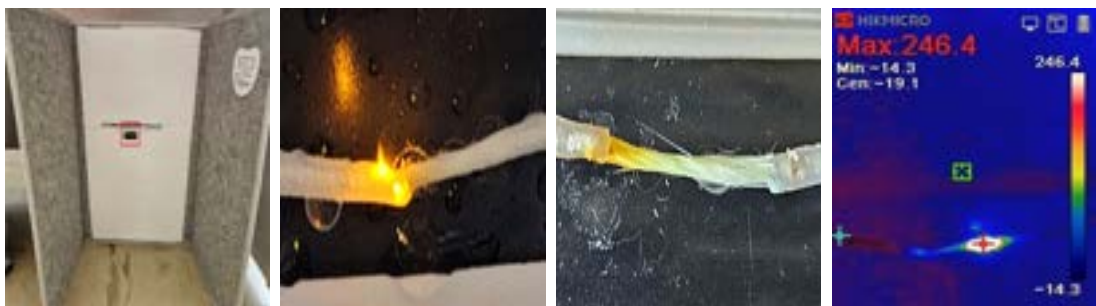


Fig. 29 Carbon fiber heating element damage (C사)

4.4.3 실험 결과 분석

파티션 히터의 발열 부위에 손상을 가하고 수분을 침투시킨 결과, 제품 구조에 따라 발화 위험성과 전기적 반응의 차이가 나타났다.

A사 제품은 발열필름 손상 시 연기와 스파크가 발생하며 363℃까지 온도가 상승하였으나, 동박 부스바 손상에서는 이상 반응이 관찰되지 않았다. 다만, 동박 부스바는 화재 등 외부 고온에 노출될 경우 자체 용융되며, 이로 인해 전기적 단락으로 오인될 가능성도 존재한다.

B사 제품은 실버 부스바에 손상 및 수분 침투 시 최고 온도 526℃와 강한 스파크가 발생하여 구조는 단순하지만 발화 위험이 높은 것으로 나타났다.

C사 제품은 탄소섬유 열선 구조로, 스파크와 연기가 발생하였으나 최고 온도는 246℃로 비교적 낮았다. 이러한 결과는 손상 및 수분 침투가 구조와 무관하게 발화 위험을 유발할 수 있다.

5 결론 및 고찰

본 연구에서는 파티션 히터의 구조적 차이, 비정상적 사용 조건, 전기적 이상 및 부품 손상에 따른 발화 가능성을 분석하고, 이에 대한 감식기법 적용 가능성을 평가하고자 세 가지 실험을 수행하였다. 그 결과는 다음과 같다.

첫째, 정상 사용 조건에서는 제품에 내장된 온도제어장치가 일정 온도에 도달하면 발열을 제한하는 기능을 수행함으로써 발화를 억제하는 것으로 확인되었다. 특히 A사 및 B사 제품은 제어장치의 개수나 제어 방식에 차이는 있었으나, 정상 작동 조건 하에서는 모두 발화에 이르지 않았다. C사 제품은 온도제어장치가 부재함에도 불구하고 실험 조건에서 축열이 충분히 발생하지 않아 발화가 발생하지는 않았으나, 구조적으로 위험성이 내포되어 있음이 확인되었다.

둘째, 비정상적인 사용 조건(히터를 접거나 덮는 등 축열 환경)에서는 온도제어장치의 작동 여부가 발화 여부에 결정적인 영향을 미쳤다. 온도제어장치가 정상 작동하는 경우에도 일시적인 과열은 발생하였으나 온도는 제한된 범위 내에서 유지되었고, 제어장치가 작동하지 않거나 고장난 조건에서는 A사 제품에서 실제 연소가 발생하였다.

반면, B사 제품은 온도제어장치가 2개 탑재되어 있어 1개가 예외적으로 작동하면서 발화를 방지하였고, 두 제어장치가 모두 고장난 경우에도 전원 자체가 인가되지 않도록 차단 설계가 되어 있어 구조적 안전성이 확인되었다. 다만, 장시간 사용 중 온도제어장치가 부분적으로만 작동하거나 반복적으로 고장이 발생할 경우, 축열로 인한 발화 가능성은 여전히 존재하는 것으로 판단된다.

C사 제품은 온도제어장치가 탑재되어 있지 않은 상태에서 축열 환경이 형성되자, 통전 후 약 40분 경과 시점에 히터 표면과 덮개 담요에서 연소가 시작되었고, 이후 전원선 단락과 함께 실제 화

재로 이어졌다. 이는 온도제어장치가 없는 제품의 경우 열 축적이 일정 수준 이상 진행될 경우 발화로 직결될 수 있으며, 구조적 위험성이 크다는 것을 보여준다.

셋째, 발열 부품에 손상을 가하고 수분을 침투시킨 조건에서는 세 제품 모두에서 스파크, 연기, 국부 고온이 발생하였다. 특히 실버 부스바로 구성된 B사 제품은 최고 526℃의 고온이 측정되었으며, 가장 강한 발열 반응이 나타났다.

A사 제품의 발열 필름 또한 국부 손상 시 고온 발열과 스파크가 발생하였다. 동박 부스바는 실험 조건에서는 안정적이었으나, 고온 환경에서는 용융되어 단락 흔적과 유사한 형상을 남길 수 있어 감식 시 오인 가능성도 존재한다.

C사 제품은 최고 온도는 상대적으로 낮았으나 스파크와 연기가 발생하여 구조적 위험성이 완전히 배제되지는 않았다. 손상과 수분 침투가 복합적으로 작용할 경우 세 제품 모두 발화로 이어질 수 있는 전기적 위험성이 존재하는 것으로 확인되었다.

본 연구를 통해 파티션 히터의 발화 위험성은 제품의 구조와 부품 구성, 온도제어장치의 유무 및 작동 상태, 사용 환경 등에 따라 현저히 달라질 수 있으며, 화재 감식 시 제품 내부 구조와 열 축적 가능성, 손상 부위 및 작동 이력 등을 종합적으로 분석해야 한다는 점이 강조된다.

향후에는 각 구성 부품별 전기적 손상 흔적과 화재 흔적을 정량적으로 비교할 수 있는 실험적 감식기준 확립이 요구되며, 제품 안전성 확보를 위한 구조적 설계 보완도 병행되어야 할 것이다.

참고문헌

- 1) 국가화재정보시스템(www.firedata.go.kr), 소방청 국가화재정보센터
- 2) 강원도소방본부, “화재조사(감식) 알고리즘”, 2007
- 3) 문옥섭·박정주, “화재감식평가 실기”, (주)시대고시기획, 2021
- 4) 제품안전정보센터(<https://www.duplex.co.kr>), “듀플렉스, 사용설명서”
- 5) 제품안전정보센터(<https://airdesign7.com>), “에어디자인, 사용설명서”
- 6) 김일권, 신문선, 조주영, “농업용 난방 필름에 의한 발화 가능성과 화재감식기법 연구, pp. 1-18, 2021.
- 7) 겨울철 난방필름 발화가능성에 관한 연구(허선집, 인천공항소방서)
- 8) National Fire Protection Association, “NFPA 921 : Guide for Fire and Explosion Investigations”, 2021.



제 5 장 | 남부권



☑ 광역화재조사 1팀 >>>

파티션 히터의 비정상적 사용과 전기적 이상에 따른 발화 가능성과 감식기법에 관한 연구

☑ 광역화재조사 2팀 >>>

음식물 처리기 운전 조건별 화재 징후 분석

☑ 광역화재조사 3팀 >>> ☆ '25년도 강원 화재재현실험 연구논문 발표대회 우수

전열온상선 설치 방법에 따른 화재 발생 가능성 분석

음식물 처리기 운전 조건별 화재 징후 분석

안정민¹⁾, 최연규, 이성용, 김지은

강원특별자치도 소방본부 남부권광역화재조사 2팀

Analysis of Fire Indicators by Operating Conditions in Food Waste Units

Jung-Min An[†], Yeon-kyu Choi, Sung-yong Lee, Ji-eun Kim

Southern Wide-Area Fire Investigation, Gangwon State Fire Headquarters

ABSTRACT

This study quantifies precursor signals of fire hazards in household microbial food waste processors under realistic operating conditions. Three scenarios were tested : (1) sealed high-temperature operation to evaluate internal heat accumulation, (2) repeated operation at low ambient temperature to assess condensation and potential moisture ingress, and (3) restricted ventilation to examine combustible gas buildup and ignition response. The core temperature reached 71.2 °C in Scenario 1, approaching the softening range of ABS/PP; localized plastic deformation was observed. Scenario 2 produced recurrent condensate with potential pathways toward electrical components. In Scenario 3, CH₄ and H₂S remained at 0%, indicating no immediate explosion risk, although different boundary conditions could enable gas accumulation. These findings support design improvements (thermal control, ventilation guidance, moisture/gas sensing), user guidance for safe operation, and the need for standardized multi-factor safety tests tailored to microbial processors.

Keywords : Microbial food waste processor, Heat accumulation, Condensation, Methane gas, Fire precursors, Experimental safety assessment

1 서론

1.1 연구 배경 및 문제의식

최근 가정용 미생물 음식물 처리기의 보급이 확대되면서, 감량 효율·탈취 성능·사용자 편의성을 강조한 다양한 제품이 시장에 출시되고 있다. 이러한 기기들은 미생물의 생물학적 분해 과정을 통해 음식물 쓰레기를 감량하는 원리를 기반으로 하며, 에너지 소모가 적고 저소음·무취 운전을 표방

1) E-mail : vcsky456@korea.kr

하는 친환경 가전으로 주목받고 있다.

그러나 장시간 운전 시 내부에 유기물이 잔류하고 고습 상태가 지속되면, 미생물 활성화에 따른 발열이 누적되어 화재 전조 조건이 형성될 수 있다. 특히, 외부와의 온도 차로 인한 결로가 기기 표면과 내부 부품에 발생하면, 전기 계통이나 회전부에 수분이 침투하여 절연 성능 저하, 전기적 트래킹, 기계 고장을 유발할 가능성이 높다. 환기가 제한된 밀폐 공간에서 이러한 현상이 장시간 지속되면, 내부 온도 상승과 가연성 가스 축적이 사용자의 인지 없이 진행되어 잠재적인 화재 위험으로 이어질 수 있다.

2024년 겨울, 연구자는 저온 환경(주거공간 다용도실)에 설치된 ‘린클 프라임300’을 운전하던 중 내부 곰팡이 번식과 바닥부 수분 고임 현상을 관찰하였다. 또한, 미생물 배양토 교체 과정에서 하부 플라스틱 구조물의 국소적 열변형을 확인하였으며, 당시 기기는 정상 운전 상태였다. 중고거래 플랫폼의 사용자 게시물에서도 동일 부위의 변형 사례가 반복적으로 확인되어, 해당 현상이 보편적이고 재현 가능한 문제임이 시사되었다.

이러한 관찰 결과는 미생물 음식물 처리기의 구조와 운전 조건에서 열 축적이 서서히 진행될 수 있음을 보여주며, 화재 전조 현상을 실증적으로 검토할 필요성을 제기한다. 아울러, 음식물 처리 과정에서의 축열·결로·가연성 가스 발생이 실제 화재로 이어진 사례가 보고되고 있어, 복합적 위험 요인의 존재 가능성이 크다. 따라서 본 연구는 다양한 운전 조건과 환경을 설정하여 화재 전조 현상을 정량적·시각적으로 분석하고, 이를 기반으로 안전 기준 개선 및 사용자 지침 마련에 기여하고자 한다.

1.2 연구의 필요성과 실험 개요

가정용 미생물 음식물 처리기는 기존 전열 기기와 달리 저발열 누적, 고습 환경, 밀폐 운전이 동시에 작용하여 화재 전조 상황을 유발할 수 있는 구조적 특성을 가진다. 발효·분해 과정에서 발생하는 열은 장시간 누적될 경우 내부 온도를 지속적으로 상승시키며, 환기가 제한된 밀폐 공간에서는 70℃ 이상에 도달할 수 있다.

또한, 겨울철과 같이 외기 온도가 낮은 환경에서는 내부 고습 상태가 결로로 이어지고, 이 수분이 기계 회전부나 전기 배선 내부로 침투할 경우 절연 성능 저하, 트래킹 발생, 부품 손상 등 복합적 위험을 야기할 수 있다. 그럼에도 현행 전기용품 안전관리 기준에는 이러한 복합 환경 조건(저발열 누적, 수분 응축, 가연성 가스 축적)에 대한 정량적 시험 항목이 부재하다. 현재 제품 검증은 누전·과열·감전 위험에 대한 기본 시험만으로 한정되어 있으며, 실제 사용자 환경에서의 화재 전조 조건에 대한 실증 검토는 미흡한 실정이다.

이에 본 연구는 다음 세 가지 목적에 따라 실험을 설계하였다.

- (1) 온도 누적 확인 : 미생물 발열과 기계 저항에 따른 내부 온도 상승 경향 분석
- (2) 결로 영향 관찰 : 외기 저온 환경에서 발생하는 수분 응축이 기계·전기 부품에 미치는 영향 확인
- (3) 가스 점화 가능성 검토 : 가연성 가스 축적 시 점화원 접촉에 따른 연소 반응 실증

실험 대상은 국내에서 널리 사용되는 ‘린클 프라임 300’ 모델이며, 함수율 72~79%의 실제 음식물 쓰레기를 사용하였다. 165L 단열 밀폐 공간에서 연속 운전하며, 흡기·배기구 개방률과 아이스팩 투입 여부 등을 변수로 설정한 세 가지 시나리오로 실험을 진행하였다.

온도는 열전대를 T1~T8 위치에 부착해 30분 간격으로 기록하였고, 외부 표면 온도는 열화상카메라로 병행 측정하였다. 가스 농도(CH_4 , H_2S)는 실시간 측정기로 모니터링하였으며, 결로나 구조 손상은 촬영 및 육안 관찰로 기록하였다.

위험 판단 기준은 내부 중심부 온도(T1)가 120°C 이상 도달 또는 80°C 초과 상태가 2시간 이상 지속될 경우 ‘고온 위험’으로 간주하고, CH_4 농도가 5% 이상일 경우 연소 하한계(LEL) 초과로 판단하여 점화원 접촉 실험을 병행하였다.

2 이론적 배경 및 선행연구 검토

2.1 미생물 음식물 처리기의 구조 및 작동 원리

미생물 음식물 처리기는 음식물 쓰레기를 미생물의 생물학적 분해 과정을 통해 감량하고 위생적으로 처리하는 가정용 전기기기이다.

본 연구에 사용된 ‘린클 프라임 300’ 모델은 고온성 미생물을 활용하여 음식물을 분해하며, 이 과정에서 발생하는 수분은 증발되고, 악취와 가스는 다단계 필터 시스템을 거쳐 정화된 후 외부로 배출된다. 다음은 해당 기기의 주요 구성 요소와 작동 원리를 정리한 내용이다.

2.1.1 주요 구성 요소

가. 처리 드럼(Digesting Drum) 및 교반 장치

기기 내부에는 회전식 원형 드럼이 설치되어 있으며, 3개의 스테인리스 교반봉이 수평으로 장착되어 있다. 드럼은 정·역회전을 반복하며 음식물과 미생물 배지를 균일하게 혼합한다. 내부에는 발열 패드 또는 내장 열선이 장착되어 일정 온도를 유지하며, 이는 미생물 분해 효율을 높이는 핵심 요소이다.

나. 배양토 또는 미생물 배지(Microbial Media)

분해 반응의 중심 요소로, 고온성 미생물이 포함된 배양토 또는 고형 배지가 사용된다. 음식물과 수분이 배지와 접촉하면 미생물 활성이 촉진되어 발효·분해 반응이 개시되며, 이 과정에서 이산화탄소(CO₂), 수증기 등 부산물이 발생한다.

다. 환기 시스템 및 탈취 필터(Ventilation & Deodorizing System)

처리 중 발생하는 수증기와 악취는 흡기·배기구를 통해 배출된다. ‘린클 프라임 300’은 활성탄 필터, 제올라이트 필터, UV-C 살균 장치 등을 포함한 4단계 탈취 시스템을 갖추고 있어 악취 저감과 위생 관리가 동시에 이루어진다.

라. 전자 제어 회로 및 센서(PCA, Sensors)

온도·습도·드럼 회전 상태를 실시간으로 감지하는 센서와 이를 제어하는 PCA(Printed Circuit Assembly)가 내장되어 있다. 이상 온도 감지 시 자동 정지 또는 경고 기능이 작동하며, 사용자 편의 기능도 지원된다.

2.1.2 작동 원리

가. 음식물 투입 및 교반

사용자가 음식물 쓰레기를 처리 드럼에 투입하면, 교반 장치가 작동하여 음식물과 미생물 배지를 일정 간격으로 혼합한다. 이 과정은 음식물과 미생물 간의 접촉 면적을 넓혀 분해 반응을 촉진하는 역할을 한다.

나. 분해 및 발열 과정

미생물은 음식물 속 유기물을 분해하며, 이때 자연적인 발효 열이 발생한다. 린클 프라임 300은 내부 발열 장치를 통해 온도를 약 40~60℃ 범위에서 유지함으로써 미생물의 활성도를 최대화한다. 이 발열은 일반 건조기보다 낮은 수준이나, 밀폐된 환경에서는 열 축적 요인으로 작용할 수 있다.

다. 수분 증발 및 음식물 감량

미생물 발열 및 내장 열선의 복합 작용으로 음식물 내 수분이 점차 증발된다. 평균 함수율 70% 이상인 음식물의 수분이 감소하면서 전체 부피는 약 80~90%까지 줄어든다. 최종적으로 남은 잔여물은 건조 상태로 전환되어 위생적으로 폐기하거나 퇴비화하는 것이 가능하다.

라. 가스 배출 및 냄새 제거

분해 및 탈수 과정에서 발생한 수증기, 악취, 가연성 가스 등은 배기 시스템을 통해 외부로 배출

되며, 이때 4단계 탈취 필터가 적용되어 대부분의 유해 성분이 정화된다. 이 시스템은 악취 최소화 뿐 아니라, 내부 압력 및 가스 축적 방지를 통해 기기의 안정성 확보에도 기여한다.

Table 1. Operating Stages and Key Features of a Microbial Food Waste Processor

Stage	Main Process	Related Components
Food Loading	Input of organic waste and start of rotational mixing	Drum, motor, agitator
Decomposition & Heat Generation	Microbial decomposition of food waste and minor heat production	Microbial media, temperature sensor, microbial species
Moisture Evaporation	Moisture evaporates and food waste is dried/reduced in volume	Heating pad (built-in heating wire), temperature controller, rotation speed
Odor Removal	Discharge of steam and odor, filtration through deodorizing system	Exhaust outlet, deodorizing filter (activated carbon, zeolite)

2.2 선행연구 고찰

국내에서 미생물 음식물 처리기를 다룬 연구들은 주로 분해 성능 향상, 악취 저감, 에너지 효율성 확보를 중심으로 진행되어 왔다. 대표적인 연구 주제로는 고효율 미생물 배양 기법, 최적 온·습도 조절 조건, 활성 촉진 분해 매체 개발, 유기물 감량률 및 퇴비화 효과 분석 등이 있다. 이러한 접근은 환경 친화적 처리 기능을 강화하는 데 주력했으나, 기기 내부에서 발생할 수 있는 누적 발열, 결로 및 곰팡이, 가스 축적 등 잠재 위험 요인 분석은 상대적으로 부족하였다.

최근 일부 실험 연구에서는 미생물 대사에 따른 발열 현상에 주목하고 있으며, 처리기 내부 온도가 40~65℃ 이상 상승한 사례가 보고되고 있다. 이러한 열은 외부 단열, 내부 축열 구조, 전기 보온장치 등에 의해 누적될 수 있으며, 장기적으로는 플라스틱 하우징 변형, 전기 부품 절연 저하 등 화재 전조 신호로 이어질 가능성이 제기된다.

또한 음식물 처리기의 고습 환경과 응축수 발생 문제에 대한 연구도 존재한다. 분해 과정에서 음식물 함유율은 60~80% 수준에 이르며, 반복 운전 시 내부 벽면이나 센서 부위에 결로가 형성되어 곰팡이 증식, 피복 손상, 위생 문제를 유발할 수 있다. 특히 전기 히터나 고온 부위 인접 영역에서의 결로 축적은 트래킹 현상이나 합선 위험을 높이는 조건으로 지적되었다.

한국소방산업기술원 등 안전기관의 보고서에 따르면, 실제 화재 사례에서 단순 전기 결함 외에도 유기물 분해에 따른 고온·고습 환경, 기기 노후화, 전선 피복 열화, 내부 트래킹 현상 등이 복합적으로 작용해 화재 또는 감전으로 이어질 수 있다. 또한 환경부와 일부 학술기관은 혐기성 분해 과정에서 메탄(CH_4), 황화수소(H_2S) 등 가연성 가스가 소량 발생하며, 환기가 제한된 조건에서는 연소

위험이 존재한다고 경고하고 있다.

이에 본 연구는 기존 연구가 성능 중심 또는 개별 위험 요인 분석에 국한된 한계를 넘어, 고온 누적·고습 응축·절연 손상·가스 축적 등 복합적 위험 조건을 실제 가정 사용 환경을 반영하여 실험적으로 구성하였다. 나아가 구조 변형, 표면 손상, 온도 상승 곡선, 가스 농도 변화 등 다층적인 평가를 수행함으로써, 기존 연구의 공백을 메우는 데 기여하고자 한다.

3 미생물 음식물 처리기 관련 화재 사례

미생물 음식물 처리기는 유기물 분해와 감량을 위해 미생물의 생물학적 활성과 보조 열원을 동시에 활용하는 장치이다. 이러한 구조적 특성으로 인해 내부는 항상 일정 수준 이상의 온도와 습도가 유지되며, 특히 폐쇄된 공간에서 장시간 연속 운전할 경우 열과 수분, 가연성 유기물이 누적되는 환경이 형성된다. 본 장에서는 실제 화재 사고, 리콜 사례, 산업시설 가스 사고를 통해 기기의 구조적·운전상 위험성을 분석한다.

3.1 주거 공간 내 실화 사례 - 과열 및 축열로 인한 화재

2013년 12월 5일, 서울 강남구 대치동의 한 고층 아파트에서 ‘한일 필레오(오클린)’ 미생물 음식물 처리기에서 화재가 발생한 사례가 보고되었다. 당시 해당 기기는 베란다의 밀폐된 공간에서 장기간 방치된 상태였으며, 내부 열선의 반복 가동과 발열 누적으로 인해 하우징이 열변형을 일으킨 후 최종적으로 화재로 이어졌다. 현장 조사 결과, 외부에서 별도의 발화원이나 전기적 단락(합선) 없이, 처리기 자체의 지속적 열 축적이 주요 원인으로 밝혀졌다. 이 사고는 미생물 분해 과정과 함께 기기 발열이 누적될 경우, 밀폐 공간에서는 실화 위험성이 실재함을 보여주는 대표적 사례로 평가된다. 물 분해 과정의 발열과 밀폐 환경이 중첩될 경우 실화 위험이 실재함을 시사한다.

3.2 구조적 결함에 따른 자발적 리콜 사례

2024년 3월, ㈜휴리엔에서 제조한 HD-010 및 FR-C350 모델의 음식물 처리기가 자발적 리콜 조치되었다. 이들 제품은 드럼 내부에 설치된 발열체(열선)가 반복적인 기계적 회전과 마찰로 손상될 수 있는 구조적 결함을 갖고 있었으며, 이로 인해 국부적 과열 및 화재 위험이 내재되어 있었다. 특히, 단단한 음식물(예 : 찢조각)이 교반 장치에 걸려 드럼통이 손상되면서 열선의 피복도 파손되고, 과열이 발생하여 화재로 이어질 가능성이 공식적으로 확인되었다.

제조사는 장기간 사용 시 열선 피복 손상과 이에 따른 과열 위험이 발생할 수 있음을 인정하고,

해당 문제를 개선하기 위해 드럼통 무상 교체 및 최신 모델로 보상 판매를 실시하였다. 이는 사용자 과실이 아닌 기기 구조적 설계상의 결함에 기인한 화재 위험 사례로, 음식물 처리기의 안전성 보장 및 예방적 조치의 중요성을 환기시키는 대표적 사례이다.

3.3 산업용 미생물 처리 시스템에서의 가스 폭발 사례

같은 해 전주시 음식물 리사이클링타운에서는 혐기성 미생물 분해 시스템에서 발생한 메탄가스가 누출되어 폭발 사고가 발생하였다. 이로 인해 근로자 5명이 화상을 입고, 설비 일부가 전파되는 피해가 발생했다. 조사 결과, 분해 과정에서 발생한 메탄(CH_4)과 황화수소(H_2S) 등 가연성 가스가 통풍이 불량한 공간에 축적되었고, 농도가 연소 하한계(LEL)를 초과했을 때 인근 히터 불꽃에 의해 급격히 연소된 것으로 추정되었다.

이 사건은 미생물 분해 과정이 단순 발열에 그치지 않고, 가연성 가스를 생성하여 폭발 위험으로 이어질 수 있음을 실증적으로 보여주는 산업 규모 사례로 평가된다.



Fig. 1 Recall case of the Hurien food waste processor

Fig. 2 Scene of the explosion at the Jeonju Recycling Town

Fig. 3 Process flow of the food waste treatment system in Jeonju

4 화재 재현 실험 및 분석

4.1 실험 목적 및 실험 개요

본 연구는 미생물 음식물 처리기 내부에서 발생할 수 있는 고온 누적, 결로 및 수분 응축, 가연성 가스 축적과 같은 화재 전조 조건을 실제 사용자 환경과 유사한 상황에서 재현하고, 각 조건이 기기의 구조적·화학적 안전성에 미치는 영향을 실증적으로 평가하는 것을 목적으로 한다.

이를 위해 국내 보급형 모델인 린클 프라임 300을 대상으로 다음과 같이 세 가지 실험을 설계하였다.

4.1.1 제1실험 - 내부 온도 누적 실험

가. 목적

미생물 발열과 기계 마찰열이 밀폐·축열 조건에서 누적될 경우, 내부 온도가 화재 위험 수준에 도달할 가능성을 검증.

나. 기대 분석 결과

고온 축열 가능성 및 하우스 열 변형 유도 여부 확인.

4.1.2 제2실험 - 수분 응축 및 결로 관찰 실험

가. 목적

온도 차에 따른 내부 수분 응축·결로 발생 여부와 곰팡이 형성 등 고습 환경 위험성을 평가.

나. 기대 분석 결과

저온 환경에서의 수분 누적이 절연체에 미치는 영향 분석.

4.1.3 제3실험 - 가연성 가스 축적 및 점화 실험

가. 목적

밀폐 조건에서의 메탄가스(CH_4) 생성, 농도 변화, 점화 반응 여부를 검증.

나. 기대 분석 결과

가스 축적 및 플래시파이어(Flash Fire) 발생 가능성 검토.

본 실험은 단순한 성능 검증을 넘어, 장시간 운전과 제한적 환기 조건에서 발생하는 복합 위험 요인을 계량적으로 측정하고, 시각적으로 분석함으로써 화재 전조 징후를 다층적으로 규명하는 데 의의를 둔다.

Table 2. Experimental Setup, Objectives, and Expected Outcomes

Experiment	Experiment Title	Objective	Expected Analytical Findings
1	Internal Heat Accumulation Test	Check heat buildup from microbial activity + friction in sealed conditions	Potential for high heat accumulation and deformation
2	Moisture Condensation	Assess condensation and humidity effects in low-temp operation	Possible insulation degradation in cold environments
3	Gas Accumulation & Ignition	Evaluate methane buildup and ignition risk in sealed conditions	Potential flashover from gas accumulation

4.2 실험 조건 및 측정 방법

4.2.1 공통 실험 환경

본 연구의 모든 실험은 내부 용량 약 165L의 세로형 아이스박스를 밀폐형 실험체로 구성하여 진행하였다. 실험체 내부에는 ‘린클 프라임 300’ 음식물 처리기를 설치하고, 음식물 중심부·외부 하우징·전기부 인접 부위에 열전대, 온도 로거, 가스 측정기를 부착하여 주요 데이터를 실시간 수집할 수 있도록 하였다.

기본 실내 온도는 약 25℃로 유지하였으며, 실험 목적에 따라 외부 온도 조건을 다음과 같이 차별화하였다.

가. 실험 1 및 실험 3

: 고온 축열 조건에서의 미생물 발열 누적을 재현하기 위해, 외기온 35℃ 이상인 더운 날씨를 활용하였다. 아이스박스는 완전히 밀폐하였으며, 인위적 가열 장치는 사용하지 않고 햇빛 및 열 누적 효과로 자연적인 고온 환경을 조성하였다.

나. 실험 2

: 저온 환경에서 수분 응축과 결로를 유도하기 위해, 실험체 외부와 하단에 대량의 아이스팩을 배치하여 외기온을 20~22℃ 수준으로 유지하였다.

이러한 외부 온도 차이를 통해, 동일한 기기 및 음식물 조건 하에서도 환경적 변수(온도, 환기, 밀폐성 등)가 내부 반응에 어떤 영향을 미치는지 비교 분석할 수 있도록 실험을 설계하였다.

모든 실험은 총 5일(120시간) 이상 연속 운전을 기본 조건으로 하였으며, 기기의 기본 동작 설정(교반 주기, 열선 작동 등)은 제조사 권장 설정을 그대로 유지하였다

Table 3. Summary of Experimental Risk Conditions

Item	Specification and Remarks
Food Waste Processor	Rinnkle Prime 300 (same model used in all tests)
Test Chamber	Sealed vertical ice box, 165 L (internal insulation applied)
Temperature Measurement	K-type thermocouples + 4-channel temperature logger (recorded every 30 min)
Gas Measurement	Methane, hydrogen sulfide(0~100% LEL range)
Video Recording	DSLR camera and thermal imaging camera used in parallel
Ambient Temperature Control	Ice packs used to maintain ± 1 °C



(a) Test chamber and device placement

(b) Ice-pack arrangement for low ambient operation

(c) Thermocouple data logger

Fig. 4 Overall experimental setup and instrumentation

4.2.2 실험 대상 음식물 구성 및 함수율 설정

본 실험에 사용된 음식물은 실제 가정에서 빈번히 발생하는 음식물 쓰레기를 조합하여 재현하였다. 주재료는 밥, 채소류, 육류 부산물, 과일 껍질 등으로 구성하였으며, 각 실험의 목적과 특성에 따라 재료 비율과 함수율을 조정하였다.

모든 재료는 실험 직전 디지털 저울(정밀도 $\pm 0.1\text{g}$)로 계량한 후 혼합하였으며, 혼합 직후 함수율을 측정하여 기준값을 확보하였다.

함수율 측정은 전자레인지 건조법을 사용하였다. 일정량(약 100g)의 시료를 계량컵에 담아 전자레인지(700W)로 1분간 가열하는 과정을 3~5회 반복하였다. 가열 후 무게 변화가 더 이상 발생하지 않을 때를 최종 건조 상태로 간주하여, 초기 중량 대비 감량분을 계산함으로써 함수율을 산정하였다. 이 방법은 시료의 수분 함량을 신속하고 간편하게 측정할 수 있어, 반복 측정에 용이하다.

Table 4. Food Composition and Moisture Content by Experiment

Experiment	Main Objective	Target Moisture Content (Weight Ratio %)	Final Measured Value (%)
1	High-temperature heat accumulation condition test	Rice 20, Fried pancake 10, Grains & cereals 20, Radish kimchi 20, Tofu 30	72.3
2	Low-temperature condensation & moisture accumulation test	Rice 40, Vegetables 20, Stew 20, Tofu 10, Pickles 10	73.9
3	Combustible gas accumulation & ignition test	Meat 30, Banana peel 20, Radish kimchi 10, Grains & cereals 20, Tofu 20	79.1

실험 1은 점성이 높고 기계적 저항이 큰 재료를 중심으로 배합하여 내부 마찰 및 발열을 극대화 하였으며, 이를 통해 고온 누적 조건을 재현하였다. 함수율은 상대적으로 낮은 72.3%로 설정하여 수분에 의한 열 완충 효과를 최소화하였다.

실험 2는 저온 환경에서 결로 발생 가능성을 검증하기 위해 수분 함량이 높은 재료 조합을 사용 하였다. 실제 측정된 함수율은 73.9%로, 실험 1보다 다소 높아 수분 응축 조건을 강화하였다.

부패 속도가 빠르고 가스 발생 가능성이 높은 고함수율 재료를 사용하여, 혐기성 발효에 따른 메탄 등 가연성 가스의 축적 여부를 관찰하였다. 최종 함수율은 79.1%로, 세 실험 중 가장 높았다.



Fig. 5 Food samples for Experiments 1~3 (before/after drying, 100 g each)

각 음식물 혼합물은 동일한 처리기(린클 프라임 300)에 투입하여, 5일간 연속 운전 조건에서 내부 분해 반응, 온도 변화, 가스 발생 등을 측정하였다.

4.2.3 측정 항목 및 방법

본 실험에서는 미생물 음식물 처리기의 내부 열 축적, 전기 부품 발열, 수분 응축, 가스 발생 등 화재 전조 징후를 다각도로 관찰하고자 하였다. 주요 측정 항목은 열전대 및 복합가스 측정기를 활용하여 정량적으로 수집하였으며, 외관 변화는 정해진 시간 간격으로 고정 위치에서 촬영한 사진과 열화상 영상을 통해 정성적으로 기록하였다.



(a) T1~T5 attachments



(b) T6~T8 attachments

(c) chamber after installation

Fig. 6 Thermocouple positions (T1~T8) and mixing chamber view

Table 5. Measurement Items and Methods for Each Experiment

Thermocouple	Location / Target	Measurement Method
Internal Temperature	Food mass (T1), Middle section (T2), Bottom section (T3)	Thermocouple attachment, automatic recording, Thermal imaging camera
Internal Machinery	PCA board (T4), Motor drive gear section (T5), Inner wall of the food processing chamber (T6)	Thermocouple attachment, automatic recording
External Temperature	Upper side of icebox (T7), Exhaust port (T8)	Thermocouple attachment, automatic recording
Moisture Condensation	Inner lid and walls of the food processing chamber	Visual inspection of condensation on the surface
Mold Formation	Surface of food waste, inner walls	Visual confirmation, thermal image analysis
Gas Concentration	CH ₄ , H ₂ S	Gas detector, real-time/interval measurement
Wiring/Connection Condition	Power lines, motor, wiring joints	visual observation

4.3 실험 결과 분석 및 고찰

4.3.1 제1실험 : 내부 온도 누적 실험 결과 분석

본 실험은 고온 밀폐 환경에서 미생물 분해 발열과 기계적 마찰열이 누적될 경우, 내부 온도가 화재 위험 기준에 근접하는지를 검증하기 위하여 수행되었다. 주변 온도 30℃ 이상의 자연 축열 조건에서 5일간 연속 운전을 실시하였으며, 음식물 시료는 점성이 높아 교반 저항을 유발할 수 있는 재료를 중심으로 배합하였다.

실험 결과, 음식물 중심부(T1)의 최고 온도는 71.2℃로 측정되었으며, 이는 ABS-PP 재질의 열변형 시작 온도(80~90℃)의 약 79~89% 수준에 해당하였다. 상부(T2)와 측면부(T3)는 각각 67.6℃, 62.3℃를 기록하였고, PCA 기판(T4)과 모터 인접부(T5)는 각각 56.1℃, 58.9℃로 일반 전기부품의 권장 허용온도(60~70℃)의 84~98% 수준에 도달하였다.

반면, 밀폐 공간 내 환경 변화를 파악하기 위해 음식물 처리기 외부에 부착한 열전대 센서(T7 : 아이스박스 상단, T8 : 배기구 인근)의 온도는 각각 38.5℃와 39.6℃로 측정되었다. 이는 실험 당시 외기 온도(약 30℃)보다 약 8~9℃ 높은 수치로, 밀폐된 아이스박스 내부 공기가 외부보다 현저히 가열되었음을 보여준다.

이러한 결과는 음식물 처리기 외부 표면이 안전 범위 내에 머물렀음에도 불구하고, 밀폐 공간에서 기기를 운전했을 경우 장기간 열을 축적하여 내부 화재 위험을 높일 수 있는 조건을 형성했음을 시사한다.

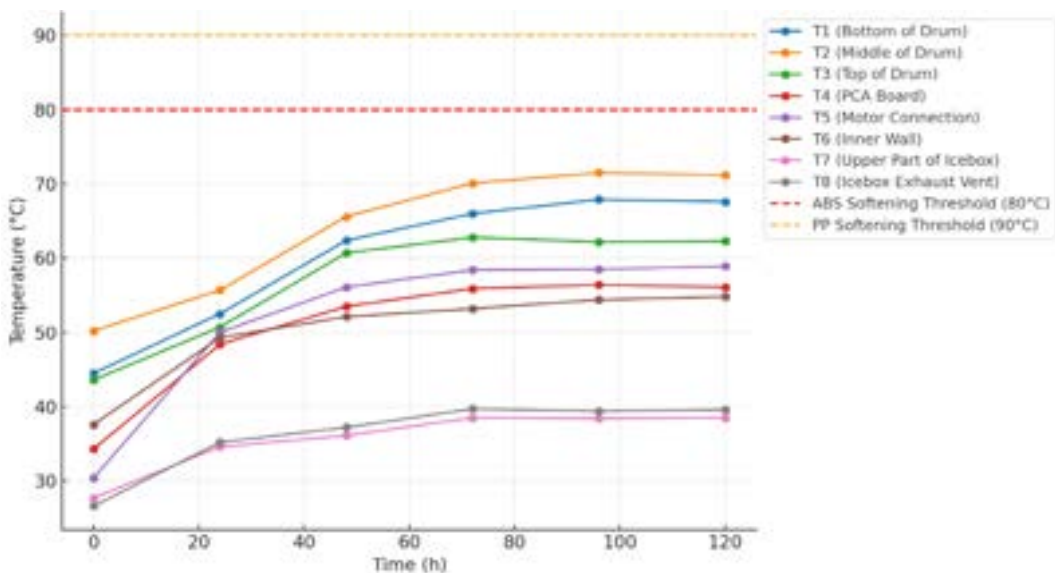


Fig. 7 Temperature Variation by Measurement Point in Experiment 1

물리적 변화 관찰 결과, 기기 바닥면 플라스틱 구조물 표면에서 국부적인 함몰과 불규칙한 요철 패턴이 형성된 것이 확인되었다. 이는 지속적인 고온 노출로 재질이 연화되면서 표면 질감이 불균일하게 변화한 결과로 판단되며, 장기간 운전 시 구조 강도의 저하와 절연 성능 저하로 이어질 가능성이 있다.



(a) Thermal deformation of bottom plastic structure (Before)



(b) Thermal deformation of bottom plastic structure (After)

Fig. 8 Comparison of bottom plastic structure before (a) and after (b) thermal deformation

본 실험에서 확인된 전조 신호를 종합하면, 열 축적 강도는 8/10, 구조 변형 정도는 6/10, 단기 발화 위험도는 4/10으로 평가되었다. 특히 음식물 중심부 최고온도 71.2℃는 ABS/PP 계열 하우징의 열변형 개시 범위(약 80~90℃)에 근접하고, 전기부품 인접부 56~59℃는 일반 권장 허용온도(60~70℃) 하한에 근접하였다. 이는 단기적으로 직접 발화에는 이르지 않더라도, 동일한 열·밀폐 조건이 장기간 반복될 경우 재질 연화와 절연 성능 저하가 누적되어 발화 위험으로 전이될 수 있는 초기 단계임을 시사한다.

4.3.2 제2실험 : 저온 환경에서의 반복 운전 시 응축수 형성과 표면 온도 변화 분석

본 실험은 외기 온도가 낮은 조건에서 음식물 처리기를 반복 운전할 경우, 내부에 수분 응축이 발생하는지를 확인하고, 이로 인해 전기부품 인접 부위까지 응축수가 침투할 가능성을 검토하기 위하여 수행되었다. 또한 반복 운전에 따른 기기 표면의 온도 분포를 함께 분석하였다.

실험 결과, 내부 온도(T1~T3)는 운전 종료 시점에 55~60℃ 범위를 유지하였으며, 이는 ABS·PP 재질의 열변형 시작 온도(80~90℃) 대비 61~75% 수준에 해당하였다. 전기부품 인접부(T4~T6)는 45~50℃로 일반 전기부품 권장 허용온도(60~70℃) 대비 안전 범위 내에 있었으며, 외부 표면 온도(T7 : 아이스박스 상단, T8 : 배기구 인근)는 각각 23.4℃, 24.2℃로 안정적인 상태를 유지하였다. 이러한 결과는 저온 외기 조건에서의 반복 운전이 내부 발열을 일정 범위 내로 억제하고, 외부 표면 온도를 안정적으로 유지하는 경향이 있음을 시사한다.

응축수 관찰 결과, 실험 3일 차부터 기기 상단 뚜껑 내부와 교반통 측벽에서 미세한 물방울이 형성되었다가 소멸하는 현상이 반복되었다. 특히, 저온 환경과 접촉하는 금속 부위 주변에서는 응축수가 더욱 빈번하게 발생하였으며, 일부 수분은 내부 구조를 따라 하부로 흘러내려 전기 배선 및 커넥터 인근 표면에 흔적을 남겼다. 린클 프레임 300 모델은 PCA 기판과 배선부에 방수 커버와 수분 증발 유도 구조가 적용되어 있어 단기 운전에서는 이상이 없었으나, 구조적으로 응축수가 전기부품 인근까지 도달할 수 있는 경로가 존재함이 확인되었다.



Fig. 9 Protective cover for PCA and wiring



Fig. 10 Moisture removal unit

본 실험에서 확인된 전조 신호를 종합하면, 응축수 발생 빈도는 7/10, 전기부품 인접 수분 도달 정도는 5/10, 단기 발화 위험도는 3/10으로 평가되었다. 이는 IEC 60068-2-78(고온·고습 환경 시험)과 IEC 60112(절연 재료 트래킹 저항 시험)에서 규정한 바와 같이, 전기부품이 장기간 고습 상태에 노출될 경우 절연 성능이 저하되고 트래킹 현상 발생 가능성이 증가한다는 점과 일치한다. 따라서 단기 운전에서는 전기적 안전성이 유지되더라도, 장기 운전 환경에서는 결로가 누적되어 전기적 결함으로 이어질 수 있다.



Fig. 11 Condition of the PCA board



Fig. 12 Water stains observed beneath the PCA board

4.3.3 제3실험 : 밀폐 조건에서의 가연성 가스 축적 및 점화 반응 관찰 실험

본 실험은 음식물 처리기를 밀폐된 환경에서 장기간 운전할 경우, 내부 부패 및 미생물 활동에 의해 메탄(CH_4)과 황화수소(H_2S) 등의 가연성 가스가 축적될 가능성을 검증하고, 가연성 가스가 일정 농도에 도달할 경우 외부 점화원과 접촉 시 발화·연소 반응이 발생하는지를 확인하기 위하여 수행되었다.

실험은 외기 온도 약 35°C 의 고온 환경에서 진행되었으며, 배기구와 흡기구를 차단하고 후면에 지름 약 3 mm의 미세 배출구 1개만을 설치하여 내부 압력을 조절하였다.



Fig. 13 Gas Measurement Photo

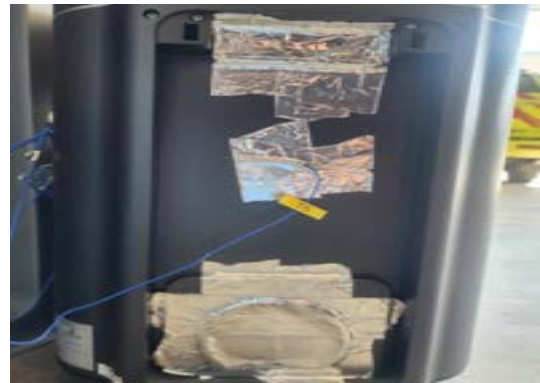


Fig. 14 Photo of Exhaust Vent Blocked

가스 농도 측정 결과, 실험 전 기간 동안 CH_4 와 H_2S 모두 0%로 검출되어, 연소 하한계(LEL, CH_4 5%)에 전혀 도달하지 않았다.

이에 따라 실험 종료 시점에서 외부 점화원(라이터, 히터, 가스버너)을 순차적으로 노출하였으나, 발화·연소 반응은 전혀 관찰되지 않았으며, 점화원 인접 부위에서 일시적인 온도 변화만이 확인되었다.

본 실험에서 확인된 전조 신호를 종합하면, 가스 축적 정도는 0/10, 단기 폭발 가능성은 0/10, 장기·환경 변화 시 폭발 가능성은 5/10으로 평가되었다. 즉, 본 실험 조건에서는 가연성 가스 발생 및 축적이 억제되어 폭발 위험이 없는 것으로 확인되었다.

그러나 고함수율 음식물 투입, 외기 온도 상승, 완전 밀폐 및 장기 방치 등 조건이 변화할 경우, 혐기성 분해로 인한 CH_4 · H_2S 축적 가능성을 완전히 배제할 수는 없다. 실제로 2024년 전주 음식물 리사이클링타운에서는 혐기성 분해 과정에서 발생한 CH_4 와 H_2S 가 환기 불량으로 축적되었고, 인근 점화원과 접촉하여 폭발이 발생하였다.

이러한 사례는 본 실험 조건에서는 관찰되지 않았던 폭발 위험이, 환경 변화 시 현실화될 수 있음을 뒷받침한다. 따라서 장기간·극한 밀폐 운전 환경에서는 주기적인 환기와 가스 감지 장치의 적용이 필요하다.

5 결 론

본 연구는 가정용 미생물 음식물 처리기를 대상으로, 실제 사용자 환경을 반영한 밀폐·고온·저온·가스 축적 조건에서의 운전 실험을 수행하여, 화재 전조 신호(precursor signals)를 정량적으로 분석하였다.

3가지 실험 시나리오를 통해 확인된 주요 결과는 다음과 같다.

제1실험에서는 고온 밀폐 조건에서 음식물 중심부 온도가 최대 71.2℃까지 상승하였으며, 이는 ABS·PP 재질의 열변형 시작 온도(80~90℃)에 근접하는 수준이었다. 또한 기기 바닥면 플라스틱 구조물에서 국부적 함몰과 요철 패턴이 관찰되어, 장기 운전 시 구조 강도 및 절연 성능 저하 가능성이 확인되었다.

제2실험에서는 외기 저온 환경에서 반복 운전 시 기기 내부에 응축수가 발생하였고, 전기부품 인근까지 수분이 도달하는 경로가 형성되었다. 이는 국제 안전기준(IEC 60068-2-78, IEC 60112)에서 규정한 장기 고습 노출 조건과 유사하며, 전기적 트래킹 가능성을 높이는 위험 요소이다.

제3실험에서는 CH₄와 H₂S 농도가 전 기간 0%로 측정되어 폭발 위험은 없었으나, 고함수율 음식물 투입·외기 온도 상승·완전 밀폐 및 장기 방치 조건에서는 혐기성 분해에 따른 가연성 가스 축적 가능성을 배제할 수 없음을 확인하였다. 실제로 2024년 전주 음식물 리사이클링타운 사고는 이러한 조건 복합으로 발생하였다.

이상의 결과를 종합하면, 본 연구의 단기 운전 조건에서는 직접적인 발화나 폭발은 발생하지 않았으나, 열변형, 응축수 침투, 잠재적 가스 축적과 같은 화재 전조 신호가 명확히 관찰되었다. 이는 미생물 음식물 처리기의 구조적 특성과 운전 환경이 복합적으로 작용할 경우 장기적으로 화재 위험이 증가할 수 있음을 실증적으로 보여준다.

5.1 학술적 의의

본 연구의 학술적 의의는 발화 여부에 국한되지 않고, 화재 전조 신호를 계량적으로 검증하는 실험 설계를 제시했다는 점에 있다.

특히, 기존 연구가 단일 환경(고온 또는 고습)에 집중한 반면, 본 연구는 실제 사용자 환경을 반영한 밀폐, 고온, 저온, 환기 제한 등 다중 조건 실험을 수행함으로써 위험 요인 간의 상호 작용을 분석했다.

또한 온도·습도·가스 농도 데이터를 안전 기준선과 직접 비교하여 위험성을 정량화한 것은, 향후 안전 규격 제정 시 실증적 자료로 활용될 수 있는 기반을 마련한 것이다.

5.2 실용적 시사점

실험 결과는 제품 설계, 사용자 지침, 안전 규격 개선 측면에서 중요한 시사점을 제공한다.

첫째, 설계 단계에서는 발열 제어 알고리즘 강화, 환기 유도형 구조 설계, 수분 감지 및 누수 정보 기능, 가스 감지 센서 적용이 필요하다. 이러한 개선은 장기 운전 중 열·습기 축적을 최소화하고, 초기 위험 단계에서 경고를 제공하는 데 효과적이다.

둘째, 사용자 지침 측면에서는 밀폐·고온 환경을 피하고, 고함수율 음식물의 장시간 투입을 제한하며, 주기적으로 기기를 청소하고 환기시키는 습관이 필요하다. 이는 사용자 스스로 위험을 완화하는 1차 예방 조치가 된다.

셋째, 안전 규격 개선을 위해 미생물 음식물 처리기 전용 ‘복합 위험성 시험 항목’을 표준화하는 것이 중요하다. 이는 다양한 환경 조건에서의 안전성을 사전에 검증하는 제도적 장치가 될 수 있다.

5.3 연구 한계 및 향후 과제

본 연구는 특정 기종을 대상으로 하였기 때문에, 설계 구조와 재질이 다른 다양한 모델에 대한 비교 실험이 필요하다. 특히, 재질 강도 저하의 임계점과 누적 열화 패턴을 규명하는 장기 내구성 시험, 실제 발화 재현 실험이 병행된다면, 미생물 음식물 처리기의 안전성 평가 및 국제 표준 제정에 있어 보다 강력한 근거 자료가 될 것이다. 또한, IoT 기반 실시간 모니터링 기술을 접목하여 온도·습도·가스 데이터를 상시 수집하고 분석하는 방안도 향후 연구 과제로 제안할 수 있다.

참고문헌

1. 이영형, 박성현, “음식물쓰레기 주입형태에 따른 혐기성소화조의 메탄가스 발생특성에 관한 연구” 2001년
2. 김한석, 오규형, 최연석, 문정기, “밀폐공간내의 가연성가스의 점화위 유독성 가스 발생에 대한 연구
3. 조원우, “미생물을 이용한 음식물쓰레기 처리기”, 2008년



2025년
화재 재현실험
연구보고서



제 5 장 | 남부권



☑ 광역화재조사 1팀 >>>

파티션 히터의 비정상적 사용과 전기적 이상에 따른 발화 가능성과 감식기법에 관한 연구

☑ 광역화재조사 2팀 >>>

음식물 처리기 운전 조건별 화재 징후 분석

☑ 광역화재조사 3팀 >>> ☆ '25년도 강원 화재재현실험 연구논문 발표대회 우수

전열온상선 설치 방법에 따른 화재 발생 가능성 분석

전열온상선 설치 방법에 따른 화재 발생 가능성 분석

오동찬¹⁾, 이준열, 신문선, 김동연

강원특별자치도 소방본부 남부권광역화재조사 3팀

Analysis of Fire Hazards According to Installation Methods of Electric Heating Cables for Agricultural Seedbeds

Author 1(Oh Dong Chan)[†], Author 2, Author 3, Author 4

Southern Wide Area Fire Investigation Team 3, Gangwon Fire Headquarters

ABSTRACT

This study experimentally analyzed the potential for fire occurrence based on the installation methods and environmental conditions of electric heating cables commonly used in agricultural seedling houses. In particular, the research aimed to evaluate the heat generation characteristics and fire risks under various configurations of heating cables, focusing on practical risk factors such as improper installation, contact with insulation materials, and insulation degradation.

The experiments were conducted by varying the length of the heating cables, the presence of thermal insulation covers and external combustible materials, and the placement of capillary-type thermostat sensors. Thermocouples were used to monitor temperature changes and localized overheating under each condition. As a result, structural defects—such as twisted cable installation and contact with metal fasteners—led to localized accumulation of heat and insulation damage. In certain conditions, smoke generation and conductor exposure were observed. Notably, in the case where the cable length was reduced to 70 meters, a high-temperature state exceeding 200°C was sustained, and actual flame ignition was observed approximately 170 minutes after the start of the experiment.

These findings empirically demonstrate that electric heating cables can lead to fire under specific conditions. The results underscore the need for improved field guidelines and safe installation standards for agricultural heating equipment. This study reproduces the structural hazards and fire propagation mechanisms of heating cables and can serve as foundational data for future safety standards and preventive measures.

Keywords : heating cable, agricultural, Seedbed, overheating

1) E-mail:odc0221@naver.com

1 서론

1.1 연구의 배경

전열온상선은 농업 분야에서 파종 초기의 온도 유지와 작물의 생육 촉진을 위해 널리 사용되는 전열기구 중 하나이다. 특히 비닐하우스나 육묘장 등에서는 외부 기온이 낮은 계절에 일정한 온도를 유지하는 것이 필수적이다. 그러나 전열온상선은 전기를 열에너지로 변환하는 특성상 화재 발생 위험이 상존한다. 그럼에도 불구하고 전열온상선의 화재 발생 가능성에 대한 체계적 연구나 실증적 검토는 부족한 실정이다. 이에 본 연구는 전열온상선의 다양한 설치 방법에 따라 화재 발생 위험이 어떻게 달라지는지를 규명하고 안전성을 향상 시키기 위한 과학적 근거를 마련하고자 한다.

1.2 연구 필요성 및 목적

현행 국내 기준에서는 전열온상선을 독립기기로 정의하지 않고, 단순히 ‘발열선’ 또는 전기기구의 일부로 분류하고 있다. 이는 해당 장치의 설치 및 안전 규정이 명확하게 정립되어 있지 않음을 반영한다. 이러한 규정상의 미비는 농업 현장에서 경험에 의존한 설치 관행으로 이어지고 있으며 1년 중 사용 기간이 비교적 짧음에도 불구하고 화재가 지속적으로 발생하는 원인이 되고 있다. 따라서 기존의 발열선·전기기구 범주의 일반적 기준만으로는 농업용 전열온상선의 화재 위험성을 충분히 예방·관리하기 어려우며 보다 구체적이고 과학적인 실험 연구를 통해 위험 특성을 규명하고 안전 관리 대책을 제시할 필요가 있다.

본 연구의 목적은 농업용 전열온상선의 다양한 설치 방법이 화재 발생에 미치는 영향을 규명하는 것이다. 이를 위해 전열온상선의 설치 형태, 사용 조건, 환경적 요인 등을 변수로 설정하여 예비 실험 및 본 실험을 수행하고 조건별 과열 및 축열, 절연 손상 등의 위험성을 분석하고자 한다.

또한, 분석 결과를 바탕으로 안전한 설치·운용 지침을 제시함으로써 농업 현장의 화재 예방과 시설 안전 확보에 기여하는 것을 목표로 한다.

1 이론적 고찰

2.1. 농업용 전열온상선 시스템의 기능

농업용 전열온상선 시스템은 전기 에너지를 열에너지로 변환하여 지온을 상승시키는 방식으로, 전통적인 양열온상(養熱溫床) 방식에 비해 온도 제어가 용이하고 설치가 간편하며 요구되는 노동력이 상대적으로 적다는 장점을 지닌다. 이러한 특성은 작물의 생육 조건을 균일하게 유지하여, 전체

적인 육묘 일수를 단축시킬 수 있다. 전열온상선은 구조가 단순하고 가온 설비가 비교적 간편하기 때문에, 전력이 공급되는 장소에서는 높은 범용성을 가지며 손쉽게 활용될 수 있다. 특히 육묘 기간이 장기화되는 작물의 경우, 양열온상의 열량으로는 온도 유지가 어려운 반면, 전열온상은 안정적인 열원을 제공할 수 있어 보다 바람직한 선택이 된다. 실제 사용 시 전열선의 배선 전력은 상면적 1m^2 당 약 $75\sim 80\text{W}$ 수준이면 충분하며, 일반적으로 시중에서 유통되는 100V 500W 급 전열선(길이 약 $60\sim 64\text{m}$) 1조는 약 6.6m^2 (약 2평)의 면적을 가온할 수 있다. 220V 1kW 급 전열선(약 120m)은 이보다 두 배 규모인 약 13m^2 이상 면적에 적용 가능하다. 전력 소비량 대비 열량 환산 시, 일반적으로 전력 1kW 는 시간당 약 859kcal 의 열량을 발생시킨다. 그러나 전열온상선 시스템은 몇 가지 주의점도 존재한다. 발열체가 비교적 가는 구조를 가지고있어 토양 충전 후 발열선 표면 온도가 국부적으로 70°C 에 도달할 수 있으며 이로 인해 발열체 인접 토양이 과도하게 건조되어 열전도 저하를 초래할 수 있다. 또한 단위 열량당 비용이 양열온상에 비해 상대적으로 높다는 단점도 존재한다.

2.1.1 온도 조절기 구성 및 기능

온도 조절기는 전열온상선의 안정적인 사용을 위해 설정된 목표 온도를 기준으로 발열선에 인가되는 전력을 제어함으로써 육묘를 위한 적정한 온도를 유지하는 기능을 하며 내부 구성은 다음과 같다.



Fig. 1 Thermostat



Fig. 2 Capillary bulb



Fig. 3 Internal Structure of a Thermostat

실험에 사용한 온도 조절기는 습도가 높고 먼지가 많은 농업 환경 특성상 구조적 안정성이 높은 기계식 써모스탯(thermostat) 구조를 기반으로 하며 모세관식 온도 감지봉과 연동하여 작동한다. 써모스탯 다이얼을 통해 설정된 온도는 기계적 기준 위치로 저장되며 이후 감지부로부터 전달되는 압력 변화와 비교되어 스위치 작동의 기준값으로 사용된다.

모세관식 감지부는 금속 재질의 감지봉에 연결된 모세관으로 구성되며 내부에는 열팽창률이 높은 액체가 충전되어 주변 온도에 따라 내부의 액체가 팽창 및 수축을 반복한다. 이 압력 변화는 다이

열을 통해 설정된 온도와 기계적으로 비교되어 온도가 상승해 일정 압력을 초과하면 기계식 접점 스위치가 개방되어 발열을 중단시키고 반대로 온도가 하락하여 압력이 감소함에 따라 접점이 다시 닫혀 전류가 공급되며 발열이 재개된다.

2.1.2 전열온상선 구성 및 기능

농업용 전열온상선은 작물의 생장 환경에 필요한 지온을 일정하게 유지하기 위해 사용하는 발열 장치로, 그 구조와 발열 방식에 따라 다양한 형태로 구현된다.

농업용으로 주로 사용되는 직렬 저항형 온상선은 발열체 전체에 걸쳐 일정한 저항값을 갖는 금속선이 전류 흐름에 따라 발열이 이루어지는 방식이고 길이에 따라 출력이 결정된다. 발열체로는 일반적으로 니크롬(Ni-Cr) 합금이 주로 사용되는데 약 $1.1\mu\Omega\cdot m$ 의 전기저항률과 최고 사용온도 $1,100^{\circ}C$ 로 고온 안정성이 우수하고 산화에도 강하여 장시간 발열하는 농업용 전열 온상 시스템에 적합하다.



Fig. 4 Series resistance heating cable



Fig. 5 Heating element

발열체는 내열성과 전기 절연성을 갖춘 절연층으로 감싸져 있으며, 이 절연재는 일반적으로 실리콘 고무(Silicone Rubber) 또는 가교 폴리에틸렌(XLPE) 등의 소재로 구성된다.

이 절연층은 외부와의 전기적 접촉을 차단하고, 고온에서도 절연 성능을 유지함으로써 전기적 안전성을 확보한다.

전열온상선은 전원 인가 시 전체 도체에 걸쳐 일관된 전류가 흐르며 선 전체에서 동일한 수준의 발열이 발생한다.

따라서 긴 구간에 걸쳐 균일한 지온 유지가 가능하고 온도조절기와 연계하여 반복적인 ON/OFF 제어를 적용할 경우 토양 과열이나 발열 불균형을 방지할 수 있다. 다만 직렬 저항형 구조는 선 전체의 저항값이 일정하지 않거나 국부 손상 발생 시 발열 편차나 국부 과열이 발생할 수 있으므로 적절한 절연 설계와 회로 보호장치의 병행이 요구된다.

2.1.3 동파방지용 열선과의 차이점

전열온상선과 동파방지용 열선은 모두 전기 저항을 이용한 발열체지만, 그 사용 목적과 구조, 온도 제어 방식, 안전 설계 기준에 있어서 명확한 차이를 가진다. 이들 간의 구조적·기능적 차이는 곧 화재 발생 위험성에 영향을 미치는 주요 요인으로 작용하므로, 비교 고찰이 필요하다.

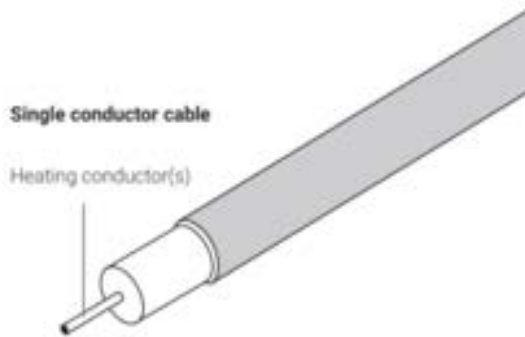


Fig. 6 Single conductor cable

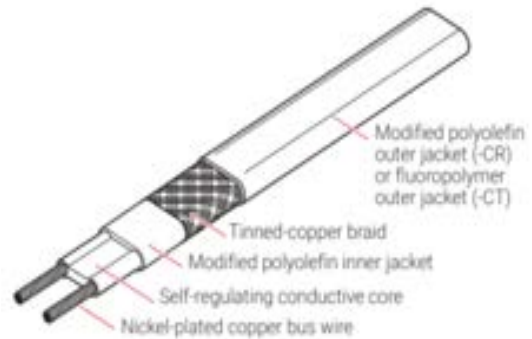


Fig. 7 Self regulating heating cable

① 열선 구조 및 저항 방식의 차이

전열온상선은 대부분 <Fig 6>과 같이 직렬 저항형 구조로 내부에 발열체가 일정 저항값을 가지며 전선 전체가 하나의 회로처럼 작동하며 길이 변화에 따른 전류 변화가 민감하다.

동파방지용 열선은 <Fig 7>과 같이 병렬 구조의 정온전선 또는 자기조절형 전열선이 일반적이다. 일정한 출력(W/m)을 유지하며 일부 제품은 겹침 설치도 가능하고 절단하여 사용하더라도 일정한 온도를 유지한다.

② 온도 제어 방식의 차이

전열온상선은 일반적으로 외부 온도조절기(써모스탯)와 연계되어 작동하며, 설정 온도에 따라 회로를 개폐하는 방식이다. 특히, 모세관식 감지부를 사용하는 기계식 써모스탯이 흔히 사용된다.

동파방지용 열선(정온전선)은 내부에 두 가닥의 도전성 구리 버스선(Bus Wire)이 나란히 배치되고, 그 사이를 채우는 반도체 폴리머 매트릭스가 온도 감지 및 발열 제어를 담당한다. 이 반도체 재질은 주변 온도가 낮을 때 전류가 쉽게 흐르면서 많은 열을 발생시키고, 온도가 높아지면 전류 흐름을 방해하여 발열을 줄이는 자기조절(Self-regulating) 특성을 갖는다.

2.2 선행 연구 검토

기존의 열선 관련 선행 연구들은 주로 동파방지용 정온전선을 중심으로 한 배관 부착형 전열 시스템의 단락 혹은 절연열화에 의한 화재 가능성 연구에 중점을 두고 있다. 정온전선은 병렬 구조로

발열량을 자동 조절하는 방식이므로 설치 방법보다는 절연과피 등에 의한 연구가 집중된 것으로 사료된다. 반면 농업용 전열온상선 시스템과 같이 직렬 저항형 발열체를 사용하는 경우 별도의 온도 조절장치를 사용해야 하고 설치 방법이나 환경에 따라 열축적, 국부 발화 등의 위험이 상대적으로 높음에도 불구하고 이러한 전열온상선의 설치 부주의가 화재 발생에 미치는 영향에 대한 실증적 연구는 매우 부족한 실정이다.

3 화재 사례 분석

3.1 화재 사례

2024. 2. 23.(금) 00:01경 홍천군 서면 소재 비닐하우스에서 발생한 화재로 <Fig 8>은 추정 발화지점이다. 해당 비닐하우스의 관계자가 열선 위에 비닐을 깔고 그 위에 모판을 올려 두었으며 120m의 온상선이 너무 길어 잘라서 사용한 것을 조사 과정에서 알 수 있었다. <Fig 9>, <Fig 10>은 온상선을 고정하는 못과 고정 방법을 보여주는 사진으로 온상선을 못에 2~3 바퀴 감아서 사용한 것을 확인할 수 있다.

온상선을 자르거나 고정 말뚝에 감아서 사용하는 행위는 해당 제품의 설명서에 따르면 모두 잘못된 설치 방법으로 확인된다.



Fig. 8 A place of Fire



Fig. 9 Mounting nail



Fig. 10 Overheated cable

3.2 화재 사례

2025. 3. 26.(수) 05:59경 평창군 미탄면 소재의 건축물에서 발생한 화재로 전열온상선은 메주를 띄우는 작업에 사용되었다. 바닥에 단열재와 전열온상선, 나무 각재를 설치한 후 메주를 올리고 보온덮개를 덮어 보온하는 구조이다.

메주와 보온덮개는 <Fig 11>과 같이 우측 벽면에 위치하였으며 온도감지기는 <Fig 12>와 같이

메주가 없는 작업장 입구 쪽에 설치되어 있다.

해당 건물의 벽면은 샌드위치 패널로 단열 효과가 미비하고 온도감지기가 설치된 부분에는 보온 덮개가 설치되어 있지 않아 발화지점에 설치된 전열온상선의 온도 상승을 감지하지 못했을 가능성이 검토된다.



Fig. 11 A place of Fire

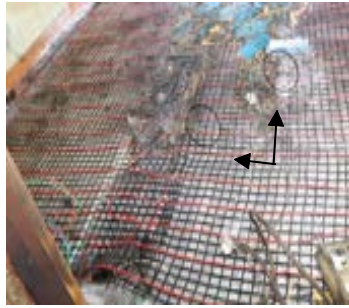


Fig. 12 Temperature sensor



Fig. 13 Thermostat

3.3 화재 사례③

2023. 3. 20. 02:32경 평창군 봉평면 소재의 비닐하우스에서 발생한 화재로 비닐하우스 내부에는 약 20m의 모종 터널이 설치되어 있고 <Fig 14>는 추정 발화지점이다. 온도감지봉은 모종 터널 외부에서 방치되어 모종 터널 내부의 온도를 감지할 수 없는 상황이었다.

모종 터널의 바닥은 비닐과 장판을 깔아 단열 하였으며 전열온상선은 나사못에 2~3바퀴 감아 고정하여 설치했다. <Fig 16>의 발화지점을 식별한 결과 전열온상선의 피복이 소실되어 있고 목재의 바깥 쪽의 탄화심도가 깊은 것으로 관찰된다.

모종 터널의 보온덮개가 나사못에 감긴 전열온상선을 덮은 채로 목재 바깥면을 덮고 있었던 것으로 추정되며 전열온상선과 보온덮개가 접촉한 부분이 축열로 인해 발화되어 보온덮개를 따라 목재 바깥면을 탄화시킨 것으로 추정된다.



Fig. 14 A place of Fire



Fig. 15 Thermostat



Fig. 16 Mounting nail conditioner

4 재현실험

4.1 실험 재료

Table 1. 재현실험에 사용된 재료 현황

구 분	내 용	비 고
자동온도조절기	220V 3KW, 1.5KW	각 1ea
전열온상선	220V 1KW(4평용) 120m	2ea
온도기록계	육묘 하우스 내부 각 지점 온도 측정	
열화상카메라	육묘 하우스 외부 온도 측정	
기타 실험키트	1.2m×4.8m 육묘 하우스	



Fig 17. Experimental devices

4.2 실험 개요

본 연구에서는 농업 현장에서 실제 사용되는 육묘 하우스를 축소 모형으로 제작한 후, 축열 조건을 다양하게 설정하여 전열온상선의 화재 위험성에 대한 실험을 수행하였다.

첫 번째 예비실험에서는 전열온상선의 전기적 특성 분석을 위해 온상선을 다양한 길이로 절단하고 각 길이 별로 전류, 저항을 측정하여 안정성을 평가하였다.

두 번째 예비실험에서는 모세관식 온도조절기의 감지봉 위치가 작동 성능에 미치는 영향을 분석하였다.

감지봉의 설치 위치에 따라 실제 발열체 주변 온도와의 편차를 비교하고, 온도 차에 따른 화재 위험성을 검토하였다. 앞의 두 실험은 농업용 전열온상 시스템의 특성을 알아보기 위한 예비실험으로 진행하였다.

세 번째 본 실험에서는 전열온상선의 설치 미흡 상태를 재현한 후, 전열온상선의 길이별 온도 상승 양상을 측정하였다. 이를 통해 설치 불량에 따른 과열 및 화재 가능성을 정량적으로 평가하였다.

4.3 예비실험 ① – 전열온상선의 전기적 특성 연구

정선소방서 후정 차고에서 진행하였으며 당일 온도는 28℃, 습도는 40~50% 였다. 실험은 가로 1.2m×세로 4.8m의 합판에 220V, 1kW 전열온상선을 지그재그로 설치하였으며 초기 설치 길이는 120m로 하였다.

이후 실험 단계별로 온상선의 길이를 110m, 90m, 70m로 절단하면서 각 구간에서의 전류(A), 저항(Ω) 값을 멀티 테스터기를 이용하여 측정하였다.



Fig 18. Experimental devices

4.3.1 예비실험 ① 결과

예비실험에서는 농업용 전열온상선의 길이 변화에 따른 전기적 특성(전류, 전압, 저항값)의 변화를 측정하여 발열체의 직렬 저항 특성과 발열량의 관계를 파악하고, 과전류 또는 국부 발열 위험성

을 분석하였다.

전열온상선은 각각 120m, 110m, 90m, 70m의 구간으로 나누어 동일한 조건에서 측정하였다. 실험을 통해 확인한 전열온상선의 전기적 특성 변화는 도체의 저항이 길이에 따라 선형적으로 변화한다는 이론적 관계를 잘 보여준다.

전열온상선의 길이를 단계적으로 줄이면서 전류, 저항을 측정한 결과 길이가 짧아질수록 저항이 일정한 크기로 감소하고 그에 따라 전류가 증가하는 경향이 명확하게 관찰되었다.

이러한 결과는 다음의 전기 저항 공식에 의해 설명할 수 있다.

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A}$$

여기서 R은 전체 저항, ρ 는 고유저항(도체 재질에 따라 고정), L은 도체의 길이, A는 도체의 단면적이다. 본 실험에 사용된 전열온상선은 동일한 재질과 단면적을 유지하고 있으므로 저항은 길이에 정확히 비례하게 변화한다.

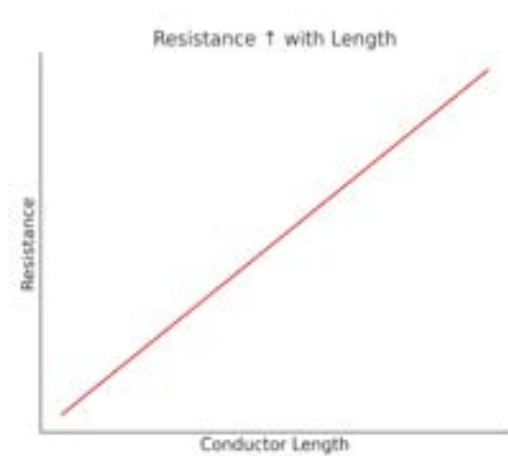


Fig 19. Linear increase of resistance with conductor length

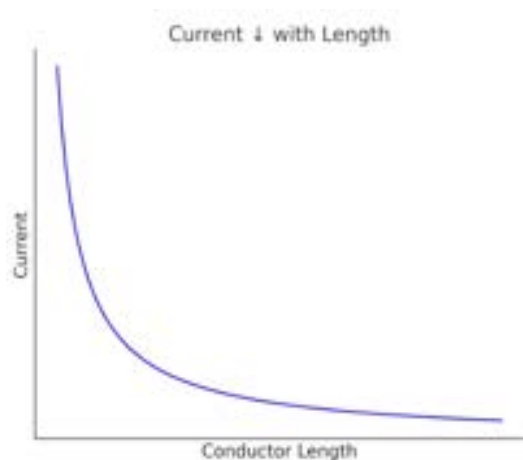


Fig 20. Decrease in current with increasing conductor length

즉, 전열온상선의 전체 길이에서 일부를 절단하면 그 절단된 구간에 해당하는 저항값이 회로 전체에서 동일하게 제거된다. 실험에서 전열온상선이 120m 길이일 때 측정된 저항은 44.0Ω 으로 측정되었으며 10m를 절단한 110m에서의 저항은 40.5Ω 으로 3.5Ω 이 감소하였고, 110m에서 90m로 20m를 절단하였을 때는 7.3Ω 이 감소하였다. 10m 마다 약 3.5Ω 의 저항이 그대로 빠진 것으로 해석할 수 있다.

Table 2. 전열온상선 길이에 따른 전기적 특성

Length	Electric current(A)	저항(Ω)	
120m	4.6	44.1	
110m	4.9	40.5	
90m	5.9	33.2	
70m	7.2	25.7	

이는 전열온상선이 직렬 저항체로 구성되어 있기 때문에 가능한 현상으로 전체 길이 중 일부가 제거될 경우 그 구간에 해당하는 전기 저항도 함께 제거되며, 그만큼 회로 저항이 절대값으로, 직선적으로 감소하게 된다.

4.4 예비실험② - 온도감지봉 비매설 상태에서의 성능 및 온도 분포

제1실험과 마찬가지로 정선소방서 후정 차고에서 실시하였으며 온도는 28.8℃, 습도는 35%인 상태에서 실험하였다. 온도조절기의 핵심 감지부인 온도감지봉(모세관식)이 상토에 매설되지 않고 공기 중에 설치된 상태에서도 정상적으로 온도를 감지하고 회로를 차단할 수 있는지를 실험하였다. 이 실험은 실제 화재 사례에서 온도감지봉의 설치가 미흡한 상황을 가정함으로써 비정상적인 설치 조건에서의 시스템 안정성을 확인하고자 한다.



Fig. 21 Experimental devices



Fig. 22 capillary bulb

4.4.1 예비실험② 결과

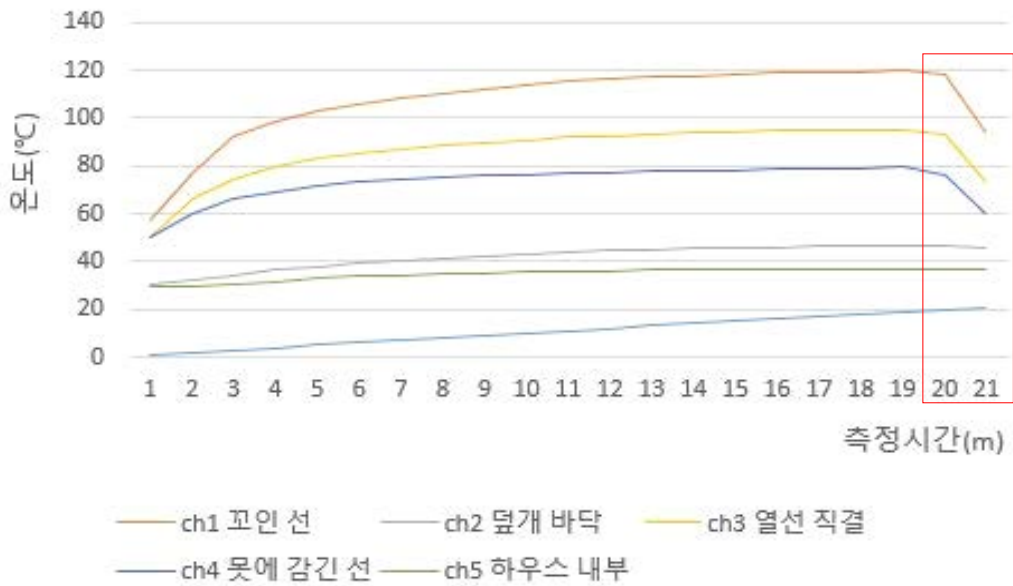


Fig. 23 Measurement of the power cut-off temperature of a mechanical thermostat

설정 온도는 40°C로 고정하였고, 전원을 인가한 후 하우스 내부 공기 온도가 약 37°C에 도달했을 때(실험 시작 20분 후) 회로가 차단되어 전원 공급이 중단되었다. 이는 설정 온도와 다소 차이가 있는 값으로 기계식 모세관식 온도조절기의 구조적 특성에 기인한 오차로 해석된다. 모세관식 써모스탯은 감지부 내의 액체가 온도에 따라 팽창하며 생기는 압력이 내부의 금속 벨로우즈(bellows) 또는 다이어프램을 밀어 스프링 장력과 균형을 이루는 구조이다. 이 구조는 전자식 온도

조절기와 달리 설정 온도와 실제 차단 온도 사이에 $\pm 3\sim 5^{\circ}\text{C}$ 이상의 편차가 발생할 수 있으며 이는 본 실험에서도 동일하게 확인되었다.

감지봉은 토양에 매설되지 않고 공기 중에 설치된 상태에서도 전열선의 발열에 반응하여 회로를 정상적으로 차단하였으며 이는 감지봉이 반드시 토양 내부에 설치되어야만 작동하는 구조가 아니라는 점을 알려준다. 다만, 감지 위치와 발열체 간 거리, 설치 조건의 차이에 따라 발열부의 실제 온도는 감지 온도보다 훨씬 높은 값을 기록하였다. 히, 온상선을 꼬아서 설치한 구간에서는 최고 온도 119.9°C , 열선과 직결한 구간은 95.4°C 까지 상승한 것으로 확인되었다. 이는 감지봉이 공기 중에 설치된 경우 실제 발열부에서의 온도 상승을 충분히 반영하지 못한 채 회로가 늦게 차단되는 문제로 해석된다.

이러한 결과는 온도감지봉의 설치 위치가 시스템 전체의 안전성에 미치는 영향을 실증적으로 보여주며, 감지봉이 상토 외부에 설치되어도 작동은 가능하지만 실제 발열체 과열을 적시에 반영하지 못할 가능성이 있다.

4.5 본 실험 – 전열온상선 설치 방법에 따른 화재 위험성 평가

본 실험은 농업 현장에서 빈번하게 발생하는 전열온상선의 부적절한 설치 상태의 발열 특성과 축열로 인한 화재 위험성을 연구하고자 한다.

특히 선로의 길이 변화와 전열온상선 설치 방법 불량 유형에 따라 국부 온도 상승 정도를 비교하여 화재 위험성과의 상관관계를 규명하기 위해 실험하였다. 온도감지봉은 파손된 상황을 가정하기 위하여 제거하였다.

Table 3. 온도기록계 설치 위치(전열온상선 120m, 90m)

구 분	내 용	비 고
Ch1	온상선 한 가닥에 직결	
Ch2	온상선 한가닥을 꼬아서 설치	

구 분	내 용	비 고
Ch3	고정 나사못에 2~3바퀴 감아 설치	
Ch4	온상선 사이 바닥	

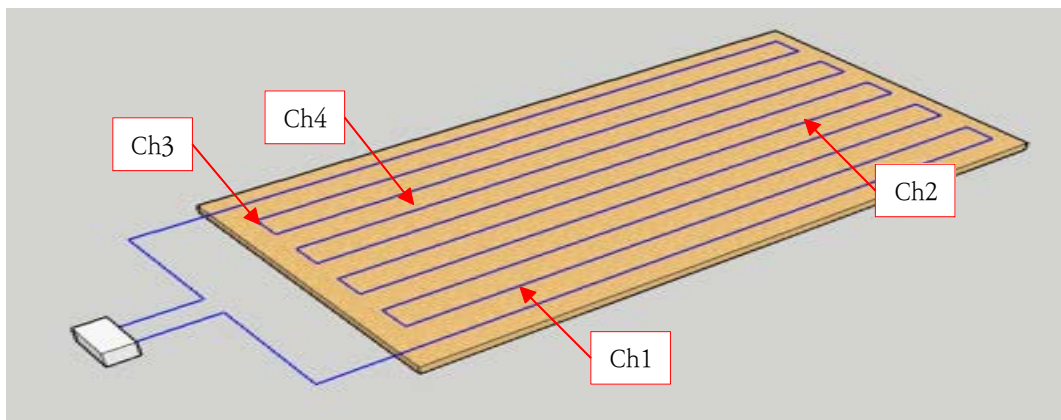


Fig. 24 Temperature measurement points using thermocouples

4.5.1 전열온상선 120m 설치



Fig. 25 Experimental devices

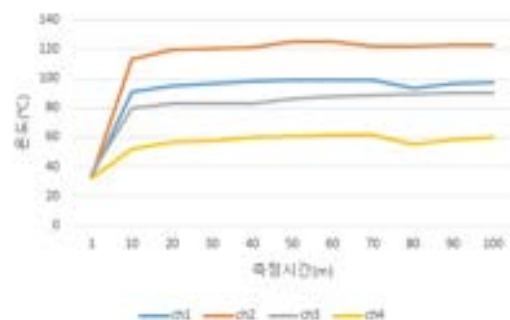


Fig. 26 Graph of temperature change over time

실험은 전열온상선 길이 120m 조건에서 100분간 진행되었으며, 온도는 10분 간격으로 측정되었다. 측정 결과 전원을 인가한 직후 빠르게 온도가 상승하였고 약 10분 이내에 대부분 최고온도에 근접하였다. 전열온상선 한 가닥과 직접 접촉된 Ch1 구간은 최고온도 약 99.2°C를 기록하며, 80°C 이상 고온 상태가 장시간 지속되었다. 화재 사례에서와 같이 보온덮개나 비닐로 전열온상선을 덮었을 때 발생할 수 있는 상황과 동일한 조건을 모사하였다. 가장 두드러진 온도 상승은 전열온상선을 꼬아 설치한 Ch2 구간에서 관찰되었다. 이 구간은 10분 시점에 이미 113.5°C에 도달하였고, 이후 최고 125.0°C까지 상승한 후에도 실험 종료 시점까지 120°C 이상을 지속적으로 유지하였다. 자동 온도조절 기능이 없는 직렬 저항형 온상선을 겹쳐서 설치했을 때 온도상승이 크다는 것을 알 수 있다. 금속 나사못에 2~3회 감아 고정한 Ch3 구간에서는 Ch1와 유사한 수준의 온도가 측정되었다. 해당 구간은 전열온상선이 겹쳐진 상태로 설치되었음에도 불구하고 금속 나사못을 통한 열 전도가 이루어지면서 열의 축적은 상대적으로 적은 것으로 추정된다. 마지막으로, 보온덮개 사이 바닥에 정상적으로 매설된 Ch4 구간은 가장 낮은 온도 상승을 보였다. 최대 온도는 약 61.5°C에 불과하였고, 전체 측정 시간 동안 일정한 수준을 유지하였다.

4.5.2 전열온상선 90m 설치(30m 절단)

전열온상선을 10m 절단 후 110m를 설치하였으나 온도 상승 외 유의미한 변화는 나타나지 않아 배제하였다. 전열온상선의 길이 외의 실험 세트는 전과 동일하다.

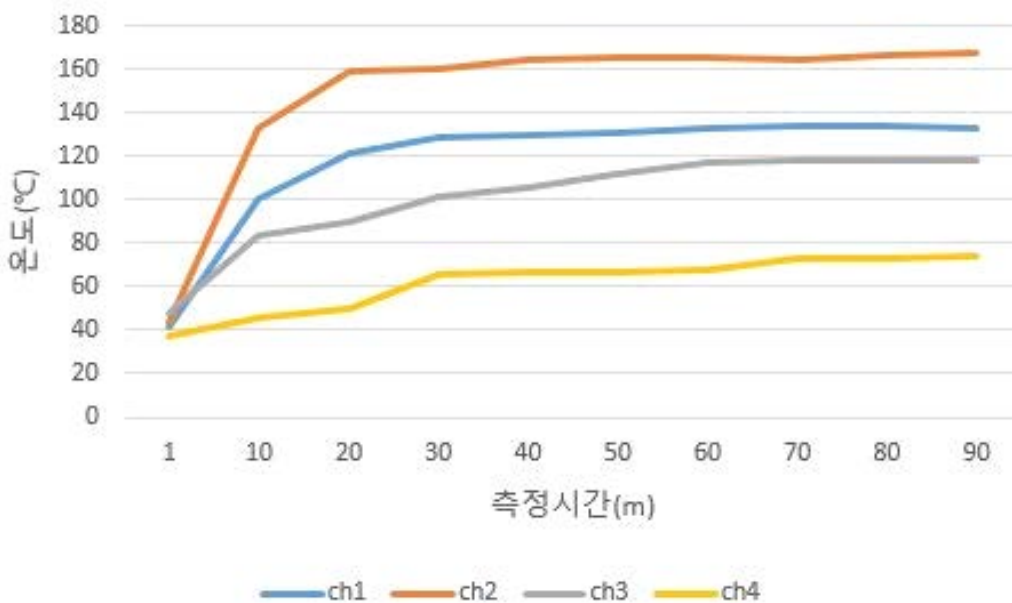


Fig. 27 Graph of temperature change over time

90m 길이의 전열온상선을 사용한 이번 실험에서도 온상선을 꼬아서 설치한 Ch2의 온도증가가 두드러지며 최고온도 165°C까지 상승하며 축열이 가장 심하게 발생하였다. 온상선에 직결한 Ch1과 나사에 감아 설치한 Ch3은 각각 133°C, 118°C까지 상승하였다.

실험 종료 후 하우스의 비닐과 보온덮개를 제거하여 내부 상태를 확인한 결과 보온덮개로 인하여 축열된 전 구간에서는 피복 절연이 파괴되었고 도체(발열체)가 외부로 노출된 상태가 확인되었다. 보온덮개 표면에는 그을음이 식별되었으며 이는 발열체에서 방출된 열이 절연재와 덮개 사이에 축적되어 연소 전 단계의 열화 반응이 진행되었음을 시사한다.

이번 실험은 밀폐된 보온 환경에서 축열이 장시간 지속될 경우 열 확산이 원활하지 않아 국부 온도가 절연재의 내열 한계를 초과하고, 구조적 손상으로 이어질 수 있음을 실증적으로 보여준다. 특히 보온덮개는 통기성이 낮은 재료로 구성되어 있어 열이 외부로 배출되지 않고 내부에 머무르게 되며, 이로 인해 열 축적과 절연열화가 동시에 진행된다.

만약 절연이 손상된 발열선과 보온덮개 간의 산소 공급, 열 축적이 복합적으로 작용한다면 화재로 이어질 가능성이 존재한다.



Fig. 28 Self Regulating Heating Cable



Fig. 29 Ignition Implement



Fig. 30 Self Regulating Heating Cable



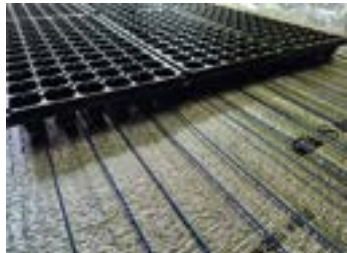
Fig. 31 Ignition Implement

4.5.3 전열온상선 70m 설치(50m 절단)

실험 세트는 기존과 거의 동일하고 약간에 변화를 주었다. 보온덮개를 절반만 설치하여 전열온상선의 절반을 외부에 노출시켜 공기와의 접촉면을 증가시켰다.

보온덮개를 제거한 전열온상선 상부에는 가연물과 발열체를 직접적으로 접촉시키기 위해 농업 현장에서 일반적으로 사용하는 플라스틱 재질의 육묘 모판을 배치하였다. 변화에 따라 온도기록계 설치 위치를 아래 표와 같이 변경하였다.

Table 4. 온도기록계 설치 위치(전열온상선 70m)

구 분	내 용	비 고
Ch5	덮개를 설치한 전열온상선 직결	
Ch6	덮개 바닥	
Ch7	모판 아래 전열온상선 직결	
Ch8	모판 아래 바닥	

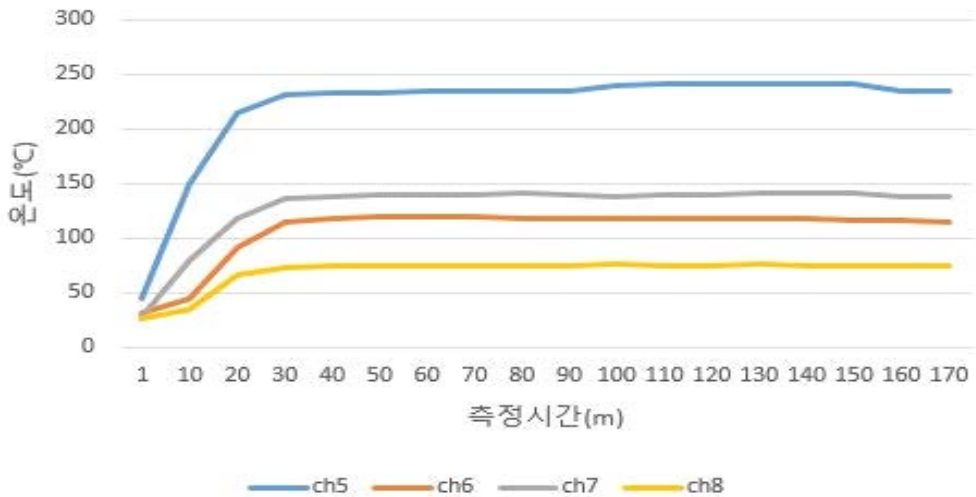


Fig. 30 Graph of temperature change over time

전열온상선의 길이를 70m로 축소한 극단적 조건에서 실험을 진행한 결과 전반적으로 온도 상승 폭이 크게 확대되었다. 특히 보온덮개 아래 전열온상선에 직결로 연결한 Ch5 구간은 최고 약 240°C에 도달하며 실험 내내 240°C 이상을 유지하였다. 모판 아래 전열선 Ch7 구간도 최고 160°C 이상으로 상승하였으며 보온덮개를 덮지 않아 열축적이 원활하지 않은 상태에서도 고온이 측정되었다. 실험 중 발생한 특이점으로는 실험 시작 20분 후 보온덮개 아래의 전열온상선의 온도가 200°C에 육박하였고 다량의 연기가 발생하였다. 이전 실험의 결과로 보아 절연재는 모두 용융되어 온상선의 도체(발열체)가 보온덮개에 직접 닿았을 것으로 추정된다. 연기가 지속되는 상태에서 80분 후 최고온도인 240°C에 도달하였고 실험 시작 170분 후 비교적 공기와의 접촉이 원활한 보온덮개 가장자리에서 <Fig 32, 33>과 같이 불꽃이 발생하였다.

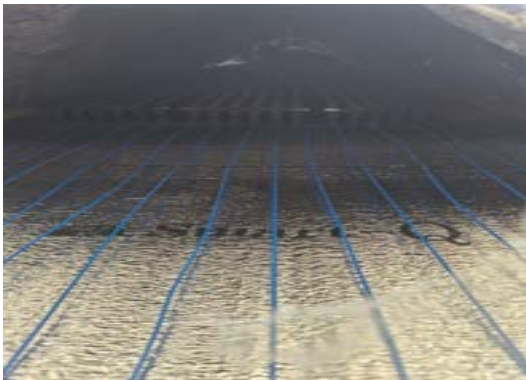


Fig. 31 The smoke-filled interior of the seedling greenhouse



Fig. 32 Ignition point



Fig. 33 Ignition point

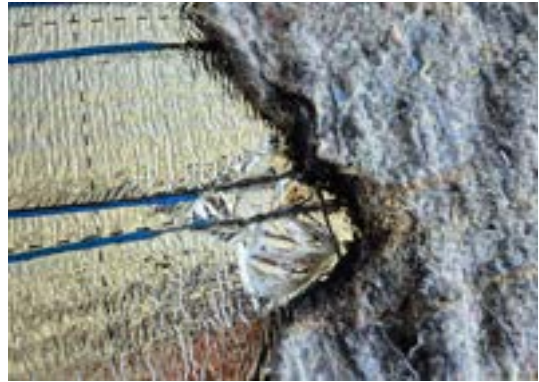


Fig. 34 Ignition point

모판 아래의 전열온상선도 최고온도 160°C 에 도달하면서 모판이 용융되는 변화를 보였다.



Fig. 35 Melted seedling tray



Fig. 36 Melted seedling tray

5 결론 및 고찰

본 연구는 농업용 육묘 하우스에서 널리 사용되는 전열온상선을 대상으로, 설치 방식 및 사용 환경에 따른 발열 특성과 화재 위험성을 실험적으로 분석하였다. 본 실험을 통해 전열온상선의 길이, 설치 상태, 보온덮개 및 외부 자재(모판) 유무가 온도 분포와 위험 수준에 미치는 영향을 규명하였다.

첫 번째 실험에서는 전열온상선의 길이를 변화시키며 전기적 특성을 분석한 결과, 선로 길이가 짧아질수록 단위 길이당 발열량이 증가하며 과열 가능성이 높아짐을 확인하였다. 특히 70m 조건에서는 200°C 이상 고온에 도달하였고 절연 열화 및 도체 노출이 발생하였다.

두 번째 실험에서는 모세관식 온도조절기의 감지봉 위치에 따라 차단 시점의 온도 편차가 발생하며 실제 발열체 온도와 최대 70°C 이상의 차이가 확인되었다. 이는 감지봉 위치가 적절하지 않을 경우 과열 상태에서 전원 차단이 지연되어 화재 위험이 증가할 수 있음을 의미한다.

세 번째 실험에서는 전열온상선의 다양한 설치 미흡 상태를 재현한 후 온도 상승과 발화 위험성을 평가하였다. 그 결과 꼬임 설치와 보온덮개에 덮여 축열되는 상황에서 고온이 장시간 유지되었으며 전열온상선의 절연재가 용융되었다. 특히 마지막 전열온상선 70m를 설치한 실험에서는 보온덮개를 절반만 덮고 나머지 구간에 플라스틱 모판을 배치한 조건에서 고온이 지속된 후 약 170분경 실제 불꽃이 발생하였다. 불꽃은 보온덮개 가장자리 부위에서 먼저 형성되었으며 이는 전열온상선과 보온재가 접촉하여 축열되는 상황에서 원활한 산소 공급이 이루어 진다면 실제 발화로 이어질 수 있는 위험성을 시사한다.

이러한 실험 결과는 전열온상선이 일정 조건에서 실제 화재로 이어질 수 있음을 실증적으로 보여주는 것으로 농업용 전열기기의 안전한 설치 기준 마련과 현장 지침 강화의 필요성을 보여준다. 본 연구는 전열온상선의 구조적 위험성과 화재 전개 메커니즘을 재현함으로써, 향후 안전기준 제정 및 예방 대책 수립에 기초자료로 활용될 수 있다.

참고문헌

- 1) 국가화재정보시스템(www.firedata.go.kr), 소방청 국가화재정보센터
- 2) 농촌진흥청(www.rda.go.kr) / 농사로:농촌진흥청 농업기술포털(www.nongsaro.go.kr)
- 3) 한재섭, 김민섭, 함승훈, “농업용 전열 온상선 화재 위험성 연구”, 강원도소방본부 광역화재조사, 2019.
- 4) 임정호, 방선배, 박광목, “동파방지열선의 단락 화재 위험성 연구”, 한국화재조사학회, pp. 140-146, 2018.

2025년 화재재현실험 연구보고서

- 발행일 2026년 6월
 - 발행인 강원특별자치도 소방본부장 오승훈
 - 발행처 강원특별자치도 소방본부 화재대응조사과
 - 주 소 강원특별자치도 춘천시 중앙로 1
 - 전 화 033)249-5138
 - 인 쇄 춘천인쇄
-

※ 비매품