

[Research Paper]

콘센트 전원 접속구 화재 발생 메커니즘 고찰과 새로운 감식 방법 제시

박진영[†] · 방선배^{*} · 은희림^{**} · 오세혁^{***} · 이유빈^{****} · 고영호^{*****}

전기안전연구원 선임연구원, ^{*}전기안전연구원 수석연구원, ^{**}고창소방서 화재조사관, ^{***}예산소방서 화재조사관,
^{****}계룡소방서 화재조사관, ^{*****}전북대학교 전기공학과 교수

Fire Mechanism in Power Connection Points of Outlets and Suggestion of a New Identification Method

Jin-Young Park · Sun-Bae Bang^{*} · Hee-Rim Eun^{**} · Se-Hyeok Oh^{***} ·
Yoo-Bin Lee^{****} · Young-Ho Ko^{*****}

Senior Researcher, Electrical Safety Research Institute,

^{*}Chief Researcher, Electrical Safety Research Institute,

^{**}Fire Investigator, Gochang Fire Station,

^{***}Fire Investigator, Yesan Fire Station,

^{****}Fire Investigator, Gyeryong Fire Station,

^{*****}Professor, Dept. of Electrical Engineering, Jeonbuk National Univ.

(Received May 6, 2020; Revised May 19, 2020; Accepted May 21, 2020)

요 약

대부분의 콘센트 화재는 플러그 핀과 핀받이 주변에서 발생하는 것으로 알려져 있다. 하지만, 플러그 접속점 이외에 콘센트의 전원 접속구에서도 화재가 발생할 수 있다는 것을 간과하면 안 된다. 본 연구에서는, 전원 접속구에 연선이 불완전하게 접속될 때, 발화 가능성을 확인하였다. 실험은 기초실험과 재현실험으로 나누어 진행하였다. 기초 실험은 접속구에 체결되는 연선의 가닥 수에 따른 발화 가능성을 확인하고 잔존물의 특징을 파악하였다. 재현실험은 전등, 청소기, 히터 등의 부하를 콘센트에 연결하고 접속구에서의 발화가 화재로 진전되는지 확인하였다. 실험 결과, 접속구에서 발생한 발열과 아크로 인해 화재로 진전되었고, 잔존물인 U-자 고정금구와 클립에서 부분적 손실이 식별되었다. 이에 따라, 연선을 사용한 전기배선이 콘센트에 불완전 접속되었을 때, 화재의 발생 가능성을 증명하였고, 잔존물의 특징으로부터 화재원인을 판정할 수 있다는 것을 확인하였다.

ABSTRACT

Most outlet fires occur around plug pins and plug pin receivers. However, no research has been conducted on ignitions at power connection points. This study confirms the possibility of ignition after incomplete connection, using a stranded wire, to the power connection point of an outlet. The experiment was divided into basic and reproducing experiments. The basic experiment confirmed the possibility of ignition according to the number of wire strands connected to the power connection point, and it identified the characteristics of the residue after the fire. In the reproducing experiment, lamps, vacuum cleaners, and heaters were connected to an outlet to check if the ignition at the connection advanced into a fire. The fire advanced due to the heat and arc generated at the connection point, and partial losses were identified in the U-type holder and clip. Accordingly, the results demonstrate that a fire may occur when the stranded wire is incompletely connected to the outlet. Moreover, it was confirmed that the cause of a fire can be determined based on the characteristics of the residue.

Keywords : Outlet, Stranded wire, Poor connection, Power connection point, Fire investigation

1. 서론

콘센트(Outlet) 화재는 플러그와 플러그 핀받이(이하 핀받이) 주변에서 과전류/과부하에 의한 과열⁽¹⁾, 먼지와 습기로 인한 트래킹^(2,3), 접속지점에서의 접속불량^(4,6), 프레팅 부식(Fretting corrosion)에 의한 산화 발열⁽⁷⁾ 등으로 주로 발생하는 것으로 알려졌다. 하지만 플러그 접속점 외에 콘센트의 전원 접속구(이하 접속구)에서도 화재가 발생할 수 있다. 접속구란 전원을 공급하기 위해 전원전선을 콘센트에 접속하는 지점을 말한다. 특히, 꽃음형 접속방식인 매입(벽붙이) 콘센트가 화재 발생 위험도가 더 높을 것으로 추정된다. 꽃음형 접속방식이 전선 체결을 편리하게 할 수 있는 장점이 있으나 규격에 적합하지 않은 전선 또는 사용자 부주의로 인해 불완전하게 접속될 수 있기 때문이다.

실제로, 호텔에서 사용 중이던 매입 콘센트에서 화재가 발생하였으며, 연선이 사용된 접속구에서 전기적 원인으로 출화된 것으로 지목되었다. 2019년 1월 14일 경 천안 소재 라마다 호텔에서 화재가 발생하여 사망 1명과 다수의 부상자가 발생하였다. 화재는 지하 1층 주차장을 개조한 린넨실에서 발원하였으며, CCTV와 현장 감식결과, 2구 콘센트에서 전기적인 원인으로 발화된 것으로 추정하였다. 관할 소방서와 국립과학수사연구원에서는^(8,9) 꽃음형 매입 콘센트에 전원전선을 연선으로 사용하여 압착력이나 결합력이 떨어져 불완전 접속을 유발한 것으로 판단하였으며, 이로 인하여 발생한 전기적 발열 및 불꽃이 가연물을 착화시키는 발화원인으로 작용한 것으로 추정하였다. 또한, 불완전 접속에 의한 단락으로 콘센트 구성 부품(누름 금구 및 단자 금구) 등에 전기적인 용융흔이 형성될 수 있다고 판단하였다.

하지만, 아직까지, 접속구에서 연선을 사용하였을 때, 나타나는 발화 현상과 잔존물의 특징을 구체적으로 연구하거나 분석한 사례가 없어 판단할 수 있는 정확한 근거가 없는 실정이다. 따라서, 콘센트 접속구에서 나타나는 발화 현상과 특징들을 알 수 있다면 좀 더 정확하게 화재 원인을

규명할 수 있을 것이다.

이에 따라, 본 논문에서는 접속구에 연선을 인입하였을 때, 접속불량으로 인한 과열 발화 양상을 고찰하고 화재원인을 규명하기 위한 감식기법을 찾고자 하였다. 이를 위해, 접속불량에 의한 열 이력과 접속구의 외형변화를 관찰하고 화재 후 잔존물의 특징을 파악하였다.

2. 매입(벽붙이) 콘센트의 구조

일반적으로 가정에서 사용하는 콘센트의 정격은 16 A이며⁽¹⁰⁾, Figure 1(a)과 같은 구조를 갖는다. 외함, 플러그 삽입부, 내함 등으로 구성되어 있고 그 중 내함 (Inner case)에는 접속구(Connection terminal)가 있으며, 접속구는 U-자 고정금구(U-type holder)와 클립(Clip)으로 구성된다. 전원 전선은 접속구의 고정금구와 클립 사이에 삽입되어 고정된다. Figure 1(b)는 콘센트의 뒷면으로, 누름버튼(Push button)을 누르면 고정금구와 클립 사이에 틈이 생겨 전원 전선을 삽입 또는 인출할 수 있다.

3. 실험구성 및 방법

실험은 기초실험과 재현실험으로 나누어 진행하였다. 기초실험에서는 전원전선(연선)이 콘센트의 접속구에 불량하게 체결될 경우 나타나는 현상과 잔존물의 특징을 관찰하였고, 재현실험에서는 콘센트에 조명, 청소기, 히터 등의 부하를 연결하여 사용 중 발생하는 화재 양상과 기초실험의 잔존물과 비교 확인하였다.

3.1 기초 실험 구성 및 방법

연선을 전원전선으로 사용하여 콘센트의 접속구에 연결한 경우, 사용자 부주의로 인해 연선의 일부만 체결될 수 있다. 이런 상태에서 부하를 연결하여 사용할 경우, 접속불량에 의한 과열이 발생할 것으로 예측할 수 있다. 이에 따라, 기초실험에서는 체결된 연선의 가다 수와 전류량을 변

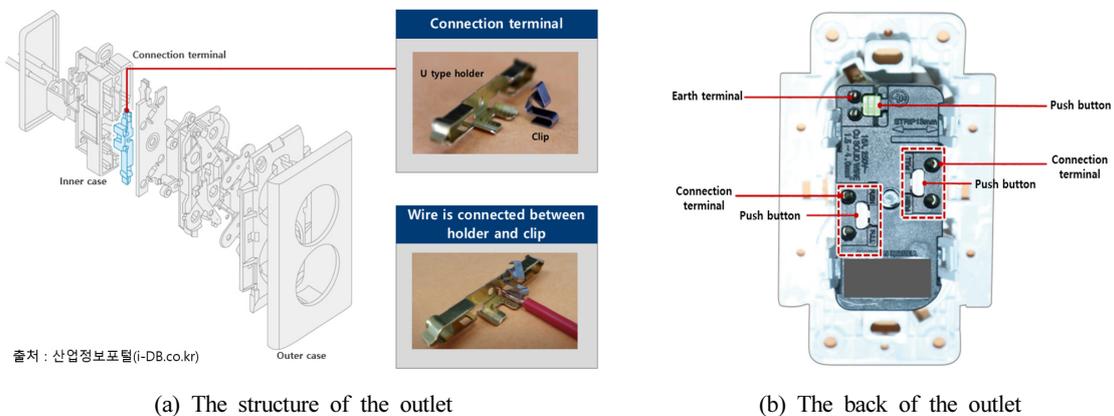


Figure 1. The composition of the outlet.

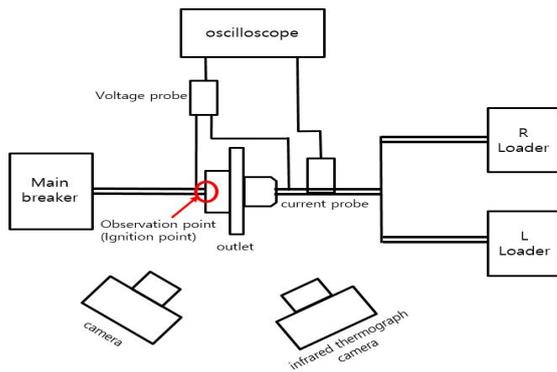


Figure 2. The composition of the basic experiment.

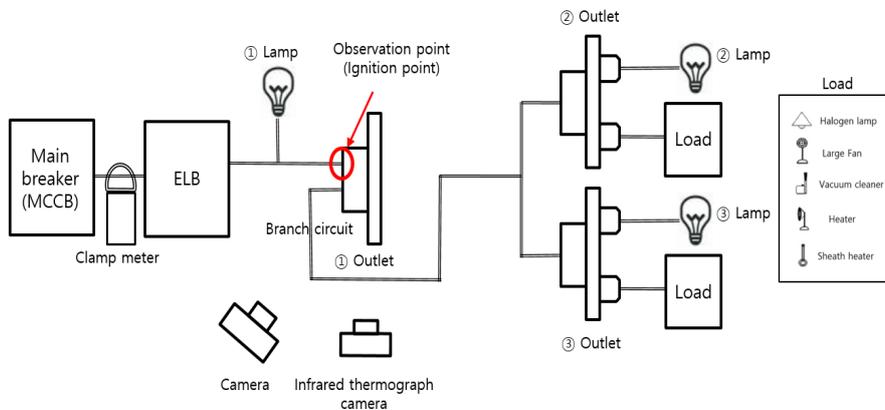


Figure 3. The composition of the fire reproduction experiment.

화시켜 접속구에서의 발화 가능성을 확인하였다.

실험에 사용된 전선은 KIV(비닐절연전선) 2.5 mm²의 연선으로, 총 42가닥으로 구성되어 있다. 접속구에 접속되는 가닥 수를 42가닥, 20가닥, 10가닥, 5가닥으로 나누고 각각의 경우에서 전류량을 15 A, 20 A, 25 A, 29 A로 변화시키며 열 이력을 관찰하였다. 가정과 사무실에서 30 A 차단기가 많이 사용되므로, 접속구에 흐를 수 있는 최대 전류를 29 A로 설정하였다. 이 과정을 통해 연선 가닥 수와 전류량에 따른 발화 가능성, 발화 현상, 아크 에너지, 잔존물의 특징을 도출하였다.

실험구성은 Figure 2와 같이 30 A 주 차단기(Main breaker), 매입 콘센트, 전압·전류 측정용 오실로스코프(Waverunner 610Zi, Teledyne lecroy), 부하장치, 접속구 온도측정용 열화상 카메라(Ti-45, Fluke), 촬영용 카메라로 구성하였다. 전압 프로브(Voltage probe)는 접속이 불량한 접속구에서 발생하는 직렬 아크를 측정하기 위한 용도로, 접속구의 앞쪽(전원측)과 부하용 코드선(부하측)에 연결하였다. 부하장치는 저항(R, Resistance) 부하와 리액턴스(L, Reactance) 부하를 겸용하였다. 이는 가정, 사무실 등에서 사용하는 냉장고, 선풍기, 세탁기 등에 리액턴스 성분이 있기 때문이며, 이 실험에서는 인가한 전류의 30%를 리액턴스 성분으로 설정하였다.

3.2 화재재현 실험구성 및 방법

화재재현 실험을 통해, 콘센트 접속구의 발화가 실질적으로 화재로 진전되는지 관찰하였다. 또한, 잔존물에 나타나는 특징을 기초실험 결과와 비교하여 공통된 점이 있는지 확인하였다.

조명, 청소기, 히터 등 실제 부하기기를 사용하여 Figure 3과 같이 구성하였다. 누전차단기(ELB)에서 ① 콘센트로 연결되는 전선은 연선을 사용하였으며, 5가닥만 접속점에 체결하였다. ① 콘센트에서 분기한 ②, ③ 콘센트에는 부하기와 통전 확인용 전등이 연결되어 있다. 연결된 부하기의 총 전류량은 29 A이다. 실험 조건은 대기온도 25 °C, 습도 43%, 풍향 남향, 풍속은 3.2 km/h에서 실시하였다.

4. 기초실험 결과 및 고찰

4.1 전선 가닥 수 및 전류별 발화 가능성 실험

Figure 4는 콘센트의 접속구에 연선을 42가닥, 20가닥, 10가닥, 5가닥을 연결하고 15 A, 20 A, 25 A, 29 A의 전류를 인가하여 접속구의 온도변화를 600 s 동안 측정한 결과이다. 전류를 증가시킬수록 최고온도가 높아지는 것을 알 수 있다. 인가전류가 29 A일 때, 42가닥은 68.2 °C, 20가닥

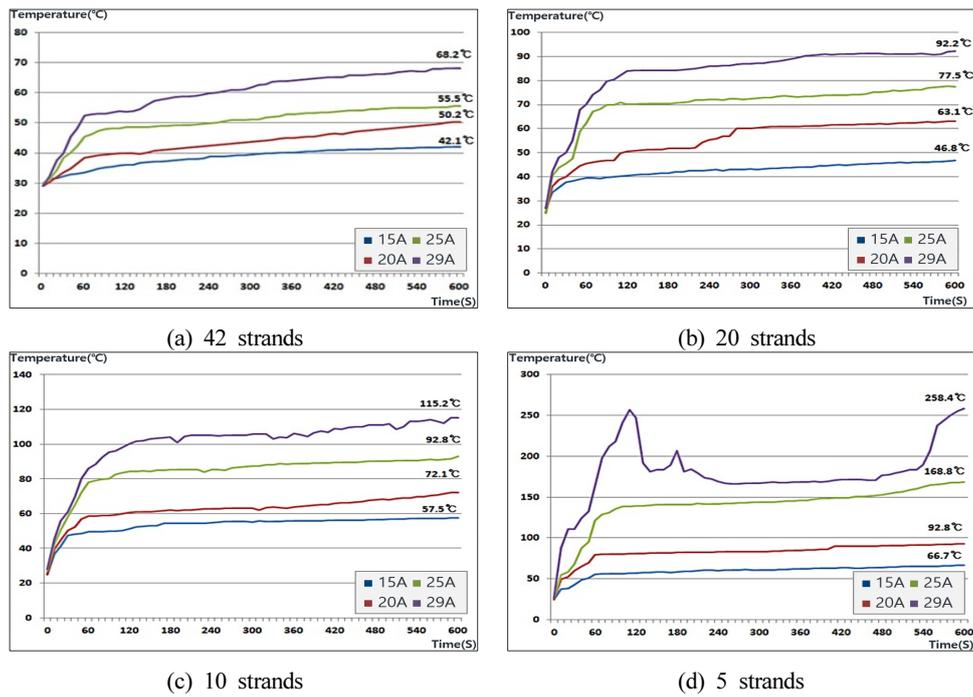


Figure 4. The temperature distribution variation of connector according to the number of wire strand and the amount of current.

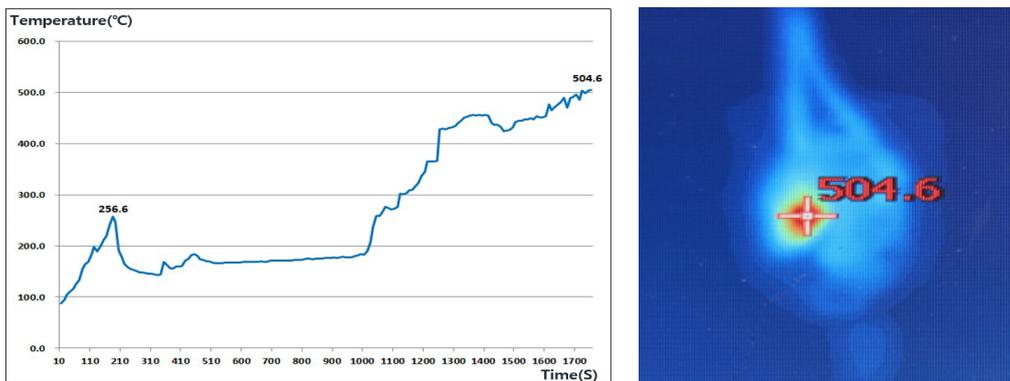


Figure 5. The temperature graph and maximum temperature at 5 strands of wire, 29 A.

은 92 °C, 10가닥은 115.2, 5가닥 258.4 °C로 측정되었다. 핀 받이를 감싸고 있는 내함은 Polybutylene terephthalate (PBT) 소재로, 열변형 온도는 200 °C로 5가닥, 29 A를 인가하면 열변형 온도를 초과하는 것을 알 수 있다. 이에 따라, Figure 5와 같이 5가닥, 29 A에서 접속구가 열변형 되어 발화될 때까지의 온도변화를 관찰하였다. 초기 180 s 동안에는 256 °C까지 온도가 급격히 상승하였으나 이후 온도가 190 °C로 유지되었다. 1,000 s 후 미소 아크가 발생 되며 다시 온도가 급격히 상승하였으며, 1700 s에서 아크와 함께 화염이 발생하였다.

4.2 발화 과정과 발생하는 아크 에너지의 크기

Figure 6은 5가닥, 29 A를 인가하였을 때, 시간 경과에 따라 접속구에서 나타나는 현상을 관찰한 것이다. 접속된

전선에서 발생한 국부적 발열로 연기가 발생하고 (Figure 6(a), (b)), 전선에서 적열로가 형성되며 전선 피복과 콘센트의 절연물이 열분해 되기 시작한다(Figure 6(c), (d)). 시간이 지날수록 절연물의 용융 부위가 넓어짐에 따라 U-자 고정 금구와 클립의 전선 고정력이 감소하여 접속구의 접촉저항이 더욱 증가한다. 이로 인해, 접속구에서 아크가 발생하고 적열로가 확장되며 온도가 가파르게 상승한다. 결국, 접속구에서 전선이 이탈하며 강렬한 직렬 아크가 발생한다 (Figure 6(e)~(g)). 강한 아크 에너지로 인해 화염이 발생한다(Figure 6(h)).

전선이 이탈하며 직렬 아크가 발생하는 이유는 전선이 접속구에서 떨어지는 순간 전류의 변화를 방해하는 방향으로 유기전압($e(t)$)이 발생하기 때문이다.

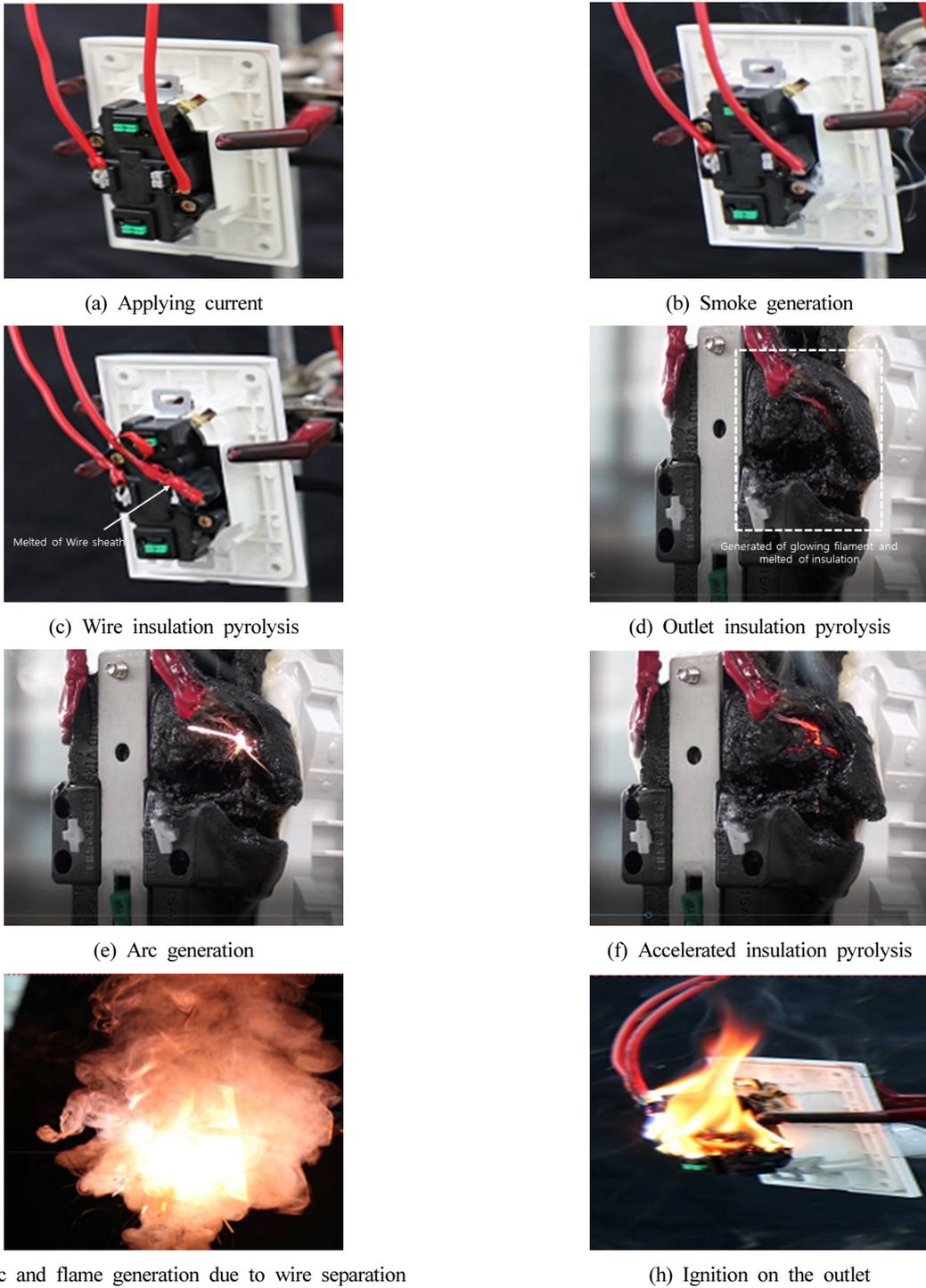


Figure 6. The ignition process of the connector due to poor connection.

$$e(t) = L \frac{di}{dt} [V] \tag{1}$$

여기서 $e(t)$ 는 유기 기전력, L 은 인덕턴스(m/H), di 는 미소 전류, dt 는 미소 시간을 나타낸다.

발생한 유기전압에 의해 Figure 7과 같이 아크 에너지(노

란색 선)가 전압, 전류의 변화에 따라 나타난다. 아크 에너지는 식 (2)에 의해 계산되며, 45 ms 동안 발생한 총 아크 에너지는 약 36 J이다. 이는 초당 9000 W의 전력이 발생한다고 볼 수 있다.

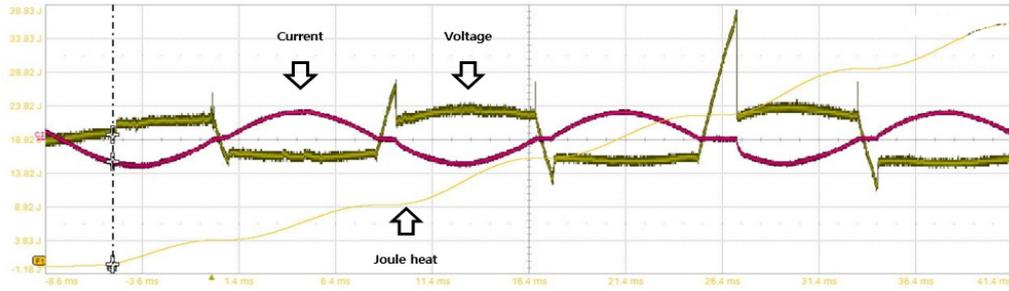


Figure 7. The arc energy generated at connector.

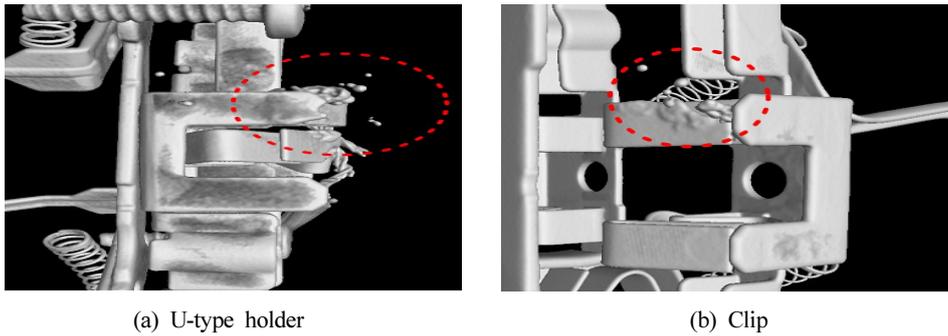


Figure 8. A trace of damage left in the remnants.

$$h(t) = \int_{t_0}^t |v(t) \cdot i(t)| dt [J] \quad (2)$$

여기서 $h(t)$ 는 아크 에너지, $v(t)$ 는 순시 전압, $i(t)$ 는 순시 전류이다.

또한, 실험하는 동안 접속구에서 아산화동 증식현상이 발생한 것을 확인하였다. 산화물이 생성되지 않은 구리 전선에서는 접촉점에 아크가 발생하더라도 전류 파형이 변화하지 않지만 산화물이 증식된 후 접촉점에서 아크가 발생하면 전류 파형에 shoulder가 나타난다⁽¹¹⁾. 아크 발생 후 3주기 동안의 전류 파형에서 5번의 shoulder가 발생한 점으로 볼 때, 접속구에서 아산화동이 증식한 것으로 판단할 수 있다.

실험 결과로부터, 연선이 접속구에 불완전 접속될 경우, 과전류에 의한 과열과 직렬 아크에 의한 아산화동 증식으로 발열하여 화염이 발생하는 것을 확인하였다. 이에 따라, 전선 접속구에서 연선이 불완전 접속되면 화재 발생 가능성이 있는 것으로 확인되었다.

4.3 발화 후 잔존물 분석

Figure 8은 아크가 발생한 접속구를 3D CT로 관찰한 것으로, U-자 고정금구와 클립이 손상되었다. 5번의 추가적인 실험을 한 결과, U-자 고정금구 손상 2건, 클립 손상 2건, 고정금구와 클립 모두 손상 1건을 확인하였다. 이 결과를 통해 접속구에서 발생한 콘센트의 잔존물(고정금구와 클립)에서 손상이 발생하는 것을 확인하였다. 이는 국립과학수사

연구원의 라마다 호텔의 감정 결과와도 일치한다. 즉, 접속구의 연선의 불완전 접속으로 인하여 발생한 아크 열은 콘센트 주변 부속품을 용융시킨다는 것이 입증되었다.

5. 화재 재현실험 결과 및 고찰

5.1 화재 양상

화재 재현실험을 통해, 콘센트 접속구의 발화가 실질적인 화재로 진전되는지 확인하였다. Figure 9는 연선을 불완전 접속시킨 ① 콘센트에서 화재가 발생하는 과정을 나타낸 것이다. 실험 시작 30 min 후에 온도가 상승하고 연기가 발생하기 시작하였다(Figure 9(b)). 연기가 발생하고 약 9 min 후 직렬 아크가 발생하며 ②, ③ 전등이 꺼졌으며, 이때, 최고온도는 565 °C로 측정되었다(Figure 9(c)). 이후 간헐적으로 콘센트에서 아크방전이 발생하였으며 이후 콘센트는 바닥으로 떨어졌다(Figure 9(d)). 화염은 전선관을 따라 상부로 확대되었으며 결국, 전선관 내 전선이 단락되어 주 차단기가 동작하고 화염이 일시적으로 강해졌으나 이후 화재가 약해졌다. 이때, 최고온도는 634 °C이었다(Figure 9(e), (f)).

실험 결과로부터, 콘센트 접속구의 발화가 충분히 화재로 진전될 수 있다는 것이 증명되었다. 또한, 소라된 콘센트 주변에 가연물이 있다면 이차적인 발화원으로 작용할 수 있을 것으로 판단된다. 여기서 주의할 점은 확대된 화염으로 인해 전선에서 발생한 2차 단락이 화재의 원인으로 오인될 소지가 있다는 것이다. 실제로, 라마다 호텔의 발화

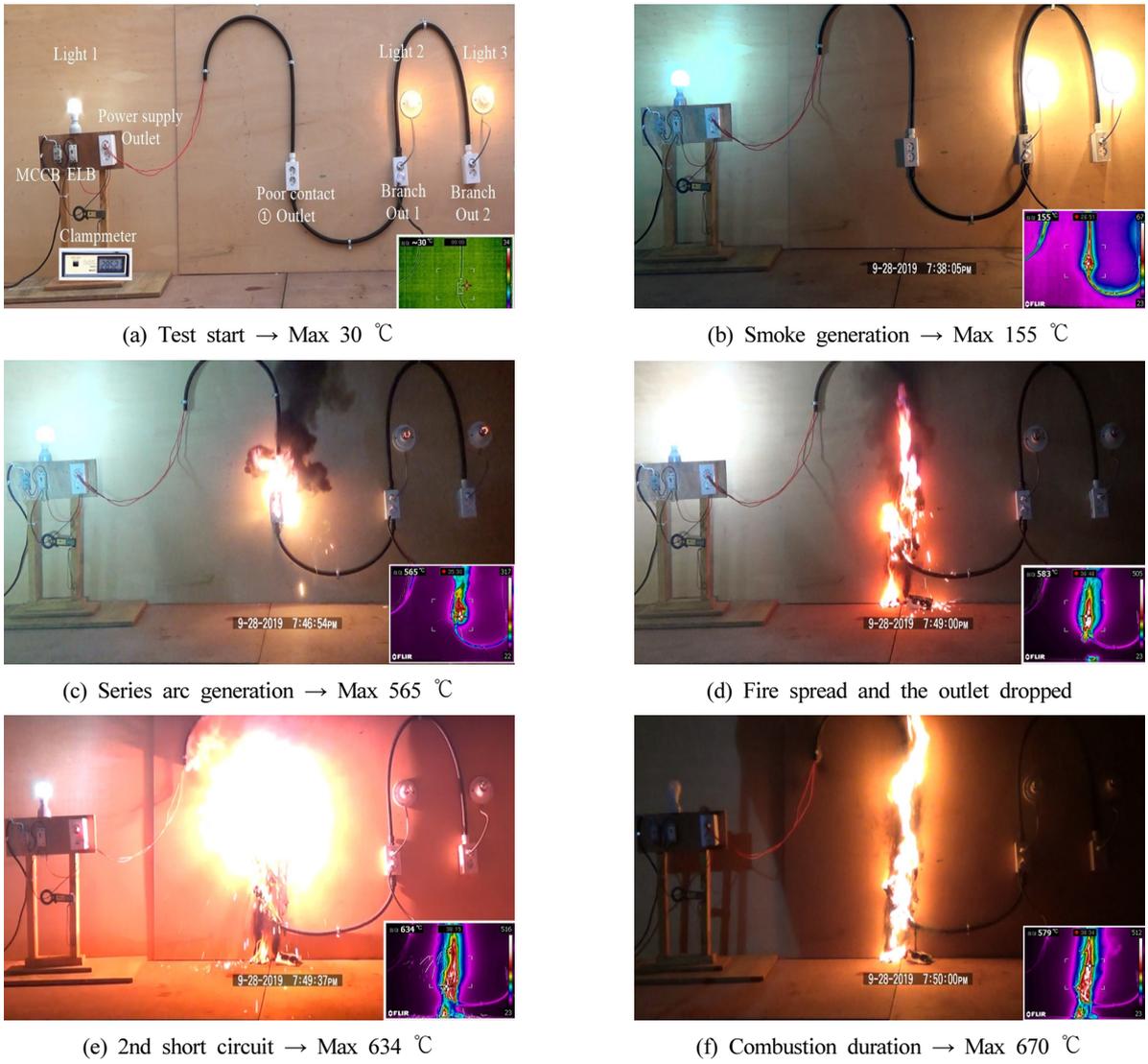


Figure 9. The ignition process by the fire reproduction experiment.

원인 콘센트의 전원 전선에서도 용융흔이 식별되었다^(8,9).

5.2 잔존물을 이용한 화재 감식기법

Figure 10은 소라된 콘센트 잔존물로, 내함이 본체에서 분리되어 있으며, 화염에 의해 단락된 용융흔이 식별되었다. Figure 11은 내함에서 접속구의 고정금구를 분리한 것으로, 기초실험과 유사하게 고정금구가 용융된 것을 알 수 있다. 화재 재현실험에서도 고정금구에 손상된 흔적이 식별되는 점으로 볼 때, 고정금구나 클립에서 손상된 흔적이 식별되면 콘센트 접속구에서 화재가 발생한 것으로 판단할 수 있다.

6. 결 론

실제 화재 사례와 감정 결과서를 바탕으로, 매입 콘센트 접속구에 연선이 불완전하게 체결되었을 때의 발화 위험성

을 확인하고 잔존물에 대한 감식기법을 제시하였다.

기초실험으로, 접속구에 접속되는 전선 가닥 수와 전류량에 따른 발화 가능성, 발화 과정, 잔존물 특징을 살펴보았다. 접속되는 연선의 가닥 수가 감소할수록, 높은 전류가 흐를수록 접속구의 온도는 크게 상승하였다. 5가닥, 29 A를 인가하였을 때, 아크가 발생하며 화재로 진전되었다. 이때, 온도는 504.6 °C까지 상승하였으며, 발생한 아크 에너지는 45 ms 동안 약 36 J이었다. 잔존물을 통해 U-자 고정금구와 클립이 손상된 것을 확인하였다.

화재재현실험으로, 접속구 발화가 실질적인 화재로 진전되는지 확인하였고, 잔존물의 특징을 기초실험과 비교 분석하였다. 실험이 진행되며 접속구의 온도가 상승하고 아크와 화염이 발생하였으며, 화염은 전선관을 따라 확대되었다. 콘센트는 용융되어 소라되었으며, 전기배선에서 2차 단락이 발생하였다. 소라된 콘센트가 2차 점화원으로 작용할 수 있다는 점과 2차 단락에 의해 생긴 용융흔이 화재 점

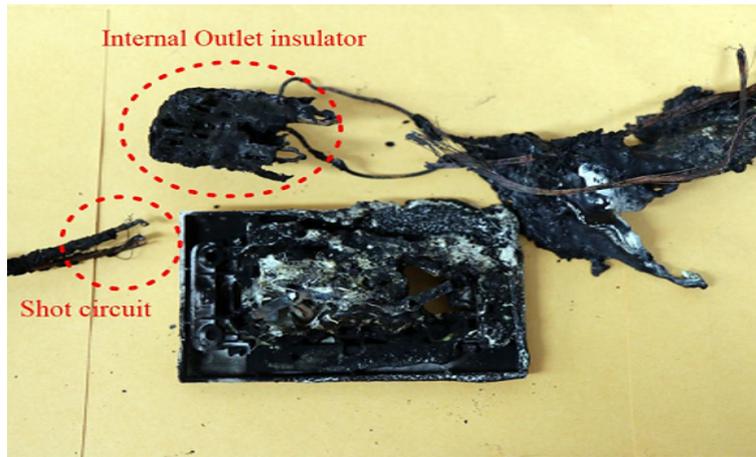
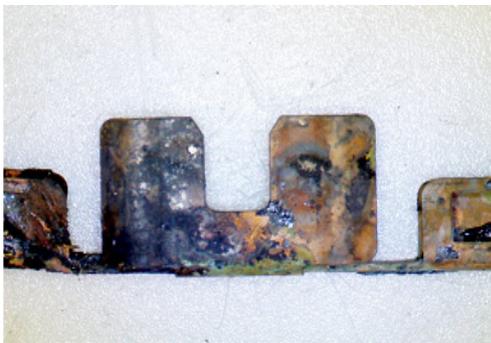


Figure 10. Remnants of the fire reproduction experiment.



(a) Arc-free U-type holder



(b) U-type holder with arc

Figure 11. Comparison of U-type holder with and without arcing.

화원으로 오인될 소지가 있다는 것을 확인하였다. 콘센트 잔존물로부터 U-자 고정금구가 손상된 것을 확인하였으며, 기초실험과 유사한 결과가 도출되었다.

이에 따라, 본 연구를 통해 연선을 사용한 전기배선이 콘센트에 불완전하게 접속될 경우, 화재가 발생할 수 있다는 것을 증명하였으며, 잔존물 특징으로부터 화재원인을 판정할 수 있다는 것을 확인하였다. 연구 결과가 콘센트 접속구의 발화 메커니즘을 이해하고 화재 감식기법으로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

References

1. D. H. Kim, S. C. Kim and K. C. Kim, "Analysis of Thermal Characteristics of the Electrical Socket-Outlets by Overcurrent", *Journal of the Korea Society of Safety*, Vol. 34, No. 3, pp. 8-14 (2019).
2. C. S. Choi, K. M. Shong, H. R. Kim, H. K. Kim, D. O. Kim and D. W. Kim, "A Stud on the Flame Pattern and the Electrical Properties of Electric Outlet Fired at Standby Mode", *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 39-44 (2002).
3. S. B. Sim, S. W. Jee, S. B. Oh, S. K. Kim and C. H. Lee, "A Study on the Tracking Characteristic Depending on Live Part form on the Plug", *Proceedings of 2011 Fall Annual Conference, Korea Institute of Fire Science & Engineering*, pp. 27-30 (2011).
4. C. S. Choi, H. K. Kim, D. O. Kim and Y. S. Kim, "The Properties of Waveform and Plug Formed by Poor Cord Sets", *Journal of the Korea Society of Safety*, Vol. 20, No. 1, pp. 87-90 (2005).
5. D. H. Kim and D. K. Hwang, "Analysis of Electrical and Thermal Signal for Series Arc in Electrical Contact", *Journal of the Korea Society of Safety*, Vol. 30, No. 5, pp. 1-7 (2015).
6. C. S. Choi, H. K. Kim and D. O. Kim, "The Properties Variation of PVC Insulated Plug Damaged by Poor Contact", *IEEE Proceeding of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials* (2003).
7. M. Friedlein, D. Gräf, F. Raiser, A. Jaumann and J. Franke, "Occurrence and Influence of Fretting Corrosion on Receptacle

- Contact Resistance”, IEEE Holm Conference on Electrical Contacts (2018).
8. Y. B. Lee, “Report of the Cause of Fire at Cheonan Ramada Encore Hotel”, Fire No. 2019-11, Cheonan Seobuk Fire Station (2019).
 9. J. G. Oh and S. H. Sa, “Legal Safety Report”, Registration No. 2019-C-472, National Forensic Service (2019).
 10. KS C IEC 60884-1:2002, “Switches for Household and Similar Fixed-electrical Installations-part 1 : General Requirements”, (2015 Identified), Korean Standards Association (2015).
 11. W. S. Kim, S. J. Park and D. H. Hwang, “The Heating of Cu-oxide and arc Properties According to Electrical Poor Contact”, Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 34, No. 3, pp. 15-20 (2019).