

전기화재는 조사 및 분석이 일반화재와 다른 출화 형태를 갖고 있다. 산업현장에서 널리 사용되고 있는 휴대용 전동드라이버의 연속패턴, 단면구조, 인접한 전화선의 열화특성 등을 분석하여 소손원인을 보다 과학적으로 입증하고자 한다.

# 휴대형 전동드라이버의 화재원인 판정

글 | 최충석 한국전기안전공사 전기안전연구원  
재해예방연구그룹장, 공학박사

## 1. 머리말

화재원인 조사는 화재 현장에 출동하여 연소 상황이나 소손 방향을 검토함과 동시에 관계자에게 화재 발생시의 상황 등에 관하여 질문하는 등의 수단으로 화재원인 등을 규명하는 것이다. 화재 조사를 함에 있어 구체적으로 판단하고 화재 발생의 과정을 통하여 그 원인을 규명하는 데 있어서 필요한 것은 과학성과 객관성이 입증되어야 한다는 것이다. 이는 화재 현장을 취급하는 어느 과정에서도 공통으로 요구되고 있지만 화재 조사는 연소 상황에 영향을 미치는 작은 요소라도 놓치지 않고 이를 충분히 확보하고 스스로 사실을 증명하고 해결하겠다는 탐구심이 필요하다. 화재는 일종의 연소 현상이므로 구조, 조직, 기구, 기타의 가연재뿐만 아니라 불연재의 재질, 형태, 설치된 위치, 기상, 소화 상황 등의 다양한 요소

나 상황이 관련되어 있다.

현장 발굴에서 얻어진 상황 증거 등 조사 결과에 따라 합리적인 판단과 과학적인 타당성을 이끌어 내고 출화 원인, 연소 확대 원인, 사전 예방상의 문제점 등 여러 가지 관련 요인들을 규명한다. 현장 조사에 대한 초기의 관찰 방법은 화재 현장 전체에 대한 거시적인 관점과 미시적인 관찰을 중점으로 수행하는 것이 중요하다. 소손 상황에 대한 관찰 조사는 불에 탄 것을 비교 대조하는 것이다. 물론 대상 물건의 재질, 형상이 동일하지 않다면 명확한 비교는 곤란하지만, 소손의 강약과 그 방향 및 수열의 방향을 관찰하고 연소 확대한 불꽃의 흐름을 따라서 귀납적으로 발화 지점을 판정한다.

전기화재는 에너지원이 전기이므로 조사 및 분석이 일반화재와 다른 출화 형태를 갖고 있다. 출화 개소 부근에 전기 배선 또는 전기 기기가 발견된 경우는 통전 입증(전압 인가를 포함)을 하는 것이 화재 가능성 확인의 중요한 척도이다. 다음에 그 기기가 전열기 또는 전열부를 가지는 기기의 경우는 취급 불량, 구조 불량에 의한 과열 출화인지 아닌지, 그렇지 않은 경우는 각각의 배선, 부품에 의한 트래킹, 누전, 단락, 반단선, 아크 방전, 과부하, 접촉 불량, 아산화동 증식 발열 현상, 은이동(Silver Migration) 등 출화 요인의 과학적인 입증에 따라 전기 배선 또는 전기 기기로부터 출화를 판정한다. 출화 개소 부근이 누전 경로를 형성할 수 있는 개소인지의 여부를 검토하여, 혹시 그렇다면 어디에서 전기가 누설(누전점)되어 어디의 접지물(접지점)에 흘러 출화개소(출화점)의 경로가 구성되는 것인지 분명히 함으로써 출화 원인을 판정한다.

접지점을 한정하는 것은 쉽지 않지만, 이 경우는 출화점을 구성하는 금속 부재가 접지되어 있는 것을 입증하면 충분하다. 출화 개소 부근에 정전기의 발

생 요건과 정전기 불꽃에 의한 착화물(가연성 가스, 먼지 등)이 존재하고 있는지의 여부를 조사함과 동시에, 스파크가 발생할 수 있는 것과 같은 조건의 유무와 정전기 불꽃의 에너지가 착화물의 최소 발화 에너지 이상으로 될 수 있는지 여부를 검증함으로써 출화의 가부를 판정한다.

본 논고에서는 일반 산업 현장에서 범용적으로 사용되고 있는 휴대형 전동 드라이버(Hand-held Motor-operated Electric Tools)의 소손 원인을 과학적으로 입증하기 위해 연소의 패턴, 단면의 구조, 배터리의 상태, 인접한 전화선의 열화 특성을 분석하고 종합적인 데이터를 지식 기반으로 하여 재현 실험을 통한 연소 과정을 증명하고자 한다.

## 2. 휴대형 전동 드라이버

### 가. 일반 사항

휴대형 전동 드라이버는 작업의 효율성, 편의성, 간편성 등의 장점을 갖고 있어서 산업 현장은 물론 일반 가정에서도 사용의 빈도가 증가하고 있다. 휴대형 전동 드라이버는 한국산업규격(KS C IEC 60745)에 적용 범위, 정격 입력 및 전류, 누설전류 및 절연 내력, 충전부에 대한 감전보호, 전원 접속 및 외부 유연성 코드, 내열성, 내화성, 내트래킹성, 절연물을 통한 절연 거리 등이 구체적으로 언급되어 있다.

■ <표 1> 전원 코드의 최소 단면적

정격 전류[A]	공칭 단면적[mm <sup>2</sup> ]
6 이하	0.75
6 초과 10 이하	1
10 초과 16 이하	1.5
16 초과 25 이하	2.5
25 초과 32 이하	4
32 초과 40 이하	6
40 초과 63 이하	10

(1) 전원 코드

휴대형으로 사용되는 전동 드라이버의 적용 범위는 정격 전압이 낮은 단상 교류 또는 직류 기기는 교류 250V 이하, 삼상 교류 기기는 440V 이하인 전동기 구동 또는 자기 구동 전기 공구를 규정하고 있다. 또한, 이동성이 매우 높은 기기이므로 전원 코드는 연선을 사용해야 하며 <표 1>과 같은 최소 단면적이 요구된다.

■ <표 2> 부분별 최대 정상 온도

부 분	온도 (°C)	
권선(등급 A)	75 이하	
기기 인입구 핀	고온 조건	95 이하
	저온 조건	40 이하
전원 코드(정격없을 때)	50 이하	
스위치 주위 온도	T 표시 없을 때	50 이하
	T 표시 있을 때	T-25 이하
콘덴서의 외부면(최대 동작 온도)		T-25 이하
	금속 물질	30 이하
핸들(정상 사용시)	자기, 유리	40 이하
	고무, 목재	50 이하

(2) 온도 상승

전동공구는 반복적인 사용과 연속 사용이 빈번하게 발생하는 기기이므로 온도 상승이 급격히 일어난다. 따라서 권선, 스위치 주위 온도, 콘덴서의 외부면 등 다양한 요소가 명확히 언급되어 있고 대표적인 예를 <표 2>에 나타냈다.

나. 작업 안전

휴대형 전동 드라이버의 개념은 전원에 연결하여 사용하는 전동기기(전선이 있는)나 배터리를 사용하는 전동기기(전선이 없는)를 의미하므로 작업장 및 사용자의 안전, 전기에 관한 안전, 전동공구의 올바른 사용과 취급 등에 대해서 다음과 같은 사항이 요구된다.

(1) 전기 안전

- 전동 드라이버는 순간 돌발 전류가 크기 때문에 기기의 전원 플러그가 전원 콘센트에 잘 맞아야 한다. 플러그를 약간만 변경시켜도 열 발생이 많을 뿐만 아니라 안전사고의 위험이 높아진다.
- 냉장고, 전자레인지, 금속 파이프, 라지에이터 등 금속성 도체의 표면에 몸이 닿은 상태에서 작업을 하면 감전의 위험성이 있다. 그리고 전원 코드가 열과 기름에 접촉하면 쉽게 산화되어 사고 발생 가능성이 높다.
- 전동공구를 물기, 습기 등이 있는 곳에 방치하였다가 사용하면 감전 위험이 있다.
- 전원 코드를 잡고 운반하거나 걸어 놓거나 콘센트에서 플러그를 뽑을 때 코드를 잡아당기면 반단선이 발생하기 쉽다.
- 옥외에서 작업을 할 때는 2중 절연 구조의 절연 전선 및 방수형 접속 기구를 사용해야 감전 사고를 예방할 수 있다.

(2) 사용자 안전

- 작업을 할 때에는 집중해야 하고, 경솔한 행동 시 위험한 상황에 노출될 수 있다. 또한 피로한 상태이거나 약물의 복용 및 음주 상태에서 주의가 산만하면 중상을 입을 수 있다.
- 안전한 복장 및 보안경의 착용이 요구된다. 전동 드라이버를 사용할 때는 금속 조각, 미세 분진 등이 발생하므로 미끄러지지 않는 신발, 안전모 또는 장갑 등을 착용하는 것이 바람직하다.
- 실수로 기기가 작동되지 않도록 주의한다. 전동 드라이버를 운반할 때 ON/OFF 스위치에 손가락

락을 대거나, 작동 스위치가 켜진 상태에서 전원을 연결하면 사고 위험이 높다.

- 작업에 적당한 복장을 갖추어야 한다. 헐렁한 복장이나 복잡한 장신구를 착용하는 경우, 또는 머리카락, 장갑이 작동하는 드라이버 가까이 닿지 않도록 주의가 요망된다.
- 분진 제거 장치나 수거 장치의 조립이 가능한 경우, 이 장치가 연결되어 있는지 또는 제대로 작동이 되는지 확인이 필요하다.

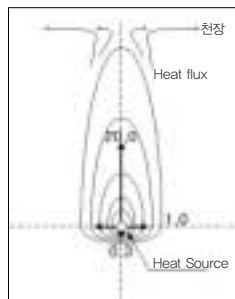
### (3) 올바른 사용과 취급

- 과부하 상태에서 사용을 피하고, 알맞은 전동공구를 사용하면 지정된 성능 한도 내에서 효율적으로 안전하게 작업할 수 있다.
- ON/OFF 스위치가 고장난 전동 드라이버를 사용하면 작업자가 정상적으로 제어할 수 없으므로 본인의 사고는 물론 2차 재해 유발 가능성이 높다.
- 작업을 시작하기 전 드릴을 교체하거나 부품을 교환하는 경우 또는 손질을 할 때는 반드시 전원 플러그를 뽑아야 한다. 순간적인 방심이 치명적 사상을 발생시킬 수 있다.
- 사용하지 않는 기기는 어린이의 손이 닿지 않는 곳에 보관해야 하며, 전동 드라이버 사용법 및 경험이 부족한 사람이 사용하는 경우 충분한 연습과 숙지를 통해서 작업에 임해야 안전 사고 발생을 예방할 수 있다.
- 가동 부위가 이상없이 정상적인 기능을 하는지, 걸리는 부위가 없는지, 기기의 기능에 중요한 부품이 손상되지 않았는지 확인하는 습관이 사고를 예방할 수 있다.

## 3. 가연물의 연소 패턴

### 가. 연소 속도비

가연물이 연소할 때 공간의 크기, 가연물의 특성, 공기의 유동 등에 의한 연소 조건의 차이로 연소 형태가 여러 유형으로 변화하지만 기본적인 연소 형태는 발화 지점에서 상단으로 연소하려는 성향이 가장 크고 상승 연소에 부가적으로 측면 연소하면서 미약하게 하단으로 연소하는 특성이 있다. 이와 같이 각 방향으로의 연소 속도비는 [그림 1]과 같이 수평 방향을 1로 했을 때 상방향 20, 하방향 0.3 정도이다. 이러한 연소 현상은 2차원적인 표현으로 V자 모양의 연소 형태를 보여 V패턴이라는 화재 용어로 표현하고 있으며, 연소 변화의 형태를 일반적인 연소 형태와 연소 조건의 변동에 의한 변화로 해석하고, 가연물과 산소의 조건에 따른 화재로 분류한다.

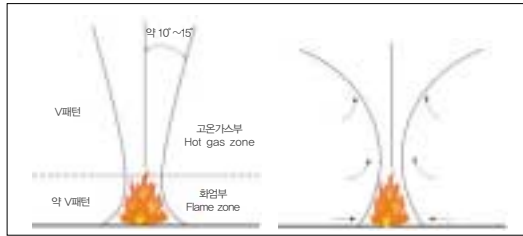


■ 그림 1. 각 방향의 연소 속도 및 등은 분포

### 나. 일반적인 연소 형태

풍향과 산소, 단일 가연물의 특별한 조건이 없다고 가정한다면 [그림 2]와 같이 화염부 상단(Hot gas zone)은 V패턴의 화염 및 연기 기둥(Plume)이 상승하여 확대한다고 볼 수 있으며, 화염부는 바닥에서부터 역 V패턴 형태로 화염이 확장되는 형태로 존재하므로 화염부의 작은 역 V패턴과 그 상단의 V패턴을 결합하면 하단이 좁은 모래시계 형태로 표현되는

것이 가장 적절하고, 중앙의 점선으로부터 화염 확산 측면의 각도는 12° ~ 15° 도의 경사를 유지하는 것이 가장 일반적인 화재 연소 형태이다.



■ 그림 2. 일반적인 연소 패턴 및 각도

■ 그림 3. 자유 공간 화재의 패턴

#### 다. 조건에 따른 연소 형태

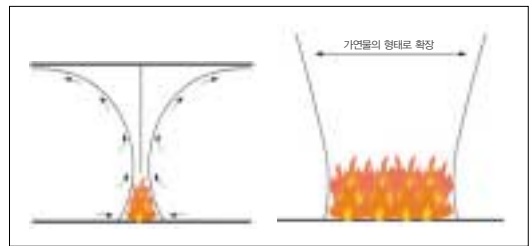
##### (1) 자유 공간 화재

[그림 3]은 자유 공간에서 발생한 화재의 연소 패턴을 나타낸 것이다. 화재시 천장이 없고 화재가 벽으로부터 멀리 떨어져 있을 때, 고온 가스와 연기 플룸은 수직적으로 계속해서 일어난다. 이런 상태는 옥외에서 화재가 일어났을 경우이다. 이와 같은 상태는 아트리움 등의 높은 천장을 가진 큰 공간 안에서 화재가 발생했을 때 또는 플룸이 작을 때 바로 초기 단계에 건물 안에서 일어나는 화재에서 볼 수 있다. 자유 공간의 플룸으로부터 화재 확산은 가까이 있는 연료의 복사 발화에 의해 주로 결정된다. 고체 물질의 확산 속도는 공기의 유동(실외 화재의 경우는 바람) 또는 연료 예열을 허용하는 경사면에 의한 도움 없이는 대체적으로 느리다.

##### (2) 제한 공간 화재

[그림 4]와 같이 화재 플룸이 구획실의 천장 또는 벽과 상호 작용할 때 연기와 고온 가스의 흐름과 화재 성장에 영향을 준다. 화재가 발생한 곳의 위에 천

장이 있거나, 화재가 벽으로부터 이격된 곳에서 발생했을 때 상승하는 연기 기둥 안의 고온 가스와 연기는, 막고 있는 벽에 의해 차단될 때까지 천장면에 부딪치고 모든 방향으로 확산된다. 고온 가스가 천장 아래 플룸의 중심선에서 멀리 유동하기 때문에 얇은 층을 형성한다. 열은 얇은 층으로부터 위의 좀더 차가운 천장으로 전달되고 차가운 공기는 밑으로부터 유입된다. 이 층은 연기 기둥의 중심부로 가까이 갈수록 더 짙어지고 뜨거워지며, 플룸의 중심선으로부터의 거리가 멀어질수록 더 얇어지고 차가워진다.



■ 그림 4. 제한 공간 화재의 패턴(천장이 있는 경우)

■ 그림 5. 가연물 지배형 화재의 패턴

##### (3) 가연물 지배형 화재

[그림 5]는 가연물 지배형 화재의 패턴을 나타낸 것이다. 가연물의 조건에 따른 화재 확산의 지배를 받는 형태로 가연물이 액상일 경우 흐르거나, 퍼지는 방향으로 표면적이 넓은 방향으로 연소가 확산된다. 고층 또는 밀집된 건물이 없이 가연물이 수평 방향으로 전개되어 있는 경우가 해당된다.

## 4. 현장 조사 및 원인 분석

### 가. 발생 개요

전자제품 조립공장에서 발생한 화재로 오전 작

업을 마치고 점심 식사를 하러 간 사이에 발생한 화재이다. 화재 현장에는 휘발성이 높은 유기성 용매가 사용되고 있었고 전동 드라이버는 배터리를 착탈하여 사용하도록 한 것이다. 화재 발생 위치는 공장의 조립공정 옆에 있는 물품 수납 박스 위에 놓은 전동공구에서 발생한 것으로 판단된다. 전동 드라이버에 사용된 축전지의 사용 전압은 9.6V, 1.7Ah이며, 회전 속도는 0-320/900rpm이다. 인명 피해는 없었고, 재산 피해는 공장 내부의 오염 및 공정의 정지에 따른 생산 차질이 발생하였다.

현장에서 수거한 물품은 전동 드라이버 1점, 전화선 1점이며 주변에 비치된 소화기를 이용하여 화재가 진압되어 건물 전체로 확산되는 것을 차단할 수 있었다.

#### 나. 소손 물품의 패턴 분석

[그림 6]은 현장의 실제 사진을 나타낸 것이다. 연소 패턴은 [그림 2]와 같은 일반적 화재의 형태를 보이고 있고, [그림 1]에서 설명된 연소의 속도와 등은 분포와 일치함을 알 수 있다. 즉 화재는 건물의 아래 모서리(바닥)에서 출화하여 상부로 확산됐음을 알 수 있고, 탄화 심도가 바닥면 바로 위인 것이 확인된다.



■ 그림 6. 사고 현장의 실제 사진



■ 그림 7. 소손된 전동 드라이버의 실제 사진

[그림 7]은 소손된 전동 드라이버의 실제 사진을 나타낸 것이다. 전동 드라이버는 벽면 모서리 쪽에 위치하고 있으며 탄화는 전체적으로 고르게 이루어졌다. 이와 같은 탄화 흔적이 발생하기 위해서는 어떤 형태이든 충분한 가연물이 존재해야 가능한 것으로 판단된다.

[그림 8]은 현장에 위치한 형태로 수거하여 나타난 전면 실제 사진이다. 드릴 척, 모체 중심, 하단의 배터리 부분은 심하게 탄화된 반면 몸체 우측은 비교적 원형을 유지하고 있다. [그림 9]는 [그림 8]의 후면을 나타낸 것으로 소손의 흔적이 상대적으로 거의 없으며 비닐(PVC)이 용융되어 부착되어 있음을 알 수 있다. 즉 전동 드라이버 전면과 후면의 탄화 패턴의 형태를 분석하면 전동 드라이버 자체만의 탄화가 아니고 비닐이 부착되어 있음이 확인되었다.



■ 그림 8. 전동 드라이버의 상부 사진



■ 그림 9. 전동 드라이버의 후면 사진

[그림 10]은 [그림 8]의 연소 방향성을 알아보기 위해 절단하여 나타난 단면 실제 사진이다. 탄화는 외부에서 내부로 진행했음을 알 수 있고, 배터리가 있는 하단이 몸통의 상부보다 심하게 탄화된 것으로 나타났다. 또한 전동 드라이버 자체만의 탄화가 아니고 비닐이 용융되어 부착된 형태도 보이는 것으로 보아 어떤 형태이든 인위적 가연물이 사용된 것으로 확인되었다.

[그림 11]은 정상 제품과 화재 현장에서 수거한 제품의 외형을 비교한 사진이다. 기본적 형태는 일

치하지만 손잡이 하단은 대부분 소실되었고 배터리가 이탈되었음을 알 수 있다. 그리고 전동 드라이버의 작동 스위치를 분석한 결과 꺼짐 상태(OFF)에 위치하고 있었고 내부 발열 및 용융 흔적을 발견할 수 없었다.



■ 그림 10. 소손된 전동 드라이버의 단면 실체 사진



■ 그림 11. 전동 드라이버의 실체 사진 비교

[그림 12]는 탄화된 배터리의 실체 사진이며, [그림 13]은 동일 사양의 정상 제품을 나타낸 것이다. 정상 제품의 사양을 근거로 소손품을 분석한 결과 자체 결함 요인과 특이 사항이 없음을 확인할 수 있었다.



■ 그림 12. 탄화된 배터리의 실체 사진



■ 그림 13. 사고품과 같은 사양의 정상 제품



■ 그림 14. 현장에서 수거한 전화선의 실체 사진



■ 그림 15. 그림 14의 확대 분석 사진

[그림 14]는 사고 현장에서 수거한 전화선의 실체 사진을 나타낸 것이며, [그림 15]는 [그림 14]의 □ 부분을 확대한 것이다. 탄화 패턴 분석 결과 내부에

서 열의 발생은 없었고 외부 화염에 의해 탄화된 패턴을 보였다.

#### 다. 재현 실험

사고 현장의 탄화 패턴, 전동 드라이버의 단면 특성, 전화선 열화의 방향성 등을 입체적으로 해석한 결과 전동 드라이버의 내부적인 요인에 의한 화재가 아니고 외부 화염에 의한 화재로 판단된다. 따라서 분석 과정에서 확인된 인자의 조건과 유사한 환경인 온도 20℃, 습도 45%, 풍향이 없는 실내에서 재현하였다. 휴대형 전동 드라이버를 비닐로 감고 종이와 비닐로 다시 배터리를 [그림 16]과 같이 준비하고, [그림 17]과 같은 위치에 착화시켰다. [그림 18]은 12분 경과한 사진이며, [그림 19]는 17분 경과된 사진이다.

전동 드라이버를 바닥면에 놓고 한쪽 모서리에 착화시킬 경우 화염은 상부의 가연물인 비닐과 종이 혼합 포장지를 태우며 몸체 쪽으로 화염이 확산되는 것을 알 수 있다.



■ 그림 16. 비닐과 종이로 포장한 실체 사진



■ 그림 17. 배터리 하단부에 착화된 실체 사진



■ 그림 18. 착화 후 12분 경과한 실체 사진



■ 그림 19. 착화 후 17분 경과한 실체 사진

[그림 20]은 착화된 후 19분이 경과했을 때의 전면 실제 사진이고, [그림 21]은 후면을 나타낸 것이다. 탄화 패턴이 완벽하게 일치하지는 않았지만 비교적 유사한 소손 패턴을 보이고 있다. 이와 같이 오차가 발생한 이유는 화재 현장과 동일한 조건을 설정하지 못했기 때문으로 판단된다. 그러나 제한된 여건 내에서의 재현 실험 결과는 유사한 특성을 보인다고 말할 수 있다. 즉 화재 지속 시간은 약 19분 정도로 판단되며 가연물로 사용된 물질은 비닐(PVC)과 사무용 종이(A4)인 것으로 확인되었다.



■ 그림 20. 착화 후 19분 경과한 사진(전면)



■ 그림 21. 착화 후 17분 경과한 사진(후면)

## 5. 맺음말

일반 산업 현장에서 범용적으로 사용되고 있는 휴대형 전동 드라이버의 소손 원인을 과학적으로 입증하기 위해 연소의 패턴, 단면의 구조, 배터리의 상태, 인접한 전화선의 열화 특성을 분석하고 유사한 환경에서 재현 실험을 한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

가. 휴대형 전동 드라이버와 배터리의 소손된 형태로 보아 배터리 부분에서 착화되어 화염이 상측 방향으로 확산된 것으로 추정되며, 휴대형 전동 공구 ON-OFF스위치의 강제 통전 상태는 발견되지 않았다.

나. 배터리의 자연 발화 및 전기적 화재 가능성을 분석한 결과 특이한 어떠한 것도 발견할 수 없었다. 또한 전동공구 내부를 절단하여 분석한 바, 내부에서 충전원에 의해 발생될 수 있는 용융흔이나 발화된 흔적이 나타나지 않았다.

다. 전동공구와 배터리 접속 부분에서 화재가 발생하였다면 손잡이 부분을 중심으로 양쪽 부분이 거의 비슷하게 탄화되어야 하나, 배터리는 대부분 소실되었으나 손잡이 부분은 탄화 상태가 심하지 않았다.

라. 전화선은 외부 열에 의해 용융된 형태로 나타나며 전기 화재로 추정되는 어떠한 원인도 발견되지 않았다.

마. 출화 재현 실험에서 배터리 부근에 화원을 제공한 경우 약 19분 후에 진화한 소손 형태가 화재 현장에서 수거한 물품과 가장 유사한 화재 패턴을 나타냈다.

이상과 같은 전동 드라이버의 연소 패턴, 배터리의 소손 형태, 전동공구의 단면 구조, 전화선의 실제 현미경 분석, 유사 조건의 재현 실험을 종합해 볼 때 전기적인 화재의 발생 가능성은 없는 것으로 판정된 결과, 사고 당시 현장 종사자의 심문 및 조사를 통해 방화로 확인되었다. (㉸)