

낙뢰로 인한 전기화재의 현장조사기법 연구 A Study on Investigation Method of the Electric Fire Scene Caused by Lightning

송재용[†] · 사승훈 · 남정우 · 김진표 · 박남규

Jae-Yong Song[†] · Seung-Hun Sa · Jung-Woo Nam · Jin-Pyo Kim · Nam-kyu Park

국립과학수사연구원
(2010. 12. 6. 접수/2011. 2. 11. 채택)

요 약

최근 지구온난화에 의한 영향으로 낙뢰의 발생빈도가 증가하는 추세이고, 낙뢰에 수반되는 뇌격전류의 강도 또한 강해지고 있는 추세이다. 2008년 기준 국내의 낙뢰 발생 빈도는 56만여 건 정도가 발생하였으며, 낙뢰로 인한 인명피해 사고 및 건축구조물의 피해는 나날이 증가하고 있다. 특히, 낙뢰로 인한 전기화재는 낙뢰 발생에 따른 대지전위 상승으로 접지선과 전원선간 절연과괴 과정에서 발생되며, 현장조사 결과, 낙뢰 발생 지역에 인접한 지역에서 동시다발적으로 전기적 피해가 발생하였다. 낙뢰에 대한 피해를 방지하기 위해서는 낙뢰 보호 장치의 설치 및 등전위 접지 시행 등의 방법이 요구된다. 또한 낙뢰로 인한 화재현장 조사에 있어서는 기상청에서 제공되는 낙뢰 발생 기록 및 화재현장과 인접한 지역에서 동시다발적인 전기적 특이점 형성 여부에 대한 검토가 필요하다.

ABSTRACT

In recently years, occurrences of lightning return strokes have been increased by global warming effect and intensity of lightning impulse voltage and current accompanied by lightning discharges has been strengthening. In Korea, 560 thousand lightning discharges happened in 2008. According to the increasing frequencies of lightning, human deaths and damages to the structure have been increased steadily. Electric fire caused by lightning return strokes due to the breakdown between power line and ground line from the ground potential rise on a process of the lightning impulse current through to the ground. The damages of lightning were occurring at same time in the neighboring areas of the lightning point. In order to protect from the lightning stroke, we made a suggestion to use protection devices and equipotential bonding at the dangerous areas. The analysis results of electric fires caused by lightning would be utilized to investigate and to find accurate fire cause in the fire scenes.

Key words : Electric fire, Lightning, Ground potential rise, Fire cause, Investigation method

1. 서 론

최근 지구 온난화 영향으로 과거에 비해 낙뢰의 빈도가 높아지고 있으며, 낙뢰에 수반되는 뇌전압 및 뇌전류의 강도 또한 강해지고 있는 추세이다. 2008년을 기준으로 국내에서도 56만 여건의 낙뢰가 발생한 것으로 관측되었으며, 낙뢰 건수의 증가에 따라 낙뢰로 인한 인명 피해 및 시설물 피해는 꾸준히 증가하고 있다.

이러한 추세에 따라 낙뢰 보호대책에 대한 지속적인

연구가 수행되고 있으며, 일반 가정에서 사용되는 저압용 가전기기 및 전원 공급부 분전반에 이상전압에 대한 대책이 적용되고 있다.¹⁻³⁾ 그럼에도 불구하고 낙뢰에 의한 피해는 지속적으로 증가하고 있으며, 특히 각종 전기 기기 및 전원계통에서 절연물의 경년열화에 따라 절연내력이 감소하는 경우, 상대적으로 낮은 강도의 낙뢰에 의해서도 사고로 이어지게 된다.

과거에 비해 전원계통 및 가전기기 등에 고밀도 집적회로의 적용이 늘어남에 따라 외부로부터 유입되는 낙뢰 및 서지전압에 취약한 특성을 나타내고 있는 것 또한 낙뢰에 의한 피해를 증가시키는 요인이 되고 있

[†]E-mail: hvlab@korea.kr

다. 낙뢰에 의한 피해는 단순한 절연과파에 그치는 것이 아니라 전원계통에 과급되어 정전사고 및 화재사고로 이어지는 경우가 대부분으로 피해 양상은 다양하고 동시다발적으로 나타나고 있다.

특히 주택 밀집 지역이나 산간지역에 단독으로 설치되어 운영되는 농가 등에서 낙뢰에 의한 전기화재의 발생이 증가하고 있다. 낙뢰에 의한 전기화재 발생은 TV 안테나 등에 낙뢰가 직접 침입, 낙뢰 발생 후, 대지전위 상승으로 인한 절연과파 과정에서 발생하는 것이 대부분이며, 사고 복구 과정에서 발생하는 경우도 있다.

따라서 본 연구에서는 낙뢰로 인한 화재현장 조사 결과를 분석하여 낙뢰에 의한 전기화재 발생 메커니즘을 해석하고, 낙뢰 통계자료 분석을 통한 낙뢰 피해 정도 및 화재 발생 가능성을 검토하였다.

현장조사 및 통계자료에 대한 분석결과, 낙뢰에 의한 화재 발생가능성은 높은 것으로 판단되며, 본 연구 결과는 낙뢰에 의한 화재 발생 시, 화재현장 조사 및 낙뢰로 인한 화재 예방대책 등의 기초 자료로 활용 가능할 것으로 기대한다.

2. 낙뢰발생 메커니즘 및 통계 분석

뇌방전은 일반적으로 뇌운에 의해서 발생되는데, 뇌운 중에서도 특히 상층의 대기와 하층의 대기가 불안정한 층으로 구성된 적란운(積亂雲)에 의한 것이 대부분이다. 뇌운의 크기는 작게는 수 km에서 크게는 약 20km에 이르기도 한다. 또한 뇌방전은 눈보라, 모래폭풍, 화산 폭발시 구름 위에서도 발생하며, 맑은 날씨에서도 발생하는 경우가 있다. Figure 1은 전형적인 뇌방전 모델을 나타낸 것으로 뇌운과 대지사이의 방전은 뇌운의 정(+전하)와 부(-전하)가 중성으로 되려는 일련의 과정으로써 플래시(Flash)라고 하며, 지속 시간은 대

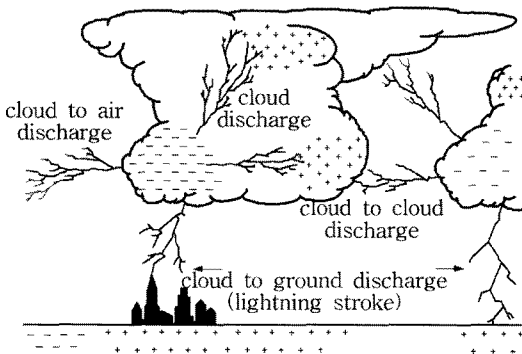
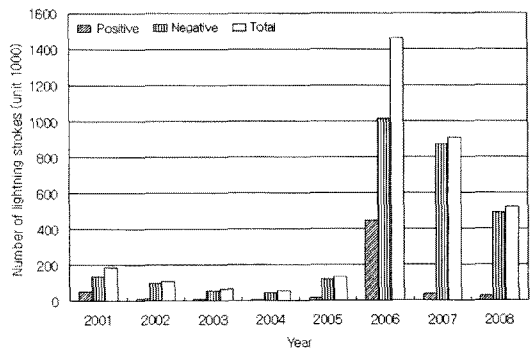


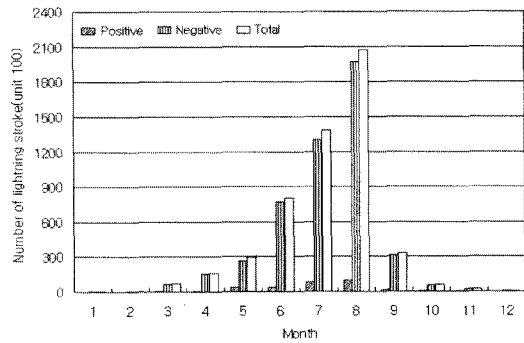
Figure 1. Types of lightning discharges.

체로 0.01~2초 정도이다. 플래시는 여러 가지 방전 성분으로 구성되는데, 그 가운데 스트로크(Strokes)라고 불리는 3~4개 정도의 펄스 형태로 나타나는 높은 피크 전류가 포함되어 있다. 이들 뇌방전 중에서도 뇌운과 대지사이에서 발생하는 방전 형태를 낙뢰라고 한다.^{4,6)}

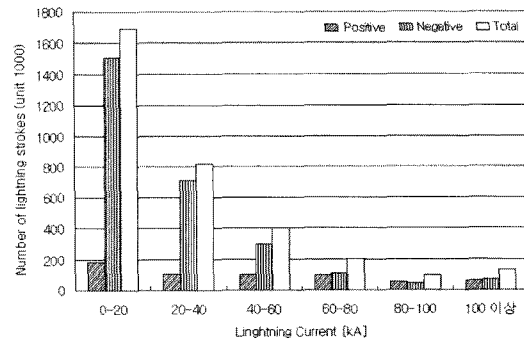
우리나라에서의 낙뢰 발생 빈도는 Figure 2(a)에 나타난 바와 같이 2006년을 기점으로 급증하는 추세에 있다. 또한 사계절의 기후를 보유한 특성상 Figure 2(b)에 나타난 바와 같이 다량의 수증기 유입으로 뇌운 발생이 활발한 5월부터 9월 사이에 많은 발생빈도를 보



(a) The annual frequency



(b) Monthly distribution



(c) Strength of lightning current

Figure 2. Stats statistical data of lightning return strokes.

이고 있는 추세이다. 특히 2006년 이후 낙뢰가 급증한 이유는 지구 온난화 등의 영향으로 기상이변이 속출하는데 기인한 바가 크다. 또한 기상청 및 한전에서 운용하는 측정시스템의 개선으로 정확한 낙뢰정보 측정이 이루어졌기 때문으로 판단된다.

낙뢰가 발생할 때, 낙뢰의 세기를 가늠할 수 있는 뇌전류의 크기는 Figure 2(c)에 나타낸 바와 같이 20kA 이하의 것이 가장 높은 비중을 차지하고 있으나, 2006년 이후 100kA 이상의 뇌격전류를 갖는 낙뢰 현상도 빈번하게 발생되고 있는 추세를 보이고 있다.

현재 배전계통에서 접지저항에 대한 제한치는 10Ω 이하가 되도록 규정하고 있다. 이러한 접지저항의 크기를 고려할 경우, 배전계통에 15kA 이상의 뇌격전류가 직격된다면 고압선 지지와 절연을 목적으로 설치되는 절연애자가 역섬락을 일으킬 위험이 있다. 특히 이들 낙뢰가 직접적으로 건축물 및 전력설비에 영향을 주는 경우, 정전사고 및 화재사고로 진전될 수 있으며, 해마다 낙뢰에 의한 인명 피해 및 물적 피해는 꾸준한 증가세를 보이고 있다.

Figure 3은 2001년부터 2006년까지 5년간 건축물 및 전력설비에서 발생한 직접적인 낙뢰에 의한 피해 정도를 나타낸 것으로 총 129건의 피해가 발생하였으며, 주로 산간지역 및 해안 지역을 중심으로 피해가 발생되

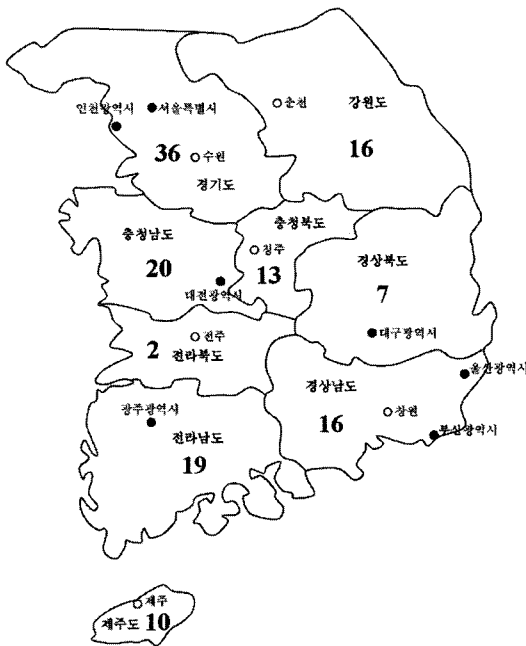


Figure 3. The damage to the structure caused by lightning discharges.

는 경향을 나타내었다.

통계 분석 자료에서 낙뢰에 의한 화재사고 피해 사례는 통계로 축적된 자료는 없으나, 자연재해에 의한 화재 발생 건수가 약 90여건 발생되고 있으며, 이중 대다수는 낙뢰에 의한 화재사고로 알려져 있다.

3. 낙뢰에 의한 전기화재

3.1 낙뢰에 의한 전기화재 발생 메커니즘

낙뢰가 발생되어 대지 또는 피뢰침에 뇌격이 가해지는 경우, 뇌격전류(I)와 대지의 저항율(ρ)에 의해 대지 전위 상승(GPR; Ground Potential Rise)이 발생한다. Figure 4에 나타낸 바와 같이 뇌격지점으로부터 거리 Dm 떨어진 두 지점 사이 Xm의 대지전위차는

$$GPR = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{D+X} \right) \quad (1)$$

로 나타낼 수 있다.⁵⁾

뇌격지점에 가까울수록 높은 대지전위 상승이 이루어지며, 상승된 대지전위가 접지선과 전원선 또는 접지측과 분전반 차단기 단자 등의 절연내력을 초과하는 경우, 절연파괴로 이어지며, 절연파괴 과정에서 수반되는 전기적 발열 및 불꽃은 절연피복이나 주변 가연물을 착화시키는 발화원인으로 작용한다. 이러한 메커니즘에 의해 낙뢰의 뇌격지점에 인접한 건축물 및 설비 등에서 전기화재로 이어지게 된다.

또한 전원선에 낙뢰가 직격되는 경우, 한쪽 전원선의 전위가 일시적으로 상승하고, 전원선간 또는 전원선과 접지선간에 절연파괴가 발생되면서 정전사고 또

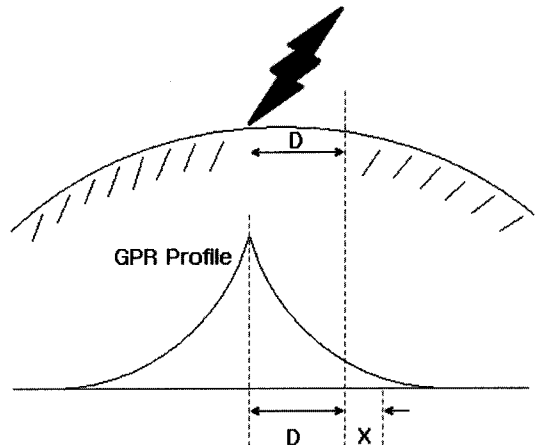


Figure 4. Schematic diagram of the ground potential rise from the lightning stroke point.

는 화재사고로 이어진다.

특수한 경우, 낙뢰가 배전계통 및 송전계통에 직격되는 과정에서 고압선로를 단선시키고, 고압선로가 지락되면서 고압선로의 고전압에 영향을 받아 직접적으로 화재가 발생하는 경우도 발생한다. 또한 고압선로의 지락 과정에서 고압선로에 의한 대지전위 상승으로 저압선로에서 절연파괴를 일으켜 화재사고로 진전될 수 있다.

3.2 낙뢰에 의한 전기화재 사고사례

낙뢰에 의한 화재사고는 순간적인 과전압 또는 과전류의 발생에 의한 것으로 낙뢰 발생지점을 중심으로 이에 인접한 건축물 및 전기설비에서 동시다발적으로 전기적 피해가 발생한다는 특징을 가지고 있다.

Figure 5는 낙뢰에 의해 화재가 발생된 건물의 개략도로 3층 건물 중, 1층 우측의 restaurant 1에서 화재가 발생되었으며, 전기적 특이점은 인접한 restaurant 2의 냉장고, 2층 office 2의 분전반 및 3층 office 3 확장형 콘센트 등에서 동시다발적으로 탄화된 현상 및 파손 흔적이 관찰된다.

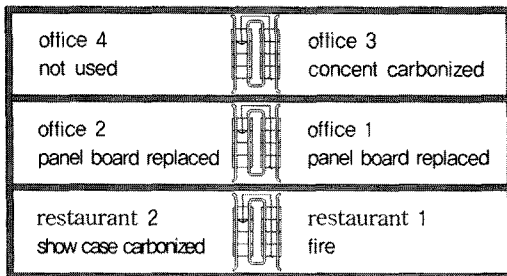
특히 Figure 6에 나타난 바와 같이 화재가 발생한

restaurant 1에서는 분전반 내 주 차단기의 전원측에 해당하는 단자 접속부를 중심으로 절연파괴된 현상이 식별되며, 화재 발생 장소에서 사용되는 가전제품 중, TV의 경우에는 내부기판이 절연파괴 과정에서 천공된 형태를 나타내었다.

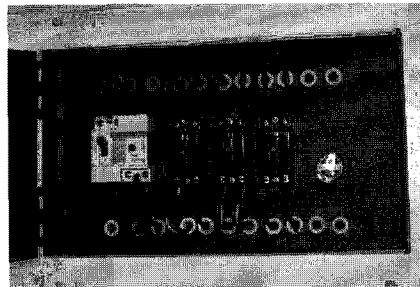
이와 같이 낙뢰가 발생하는 경우, 전원계통을 따라 동시다발적으로 피해가 발생하는 양상을 나타내며, 절연파괴가 발생하는 개소 중, 상대적으로 절연이 약하거나 작화되기 쉬운 가연물이 존재하는 경우, 화재사고로 이어지는 특성을 나타낸다.

낙뢰가 저압측 수용가에 직격되면서 화재가 발생하는 경우도 있지만, 배전계통에 낙뢰가 떨어지면서 고압전력선을 통해 과전압이 유입되거나, 낙뢰 후, 고압선이 단선 지락되는 과정에서 지락개소에 인접한 수용가에서 화재가 발생되기도 한다. 고압선의 지락에 의한 경우에도 낙뢰 발생과 동일한 메커니즘의 대지전위 상승이 발생되고, 상대적으로 지락개소에 가까운 장소에서 화재 발생이 위험이 크다.

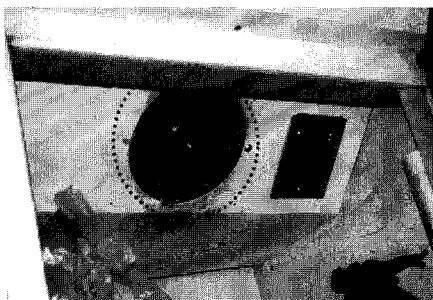
Figure 7에는 배전계통에 낙뢰가 침입하는 과정에서 고압선이 지락되면서 화재가 발생한 사례로 고압선의 단선 형태 및 고압 전력선을 지지하기 위한 애자 부분



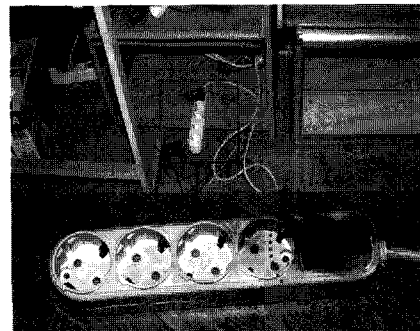
(a) Schematic diagram of the building



(c) Replaced panel board in the office 1

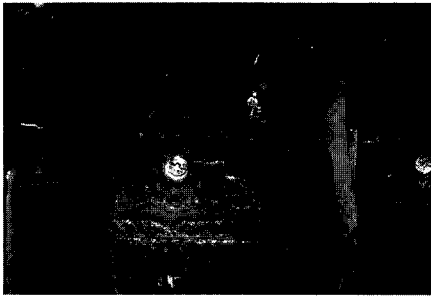


(b) Carbonized point of the show case refrigerator(restaurant 2)

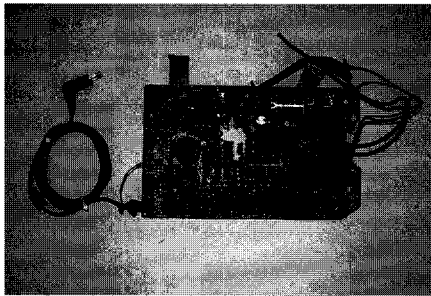


(d) Carbonized multi-concent in the office 3

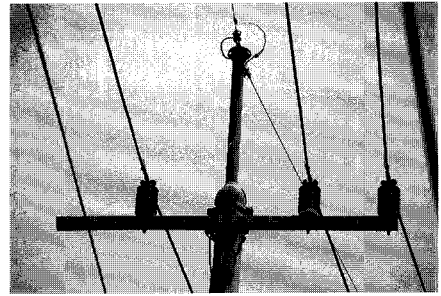
Figure 5. Schematic diagram of the fire scene building and damage patterns in electrical panel board and home appliances caused by lightning.



(a) Breakdown shape of the circuit breaker on the panel board



(b) Breakdown and punched damage of the TV



(a) The distribution line happened lightning



(b) The neighboring area of the distribution line(fire scene)



(c) Snapped power cable of the distribution line



(d) Melting trace of the insulation

Figure 6. Typical breakdown pattern caused by lightning.

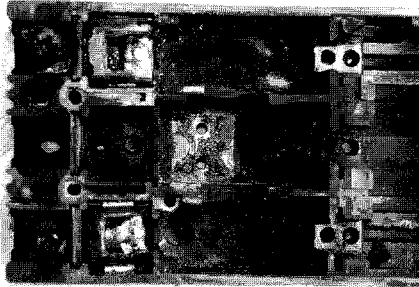
이 용융된 흔적이 관찰되는 특징이 있다.

화재는 고압선 지락개소와 가장 인접한 저압측 수용가에서 발생되었으며, 피해의 양상은 분전반 차단기의 소손, 가스공급 금속 파이프의 전기적 발열에 의한 용융 등의 특이점이 나타났다. 또한 2층 가옥 구조 중, 화재의 영향이 없는 1층 가옥에서 분전반 내 차단기의 소손 및 벽면 콘센트가 일부 탄화된 형상이 관찰되었다.

Figure 8에는 고압선 지락 이후, 화재가 발생된 가옥 및 이와 인접해 있는 1층 가옥에서의 과전압 유입에 따른 전기적 피해 양상을 나타낸 것으로 분전반 부분이 소손되고, 분전반 내에 설치되어 있던 차단기의 분해 검사 시, 내부 접점 부분이 용융된 형상이 관찰되었다. 또한 화재의 영향이 없는 1층 분전반의 차단기에서도 화재 발생 가옥의 차단기와 동일한 형태의 피해가 발생하였다. 이는 전형적인 대지전위 상승에 따른 절연파괴 과정에서 발생하는 것으로 낙뢰 및 고압선 지락 등으로 과전압이 발생하는 경우, 인접 지역에서 동시다발적인 피해 양상을 나타내는 특징을 보여준다. 이와 더불어 분전반에 설치된 차단기는 외관상 절연파괴의 흔적이 나타나지 않는 경우도 있으나, 이러한 경우에도 내부 접점이 용융 유실되는 현상이 발

Figure 7. Damage patterns caused by lightning to the distribution line.

생한다. 따라서 낙뢰 또는 과전압에 의한 화재 발생의 경우에는 외관상 특이점이 관찰되지 않더라도 내부 접점 등의 상태를 확인해야만 한다.



(a) Breakdown inner circuit breaker



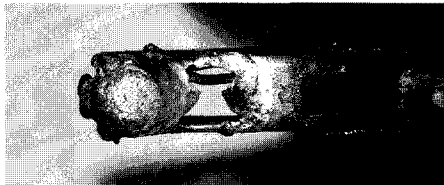
(b) Breakdown between terminal of the circuit breaker



(c) Melting shape of the gas tube



(d) Melting mark of the inner contactor of the circuit breaker



(e) Melting mark of the inner contactor of the circuit breaker

Figure 8. Typical breakdown pattern caused by line to ground fault.



Figure 9. Information of lightning discharges served by the Korea meteorological administration.

낙뢰에 의한 화재 발생 및 전원계통에서의 피해 양상은 고압선 지락 또는 전원계통의 이상으로 발생하는 과전압 등에 의한 피해 형태가 동일하게 나타나므로 낙뢰에 의한 화재사고에 대한 입증은 위해서는 낙뢰정보의 확인이 필수적이다.

현재 기상청에서는 Figure 9에 나타난 바와 같이 낙뢰정보를 실시간으로 제공하고 있으며, 뇌격 발생 시각 및 뇌전류의 크기 등을 다양하게 확인 할 수 있다. 또한 해당 지방 기상청에서는 보다 정확한 장소별 낙뢰정보를 제공하므로 낙뢰 발생 여부를 정확히 확인할 수 있다.⁷⁾

4. 낙뢰에 의한 전기화재의 현장조사기법

낙뢰에 의한 전기화재 현장의 조사는 일반화재와 크게 다르지 않으며, Figure 10에 나타난 바와 같이 초기에는 전체적인 연소 형상의 관찰을 통하여 개략적인 발화지점을 추소한다. 이와 더불어 발화지점 및 인접한 부분에서 전기적 특이점 식별 여부를 검토한다. 낙뢰 또는 과전압에 의해 화재가 발생하는 경우, 발화지점을 포함한 인접 지역에 동시다발적으로 전기적 특이점이 식별된다. 동시다발적으로 전기적 특이점이 식별되는 경우, 낙뢰 또는 과전압에 의한 화재로 볼 수 있으며, 기상청 등의 낙뢰정보를 확인하여 화재 발생시

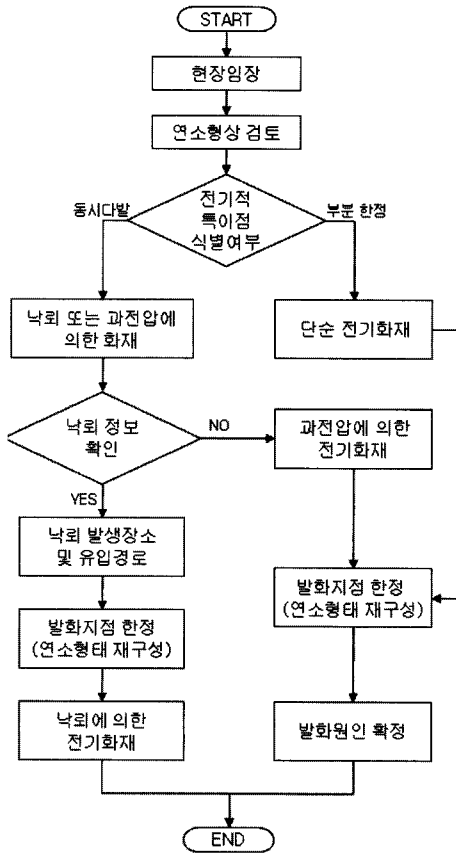


Figure 10. Proposed Investigation process of the electric fire scene caused by lightning strokes.

각과 비슷한 시각에 낙뢰가 발생된 정보가 있다면 낙뢰에 의한 전기화재로 결론지을 수 있을 것이다.

낙뢰에 의한 전기화재로 잠정 결론짓는 경우, 초기 발화지점을 중심으로 연소 확대되는 형상을 검토하여 현장 연소형상에 대한 재구성 시, 왜곡 또는 모순이 없는지를 다시 한번 확인한다. 연소형상에 대한 모순이 발견되지 않는 경우, 낙뢰에 의한 전기화재로 추정할 수 있을 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 낙뢰에 의한 전기화재 발생의 사례 분석을 통하여 효과적인 현장조사 기법을 제안하였다.

낙뢰에 의해 화재가 발생하는 경우, 동시다발적인 전기적 특이점이 식별되며, 특히 차단기와 같이 외함을 가지는 경우, 외관상 결함이 발견되지 않더라도 내부적으로 전기적 발열에 의한 용흔이 식별되는 경우가 있으므로 현장조사 과정에서 이러한 점을 주의 하여야 한다.

현재 기상청에서는 낙뢰 발생 정보를 발생시각, 뇌 전류의 크기 및 낙뢰 발생 위치에 대한 정보를 제공함으로써 이를 충분히 활용해야 할 것이다.

결론적으로 본 논문에서 제시한 현장조사 기법 적용을 통하여 보다 효과적인 화재현장 조사가 가능할 것으로 기대한다.

참고문헌

1. W.P. Winn and C.B. Moore, "Electric Field Measurements in Thunderclouds Using Instrumented Rockets", J. Geophys. Res., Vol.76, No.21, pp.5003-5017(1971).
2. Gyung-suk Kil, et al., "A Study on Development of the Lightning Warning System", KIMICS Spring Conference, Vol.10, No.1, pp.274-277(2006).
3. Kohichi Nakamura, et al., "Development of a Lightning Warning Device Utilizing Point Discharge Current", Trans. of IEEJ, Vol.101B, No.2, pp.33-40 (1981).
4. Mazen Abdel-Salam, et al., High-Voltage Engineering, 2nd Edition, Marcel Dekker, INC., pp.596-597(2000).
5. M.A. Uman, "Natural Lightning", IEEE Trans. Industry Application, Vol.30, No.3, pp.785-790(1994).
6. 황진권, "전기화재 징후 감시를 위한 아크전류 파형 분석에 관한 연구", 한국화재소방학회 논문지, Vol.23, No.1, pp.7-14(2009).
7. 기상청 낙뢰 발생 정보 <http://www.kma.go.kr/weather/images/lightning.jsp>.