

**차단기의 표면에서 절연파괴에 의한 전기적 특이점에 관한 연구**  
**A Study on the Electrical Unique point due to the Dielectric  
breakdown at the Surface of a Circuit Breaker**

**김동욱 · 김만건 · 김명수 · 김혁수**

한국전기안전공사

Dong-Ook Kim, M-G Kim, M-S Kim, H-S Kim

Korea Electrical Safety Corporation(KESCO)

**요 약**

2008년도 사고설비별 전기화재 발생현황을 살펴보면 전기화재중 전기배선 및 배선 기구에서 발화한 화재가 2,540건으로 전기화재 발생 중 25.95 %를 점유하였다. 또한 사고전압별 전기화재 발생현황으로 220/380 V에서 화재가 6,320건(64.4 %)으로 전기 화재의 대부분을 점유하였다. 전기화재는 단락, 과전류, 접촉불량, 트래킹 등 9가지로 분류할 수 있다. 이러한 전기로부터 재해를 막기 위하여 누전차단기나 배선용차단기를 사용하여 일부의 전기화재 원인을 차단할 수 있으나 차단기 자체에서 발생하는 원인에 대하여는 보호할 전기기기가 부재하다.

본 논문에서는 최근 실화법의 적용으로 일반적으로 전기화재로 취급되어지지만 보다 세밀히 조사하면 제조결함, 사용자 부주의, 설치 및 환경에 따른 위험성을 분석하고 전기설비에서의 화재 발생에 대한 예방대책에 활용할 수 있도록 연구하였다.

## 1. 서 론

2008년도에 발생한 화재는 49,631건으로 전기화재는 9,808건이 발생하여 19.8 %의 점유율을 보였다. 또한 전기화재중 전기배선 및 배선기구에서 발화한 화재가 2,540건으로 25.95 %를 점유하였으며 사고전압별로 분석한 전기화재는 220/380 V에서의 화재가 6,320건(64.4 %)으로 전기화재의 대부분을 점유하였다. 220/380 V에서 전기화재가 많은 이유는 대부분의 가전기기 및 동력기기에서 사용하는 전압이 220V나 380 V이기 때문으로 분석된다.

전기화재란 전기적 원인이 발화원으로 되는 화재를 말하며, 전기화재의 발생과정을 살펴보면 전기에너지가 변환되어 발생한 열이 발화원이 되어 일어난 화재와 절연물의 도체로의 변질, 네온사인의 고압부에서의 누설방전이나 낙뢰 등 천재지변에 의한 절연 파괴, 노후, 자연적 원인뿐만 아니라 취급부주의나 방화 등 인위적인 원인에 의해 발생되는데, 전기기기기구의 제작 불량에 의한 화재와 설계·구조적 결함으로 인한 화재, 불안정한 시공에 의한 누전이나 열 발생, 안전장치의 부동작 등 고장 및 사용자의 부적절한 사용방법이 요인이 되어 발생한 화재로 분류할 수 있다.

전기에너지가 변환되어 발생한 열의 종류에는 줄열(Joule's heat)이나 방전스파크 및 아크(Arc)로부터 발생된 열속 등이 있으며, 줄열이 발생하는 가장 큰 요인으로는 단락이나 지락 등과 같이 전기회로 이외로의 누설에 의한 경우로 전압이 인가된 충전 부분에 도체접촉 등이 있고, 그 다음으로는 중성선 단선과 같은 배선의 1선 단락이나 전동기의 과부하운전 등 부하의 증가, 배선의 반단선에 의한 전류통로의 감소와 국부적인 저항치의 증가, 각 종 개폐기·차단기류 등을 고정하는 나사가 느슨해져 국부적인 저항이 증가하여 줄열에 의해 발열하는 경우 등이다[1-2].

전기배선 또는 코드가 가구 등의 무거운 물건에 깔리거나 진동에 의해 피복이 손상되어 회로 외로의 누설에 의한 경우, 전기 제품의 플러그와 콘센트의 사이에 먼지가 쌓여 습기를 포함하면 전기통로가 형성되는 트래킹(Tracking)현상과 부품의 열화 등에 의한 누설전류가 흘러 발생하는 전기적 조건의 변화 등이 있다. 또한 전기설비가 규격미달이나 노후된 경우, 전기설비를 변경할 경우, 혹은 전기설비가 잘못 사용되거나 기기와 맞지 않을 경우에 화재가 발생할 수 있다[3-4].

이러한 전기로부터 재해를 막기 위하여 누전차단기나 배선용차단기를 사용하여 일

부의 전기화재 원인을 차단할 수 있으나 차단기 자체에서 발생하는 원인에 대하여는 보호할 전기기기가 부재하다.

본 논문에서는 최근 실화법의 적용으로 일반적으로 전기화재로 취급되어지지만 보다 세밀히 조사하면 제조결함, 사용자 부주의, 설치 및 환경에 따른 위험성을 분석하고 전기설비에서의 화재 발생에 대한 예방대책에 활용할 수 있도록 연구하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 사례분석

그림 1은 건설현장에서 임시로 사용되는 차단기가 부착된 콘센트에서 화재가 발생한 것으로 소실된 정면은 그림 1(a)와 같이 콘센트 내부에서 발화된 패턴을 보이고 있다. 그림 1(b)와 그림 1(c)는 정상제품과 소손된 제품을 비교분석한 것으로 소손된 차단기의 상부를 중심으로 탄화패턴이 형성되었다.



(a) 소실된 전기기구



(b) 정상 제품의 후면



(c) 소손된 제품의 후면

〈그림 1〉 정상 및 소손된 차단기의 비교분석

그림 2는 최초 발화부로 추정되는 차단기 1차측 단자간의 전기저항을 측정한 것으로 측정결과 극간 저항이 약 30 Ω으로 나타남에 따라 차단기 극간에 절연파괴가 발생하여 탄화도전로가 형성된 것으로 판단되었다.



〈그림 2〉 소손된 차단기 1차측 극간 저항 측정

## 2.2 트래킹에 의한 화재위험성

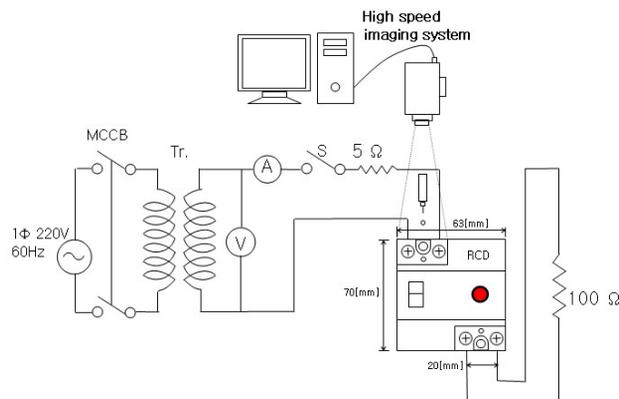
누전차단기는 경년열화와 함께 환경적 오염 등에 의해 전기회로에 누설전류가 흐르면 전로를 차단하여 전기화재 등의 사고를 예방하는 배선기구로 과부하 검용인 경우에는 과전류에 대해 자동적으로 전로를 차단할 수 있다.

배선용 차단기는 일정 전류 이상의 과전류에 대해 자동적으로 전로를 차단해 배선이나 전기기기를 보호하기 위한 안전장치로 차단방식에 따라 전자식, 열동식 등으로 구분된다.

이러한 차단기에서의 트래킹 화재는 대부분 분전반 차단기의 전원측과 부하측 단자간 또는 단자와 고정볼트 간에서 부분으로 발생하며 연소형태와 전기적인 용융흔의 식별, 동(Cu) 부분 절연재의 도전화 등의 탄화도전로 형성으로 화재가 발생하고 있다.

### 2.2.1 트래킹 실험

차단기 표면에서의 트래킹 진행과정과 실험 후 외형 특성, 내부 특성, 입력 전선의 형태 분석으로 차단기에서의 트래킹 원인 조사 방법을 서술하였으며 차단기의 입력 단자와 주변 금속과의 트래킹, 차단기 내부에서의 트래킹 과정도 실험과 함께 분석하여 외부와 내부 그리고 주변 금속에 대해 부분적으로 트래킹이 발생할 때의 특징을 나타냈다. 실험 방법은 그림 1과 같이 1%의 NaCl 수용액을 차단기 상부에 분당 40 방울 떨어 뜨려 초고속 카메라를 이용하여 분석하였다.



〈그림 3〉 트래킹 실험장치 구성

### 2.2.2 트래킹 실험 결과

그림 4는 염수를 차단기 상부에서 떨어뜨렸을 때 차단기 표면에서의 트래킹 진행과정을 나타낸 것으로 그림 4(b)와 같이 고정나사와 같은 주변 금속재료 부분으로 방전이 시작되어 그림 2(c)와 같이 아크 불꽃을 나타냈다.

그림 5는 트래킹이 발생된 단자부분으로 그림 5(a)는 전선과 고정나사를 제거한 후의 차단기 정면으로 상부의 전선을 고정시키는 두 개의 나사를 중심으로 탄화패턴이 형성되었으며 그림 5(b)는 전선을 고정시키는 단자 부분으로 트래킹의 경로는 양 전선의 중간에 차단기를 고정시키는 나사 부위로 탄화도전로가 진행된 형태를 나타냈다.



(a) step-1

(b)step-2

(c)step-3

〈그림 4〉 차단기 상부에서 발생한 트래킹 현상



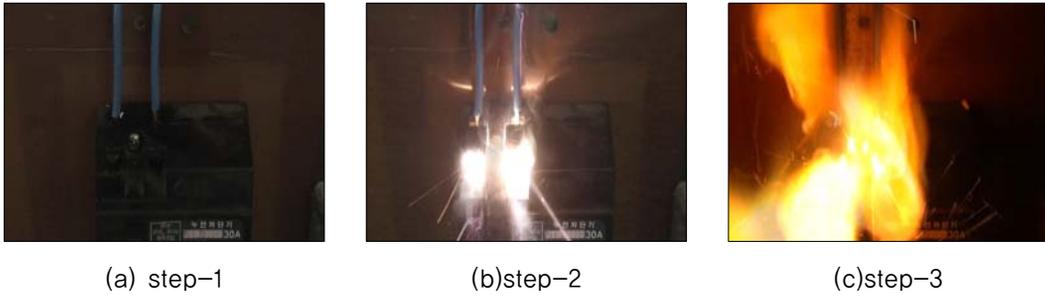
(a) 정면

(b) 상부면

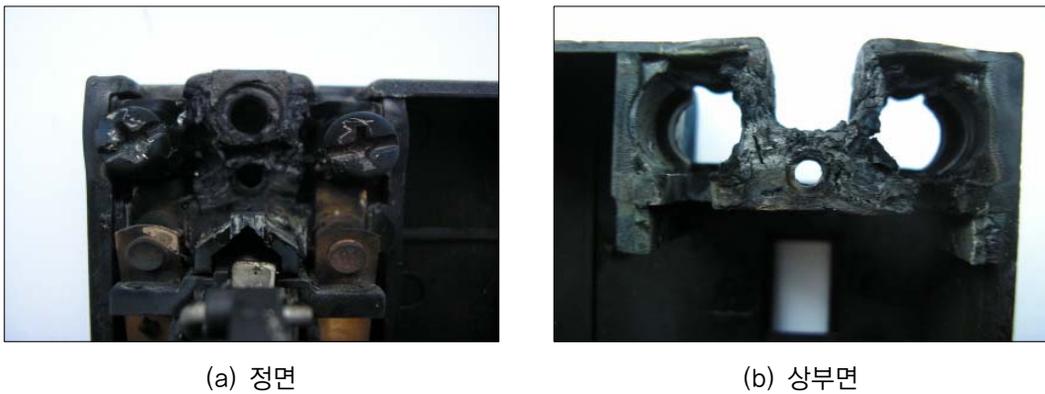
〈그림 5〉 트래킹이 발생된 단자 부분

그림 6은 염수를 차단기 상부에서 떨어뜨렸을 때 입력단자의 사이로 수분이 침투하여 차단기 내부에서 트래킹이 발생한 것으로 그림 6(b)와 같이 내부에서 아크가 발생한 후 그림 6(c)와 같이 불꽃이 발생하였다.

그림 7은 내부에서 트래킹이 발생된 차단기의 내부를 나타낸 것으로 그림 7(a)는 차단기이 입력측 양 단자부분 하단의 중심부분을 중심으로 V-패턴이 나타나며 크게 소손되었고 그림 7(b)는 입력측 단자를 덮는 부분으로 차단기를 고정시키는 나사가 있었던 가운데의 하단부를 중심으로 탄화된 패턴을 나타냈다.



〈그림 6〉 차단기 내부에서 발생한 트래킹 현상



〈그림 7〉 트래킹이 발생된 내부

그림 8은 차단기 후면에 스테인리스를 부착하여 차단기를 고정하여 염수를 상부에서 떨어뜨렸을 때 접지한 스테인리스와 입력단자 사이에서 그림 8(b)와 같이 탄화도전로가 형성된 후 그림 8(c)와 같이 아크가 발생하였다.

그림 9는 그림 8의 실험에서 나타난 단자 상부면과 측정전류로 그림 9(a)와 같이 트래킹이 주변 외함 금속으로 진행되었으며 그림 9(b)와 같이 측정전류는 미소방전이 30 mA 이하로 진행되었다가 절연파괴시 급속한 전류 상승을 보인다.



(a) step-1



(b)step-2

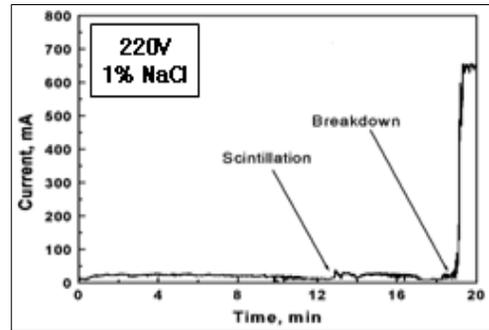


(c)step-3

〈그림 8〉 차단기 단자와 접지단자에서 발생한 트래킹 현상



(a) 상부면



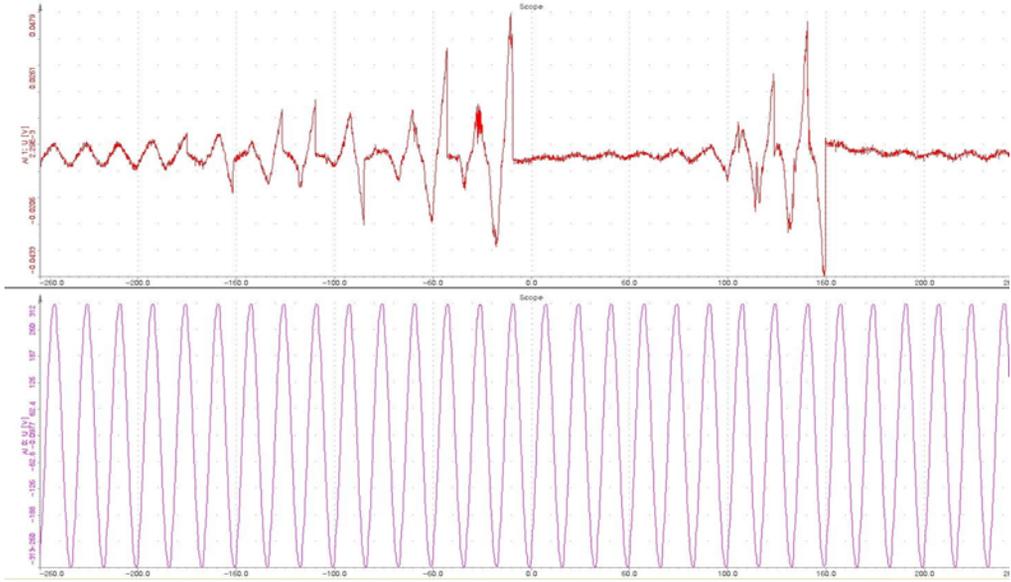
(b) 측정 전류

〈그림 9〉 트래킹이 발생된 단자 부분 및 측정전류

### 2.2.3 트래킹 진행에 따른 전기적 특성

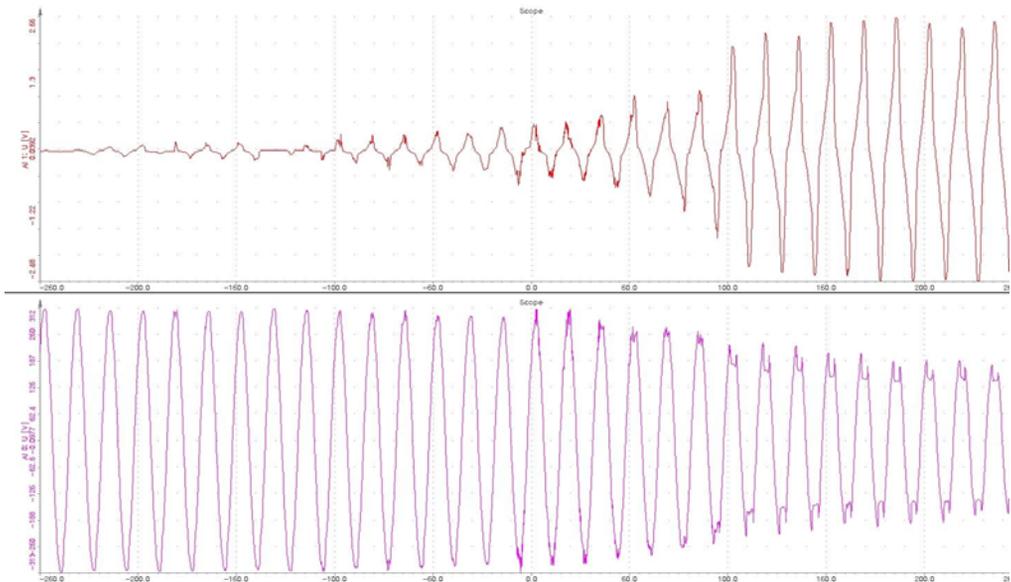
트래킹은 유기질 절연재료의 표면이 특히 흡습되었을 때 발생하며 진행과정은 건조대의 형성과 미소방전이 진행하다가 아크방전으로 진행된다. 이러한 과정에서 미소방전이나 아크가 발생했을 전기적 특이점을 분석하였다. 실험은 미소방전과 아크방전이 진행될 때 측정하기 위하여 부무하 상태로 실험하였다.

그림 10은 염수를 차단기 상부에서 떨어뜨렸을 때 차단기 표면에서 미소방전이 진행될 때 측정한 것으로 전압의 변동은 나타나지 않았으며 전류의 변화는 최대 피크값이 0.048 A로 나타났으며 실효치는 2.5 mA이하로 나타났다.



〈그림 10〉 미소방전시 전류 및 전압 파형

그림 11은 염수를 차단기 상부에서 떨어뜨렸을 때 차단기 표면에서 미소방전 이후 아크 방전으로 진행될 때 측정된 것으로 전압의 변동은 피크치 312 V에서 187 V 이하로 강하되고 전류는 피크치가 2.66 A로 상승하였다.



〈그림 10〉 아크방전시 전류 및 전압 파형

이와 같이 차단기에서의 트래킹은 주로 부하측보다는 입력측 단자에서 주로 발생하였다. 트래킹은 환경적 열화로 주위의 먼지나 기름 등에 의해 양극간에 누설전류가 발생하여 탄화도전로를 형성시키는 것으로 미소방전시에 전류는 극히 작으며 아크방전 또한 높은 전류를 형성시키지는 않으나 방전 표면에 높은 불꽃을 발생시키므로 이에 대한 대책이 시급하다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 화재 및 감전 그리고 설비사고를 위해 설치하는 차단기에서의 전기 화재 발생 메커니즘에 관하여 사례분석 및 실험 분석하였다. 특히 차단기에서는 트래킹과 접촉불량에 의해 화재가 다수 발생하고 있으며 트래킹은 부하측보다는 입력측 단자에서 외부, 내부 그리고 단자와 접지된 도체에서 발생한다.

트래킹이 발생될 때의 전류를 측정해본 결과 미소방전이 진행되는 과정에서는 48 mA 이하의 전류를 유지하며 아크로 전이되는 절연파괴시에 3-4 A 사이의 전류가 발생하였다. 즉, 상부의 차단 보호기구나 30 A의 정격 누전차단기를 설치하여도 보호할 수 없다는 결론이 도출된다. 이에 따라 먼지나 흡기가 많은 장소에서는 낮은 감도의 누전차단기 설치가 필요하다. 이러한 결과는 차단기에서의 전기화재 예방을 수립하는데 기여할 수 있는 것으로 사료된다.

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

## 〈참고문헌〉

- [1] D. W. Kim, “A Study on the Characteristics of Tracking Deterioration between Electrodes on Phenolic Resin used for Low Voltage”, ICEE 2002 conference
- [2] H. Zang, R. Hackam, “Electrical Surface Resistance, Hydrophobicity and Diffusion Phenomena in PVC”, IEEE Trans. DEI, Vol. 6, No. 1, pp.73~83, 1999
- [3] B.X. Du, “Discharge Energy and dc Tracking of Organic Insulating Materials”, IEEE Trans. DEI Vol. 8, No. 6, pp.897~901, 2001
- [4] W. R. Wilson, High-Current Arc Erosion of Electric contact Material, AIEE Trans. 74(Part III), pp657-664, 1955