

## 저압용 나전선의 단락조건에 의한 단면 분석

송길목, 김동욱, 김동우, 김영석, 최충석  
전기안전연구원

### The Cross Section Analysis CSA based on the Short Circuit Conditions of the Low Voltage Bare Wires

Kil-Mok Shong, Dong-Ook Kim, Dong-Woo Kim, Young-Seok Kim, Chung-Seog Choi  
Electrical Safety Research Institute

**Abstract** - In this paper, we studied the cross section analysis based on the short circuit conditions of the low voltage bare wires. The copper wires prepared for the experiment were 1.2mm, 1.6mm, and 2.0mm in diameter. Through the cross section analysis(CSA), it was confirmed that the dendrite structure grew at the angle of about 40° or 60° when the fusing current was applied to the wires. The larger the fusing current is, the more decreased the growth angle of the dendrite structure is. It was confirmed that the dendrite structure was arranged like the columnar structure. In this paper, the characteristics analysis of short circuit was carried out in the range of transient duration.

## 1. 서 론

전기가 발견된 이래 산업발달이 가속화되고 많은 전기 설비와 기기들이 개발되었다. 전기의 사용은 대전력 설비에서 전자제품에 이용되는 미세전류까지 다양하며, 오늘날 크게 발전되고 있는 분야는 대형화되어 가고 있는 설비의 절연성능 개선과 콤팩트한 형태로 이용이 가능한 한 기술개발을 하는데 있다. 이러한 개발의 가장 중요한 부분으로 절연을 확보하는데 있으며 절연이 확보되지 못하면 설비사고나 기기의 피로누적에 의한 사고로 진전된다. 단락사고에 의한 파급효과는 매우 커서 정전사태는 물론, 화재로 진전하거나 인명 피해를 입히는 등 다양한 형태의 손실을 발생시킨다. 국내 전기안전 시장은 매우 협소하며 이에 대한 국민적 인식이 부족하여 자생하기 어려운 산업구조를 가지고 있다.

산업생산에 있어서 가장 중요한 요소 중 하나는 근로자의 안전과 직결된 것이며, 설비의 정상적 운행이라고 볼 때, 전기재해를 예방하기 위한 연구는 매우 중요하다. 따라서 연구의 중요성을 인식하고 이에 대한 국내외 자료와 연구여건을 고려한다면 사고 원인을 분석하고 그 원인에 대한 이론적 정립이 필요하다 하겠다. 전기재해 중 많은 인적 물적 피해를 주는 전기화재 원인분석 기술은 예방대책을 수립하는 기준이 되며 향후 전기안전 분야의 정책적 방향을 제시하는 중요한 자료가 될 것이 판단된다.

본 논문은 전기화재 원인 중 단락 또는 과부하에 의해 용단되는 전선의 특성과 원인규명을 위한 분석방법에 대해 기술하였다. 따라서 전선의 굵기, 용단전류의 크기, 전선의 길이의 단락조건에 따른 전선의 특성변화를 다양한 분석기법을 이용하여 해석하였다. 이러한 연구의 결과를 토대로 도전재료의 열적 특성 해석과 더불어 전기화재 원인분석에 중요한 자료가 될 것으로 판단된다.

## 2. 이 론

### 2.1 국내 전기화재 현황 및 특성

국내에서 발생하고 있는 전기화재는 매년 가장 높은

점유율을 보이고 있다. 행정자치부의 통계자료에 의하면, 1994년도부터 2003년도까지 최근 10년간 약 30% 이상의 점유율을 보이고 있으며 최근 2003년도에도 전체화재 건수가 약 3만 건에 이르고 있으며 이 중 약 1만 건 정도가 전기화재인 것으로 집계되었다. 이는 ±5% 정도의 오차범위를 적용하더라도 매우 높은 것으로 이에 대한 필요성이 요구된다[4].

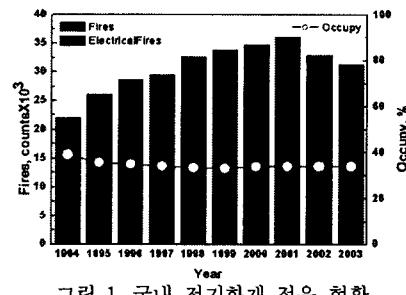


그림 1. 국내 전기화재 점유 현황

2003년도 발생한 전기화재의 원인별로 분석하면, 단락이 가장 많은 부분을 차지하며, 과부하, 누전, 접촉 불량, 트래킹과 같은 절연파괴 등의 순으로 나타나 있다.

인명피해는 441명의 사상자가 발생하였으며, 그 중 76명이 사망하였다. 물적 피해액은 약 499억으로 전체화재의 약 33%를 점유하는 것으로 나타나 있다.

### 2.2 전류에 의한 전선의 용단특성

1883년도 단선(solid wire)의 용단전류를 실험식으로 계산한 프리스(W.H. Preece)는 구리(Cu), 철(Fe) 등 금속재료에 따른 각 전선의 용단전류 값을 실험을 통해 유추하였다[1].

$$I_f = AD^{1.5} \quad (1)$$

$I_f$ 는 용단전류를 나타내고, A는 용단계수로서 구리의 경우 80이다. D는 전선의 직경(mm)을 나타낸다[2][3].

단락의 경우 극히 짧은 시간 동안 높은 전류에 의해 발생되는 것을 의미하며 회로상에서 보면 저항이 거의 없는 상태에서 폐회로가 구성된 것이다. 과부하는 전기 사용에 있어서 허용전류 이상의 부하를 병렬로 연결하여 전체적으로는 전선이 출열에 의한 발열을 촉진시키고 궁극적으로는 용단되는 특성을 가진다. 혼히 연선의 경우 허용전류 이하로 정상적으로 운용되는 설비에서도 기계적 외력이 전선에 주어지거나 반복적으로 전선이 구부려져 반단선이 되면 반단선 된 부분에서는 일종의 과부하에 의한 과전류의 영향을 받는다. 그림 2는 이러한 단락 및 과부하에 대해 개념적으로 설명하고자 그 사고 개략도를 나타낸 것이다.

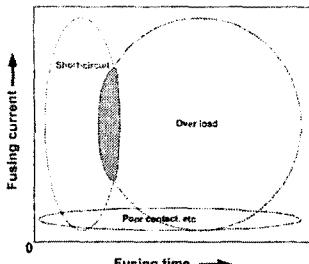


그림 2. 용단시간 및 용단전류에 따른 사고원인

구리(copper)의 경우 용융온도가  $1,083^{\circ}\text{C}$ 로서 일반화재의 온도보다 훨씬 높은 온도에서 용융되는 특징을 가진다. 아크의 온도는 문헌에 의하면 적개는  $2,000^{\circ}\text{C}$ 에서  $3,000^{\circ}\text{C}$ 이상의 고온이 발생하며, 재질에 따라  $5,000^{\circ}\text{C}$  이상 나타나기도 하며, 아크 플라스마에서는 약  $10,000^{\circ}\text{C}$ 의 온도로 나타내기도 한다. 따라서 전기에너지의 양에 의해 달라지는 하나 매우 높은 온도에서 아크가 발생하는 것으로 되어 있으며, 이로 인해 구리는 수지상 및 주상조직이 생성되거나 입자가 성장하는 형태로 열에 대한 특성을 보인다. 이는 에너지량과 시간에 따라 밀접한 관계를 가진다[2][3].

전기화재의 원인을 판정하는 경우 전선의 단면조직을 확대하여 분석하는데 과냉 조건에 따른 금속단면의 상변화를 분석하여 결과로 해석하게 된다. 단락의 경우 전선과 전선 혹은 충전부에 고열의 아크흔이 남게 되는데 이 때  $1,000^{\circ}\text{C}$  이상의 온도 차이가 짚은 시간동안 이루어진 경우 주상조직이 온도가 낮은 금속경계면을 중심으로 형성된 것으로 판별한다. 과전류에 의한 경우 수지상 조직이 형성되는데 이는 조직이 핵생성과 그를 중심으로 하여 산화동( $\text{Cu}_2\text{O}$ )이 재결합하는 과정에서 형성된다. 크게 세 가지 형태로 단면조직을 분류하여 분석이 가능하고, 이외의 다양한 재결합과 단면 조직을 이용하여 전기화재를 판정하는 자료로 이용되고 있다[5][6].

### 3. 실험방법

전선의 용단시간 및 용단전류에 따른 특성을 분석하고자 사용된 시료는 나전선(bare wire)으로서 1.2mm, 1.6mm, 2.0mm의 지름이 다른 전선을 선택하여 10cm의 길이로 절단하였다. 각 전선은 대전류공급장치(ODEN 1X, Denmark)를 이용하였다. 실험실 온도와 습도는 각각  $20^{\circ}\text{C}$ , 60%의 습도를 유지하여 실험하였다. 용단전류는 프리스의 실험식에 의하여 용단전류의 1배, 1.5배, 2 배의 값을 공급하는 방식으로 하였다. 1.2mm의 전선은  $105 \pm 5\text{A}$ ,  $157 \pm 5\text{A}$ ,  $210 \pm 5\text{A}$ 의 전류를 공급하였다. 1.6mm의 전선은 각각  $161 \pm 5\text{A}$ ,  $240 \pm 5\text{A}$ ,  $320 \pm 5\text{A}$ 의 전류로 용단시켰고, 2.0mm의 전선은  $226 \pm 5\text{A}$ ,  $339 \pm 5\text{A}$ ,  $452 \pm 5\text{A}$ 의 전류로 용단시켰다. 그림 3은 용단전류를 공급하기 위한 장치와 각 전선의 용단전류값을 나타낸 것이다.

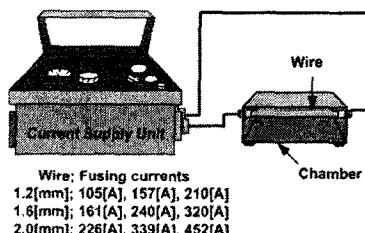


그림 3. 장치 개략도 및 각 전선의 용단전류

### 4. 실험결과 및 고찰

#### 4.1 용단특성 분석

1.2mm의 전선은 용단전류가 약  $105\text{A}$ 이었을 때 평균 9.14sec의 용단시간을 보였다. 1.5배의 전류인  $157\text{A}$ 인 경우 4.70sec였으며,  $210\text{A}$ 인 경우에는 2.10sec의 시간에 용단되었다. 1.6mm의 전선에서 용단전류가  $161\text{A}$ 인 경우 용단시간은 평균  $18.94\text{sec}$ 가 측정되었다.  $240\text{A}$ 의 용단전류에서 6.23sec의 용단시간이 걸렸으며,  $320\text{A}$ 이었을 때는 3.41sec의 용단시간이 소요되었다. 2.0mm의 전선에서 용단전류가  $226\text{A}$ 인 경우 용단시간은 21.75sec,  $339\text{A}$ 에서는  $6.80\text{A}$ ,  $452\text{A}$ 에서는 4.31A의 용단시간이 소요되었다. 그림 4는 각 전선의 용단전류에 따른 시간변화를 측정하여 나타낸 그래프이다.

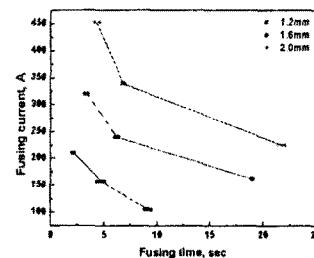


그림 4. 용단시간대 용단전류 곡선

#### 4.2 전선의 외형 변화

용단전류에 따른 각 전선의 외형변화를 실체현미경을 통하여 활영한 후 2.0mm의 전선에 대해 그림 5와 같은 외형변화를 분석하였다. 1.2mm, 1.6mm에서도 유사한 경향을 확인하였다.

그림 5는 전선의 지름이 2.0mm의 것으로 (a)는 정상상태의 것으로 전류가 공급되지 않았을 때를 보여준다. (b)는  $226\text{A}$ 를 공급하여 용단된 전선으로 흑갈색의 표면을 확인하였다. (c)는  $339\text{A}$ 의 용단전류를 공급하여 용단된 것으로 표면이 매우 불규칙하게 찌그러진 형태를 보였다. (d)는 용단전류가  $452\text{A}$ 인 경우로서  $339\text{A}$ 에서 용단된 전선과 비교하여 흑갈색의 용융 탄화된 부분이 훌려내리고, 비교적 짚은 시간 동안 이루어져 전선 내부까지 용융되지는 않은 형태를 확인할 수 있었다.

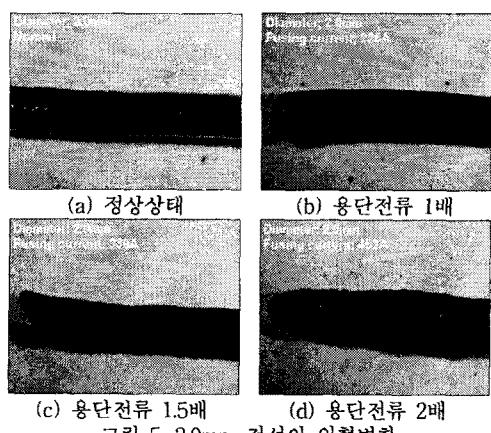


그림 5. 2.0mm 전선의 외형변화

#### 4.3 단면 특성

그림 6은 각 전선의 용단된 전선을 성형, 연마 후 에칭하여 금속현미경에 의해 100배 확대하여 활영된 것이다. (a)는 수지상 조직(dendrite structure)이 나타났고, 전선 중심부에서 외부의 중심축으로부터 약 59.7%의 각도를 나타냈다. (b)는  $157\text{A}$ 의 용단전류를 공급하여 평균 4.70sec에서 용단되었고,  $40^{\circ}$ 이내의 각도를 가지고 성장하는 것을 확인하였다. (c)는 수지상 조직의 생성각도가

$\pm 3.5^\circ$ 에서 성장하였다.

(d)는 1.6mm의 나전선을 161A의 용단전류로 용단된 것으로 수지상 조직이 전선 중심부로부터 약  $61.1^\circ$  와  $41.7^\circ$  등의 일정각도로 성장하고 있음을 확인하였다. (e)는 수지상 조직의 성장각도가  $40^\circ$  이내에서 성장하였다. (f)는 수지상 성장각도가  $\pm 5^\circ$ 의 범위에서 성장하고 있음을 확인하였다.

(g)는 2.0mm의 전선을 용단시킨 후 분석한 것으로 수지상 조직이 약  $40.3^\circ$ 와  $-48.0^\circ$ 에서 일정각도를 이루어 성장한 것으로 나타났다. (h)는 전선의 단면으로 수지상 조직이 조밀하게 생성되었던 것과는 달리 일부분 생성되었으며, 단락전류에 의해 생성되는 주상조직(columnar structure)이 나타났다. (i)는 전선의 가장 자리 부분에서 주상조직이 조밀하게 생성하였음을 확인하였다.

이는 용단전류에 의한 출열로 전선내부가 높은 열이 발생하여 중심축으로부터 표면으로 성장하고 있음을 보여주며, 단락에 의한 조직특성이 나타났다.

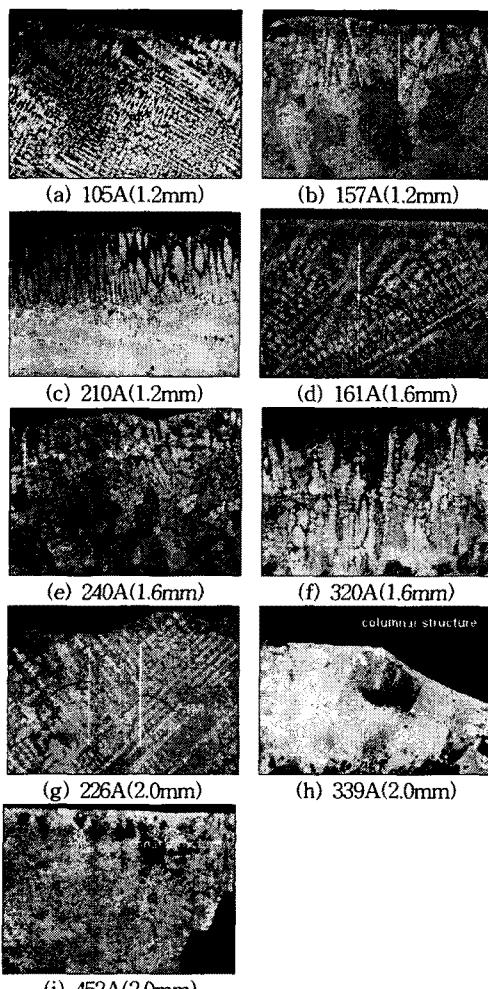


그림 6. 용단전류에 의해 열화된 나전선의 단면분석

그림 7은 위의 그림 6에서 나타난 수지상 성장특성을 도식화 한 것이다.

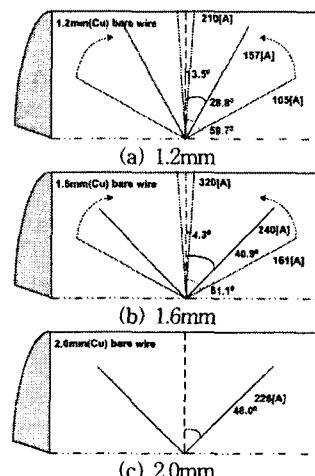


그림 7. 수지상 성장 특성에 대한 도식화

위의 단면특성을 통해 용단전류의 1배에서는 각각 약  $40^\circ$ 와  $60^\circ$ 의 일정각도를 이루며 과전류 용단에서 나타나는 수지상조직이 생성되는 것을 확인하였고, 1.5배와 2배의 용단전류로 같은수록 생성각도는 줄어들어 주상조직에서 나타나는 배열로 형성되는 것을 확인하였다. 또한 일부에서는 주상조직이 생성된 것을 확인하였다. 이로써 용단전류에 의한 용단시간의 결정으로 전선 단면의 물리적 특성이 변화되고 있는 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

전기화재 원인분석에 있어서도 단락과 과전류에 의한 사고를 규명하는 데는 많은 분석기법과 이론이 적용된다. 본 실험을 통해 과부하에 의한 영향과 단락에 의한 단면특성 비교를 통해 전기화재 원인분석은 단면조직의 형태를 통해 입증되어 왔다. 따라서 과전류(over current)와 단락(short circuit)의 경계적 범위에서의 다양한 사고패턴에 대해 모의가 가능하였다.

본 논문을 통해 단락특성 해석과 그 경계적 조건에서의 다양한 패턴 해석에 많은 도움이 될것으로 기대되며, 특히 전기화재 원인 규명에 판단자료로서 활용이 가능할 것으로 기대된다.

본 연구는 산업자원부 전력산업기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

## 【참 고 문 헌】

- [1] W. H. Preece, "On the heating effects of electric currents", Proc.Royal Soc., vol. 36, pp.464~471, 1884
- [2] Sheera Knechi, Bill Gonzalez, Kimberley Sieber, "Fusing Current of Short Aluminum Bond Wire", 1996 InterSociety Conf. on TP, pp.329~333, 1996
- [4] Chung-Seog Choi, Kil-Mok Shong, Hyang-Kon Kim, Dong-Ook Kim, Dong-Woo Kim, "The Analysis of Dendrite Structure of Electric Wire Melted by Fusing Current", 2003J-K JointSymp. on ED&HVE, pp.145~148, 2003.
- [5] EUGENE LOH, "Physical Analysis of Data on Fused -Open Bond Wires", IEEE Trans. on CH & MT, VOL. CHMT-6, NO. 2, 1983
- [6] 김정근 외 2, "금속현미경 조직학", 도서출판 폴드 초판, pp.14~183, 1999