

## 전선의 단면분석을 통한 단락특성에 관한 연구

(A Study on the Characteristics of Short Circuit through the Cross Section Analysis of Electric Wire)

송길목\* · 최충석\* · 김윤희\*\* · 김상현\*\* · 박남규\*\*

(Kil-Mok Shong · Chung-Seog Choi · Yun-Hoi Kim · Sang-Hyeon Kim · Nam-Kyu Park)

전기안전연구원\* · 국립과학수사연구소\*\*

Electrical Safety Research Institute, \*Korea Electrical Safety Corporation,

\*\*National Institute of Scientific Investigation)

### Abstract

For a fire cause judgement, this paper describes the short circuit characteristics of a electric wire through the cross section analysis under ac condition. 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 and the correlation constant k was investigated by measuring the short circuit duration and the fusing current.

### 1. 서 론

편리하고 윤택한 사회기반 시설의 대부분은 전기에너지 이용한 것으로 과학발달과 더불어 매우 중요한 에너지로 인식되고 있다. 그러나 이러한 전기사용에 있어서 부주의, 안전관리 미숙 등으로 전기재해가 나날이 증가하는 추세이며 과거에 비해 재산피해는 물론 인명피해도 대형화 되어 가고 있다.

전기재해는 크게 설비사고에 의한 정전, 시스템 오류 등이 있으며, 감전이나 화재로 전이되어 부차적인 사고로 이어지기도 한다. 특히 전기화재의 경우 관리가 소홀한 야간에 주로 발생하고 있으며, 장시간 방치에 의한 사고가 주를 이루고 있다.

단락에 의한 전기화재는 매년 전기화재 원인 중 가장 많은 점유율을 보이고 있어서 이에 대한 연구의 필요성이 높아지고 있다. 단락사고에 의한 경우 보호장치에 의해 차단되나 이미 단락에 의한 아크는 주변 가연물에 착화되므로 차단장치는 계통의 안전을 보호 하기는 하나 2차적 사고를 예방하지 못하는 단점을 가지고 있다.

단락에 의한 사고의 경우 대부분 섬광(flash)과 폭발(explosion) 그리고 높은 열을 동반한다. 단락사고 설비는 대부분 전선에서 나타나며, 높은 열이 순간적으로 발생하여 용융된 구리망울이 아크비산을 통해 화재로 전이되는 과정을 거친다. 따라서 단락사고에 의한 전선

의 변형에 대한 연구, 순간 아크열에 의한 주변 가연물이 화재로 진전되기 위한 조건에 관한 연구 등 다양한 전기화재의 연구가 진행 중에 있다[1].

본 논문에서는 이 중 아크 발생에 의한 고열이 도전 재료에 영향을 주어 용단되는 금속의 단면 특성을 이용하여 정확한 단락사고 원인분석을 실시하고자 하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1. 단락과 전류특성

1883년도 단선(solid wire)의 용단전류를 실험적으로 계산한 프리스(W.H. Preece)는 구리(Cu), 철(Fe) 등 금속재료에 따른 각 전선의 용단전류 값을 구하였다. 금속도체가 용단되기 위한 조건은 전류, 온도, 습도 등인 것으로 알려져 있다. 식 1은 프리스의 실험식을 나타낸 것이다.

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

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

IEC 60364-433 및 434에 의하면 과부하 보호, 단락보호에 대해 자세하게 설명하고 있다. 일반적으로 단락지속시간은 국제전기코드에 나타난 것과 같이 아래와 같은 식으로 표현된다.

$$\sqrt{t} = k(S/I_s) \quad (2)$$

단락지속 시간은 5sec 이내로 한다. 지속시간에 대한 식은 국제전기코드에 의해 구할 수 있다.  $I_s$ 는 단락전류를 나타내고, S는 단면적(mm<sup>2</sup>), k는 상수로서 비닐절연된 동전선(copper wire)일 때는 115, 비닐절연된 알루미늄 전선(Al wire) 74를 나타낸다. 그러나 위의 규정에서 단면적이 10mm<sup>2</sup>미만의 전선, 5초를 초과하는 단락지속 시간, 종류가 다른 전선의 접속, 나전선(bare wire)은 k의 값이 검토 중에 있다.

## 2.2. 금속재료의 특성

상기한 것과 같이 단락에 의해 용단된 전선은 외부화염에 의해 용융되는 것과는 달리 온도와 시간에 따라 단면의 특이 구조를 가진다. 구리(copper)의 경우 용융온도가 1,083℃로서 일반화재의 온도보다 훨씬 높은 온도에서 용융되는 특성을 가지고 있다. 또한 아크의 온도는 문헌에 의하면 적게는 2,000℃에서 3,000℃이상의 고온이 발생하며, 재질에 따라 5,000℃이상 나타나기도 한다.

단락에 의해 국부적으로 온도가 급상승하였다가 주변의 낮은 온도에 의해 냉각되면서 금속단면의 변화가 나타난다. 따라서 단락에 의한 금속재료의 변화를 쉽게 추정 가능한 방법으로 단면분석(cross section analysis)이 많이 이용되고 있다.

금속의 결정은 모든 방향으로 일정하게 성장하지 않고 결정구조와 열 발산 방향에 의해 많이 좌우된다. 급격한 냉각이 발생하였을 경우 금속은 다수의 결정이 형성된다. 표피에서는 미세한 입자가 생성되고 결정화가 서서히 일어난다. 계속되는 냉각으로 결정이 성장하며 열의 방출과 더불어 주형의 내부로 주상결정(columnar crystal)이 형성된다. 이미 형성된 결정의 벽이 두꺼워질수록 주형과 그 주위 사이의 온도 강하가 감소되어 열 방출이 서서히 일어난다. 주상결정의 성장, 즉 결정성장은 중지되고 내부 잔류 용액은 방향성이 없는 입상결정(grain crystal)으로 된다. 주상결정이 성장하여 결정사이에 퇴적이 생겨 정방형의 주물에서는 대각선 방향으로 경계선이 나타난다. 방향성 응고를 가진 주상결정을 형성함으로써 재료의 자기적 특성을 개선할 수 있다.

수지상 결정은 어떤 결정학적 면상에서 선택적으로 성장된다. 구리(copper)과 같은 FCC 금속 속에서는 수지상 축은 조밀충전된 면에 의하여 형성된 피라미드(pyramid) 축에 있다. 수지상정의 성장속도는 액상에서 과냉도에 따라 좌우되며 과냉은 가장 차가운 표면에서부터 시작되므로 수지상정의

표면을 따라 먼저 성장된다. 표 1은 금속의 종류에 따른 조직을 나타낸 것이다.

표 1. 수지상정 성장방향  
Table 1. Growing direction of dendrite structure

Materials	Structure
Fe, Si, $\beta$ -Brass	body-centered cubic
Al, Cu, Ag, Au, Pb	face-centered cubic
Cd, Zn	close-packed hexagonal
$\beta$ -Sn	tetragonal

금속의 상변화에 있어서 과냉 조건에 따라 결정이 성장하거나 핵을 중심으로 한 결정구조가 나타나게 된다. 일반적으로 전기화재를 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 이때 1,000℃ 이상의 온도 차이가 짧은 시간동안 이루어진 경우 주상조직이 온도가 낮은 금속경계면을 중심으로 형성된 것으로 판별한다. 과전류에 의한 경우 수지상 조직이 형성되는데 이는 조직이 핵생성과 그를 중심으로 하여 산화물( $Cu_2O$ )이 재결합하는 과정에서 형성된다. 크게 세 가지 형태로 단면조직을 분류하여 분석이 가능하고, 이외의 다양한 재결합과 단면 조직을 이용하여 전기화재를 판정하는 자료 이용되고 있다[4][5].

## 2.3. 실험방법

전선 단면 분석을 위해 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℃, 60%의 습도를 유지하여 실험하였다. 1.2mm의 전선은 105±5A, 157±5A, 210±5A의 전류를 공급하였다. 1.6mm의 전선은 각각 161±5A, 240±5A, 320±5A의 전류로 용단시켰고, 2.0mm의 전선은 226±5A, 339±5A, 452±5A의 전류로 용단시켰다. 용단전류의 값은 프리스의 공식에 의한 것으로 각 용단전류의 1배, 1.5배, 2배에 해당되는 전류를 공급하여 용단된 시료를 이용하였다.

용단된 전선의 끝부분은 광학현미경을 통해 외형을 확대하였다. 또한, 단면분석(cross section analysis, CSA)을 위해 용단부분의 약 10mm 가량을 절단하고 형기를 통해 페놀수지와 함께 직경 25mm의 높이

20mm 정도의 시편(mount)을 제작하였다. 제작된 시편은 연마과정을 통해 표면을 일정부분 절삭하고 광택 처리하였다. 표면은 에칭 처리하여 금속단면을 비교분석하였다. 그림 1은 일련의 실험 및 분석과정을 순서대로 나타낸 것이다.

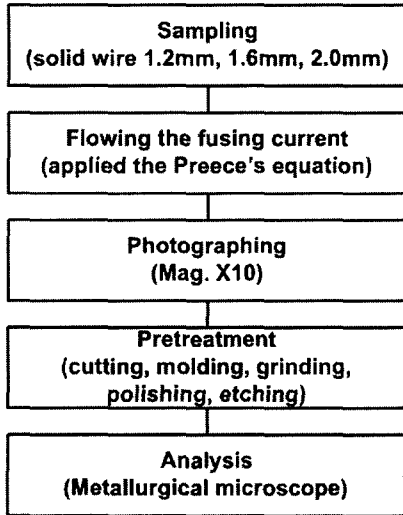


그림 1. 단면분석을 위한 순서도  
Fig. 1. The flowchart for the cross-section analysis

#### 2.4. 용단전류에 따른 시간 측정

각 전선의 용단전류를 공급하여 용단 시킨 결과 그림 2와 같은 측정결과를 알 수 있었다. 그림에서 알 수 있듯이 직경의 크기에 따라 용단전류가 큰 것을 알 수 있고, 각 전선의 용단전류 크기에 따라 용단시간이 변하는 것을 확인하였다.

1.2mm의 전선은 용단전류가 약 105A이었을 때 평균 9.14sec의 용단시간을 보였다. 이는 국제기준에 의하면 과전류 용단에 근접한 상태를 나타내는 것이다. 또한 1.5배의 전류인 157A인 경우 4.70A로서 5초 이내에 용단되어 단락 용단에 근접하는 것을 보여준다. 용단전류가 210A인 경우에는 2.10sec의 시간에 용단되었다.

1.6mm의 전선에서 용단전류가 161A인 경우 용단시간은 평균 18.94sec가 측정되었다. 240A의 용단전류에서 6.23sec의 용단시간이 걸렸으며, 320A이었을 때는 3.41sec의 용단시간이 소요된 것을 알 수 있었다. 따라서 1.6mm의 전선에서 용단시간이 5초 이내에 동작하기 위한 용단전류는 약 270A 이상인 것으로 추정된다.

2.0mm의 전선에서 용단전류가 226A인 경우 용단시간은 21.75sec, 339A에서는 6.80A, 452A에서는 4.31A의 용단시간이 소요된 것으로 나타났다. 이 곳에서 보면 용단시간이 5초 이내인 경우를 고려하면 약 450A 부분에서의 용단전류가 공급되었을 경우 나타나는 것으로 판단된다.

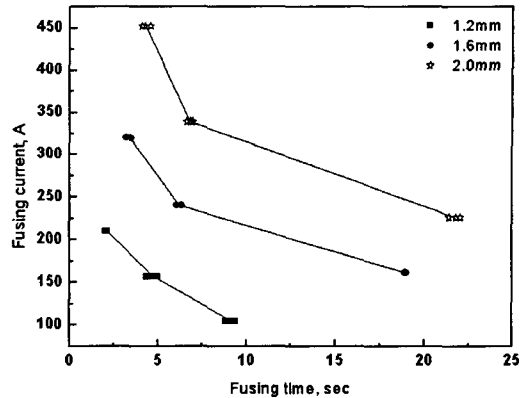


그림 2. 용단시간대 용단전류 곡선  
Fig. 2. Curves of fusing time versus fusing current

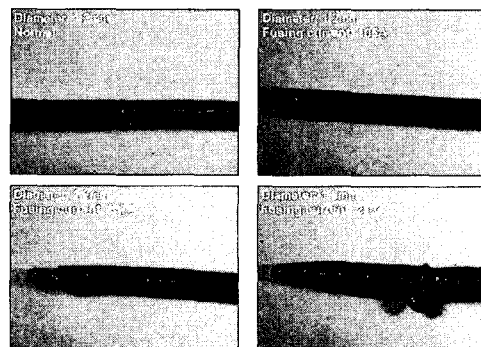
#### 2.5. 용단전류에 의한 외형변화

용단전류에 따른 각 전선의 외형변화를 실체현미경을 통해 촬영한 결과 그림 3과 같은 외형변화를 확인할 수 있었다.

그림 3(a)는 지름이 1.2mm의 전선으로 용단전류가 105A이었을 때 용단 면이 거칠고, 흑갈색의 표면으로 변한 것을 알 수 있다. 용단전류가 157A인 경우 전체표면은 흑갈색으로 불규칙하게 찌그러진 형태를 나타냈다. 용단전류가 210A인 경우에는 단면적이 대체로 작아진 것을 확인할 수 있으며 표면은 흑갈색으로 흘러내린 형태의 용융 흔적을 확인할 수 있었다.

그림 3(b)는 정상상태와 달리 161A에서 용단된 전선은 표면이 흑갈색으로 용단 면이 둥글게 된 것을 확인하였다. 또한 240A의 용단전류가 흘렀을 때는 표면이 불규칙하게 찌그러진 형태를 확인할 수 있었다.

그림 3(c)는 전선의 지름이 2.0mm의 것으로 226A에 의해 용단된 전선은 흑갈색의 표면과 1.2mm의 161A에 용단된 전선과 유사한 외형변화를 확인하였다. 용단전류가 339A일 때는 표면이 매우 불규칙하게 찌그러진 형태를 보였다. 용단전류가 452A인 경우에는 339A에서 용단된 전선과 비교하여 흑갈색의 용융 탄화된 부분이 흘러내린 형태를 확인할 수 있었다.



(a) 1.2mm bare wire

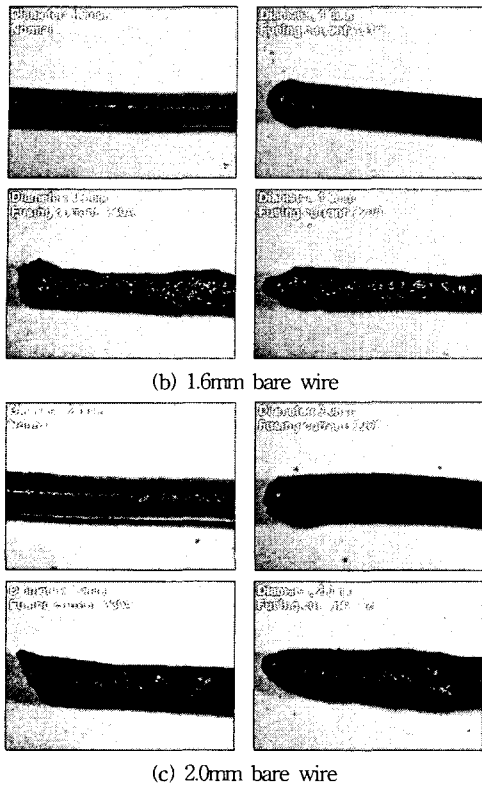


그림 3. 용단전류에 의한 전선의 외형변화  
 Fig. 3. The external variation of wire by fusing current

## 2.6. 단면분석

구리의 열적 특성을 이용하여 과전류에 의해 용단되는 시간이 짧은 경우와 비교적 긴 시간동안 유지되다가 용단될 때의 단면조직을 분석하고자 하였다.

일반적으로 높은 전류에 의해 극히 짧은 시간에 용단되는 것을 단락(short circuit)이라고 하며 단락에 의한 아크열에 의해 순간고온에서 상온으로 온도변화가 발생하는 동안 1,000°C 이상의 온도차가 발생하게 되어 주상조직(columnar structure)이 형성된다. 이 조직은 온도가 높은 쪽에서 낮은 쪽으로 방향성을 가지고 있으며 외부 온도가 상온인 경우 전선에 부착된 부분의 경계면을 중심으로 성장한 것으로 확인할 수 있다. 수지상 조직의 경우는 단락과 비교하여 긴 시간이 요구되는 사항으로 과전류(over current)에 의해 전선 내부가 줄열이 발생하게 되고, 이러한 상태가 지속되다가 용단되면 용융된 전선이 식는 과정에서 형성되는 조직으로 가지 모양의 형태를 하고 있으며 조건에 따라 다양한 방향성을 가지고 있다.

그림 4는 1.2mm의 나전선을 105A, 157A, 210A로 각각 용단시킨 후 단면을 분석한 것이다. (a)는 105A를 공급하여 약 9.14sec에서 용단된 것으로 단면을 보면, 과전류에 의한 용단으로 나타나는 수지상 조직(dendrite structure)이 나타났고, 전선 중심부에서 외부의 중심축

으로부터 약 59.7°의 각도를 이루어 생성되었음을 확인할 수 있다. (b)는 157A의 용단전류를 공급하여 평균 4.70sec에서 용단되었을 때 나타난 전선의 단면을 보여주는 것으로 (a)와는 달리 수지상조직의 성장각도가 일정하지 않음을 확인할 수 있었고, 내부는 결정성장(grain growth)을 확인할 수 있는 조직이 나타났다. (c)는 210A의 용단전류를 2.10sec 동안 공급하여 용단된 전선의 단면으로 수지상조직의 성장각도가 ±3.5°에서 성장하였음을 확인하였다. 이는 주상조직의 형태와 유사한 성장 특성으로 전선 내부의 온도와 외기온도가 많은 차이가 나므로 높은 곳에서 낮은 곳으로 수지상 조직이 성장한 것으로 판단된다. 따라서 프리스의 용단전류 2배 이상에서 단락특성을 가진 조직이 나타나고 있음을 확인하였다.

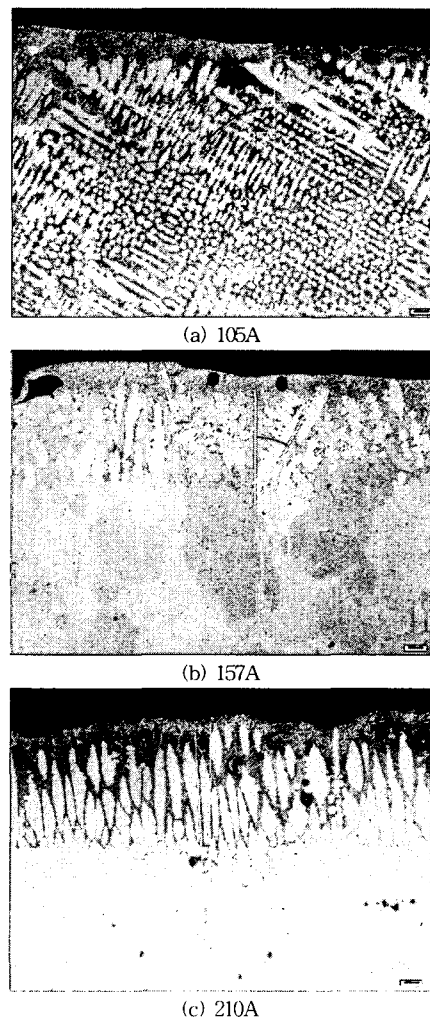
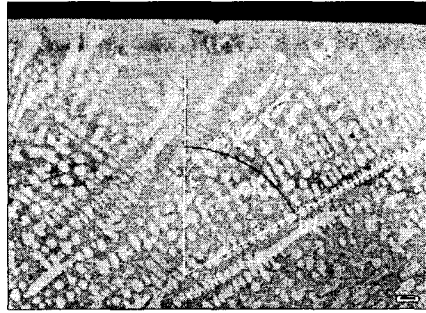
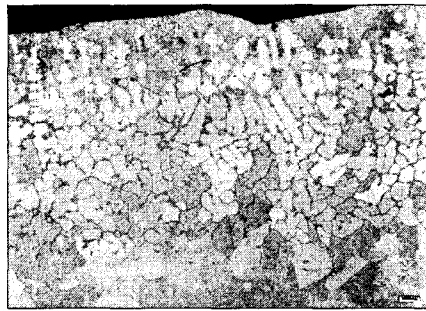


그림 4. 용단전류에 의해 열화된 1.2mm 나전선의 단면분석  
 Fig. 4. The CSA of 1.2mm bare wire contaminated by fusing current

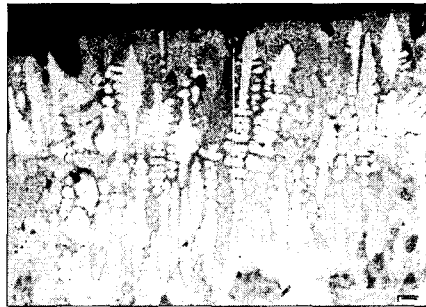
그림 5는 1.6mm의 나전선을 용단전류에 의해 용단시킨 후 단면을 촬영한 것이다. (a)는 161A의 용단전류를 공급하여 평균 18.94sec에 용단된 전선의 단면으로 수지상 조직이 전선 중심부로부터 약 61.1°와 41.7° 등의 일정각도로 성장하고 있음을 확인하였다. (b)는 240A의 용단전류의 공급하여 평균 6.23sec에 용단된 전선의 단면으로 수지상 조직의 성장각도가 비교적 일정하지 않음을 알 수 있다. (c)는 320A의 용단전류를 공급하여 평균 3.41sec에서 용단된 전선의 단면으로 수지상 조직의 성장각도가  $\pm 5^\circ$ 의 범위에서 성장하고 있음을 확인하였다.



(a) 161A



(b) 240A



(c) 320A

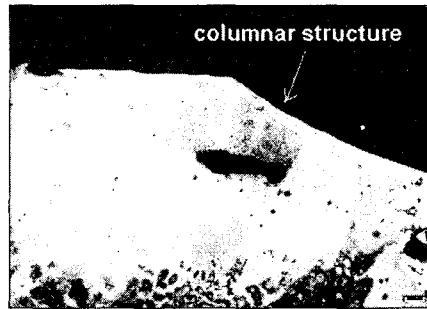
그림 5. 용단전류에 의해 열화된 1.6mm 나전선의 단면분석  
Fig. 5. The CSA of 1.6mm bare wire contaminated by fusing current

이는 용단전류에 의한 줄열로 전선내부가 높은 열이 발생하여 중심축으로부터 표면으로 성장하고 있음을 보여주고 있다. 이는 주상조직에서 관찰되는 것으로 단락에 의한 조직특성이 나타나고 있음을 확인하였다.

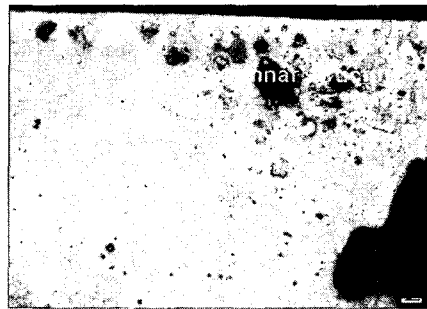
그림 6은 2.0mm의 전선을 용단시킨 후 단면을 확대 촬영한 것이다. (a)는 226A의 용단전류를 공급하여 평균 21.75sec에서 용단된 전선의 단면으로 수지상조직이 약 40.3°와 -48.0°에서 일정각도를 이루어 성장한 것으로 나타났다. (b)는 339A의 용단전류를 공급하여 평균 6.80sec에서 용단된 전선의 단면으로 수지상조직이 조밀하게 생성되었던 것과는 달리 일부분 생성되었으며, 단락전류에 의해 생성되는 주상조직(columnar structure)이 나타난 것을 확인하였다. (c)는 452A의 용단전류를 평균 4.31sec 동안 공급하여 용단시킨 전선의 단면으로 전선의 가장 자리 부분에서 주상조직이 조밀하게 생성하였음을 확인하였다. 이는 (b)에서 나타난 주상조직보다 조밀한 간격으로 생성된 것으로 수지상조직이 혼재되어 있기는 하나 단락 특성이 지배적으로 나타나는 것으로 판단된다.



(a) 226A



(b) 339A



(c) 452A

그림 6. 용단전류에 의해 열화된 2.0mm 나전선의 단면분석  
Fig. 6. The CSA of 2.0mm bare wire contaminated by fusing current

본 연구는 산업자원부 전력산업기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

- (1) 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.
- (2) W. H. Preece, "On the heating effects of electric currents", Proc.Royal Soc., vol. 36, pp.464~471, 1884
- (3) Sheera Knechi, Bill Gonzalez, Kimberley Sieber, "Fusing Current of Short Aluminum Bond Wire", 1996 InterSociety Conf. on TP, pp.329~333, 1996
- (4) William D. Callister, Jr., "Materials Science and Engineering an Introduction", Wiley 6th edition, pp.594~636, 2003
- (5) 김정근 외 2, "금속현미경 조직학", 도서출판 골드 초판, pp.14~183, 1999

위의 단면특성을 통해 용단전류의 1배에서는 각각 약 40°와 60°의 일정각도를 이루며 과전류 용단에서 나타나는 수지상조직이 생성되는 것을 확인하였고, 1.5배와 2배의 용단전류로 갈수록 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.

국제전기코드에서 단락전류의 정의에 의해 상수 k를 본 실험의 결과로서 계산하여 추정하여 보면, 그림 7에서 나타난 것과 같은 범위 내에서 정의할 수 있을 것으로 판단된다. 이 곡선에서 보면, 상수 k의 값은 약 300에서 결정되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 본 실험의 정확성을 위해 더 많은 자료 축적을 위한 보완실험이 요구된다.

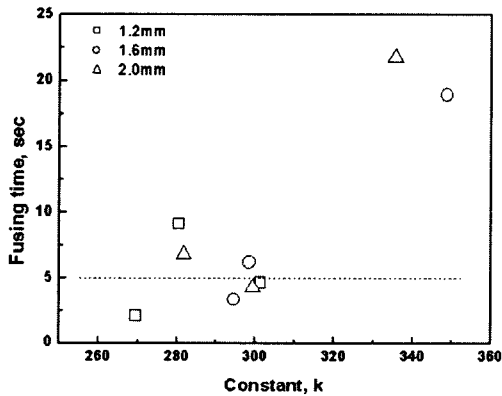


그림 7. 상수 k 대 용단시간 곡선  
Fig. 7. Curves of constant(k) versus fusing time

### 3. 결 론

전기로 인한 재해는 이루 헤아릴 수 없을 만큼 다양한 패턴을 가지고 있다. 전기화재 원인분석에 있어서도 단락과 과전류에 의한 사고를 규명하는 데는 많은 분석 기법과 이론이 적용되며 전기에너지에 의한 열적 메커니즘을 해석하는 데는 복합적 사고가 요구되기도 한다. 단순 과전류 즉, 지속시간을 가지는 과전류에 의한 경우와 단순 단락 즉, 극히 짧은 시간 내에 단락으로 이어지는 경우의 전기화재 원인분석은 단면조직의 형태를 통해 입증되어 왔다. 따라서 과전류(over current)와 단락(short circuit)의 경계적 범위에서의 사고원인을 분석하고자 프리스의 용단전류를 중심으로 단면분석을 통한 단락특성을 실험하였다.

본 논문을 통해 과도기적 경계범위의 단락특성 해석이 가능하였고, 국제전기코드의 단락시간 산출시 나전선(bare wire)의 상수 값에 대한 고찰이 이루어졌다.