

AC 전류에 의해 용융된 나전선의 발열 특성

(The Heating Characteristics of Electric Bare Wire Melted by AC Current)

송길목* · 최충석 · 김향곤 · 김영석

(Kil-Mok Shong · Chung-Seog Choi · Hyang-Kon Kim · Young-Seok Kim)

요 약

이 논문은 화재원인판정에 있어서, 교류전류에 의해 용융된 나전선의 발열특성을 기술한 것이다. 실험을 위해 동전선은 1.2[mm], 1.6[mm], 2.0[mm]의 직경인 것을 준비하였다. 단면분석을 통해 용단전류가 전선에 공급되었을 때, 수지상 조직은 약 40[°] 또는 60[°]의 각도로 성장하는 것을 확인하였다. 용단전류가 커지면 커질수록 수지상 조직의 성장각도는 줄어들었다. 그것은 주상조직과 유사하다는 것을 확인하였다.

Abstract

For a fire cause judgement, this paper describes the heating characteristics of electric bare wire melted by AC current. The copper wires prepared for the experiment were 1.2[mm], 1.6[mm], and 2.0[mm] 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.

Key Words : fire cause judgement, heating characteristics, fusing current, dendrite structure, columnar structure

1. 개 요

편리하고 윤택한 사회기반 시설의 대부분은 전기 에너지를 이용한 것으로 과학발달과 더불어 매우 중요한 에너지로 인식되고 있다. 최근 다양한 분야에 설비나 장치가 원하는 형태의 주파수와 전압의 크기 등을 변환하여 사용되고 있는 추세이다. 그러나 이

러한 전기사용에 있어서 부주의, 안전관리 미숙 등으로 전기재해가 나날이 증가하는 추세이며 과거에 비해 재산피해는 물론 인명피해도 대형화 되어 가고 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 피해

* 주저자 : 전기안전연구원 전기재해연구그룹
Tel : 031-580-3033, Fax : 031-580-3045
E-mail : natasder@kesco.or.kr
접수일자 : 2005년 10월 13일
1차심사 : 2005년 10월 19일
심사완료 : 2005년 11월 1일

를 주는 전기화재 원인분석 기술은 예방대책을 수립하는 기준이 되며 향후 전기안전 분야의 정책적 방향을 제시하는 중요한 자료가 될 것이 판단된다[1,2].

본 논문에서는 전기화재 중 단락과 과부하에 의해 소손되는 전선의 금속단면 변화를 분석하였으며, 용단전류와 시간과의 관계를 단면변화와 비교하여 그 특성을 밝혔다. 실험에 응용된 실험식은 프리스의 용단전류값을 적용하여 화재 발생에 따른 전기화재 원인 분석에 응용이 가능하도록 하였다[3,4].

2. 단면분석을 통한 전기화재 판정

2.1 국내 전기화재 현황 및 특성

국내에서 발생하고 있는 전기화재는 매년 가장 높은 점유율을 보이고 있다. 행정자치부의 통계자료에 의하면 1994년도부터 2003년도까지 최근 10년간 평균 30[%]를 상회하는 점유율을 보이고 있으며, 최근 2003년도에도 전체화재 건수가 약 3만 건에 이르고 있으며, 이 중 약 1만 건 정도가 전기화재인 것으로 집계되었다.

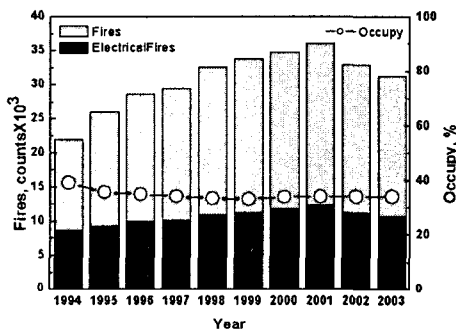


그림 1. 국내 전기화재 점유 현황
Fig. 1. Possession state of electrical fire in the inside of the country

이는 $\pm 5[\%]$ 정도의 오차범위를 적용하더라도 매우 높은 것으로 이에 대한 대책이 요구된다.

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

단락에 의한 전기화재는 매년 전기화재 원인 중

가장 많은 점유율을 보이고 있어서 이에 대한 연구의 필요성이 높아지고 있다. 단락사고에 의한 경우 보호 장치에 의해 차단되나 이미 단락에 의한 아크는 주변 가연물에 착화되므로 차단장치는 계통의 안전을 보호할 수는 있으나 2차적 사고를 예방하지 못하는 단점을 가지고 있다.

단락에 의한 사고의 경우 대부분 아크발생에 의한 섬광(flash)형태의 가시광선과 단락되는 전선 또는 충전부 사이에서의 기압차에 의한 폭발(explosion) 그리고 높은 열을 동반한다. 단락사고 설비는 대부분 전선에서 나타나며, 높은 열이 순간적으로 발생하여 응용된 구리망울이 아크비산을 통해 화재로 전이되는 과정을 거친다. 따라서 단락사고에 의한 전선의 변형에 대한 연구, 순간 아크열에 의한 주변 가연물이 화재로 진전되기 위한 조건에 관한 연구 등 다양한 전기화재 원인분석을 규명하기 위한 연구가 진행 중에 있다[5,6].

2.2 구리의 특성

상기한 것과 같이 단락에 의해 용단된 전선은 외부화염에 의해 응용되는 것과는 달리 온도와 시간에 따라 단면의 특이 구조를 가진다. 도전재료로서 가장 많이 이용되는 구리(copper)의 경우 응용온도가 1,083[°C]로서 일반화재의 온도보다 훨씬 높은 온도에서 응용되는 특징을 가지고 있다. 또한 아크의 온도는 문헌에 의하면 적게는 2,000[°C]에서 3,000[°C] 이상의 고온이 발생하며, 재질에 따라 5,000[°C] 이상 나타나기도 한다.

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

1,000[°C] 이상의 온도 차이가 짧은 시간동안 이루어진 경우 주상조직이 온도가 낮은 경계면을 중심으로 형성된 것으로 판별한다. 과부하에 의한 경우 수지상 조직이 형성되는데, 핵생성과 그를 중심으로 하여 산화동(Cu₂O)이 재결합하는 과정에서 형성된다. 수지상 결정은 어떤 결정학적 면상에서 선택적

으로 성장된다. 구리(copper)와 같은 면심입방구조(FCC)속에서 수지상 축은 조밀충진 된 면에 의하여 형성된 피라미드(pyramid) 축에 있다. 수지상정의 성장 속도는 액상에서 과냉도에 따라 좌우되며 과냉은 가장 차가운 표면에서부터 시작되므로 수지상정이 표면을 따라 먼저 성장된다[7].

2.3 용단전류의 실험식과 특성

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

$$I_f = A \cdot D^{1.5} \quad (1)$$

I_f 는 용단전류를 나타내고, A 는 용단계수로서 구리의 경우 80이다. D 는 전선의 직경([mm])을 나타낸다[8].

용단전류에 의한 실험식에서 개략적인 재료의 특성을 파악할 수 있으나 용단전류와 시간은 주변의 온도, 습도 등 많은 영향을 받는다. 따라서 이를 보완하기 위한 식으로 온더돈크(Onderdonk)의 실험식이 제시되었다. 이는 IEEE Std 1048-1990에 의해 설명되어 있으며, 중요사항은 구리 도체에 대한 용단전류와 시간과의 관계를 나타낸 것이다. 이외에도 과전류에 의해 영향을 받는 전선에 대한 다양한 실험식과 코드가 제시되어 있는데 그 중 IEC 60364-433 및 434에 의하면 과부하 보호, 단락보호에 대해 자세하게 설명하고 있다[9-10].

3. 과전류 조건에서의 실험구성

3.1 실험 방법

본 실험의 주요 목적은 현재 국내에서 발생되고 있는 전기화재의 주요 요인 중 과전류에 의한 사고 원인을 판정하는 것으로 단락에 의한 주상조직의 생성과 과부하에 의한 수지상조직 생성의 경계부분을 실험을 통해 입증하는데 있다. 그림 2는 일련의 실험

및 분석과정을 순서도로 나타낸 것이다.

단면분석(cross section analysis, CSA)을 위해 용단부분의 약 10[mm] 가량을 절단하고 성형기를 통해 페놀수지(phenol resin) 분말(powder)과 함께 직경 25[mm]의 높이 20[mm] 정도의 시편(mount)을 제작하였다. 제작된 시편은 연마과정을 통해 표면을 일정 부분 절삭하고 광택 처리하였다. 표면은 에칭 처리하여 금속단면을 비교분석하였다.

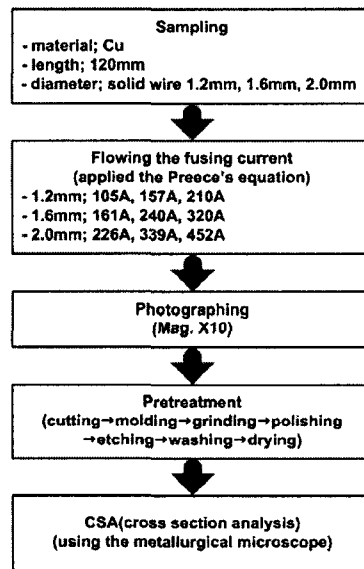


그림 2. 단면분석을 위한 순서도
Fig. 2. The flowchart for the CSA

3.2 실험 장치 구성

전선의 용단시간 및 용단전류에 따른 특성을 분석하고자 사용된 시료는 나전선(bare wire)으로서 1.2 [mm], 1.6[mm], 2.0[mm]의 지름이 다른 전선을 선택하여 120[mm]의 길이로 절단하였다. 실험에 이용된 부분은 100[mm]의 중간부분이며, 나머지는 그립(grip)에 의해 양쪽 끝부분을 잡도록 하였다. 전원공급은 대전류공급장치(ODEN 1X, Denmark)에 의해 전류를 공급하였다. 1.2[mm]의 전선은 105±5[A], 157±5[A], 210±5[A]의 전류를 공급하였다. 1.6[mm]의 전선은 각각 161±5[A], 240±5[A], 320±5[A]의 전류로 용단시켰고, 2.0[mm]의 전선은 226±5[A], 339±5[A], 452±5[A]의 전류로 용단시켰다.

AC 전류에 의해 용융된 나전선의 발열 특성

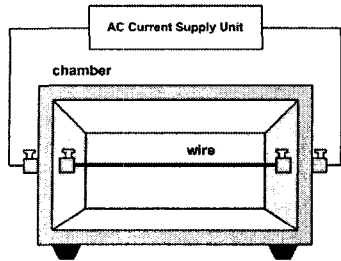


그림 3. 실험 구성 및 개략도
Fig. 3. Experimental setup and schematics

용단전선의 분석대상은 그림 4에서 보이는 것과 같이 전선의 단면의 일부로서 연마기에 의해 대상면을 처리하였다.

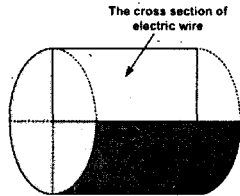


그림 4. 용단전선의 단면
Fig. 4. The cross-section of the fused wire

용단전류의 값은 프리스의 공식에 의한 것으로 각 용단전류의 1.0배, 1.5배, 2.0배에 해당되는 전류를 공급하여 용단된 시료를 이용하였다. 실험실 온도와 습도는 각각 20[°C], 60[%]의 습도를 유지하여 실험하였다. 그림 3의 (a)는 실험대상물이 기류의 영향을 최소화하기 위해 챔버(chamber)를 이용하였으며, (b)는 시료에 공급된 용단전류 대 시간의 상관곡선으로 구리의 특성과 용단시간을 측정을 통해 발열량을 산출할 수 있다.

4. 용단까지의 전류 및 시간 특성

4.1 용단전류에 따른 시간 측정 및 발열량

각 전선의 용단전류를 공급하여 용단 시킨 결과 그림 5에서 그림 7과 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.

1.2[mm]의 전선은 용단전류가 약 105[A]이었을 때 평균 9.14[sec]의 용단시간을 보였다. 이는 국제기준에 의하면 과전류 용단에 근접한 상태를 나타내는 것이다. 또한 1.5배의 전류인 157[A]인 경우 4.70[A]로서 5초 이내에 용단되어 단락 용단에 근접하는 것을 보여준다. 용단전류가 210[A]인 경우에는 2.10[sec]의 시간에 용단되었다.

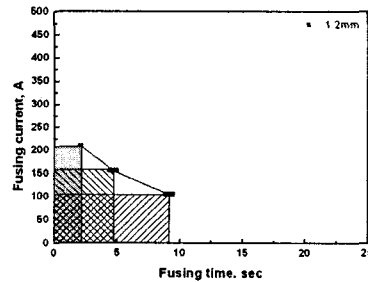


그림 5. 1.2[mm] 전선의 용단시간 대 전류곡선
Fig. 5. Fusing time v.s. fusing current curve of 1.2[mm] wire

1.6[mm]의 전선에서 용단전류가 161[A]인 경우 용단시간은 평균 18.94[sec]가 측정되었다. 240[A]의 용단전류에서 6.23[sec]의 용단시간이 걸렸으며, 320[A]이었을 때는 3.41[sec]의 용단시간이 소요된 것을 알 수 있었다. 따라서 1.6[mm]의 전선에서 용단시간이 5초 이내에 동작하기 위한 용단전류는 약 270[A] 이상인 것으로 추정된다.

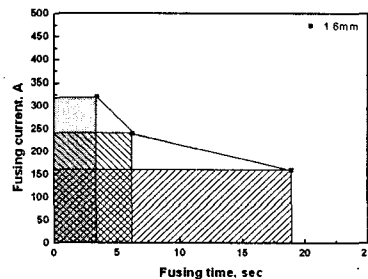


그림 6. 1.6[mm] 전선의 용단시간 대 전류곡선
Fig. 6. Fusing time v.s. fusing current curve of 1.6[mm] wire

2.0[mm]의 전선에서 용단전류가 226[A]인 경우 용단시간은 21.75[sec], 339[A]에서는 6.80[A], 452[A]에서는 4.31[A]의 용단시간이 소요된 것으로 나타났

다. 이 곳에서 보면 용단시간이 5초 이내인 경우를 고려하면 약 450[A] 부분에서의 용단전류가 공급되었을 경우 나타나는 것으로 판단된다.

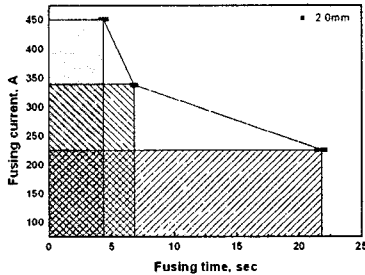


그림 7. 2.0[mm] 전선의 용단시간 대 전류곡선
Fig. 7. Fusing time v.s. fusing current curve of 2.0[mm] wire

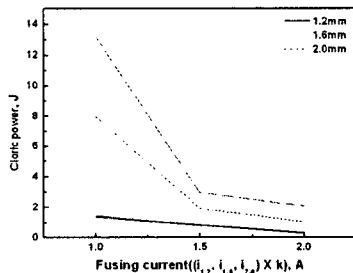


그림 8. 용단전류 대 발열량 상관곡선
Fig. 8. The correlation curves of fusing current v.s. heating value

따라서 구리의 전기저항율은 $1.7241[\mu\Omega] \cdot [cm]$ 로 나타낼 수 있으므로 각각의 굵기와 길이에 대한 저항은 1.2[mm]인 경우 $1.95[\mu\Omega]$, 1.6[mm]인 경우 $3.46[\mu\Omega]$, 2.0[mm]인 경우 $5.41[\mu\Omega]$ 로 계산되어 있다. 공급한 용단전류와 시간, 저항으로 열용량을 산출할 수 있다. 각각의 전선이 용단될 때까지의 발열량을 줄의 법칙에 의하여 산출하면 그림 8과 같다. 그림에서 용단전류의 정수배가 커질수록 발열량은 전선의 직경에 비례하여 용단되는 것으로 확인되었다. 또한 전선의 직경이 클수록, 용단전류의 정수배가 작을수록 발열량의 기울기가 커지는 것으로 나타났다. 용단전류의 1배에서 보면, 1.2[mm] 직경의 전선은 1.4[J]의 발열량을 가지고 용단되었으나, 1.6[mm]인 경우에는 8.0[J], 2.0[mm]의 직경을 가진 전선은 13.2[J]의 열량에서 용단되었다.

4.2 전선의 외형 변화

용단전류에 따른 각 전선의 외형변화를 실체현미경을 통해 촬영한 후 각각의 용융패턴을 확인할 수 있었다.

그림 9는 전선의 지름이 1.2[mm]의 전선으로 (a)는 정상상태의 것으로 전류가 공급되지 않았을 때를 보여준다. (b)는 용단전류의 1배로서 105[A]의 전류가 흐르다가 용단된 것으로 끝부분이 거칠게 용단되어 있으며 전체 표면은 흑갈색의 형태를 확인할 수 있다. (c)는 157[A]의 전류에 의해 용단된 1.2[mm] 직경의 전선으로 용단부분이 둥글고 전체 표면은 주름진 형태의 흑갈색임을 알 수 있다. (d)는 용단전류의 2배 전류인 210[A]에서 용단된 것으로 용단부분의 직경이 가늘고 표면에 주름이 많은 흔적을 확인할 수 있다.

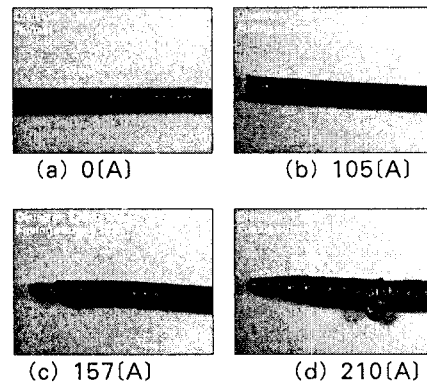


그림 9. 1.2[mm] 나전선의 용융패턴 이미지
Fig. 9. The molten pattern image of 1.2[mm] bare wire

그림 10은 직경 1.6[mm]의 나전선을 각각의 용단전류에 의해 용단된 상태를 촬영한 것이다. (a)는 용단전류를 공급하지 않은 상태로 적갈색에 빛에 반사가 되는 형태를 확인할 수 있다. (b)는 161[A]의 전류를 공급하여 용단시킨 것으로 용단부분에는 둥근 형태를 되어 있으며 표면은 흑갈색으로 산화된 형태를 확인할 수 있다. (c)는 240[A]의 전류를 공급하여 용단시킨 것으로 표면이 주름지고, 용단부분이 거칠게 끊긴 형태를 보인다. (d)는 320[A]의 전류로 용단시킨 전선의 외형을 확대한 것이다. 표면이 주름지

AC 전류에 의해 용융된 나전선의 발열 특성

고 (c)보다 단면이 줄어든 것으로 보이며, 흑갈색의 산화된 표면을 확인하였다.

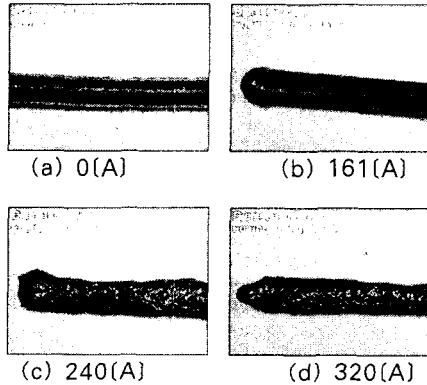


그림 10. 1.6[mm] 나전선의 용단패턴 이미지
Fig. 10. The molten pattern image of 1.6[mm] bare wire

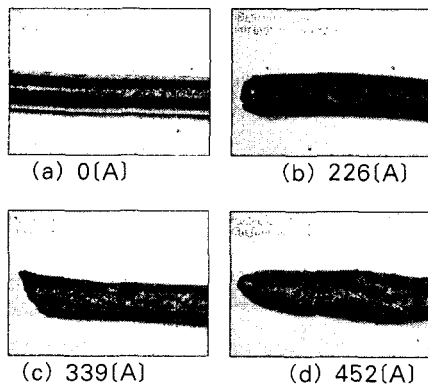


그림 11. 2.0[mm] 나전선의 용단패턴 이미지
Fig. 11. The molten pattern image of 2.0[mm] bare wire

그림 11은 직경 2.0[mm]의 나전선을 이용하여 각각의 용단전류로 용단된 상태를 촬영한 것이다. (a)는 용단전류가 흐르지 않은 상태로서 정상상태에서의 전선을 보여준다. (b)는 226[A]의 전류를 공급하여 용단시킨 것으로 표면은 매끄러우며 흑갈색으로 산화된 상태를 확인할 수 있다. (c)는 339[A]의 전류를 공급하여 용단시킨 것으로 용단부분이 거칠고 전선의 표면은 주름진 형태를 보인다. (d)는 452[A]의 전류를 공급하여 용단시킨 것으로 용단끝부분이 둥글고 표면은 주름이 비교적 많은 것을 확인할 수 있고,

지름의 변화가 부분적으로 큰 것을 확인할 수 있다.

5. 용단전선의 단면특성

5.1 용단전류에 따른 단면 조직 성장

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

구리전선의 단면조직인 경우 정상상태의 것은 그림 12에 나타난 것과 같은 유형의 것을 확인할 수 있다. 단면조직의 경계가 조밀하고 불규칙적으로 배열되어 있음을 알 수 있다.

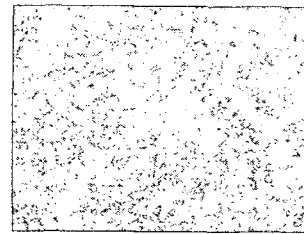


그림 12. 정상상태의 단면조직
Fig. 12. The cross-section structure of the normal state

그림 13은 1.2[mm]의 나전선을 105[A], 157[A], 210[A]로 각각 용단시킨 후 단면을 분석한 것이다. (a)는 105[A]를 공급하여 약 9.14[sec]에서 용단된 것으로 단면을 보면, 과전류에 의한 용단으로 나타나는 수지상 조직(dendrite structure)이 나타났고, 전선 중심부에서 외부의 중심축으로부터 약 59.7°의 각도를 이루어 생성되었음을 확인할 수 있다. (b)는 157[A]의 용단전류를 공급하여 평균 4.70[sec]에서 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 210[A]의 용단전류를 2.10[sec] 동안 공급하여 용단된 전선의 단면으로 수지상조직의 생성각도가 $\pm 3.5^\circ$ 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.

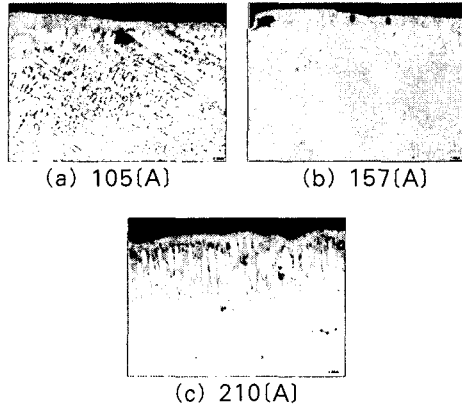


그림 13. 용단전류에 의한 1.2[mm] 나전선의 단면이미지
Fig. 13. The cross-section images of 1.2[mm] bare wire by fusing current

그림 14는 1.6[mm]의 나전선을 용단전류에 의해 용단시킨 후 단면을 촬영한 것이다. (a)는 161[A]의 용단전류를 공급하여 평균 18.94[sec]에 용단된 전선의 단면으로 수지상 조직이 전선 중심부로부터 약 61.1[°]와 41.7[°] 등의 일정각도로 성장하고 있음을 확인하였다. (b)는 240[A]의 용단전류의 공급하여 평균 6.23[sec]에 용단된 전선의 단면으로 수지상 조직의 성장각도가 비교적 일정하지 않음을 알 수 있다. (c)는 320[A]의 용단전류를 공급하여 평균 3.41[sec]에서 용단된 전선의 단면으로 수지상 조직의 성장각도가 $\pm 5[°]$ 의 범위에서 성장하고 있음을 확인하였다.

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 15는 2.0[mm]의 전선을 용단시킨 후 단면을 확대 촬영한 것이다. (a)는 226[A]의 용단전류를 공급하여 평균 21.75[sec]에서 용단된 전선의 단면으로 수지상조직이 약 40.3[°]와 -48.0[°]에서 일정각도를 이루어 성장한 것으로 나타났다. (b)는 339[A]의 용

단전류를 공급하여 평균 6.80[sec]에서 용단된 전선의 단면으로 수지상조직이 조밀하게 생성되었던 것과는 달리 일부분 생성되었으며, 단락전류에 의해 생성되는 주상조직(columnar structure)이 나타난 것을 확인하였다. (c)는 452[A]의 용단전류를 평균 4.31[sec] 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.

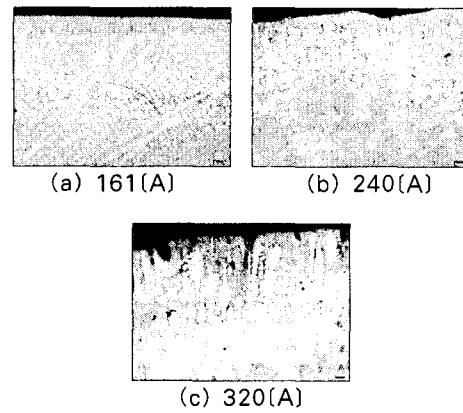


그림 14. 용단전류에 의한 1.6[mm] 나전선의 단면이미지
Fig. 14. The cross-section images of 1.6[mm] bare wire by fusing current

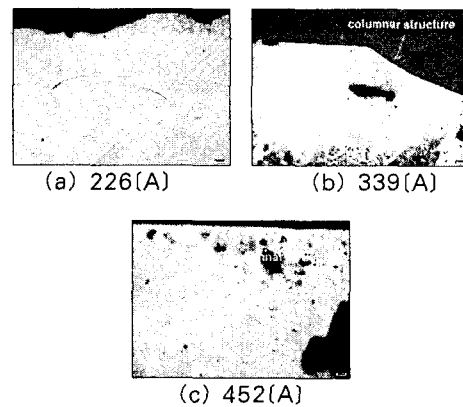


그림 15. 용단전류에 의한 2.0[mm] 나전선의 단면이미지
Fig. 15. The cross-section images of 2.0[mm] bare wire by fusing current

6. 결 론

전기로 인한 재해는 이루 헤아릴 수 없을 만큼 다양한 패턴을 가지고 있다. 전기화재 원인분석에 있어서도 단락과 과전류에 의한 사고를 규명하는 데는 많은 분석기법과 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 전류와 시간적 영향을 받는 단락과 과부하 경계범위의 특성 해석으로 전기화재 원인을 입증하는 자료로서의 활용이 가능하였다.

본 연구는 산업자원부 전력산업기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [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", 2003-K Joint Symp. 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] John D. DeHaan, "Kirk's Fire Investigation", 5th edition, Prentice Hall, pp.305, 2002.
- [4] Kil-Mok Shong, Hyang-Kon Kim, Chung-Seog Choi and Hee-Ro Kwak, "A Study on the Electrical Fire Analysis of PVC Insulated Flexible Cord by Over-Current", KIEE 2003spring conference, pp.131~133, 2003.
- [5] Atila Metrol Member, "Estimation of Aluminium and Gold Bond Wire Fusing Current and Fusing Time", IEEE Trans. on CP & MT, VOL. 18, NO. 1, pp.210~214, 1995.
- [6] Babrauskas, V., "Fires due to Electric Arcing: Can 'Cause' Beads Be Distinguished from 'Victim' Beads by Physical or Chemical Testing?", Fire and Materials, pp.189~201, 2003.
- [7] 김정근 외 2, "금속현미경 조직학", 도서출판 골드 초판, pp.14~183, 1999.

- [8] Sheera Knechi, Bill Gonzalez, Kimberley Sieber, "Fusing Current of Short Aluminum Bond Wire", 1996 InterSociety Conf. on TP, pp.329~333, 1996.
- [9] William D. Callister, Jr., "Materials Science and Engineering an Introduction", Wiley 6th edition, pp.594~636, 2003.
- [10] Eugene Loh, "Physical Analysis of Data on Fused -Open Bond Wires", IEEE Trans. on CH & MT, VOL. CHMT-6, NO. 2, 1983.

◇ 저자소개 ◇

송길목 (宋 倭 穆)

1967년 3월 31일생. 1994년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 2003년 동 대학원 전기제어시스템공학과 졸업(석사). 2005년 현재 동 대학원 박사과정 재학 중. 1996년~현재 한국전기안전공사 부설 전기안전연구원 전기재해연구그룹 연구과장.
Tel: (031)580-3033, Fax: (031)580-3045,
E-mail : natasder@kesco.or.kr

최충석 (崔 忠 錫)

1961년 9월 19일생. 1991년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1993년 나고야대학 초청연구원. 1994~1995년 구마모토대학 객원연구원. 1997년~현재 전기안전연구원 전기재해연구그룹 그룹장.
Tel: (031)580-3030, Fax: (031)580-3045,
E-mail : ccseog@netian.com / ccseog@kesco.or.kr

김향곤 (金 珣 坤)

1970년 12월 14일생. 1996년 조선대학교 공대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년~현재 전기안전연구원 전기재해연구그룹 연구부장.
Tel: (031)580-3031, Fax: (031)580-3045,
E-mail : kon0704@kesco.or.kr

김영석 (金 榮 錫)

1974년 4월 27일생. 1996년 2월 경상대학교 공대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2001~2002년 야마구치대학 객원연구원. 2003년~현재 전기안전연구원 전기재해연구그룹 연구원.
Tel: (031)580-3038, Fax: (031)580-3045,
E-mail : athens9@kesco.or.kr