

과전류 열화에 의해 용단된 전선의 수지상 조직 성장특성에 관한 연구

송길목*, 최충석*, 김동우*, 곽희로**
*전기안전연구원, **승실대학교

A Study on the Growing Characteristics of Dendrite Structure of Melted Wire Deteriorated by Over Current

Kil-Mok Shong*, Chung-Seog Choi*, Dong-Woo Kim*, Hee-Ro Kwak**
*Electrical Safety Research Institute, **Soongsil Univ.

Abstract - In this paper, we studied on the growing characteristics of dendrite structure of melted wire deteriorated by over current. Electric wire was melted by Jolue's heat. By using HSIS(High Speed Imaging System), we found out a lot of melted parts of wire were dispersed and radiated. Electric wire had narrow melted areas in case of short fusing time. A lot of very small dots generated around the grain of copper cross-section and they were changed into dendrite structure. Dendrite structure appeared at the values lower than 2.5[A/sec]. In case of very short fusing time, fusing current was calculated by empirical formula.

The Preece equation was not enough to analyze a variety of characteristics of melted wire because it did not consider melting time, atmosphere, etc.

1. 서 론

근대 문명을 이끌어 가고 있는 핵심에너지로서의 전기는 일상생활에 점점 가깝게 접근하여 대용량화, 혹은 미세화 된 다양한 형태의 출력으로 편익을 제공하고 있다. 하지만, 이렇게 근접하여 사용되고 있는 전기의 부분별 한 이용과 생산으로 안전을 고려하지 않은 무리한 조건에 의해 재해가 발생하게 된다. 국가 중대재해의 대처에 있어서 이미 선진외국에서는 안전 전문 연구기관에 대한 투자와 개발이 이루어지고 있어서 연구성과가 교육, 홍보, 개발 등 적극적으로 활용될 수 있도록 제도적 장치가 마련되어 있다. 그러나, 국내에서는 안전의 중요성보다 생산성 향상에 우선하는 취약한 기반 구조를 가지고 있어서, 학교와 연구소, 기관 등에서 공익성을 가진 연구가 일부 진행 중에 있지만 관심과 지원이 필요한 실정이다. 향후, 국가가 경제적으로 안정될수록 전기안전에 대한 중요성은 증대할 것으로 판단된다.

국내에서 발생하는 전기화재 원인의 대부분은 단락으로 약 70[%] 이상의 점유율을 보이며, 그 다음으로 과부하와 누전이 점유하고 있다. 전기화재가 매년 국내화재의 30[%] 이상 상회하는 점유율에서 본다면, 전기화재를 줄이는 것만으로도 국가 재해를 상당부분 해소할 수 있다고 판단된다.

본 연구는 전기화재의 원인으로 과부하에 의해 과전류가 흘러 이에 대한 발열로 화재가 발생한 것을 모델링 하였으며, 용단될 때의 순간 현상을 고속이미지 시스템(HSIS: High Speed Imaging System, HG-100K, REDLAKE Ins., USA)을 이용하여 분석하였다. 용단 전류(fusing current)까지 흘러 변형된 전선의 단면조직에서 성장된 수지상 조직은 실체현미경(Stemi SV11, CarlZeiss, Germany)과 금속현미경(Ephipot, Nikon, Japan)에 의해 분석하였다. 또한,

국내에서 많이 인용되고 있는 W.H. Preece의 식과 과전류 모델링을 통해 나타난 용단전류(fusing current)의 실험식(empirical formula)을 비교 분석하였다. 이러한 분석을 통해 과전류의 특성과 현상에 대한 이론적 해석이 가능하였고 수지상 성장특성 해석을 통해 전기화재의 원인을 규명하는 중요한 자료가 될 것으로 기대된다.[1]

2. 이 론

인간의 안전과 전기설비 사고를 최소화하기 위해 이용되고 있는 fuse는 전류가 제한 값을 벗어날 때 녹아서 끊어지도록 설계된 회로의 한 요소이다. 회로상에 일정 전압이 인가된 상태에서 높은 부하의 사용이나 단락 등에 의해 순간 단락전류가 발생할 경우 차단장치가 없다면 가장 취약 부분으로부터 출열에 의해 용융(melting)되다가 끊어지게 된다. 이러한 원리를 이용한 fuse는 전기설비의 보호목적으로 인위적인 부분에 취약한 장치를 구축하여 전기사고가 파급되지 않도록 설계되어 있다. 국내 일부 규정에도 나와있는 실험식으로 용단전류(I)에 대한 Preece의 실험식은 다음과 같다.[2,3]

$$I = AD^{1.5}(A) \quad (A: \text{금속에 따른 상수}, D: \text{전선의 직경})$$

위의 식은 일반 실험실 조건에서 만들어진 것으로 전선의 종류와 전선의 직경에 따라 용단되는 전류가 다른 것을 알 수 있다. 표 1은 금속의 종류에 따른 상수값을 나타낸 것이다. 동(Cu; copper)전선의 경우 상수(A)는 80.0인 것을 알 수 있다.[4,5,6]

표 1. 금속의 종류에 따른 Preece 상수(A)

Fuse Wire	A (D in mm)	Melting Point(°C)	Boiling Point(°C)
Cu	80.0	1,083	2300
Al	59.3	660	1,800
Ag	49.8	960	1,950
Fe	24.6	1,535	3,000
Pt	40.4	232	4,300

3. 실험방법

본 연구에 필요한 실험장치를 구성하기 위해 20.0 [°C]의 온도와 50[%]의 습도를 유지하고 있는 실험실에서 수행하였다. 대전류 공급장치(ODEN 1X, Programma, Sweden)를 이용하여 용단전류(fusing current)가 될 때까지 0.5[A/sec], 1.0[A/sec], 2.5[A/sec], 5.0[A/sec], 7.5[A/sec], 10.0[A/sec], 12.5[A/sec]의 일정시간 간격으로 전류를 높여 실험하였다.

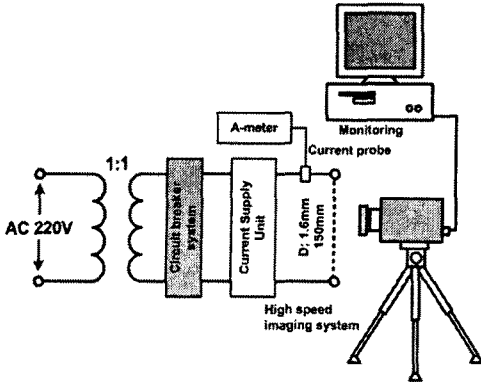


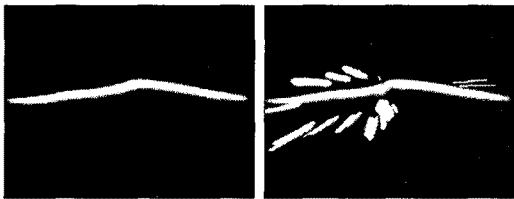
그림 1. 용단전류 공급을 위한 실험장치 구성

실험대상은 1.6[mm]의 절연피복이 없는 동(Cu; copper)전선을 150[mm]의 길이로 하여 실험하였다. 용단될 때의 과정은 고속이미지 시스템에 의해 촬영하였고 용단전류와 시간과의 관계를 실험식을 통해 해석하였다. 또한, 수지상 조직의 성장을 분석하기 위해 성형기(Predopress, Struers, Denmark)를 이용하여 용단된 전선과 수지를 몰딩한 지름 20[mm], 높이 20[mm] 원기둥 모양의 시료를 제작하였다. 성형된 시료는 polishing과 etching과정을 거친 후 금속현미경에 의해 단면조직(cross-section structure)을 분석하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 고속이미지 시스템에 의한 용단특성

고속이미지에 의해 촬영된 전선은 그림 2(a)에서 알 수 있듯이 전류가 상승할수록 전선이 휘어진 것을 볼 수 있다. (b)는 (a)의 과정에서 약 4[msec] 후의 현상으로 용단되면서 가장 큰 발광을 하고 이후 용융망울이 비산(dispersion)되는 것을 확인하였다. 구리의 용융점이 1,083[°C]이므로 그림 2에서의 현상은 1,083[°C] 보다 훨씬 높은 온도에서 나타나는 것으로 판단된다.



(a) 기준(0.0[msec]) (b) 4.0[msec]
그림 2. 과전류에 의한 용단과정(7.5[A/sec])

실험에서 알 수 있듯이 과전류에 의해 용단되는 인자는 용단시간에 지배되며 특히, 용단시간이 짧을수록 용단된 범위가 작아지는 것을 알 수 있었다. 용단시 비산되는 현상은 전기적 현상에서 나타나는 것으로 용융(melting)된 부분에서 일부 재료가 떨어져 나가는 것으로 판단된다.

4.2 외형분석

그림 3은 전선의 실체를 확대하여 촬영한 이미지로서 전선의 지름은 1.6[mm]이다. 전선의 표면은 전선이 제조당시 만들어진 연신구조의 형태를 하고 있다. 이러한 전선은 열을 받는 시간과 온도에 따라 변하게 된다.

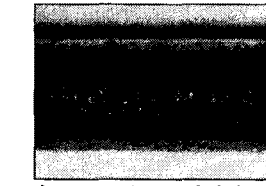
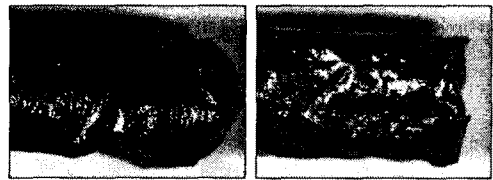


그림 3. 1.6[mm]전선의 확대

그림 4는 용단전류에 의해 변형된 전선의 외형으로 초당 1[A]의 속도로 전류를 증가하여 용단된 전선 (a)와 초당 10[A]의 속도로 전류를 증가하여 용단된 전선 (b)을 확대한 것이다. (a)의 경우 끝이 둥글고 암갈색의 표면을 확인할 수 있다. 이는 전선이 과전류에 의해 전체적으로 열을 받아 공기 중의 산소와 결합한 것으로 산화동의 특성을 가지고 있다. 또한, (b)는 초당 10[A]의 전류가 상승하다 용단된 것으로 용단시간이 짧을수록 용융망울은 맺히지 않고 끝이 잘린 듯한 모양과 표면이 매우 불규칙한 형태의 외형을 확인할 수 있다.



(a) 1.0[A/sec] (b) 10.0[A/sec]
그림 4. 용단전류에 의해 변형된 전선(1.6[mm])

4.3 수지상 조직의 성장 특성

그림 5는 전선의 단면을 분석하기 위해 polishing과 etching과정을 거친 후 단면을 촬영한 것으로 정상전선의 모든 경우에서 나타나는 것이다.

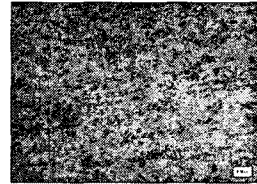
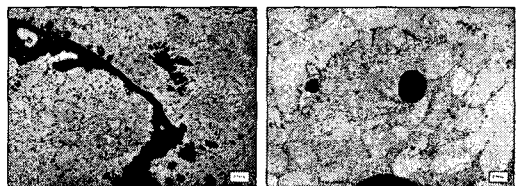


그림 5. 정상전선(1.6[mm])의 단면조직(cross-section)

수지상(dendrite structure)의 성장은 그림 6의 단면조직 형태에서 알 수 있듯이 전류상승시간을 천천히 할수록 점차 (b)에서와 같이 아주 작은 기포 모양이 과전류에 의해 성장된 grain의 경계에서 중심으로 발달되다가 (a)에서 보이는 작은 수지상 조직이 성장하는 것을 알 수 있다. 수지상 조직은 약 2.5[A/sec]의 속도로 전류상승을 준 조직에서 미세하게 성장하기 시작하여 1.0[A/sec]의 조건에서는 상당부분이 진전된 것을 확인할 수 있다. 수지상 조직의 성장은 grain 경계에서 생성된 미세한 기포가 서로 합쳐지면서 산화된 구리의 조직에서부터 발달되었다.



(a) 1.0[A/sec] (b) 10.0[A/sec]
그림 6. 용단시간에 따른 수지상 조직의 성장

4.4 용단시간과 용단전류의 특성 해석

1.6[mm]의 절연하지 않은 동(Cu; copper)전선을 반복적인 모델링 실험을 통해 용단시간에 따른 전류의 크기를 측정하여 특성곡선을 만들고, 특성 실험식을 구현하였다. 또한, 국내 일부 규정에 인용된 Preece의 실험식과 비교하여 용단전류에 영향을 미치는 인자에 대해 분석하였다. 이번 실험에서 모델링한 전선(직경: 1.6[mm])에 대해 Preece의 공식으로 계산하면 용단전류의 값은 아래의 식과 같이 표현된다. 그림 7은 실험데이터를 나타낸 것으로 용단전류와 용단시간이 반비례하는 형태를 알 수 있다.

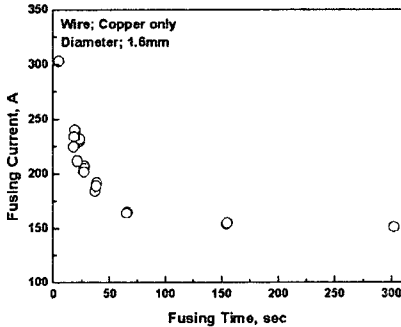


그림 7. 용단시간과 용단전류의 상관곡선

위의 특성 데이터를 이용하여 얻은 용단전류의 실험식은 아래와 같이 표현되어진다. 이 식은 최소승법(least squares method)의 하나로 Gauss-Newton의 다항 보간법(mixed polynomial interpolation)으로 구해졌다.

$$I_{\text{fuse}} = 156.2(1.2e^{-0.0467t} + e^{-0.0001t}) \text{ [A]}$$

용단시간이 극히 짧아지면 전류는 아주 높은 전류가 흘러 결국 단락형태의 조건을 가지게 된다. 위의 식에서 1.6[mm] 전선의 용단전류에 의한 특성 곡선을 확인할 수 있으며, 순간시간을 거의 0으로 하면 343.6[A]의 용단전류를 추정할 수 있었다. 또한, Preece의 공식으로 실험에 이용된 전선의 용단전류를 구하면 아래와 같이 표현된다.

$$I = 80.0 \times 1.6^{1.5} = 161.9 \text{ [A]}$$

이는 그림 8에서 나타낸 것과 같이 모델링에 의해 얻은 실험식으로 계산하면 약 71[sec]의 용단시간을 갖는 것으로 나타났다.

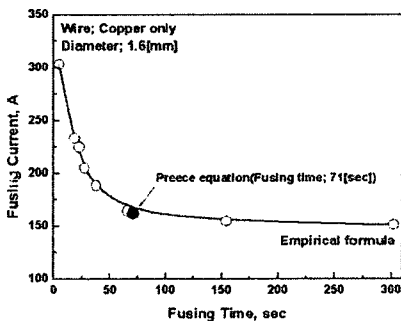


그림 8. 모델링 실험식과 Preece의 계산 비교

위의 실험식에서 용단시간과 용단전류의 상관관계를 알 수 있다. Preece의 식은 단편적으로 금속종류에 따

른 특성을 해석할 때 이용이 가능하지만, 용단시간(fusing time)과 주변 온도 등을 고려하지 않아 전체적인 전선의 용단특성을 해석하는데는 어려움이 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 수지상 조직의 성장 특성을 시간에 따른 전류상승의 조건을 가지고 실험식과 비교 분석한 것으로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 고속이미지 시스템에 의해 용단특성을 촬영한 결과, 전선의 외형은 높은 열에 의해 전선이 휘어지다 용단되면서 가장 큰 발광과 용융망울이 비산되는 것을 확인하였다.
- (2) 과전류에 의해 용단되는 인자는 용단시간에 지배되며 특히, 용단시간이 빠를수록 용단된 범위가 작았다.
- (3) 수지상 조직의 성장은 grain 경계에서 생성된 미세한 기포가 서로 합쳐지면서 산화된 구리의 조직에서부터 성장하고 시간당 전류상승 값이 작을수록 성장이 잘 되는 것을 알 수 있었다.
- (4) 수지상 조직은 약 2.5[A/sec]의 속도로 전류상승을 준 조직에서 미세하게 성장하기 시작하여 1.0[A/sec]의 조건에서는 상당부분이 진전된 것을 확인할 수 있다.
- (5) 용단시간이 극히 짧은 경우 전류는 실험식(empirical formula)에 의해 계산한 결과 343.6[A]였다.
- (6) 모델링에 의한 실험식과 Preece의 식을 비교한 결과, Preece의 식은 용단시간과 주변 온도 등을 고려하지 않아 전체적인 전선의 용단특성을 해석하는데는 어려움이 있었다.

본 연구는 산업자원부 전력산업기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- (1) 송길목, 김향곤, 최충석, 광희로, "Over-Current에 의한 PVC Insulated Flexible Cord의 전기화재 해석에 관한 연구", KIEE 고전압 및 방전용융기술 연구회 춘계학술발표대회 논문집, pp.131-133, 2003
- (2) Sheera Knecht, "Fusing Current of Short Aluminum Bond Wire", IEEE ISC on TP, pp.329-332, 1996
- (3) Atila Mertol Member, "Estimation of Aluminum and Gold Bond Wire Fusing Current and Fusing Time", IEEE Trans. on CP & MT, VOL. 18, NO. 1, 1995
- (4) EUGENE LOH, "Physical Analysis of Data on Fused -Open Bond Wires", IEEE Trans. on CH & MT, VOL. CHMT-6, NO. 2, 1983
- (5) "High Voltage Fuses", Internet site <http://www.fortunecity.com/greenfield/bp/16/fuses.htm>
- (6) "Dentrite Growth", Internet site <http://www.its.caltech.edu/~atomic/snowcrystals/electric/electric.htm>