

# 과전류에 의해 용단된 연동선의 단면조직 분석

송길목 · 김동우 · 최충석

전기안전연구원(한국전기안전공사 부설)

## 1. 서 론

산업현장이나 일반 가정에서 없어서는 안 될 전기는 무분별한 이용과 안전을 고려하지 않은 무리한 조건에 의한 사용으로 예상하지 못한 중대한 재해로 이어질 수 있다. 국내의 경우 전기화재 및 감전으로 인한 피해가 매년 발생하고 있으며 재해 규모가 대형화되고 있는 추세에 있다. 이미 선진외국에서는 국가 중대재해 대책을 위한 안전 전문 연구기관에 대한 투자와 개발이 이루어지고 있어서 연구성과가 교육, 홍보, 개발 등 적극적으로 활용될 수 있도록 제도적 장치가 마련되어 있다<sup>1)</sup>. 그러나, 국내에서는 안전의 중요성 보다 생산성 향상에 우선하는 취약한 기반 구조를 가지고 있어, 국가 전반에 걸친 관심과 지원이 필요한 실정이다. 향후, 국가가 경제적으로 안정될수록 전기안전에 대한 중요성은 증대될 것으로 판단된다<sup>2)</sup>.

국내 전기화재의 발생 원인은 대부분 단락으로 매년 전기화재의 약 70[%] 이상의 점유율을 보이며, 그 다음으로 과부하와 누전이 점유하고 있다. 전기화재가 매년 국내화재의 30[%] 이상 상회하는 점유율에서 본다면, 전기재해를 줄이는 것만으로도 국가 재해를 상당부분 해소할 수 있다고 판단된다. 그러나 국내의 화재통계에 있어서 전기화재의 발생 비율이 선진외국기관과 비교하여 큰 차이를 보이고 있는 데 전체화재의 과학적인 조사와 근거를 바탕으로 하기 보다 목격자의 진술과 정황을 근거로 한 조사자의 판단이 우선 될 결과를 가져올 수 있다. 따라서, 전기화재의 경우 목격자가 없는 경우가 많아 원인규명이 매우 어려워 예방대책을 위한 과학적인 접근이 필요한 실정이다<sup>3)</sup>.

본 연구는 전기화재의 원인 중 과부하에 의해 과전류가 흘러 줄열에 의해 화재가 발생하는 것을 모델링하여 해석하였다<sup>4)~5)</sup>. 과전류에 의한 용단과정을 고속이미지 시스템(HSIS; High Speed Imaging System, HG-100K, REDLAKE Ins., USA)에 의해 분석하였다. 과전류에 의해 용단된 연동선은 전선의 단면조직을 분석하기 위해 절단기(Diamond saw)를 이용하여 일정 부분 절단하여 성형기에 의해 지름이 20[mm], 높이는 약 20[mm]의 펠렛(pellet)을 제작하여 연마기로 연마한 다음 에칭(etching)하였다. 완성된 시료는 금속현미경(Ephipot, Nikon, Japan)을 이용하여 과전류에 의해 변형된 단면 조직 특성을 분석하였다. 본 실험결과와 분석을 통해 과전류의 특성과 현상에 대한 이론적 해석이 가능하였고 전기화재의 원인을 규명하고 향후 예방대책을 수립하는데 중요한 자료가 될 것으로 기대된다.

## 2. 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 각각의 시간당 전류의 크기만큼 증가시켰다. 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 1은 연동선을 1.6[mm]의 절연피복이 없는 연동선(Cu; copper)을 150[mm]의 길이로 하여 구성된 실험장치의 일부를 나타낸 것이다. 용단될 때의 과정은 고속이미지 시스템에 의해 촬영하였다.

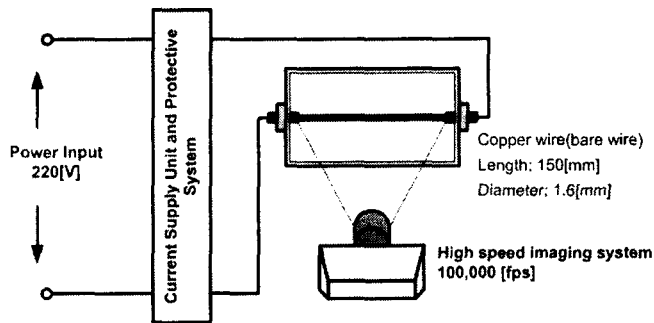


그림 1. 과전류 실험장치 구성

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 용단시간과 용단전류의 상관관계

표 1은 1.6[mm]의 연동선을 실험조건에 따라 과전류가 흐르도록 한 후 용단될 때까지의 시간과 전류를 나타낸 것으로 3회 이상의 실험을 통해 얻은 결과를 평균한 값이다.

표 1에서와 같이 초당 0.5[A]의 전류를 흐르게 하였을 때 302[sec]에서 용단되었으며 용단전류는 151[A]였다. 또한, 짧은 시간동안 전류를 흘렸을 때 5[sec]에서 용단되었으며 이때의 용단전류는 303[A]로 나타났다. 초당 공급하는 전류의 크기를 크게 할수록 용단시간은 짧아졌으며 그때의 용단전류는 커지는 것으로 나타났다. 2.5[A/sec]의 조건으로 전류를 흐르게 하였을 때 평균 용단시간이 65.7[sec]로 급격히 짧아진 것을 알 수 있다.

표 1. 용단시간과 용단전류의 상관관계

Conditions [A/sec]	Fusing Characteristics						Average	
	Current[A]	Time[sec]	Current[A]	Time[sec]	Current[A]	Time[sec]	Current[A]	Time[sec]
0.5	151	302	-	-	-	-	151	302
1.0	154	154	155	155	-	-	154.5	154.5
2.5	164	65.6	165	66.0	164	65.6	164.3	65.7
5.0	192	38.4	184	36.8	189	37.8	188.3	37.7
7.5	207	27.6	205	27.3	202	26.9	204.7	27.3
10.0	212	21.2	230	23.0	232	23.2	224.7	22.5
12.5	240	19.2	234	18.7	225	18.0	233.0	18.6
303/5sec	303	5.0	-	-	-	-	303.0	5.0

그림 2는 표 1에서 평균값으로 계산된 용단시간과 용단전류의 상관곡선을 나타낸 것이다. 상관곡선에서도 알 수 있듯이 2.5[A/sec]와 5.0[A/sec]의 조건에서 변곡점이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 프리스(Preece)의 실험식에 의해 계산해 보면 161.9[A]에서 용단되는 것으로 나타나 2.5[A/sec]의 조건에서 용단되었을 때의 용단전류인 164.3[A]와 유사한 것으로 나타났다.

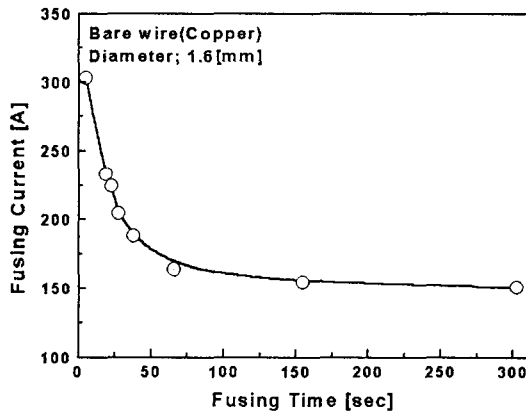


그림 2. 용단시간과 용단전류의 상관곡선

### 3.2 용단시 아크특성

그림 3은 고속이미지 시스템을 이용하여 촬영한 용단시 아크특성을 나타낸 것으로 용단되는 순간을 촬영한 이미지이다. 그림 3(a)는 1.0[A/sec]의 조건으로 전류를 공급한 것으로 전선 중앙부에 적열에 되었다가 섬광과 함께 용단되며 용융망울이 비산되는 것을 확인할 수 있다. 그림 3(b)는 5.0[A/sec]의 조건으로 비산되는 용융망울이 연동선을 중심으로 넓게 퍼져 나가는 것을 확인할 수 있다. 그림 3(c)는 10.0[A/sec]의 조건으로

적열된 부분 중에서 전기적으로 가장 취약한 부분에서 용단된 것을 확인할 수 있다.

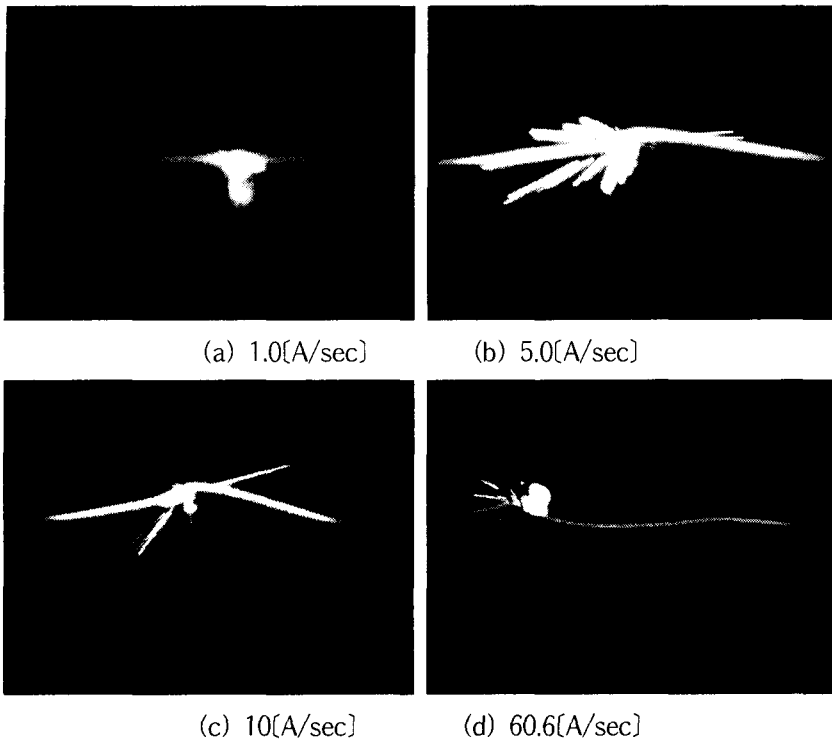


그림 3. 과전류에 의한 용단시 아크특성

### 4.3 금속단면조직 특성

그림 4는 과전류에 의해 용단된 연동선의 단면을 절단하여 금속단면조직을 금속현미경에 의해 촬영한 것으로 과전류시 나타나는 수지상 결정(dendrite)조직이 성장하고 있었던 것을 확인할 수 있었다. 그림 4(a)에서 중앙 우측상단에 수지상 결정 조직이 형성된 것을 확인할 수 있다. 이는 점 형태로 산화동이 단면 전체에 퍼져 있고 일부 수지상 결정을 중심으로 모이는 형태를 알 수 있다. 그림 4(b)는 초당 5.0[A]씩 전류를 증가시켜 용단되었을 때의 단면을 나타낸 것으로 이미지에서 보이는 점들이 경계를 그리며 커지는 것을 확인할 수 있다. 그림 4(c)는 초당 10[A]씩 전류를 증가시킨 것으로 단면 조직은 열을 많이 받았을 때 나타나는 경계를 가진 조직이 성장한 것을 확인할 수 있다. 그림 4(d)는 초당 60.6[A]씩 전류를 증가시켜 303.0[A]에서 용단된 것으로 표면에 과전류에 의한 점들이 다수 형성되어 있고 전선의 중심으로 갈수록 점들이 적어지고 있는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 과전류가 흐를 때는 표면에서부터 열이 발산하여 점차 내부로 진전하는 과정을 나타내고 있으며, 과전류가 지속적으로 흐르면 점형태의 아산화동이 주변과 결합하여 수지상 결정 조직으로 성장하는 것을 알 수 있었다.

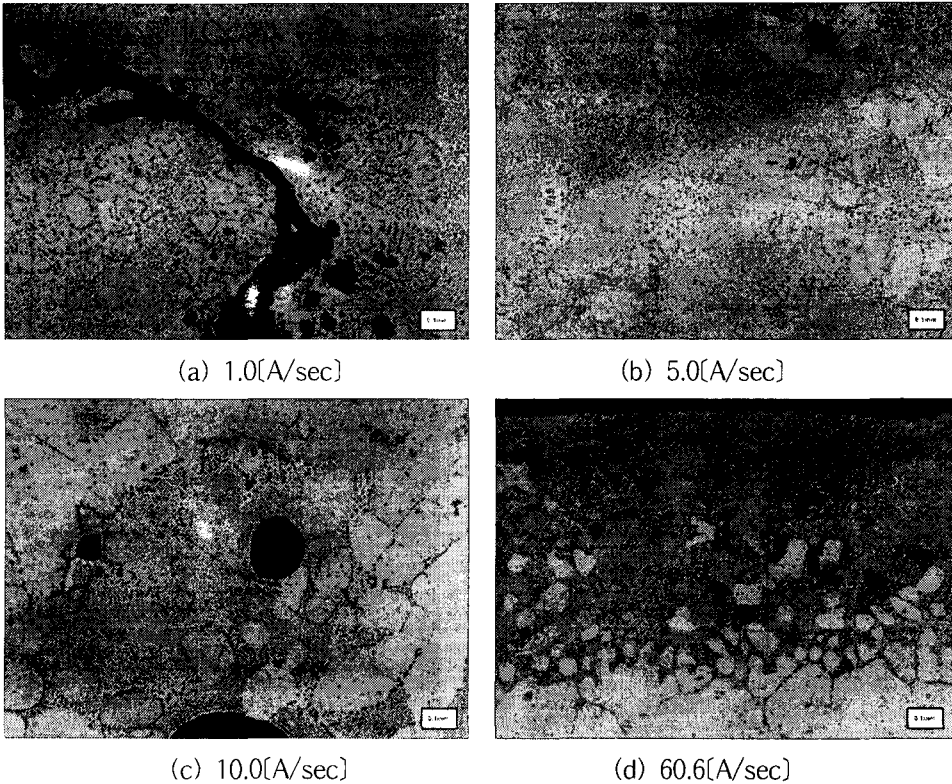


그림 4. 과전류에 의한 연동선의 단면조직

#### 4. 결 론

- (1) 초당 0.5[A]의 전류를 흐르게 하였을 때 302[sec]에서 용단되었으며 용단전류는 151[A]였다. 또한, 짧은 시간동안 전류를 흘렸을 때 5[sec]에서 용단되었으며 이때의 용단전류는 303[A]로 나타났다.
- (2) 과전류 증가 조건 2.5[A/sec]와 5.0[A/sec]사이에서 변곡점이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 프리스(Preece)의 식으로 계산해 보면 161.9[A]로 실험결과 2.5[A/sec]의 용단전류인 164.3[A]와 유사하였다.
- (3) 용단시 아크 발생은 연동선의 가장 취약한 부분으로부터 용단되고 이때 섬광과 용융망울이 비산되는 것을 확인하였다.
- (4) 용단된 전선의 외형은 전체적으로 검붉게 표면이 탄화된 것을 확인할 수 있는데 이는 줄열에 의해 공기중에서 표면이 산화된 것으로 판단된다.
- (5) 과전류가 흐를 때 표면에서부터 열이 발산하여 점차 내부로 진전하는 과정을 나타내고 있으며, 지속시간을 두고 과전류가 흐르면 점형태의 아산화동이 주변과 결합하여 수지상 결정 조직으로 성장하는 것을 확인하였다.

따라서, 과전류 발생 메커니즘을 고속촬영과 수지상 결정 조직 분석으로 가능하였으며, 향후 전기화재 원인에 대한 과학적인 해석과 예방대책을 수립하는데 중요한 자료가 될 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 산업자원부 전력산업기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] 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
- [2] 송길목, 김향곤, 최충석, 광희로, "Over-Current에 의한 PVC Insulated Flexible Cord의 전기화재 해석에 관한 연구", KIEE 고전압 및 방전응용기술 연구회 춘계학술발표대회 논문집, pp.131-133, 2003
- [3] 송길목, 최충석, 김동우, 광희로, "과전류 열화에 의해 용단된 전선의 수지상 조직 성장특성에 관한 연구", KIEE 하계학술대회 논문집, pp.1463-1465, 2003.7
- [4] Sheera Knecht, "Fusing Current of Short Aluminum Bond Wire", IEEE ISC on TP, pp.329-332, 1996
- [5] EUGENE LOH, "Physical Analysis of Data on Fused -Open Bond Wires", IEEE Trans. on CH & MT, VOL. CHMT-6, NO. 2, 1983