

# 과전류에 의해 용단된 소선의 단면특성 분석에 관한 연구

최충석 · 김향곤 · 김동욱 · 김형래

한국전기안전공사 부설 전기안전연구원

## 1. 서 론

산업현장 뿐만 아니라 일반가정에서 냉난방기기와 다양한 전기제품의 사용으로 전기 용량은 해마다 증가하고 있으며 이로 인해 전선의 과열에 따른 화재위험성이 점점 높아지고 있다. 전기화재의 발생원인을 살펴보면, 합선, 과부하, 누전, 접촉부과열, 스파크 등 주로 전선에서 화재의 위험성이 높다<sup>1)~3)</sup>. 전선은 종류와 굵기에 따라 최고허용전류와 온도가 정해져 있다. 그러나, 전선선정이 부적절하거나 기타의 원인에 의해서 과부하로 사용되는 경우나 적절한 굵기의 전선을 선정하여 사용하더라도 연선의 경우 수십 가닥의 소선중에서 잦은 구부림, 기계적 인장, 뒤틀림 등에 의해 소선의 일부가 끊어지는 경우가 자주 발생한다. 이와 같이 외부의 기계적인 스트레스에 의해 연선 중 소선의 일부가 끊어지는 것을 반단선이라고 하며 이것은 진공청소기나 모발건조기 등 이동용 기기의 전원선, 전기장판의 전원연결부, 선풍기의 회전부분 등에서 쉽게 일어난다<sup>4)~5)</sup>.

본 연구에서는 과전류에 의해 용단되는 소선의 특성을 규명하기 위하여 VCTF(2.0mm<sup>2</sup>×2C) 전선에 들어있는 0.26mm 소선을 사용하였으며 용융 소선의 외형과 단면구조 등을 해석하여 에너지 크기에 따른 소선의 용단 특성을 밝히는데 있다.

## 2. 실험방법

소선의 용단특성을 규명하기 위하여 그림 1의 실험회로와 같이 1φ 220V 60Hz의 상용전압하에서 단락 및 과부하 겸용 실험장치(ES & OL-10, KESCO, Korea)를 이용하여 소선에 과전류를 인가하였다. 부하에 흐르는 전류는 단계별로 가감할 수 있도록 하였다. 소선이 용단되는 시간과 전류는 누설전류계(3263, Hioki, Japan)와 기록계(AR1100A, Yokogawa, Japan)를 사용하여 실시간 측정기록 하였다. 이 때의 주위온도는 20±2℃, 습도는 64~66%였다.

본 실험에서는 소선의 가닥수와 부하변화에 따른 용단전류와 용단시간과의 상관관계를 규명하였으며, 용단된 전선은 실체현미경(SV-11, Carlzeiss, Germany)과 금속현미경(Epiphot, Nikon, Japan)을 이용하여 용융 소선의 외형과 단면구조를 해석하였다. 또한, SEM(JSM-6400, Jeol, Japan)과 EDX(Ultracool, Oxford, England)를 이용하여 용융소선의 표면구조와 성분을 분석하였다.

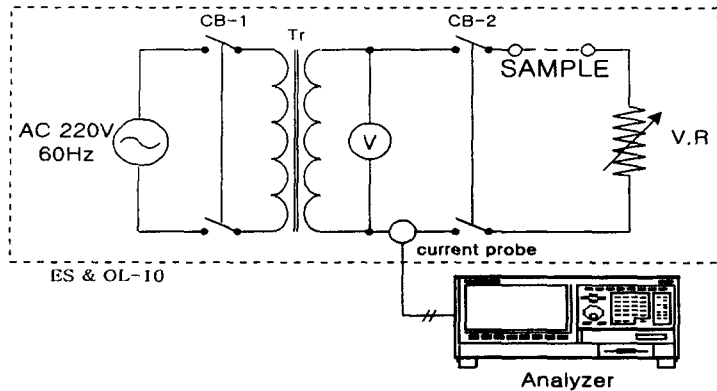


그림 1. 전선의 과전류 용단 실험회로

### 3. 실험결과 및 고찰

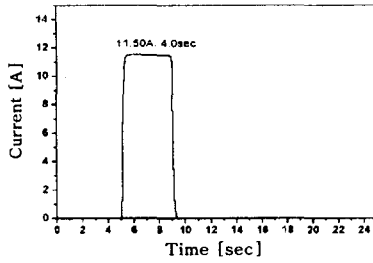
#### 3-1. 소선 1가닥일 때 부하전류에 따른 용단 특성

그림 2는 0.26mm 소선 1가닥일 때 부하변화에 따른 소선의 용단특성을 나타낸 것이다. (a)는 1가닥의 소선에 11.50A의 전류가 흘렀을 때로 소선이 용단되는데 소요된 시간은 4.0sec이었으며 용단되는데 소요된 열량을 계산해 보면, 1 $\phi$  223V로 열량은

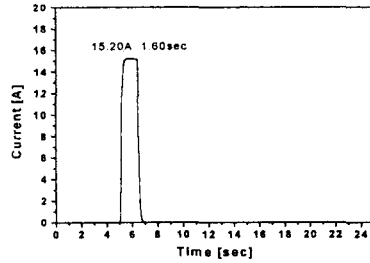
$$H = 0.24VIt = 0.24 \times 223 \times 11.50 \times 4.0 = 2,461.9[\text{cal}] \quad (1)$$

였다. (b)는 1가닥의 소선에 15.20A의 전류가 흘렀을 때로 소선이 용단되는데 소요된 시간은 1.6sec이었으며 용단되는데 소요된 열량을 계산해 보면, 1 $\phi$  222V로 열량은 식 (1)에 의해 1,295.7[cal]였다. (a)의 열량과 비교했을 때 약 절반 정도의 열량으로 용단됨을 알 수 있었다.

그림 3은 그림 2 (a)와 (b)의 용융소선을 실체현미경과 금속현미경을 이용하여 외형과 단면의 결정구조를 비교한 것이다. (a)와 (b)는 11.50A의 전류 통전시 용단된 소선으로 도체 중간부분에 용융흔이 형성되어 있으며, 과전류에 의해 용단될 때 나타나는 전형적인 수지상 조직이 나타나며 작은 구멍(void)이 관측되었다. (c)와 (d)는 15.20A의 전류 통전시 용단된 소선으로 도체 끝부분과 중간부분에 용융흔이 형성됨을 볼 수 있으며, 작은 구멍이 관측되고, 다각형의 결정구조를 나타낸다.

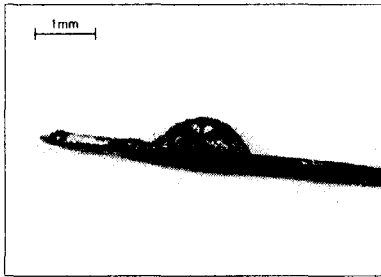


(a) 11.50A 통전시

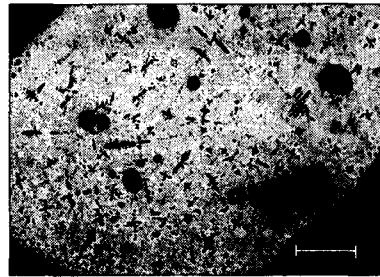


(b) 15.20A 통전시

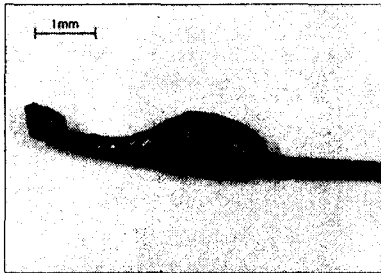
그림 2. 부하전류 변화에 따른 용단특성(1가닥)



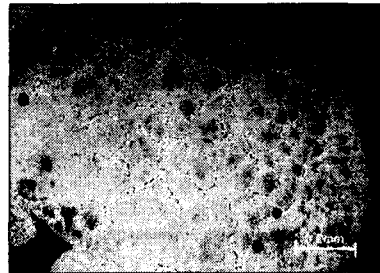
(a) 전선외형(11.50A)



(b) 결정구조(11.50A)



(c) 전선외형(15.20A)



(d) 결정구조(15.20A)

그림 3. 과부하에 의해 용단된 소선의 외형과 결정구조

### 3-2. 소선 2가닥일 때 부하전류에 따른 용단특성

그림 4는 0.26mm 소선 2가닥의 결선상태에 따른 용단특성을 나타낸 것이다.

(a)는 2가닥의 소선을 평형상태로 결선하여 실험한 것으로 용단전류는 19.09A, 용단시간은 5.85sec였다. 이때의 전압은 1 $\phi$  221V로 용단되는데 소요된 열량을 계산해 보면, 5,923.3[cal]였고 (b)는 2가닥의 소선을 꼬아서 결선하여 실험한 것으로 용단전류는 21.80A, 용단시간은 6.0sec였다. 이때의 전압은 1 $\phi$  221V로 용단되는데 소요된 열량은 6,937.6[cal]로 소선을 평형으로 결선했을 때와 꼬아서 결선했을 때 용단되는데 필요한 열량을 계산한 결과, 소선을 꼬아서 결선할 수록 용단되는데 더 많은 에너지가 필요함을 알 수 있었다.

그림 5는 그림 4의 (a)와 (b)의 용융흔을 실체현미경과 금속현미경을 이용하여 외형과 결정구조를 비교한 것이다. (a)와 (b)는 소선을 평형으로 결선했을 때로 도체의 중간에 용융흔이 형성되어 있으며 변형된 수지상조직을 볼 수 있다. (c)와 (d)는 소선을 꼬아서 결선했을 때로 도체 끝부분에 용융흔이 형성되어 있으며 과전류에 의해 용단될 때 나타나는 수지상 조직이 변형되어 나타났다.

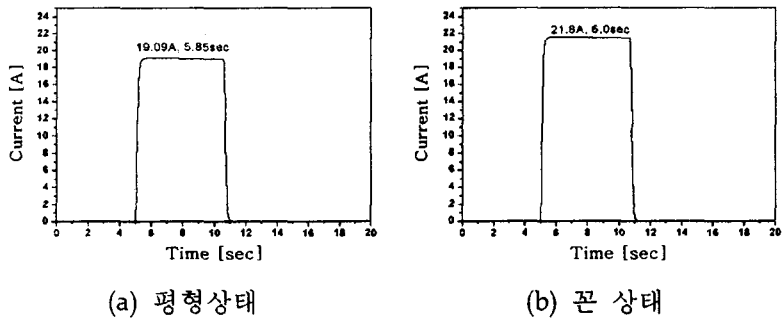


그림 4. 부하전류 변화에 따른 용단특성(2가닥)

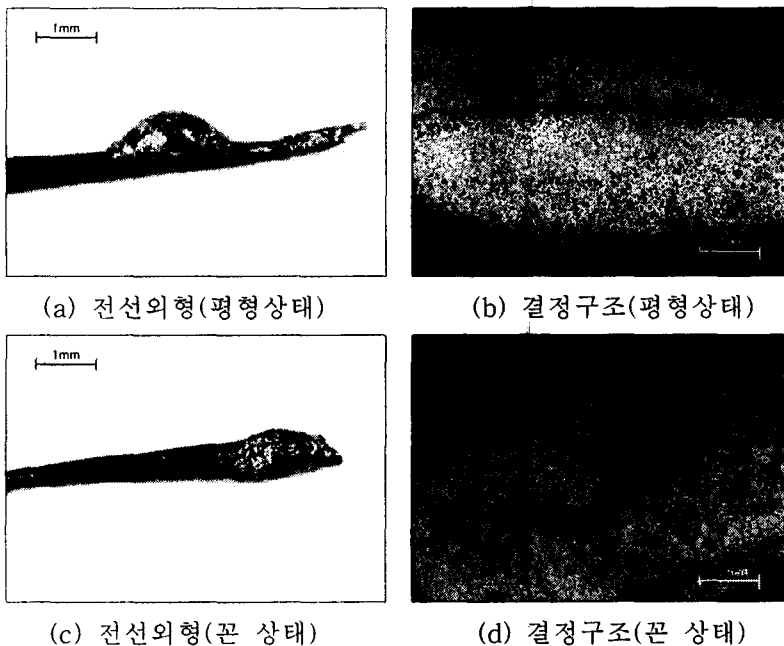
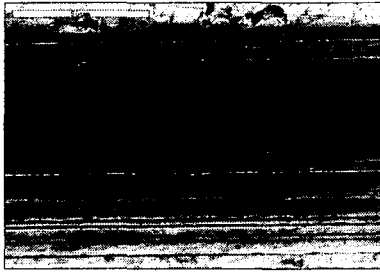


그림 5. 과부하에 의해 용융된 전선의 용융흔과 결정구조

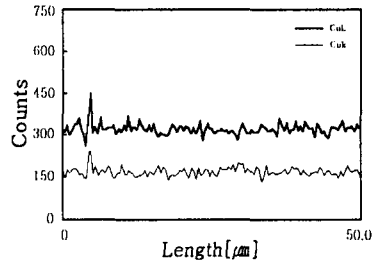
### 3-3. 과전류 용단전선의 표면구조 및 조성변화 분석

그림 6은 SEM과 EDX를 이용하여 정상전선과 과전류에 의해 용단된 소선의 표면구조와 조성변화를 분석한 것이다. (a)와 (b)는 정상전선의 표면구조와 조성분포로 전선

제조시 생성되는 연신구조가 나타나며, Cu가 고르게 분포하고 있음을 알 수 있었다. (c)와 (d)는 용단된 전선의 표면구조와 조성분포로 정상전선에서 나타나는 연신구조는 사라지고, 용융된 부분과 용융되지 않은 부분의 경계가 뚜렷이 나타나며, EDX 분석결과 용융시의 산화작용에 의해서 산소성분이 검출되었으며, Cu의 조성분포가 불규칙하게 나타났다.



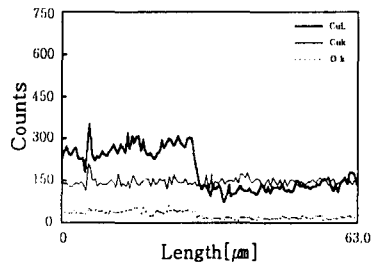
(a) 표면구조(정상전선)



(b) 조성분포(정상전선)



(c) 표면구조(용융전선)



(d) 조성분포(용융전선)

그림 6. 정상전선과 용융전선의 표면구조와 조성분포 비교

#### 4. 결 론

본 연구에서는 과전류에 의해 용단되는 소선의 특성을 규명하기 위하여 VCTF(2.0mm<sup>2</sup>×2C) 전선에 들어있는 소선 0.26mm를 사용하여 소선의 가닥수와 부하 변화에 따른 용단전류, 용단시간, 용단된 전선의 표면상태, 결정구조 및 조성변화 등을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

① 소선 0.26mm 1가닥 일 때 부하변화에 따른 용단특성을 실험한 결과, 전류가 증가할수록 시간이 급속히 짧아짐을 알 수 있었으며, 소요된 열량 또한 크게 감소하였다.

② 소선 0.26mm 2가닥 일 때 결선방법에 따른 용단특성을 실험한 결과, 소선을 꼬아서 결선했을 때 더 큰 전류와 열량이 필요함을 알 수 있었다.

③ 정상상태의 전선도체와 과전류에 의해 용단된 전선도체의 표면구조와 조성분포를 분석한 결과, 정상전선에서는 연신구조를 볼 수 있었으며 Cu가 고르게 분포하였다. 용융전선에서는 용융부분과 용융되지 않은 부분의 경계가 뚜렷하게 나타났으며 용융시

산화작용에 의해 Cu 이외에 O가 검출되었다.

이상과 같은 실험과 분석결과, 소선의 전류변화에 의한 용단특성은 전류가 클수록 용단되는 시간은 짧아졌으며 용단되는데 필요한 열량 또한 크게 감소함을 알 수 있었다. 여러 가닥의 소선을 평형으로 결선한 경우보다 소선을 꼬아서 결선할 때가 더 큰 전류와 시간이 필요함을 알 수 있었다. 또한, 과전류에 의해 용단된 소선 끝부분에는 용융흔이 형성되었으며 과전류에 의해서 용단될 때 나타나는 결정구조를 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과를 바탕으로 에너지의 크기 및 형태에 따라 소선이 어떻게 변화되었지를 판정할 수 있게 되었다.

## 감사의 글

본 연구는 산업자원부 전력산업기반기금에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 1) 三橋信雄, "絶縁破壊電線の劣化履歴と火災危険について", 日本火災學會誌, Vol.31, No.1, pp.11~19, 1981
- 2) 한국전기안전공사, "A Statistical Analysis on the Electrical Accident", 10th edition pp. 8~55 2001. 10
- 3) LIU Guicai et al. "Electrical Failure And Aviation Safety" Proceedings of Asia Pacific Symposium on Safety, Vol 1, pp. 279~282, 2001. 11
- 4) Norimichi Watanbe, "電源コードの半断線箇所における放電形態と發火危険性", 日本火災學會研究發表會 概要集, pp.202~203, 1994. 5
- 5) Nasayoshi Nagata, "Firing Current and Energy Input of Polyvinyl Chloride Covered Cords Having Disconnected Element Wires" Bulletin of Japanese Association of Fire Science and Engineering, Vol.33, No.1, PP.1~2, 1983