

직류 과전류 인가상태에서 저압용 나전선의 전기적 특성

김영석, 김동욱, 송길목, 최충석
한국전기안전공사 부설 전기안전연구원

Electrical Properties of Low Voltage Bare Wire Under Applied Directing Over-current

Y.S. Kim, D.O. Kim, K.M. Shong and C.S. Choi
Electrical Safety Research Institute, subsidiary of KESCO

1. 서 론

다양한 전기제품의 사용과 대량생산으로 전력의 소비가 증가함에 따라 전력공급 설비의 대형화가 불가피하다. 또한 이에 따른 전기사고도 계속적으로 발생되고 있는 추세이다 [1-3]. 전기사고에 관한 통계자료를 살펴보면[4], 전기화재 사고의 대부분은 단락에 의한 것으로 전체의 78%를 차지하고 있으며, 그 다음으로 과부하에 의한 사고가 점유하고 있어 화재예방대책 및 원인 조사가 절실히 요구된다. 이들 화재의 원인조사는 연소방향, 주변 환경 등 여러 가지 상황을 종합적으로 판단해서 수행되어지고 있으며, 그 중에서 배선 기구 등의 전기적 용융흔적은 화재 원인조사 판정에 있어 매우 중요한 방법 중에 하나이다[5-6].

과부하에 의한 전기사고는 일반적으로 사용하고 있는 기기 및 제품에 과부하 등에 의해 과전류가 흐르고, 줄열이 발생하여 전선이 용융되어 용단 전류에 이르게 되면 가장 취약한 부분에서 아크(arc)가 발생하여 용단되는 형태를 나타낸다. 이런 배선기구 및 전기기기 등은 대부분은 교류 및 직류 환경 내에서 사용되어지며, 과부하 및 과전류 환경에 노출되기 쉬우며, 전기 사고로 진진 될 가능성이 매우 높다[7-8]. 그러나 과전류 상태에서의 전기화재 메커니즘에 대한 분석은 아직 미흡하며, 전기화재 예방을 위해서는 체계적이고 객관적인 자료의 제시가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 과부하에 의해 전류가 전선에 흘렀을 경우의 화재발생을 모의하였으며, 교류 및 직류 환경에서 비교하였다. 또한 과전류에 의한 전선의 용단 현상을 고속카메라 이미지 시스템을 이용하여 촬영하였으며, 용단 된 시료들은 분석기기를 이용하여 외형과 단면 조직을 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

과전류 인가에 따른 전선의 실험을 위해 절연피복이 없는 구리 나전선(copper bare wire)으로 하였으며, 길이 150[mm], 직경변화를 1.2[mm], 1.6[mm], 2.0[mm]의 3종류로 하였다. 그림 1은 본 실험에 사용한 실험 개략도를 나타낸다. 동 전선을 접속부에 접속하고 교류/직류 겸용의 대전류 공급장치(IDX, Japan)을 이용하여 전류를 공급하였다. 전류는 1.0[A/sec], 2.5[A/sec], 5.0[A/sec], 7.5[A/sec], 10.0[A/sec], 20.0[A/sec], 150[A/sec]의 상승 속도로 전선이 용단될 때까지 공급하였다. 이때 용단될 때의 전선의 아크 특성은 초고속카메라(HSIS, HG-100K, Redlake, USA)이미지 시스템을 이용하여 관측하였으며, 용단시간 및 용단 전류값은 데이터취득시스템(DAQ system)에서 분석하였다. 또한 용단된 동 전선의 외형과 조직분석은 실체현미경과 금속현미경(Ephopot, Nikon, Japan)을 이용하여 분석하였다. 모든 실험은 온도 20[°C], 습도 50[%]의 분위기 내에서 수행하였다.

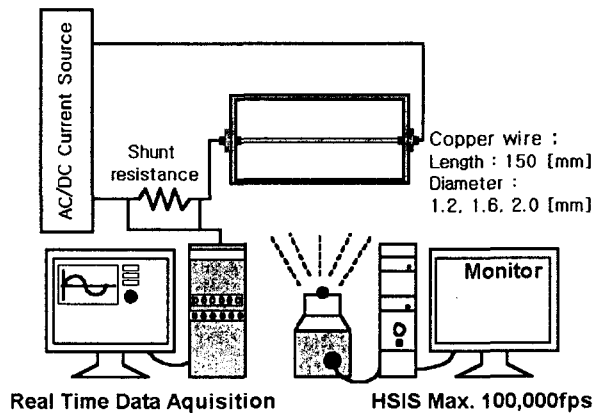
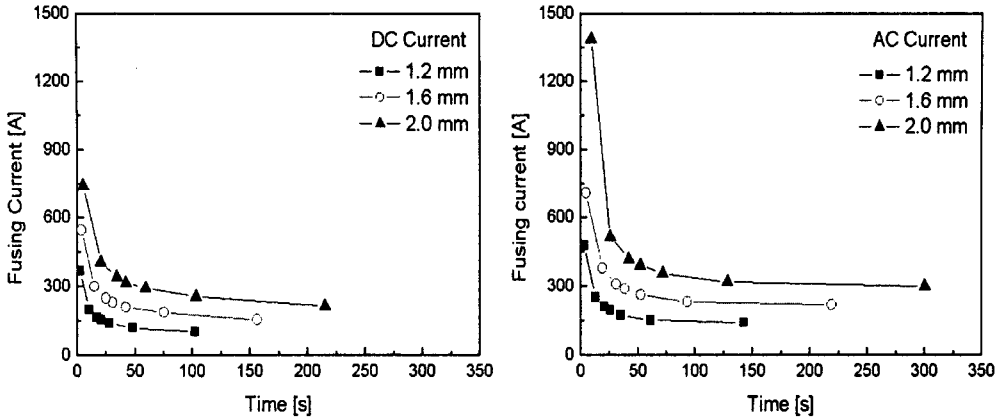


그림 1. 과전류 실험장치의 구성

3. 실험결과 및 검토

그림 2는 동전선의 과전류에 따른 용단전류 및 용단시간을 나타낸다. 실험은 각 시료마다 10회 이상 실시하였으며, 실험값의 평균값을 취하였다. 그림 2(a)는 직류 인가상태에서의 특성으로 전선의 굵기가 굵어질수록 용단 전류값은 높아지고 용단시간은 길어지는 알 수 있다. 또한 전류상승속도가 높은 경우, 용단 전류값이 높고 용단 시간이 짧아졌다. 구체적으로 살펴보면, 전류상승속도가 1[A/sec]인 경우, 1.2[mm]에서 용단 전류값과 시간은 각각 약 108[A], 108[sec]이며, 2.0[mm]의 경우에는 223[A]와 223[sec]였다. 그림 2(b)의 교류를 인가한 경우도 직류와 유사한 경향이 나타났으며, 교류를 인가하였을 경우가 전체적으로 용단전류 피크값이 높고 용단시간이 길게 나타났다.

전선 굵기 1.6[mm]에서 교류 및 직류를 각각 흘렸을 때의 용단시간과 용단전류를 그림 3에서 비교하였다. 그림에서 교류 및 직류 모두 초당 전류 상승속도가 빠른 경우, 용단 시간은 짧아지며, 초당 전류 상승속도가 느린 경우에는 용단 시간이 길어지는 것을 알 수



(a) 직류인 경우 (b) 교류인 경우
 그림 2. 과전류 인가에 따른 용단전류 및 용단시간 특성

있다. 또한 교류 피크값일 때가 용단전류가 크게 나타났으나, 실효값은 직류값과 거의 비슷한 값을 나타내었다. 교류인 경우, 초당 150[A]의 전류를 공급하였을 때 용단 전류 피크값은 약 708[A]였으며, 용단시간은 4.71[sec]였다. 직류의 경우는 초당 150[A]의 전류를 흘렸을 때 용단전류는 약 547[A]였으며, 용단시간은 3.6[sec]였다. 전류상승속도가 낮은 경우 교류일 경우, 직류의 것보다 용단시간이 길게 나타났으며, 이는 교류는 파형이 교번하기 때문에 일정한 전류가 흐르는 직류보다 시간이 길게 나타나는 것으로 판단된다.

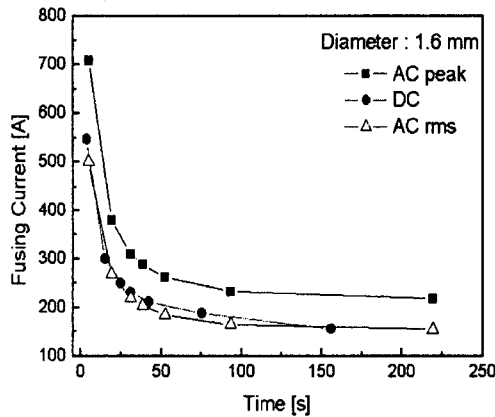
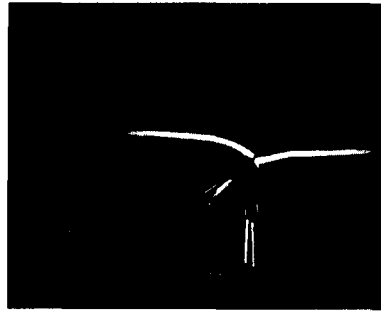


그림 3. 교류 및 직류의 용단전류 및 용단시간 특성

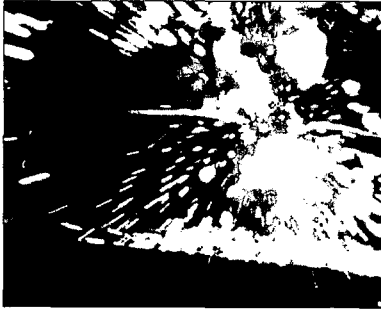
그림 4는 전선 1.6[mm]에서 직류의 상승속도에 따른 동 전선의 아크 용단특성을 초고속 카메라로 촬영한 것을 나타낸다. 그림 4(a)는 1.0[A/sec]의 경우로 비산되는 크기는 작은 것을 알 수 있다. 그림 4(b)의 5.0[A/sec]의 경우는 용단된 전선을 중심으로 방사형태로 용융망울이 비산되는 것을 알 수 있다. 그림 4(c)의



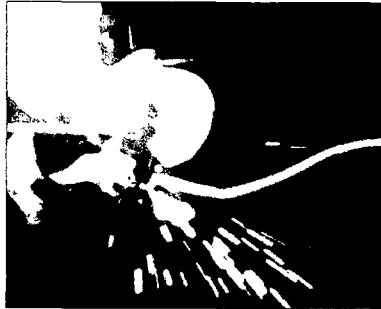
(a) 1.0 [A/sec]



(b) 5.0 [A/sec]

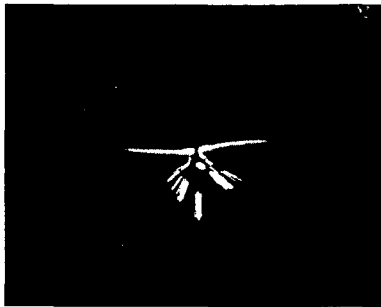


(c) 10.0 [A/sec]



(d) 150.0 [A/sec]

그림 4. 직류 상태에서 과전류에 의한 아크 용단 특성



(a) 1.0 [A/sec]



(b) 5.0 [A/sec]



(c) 10.0 [A/sec]



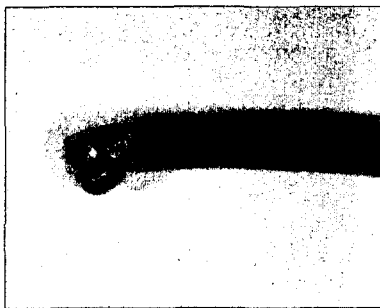
(d) 150.0 [A/sec]

그림 5. 교류 상태에서 과전류에 의한 아크 용단 특성

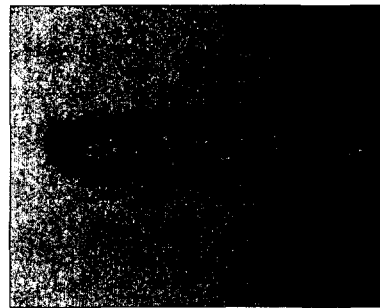
10.0[A/sec]의 경우에는 마치 큰 에너지에 의한 폭발현상으로 화염이 확산되고 용융망울이 주변으로 비산되었으며, 그림 4(d)의 150.0[A/sec]도 마찬가지로 화염이 더욱 크게 발생하였으며, 용융망울이 주변으로 비산되었다. 따라서 전류상승속도가 증가할수록 화염과 용융망울의 비산이 더욱 커지는 것을 알 수 있다.

그림 5는 전선 1.6[mm]에서 교류 상승속도에 따른 동 전선의 아크 용단특성을 초고속 카메라로 촬영한 것을 나타낸다. 그림 5(a)는 1.0[A/sec]의 전류 상승속도로 증가시킨 경우로, 아크에 의해 비산되는 용융망울이 용단된 전선을 중심으로 방사 형태로 넓게 퍼져 나가는 것을 확인 할 수 있으며, 그림 5(b)는 5.0[A/sec]의 경우는 용단 시 약간의 화염이 관측되었으며, 전선을 중심으로 용융망울이 비산되는 것을 알 수 있다. 그림 5(c)의 10.0[A/sec]의 경우에는 화염이 확산되고 용융망울이 비산되었으며, 그림 5(d)의 150.0[A/sec]에서는 화염이 더욱 커지고 확산되었으며, 용융망울이 주변으로 비산되었다. 직류와 교류 일 때의 초고속 카메라에 의한 화염확산을 비교해보면, 공통적으로 전류상승속도가 증가할수록 화염의 크기가 더욱 확산되고 용융망울의 비산이 더 커지는 것을 알 수 있다. 전류상승속도를 빠르게 하면, 전선의 에너지는 순간적으로 증가하기 때문에 큰 화염을 나타내고 용융망울이 비산되는 것으로 판단된다. 또한 직류일 경우가 화염의 크기가 조금 큰 것을 알 수 있으며, 교번하는 교류보다 한 방향으로 지속적인 에너지의 공급에 의한 것으로 사료된다. 또한 전선이 굵을수록, 전류상승속도가 빠를수록 과전류에 의한 화재위험성이 매우 높은 것을 알 수 있다.

그림 6은 직류 및 교류에서 과전류에 의한 동 전선의 외형사진을 나타낸다. 그림 6(a)는 1.0[A/sec]의 경우로 표면은 검게 산화되었으며, 용단부분에는 큰 망울이 있는 것을 알 수 있다. 하지만, 그림 6(b)의 150.0[A/sec]의 경우에는 표면은 검붉게 산화되었으며, 표면은 매끄럽지 못하고 주름진 표면이 관측되었다.



(a) 1.0 [A/sec]

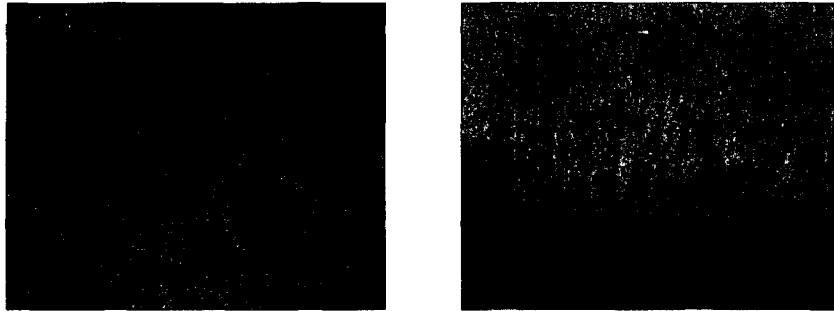


(b) 150.0 [A/sec]

그림 6. 직류상태에서 과전류에 의한 동전선의 단면 조직

그림 7은 과전류에 의해 용단된 금속의 단면 조직을 나타낸다. 그림 7(a)과 (b) 모두 과전류 시 나타나는 수지상(dendrite) 결정조직이 성장하고 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 전류상승 속도가 낮은 그림 7(a)의 경우, 수지상 조직은 전선 단면 전체에 퍼져있으며, 단시간에 용단된 그림 7(b)의 경우에는 수지상 조직이 전선 표면에 집중되어 있는 것을

알 수 있다. 따라서 과전류에 의해 표면에서부터 열이 발산되어 점차 내부로 조직이 성장하는 것을 알 수 있다.



(a) 1.0 [A/sec] (b) 150 [A/sec]
그림 7. 직류상태에서 과전류에 의한 동전선의 단면 조직

4. 결 론

본 연구에서는 절연피복이 없는 동 전선에 직류 및 교류 과전류를 흘렸을 때의 전기적 특성, 아크 특성 및 금속 단면 조직을 분석하였다. 직류 및 교류 모두 전류 상승이 빠른 경우, 용단 시간은 짧아지며, 전류 상승이 느린 경우에는 용단 시간이 길었다. 또한, 교류가 직류보다 용단시간이 길게 나타났다. 이는 교번하는 파형에 의한 차이에 의한 것으로 판단된다. 아크에 의한 비산 특성은 직류 및 교류의 경우, 용융망울이 용단된 전선을 중심으로 양쪽방향으로 넓게 퍼져 나가는 것을 확인 할 수 있으며, 전류상승속도가 빠를수록 용단 시, 화염의 크기가 크고 용융망울이 멀리 비산되었다. 직류일 경우가 화염의 크기가 조금 큰 것을 알 수 있으며, 교번하는 교류보다 한 방향으로 지속적인 에너지의 공급에 의한 것으로 사료된다. 전선이 굵을수록, 전류상승속도가 빠를수록 과전류에 의한 화재위험성이 매우 높은 것을 알 수 있다. 용융된 전선의 외형은 전류상승속도가 빠를수록 표면은 검붉게 산화되고 표면은 매끄럽지 못하고 울퉁불퉁한 표면이 관측되었다. 금속 단면 조직에서는 과전류 시 나타나는 수지상 결정조직이 성장하였으며, 전류상승 속도가 낮은 경우, 수지상 조직은 전선 단면 전체에 퍼져 있으나, 비교적 짧은 시간에 용단된 전선의 경우에는 수지상 조직이 전선 표면에 집중되는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 전력산업기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. EUGENE LOH, "Physical Analysis of Data on Fused-Open Bond Wires", IEEE Trans. on CH & MT, VOL. CHMT-6, NO.2, pp.209~217(1983)

2. 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)
3. John D. DeHaan, "Kirk's Fire Investigation", 5th edition, Prentice Hall, pp. 305(2002)
4. Korea Electrical safety Corporation, "A Statistical Analysis on the Electrical Accident", 13th edition, pp. 7-24, 2004.
5. Sheera Knecht, "Fusing Current of Short Aluminum Bond Wire", *IEEE ISC on TP*, pp.329~332(1996)
6. Atila Metrol Member, "Estimation of Aluminum and Gold Bond Wire Fusing Current and Fusing Time", *IEEE Trans. on CP & MT*, VOL.18, No.1, pp.210~214(1995)
7. Chung-Seog Choi et al, "The Analysis of Dendrite Structure of Electric Wire Melted by Fusing Current", 2003 Japan-Korea Joint Symposium on ED & HVE, pp.145-148. 2003
8. 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 2003 spring conference*, pp.131~133(2003)