전선 단락시 접촉각도에 따른 화염 및 용흔 특성 분석

김동욱 · 송길목 · 김동우 · 김영석 · 최충석
전기안전연구원(한국전기안전공사 부설)

1. 서 론

산업기술의 발달에 따라 전기 및 전자제품들은 다양화 및 고급화 되어가는 추세이며, 이에 따라 전기에너지는 산업현장, 주택 등 현대문명에 있어서 사용빈도가 점점 늘어가고 있다. 전기관련 사고 발생빈도 역시 높은 비율을 차지하고 있다. 선진국에서는 안전전문기관에 대한 관심과 투자가 꾸준히 이루어지고 있는 반면, 국내에서는 안전관련 연구가 일부 진행 중에 있지만 선진국에 비해 미약한 실정이다. 2002년도 전기재해 통계자료에 의하면, 총 화재 32,966건 중 전기화재는 11,202건으로 34%의 점유율을 차지하였으며, 전기화재의 피해규모도 대형화되어가는 추세이다. 전기화재를 원인별로 구분하면, 단락에 의한 화재가 전체 전기화재의 78%(8,743건)로 가장 큰 비율을 차지하고 있으며, 다음으로 과부하에 의한 화재가 7.8%(869건)를 점유하였다[1)~4)]. 전선의 선간단락 발생원인으로는 전선피복이 자외선, 열, 습윤 등에 의한 장시간 노출로 인한 절연열화의 경우와 시공 및 사용상 부주의에 의한 피복손상, 쥐 등 설치류에 의한 피복의 손상 등이 있다[5)~6)].

본 연구에서는 단락 및 과부하 실험장치(ES&OL-20, KESCO, KOREA)를 이용하여 전선의 선간단락각도 변화에 따른 화염과 입자의 진전특성을 분석하였다. 또한, 단락후 발생한 용융흔에 대하여 외형분석과 금속조직 분석을 하였다.

2. 실험방법

그림 1은 전선의 선간 접촉각도의 변화에 따른 단락실험을 위한 회로이다. 실험에 사용된 단락 및 과부하 실험장치는 1φ 220V 60Hz의 전원을 사용하였으며, 전선 a-a′를 고정시킨 상태에서 전선 b-b′를 이동시킴으로써 접촉각도 θ를 변화시켰다. 실험에 사용된 전선으로는 직경 0.32[mm], 길이 100[mm]의 나전선이 사용되었다. 실험시 부하측 조건은 스위치 S_2를 개방하여 무부하로 하였으며, 단락과정은 고속카메라(High Speed Imaging System, HG-100K, Redlake, USA)를 이용하여 초당 10,000프레임으로 화염의 비산패턴을 촬영하였다. 선간 단락 실험 후 발생한 전선의 외형을 실체현미경(SV-11, Carlzeiss, Germany)으로 분석하였으며, 금속현미경(Epiphot, Nikon, Japan)을 이용하여 용단된 전선의 단면조직을 분석하였다.

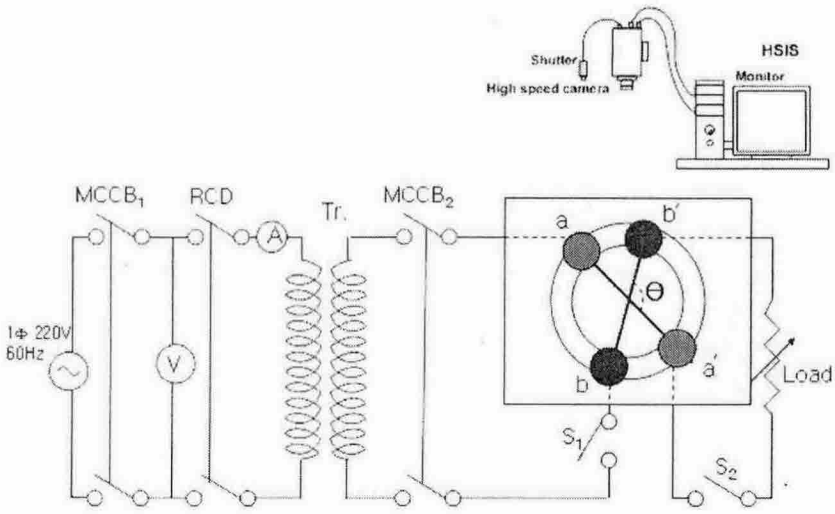


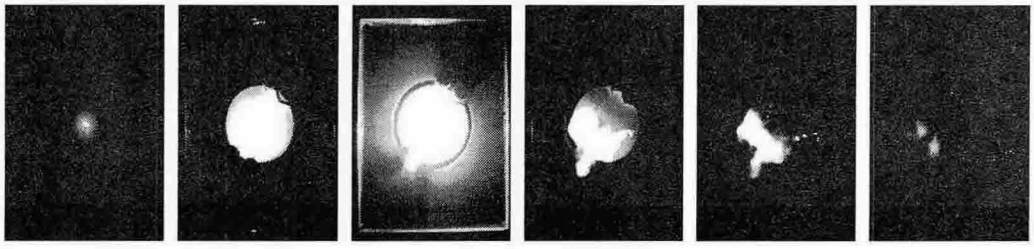
그림 1. 전선의 단락 실험회로

3. 실험결과 및 고찰

3. 1 접촉각도에 따른 입자의 비산

단락은 일반적으로 회로상에서 절연불량으로 발생하며, 단락시에는 급격한 에너지의 방출에 의해 섬광과 함께 폭발이 일어난다. 이때 화염의 비산방향은 플레밍의 왼손법칙에 따라 전류와 자계에 동시에 수직한 방향으로 작용한다[7].

그림 2~4는 선간 접촉각도변화에 따른 단락과정을 고속카메라로 촬영한 사진이다.

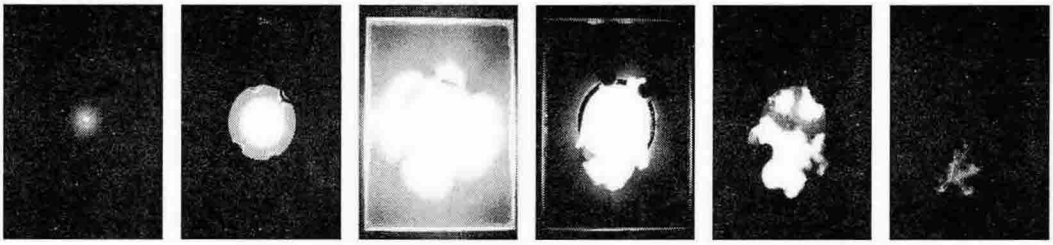


(a) 0[ms] (b) 0.6[ms] (c) 2.4[ms] (d) 3.9[ms] (e) 5.4[ms] (f) 11.4[ms]

그림 2. 접촉각도가 30°일 경우 단락 과정

그림 2는 선간 접촉각도가 30°인 경우로서, 그림2(a)는 선간단락이 시작되었을 때의 사진을 나타내고 있다. 그림 2(b)는 선간단락 후 0.6[ms]가 지났을 때의 사진이며, 아크 발생이 어느 정도 진전되어가고 있음을 나타내고 있다. 그림 2(c)는 단락이 시작된 후 가장 큰 밝기를 나타내는 시점으로, 그림 2(a)로부터 2.4[ms]가 지났을 때의 사진이다. 그림 2 (d)는 전단계에서 섬광과 폭발이 일어난 후 발생한 화염이 부하측으로 진전되

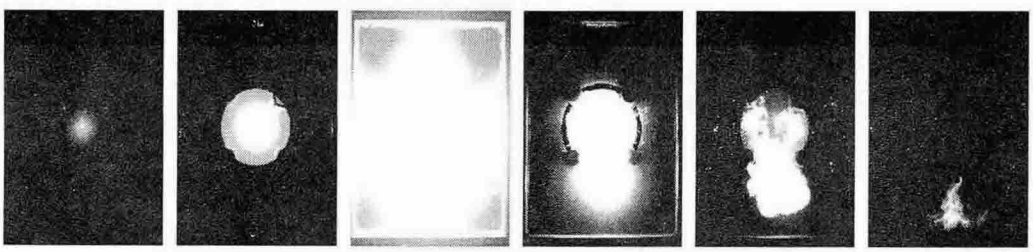
는 것을 보여주고 있다. 그림 2(e)와 2(f)는 화염이 점차 소멸되어가고 있음을 나타내고 있다. 단락이 그림 2(a)에서 시작된 후, 화염과 입자가 완전히 사라지기까지 20.5[ms]가 소요되었다.



(a) 0[ms] (b) 0.3[ms] (c) 3.3[ms] (d) 4.7[ms] (e) 7.8[ms] (f) 17.9[ms]

그림 3. 접촉각도가 60°일 경우 단락 과정

그림 3은 선간 접촉각도가 60°인 경우 전선의 단락과정을 나타내고 있다. 그림 2(a)와 마찬가지로 그림 3(a)는 선간단락이 시작되었을 때의 사진을 나타내고 있다. 그림 3(b)는 선간단락 후 0.3[ms]가 지났을 때의 사진이며, 아크발생의 초기단계를 나타내고 있다. 그림 3(c)는 단락이 시작된 후 가장 큰 밝기를 나타내는 시점으로, 그림 3(a)로부터 3.3[ms]가 지났을 때의 사진이다. 그림 3(d)는 전단계에서 섬광과 폭발이 일어난 후 발생한 화염이 부하측으로 진전되는 것을 보여주고 있다. 앞의 그림2와 비교하였을 때 화염이 방사되는 면적이 더 커짐을 알 수 있다. 그림 3(e)를 거쳐서 그림 3(f)는 화염이 점차 소멸되어가고 있음을 나타내고 있다. 화염과 입자가 완전히 소멸되기까지 시간은 단락시작시점에서 29.4[ms]가 소요되었다.



(a) 0[ms] (b) 0.3[ms] (c) 3.6[ms] (d) 6.1[ms] (e) 10.1[ms] (f) 23.7[ms]

그림 4. 접촉각도가 90°일 경우 단락 과정

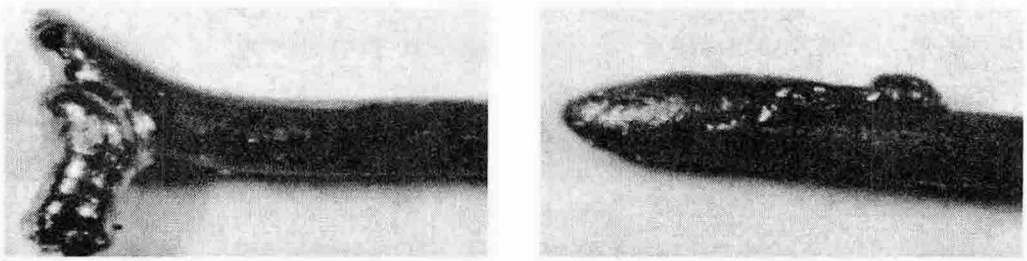
그림 4는 선간 접촉각도가 90°인 경우 전선의 단락과정을 나타내고 있다. 그림 4(a)는 선간단락의 시작점을 나타내고 있다. 그림 4(b)는 선간단락 후 0.3[ms]가 지났을 때의 사진이며, 아크발생의 초기단계를 나타내고 있다. 그림 4(c)는 단락이 시작된 후 가장 큰 밝기를 나타내는 시점으로, 그림 4(a)로부터 3.6[ms]가 지났을 때의 사진이다. 그림 4(d)는 전단계에서 섬광과 폭발이 일어난 후 발생한 화염이 부하측으로 진전되는 것을 보여주고 있다. 상기 그림 2,3과 비교하였을 때 화염이 방사되는 면적이 더 커짐

을 알 수 있다. 그림 4(e)를 거쳐서 그림 3(f)는 화염이 점차 약해지고 있음을 나타내고 있다. 화염과 입자가 완전히 소멸되기까지 시간은 단락시작시점에서 30.6[ms]가 소요되었다. 이는 앞의 경우와 비교해 보았을 때, 전선의 접촉각도가 커질수록 단락현상이 천천히 오래 지속됨을 알 수 있다.

그림 2~4에서 각각의 단락과정 중 최대 섬광이 발생한 시점을 비교해 보면 그림 2(c)는 2.4[ms], 그림 3(c)는 3.3[ms], 그림 4(c)는 3.6[ms]를 나타내고 있다. 이는 전선의 접촉각도가 커질수록 단락현상이 천천히 지속되므로 최대 섬광 발생시점도 늦어짐을 의미한다.

3.2 외형 및 금속조직분석

전선의 선간 접촉각도의 변화에 따른 단락실험 후 수거한 전선에 대해 외형을 실체현미경으로 확대 분석한 결과, 전선의 용융흔 형태는 단락각도의 변화에 따라 큰 차이가 없었으나, 일반적으로 전원측의 용융전선의 색이 부하측 전선에 비해 밝은 빛깔을 나타내었다. 반면, 부하측 전선은 암갈색을 띄는 경우가 많았다.



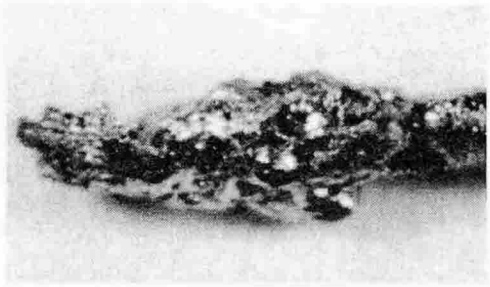
(a) 전원측 전선 (b) 부하측 전선

그림 5. 접촉각도가 60°인 경우의 전원측과 부하측 전선

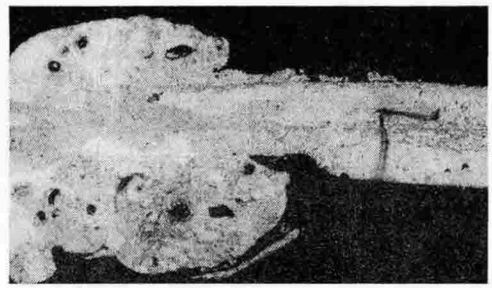
그림 5는 접촉각도가 60°인 경우의 전원측 전선과 부하측 전선을 나타낸 것으로 좌측이 우측에 비해 밝은 빛깔을 나타내고 있다.

용융전선의 금속단면조직 분석결과, 일부 전선에서 단락의 특징을 나타내는 주상조직이 나타났다.

그림 6(b)는 금속현미경에 의한 용융전선의 단면금속조직을 나타낸 것으로써, 상하 경계면을 중심으로 주상조직이 있는 것을 확인할 수 있다.



(a) 전원측 전선



(b) 금속단면조직

그림 6. 접촉각도가 30°인 경우의 전원측 전선과 금속단면조직

4. 결 론

이상과 같이 전선의 단락시 선간 접촉각도 변화에 따른 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 고속카메라에 의한 단락과정 촬영결과, 아크가 발생하기 시작하여 아주 밝은 섬광으로 진전된 후 폭발하여 화염과 입자가 이동하며 소멸되는 것을 확인할 수 있었다.

2) 단락발생 중에 아크 및 화염은 플레밍의 왼손법칙에 따라서 전원측에서 부하측으로 이동하였다.

3) 전선의 단락시 선간 접촉 각도가 커질수록, 아크의 최대밝기 및 방사면적이 커졌다.

4) 단락의 생성에서 소멸까지의 시간을 비교해 보면, 접촉각이 30°일 때 20.5[ms], 60° 일 때 29.4[ms], 90° 일 때 30.6[ms]로써, 선간 접촉각도가 커질수록 아크발생 및 화염의 진전속도가 느려졌다. 이는 단락각도의 증가에 따라 단락현상이 천천히 오래 지속되는 것을 의미한다.

5) 단락 후 용융된 전선을 분석한 결과, 전원측은 부하측 전선에 비해 밝은 빛깔을 나타내었고 일부 전선에서 주상조직이 관찰되었다.

전선에 선간 단락이 발생할 경우 접촉각도에 따른 화염의 방사특성과 지속시간을 분석하였으며, 본 실험의 연구결과와 더불어 다양한 조건의 단락실험에 의한 자료구축을 통해 전기화재 중 가장 큰 비율을 차지하는 단락화재에 대한 원인분석 및 예방에 기여할 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 전력산업기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1) 최충석 외 5, "전기화재공학", 동화기술, 2004.
2) 한국전기안전공사, "전기재해 통계분석", pp7~12, 2003.
3) Chung-Seog Choi, et al, "The Analysis of Dendrite Structure of Electric Wire Melted by Fusing Current", 2003 J-K Symp. on ED and HVE, pp145~148, 2003.
4) Chung-Seog Choi, et. al, "The Scattering Patterns Analysis of Particles by Varying Short-Circuit Angles between Electric Wires", Fire Science & Technology 2004, pp717~722, 2004.
5) J.H. Dymond, Nick Stranges and Karim Younsi and John E. Hayward, "Stator Winding Failures: Contamination, Surface Discharge, Tracking", IEEE Tran. Industry Applications, VOL. 38, NO. 2, March/April 2002, pp.577-583.
6) H. Nakano, "Consideration of Fire Cause from Electrical Wiring", Japan Association for Fire Sci. & Eng., Vol.46, No.2, pp1-5, 1996.
7) William H. HAYT, "Engineering Electromagnetics", 5th edition, McGraw-Hill, pp. 265-271, 1989.