

접촉 불량된 전선접속부의 아크 및 온도 특성



최 충 석

(한국전기안전공사 전기안전연구원)

1. 서론

전선접속부에서 접속불량이 발생하여 전기화재를 유발시키는 요인은 설계 및 구조 불량, 사용자의 부주의, 공사 불량, 경년 열화 등이 있다.

2003년 통계자료에 의하면 접속 불량에 의한 전기화재는 전체의 5.3[%]인 393건이 발생하였으며, 전기사고의 원인분석 및 예방 연구가 필요함을 보여주고 있다. 접속부의 접속 방식은 스프링 접속, 압착 접속, 스크루 접속 등으로 나눌 수 있다. 전선의 분기와 접속의 목적으로 스크루 접속을 많이 이용하고 있으며, 스크루 접속의 대표적인 접속 기구로는 단자대(Terminal Block)를

들 수 있다. 하나의 전원 전선에 여러 개의 부하 전선이 연결되는 경우가 대부분이며 적절한 설치와 관리가 요구된다.

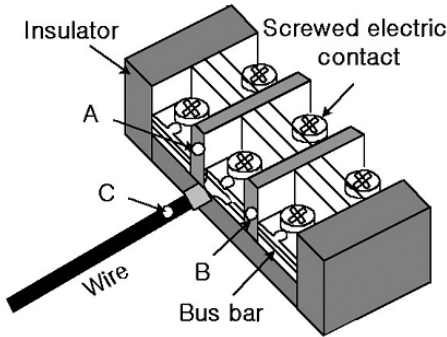
단자대를 포함한 접속부에서 접촉 불량에 의한 전기사고는 한국산업규격(KS)에 맞지 않는 조임 접속과 진동이나 이완, 부식, 전식 등 다양한 열화 원인에 의해 사고의 발생 가능성이 높아지며, 교통, 발파, 지진, 바람, 기계 내부의 진동 등에 의해 가속된다. 진동에 의해 접촉 불량이 발생하면 아크가 발생하고 주변 절연물의 온도가 상승하여 산화물의 증식 등에 의해 전기사고로 이어진다. 즉 전기사고가 필연적으로 발생함에 따라 연결 부분을 최소화하는 방법이 필요하며 적절한 조임 토크를 유지하는 것이 매우 중요하다.

본 연구는 전선 접속부의 조임 방법 중의 하나인 스크루 접속 방식에서 발생하는 아크 및 온도 특성의 패턴을 초고속카메라(HSIS), 주사전자현미경(SEM), 에너지분석기(EDX) 등으로 분석하여 사고 발생 메커니즘을 제시하고 사고 예방자료로 활용하고자 한다.

2. 실험 방법

실험에 사용된 스크루 단자대의 구성과 각 온도의 측정 부위를 <그림 1>에 나타냈다. 단자대는 스크루 단자, 부스바(Bus Bar), 절연물

(Insulator)로 구성되어 있으며, 옥내용 전선으로 주로 사용되는 비닐절연 전선(IV, 2.0[mm])을 부스바와 스크루 단자 사이에 접속하여 사용하였다.



〈그림 1〉 단자대의 구성 및 온도 측정 부위

단자대의 스크루 조임 토크는 한국산업규격(KS C 2625)의 나사 지름에 맞는 기준이 적용되었으며, 스크루의 단자 지름은 4.0[mm]로서 적정 토크 1.2[N·m] 이상으로 조임해야 한다. 접촉 불량된 재현은 산업 현장에서 발생할 수 있는 최악의 조건과 유사하도록 토크드라이버(FDS2-S, Tohnichi, Japan)로 조이지 않은 상태인 0 [N·m]으로 설정하였으며, 단자 나사의 호칭 지름과 토그는 〈표 1〉과 같이 나타내고 있다.

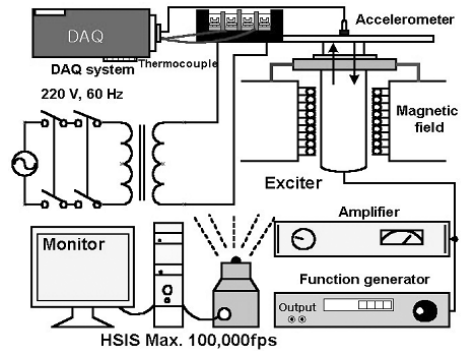
〈표 1〉 단자 나사의 조임 토크

단자나사의 호칭지름 [mm]	2.5	3	3.5	4	5	6
토크 [N·m]	0.4	0.5	0.8	1.2	2.0	2.5

〈그림 2〉는 접촉 불량에 의한 스크루 단자와 전선 사이의 아크 및 열화 특성 실험을 위해 구성된 가속 열화 장치의 개략도를 나타낸 것이다. 그림에서 접촉 불량 유도를 위한 장치로는 영구자석

에 의해 가속도를 만들어 낼 수 있는 소형 가진기를 이용하였으며, 최대 변위는 ±3 [mm]이며, 주파수는 18[kHz]이다. 단자대는 상하, 좌우 이동이 가능한 레일(rail)에 고정하고 전선은 가진기에 연결하였다. 진동의 인가는 신호발생기를 이용하여 정현파를 인가하였으며, 주파수는 50~500[Hz]까지 가변시켰다. 진동의 진폭은 증폭기를 통해 조절하였으며, 진동 주파수는 가속도계(Sensitivity, 50[mV/G])를 온도 측정은 K-Type 열전대를 각각 사용하였다.

전원은 최대 출력 600[V]의 전압조정기를 이용하여 220[V]를 인가하였으며, 부하는 전동 부하(240[W])로서 저항만을 이용하였다. 진동에 따른 접촉 불량 발생 시의 아크 및 열화 과정은 초고속 카메라 시스템(HSIS, HG-100K, Redlake, USA)을 이용하여 관측하였으며, 외형 관찰은 디지털 카메라를 이용하여 촬영하였다. 주변 분위기는 온도 11.5[°C], 습도 38[%]에서 실험하였다.



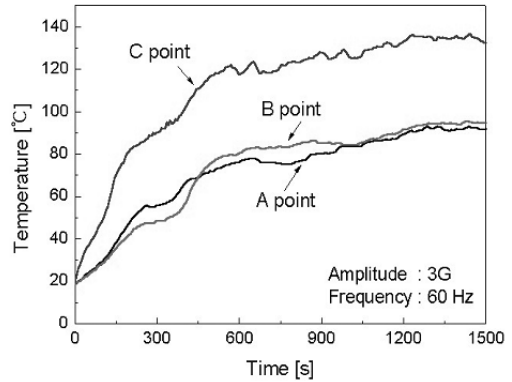
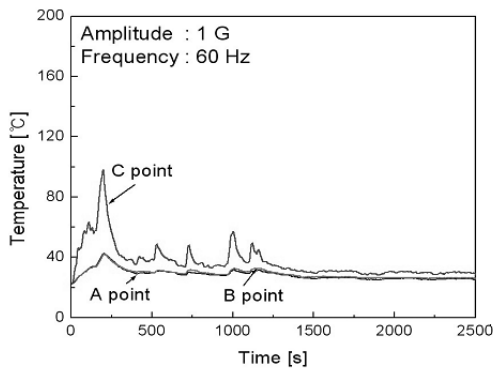
〈그림 2〉 접촉 불량 모의를 위한 개략도

3. 결과 및 고찰

정현파 신호로 1[G], 3[G] 크기의 진동을 일정하게 유지하고 주파수 변화에 따라 가속 열화를 발생시켜 접촉 불량을 유도하였다. 주파수

60[Hz]를 인가했을 때 단자대와 전선 사이의 접촉 불량이 일정하게 유지되도록 제어하였으며 그때 발생하는 온도 특성을 실시간으로 측정하여 <그림 3>에 나타냈다.

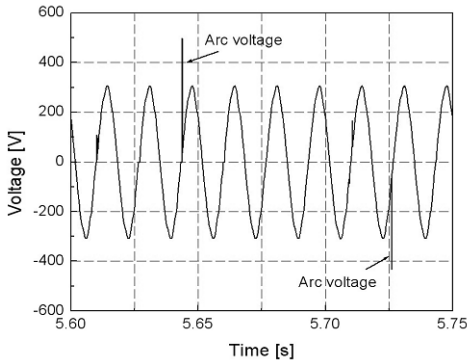
그림 (a)는 1[G]의 진동주파수에서 2,500[sec] 경과할 때 각 점에서의 온도 특성을 나타낸 것이다. A점(Insulator)과 B점(Bus Bar)은 시간의 경과에 따라 비교적 일정한 온도 특성을 보이고 있다. 그러나 C점(Wire)은 약 250[sec] 경과할 때 최고 100[°C]까지 온도가 상승하여 전선의 피복이 변형되고 변색되는 특성을 보였으나, 일정 시간이 경과한 후 부터는 축열과 방사의 균형이 형성되고 안정한 상태를 보이는 것으로 나타났다. 즉 전선과 단자 사이의 변색 또는 탈색이 관측되면 접촉 불량에 발생했음을 인지하고 적절한 조치를 취하는 것이 요구된다. 그림 (b)는 3[G]의 진동주파수에서 1,500[sec] 경과할 때 각점에서의 온도 특성을 나타낸 것이다. 접촉 불량이 발생하면 시간이 경과함에 따라 온도가 상승하는 것을 알 수 있었으며, 단자대의 페놀 수지보다 스크루 나사와 접촉하고 있는 플라스틱 수지의 온도 상승이 현저한 것으로 나타났다. 접촉 불량이 발생하여 약 180[sec]가 경과하면 온도는 80[°C]까지 상승되며, 130[°C]까지 온도가 상승하고 난 후 포화되면서 축열과 방사의 균형을 유지하였다.



(b) 진동주파수 3[G] 인가할 때
<그림 3> 시간에 따른 온도 변화(60[Hz])

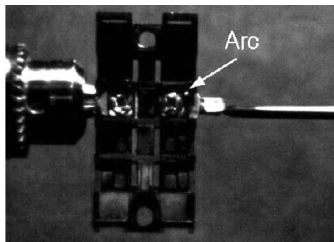
페놀 수지는 직접적인 아크열 보다는 간접적인 아크열에 의해 온도가 상승하였으며, 80[°C] 부근까지 상승한 후, 포화되는 경향을 나타냈다. 전선 피복은 폴리염화비닐(Poly Vinyl Chloride ; PVC)로서 허용 온도의 범위가 70~80[°C]이며 아크 열에 쉽게 용융되는 것을 알 수 있다. 단자대의 절연물은 페놀 수지(Phenolic Resin)로서 허용온도가 120[°C]이며 허용온도 범위 내에 있다. 진동주파수 60[Hz]를 인가할 경우는 전선이 스크루 단자와 부스바 사이에 접촉하고 있는 시간이 짧기 때문에 아크 방전이 더 많이 일어나고 열화가 빨리 진행되는 것으로 판단되며, 시간이 경과함에 따라 계속 열화가 발생하기 때문에 접촉 불량에 의한 아크 발생으로 전기사고의 발생 가능성이 높은 것을 알 수 있다.

<그림 4>는 전선 접속부에서 진동주파수 60[Hz]를 인가했을 때의 아크에 따른 전압 파형을 나타낸다. 아크 발생에 따른 불규칙적인 이상파크가 관측되었다. 이와 같은 이상에너지에 의해 폴리염화비닐 수지와 페놀 수지의 가속 열화가 활발하게 진행되는 것을 알 수 있다.

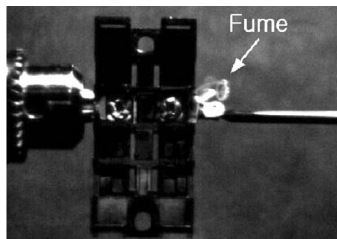


〈그림 4〉 진동주파수가 인가될 때의 파형

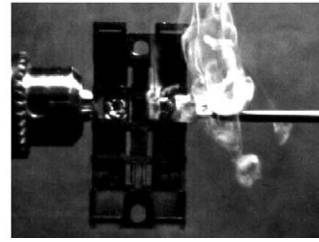
〈그림 5〉는 진동주파수 60[Hz] 경우에 단자대에서 스크루 단자와 전선 사이의 접촉 불량에 의한 아크 발생과 화재 진전 과정을 나타낸다. 그림 (a)와 같이 진동에 의해 접촉 불량이 발생하면 아크가 발생하고 접촉저항이 증가하며, 페놀 수지와 PVC 수지로 열이 전달되어 열화된다. 그림 (b)와 (c) 같이 줄열에 의해 폴리염화비닐 수지와 페놀 수지의 온도가 상승하면 용융과 함께 연기가 발생하고 단자대 주위로 확산된다.



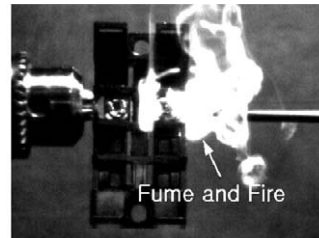
(a) 아크 상태



(b) 연기발생 초기



(c) 연기 및 불꽃 발생



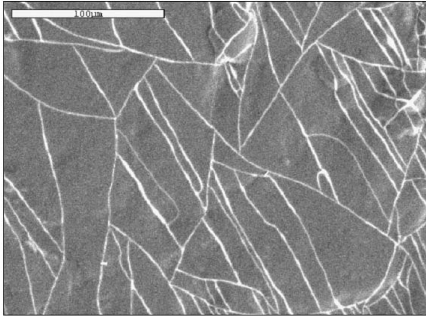
(d) 화재 진전

〈그림 5〉 접속부에서 발생하는 아크 및 화재 진전 현상

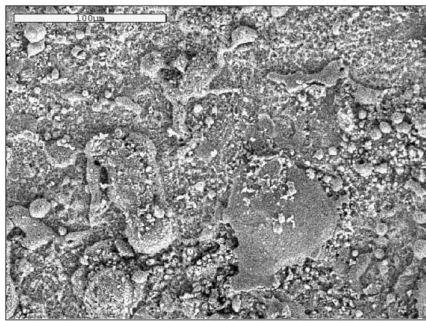
그림 (d)와 같이 아크 방전에 의해 용융된 페놀 수지에 착화되어 화재로 진전하게 된다. 즉 차량, 발파, 바람, 기계 내부의 진동 등의 일정한 진폭과 주파수를 가지는 진동이 전선 접속부에 영향을 미치게 되면 아크 방전에 의해 주변 절연물의 온도가 상승하게 되고 열화된다. 이때 열화된 절연물에 아크 방전과 같은 착화에너지가 존재하게 되면 전기화재로 진전될 가능성이 높은 것으로 판단된다.

〈그림 6〉은 스크루 단자 표면의 SEM 사진을 나타낸 것이다. 정상 시료의 경우, 표면에 미세한 균열 이외의 특이 사항은 없는 것으로 보인다. (b)는 SEM 사진을 나타낸 것으로 정상 시료의 고유한 입자가 없어지고 새로운 입자가 다수 관측된다. 입자의 크기가 불규칙적이며 배열도 규칙성을 상실하면 다양한 형태를 유지하고 있다. 즉 불규칙적인 클러스터가 성장되었고 표면의 오염도 심하게 생성된 것으로 보아 순간적

인 고에너지에 의해 산화가 촉진된 것을 알 수 있다.



(a) 정상 시료



(b) 열화된 시료

〈그림 6〉 스크루 단자의 SEM 사진

즉 전기적인 아크(Ark)가 발생하면 수천 °C의 열과 공기 중의 산소가 재결합하면서 산화가 촉진되는 것으로 판단된다. 이처럼 표면 구조가 변형되고 결합이 파괴되면 절연재로서의 기능은 발휘할 수 없을 뿐만 아니라 출화의 가능성도 상대적으로 높아진다.

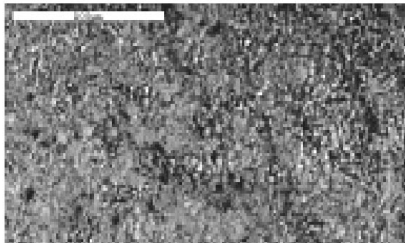
〈표 2〉는 〈그림 6〉과 같은 조건에서의 스크루 단자의 성분 변화를 나타낸다. 정상 시료의 스크루 단자는 철(Fe)에 아연(Zn)이 도금된 것으로 아연(Zn)이 66.56[%]로서 대부분을 차지하였으며, 다음으로 30.9[%]의 산소(O), 2.51[%]의 철 성분으로 구성되어 있다. 접촉 불량에 의해 표면이 열

화된 스크루 단자의 성분 분포를 보면, 산소는 약 24.6[%]로 정상일 때와 유사한 분포를 보였지만, 아연은 3.33[%]로 줄어들고 철은 59.8[%]로 크게 증가하였다. 이는 접촉 불량에 의한 아크열이 공기 중의 산소와 반응하고 용융 온도가 419.5[°C]인 아연은 용융되어 철 성분이 많이 검출된 것으로 판단된다. 구리(Cu)와 주석(Sn)은 각각 10.9[%]와 1.37[%] 검출되었으며, 이는 압착 단자의 성분이 일부 용융되어 전이된 것으로 판단된다.

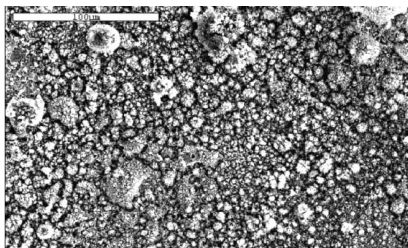
〈표 2〉 스크루 단자의 성분 분석

상태 \ 성분[%]	Zn	Cu	Fe	O	Sn
Normal	66.6	0	2.51	30.9	0
Poor Contact	3.3	10.9	59.8	24.6	1.37

〈그림 7〉은 압착 단자 표면의 주사전자현미경(SEM) 사진을 나타낸 것이다. 정상 시료의 경우 표면에 비교적 균일한 입자가 분포하고 있음을 알 수 있다. 즉 구리(Cu)와 주석(Sn) 입자가 고르게 분포되어 있음을 잘 보이고 있고 시료의 상태도 비교적 양호한 것을 알 수 있다. (b)는 열화된 시료의 SEM 사진을 나타낸 것으로 정상 시료의 교유한 입자가 없어지고 새로운 입자가 다수 관측된다. 입자의 크기가 불규칙적이며 배열도 규칙성을 상실하여 다양한 형태를 유지하고 있다. 이처럼 무질서한 형태를 보이는 이유는 순간적인 고열에 의해 산화될 때 나타나는 특성이다. 즉 전기적인 아크(Ark)가 발생하면 수천 °C의 열과 공기 중의 산소가 재결합하면서 산화가 촉진된 것으로 판단된다. 이와 같은 현상이 지속되면 기계적 성능의 저하는 물론 전기적 특성도 저하되어 저항이 증가하게 되고 발열량도 증가하여 사고를 유발시킬 가능성도 급격히 커진다.



(a) 정상 시료



(b) 열화된 시료

〈그림 7〉 압착 단자의 SEM 사진

〈표 3〉은 접촉 불량에 의한 압착 단자의 성분 분포 변화를 나타낸 것이다. 정상 상태의 압착 단자는 구리(Cu)에 주석(Sn)이 도금된 것으로 주석(Sn)이 96.61[%]로써 대부분을 차지하였다. 하지만, 접촉 불량에 의해 표면이 열화된 압착 단자의 성분 분포를 보면 주석은 2.89[%]로 줄어들고, 구리는 63.76[%]로 크게 증가하였다.

〈표 3〉 압착 단자의 성분 분석

상태 \ 성분[%]	C	Cu	Sn	Zn	Fe	O
Normal	1.52	1.87	96.6	0	0	0
Poor Contact	0	63.8	2.89	10.4	8.82	14.1

스크루 단자와 비슷한 결과로써 아크열이 발생하면서 공기 중의 산소(14.12[%])와 반응하여 산화되었고, 용융 온도가 231.9[°C]인 주석이 용융되어 구리 성분이 검출된 것으로 판단된다. 또한, 스크루 단자의 성분이 일부 용융되어 전이되었으

며 상호 영향이 있었음을 의미한다. 즉 공기 중의 산화가 가속되었음을 주사전자현미경(SEM)에 의한 구조 분석 및 에너지분산분석기(EDX) 성분 분석에서도 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 논문에서는 전선 접속부에서의 스크루 나사 조임 불량에 따른 접촉 불량을 모의하였으며, 그때의 아크 및 온도 분포, 구조 및 조성 변화 등을 분석하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

(1) 스크루 나사 조임 불량 상태에서 진동이 발생하면 아크가 발생하고 접촉 저항이 증가하며, 페놀 수지와 폴리염화비닐 수지는 아크 열에 의해 용융되어 열화된다.

(2) 진동주파수에 의한 열화 정도는 전선이 스크루 단자와 부스바 사이에 접촉하고 있는 시간에 따라 아크 방전의 차이가 나타나며, 고주파보다는 저주파에서의 열화가 가속되는 것으로 분석되었다.

(3) 초고속카메라 촬영 분석에 의해 단자대에서의 화재 진전 과정을 살펴보면, 먼저 아크가 발생하고 줄열에 의해 폴리염화비닐 수지와 페놀 수지의 온도가 상승하면 용융과 함께 연기가 발생하며, 아크 방전에 의해 용융된 페놀 수지에 착화되어 화재로 진전하게 된다.

(4) 따라서 일정한 크기와 주파수를 가지는 진동이 전선 접속부에 인가되면 아크 현상이 발생하고 주변 절연물은 온도 상승에 의해 열화된다. 또한, 열화된 절연물에는 아크 방전에 의해 착화되기 쉬우며 화재로 진전될 가능성이 높은 것으로 판단된다.

이상과 같은 결론을 종합해 보면 전기기기 또는 설비의 접속은 전기적 특성은 물론 기계적 성질도 잘 유지되도록 하는 것이 사고 예방의 중요한 요소를 실험을 통해서 확인할 수 있었다. 