

# 외부 진동하에서 스크루 접속부의 아크 및 온도 특성

김영석 · 김동욱 · 김동우 · 이기연 · 최충석

한국전기안전공사 부설 전기안전연구원

## 1. 서론

전선 접속부에서 접촉불량에 의해 발생하는 전기화재는 전기설비의 부주의한 사용과 설치에 의한 원인으로 발생한다. 이들 전기설비 내에는 전선과 기기 단자의 접속 등 다수의 전기적 접속부가 존재하며, 이들 접속부에서 접속력이 저하되거나 환경적 요인에 의해 열화 되면 국부적인 발열로 인해 전기화재가 다수 발생하게 된다[1-3]. 2003년 통계자료에 의하면, 접촉 불량에 의한 전기화재는 전체의 5.3%인 393건이 발생하였으며, 전기사고의 원인분석 및 예방 연구가 절실히 필요하다[4]. 접속부의 접속방식은 크게 스프링 접속, 압착접속, 스크루 접속으로 나눌 수 있으며, 전선의 분기와 접속의 목적으로 스크루 접속을 많이 이용하고 있다. 스크루 접속의 대표적인 접속기구로는 단자대(terminal block)를 들 수 있으며, 하나의 전원 전선에 여러 개의 부하 전선이 연결되는 경우가 많아 규격에 맞는 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 사고가 발생한다[5][6]. 이들 중에서 진동은 교통, 발파, 지진, 바람, 기계내부 등에서 발생되며, 잘못된 설계나 불량 제작으로 인한 불평형으로 진동을 유발하며, 진동주파수 대역과 진폭범위도 넓다[7]. 진동에 의해 접촉 불량이 발생하면, 아크가 발생하고 주변 절연물의 온도가 상승하며, 산화물의 증식 등에 의해 전기사고로 이어진다. 따라서 전기사고가 필연적으로 발생함에 따라 연결부분을 최소화 하는 방법이 필요하며 적절한 조임 토크를 유지하는 것이 매우 중요하다.

본 연구는 전선 접속부의 조임 방법 중의 하나인 스크루 접속 방식의 개선의 목적이며, 그 전 단계로서 기계적 진동에 따른 스크루 조임 부분에서의 가속열화를 모의하였다. 또한 기계적 진동에 따른 조임 부분에서의 아크 및 온도특성, 열화 되는 과정을 조사하고 재료를 분석하였다.

## 2. 실험방법

본 실험에 사용된 스크루 단자대의 구성과 각 온도의 측정부위를 그림 1에 나타내었다. 단자대는 스크루 단자, 부스바(bus bar) 그리고 절연물로 구성되어 있으며, 비닐절연 전선(IV, 2.0[mm])을 부스바와 스크루 단자 사이에 접속하여 사용하였다. 단자대의 스크루 조임 토크는 한국산업규격(KS C 2625)의 나사 지름에 맞는 기준이 있으며, 본

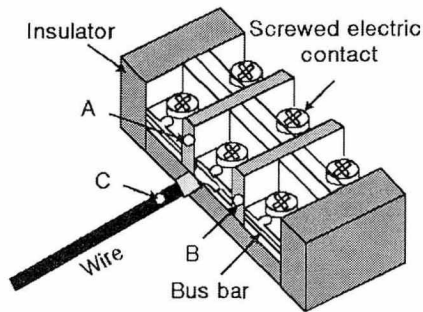


그림 1. 단자대의 구성 및 온도 측정부위

실험에 사용한 스크루의 단자 지름은 4.0[mm]로서 적정 토크 1.2[N·m]이상으로 조임해야 한다. 하지만, 조임 불량 상태를 모의하기 위해 전선과 연결되는 단자를 토크드라이버(FDS2-S, Tohnichi, Japan)로 조이지 않은 상태(0 [N·m])로 설정하였다.

그림 2는 접촉 불량에 의한 스크루 단자와 전선사이의 아크 및 열화특성 실험을 위한 가속열화장치의 개략도를 나타낸다. 그림에서 접촉 불량 유도를 위한 장치로는 영구 자석에 의해 큰 가속도를 만들어 낼 수 있는 소형 가진기를 이용하였으며, 최대 변위는 ±3 [mm]이며, 주파수는 18[kHz]이다. 우선, 단자대는 상하, 좌우 이동이 가능한 x-rail에 고정하고 전선은 가진기에 연결하였다. 진동의 인가는 신호발생기를 이용하여 정현파를 인가하였으며, 주파수는 50~500[Hz]까지 가변시켰다. 진동의 진폭은 증폭기를 통해 조절하였다.

인가되는 진동 주파수 및 온도측정은 가속도계(Sensitivity, 50[mV/G])와 K-type 열전대를 이용하여 데이터 취득시스템에서 취득하였다. 전원은 최대출력 600[V]의 전압조정기를 이용하여 220[V]를 인가하였으며, 부하는 전등부하(240[W])로서 저항만을 이용하였다. 진동에 따른 접촉 불량 발생시의 아크 및 열화과정은 고속카메라 시스템(HG-100K, Redlake, USA)을 이용하여 컴퓨터에서 관측하였으며, 외형관찰은 디지털 카메라를 이용하여 촬영하였다. 이때, 주변 분위기는 온도 11.5[°C], 습도 38[%]에서 실험하였다.

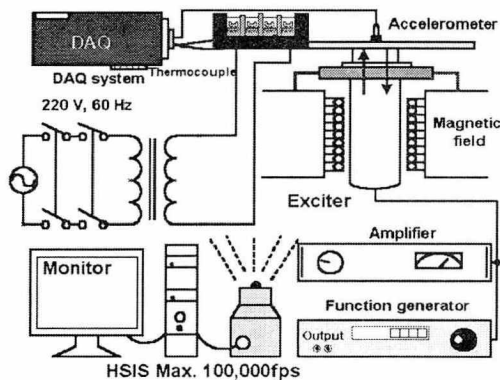


그림 2. 접촉 불량을 위한 실험개략도

### 3. 실험결과 및 고찰

정현파 신호로 3[G] 크기의 진동을 일정하게 두고 주파수 변화에 따라 가속열화를 발생시켜 접촉 불량에 유도하였다. 주파수 60[Hz]를 인가했을 때 단자대와 전선사이의 접촉 불량에 따른 온도변화를 그림 3에 나타내었다. 진동의 인가시간은 1500[sec]로 하였다. 그림에서 알 수 있듯이, 접촉 불량이 발생하면 시간이 경과함에 따라 온도가 상승하는 것을 알 수 있다. 특히, 단자대의 페놀수지 보다 스크루 나사와 접촉하고 있는 PVC 수지의 온도상승이 현저하게 나타났다. 진동에 의해 발생한 접촉 불량에 의해 전선피복은 약 180[sec]동안 온도가 80[°C]까지 급격하게 상승하고 130[°C]까지 온도가 상

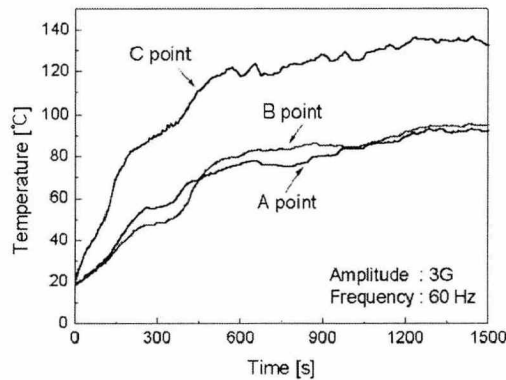


그림 3. 진동주파수 60[Hz]에서 시간에 따른 온도 변화

승하고 난 후 포화되었다. 페놀 수지는 직접적인 아크 열 보다는 간접적인 아크열에 의해 온도가 상승하였으며, 80[°C]부근까지 상승한 후, 포화되는 경향을 나타내었다. 전선 피복은 폴리염화비닐(Poly Vinyl Chloride)로서 허용온도의 범위가 70~80[°C]로서 아크 열에 쉽게 용융되는 것을 알 수 있으며, 단자대의 절연물은 페놀(Phenolic)수지로서 허용온도가 120[°C]로 허용온도 범위 내에 있다. 진동주파수 60[Hz]는 전선이 스크루 단자와 부스바 사이에 접촉하고 있는 시간이 짧기 때문에 아크방전이 더 많이 일어나고 열화가 빨리 진행되는 것으로 판단되며, 시간이 경과함에 따라 계속 열화가 발생하기 때문에 접촉 불량에 의한 아크 발생으로 전기사고의 발생가능성이 매우 높은 것을 알 수 있다.

그림 4는 전선 접속부에서 진동 주파수 60[Hz]를 인가했을 때의 아크에 따른 전압파형을 나타낸다. 아크방전에 의해 전압파형 찌그러짐 일부구간에서 발생하였다. 아크방전에 의해 전압은 인가된 전압인 220[V] 이상의 큰 전압이 측정되었으며, 시간에 따른 전압파형은 일정한 주기를 가지고 있지는 않았다. 따라서 진동 주파수 60[Hz]일 때에 아크방전에 의한 열에 의해 폴리염화비닐 수지와 페놀수지의 가속열화가 활발하게 진행되는 것을 알 수 있다.

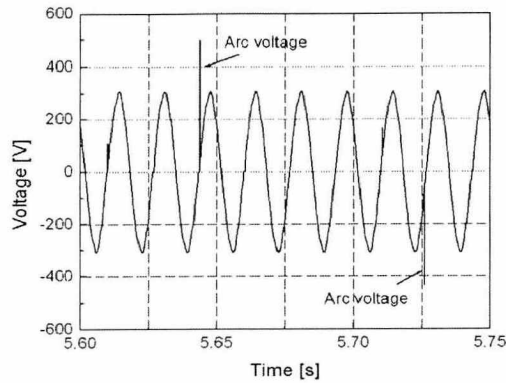
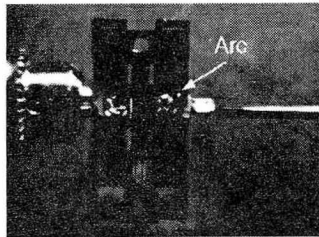
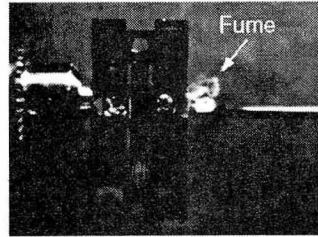


그림 4. 접속부에서 진동 주파수 60[Hz]가 인가될 때의 전압파형

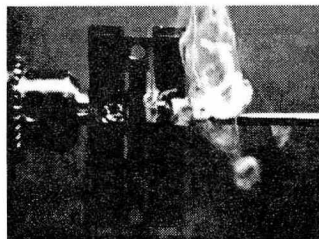
그림 5는 진동주파수 60[Hz]경우에 단자대에서 스크루 단자와 전선 사이의 접촉 불량에 의한 아크 발생과 화재 진전과정을 나타낸다. 그림 (a)와 같이 진동에 의해 접촉 불량이 발생하면, 아크가 발생하고 접촉저항이 증가하며, 페놀 수지와 PVC 수지로 열이 전달되어 열화 된다. 그림 (b)와 (c) 같이 줄열에 의해 폴리염화비닐 수지와 페놀 수지의 온도가 상승하면 용융과 함께 연기가 발생하고 단자대 주위로 확산되며, 그림 (d)와 같이 아크방전에 의해 용융된 페놀 수지에 착화되어 화재로 진전하게 된다. 따라서 교통, 발파, 지진; 바람 그리고 기계 내부 등의 일정한 진폭과 주파수를 가지는 진동이 전선 접속부에 영향을 미치게 되면 아크방전에 의해 주변 절연물의 온도가 상승하게 되고 열화 된다. 이때 열화 된 절연물에 아크 방전과 같은 착화에너지가 존재하게 되면 전기화재로 일어날 가능성이 매우 높은 것으로 판단된다.



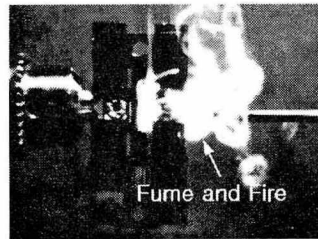
(a) 초기 아크 상태



(b) 연기발생 I



(c) 연기 발생 II



(d) 연기 및 화재 진전

그림 5. 접속부에서 진동주파수 60[Hz]가 인가될 때의 아크현상 및 화재진전

표 1은 접촉 불량에 의한 스크루 단자의 성분변화를 나타낸다. 정상상태의 스크루 단자는 철(Fe)에 아연(Zn)이 도금 된 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 변화된 스크루 단자의 성분분포를 보면 산소는 약 24.6[%]로 정상일 때와 유사한 분포를 보였지만, 아연은 3.33[%]로 크게 줄어들고 철은 59.8[%]로 크게 증가하였다. 이는 접촉 불량에 의해 아크열이 발생하면서 공기 중의 산소와 반응하고 용융온도가 419.5[°C]인 아연은 용융되어 철 성분이 많이 검출된 것으로 판단된다. 또한 구리(Cu)와 주석(Sn)은 각각 10.9[%]와 1.37[%] 검출되었으며, 이는 압착단자의 성분이 일부 용융되어 전이된 것으로 판단된다.

표 1. 스크루 단자의 성분 분석

상태 \ 성분	Zn[%]	Cu[%]	Fe[%]	O[%]	Sn[%]
Normal	66.56	0	2.51	30.9	0
Poor contact	3.33	10.9	59.8	24.60	1.37

표 2는 접촉 불량에 의한 압착단자의 성분분포 변화를 나타낸 것이다. 정상상태의 압착 단자는 구리(Cu)에 주석(Sn)이 도금 된 것으로 주석(Sn)이 96.61[%]로서 대부분을 차지하였다. 하지만, 접촉 불량에 의해 표면이 변화된 압착 단자의 성분분포를 보면 주석은 2.89[%]로 크게 줄어들고, 구리는 63.76[%]로 크게 증가하였다. 이는 스크루 단자와 비슷한 결과로서 아크열이 발생하면서 공기 중의 산소 반응(14.12[%])하여 하고 용융온도가 231.9[°C]인 주석이 용융되어 구리 성분이 검출된 것으로 판단된다. 또한 스크루단자의 성분이 일부 용융되어 전이되었으며, 상호영향이 큰 것을 알 수 있다.

표 2. 압착단자의 성분 분석

상태 \ 성분	C[%]	Cu[%]	Sn[%]	Zn[%]	Fe[%]	O[%]
Normal	1.52	1.87	96.61	0	0	0
Poor contact	0	63.76	2.89	10.41	8.82	14.12

#### 4. 결론

본 논문에서는 접속부에서의 스크루 나사 조임 불량에 따른 접촉 불량을 모의하였으며, 그 때의 아크 및 화재 위험성에 관해 조사하였다.

스크루 나사 조임 불량 상태에서 진동이 발생하면 아크가 발생하고 접촉저항이 증가하

며, 페놀 수지와 폴리염화비닐 수지는 아크열에 의해 용융되어 열화 된다. 또한 진동 주파수에 의한 열화정도는 전선이 스크루 단자와 부스마 사이에 접촉하고 있는 시간에 따라 아크방전의 차이가 나타나며, 고주파보다는 저주파에서의 열화가 가속되는 것으로 조사되었다. 고속카메라 촬영에 의해 단자대에서의 화재 진전과정을 살펴보면, 먼저 아크가 발생하고 줄열에 의해 폴리염화비닐 수지와 페놀 수지의 온도가 상승하면 용융과 함께 연기가 발생하며, 아크방전에 의해 용융된 페놀 수지에 착화되어 화재로 진전하게 된다. 따라서 일정한 크기와 주파수를 가지는 진동이 전선 접속부에 인가되면 아크현상이 발생하고 주변 절연물은 온도상승에 의해 열화 된다. 또한 열화 된 절연물에는 아크방전에 의해 착화되기 쉬우며, 화재로 일어날 가능성이 매우 높은 것으로 판단된다. 접촉 불량 실험 후의 스크루 단자와 압착단자의 표면은 주변 산소와 반응하여 검게 탄화되고 산화물이 일부 증식되었으며, 상호영향이 큰 것을 확인하였다.

## 감사의 글

본 연구는 산업자원부 전력산업기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] Roland S. Timist, "A Possible Degeneration Mechanism in Stationary Electrical Contacts", IEEE Transactions on Component, Hybrids, and manufacturing Technology, Vol.13, No.1, 1990.
- [2] C.S. Choi, et al, "Electrical fire Engineering", Dong-Hwa technology, pp.165-211, 2004
- [3] Korea Electrical safety Corporation "A Statistical Analysis on the Electrical Accident" 13th edition, pp. 7-26, 2004
- [4] V. Babrauskas, "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
- [5] Jarle Sletbak et al, "Glowing Contact Areas in Loose Copper Wire Connections", IEEE Transactions on Component, Hybrids, and manufacturing Technology, Vol.15, No.3, 1992.
- [6] E. Cadirli, N. Marasli, B. Bayender and M. Gunduz, "Investigation of the structure parameters according to the solidification parameters for pivalic acid", Material science, Vol.34, pp.5533-5541, 1999.
- [7] 이규배, "건축구조물의 진동측정 및 기준", 한국소음진동공학회지, 제 9권, 제 6호, 1999.