

B-05

단자대의 조임토크 불량에 의한 아크패턴 및 성분분석

송길목, 김동욱, 김동우, 김영석, 최충석
한국전기안전공사 부설 전기안전연구원

The Component Analysis and Arc Patterns by Poor Tightness Torque of Terminal Blocks

K.M. Shong, D.O. Kim, D.W. Kim, Y.S. Kim and C.S. Choi
Electrical Safety Research Institute attached to KESCO

1. 서론

산업사회가 발전함과 함께 대용량 전기설비의 증가로 전기에너지의 수요가 급증하고 있다. 전기설비 내에는 전선과 전선의 접속, 전선과 기기단자의 접속 등 다수의 전기적 접속부가 존재한다. 단자대를 포함한 접속부에서 접속력이 저하되거나 환경적 요인에 의해 열화되면 국부적인 발열로 인해 전기재해가 다수 발생하고 있어 이에 대한 원인분석 및 예방 연구가 절실히 요구된다^[1-3].

저압에 사용되는 단자대(*terminal block*)는 전선의 접속, 분기 또는 중계를 목적으로 전선 접속부를 가진 도전체와 그것을 유지하는 절연체를 조합한 것이다. 단자대의 종류에는 나사조임 단자대, 터브 단자대, 리그 단자대, 래핑 단자대, 나사없는 단자대로 나뉜다^[4]. 일반적으로 단자대는 일대일 대응에 의한 전원 연결이 이루어지나 일대다 대응에 의해 하나의 전원 전선에 여러 개의 부하 측 전선이 연결된 경우가 많으며, 규격에 맞는 설치와 관리가 요구된다. 특히 전기적 보호 장치의 시설이 되어 있지 않거나 초기설치에 있어서 규격을 벗어난 나사나 볼트의 조임 상태가 있을 경우 접촉 불량에 의한 줄열이 발생하여 화재로 이어질 수 있다.

단자대와 관련된 사고로는 진동, 이완이나 조임 불량으로 접촉 불량에 의한 줄열 발생, 과도한 부하 사용에 의한 과전류 발생, 먼지(*dust*), 수분(*water*), 공해 등의 원인에 의한 절연파괴 등이 있다^{[5][6]}. 이중 가장 많이 발생하는 사고 유형으로는 접촉 불량에 의한 전기사고이다. 나사나 볼트의 조임토크는 한국산업규격(KS)에 의해 정해져 있으나 외부에서 진동이나 부식, 침식의 진행, 전식 등 다양한 열화 원인에 의해 접촉불량이 발생한다. 진동에 의해 접촉불량이 발생하면, 아크가 발생하고 일정시간이 지나면 산화물이 증식하는 과정으로 발전한다. 따라서 전기사고가 필연적으로 발생함에 따라 연결부분을 최소화 하는 방법이 필요하며 점검을 통해 정상적인 조임 토크를 유지하는 것이 매우 중요하다^{[7][8]}.

본 연구에서는 전선의 접속과 분기에 사용되는 단자대에서 발생할 수 있는 전기재해를 모의하기 위해 인위적으로 진동을 인가하여 접속불량에 의한 아크현상과 산화 증식된 후의 성분을 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 나사 조임 단자대의 외형과 구성을 그림 1에 나타낸다. 단자대는 4단자를 가지는 것으로 나사와 와셔, 부스바(bus bar) 그리고 절연물로 구성되어 있으며, 일반적으로 압착단자에 부착된 전선을 부스바와 나사사이에 접속하여 사용하고 있다. 단자대의 나사조임은 표 1에 나타낸 공업용 단자대 조임토크 기준(KS C 2625)[4]과 같이 나사지름에 따른 조임토크에 맞게 체결해야 한다. 본 실험에 사용된 단자대의 호칭지름은 12.0 [mm]로서 적정 토크 14.0[N·m]이상으로 체결해야 하지만, 조임토크 불량에 의한 아크현상을 실험을 위해 4개의 단자 중 1개를 분리하여 토크드라이버(FDS2-S, Tohnichi, Japan)로 조이지 않은 상태(0 N·m)로 설정하여 실험하였다.

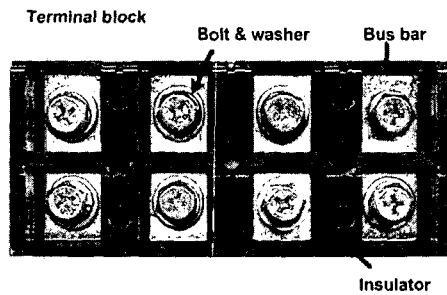


그림 1. 단자대의 외형과 구성

표 1. 조임 토크

단자나사의 호칭지름 [mm]	2.5	3	3.5	4	5	6	8	10	12	16
토크 [N·m]	0.4	0.5	0.8	1.2	2.0	2.5	6.0	10.0	14.0	25.0

그림 2는 단자대의 접속 불량을 유도하여 그 특성을 분석하기 위한 열화 실험 장치를 구성한 것으로 전원은 220V의 실험조건으로 연결하였으며 부하는 전등부하(240W)로서 저항만을 이용하였다.

진동은 진동모터를 이용하여 6,000rpm의 고속으로 진동을 진행하였다. 진동시간은 2시간으로 하였으며 볼트(bolt)와 와셔(washer) 등의 특성 변화가 진행되는

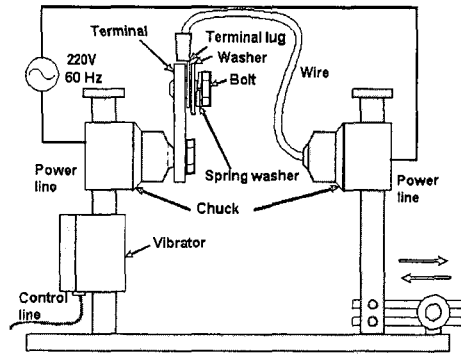
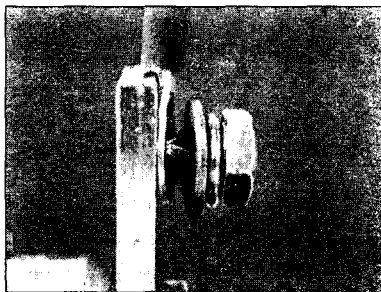


그림 2. 접촉 불량 유도를 위한 실험 장치의 구성

단계까지만 실험하였다. 본 실험은 재료의 특성상 접촉 불량인 진행되었을 경우 접촉 저항에 의한 줄열이 발생하면 주변 산소나 수분에 의해 아크가 발생하는지의 여부를 확인하였다. 실험 후 분석은 주사전자현미경(SEM)과 에너지 분산형 X선분석기(EDX)를 이용하여 미세 확대 및 성분분포 변화를 비교 분석하였다.

3. 실험결과 및 검토

그림 3은 단자대 나사 조임 불량상태에서 진동발생에 따른 아크현상을 나타낸 것이다. 그림 3(a)는 와셔와 압착단자 사이, 와셔와 와셔 사이에서 아크가 발생하는 것을 촬영한 것이고, 그림 3(b)는 압착단자와 부스바(bus bar)에서 아크가 발생하는 것을 촬영한 것이다. 초기상태에서는 기계적 진동에 의해 압착단자를 기준으로 아크가 발생하고 접촉저항이 증가하여 줄열이 발생하였다. 시간이 경과한 뒤에는 진동을 가하지 않더라도 아크가 지속적으로 발생하고 압착단자와 부스바 그리고 압착단자와 와셔사이에 산화물 증식이 생성되었다.



(a) 와셔와 압착단자 사이의 아크



(b) 압착단자와 부스바 사이의 아크

그림 3. 접촉 불량에 의한 아크 발생

아크열화에 의한 실험이 끝난 후 변형된 단자대의 외형을 그림 4에 나타낸다. 그림에서

알 수 있듯이 와셔의 주변으로 검게 변형되었고 압착단자에서도 접촉불량이 발생한 부분은 검게 탄화된 것을 확인하였다. 볼트의 경우에도 산과 풀의 중간 부분에 검게 탄화되어 있는 것을 확인하였다.

실험전의 재료와 실험 후 변형된 재료의 표면을 분석하기 위해 주사전자현미경(SEM)을 이용하였다. 그림 5는 주사전자현미경을 이용하여 압착단자의 변형을 비교한 이미지이다.

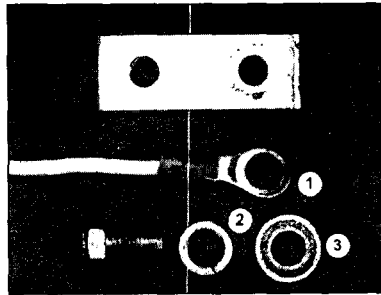


그림 4. 접촉 불량에 의한 단자대의 외형변화



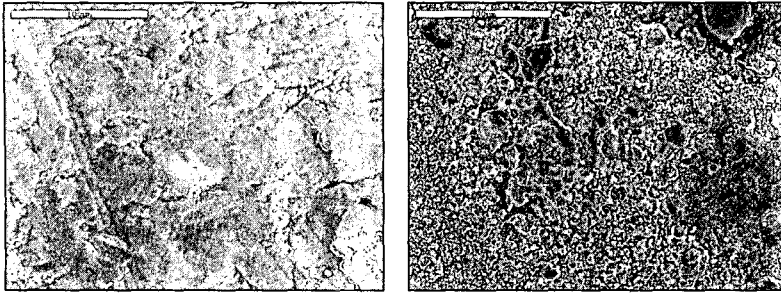
(a) 정상 상태

(b) 접촉 불량 후

그림 5. 압착단자의 주사전자이미지(SEM) 사진

그림 5(a)의 정상상태의 압착단자 표면은 입자(grain)의 크기가 일정하고 고르게 분포된 것을 확인할 수 있고, 그림 5(b)의 접촉 불량 후 압착단자의 표면은 일부 입자의 크기나 표면의 상태가 고르지 못한 것을 확인하였다.

그림 6은 주사전자현미경을 이용한 평 와셔의 이미지를 나타낸 것이다. 그림 6(a)는 평 와셔의 정상상태일 때의 표면으로 제조 시 형성된 형태를 유지하고 있으나, 그림 6(b)에 서와 같이 접촉 불량에 의한 표면의 변형이 발생하여 아크열에 의해 탄화되고 용융된 표면을 볼 수 있다. 또한 입자의 크기가 불규칙한 것을 알 수 있다.



(a) 정상 상태 (b) 접촉 불량 후

그림 6. 평 와셔의 주사전자이미지(SEM) 분석

에너지 분산형 X선분석기(EDX)를 이용하여 접촉 불량에 의한 특성 변화를 분석하였다. 표 2는 압착단자의 정상과 접촉 불량에 의한 성분분포 변화를 비교 분석한 것이다.

정상상태의 압착단자는 주석(Sn; tin)이 89.64%를 차지하였으며 다음으로 4.59%의 질소(N; nitrogen), 3.61%의 탄소(C; carbon), 1.75%의 구리(Cu; copper)로 구성되어 있다. 이는 압착단자의 표면이 주석도금되어 있기 때문이다. 접촉 불량에 의해 표면이 변화된 압착단자의 성분분포를 보면 탄소는 약 3.26%로 정상일 때와 유사한 분포를 보였으며, 질소는 거의 검출되지 않았고, 구리는 2.04%로 유사한 성분분포를 보였다. 그러나 주석인 경우 18.48%로 거의 1/4정도로 성분분포가 줄었고, 정상상태에서는 검출되지 않았던 25.36%의 산소(O; oxygen), 18.18%의 철(Fe; iron), 32.0%의 아연(Zn; zinc)이 검출되었다. 이는 접촉 불량에 의해 아크열이 발생하면서 공기 중의 산소와 평 와셔의 성분이 일부 용융되어 전이된 것으로 판단된다.

표 2. 접촉 불량에 의한 압착단자의 성분분포 변화

성분(%) 상태	탄소(C)	질소(N)	구리(Cu)	주석(Sn)	산소(O)	철(Fe)	아연(Zn)	크롬(Cr)
정 상	3.61	4.59	1.75	89.64	0	0	0	0
접촉불량	3.26	0	2.04	18.48	25.36	18.18	32.0	0

표 3은 접촉 불량에 의한 평 와셔의 성분분포 변화를 나타낸 것으로 한쪽에는 압착단자가 있었고 다른 한 편에는 스프링 와셔가 있었기 때문에 성분분포의 변화도 이러한 영향으로 정상에서는 나타나지 않았던 미량의 구리 0.57%와 주석 14.41%가 검출되었다. 이 검출된 성분은 압착단자에서 나온 것으로 판단된다.

표 3. 접촉 불량에 의한 평 와셔의 성분분포 변화

성분(%) 상태	탄소(C)	질소(N)	구리(Cu)	주석(Sn)	산소(O)	철(Fe)	아연(Zn)	크롬(Cr)
정 상	5.17	0	0	0	28.14	2.38	59.21	4.40
접촉불량	0	0	0.57	14.41	22.12	25.90	35.48	1.12

4. 결론

단자대에서 압착단자와 나사를 적정기준으로 조이지 않은 상태에서 진동이 발생하면 접촉저항이 커져 줄열과 저압 저전류에서도 미세한 아크와 열이 지속적으로 발생하여 와셔의 주변이 검게 변형되었고 압착단자, 볼트 등 전반적인 곳에서 검게 탄화된 것을 확인하였다. 정상상태의 압착단자 표면은 입자(grain)의 크기가 일정하고 고르게 분포된 것을 확인할 수 있었으나, 접촉 불량 후 일부 입자의 크거나 표면의 상태가 고르지 못한 것을 확인하였다.

평 와셔의 분석으로 정상상태일 때의 표면은 제조 시 형성된 형태를 유지하고 있으나, 접촉 불량이 발생하면 아크열에 의해 탄화되고 용융된 표면의 입자 크기가 불규칙한 것을 확인하였다. 접촉 불량에 의해 단자대의 와셔와 나사, 압착단자에서 아크에 의한 열이 전이되고 이러한 현상이 지속되면 저항특성에 의해 발열되어 화재로 이어질 수 있으므로, 접속부의 나사 조임을 규격에 맞게 설치하고 유지할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부(MOCIE) 전력산업기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 한국전기안전공사, "전기재해 통계분석", pp.10~50, 2003.
2. 박용환, 양승용, "단면결합 전선에서의 화재발생 메카니즘 연구", 한국화재소방학회 추계학술대회 논문집, pp.61~67, 2001.
3. 東京消防廳消防科學研究室, "漏電遮斷器等の電線接續部からの出火防止する研究", フェスク, pp. 46~50, 2001.
4. 한국표준협회, "공업용 단자대 KS 규격(KS C 2625)", 1990.
5. 原 英喜 외 1, "一般家庭における低壓遮斷器接點の接觸抵抗とジュール熱", J. IEIE Jan, Vol. 21, No. 122, pp. 1031-1032, 1995.
6. 김향곤 외 5, "접촉 압력에 따른 전선 연결기구의 열 특성 변화", 한국화재소방학회 추계학술대회 논문집, pp.127-132, 2002.
7. Guo-Ping Lue, Jian-Gue Lu, Ji-Gao Zhang, "Failure Analysis on Bolt-type Power Connector's Application", IEEE, pp.77-86, 1999.
8. Jarle sletbak, Roar Kristensen, Hakon Sundklakk, Gunnar Navik and Magne Runde, "Glowing Contact Areas in Loose Copper Wire Connections", IEEE Trans. Comp., Hybrids, Manuf. Technol., Vol. 15, No. 3, June. pp. 322-327, 1992.