글 | 최충석 한국전기안전공사 전기안전연구원 전기재해연구그룹장, 공학박사

접촉 불량이 발생한 옥내용 소형 스위치의 소손 원인 분석

접촉 불량이 옥내용 소형 스위치의 구조와 열화 및 소손 패턴, 열 특성, 단자부의 성분 분포, 절연 덮개 등에 대한 과학적인 분석을 통해 사고를 예방하기 위한 방법을 알아보자.

1. 머리말

옥내에 사용되는 조명, 전열, 통신 등을 효율적으로 제어하기 위해서 스위치를 설치하게 된다. 옥내용 소형 스위치는 한국산업규격(KS C 3809) 및 국제전기위원회(IEC 60669-1)에 적용 범위, 인용 규격, 정의, 종류 및 정격 성능, 구조, 치수 및 재료, 시험 방법, 검사, 제품의 호칭 방법, 표시 등이 구체적으로 언급되어 있다. 옥내용 소형 스위치의 적용 범위는 주파수 60Hz 교류 250V 이하의 전로에서 주로 옥내등 및 옥외등에 부착하여 전등의 점멸 또는 소형 전기기기에 사용하는 것으로, 정격 전류 20A 이하인 것에 대해서 규정하고 있다. 다만 자동 차단기구가 붙은 것과 방폭형, 그 밖에 특수한 것 및 특정한 소형 전기기기에만 사용하기 위해서 특별히 설계된 스위치는 포함하지 않는다.

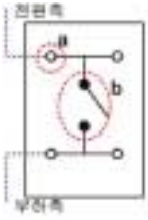
스위치는 사용 목적에 따라 전기회로의 개폐기, 상승 회전 스위치, 회전 스위치, 크로스바 스위치 등과 같은 자동 교환기의 본체를 구성하는 선택 기구, 셀렉터, 컨넥터, 라인 스위치 등과 같이 스텝 바이 스텝 방식(Step by Step Type)의 주체를 이루는 교환 회로의 최소 단위이며 선택기구, 계전기 등의 부품으로 구성되고 일반적으로 1회로마다 조립하여 사용된다.

본 고에서는 옥내에 설치되어 사용 중인 스위치가 접촉 불량이 발생하여 일반 화재로 진행되는 과정에 수거된 옥내용 소형 스위치의 구조, 열화 패턴, 단자부의 특성 등을 과학적으로 분석하여 스위치의 소손 원인을 제시하고 유사 사고 예방을 위한 자료로 삼고자 한다.

2. 동종 제품의 열화 패턴

사고 현장에서 수거한 동종 제품의 열화 패턴을 다양한 각도로 제시함으로써 원인 분석의 과학화를 기하고자 한다. 현장에 사용된 스위치의 외형은 3개의 스위치로 구성된 [그림 1]의 (a)와 같으며, 스위치의 내부 회로는 그림 (b)와 같이 전선을 끼워 넣을 수 있는 곳이 네 군데 있으며, 접촉자인 단자 부분이 한 곳으로 구성되어 있다. 즉 전선을 끼워 접속할 수 있는 클립과 기계적 접촉 단자에서의 접촉으로 회로가 구성되어 점등이 가능하게 된다.

(a) 동일 제품의 외형

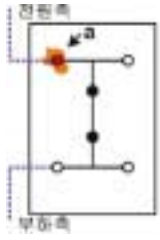


(b) 내부 회로

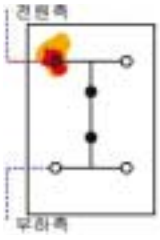
■ 그림 1. 스위치의 외형 및 내부 회로

가. 전선 연결 클립의 열화

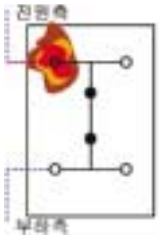
전선을 스위치에 고정하기 위해서 사용되는 클립 부분의 열화에 의해 사고가 발생하는 경과를 보면 [그림 2]와 같이 나타낼 수 있다. 전선과 클립 부분의 접속부에서 접촉 불량에 의한 경우 장시간 동안 그 진전 과정을 알 수 없으며 사용상에서도 전압 강하가 낮아 보호 장치 또는 점검이나 검사시 발견되기 어렵다. [그림 2]는 [그림 1]의 (a)부분에서 발생한 접촉 불량에 의해 형성되는 화재 진전 과정을 나타낸 것으로 (a)는 초기에 접속부의 접촉 불량이 발생하면 국부적으로 발열이 발생한다. (b)는 장시간 사용시 지속적으로 축열되어 발열 부위가 진전되고 일부는 아산화동 증식이 발생하면서 전선의 일부가 열적 피로에 의해 적열된다. (c)는 화재가 진전되는 것으로 상기의 과정이 반복되면서 축열되었던 열이 절연 재료의 발화온도 시점까지 이르면 주변을 태우면서 화재로 진전된다.



(a) 접촉 불량



(b) 축열 형성



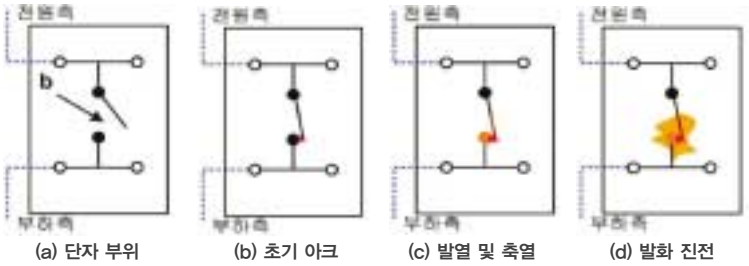
(c) 화재 발생

■ 그림 2. 전선과 클립 부분의 접촉 불량에 의한 화재 진전 과정

나. 접촉자의 접촉 불량

[그림 3]은 접촉자의 접촉 불량에 의해 발생될 수 있는 화재 진전 과정을 개략화한 것이다. (a)는 접촉 단자의 위치를 나타낸 것으로 이 부분이 물리적 힘에 의해 휘거나 이물질에 의해 접촉에 이상이 발생하였을 경우 접촉 불량에 의해 조명의 깜박거림 등이 나타날 수 있다. 접촉 불량은 접촉단자에서 접촉 저항에 의한 전압 강하가 발생하는 것으로 이에 따른 현상으로 조명이 깜박거리거나 조도가 낮아질 수 있는 것이다. (b)에서 나타난 것과 같이 접촉 불량이 발생하면 미소 아크가 발생하는 것을 알 수 있다. (c)는 미소 아크가 반복적으로 발생하면서 축열되고 접촉 단자 일부가 발열되는 것을 알 수 있다. 대부분의 접촉 재료는 아산화 증식 발생을 억제

하는 것으로 아산화동 증식은 거의 발생하지 않으나 발열 범위가 확대되면서 축열이 이루어진다. (d)는 축열된 열이 주변의 절연재료의 발화 온도 시점까지 이르게 되면 탄화되면서 화재로 이어지게 된다. 따라서 이러한 다양한 화재 진전 메커니즘에 의해 스위치의 소손이 발생하는 것으로 화재 원인을 밝히는 데 중요한 자료가 된다.

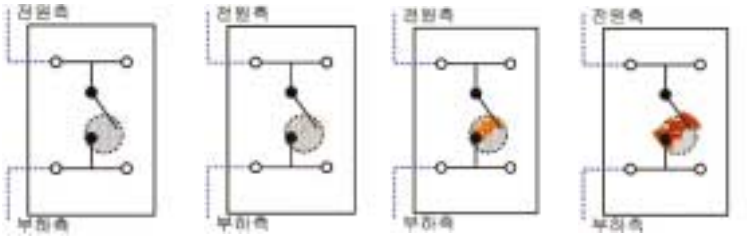


(a) 단자 부위 (b) 초기 아크 (c) 발열 및 축열 (d) 발화 진전

■ 그림 3. 접촉자의 접촉 불량에 의한 화재 진전 과정

다. 접촉자의 절연 파괴

[그림 4]는 접촉자 사이에 절연이 파괴되어 화재가 진전되는 과정을 개략화한 것이다. (a)는 단자 사이에 이물질이 부착된 것으로 수분이나 먼지 등이 단자 사이에 끼면 누설 전류가 흐르게 된다. 이때는 전원 스위치가 소등 상태(Off)에 있어도 미세한 전류가 흐르면서 점등 상태(On)로 된다. (b)는 누설 전류가 흐르는 표면에 미소 불꽃 방전이 발생하여 절연 재료를 탄화시키면서 더 많은 전류가 흐를 수 있도록 도전로가 형성된다. (c)는 탄화 도전로가 형성된 것으로 많은 전류가 흐르게 되어 표면이 탄화되면서 많은 열을 발생시키고 축열한다. (d)는 축열되었던 열에 의해 발화되는 것을 나타낸 것이다. 상기의 과정이 반복되다가 발화 온도 시점이 되면 주변을 태우면서 화재로 진전하게 되는 것이다.



(a) 이물질 (b) 불꽃 방전 (c) 도전로 형성 (d) 발화 진전

■ 그림 4. 접촉자의 절연 파괴에 의한 화재 진전 과정

3. 현장 조사 및 원인 분석

가. 소손 물품의 패턴 분석

본 사고는 일반 건물 내의 사무실 조명용으로 사용하는 전등의 제어용 스위치에서 발생한 것으로 정격전압 250V, 정격전류 15A인 누름 버튼 스위치이다. 사고 발생 당시 사무실에 사람들이 정상적인 업무를 수행하고 있었던 관계로 화재가 발생했음에도 불구하고 조기에 진화되어 2차 재해를 예방할 수 있었다.

(a) 정상 제품 (b) 사고 제품

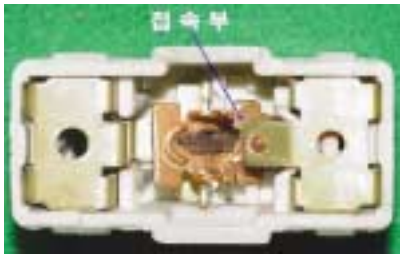
■ 그림 5. 스위치 정면의 소손 패턴 비교

(a) 정상 제품 (b) 사고 제품

■ 그림 6. 스위치 뒷면의 소손 패턴 비교

[그림 5]는 스위치의 정면을 분석한 것으로 (a)는 정상 제품의 외형을 나타낸 것이고, (b)는 사고 제품을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 (b)의 좌측 첫 번째 단로 스위치가 열에 의한 변형이 나타나 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 두 번째 단로 스위치의 경우 내부 접속부가 어떤 이유인지는 정확히 알 수 없으나 이탈되어 있는 것을 알 수 있다.

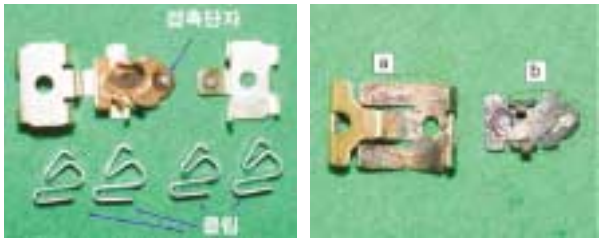
[그림 6]은 스위치의 뒷면을 비교한 것으로 정상 제품과는 달리 사고 제품에서는 탄화된 부분이 명확히 확인되며, 점선 원으로 표시된 부분이 발화 부위인 것으로 판단된다. 따라서 열의 진행은 그림에서 좌측 첫 번째 스위치에서 시작되었음을 확인하였다.



■ 그림 7. 단로 스위치의 내부 설치 형태

[그림 7]은 정상인 단로 스위치의 내부 구성을 보여주는 것으로 접속부를 중심으로 접촉 단자가 동작할 수 있도록 설치되어 있는 것을 알 수 있다.

[그림 8]은 내부 구성품을 분해하여 비교한 것으로 (a)에서 접촉 단자와 클립이 나타나 있으나, (b)의 사고 제품에서는 대부분 이탈 되었고 접촉 단자를 지지하여 클립과 접촉되는 [a]와 접촉 단자 부분인 [b]의 외형을 볼 수 있다. [a]는 점선 원안의 부분이 검게 탄화된 것으로 보아 높은 열에 의한 소손이 있었음을 알 수 있다. [b]는 대부분 검게 그을려 있으며 접촉 부위의 단자 부분이 용융되어 있는 것으로 보아 높은 열이 있었음을 알 수 있다.



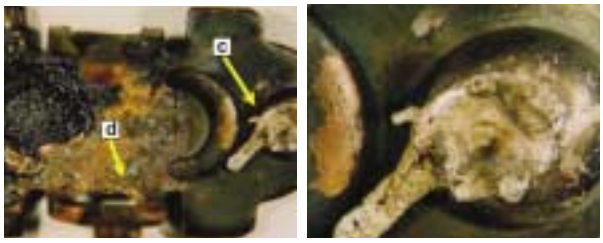
(a) 정상 제품 (b) 사고 제품

■ 그림 8. 내부 구성품 분해 비교

[그림 9]는 [그림 8]의 (b) 부분 뒷면을 촬영한 것으로 그림에서 알 수 있듯이 [그림 8(b)] 보다는 적게 탄화되어 있는 것을 확인하였다. 따라서 내부의 높은 열은 [그림 8(b)]의 보

■ 그림 9. 연결 지지대와 접촉 단자의 뒷면

이는 부분에서 시작되었음을 알 수 있다.



(a) 접촉 단자 (b) ⓒ부분 확대

■ 그림 10. 접촉 단자의 확대된 실체 현미경 사진

나. 단자부의 특성 분석

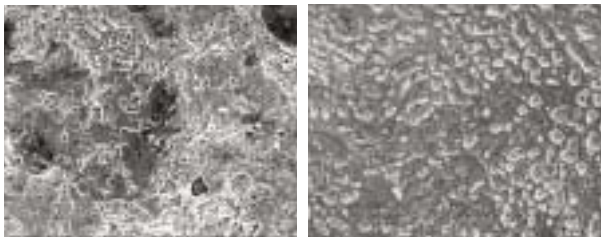
[그림 10]은 접촉 단자를 20배율로 확대한 것으로 ⓒ와 ⓓ부분에서 용융된 흔적을 발견하였다. [그림 10]의 (b)는 ⓒ부분을 확대한 것으로 접촉 단자 부분이 높은 열에 의해 용융된 것을 알 수 있다. 접촉 단자 대부분이 검게 그을려 있으나 실제 용융된 부분은 [그림 10]의 (a)에서 알 수 있듯이 ⓒ와 ⓓ부분인 것으로 나타났다. ⓒ부분은 접점 부분으로 열에 강하도록 재료가 되어 있는 부분으로 용융된 흔적으로 보아 순간 높은 열이 발생하였던 것으로 판단된다. (b)에서와 같이 확대를 해서 보면 접촉면에서 용융된 것을 확인할 수 있다. ⓓ부분은 단자 지지대와 연결된 부분으로 접촉 단자가 움직일 수 있도록 기계적으로 연결된 고리이다. 이 부분에서 용융된 흔적이 발견되어 기계적인 접촉이 불량했었음을 확인할 수 있다. 따라서 접촉 단자가 휘어진 것으로 보아 접촉이 불량한 상태가 되어 장시간 축열되었던 것으로 판단된다.

(a) 정상 제품 (b) 사고 제품

■ 그림 11. 스위치의 단자 지지대의 주사전자현미경 사진

[그림 11]은 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 2차 전자 이미지를 출력한 것으로 (a)는 단자 지지대의 정상 부분을 나타낸 것이고, (b)는 사고 제품으로서 [그림 8]의 (b)에 있는 ⓐ부분의 표면을 분석한 것이다. (a)는 제품이 제작될 때 나타나는 줄무늬 형태의 표면이 나타나는 것을 확인하였다. (b)는 사고 제품로서 표면은 열에 의해 표면이 산화 반응을 일으켜 변형된 조직을 확인할 수 있으며, 표면에 열적 영향이 많았던 것으로 판단된다. 스위치의 단자 지지대 부분은 에너지분석기(EDX)에 의해 분석해 보면 CuK line과 ZnK line이 나타나는 것을 알 수 있었으며, 정상 상태에서의 비율은 구리(Cu)가 약 62.95%, 아연(Zn)이 약 37.05%로서 황동인 것으로 나타났다. (b)의 경우에는 정상 상태와는 달리 탄화되어 주변의 OK line과 CK line이 나타나는 것을 확인하였고, 성분비는 탄소(C)가 약 19.52%, 산소(O)는 약 14.92%, 구리(Cu)는 약 18.23%, 아연(Zn)이 약 47.33%인 것으로 분석되었다. 따라서 표면 조직은 열에 의한 탄화와 부식 등 산화 반응이 진행되었던 것으로 판단된다.

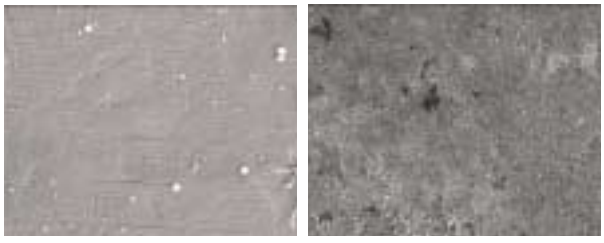
[그림 12]는 [그림 10]의 ⓒ부분에 대한 분석으로 정상 부분과 사고 제품을 2차 전자 이미지로 비교한 것이다. (a)는 정상 부분으로 표면이 불규칙하게 고루 분포되어 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 이 부분은 성분 분석(EDX)에 의해 OK line과 AgL line이 참여한 것으로 나타났다. 성분비는 산소(O)가 약



(a) 정상 제품 (b) 사고 제품

■ 그림 12. 스위치의 접점의 주사전자현미경 사진

11.00%, 은(Ag)이 약 89.00%인 것으로 나타나 접점은 대부분 은으로 된 것을 확인하였다. (b)는 사고 제품의 접점 부분으로 표면에 크고 작은 기포가 전체적으로 분포되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 사고 제품의 성분 분석을 통해 성분의 참여 정도를 분석하면, 정상 상태에서는 나타나지 않았던 SnL line이 나타났고, 성분비는 산소(O) 15.95%, 은(Ag) 59.66%, 주석(Sn) 24.39%인 것을 확인하였다. 이는 열적 영향에 의해 산화 반응한 것으로 판단되며 주석은 은 코팅이 열에 의해 벗겨지면서 내부의 주석이 드러난 것으로 판단된다.

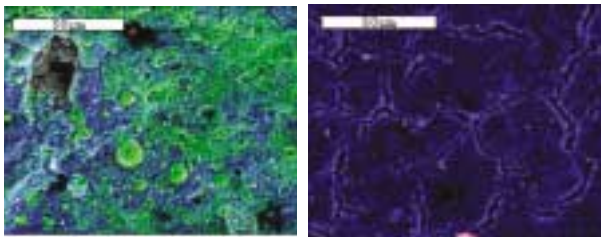


(a) 정상 제품 (b) 사고 제품

■ 그림 13. 스위치의 접점 주변의 주사전자현미경 사진

[그림 13]은 접점 주변에 있는 금속을 분석한 것으로 (a)는 정상 상태의 것이고, (b)는 사고 제품이다. (a)는 정상 상태의 표면으로 제작시 사출되어 나타나는 줄무늬 형태가 확인되었으며, 성분 분석을 통해 CK line과 CuK line, AgL line이 나타나는 것을 확인하였다. 성분비를 보면, 탄소(C) 28.83%, 구리(Cu) 69.37%, 은(Ag) 1.80%로 은 성분은 극미량이 환원된 것으로 나타났다. (b)는 사고 제품으로서 2차 전자 이미지를 보면 대부분 정상 상태와는 달리 줄무늬 형태가 없어지고 표면이 거칠어진 것을 확인하였다. 성분 분석을 통해 CK line, OK line, CuK line, AgL line이 포함되어 있는 것을 알 수 있었다. 참여율은 탄소(C) 3.71%, 산소(O) 10.49%, 구리(Cu) 3.02%, 은(Ag) 82.77%인 것으로 분석되었다. 따라서 열적 영향에 의해 탄소와 산소가 산화 반응한 것으로 판단된다.

사고 제품의 사고에 의한 산화 특성을 분석하기 위해 사고 제품의 단로 스위치 접점과 접점 주변에 대한 성분에 대해 카메오(cameo)를 이용하여 성분 분포를 확인하였다. (a)는 접점 부분으로 파란색 부분은 주석(Sn)이며, 녹색은 은(Ag)이 분포되어 있는 것을 나타낸 것이다. 또한, 산소(O)는 극히 일부에서 빨간색으로 분포되어 있다. (b)는 접점 주변을 매핑한 것으로 구리(Cu)는 파란색으로 대부분을 차지하고 있으며 극히 일부분 균열된 부분에서 탄소(C)와 산소(O)가 있는 것을 확인하였다.



(a) 접점 (b) 접점 주변

■ 그림 14. 사고 스위치의 접점과 접점 주변의 카메오 성분 분포

4. 맺음말

접촉 불량이 발생한 옥내용 소형 스위치의 구조, 열화 및 소손 패턴, 열 특성, 단자부의 성분 분포, 절연 덮개 등을 과학적으로 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

가. 단로 스위치의 사고 패턴에 있어서 외형 변화는 좌측 첫 번째 단로 스위치의 열에 의한 변형이 확인되었고, 열의 진행은 단로 스위치를 중심으로 시작되었다. 또한, 사고 단로 스위치의 내부는 높은 열에 의한 영향으로 탄화된 것을 확인하였고, 대부분 검게 그을려 있으며 접촉 부위의 단자 부분이 용융되어 있었다.

나. 접촉 단자의 실체 확대를 통해 접촉단자 부분이 높은 열에 의해 용융된 것을 확인하였고, 이는 열 흔적의 형태로 보아 순간 높은 열이 발생하였던 것으로 판단된다.

다. 주사전자현미경에 의한 분석으로 사고 제품의 표면이 열에 의해 산화 반응을 일으켜 조직이 변형되었으며, 스위치의 단자 지지대의 성분 분포는 정상 상태의 경우 구리(Cu) 62.95%, 아연(Zn) 37.05%의 황동이었으며 사고 제품은 탄소(C) 19.52%, 산소(O) 14.92%, 구리(Cu) 18.23%, 아연(Zn) 47.33%로서 표면 조직은 열에 의한 탄화와 부식 등 산화 반응이 진행되었던 것으로 판단된다.

라. 접점 부분은 정상 상태에서 산소(O) 11.00%, 은(Ag) 89.00%로 구성되었고, 사고 제품은 산소(O) 15.95%, 은(Ag) 59.66%, 주석(Sn) 24.39%인 것으로 열적 영향에 의해 산화 반응한 것으로 판단되며 주석(Sn)은 은(Ag) 코팅이 열에 의해 벗겨지면서 내부의 주석이 드러난 것으로 판단된다.

이상의 결론을 종합하면 조명 점등용 단로 스위치의 사고 원인은 외부의 영향으로 접촉 단자 부분에 물리적인 힘이 가해져 접촉이 불량한 상태에서 장시간 진행되다가 축열된 열에 의해 화재로 진전되었던 것으로 판단된다. 따라서 이와 같은 사고를 예방하기 위해서는 스위치를 설치하고 유지관리할 때 접촉 불량의 발생 유무, 미세한 잡음 발생, 불규칙적인 점멸 혹은 조도의 저하 등을 주의깊게 관찰하는 것이 중요하다.