

6.6kV급 케이블 중간접속부의 절연파괴 사고원인 분석과 실험 검증

김영석, 송길목, 정진수
한국전기안전공사 전기안전연구원

The Experimental Verification and Fault Cause Analysis of Breakdown on the 6.6kV class Cable Joint

Young-Seok Kim, Kil-Mok Shong and Jin-Su Jung
Electrical Safety Research Institute subsidiary of Korea Electrical Safety Corporation

Abstract - In this paper, we examined the faulted cable joint through the external form analysis, material analysis, experimental verification and it's cause diagnosis system. It was not observed the void, sharp material from the external form analysis and material variation. From the experimental verification, the thickness decrease of an insulator decreased ac breakdown strength suddenly and the breakdown traces of the insulator that was damaged by knife displayed elliptic shape. Thus, the faulted cable is assumed to accident that become dielectric breakdown by the deterioration of insulation performance that can happen when work.

1. 서 론

2002년부터 제조물책임법이 시행됨에 따라 전력설비(전력케이블, 변압기, 차단기 등)의 사고 사례에 대한 자료제공과 정확한 사고원인 규명을 위해서는 피해자, 제조업체, 관련기관 등에 객관적인 자료제공 시스템이 필요하다. 수용가 전기설비에서 사고가 발생했을 경우, 피해자 및 업체에서는 전력공급을 우선 시 하여 전력공급회사 및 전기안전관리자에게 연락을 취하여 복구하고 있다. 그리고 사고가 난 전기설비에 대해서는 필요에 따라 사고원인을 규명하거나 피해보상을 신청하는 경우가 발생하게 된다. 전기설비 사고원인에 대한 규명은 전문가를 통해 비공개적으로 진행하여 사고사례에 대한 데이터베이스가 충분하게 되어 있지 않다.

국내 및 국외에서 전기설비 사고에 대한 DB를 구축한 사례가 있으나, 일부 서비스가 제공되는 곳에서는 비공개되거나, 미국의 도블(Doble)의 경우는 유료화 서비스로 제공, 일본의 보안협회의 경우에는 보안문서로 등록되어 이용절근의 제한이 따르고 있다. 또한 PL단체 및 협회에서는 전기설비 사고보다는 전기제품, 자동차, 의료기기 등의 생활용품에 대한 PL사례를 제공하고 있다.

일반적인 고압 케이블의 사고원인으로는 케이블 자체의 보이드, 돌기, 이물질 등에 의한 원인과 케이블 시공 시 발생할 수 있는 틈의 발생, 칼집, 열 수축 불량 등의 원인과 공사 중 패임, 설치류 등의 환경적 원인을 들 수 있다[1][2].

본 케이블 사고는 고전압(6.6kV) 케이블 설치되어 운영되는 중장대가 발생하여 소손된 경우로서, 2008년 10월에 포설되었지만, 12월에 사고가 난 사례이며, 포설지역에서는 총 8개의 케이블 직선접속점이 있다. 그림 1에서 소손된 케이블은 케이블과 중간접속부에 절연파괴가 발생한 것으로 추정되며, 절연체에 구멍이 관측되었고, 내부도체가 패인 흔적이 발견되었다. 또한 같은 구간에 설치된 케이블 중간접속부의 차폐층이 절연테이프 틈으로 관측되는 사례도 있었다. 이에 소손된 케이블 접속부의 사고원인 규명을 위하여 외형분석, 재료분석을 수행하였고, 재현실험을 통해 사고원인을 검증하였으며, 전기설비사고처리시스템

에 DB화된 객관적 자료와 비교하여 원인규명을 실시하였다.

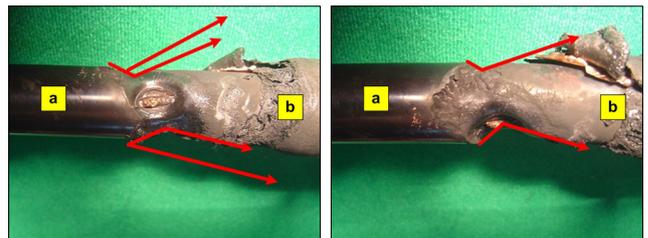
2. 본 론

2.1 외형패턴 분석

그림 2는 사고케이블과 중간접속부 사이의 탄화패턴을 나타낸다. 사진에서 알 수 있듯이, [a]부분에서 [b]부분으로 진행된 것으로 확인할 수 있다. 그림 (a)를 정면으로 정하여 보면, 깊게 파인 상태에서 그 기울기의 각도가 [a]부분이 크고, [b]부분은 완만한 것을 알 수 있다. 또한 [b]부분의 표면이 탄화되어 손상된 흔적이 발견되고, 이때 소손 부분에서의 방수테이프는 거의 확인되지 않았다.

따라서 케이블 전면에서 탄화 패턴이 일정하고 그 방향성과 패인 정도가 일정한 것으로 보아 절연파괴가 경계면에서 시작하여 접속부분으로 확산되는 경향을 보인 것으로 추정된다. 이러한 탄화패턴을 가지고 절연파괴를 발생시키는 경우는 크게 두 가지의 경우가 있다.

가장 큰 요인의 하나는 시공을 위해 절개 작업 시 절개면을 일정해야 되지만 일정하지 못하고 깊게 패인 경우 동차페 테이프와 반도체층이 일부 손상을 입게 된다. 이러한 경우 전계가 집중되어 지속적인 탄화가 이루어지다가 일정 시간이 지나면, 절연파괴가 발생하게 된다. 또 하나의 경우는 수분이 침투하여 절연을 저하시키는 경우이다. 이 경우 절연이 저하된 부분을 중심으로 절연파괴가 진행되는데 전면에 고른 탄화를 보인다. 본 케이블의 경우에는 첫 번째에 해당되는 것으로 추정된다. 두 번째의 경우에는 차수테이프의 색깔변화 등이 발견되어야 하는데 보이지 않았다. 이외에도 제조불량 등이 의심되므로 재료분석을 통해 확인할 필요가 있다.



(a) 정면 (b) 측면
그림 2. 사고케이블과 중간접속부의 탄화패턴

소손된 케이블을 분해한 것을 그림 3에 나타낸다. 분해된 내부의 경우 특히 부품을 테이프의 색깔이 백색으로 유지되어 있는 것으로 보아 수분침투는 되지 않은 것으로 추정된다. 이는 겨울



그림 1. 소손된 케이블 중간접속부

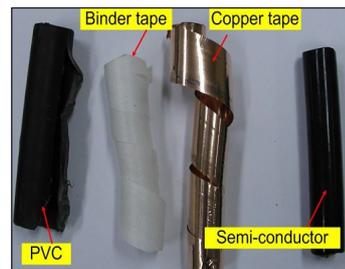


그림 3. 소손된 케이블 중간접속부의 분해

철 습도가 낮고 기온이 낮아 수분이 이동할 가능성이 낮아 침투되지 않았을 가능성이 높다.

그림 4는 엑스레이 분석을 통한 내부의 이물질질을 확인 여부를 나타낸다. 소손된 케이블 사고에서 동차페 테이프와 도전체의 구분이 확인하였으며, 중간접속부의 직선접속체에 의해 마무리된 케이블의 경우 각 부분별로 구분하여 보면 시공 시 바인드 작업이나 압착 슬리브의 상태는 매우 양호한 것으로 나타났다. 바인드의 조임상태도 양호하여 전계가 집중되어 전기적 영향을 받을 것으로는 보이지 않았다. 따라서 소손 케이블에서는 내부 금속과 편 등과 같은 이물질은 없는 것으로 확인하였다.

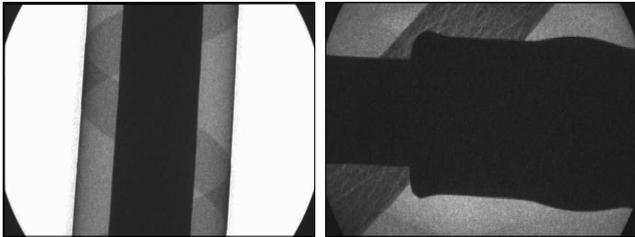


그림 4. 소손된 케이블의 X-ray 분석

2.2 재료특성 분석

그림 5는 시료 내도상의 돌기나 절연체 내부의 보이드 등을 관찰하기 위한 핫오일 방법을 나타낸다. 외도가 제거된 시료는 핫오일시험을 실시하며, 끓는점이 300℃ 이상 되는 실리콘유로 가열한 후, 이 가열된 실리콘 내로 외도가 제거된 케이블 시료를 담가놓아 절연체를 투명하게 만든다. 이 상태에서 시료를 관찰하여 내도상의 돌기나 절연체 내부의 보이드 등을 관찰한다. 절연체 내부결함 여부(케이블 하자 여부)를 알아보기 위해 핫오일시험을 실시한 결과, 사고시료에서 돌기, 함침, 보이드와 같은 특이사항은 발견되지 않아 케이블 하자에 의해 발생한 사고는 아닌 것으로 추정된다. 이후, 정밀기기를 이용한 절연재료의 특성적 변화는 관측되지 않았다.

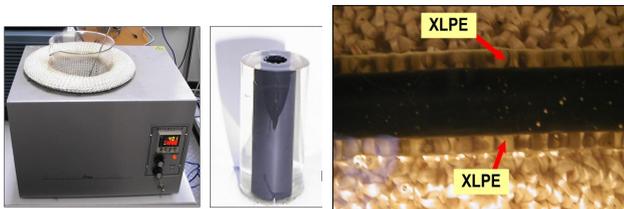


그림 5. 핫오일시험에 의한 XLPE

2.3 재현실험을 통한 검증

그림 6은 케이블의 시공 불량량을 모의한 실험의 개략도를 나타낸 것으로 시공 시 발생할 수 있는 칼집 처리에 대한 것이다. 시료를 제작하기 위해 케이블의 결점을 만들고 조립형 접속체를 이용하여 케이블 양쪽 끝을 중단처리 하였다. 절연체의 두께 감소는 1mm로 하였으며 시공 시 발생할 수 있는 부분인 반도전층이 끝나는 부분에 칼을 이용하여 절연체의 두께를 감소시켰다. 고전압 인가 실험은 IEEE Std 48-1996(R2003)의 기준에 따라 상용주파 건조내전압시험을 수행하였다[3]. 시료의 외부 동차페층을 접지시키고 도체에 교류 전압을 인가하였으며, 1kV/sec의 속도로 전압을 상승시켜 절연파괴가 발생할 때까지 인가하였다. 절연파괴가 발생하고 난후 시료를 분해 전·후 관찰하고 절연파괴 홀이 발생한 부분은 광학 현미경을 이용하여 관찰하였다.

그림 7은 케이블 중단부 시공시 칼집을 이용하여 반도전층을 벗길 경우 칼날이 반도전층 뿐 아니라 절연체 일부를 관통하여 발

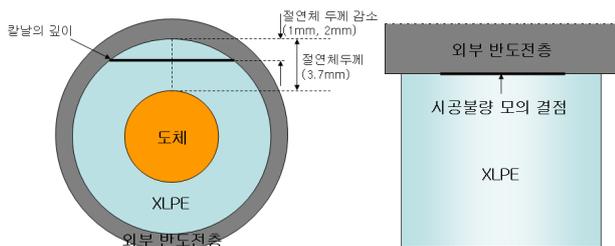
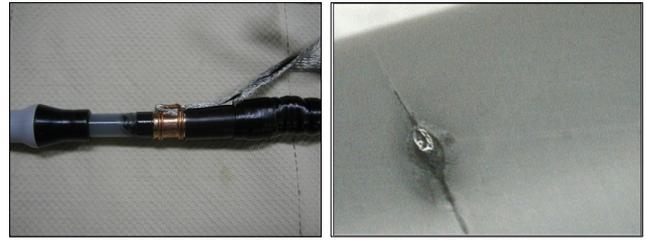


그림 6. 실험검증을 위한 시료제작

생한 시공불량량을 모의한 실험결과이다. 절연파괴는 칼에 의한 절단 부위를 따라 발생하였으며 형상은 타원형으로 나타났다. 절연파괴 전압은 43kV로 정상상태의 90kV보다 매우 낮게 나타났다. 따라서 시공시 칼에 의해 절연체가 손상되면 전계가 집중되어 절연파괴로 연결되므로 사고에 치명적임을 알 수 있다.



(a) 절연파괴된 부위 (b) 절연파괴 홀(hole)
그림 7. 케이블 시공시 칼집 모의 실험결과

그림 8은 구축한 전기설비사고 처리시스템(www.kesco-pl.com)을 이용하여 사고원인을 추정한 결과를 나타낸다.

자가원인 분석은 1차 진단으로 케이블 중간접속부를 선택하고 2차 진단으로 절연체 외형의 구멍이 발생한 경우, 3차 진단으로 도체가 패인 경우를 선택하였다. 자가원인 분석결과 케이블은 시공시 칼집에 의한 전계집중과 케이블과의 틈 발생으로 전계집중의 가능성, 빗물 및 수분침투 등에 의한 수트리 가능성이 각각 52%의 사고확률로 높게 나타났다. 이 중에서 본 케이블 사고의 경우 시공시 칼집에 의한 전계 집중으로 사고가 발생했을 것으로 추정되며, 실험검증한 결과와 유사한 것으로 판단된다.

자가원인분석		
1차 진단 케이블 사고 부위	2차 진단 절연체 외형	3차 진단 도전체 외형
Cable Joint	Surface Pit	Bead Notch
사고원인 내용은 일반적인 사고를 바탕으로 작성된 의견이며, 정확한 분석에 의해 사고원인은 달라질 수 있으므로 필요시에는 전문자에게 문의하시기 바랍니다.		
전단내용		
빗물 및 수분 침투, 케이블 내부의 수트리(Water Tree) 가능성		
52%		
시공시 칼집에 의한 전계집중 가능성		
52%		
케이블과의 틈(gap) 발생으로 전계집중 가능성		
52%		

그림 8. 소손된 케이블의 자가원인 분석 결과

3. 결 론

소손된 케이블 접속부의 사고원인 규명을 위하여 외형분석, 재료분석, 재현실험 및 케이블 사고 자가원인분석을 수행하였다. 소손된 케이블은 설치 후, 겨울철 온도변화에 따라 접속부의 수축현상이 관측되었으며, 이에 절연성능의 저하와 전계집중이 이루어졌을 것으로 추정된다. 또한, 사고부위가 케이블과 중간접속부 사이에서 발생하여 시공시 발생할 수 있는 칼집 등의 영향이 크게 영향을 미쳤을 것으로 추정되며, 부하량의 영향보다는 초기부터 누적된 절연성능의 저하에 의한 것으로 전철의 특성상 과도부하가 순간 걸리는 시점에서 발생하였을 것으로 판단된다. 따라서 일반적으로 발생할 수 있는 케이블 시공시 중간접속부의 절연성능 저하에 의한 절연파괴 사고로 추정된다.

[참 고 문 헌]

- [1] G.Katsuta et al, "Influence of Defects on Insulating properties of XLPE Cable, Proceeding of the 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, pp.485-489, 1991.
- [2] 강동식의 4인, "XLPE케이블의 전기트리 열화에 따른 전기적 특성 검토", 대한전기학회, Vol.49C, No.7, pp.400-406, 2000.
- [3] IEEE Standard Test Procedures and Requirements for Alterating-Current Cable Terminations 2.5kV Through 765kV, IEEE Std 48-1996(R2003)