

P-04

전력케이블의 고장사고 요인별 전기적 열화특성 연구

민치현, 광동순, 천현권, 최진욱, 박태수, 김영석*, 김선구*, 김상현
경상대학교 전기공학과 및 공학연구원, 한국전기안전공사 전기안전연구원*

A Study on the Electrical Degradation Properties according to Accident Factors of Power Cable

C. H. Min, D. S. Kwag, H. G. Cheon, J. W. Choe, T. S. Park, Y. S. Kim*,
S. G. Kim*, S. H. Kim

Department of Electrical Engineering, Gyeongsang National University and ERI,

**Electrical Safety Research Institute, Korea Electrical Safety Corporation*

1. 서 론

현재 전력케이블의 대표적인 절연재료로 사용 중인 XLPE(cross-linked polyethylene)는 절연 성능이 우수하고 가공이 비교적 용이하다는 장점을 가지고 있다. 반면 장기 과전압 및 수분, 또는 기타 요인들에 의해 쉽게 열화 되는 단점이 있다. XLPE 케이블은 제조 시 절연체 내에 불순물이나 보이드(void), 수분등과 같은 결함들이 존재할 수 있으며, 이러한 결함들은 트리(tree) 발생의 요인이 되어 케이블의 절연성능 저하에 치명적인 영향을 미친다[1]. 80년대 중반 이후 3중 압출 공정이 일반화되면서 불순물 유입이 감소하였지만, 이러한 주의에도 불구하고 제조공정상 불순물 및 보이드 등과 같은 결함의 존재를 완전히 차단하기는 어렵다. 이러한 결함들은 전계 및 열, 기계적 변형에 의해 부분방전과 트리(tree)열화 발생의 원인이 되고, 주로 두꺼운 고체절연물에서 나타난다[2]. 장기 사용 중 발생하는 전기 트리는 직경 수 μm 정도의 미세한 채널구조를 가지며, 고전계에서는 부시형(bush type)으로, 저전계에서는 가지형(branch type)으로 진전하는 경향을 보인다고 보고되어 있다. 이러한 장시간 트리의 성장으로 케이블 접속부 및 전력케이블의 고장사고의 원인이 된다[3].

본 연구에서는 XLPE 전력케이블의 고장사고 원인별 전기적 열화특성 분석을 위하여, XLPE 펠렛(pellet)을 압축·성형하여 순수 XLPE만으로 된 시료와 보이드 및 불순물을 포함한 시료 등 3 종류의 시료를 제작하고, AC 장기과전에 따른 XLPE의 전기적 열화 현상을 조사하였다.

2. 시료제작 및 실험방법

케이블 사고의 전기적 열화 관계를 도출하기 위한 가장 이상적인 시료는 케이블 자체라 할 수 있으며, 모든 실험결과는 결국 케이블에 적용하여 해석해야 하므로 다른 종류의 재료를 사용할 경우에 발생할 수 있는 문제점을 모두 해결하고 가장 이상적인 시험결과를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 그러나 실제 케이블을 가지고 전기적 열화에 대한 실험을 모의 한다는 것은 현실적으로 매우 어려운 문제이고 일정한 시간 내에 실험을 수행할 수 없기 때문에 XLPE 펠렛을 사용하여 자체 제작한 주형틀로 압축·성형하고 가교시켜 시편을 제작하였다. 가교과정은 주형틀에 XLPE 펠렛을 채우고 핫프레스(hot press)에서 180°C , 190kgf/cm^2 의 압력으로 15분간 압축·성형하고, 냉

각은 압력을 유지한 상태에서 30℃까지 수냉각 한다. 압력을 유지한 상태로 급냉각 하는 이유는 시료내부에 보이드가 형성되는 것을 방지하기 위함이다[4].

순수 XLPE 시편의 경우 위에서 제작한 시료를 가로 20mm, 세로 20mm, 두께 4mm로 잘라 제작하였다. 불순물을 포함한 XLPE 시편은 XLPE 가교 공정에서 Al_2O_3 를 혼합하였다. 또한 보이드를 포함한 XLPE 시편은 순수 시편의 한쪽 면에 침전극을 삽입하였다가 서서히 뽑아내어 1mm 길이의 보이드를 인위적으로 만들어 주었다.

이렇게 제작된 3 종류의 시편에 전기 트리를 발생시키기 위해 그림 1과 같이 침-평판 구조의 전극을 삽입하였고, 전극 사이의 간격은 2mm로 동일하게 하였다. 침전극은 바늘 삽입을 위한 취부금구를 제작하여 시료를 고정한 후, 열풍기로 시료의 온도를 90~100℃로 유지시킨 다음 서서히 바늘을 갭 길이 지점까지 삽입하고 상온으로 서서히 냉각시킨다. 이때 냉각도중 바늘이 밀려나 오는 것을 방지하기 위하여 시료와 전극의 경계를 에폭시 수지로 견고하게 유지하였다. 평판전극은 침전극 반대편에 실버페이스트를 얇게 도포하고 알루미늄 테이프를 접착시켜 제작하였다.

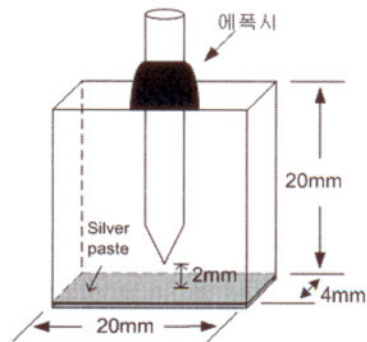


그림 1. 전기 트리 실험을 위한 XLPE 시편의 형상.

위와 같이 준비된 시료는 전압 인가 시 발생하는 연면방전을 방지하기 위하여 실리콘유에 함침 하였으며, 60Hz의 교류전압을 1kV/sec의 속도로 상승시켰다. 각 시료별 단시간 절연파괴 실험은 전압을 상승시켜 절연파괴 되는 순간의 전압을 측정하였고, 장기 열화 실험은 고전계영역 및 저전계 영역의 전압을 인가하여 절연파괴까지 도달하는 시간을 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

그림 2는 순수 XLPE 시편 및 불순물 포함 시편, 보이드 포함 시편의 인가전압에 따른 절연파괴 시간을 측정한 V-t 특성 곡선을 보여주고 있다. 일반적으로 역 n승의 법칙 ' $V^n \cdot t = \text{constant}$ '에서 수명지수 n 값을 구할 수 있으며, 고체 절연재료의 수명을 예측하는 척도가 된다. 일반적으로 n 값이 작을수록 내부방전 특성이 나쁘고, 동일한 수명을 주는 인가전압도 낮다고 보고되고 있다. 본 실험에서 순수 XLPE 시편의 경우 $n=12.2$, 불순물 포함 XLPE의 경우 $n=11.5$, 보이드 포함 XLPE의 경우 $n=9$ 로 조사되었으며, 순수한 경우보다 불순물이나 보이드가 포함되면 XLPE의 내부방전 특성이 나쁨을 알 수 있다. 특히 보이드가 XLPE 내부에 존재하는 경우 매우 취약함을 알 수 있다.

그림 3은 순수 XLPE 시편에 대한 단시간 절연파괴 흔적을 보여주고 있다. 초당 1kV씩 전압을 상승시킨 단시간 절연파괴는 29kV에서 절연파괴가 발생하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 단시간 절연파괴의 경우는 전극 간의 최단거리인 일직선상의 방전채널이 형성되어 절연파괴 되고, 방전채널 주변에는 트리 등의 열화 흔적이 보이지 않았다.

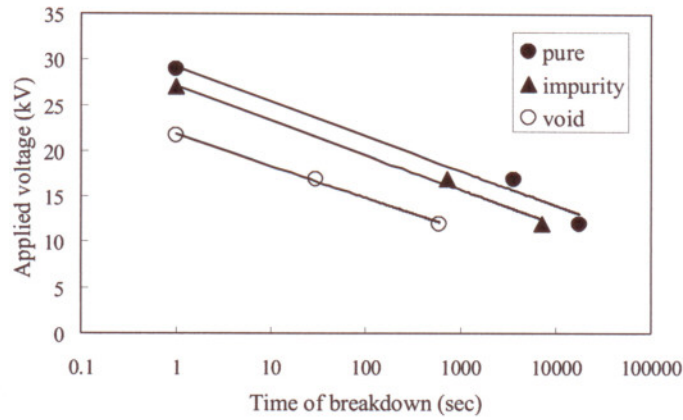


그림 2. 순수 XLPE 시편과 불순물 및 보이드 포함 XLPE 시편의 V-t 특성 곡선.

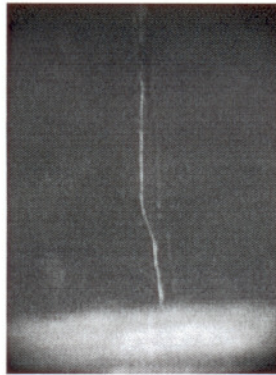


그림 3. 순수 XLPE 시편의 단시간 절연파괴 흔적.

한편 동일한 조건에서 단시간 절연파괴 전압의 60% 및 40% 지점을 택하여 17kV의 고전계와 12kV의 저전계를 시료에 인가한 경우의 장기 과전 열화흔적을 그림 4의 (a)와 (b)에 각각 나타낸다. 최초 목표 전압까지 인가한 후 일정 시간이 경과하면 부분방전열화에 의한 전로파괴가 발생하게 된다. 장기 과전한 경우는 침전극 선단에서 트리가 진전되어 가면서 전극 간의 최단거리인 방전채널이 형성되어 절연파괴 되고, 침전극의 선단 및 방전채널 주변에서 트리가 진전되어 가는 열화 흔적이 선명하게 보였다. 그림 4 (a)의 고전계인가 시료에서는 침전극의 선단에 가느다란 전기 트리 채널이 집중적으로 분포하여 부시형 트리가 형성되었고, 그림 4 (b)의 저전계인가 시료는 몇 개의 채널이 점진적으로 성장하여 나뭇가지 형태인 가지형으로 트리가 형성되었다. 일반적으로 동일 시료 하에서 전기 트리의 형상 및 성장률은 인가전압, 주파수, 침전극 곡률반경 및 온도 등의 영향을 받으며, 침전극의 전계집중 부위에서 발생하는 전자·정공의 주입 및 이동에 의하여 생성된 트리채널의 가스 압력과 절연재료의 분자구조에 따른다. 본 실험 시 주파수 및 곡률반경, 온도 등은 일정하였고 변화된 영향을 준 것은 전압의 크기였다. 방전에너지가 큰 경우 고분자의 여러 취약한 곳에 에너지가 작용하여 다양한 채널을 발생시키게 되므로 부시형 전기 트리가 발생되지만, 인가전압이 낮은 경우에는 방전 에너지가 작아 고분자의 가장 취약한 부분에 작용하여 소수의 채널만을 발생시키게 되므로 가지형 전기 트리가 발생하는 것으로 사료된다. 그러나 그림 5에서 보여주는 것과 같이 하부전극인 평판전극에서 불평등 전계가 형성되는 경우는 방전채널이 전계가 집중되는 지점으로 휘어 들어가는 경향을 보여주었다.



(a) 고전계(17kV)



(b) 저전계(12kV)

그림 4. 순수 XLPE 시편의 장기 과전에 따른 고전계 및 저전계에서의 열화흔적 및 방전채널.



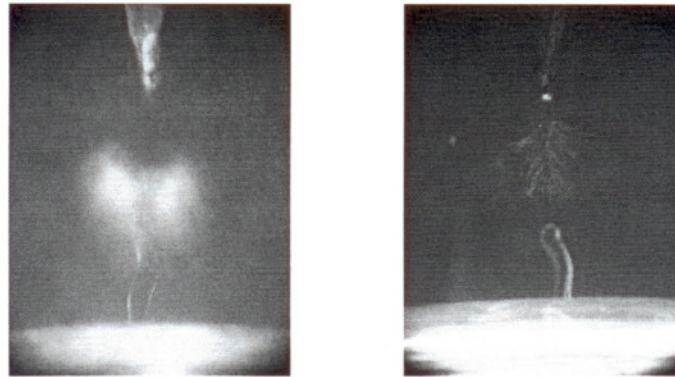
그림 5. 불평등 전계에서의 열화흔적 및 방전채널.

그림 6은 보이드를 포함한 XLPE 시편의 단시간 절연파괴 흔적을 보여주고 있다. 약 21.7kV에서 절연파괴가 발생하였으며, 방전 흔적에서는 순수 XLPE 시편과 유사하게 트리와 같은 열화 흔적이 발견되지 않았다. 다만, 인위적으로 제작된 보이드 끝단에서 방전이 시작됨을 알 수 있다.



그림 6. 보이드를 포함한 XLPE의 단시간 절연파괴 흔적.

보이드 포함 XLPE 시편의 고전계 및 저전계 영역에서의 각각의 열화흔적 및 방전채널을 그림 7의 (a)와 (b)에 각각 나타내었다. 장기 과전한 경우는 임의로 형성한 1mm 보이드 내부에서 부분방전 현상이 일어나고, 보이드가 끝나는 지점에서 방전채널이 형성되어 절연파괴 된다. 또한 침전극 선단 및 보이드 주변에 트리가 진전되어 열화 된 흔적을 볼 수 있다. 일반적으로 보이드가 전극 사이에 위치해 있을 때 부분방전이 일어나기 쉬운데, 그 이유는 가스공간은 고체보다 유전율이 낮으므로 전계가 집중되고, 고체보다 기체의 방전개시 전계가 낮게 형성된다.

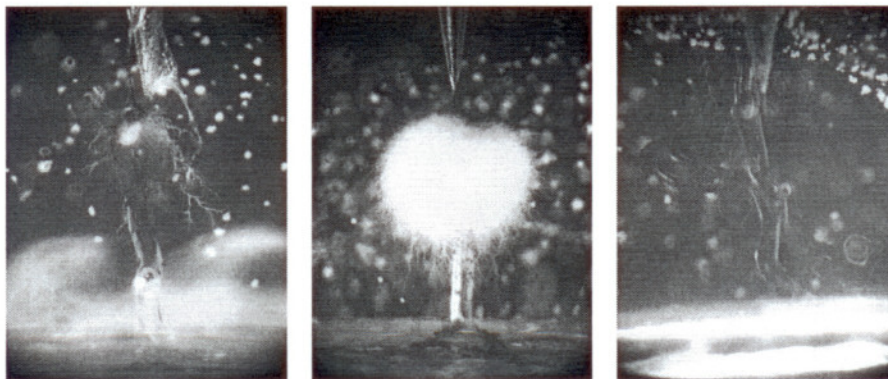


(a) 고전계(17kV)

(b) 저전계(12kV)

그림 7. 보이드 포함 XLPE 시편의 장기 과전에 따른 고전계 및 저전계에서의 열화흔적 및 방전채널.

그림 8은 Al₂O₃의 불순물이 포함된 XLPE 시편의 단시간 절연파괴 흔적 및 장기 열화 시의 열화흔적 및 방전채널을 보여준다. 그림 (a)의 단시간 절연파괴의 경우 절연파괴 전압은 27kV이고, 절연파괴 흔적에서는 불순물 입자를 통한 미세한 트리의 흔적과 방전채널을 확인할 수 있었다. 또한 동일 조건에서 장기 열화 실험을 한 시편의 경우 트리의 진전방향은 상부전극에서 하부전극으로 향하는데 불순물 입자를 향해 산발적으로 진전 된 것을 볼 수 있다.



(a) 단시간 절연파괴

(b) 고전계(17kV)

(c) 저전계(12kV)

그림 8. 불순물 포함 XLPE 시편의 단시간 및 장기 열화 시의 열화흔적 및 방전채널.

4. 결론

본 연구에서는 불순물 및 보이드가 XLPE의 절연열화에 미치는 영향을 조사하기 위해 순수 XLPE와 보이드 및 불순물 포함 XLPE 시편의 전기 트리 및 절연과괴 흔적을 비교하여 관찰하였다.

실험결과로서 순수 XLPE 시편과 비교하였을 때 불순물 및 보이드를 포함한 XLPE 시편은 전체적으로 절연내력이 감소하였으며, 전기 트리의 형성 및 진전에 있어서도 불순물 및 보이드가 영향을 미치고 있음을 확인하였다. 특히 절연체 내부에 보이드의 존재는 케이블 절연성능에 치명적임을 알 수 있었다.

XLPE의 제조 기술의 핵심은 불순물 및 보이드를 얼마나 배제시킬 수 있는가에 달려있다고 해도 과언이 아니다. 이를 위하여 절연재료의 성능 향상을 비롯하여 불순물 및 보이드를 배제할 수 있는 시스템과 검출 장치 등이 활발하게 연구·개발 되어야 할 것이다. 차후 케이블 사고와 관련한 연면방전 특성에 미치는 흠집 및 돌기, 불순물 등에 대한 연구를 진행할 계획에 있다.

본 연구는 산업자원부 전력산업기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 전춘생, "방전·고전압공학", pp.309-314, 동명사, (2001).
2. 강동식, 선종호, 이홍식, 박정후, 조정수, "XLPE 케이블의 전기트리 열화에 따른 전기적 특성 검토", 대한전기학회, Vol. 49C, No. 7, pp.400-405(2000).
3. N. Shimizu, Y. Shibata, K. Ito, K. Imai, M. Nawata, "Electrical Tree at High Temperature in XLPE and Effect of Oxygen", Conf. Electrical Insulation & Dielectric Phenomena, pp.329-331(2000).
4. 김상준, 한재홍, 송일근, 김동명, 이동영, 김주용, 이창용, "배전케이블 수명예측 기준결정 및 열화진단 시스템 구축-최종보고서", pp.391-406, 전력연구원, (1997).