

PL법 환경을 고려한 배전 케이블 종단부의 사고 유형 연구

(A Study on Accident Pattern of Distributing Cable Termination Considering PL Law Environment)

백승명* · 최재형** · 최진욱** · 김영석*** · 김선구*** · 김상현**

(Seung-Myeong Baek* · Jae-Hyeong Choi** · Jin-Wook Choi** · Young-Seok Kim*** · Sun-Gu Kim*** · Sang-Hyun Kim**)

창원전문대학 소방방재과* · 경상대학교 전기공학과 및 공학연구원** · 한국전기안전공사
전기안전연구원***

(Department of Fire Protection Engineering, Changwon College* · Department of Electrical Engineering,
Gyeongsang National University and Engineering Research Institute** · Electrical safety Research Institute,
subsidiary of Korea Electrical Safety Corporation***)

Abstract

This paper introduces experimental investigates of an accident pattern for the distributing XLPE cable terminations considering PL law environment. The influence of defects such as thickness and length decrease of XLPE, the impurity on XLPE and the gap between stress-con of housing and semi-conductor on insulating properties of the termination have been studied. The thickness and length decrease of XLPE decrease ac breakdown strengths. Dielectric breakdown traces of XLPE that is damaged by knife displayed other shape. The gap of between housing and semiconductor deteriorates dielectric strength of XLPE seriously.

1. 서론

제조물의 결함으로 인하여 발생한 손해에 대한 제조업자 등의 손해배상책임을 규정함으로써 피해자의 보호를 도모하고 국민생활의 안전향상과 국민경제의 건전한 발전에 기여함을 목적으로 각 산업분야에 PL법이 도입되고 있는 실정이다.

전기설비분야에서도 PL법이 시행이후 제조물 책임소송과 PL보험사고 발생건수가 해마다 증가되고 있으며 수용가에 전기를 공급하는 배전분야에서 전기사고 발생 시에는 고객의 불편사항의 우선처리에 따라 사고원인 조사 없이 전원을 공급하게 되며, 사고원인규명의 시간적·경제적 비용, 전력기기에의 PL적용 여부에 대한 인식이 부족한 것이 현실이다. 이런 현실에서 향후 동일한 사고가 발생할 경우 배전분야는 분쟁의 소지가 매우 높기 때문에 PL법 적용을 대비하여 정확한 사고원인 규명과 PL분쟁 해결의 사고 원인규명의 데이터베이스화가 필요하다.

배전설비의 한 부분인 지중배전선로의 고장형상을 살펴보면 외상에 의한 사고가 약 40%, 외상이외의 사고가 약 60%를 차지하고 있으며, 외상이외의 사고 60%에 대하여 케이블에서 약 30%, 접속재에서 약 70%의 사고가 발생하는 것으로 보고 되어 PL법을 대비하여 이에 대한 원인분석과 처리기준에 대한 데이터베이스가 필요한 실정이다[1],[2].

따라서 본 논문에서는 배전급 케이블의 정확한 사고원인 규명과 그에 따른 책임소재를 명확히 하기 위해 먼저 6.6kV급 배전 케이블의 종단부의 사고에 미치는 요소들을 분석하여 사고원인을 추정하였으며, 실제 사용되는 종단접속재와 케이블

을 이용하여 실제상황과 가장 근접하게 각 사고 요소를 포함한 모델을 제작하여 각 사고 요소가 케이블 종단부의 절연내력에 미치는 영향과 사고 형태에 따른 패턴을 정리하였다.

2. 본론

2.1 종단 접속시 시공불량 분석

케이블 종단 접속은 종단접속재를 이용하여 시공되고 종단 접속재는 조립형과 열수축형으로 나누어지는데 본 연구에서는 조립형을 이용하여 종단접속시공과 시공 중에 발생할 수 있는 전기적 결점 원인을 분석하였다.

조립형 종단접속재를 이용하여 6.6kV 케이블 종단접속 시 공공정을 단계별로 살펴보면 외피 박피→편조선 고정 후 동차 패 테이프 제거→반도전층 박피→터미널부 절연체 제거→절연체 세척→절연체 외면 실리콘그리스 도포→하이징 끼움→고압 테이프 감기→단자 압착→편조선 고정과 같다. 이 시공공정 중 전기적 결점이 발생할 수 있는 공정은 다음과 같다.

- A) 반도전층 박피
- B) 절연체 세척
- C) 하우징 끼움

여기서, 공정별 전기적 결점의 원인은 A) 반도전층 박피 공정에서 반도전층의 길이를 잘못 측정하여 박피하면 절연체의 길이가 짧아지고 또한 반도전층 박피할 때 절연체에 흠집이 생길 수 있다. B) 절연체 세척 공정에서 세척포에 의해 외부 반도전층이 녹아 묻게 되고 다시 절연체 표면에 묻어 불순물

의 역할을 할 수가 있다. C) 하우징 끼움 공정에서는 하우징의 스트레스콘과 반도체층과 겹치도록 끼워야 하지만 시공 중 겹치지 않으면 하우징의 스트레스콘과 반도체층 사이에 틈이 발생하게 된다.

따라서 위의 각 A), B) 및 C) 공정에 의해 발생하는 전기적 결점의 원인은 다음과 같다.

- a) 절연체의 길이 감소
- b) 흠집 발생에 따른 절연체 두께 감소
- c) 절연체 위의 불순물
- d) 하우징과 반도체층 사이의 틈

본 논문에서는 위의 원인에 대하여 절연특성 의존성과 사고 패턴을 조사하였다.

그림 1은 본 연구에 사용된 6.6kV 케이블용 조립형 종단점 속재와 조립이 완성된 종단부 단면을 나타낸다.

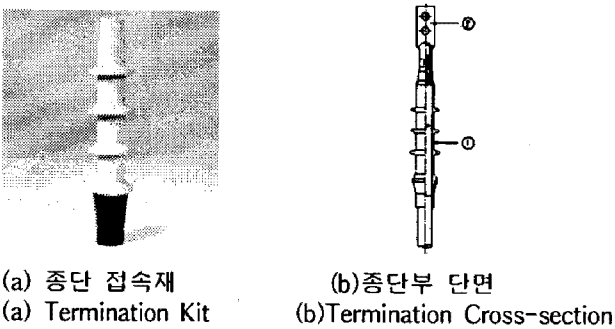


그림 1. 종단 접속재와 종단부 단면
Fig. 1. Termination Kit and Terminal Cross-section characteristics of address discharge (① : 절연하우징, ② : 터미널 러그)

2.2 시료 제작

케이블 종단부를 제작하기 위하여 사용한 케이블은 국내에서 제작된 6/10kV 트레이용 가교폴리에틸렌 난연 전력케이블(6/10kV TFR-CV 35SQMM×1C)로 절연체는 XLPE, 외피는 난연 PVC, 차폐층은 동테이프이고 내부·외부 반도체층으로 구성되어 있다. 절연체의 길이 감소는 하우징이 없는 경우와 하우징이 있는 경우를 나누어서 고찰하였다. 절연체의 두께 감소는 1mm와 2mm로 하였으며 시공상 발생할 수 있는 부분인 반도체층이 끝나는 부분에 칼을 이용하여 절연체의 두께를 감소시켰다. 그림 2에 두께를 감소시킨 부위와 방법을 나타내고 있다. 하우징과 반도체층 사이의 틈은 5mm와 10mm로 하였다.

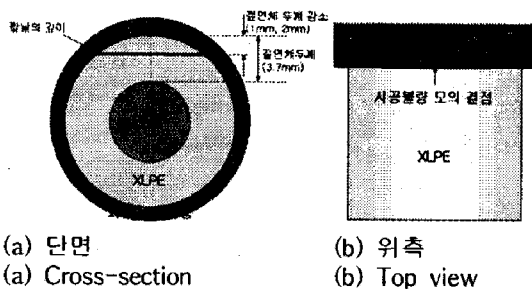


그림 2. 두께 감소
Fig. 2. Thickness decrease

표 1은 절연체의 길이 감소, 절연체의 두께 감소 및 하우징 스트레스콘과 반도체층 사이의 틈의 크기를 각각 나타낸다.

표 1. 결점 종류
Table 1. Kind of faults

길이 감소 (mm)		두께 감소 (mm)	불순물	틈 (mm)
하우징 없음	하우징 있음			
15, 45, 135	15	1, 2	반도체층, 동, 수분	5, 10

케이블의 전체길이는 교류(이하 AC) 전압 시험용은 80cm, 충격파(이하 IMP) 전압 시험용은 100cm 이고 케이블 양단에 결점 처리하여 종단재를 이용하여 종단처리 하였다. 그림 3에 결점을 가진 양쪽 종단 처리한 시료를 나타낸다.

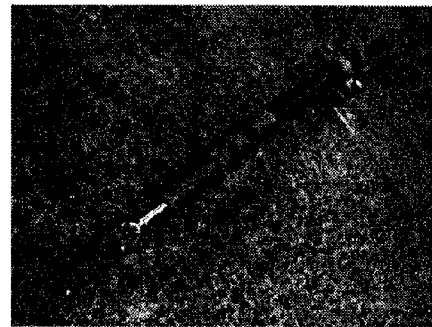


그림 3. 케이블 종단부 내전압 시험 시료
Fig. 3. Specimen for withstand test of cable terminal

2.3 실험 방법

각 결점을 가진 시료를 이용하여 외부 동차폐층을 접지시키고 도체에 AC, IMP 전압을 인가하였다. AC 전압은 1kV/sec의 속도로 상승시켜 절연파괴가 발생할 때까지 전압을 상승시켰으며 임펄스(이하 IMP) 전압은 28kV에서 시작하여 4kV씩 증가시켜 절연파괴가 발생할 때까지 단계별로 전압을 인가하였다. 절연파괴가 발생하고 난후 시료를 분해 전·후 관찰하고 절연파괴 홀이 발생한 부분은 광학 현미경을 이용하여 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 절연체 길이 감소 영향

그림 4는 다른 XLPE의 길이에 따른 절연파괴 전압을 나타낸다. 절연체의 길이가 길어짐에 따라 절연파괴 전압은 증가하다가 약 180mm부터는 매우 완만하게 증가하는 경향을 나타내었다. 반도체층의 길이를 잘못 측정하여 박피하는 경우 XLPE의 길이가 감소하게 된다. 15mm 감소하였을 때 종단점속재를 이용하여 케이블 양단을 종단처리하고 전압을 인가하였을 때 AC 전압 72kV, IMP 전압 84kV에서 각각 연면방전으로 절연파괴가 발생하였다. 이는 길이 감소가 없는 경우와 같은 전압 값이다. AC 전압을 인가한 경우 하우징의 하부에

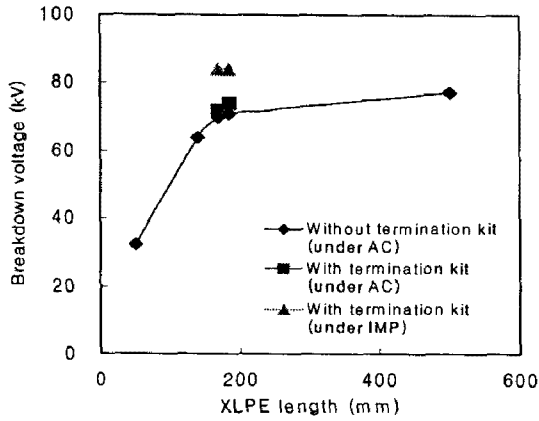


그림 4. 길이 감소에 따른 절연파괴 전압
Fig. 4. Breakdown voltage depend on length decrease

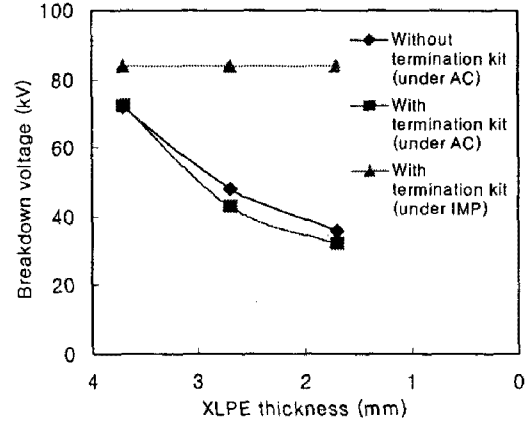


그림 6. 두께 감소에 따른 절연파괴 전압
Fig. 6. Breakdown voltage depend on thickness decrease

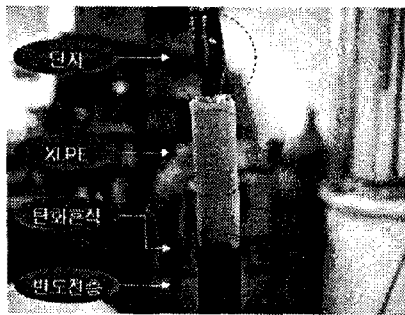


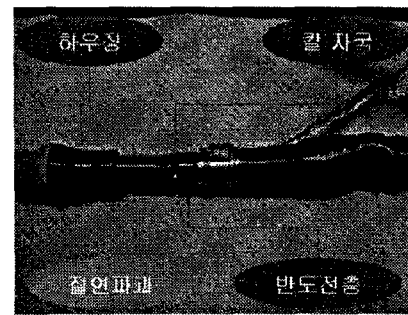
그림 5. 탄화 흔적
Fig. 5. Aging trace

부분방전 때문에 발생한 탄화 흔적이 관찰되었으며 IMP 전압을 인가한 경우 하우징을 덮은 부분의 절연테이프가 손상된 것이 관찰되는 시료가 있었다. 절연체의 길이 감소가 적을 때는 절연내력에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 본 연구에서는 수차례 반복 방전시험을 한 결과 종단접속재가 없을 때는 연면방전이 발생하다가 반도체층 끝부분에서 부분방전에 의해 관통파괴가 발생하는 것으로 나타났다. 종단접속을 완성하였을 때는 종단접속재의 표면을 타고 공기 중으로 연면방전만 발생하고 관통파괴는 발생하지 않았다. 그림 5는 연면방전에 의한 탄화 흔적을 나타낸다.

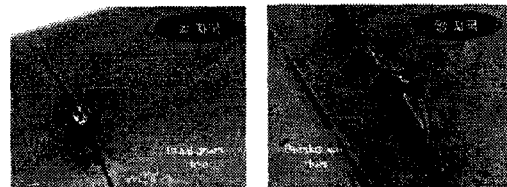
3.2 절연체 두께 감소 영향

반도전층을 박피할 때 사용하는 칼에 의해 절연체가 손상되어 두께가 감소할 경우 1mm 감소할 때 AC 전압에서는 평균 44kV, 2mm 감소할 경우에는 평균 32kV에서 절연체의 관통에 의해 절연파괴가 발생하였다. 절연체의 감소가 없는 경우 평균 72.5kV AC 전압에서 연면방전으로 절연파괴가 발생하는 것을 비교하였을 때 절연파괴 전압의 감소가 매우 크게 나타나고 방전의 형태도 다른 것으로 관찰된다.

절연파괴 홀은 칼자국을 따라 타원 형태로 발생하였다. 결합이 없을 때 원의 형태를 나타내는 것과 비교했을 때 매우 큰 차이를 나타내는 특징이라 할 수 있다. IMP 전압을 인가한 경우 두께 감소의 영향 없이 공기 중 연면방전으로 절연파괴가 발생하였다. 그림 6은 두께 감소에 따른 AC와 IMP 전압 하에서 절연파괴 전압을 나타낸다.



(a) 절연파괴 위치



(b) 1mm

(c) 2mm

그림 7. 두께 감소에 따른 절연파괴 위치 및 홀의 형상
Fig. 7. Breakdown position and breakdown hole shape depend on thickness decrease

3.3 틈의 영향

종단접속 시공 중 하우징의 하단부의 검은 부분과 반도체층은 겹치도록 시공하여야 하지만 케이블의 제작, 운반 및 작업 중 케이블 절연체인 XLPE의 형상이 완전 원이 아니고 타원형상으로 변형되어 하우징이 잘 끼워지지 않는 경우가 발생할 수 있다. 이처럼 하우징의 아래쪽 검은 부분과 반도체층이 겹치지 않고 사이에 틈이 발생하였을 때를 모의하여 틈이 5mm와 10mm인 종단접속을 한 시료를 제작하여 AC와 IMP 전압을 인가하여 절연특성을 고찰하였다.

5mm 틈을 가진 시료에 교류전압을 인가한 경우에 시료는 틈 부분에서 부분방전이 급격히 발생하여 42kV 전압에서 반도체층과 XLPE가 만나는 지점에서 절연파괴가 발생하였다. 10mm의 틈을 가진 시료도 42kV 전압에서 절연파괴가 발생하였으며 절연파괴 구멍은 반도체층에서 약 1.5mm 떨어진 지점에서 발생하였다. 따라서 틈이 발생하면 AC 전압을 인가한 경우에 부분방전에 의해 XLPE가 심하게 열화 되어 탄화되고 절연파괴 전압이 매우 낮아 틈이 없는 경우보다 53%의 낮은 절연내력을 가지게 된다.

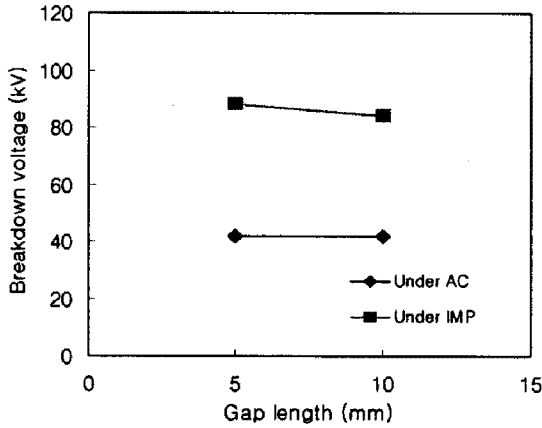


그림 8. 두께 감소에 따른 절연파괴 전압
Fig. 8. Breakdown voltage depend on thickness decrease

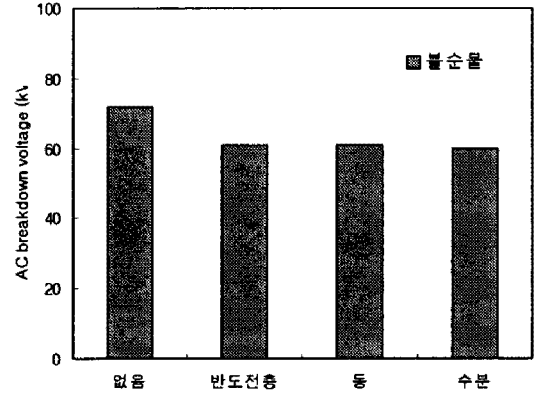
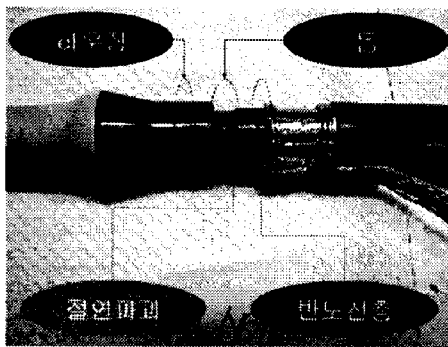
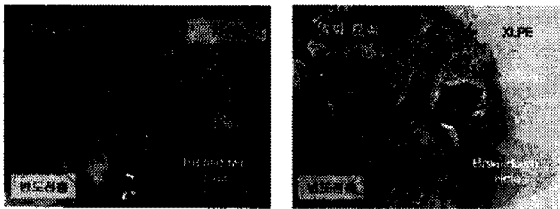


그림 10. 절연파괴 전압에 대한 불순물 영향
Fig. 10. Breakdown voltage depend on impurity



(a) 절연파괴 위치



(b) 5mm (c) 10mm

그림 9. 틈에 따른 절연파괴 위치 및 구멍의 형상
Fig. 9. Breakdown position and breakdown hole shape depend on gap

IMP 전압을 인가하였을 때는 하우징의 표면을 따라 공기 중으로 연면방전 형태로 절연파괴가 발생하였으며 절연파괴 전압은 틈이 없는 경우와 오차범위 안에서 유사하게 나타났다. 따라서 IMP 전압에서는 틈의 영향이 없음을 그림 8을 통해 알 수 있다. 알 수 있다. 그림 9에 틈 5mm와 10mm 일 때 절연파괴 구멍과 흔적을 나타낸다. 구멍은 둥근 형상이고 열화는 반도체층과 홀 사이에서 심하게 발생하였다.

3.3 불순물의 영향

본 연구에서는 불순물이 절연 특성에 미치는 영향 AC 전압 하에서 종단 접속재가 없는 경우로 제한하여 고찰하였다. 불순물이 없는 경우 72kV의 절연파괴 전압을 나타내고 불순물이 있는 경우 반도체층 61kV, 동 61kV, 수분 60kV의 절연파괴 전압을 각각 나타내었다. 절연파괴는 반도체층에서 불순물을 따라 도체로 이어지는 경로로 발생하였다. 불순물이 존재하는 경우 약 15%의 절연내력이 저하되는 것을 알 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 PL법 환경을 고려하여 배전급 케이블의 사고 시 그 원인을 명확히 하기 위하여 배전급 케이블 중 6.6kV 급 케이블을 이용하여 조립형 종단 접속재를 이용하여 케이블 종단부 시공하는 경우 발생할 수 있는 사고 유형을 분석하여 결점을 도출하고 그 결점에 따른 절연특성을 고찰하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 조립형 종단 접속재를 이용하여 케이블을 종단 처리하는 경우 반도체층 박피, 절연체 세척 및 하우징 끼움 공정에서 절연체의 길이 감소, 흠집 발생에 따른 절연체 두께 감소, 절연체 위의 불순물 및 하우징과 반도체층 사이의 틈 등의 시공상 결함이 발생할 수 있다.
2. 절연체 길이 감소의 경우 종단접속재를 환성하였을 경우에 절연내력저하는 거의 나타나지 않았다. 절연체 두께 감소의 경우 AC 전압 하에서는 절연내력이 크게 낮아지고 2mm 감소한 경우 44%의 낮은 전압에서 절연파괴가 발생하였다. 절연파괴 구멍은 타원의 형태로 다른 결점과 비교되는 절연파괴 흔적을 나타내었다.
3. 반도체층과 하우징 하단부 사이에 틈이 발생하는 경우 AC 전압에서 부분방전에 의하여 XLPE가 심하게 열화 되었으며 결점이 없는 시료의 약 53%에 해당하는 절연내력을 나타내었다.
4. 불순물은 도전성 물체이면 약 15%의 절연내력 저하를 나타냈으며, 연면방전 형태로 절연파괴 흔적을 관찰하기 힘들었다.

본 연구는 지식경제부 전력산업기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

(1) 유양근 "지중케이블 접속재", 전기설비지, 2001년 10월호.
(2) Billing, J.W., 1984, "Examination of Thin Tape Produced from Extruded Cable Insulation", 4. Int. Conf. Dielec. Matr. Mesa. and Appl., Lanchester U.K.