

XLPE 케이블의 비등방성이 가지는 전기·기계적 특성

조대희 이상진 김영호 박완기

LG 전선 전력연구소

The Effect of Angular Anisotropy in XLPE Insulation on Dielectric Strength

Dae-Hee Cho, Young-Ho Kim, In-Ho Lee

EPR & TC

Abstract

최근 초고압 케이블 절연체로 XLPE(가교 폴리에틸렌)이 널리 사용되어 지면서 XLPE의 여러 물리 화학적 특성에 따른 절연 성능에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이러한 XLPE 절연층은 제조과정에서 압출과정을 거쳐 도체를 감싸게 되는데 이 과정에서 흐름 패턴으로 나타나는 비등방성(anisotropy)을 띠게 된다. 본 논문에서는 초고압 XLPE 케이블에서 시계 방향으로 나타나는 비등방성(anisotropy)이 나타내는 기계-전기적 특성을 인장강도(tensile strength), 트리 개시전압 및 개시시간을 측정된 결과를 토대로 고찰해 보았으며, 이러한 비등방성이 초고압 XLPE 케이블의 절연 성능에 영향을 주는 인자로 고려되어야 함을 알 수 있었다.

Key Words : angular anisotropy, XLPE power cable, tree initiation time, tree initiation voltage

1. Introduction

가교 폴리에틸렌(XLPE)은 높은 전기적 파괴 전압과 기계적-열적 특성이 우수하여 최근 초고압 케이블의 절연체로써 널리 사용되고 있다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 가교 폴리에틸렌은 높은 전기적 스트레스에 일정시간 놓여지게 될 경우 전기 트리라는 메커니즘을 통해 절연 파괴가 일어나게 된다. 이러한 절연 파괴를 야기시키는 가설에 대하여 아직 명확한 정리가 이루어진 예는 없으며 다음과 같은 두 가지 가설이 유력하다.

첫째, 열적-전기적 스트레스에 의한 XLPE 특성의 변화가 케이블 절연체의 수명 저하를 가속시킨다. 둘째, 보이드 및 이물과 같은 결함이 부분방전(PD)의 시발점으로 작용하며 이러한 부분방전이 전기 트리의 발생을 야기시킨다[1,2].

이러한 절연 파괴를 유발하는 전기 트리의 발생 원인에 대한 가설 외에 최근에는 몇몇 연구자들이 절연체의 압출 과정에서 일반적으로 형성되는 흐름 패턴(flow pattern)에 대해 관심을 보이고 있다[1,3]. 이러한 흐름 패턴은 압출헤드로부터 발생하는 흐름의 히스토리로서 압출기에서 도체를 둘러싸는 두개의 흐름이 모아지는 과정에서 발생한 비등방성 특성을 뜻한다. 하지만 아직까지 이러한 흐

름 패턴이 XLPE 케이블의 절연 특성에 유해한 것인지에 대한 연구결과가 발표된 예는 없다. 다만 몇 가지 흐름 패턴과 전기적 파괴 실험 결과와의 관계에 대한 연구 결과를 살펴보면 다음과 같다. Tanaka 및 Greenwood는 20kV급 폴리에틸렌 절연 케이블 단면의 트리시험 결과 트리 진전 방향과 흐름구조 사이에 상관관계가 있다는 연구결과를 발표하였다[3]. 1995년 발표된 Jicable[1] 자료에 의하면 90kV급 XLPE 절연 케이블에 대한 화학구조적인 분석결과 흐름 구조의 시계방향에 따라 결정화도의 변화가 나타났으며, 비등방성이 상대적으로 낮은 영역인 3시와 9시 방향의 파괴강도가 비등방성이 분명한 12시, 6시(용융상태의 XLPE가 주입되고, 다시 모아지는 영역) 방향에 비해 약간 더 높게 나타났다.

본 연구에서는 케이블 절연체의 시계 방향에 따른 비등방성과 전기 절연 특성과의 상관관계를 조사하고자 트리 개시 전압 및 시간을 측정하였다. 이러한 전기 트리 시험을 수행하는 데 있어 케이블 절연체에 바늘을 삽입할 때 발생하는 기계적 스트레스는 트리 개시를 가속시키는 중요한 변수가 될 수 있으므로 이를 최소화하기 위해 needle-to-needle 전극 구조를 채택하였다[4-5]. 또

한 방위각에 따라 나타나는 비등방성과 기계적 강도와와의 관계를 알아보기 위해 시계 방향에 따른 인장강도(tensile strength) 시험을 수행하였다.

2. Experimental

본 연구에서는 건식 가교된 154kV 송전용 XLPE 케이블을 사용하였다. 먼저 시계방향에 따른 기계적 강도를 측정하기 위해 두 개의 케이블에 대해 덤벨 시편을 준비하였다. 이때 시계방향에 따른 흐름 패턴은 그림 1과 같이 시편의 중앙에 위치하도록 하였다. 그림 2(a)에 초고압 케이블의 단면에 나타나는 흐름 패턴을 나타내었다.

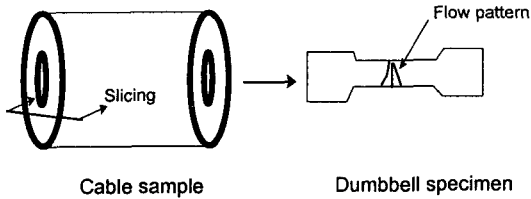


Fig. 1. Sample preparation for tensile strength test.

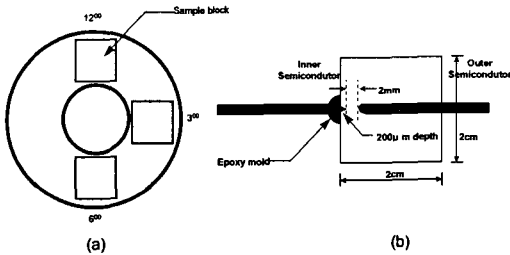


Fig. 2. (a) Flow pattern of the XLPE cable insulation. (b) Shape of a sample for tree initiation test.

케이블을 도체와 수직으로 두께 3cm로 슬라이싱을 한 후, 가로 세로 2cm의 정사각형 모양의 커터로 시계 방향(3시, 6시, 12시)에 따라 자른 시편에 그림 2(b)와 같이 침을 삽입하여 트리 시험을 수행하였다. 이때 사용된 전극 구조는 침 삽입 과정에서 발생할 수 있는 기계적 스트레스를 최소화하기 위해 ASTM D-3756 방법을 이용하였다. 두 개의 바늘을 사용하였는데, 상부전극은 침선단의 반지름이 $5\mu\text{m}$ 이며 하부전극은 $20\mu\text{m}$ 반지름을 갖는 침을 사용하였다. 전기 트리는 항상 전기장장의 세기가 집중되는 바늘 끝으로부터 발생되므로 침을 삽입하기 전후의 침의 상태가 매우 중요하며, 따라서 침 삽입 전후의 침 선단의 상태를 고배율의 현미경으로 관찰하여 이물이나 침선단이 망가진 경우를 선별

해야만 한다. 침과 침 사이의 간격은 특별히 고안된 바늘 삽입기와 광학 현미경을 사용하여 $2\text{mm} \pm 5\mu\text{m}$ 를 유지하도록 삽입하였다.

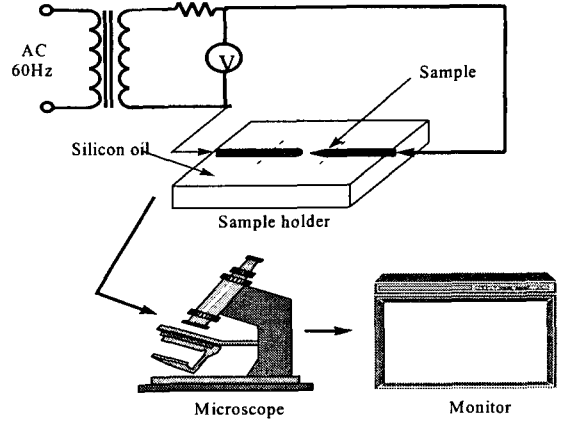


Fig. 3. Experimental setup for tree initiation test.

그림 3에 트리 개시 시험 장치를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 광학 현미경에 CCD 카메라를 설치하여 모니터를 통해 트리 개시 여부를 관찰한다. 이때 인가 전압은 60Hz의 A.C 전압을 초당 1kV의 상승 속도로 증가시키며, 트리 개시와 동시에 전압인가를 중지하고 이때의 전압을 트리 개시 전압으로 기록한다. 절연체의 수명을 예측하기 위한 V-t 시험은 24kV의 전압을 인가한 상태에서 트리 개시가 관찰 되었을 때의 시간을 측정하였다.

Basic theory of Weibull Distribution

절연체에 대한 전기 트리가 발생하는 전압과 파괴 시간을 얻는 시험은 조건을 동일하게 함에도 불구하고 비교적 넓은 편차를 보인다. 따라서 이렇게 분산된 값들을 분석하기 위해서는 통계학적 기법을 활용해 정량화하는데, 이때 이용되는 방법이 Weibull 분포이다[6]. 트리 개시 전압 및 시간에 대한 Weibull 함수를 Eqn. 1 및 2에 각각 나타내었다.

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\theta_t}\right)^{\beta_t}\right] \quad \text{Eqn. 1}$$

$$F(V) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V}{\theta_V}\right)^{\beta_V}\right] \quad \text{Eqn. 2}$$

where,

r : radius of needle tip

d : distance between two electrodes

βV : shape parameter of tree initiation voltage

θV : scale parameter of tree initiation voltage

βt : shape parameter of tree initiation time

θt : scale parameter of tree initiation time

3. Results and discussion

시계 방향(3시/6시)에 따른 인장 강도(tensile strength) 측정 결과는 2.2~2.76kg/mm²의 비교적 넓은 분포를 보였으며 3시 방향의 인장 강도가 6시 방향의 값보다 높은 결과를 보였다. 각각의 케이블 시편에 대해 측정된 인장 강도의 최대, 평균, 최소값을 그림 4에 나타내었다.

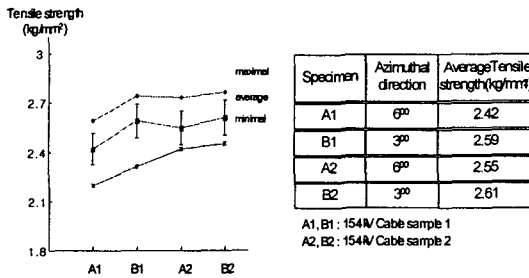


Fig. 4. Tensile strength as the azimuthal direction.

이러한 결과로부터 비등방성이 높은 영역의 기계적 강도가 상대적으로 낮은 비등방성을 보이는 영역보다 낮음을 유추할 수 있다.

지금까지 알려진 여러 전기적 절연 강도 시험 방법 중 침대침 전극을 이용한 트리 시험은 가장 널리 이용되고 있는 방법 중 하나이며, 본 연구에서도 시계 방향에 따른 절연 강도를 측정하기 위하여 당사의 초고압 생산라인에서 제조된 케이블 시편에 대한 침대침 전극을 이용한 트리 개시 시험을 수행하였다.

그림 5.에 비등방성에 따라 나뉘어진 3개의 영역에 대한 트리 개시 전압 시험 결과를 Weibull 분포로 나타내었다. 또한 표 2.에 방위각에 따른 영역별 트리개시 시험으로부터 얻어진 형상 파라미터(βv)와 스케일 파라미터(θv)를 나타내었다. 각각의 시험(트리개시 전압, 시간)에는 영역별로 50 ~ 70개의 시편에 대한 시험을 수행하여 얻어진 데이터의 신뢰성을 높일 수 있었다.

그림 5.로부터 각 영역에 대한 트리 개시 전압은 26kV ~ 50kV 까지 넓게 분포하고 있음을 알 수

있다. Table 2.에 나타낸 바와 같이 비등방성이 높은 6시와 12시 방향의 스케일 파라미터(θv)는 서로 유사한 값을 보임과 아울러 상대적으로 낮은 비등방성 영역(3시 방향)보다 약간 높은 값을 보임을 알 수 있다. 따라서 이러한 결과만으로는 비등방성이 높은 영역의 절연 강도가 그렇지 않은 영역에 비해 낮다고 보기는 어렵다.

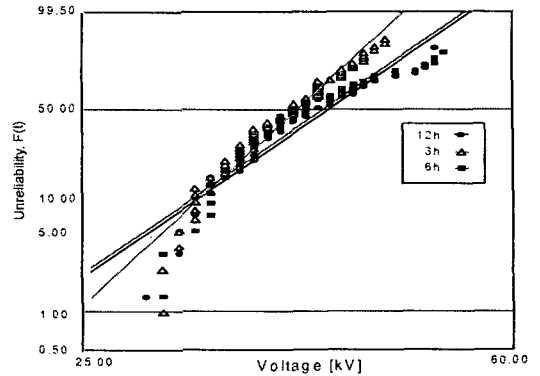


Fig. 5. Electrical tree initiation voltage in short time test.

Table 2. Parameters from the short time test.

Sample Group	βv	θv
12시	6.39	43.3
3시	9.23	39.9
6시	6.39	42.7

where, βv : shape parameter, θv : scale parameter

하지만, 여기에서 주목할 것은 상대적으로 낮은 비등방성을 보이는 영역(3시 방향)의 형상 파라미터(βv)가 다른 두 영역에 비해 현저히 높다는 점이다. 이러한 결과는 비등방성이 높은 영역에서 트리 개시 전압에 있어 상대적으로 보다 큰 편차를 보이는 지점이 많다는 것을 의미한다.

그림 6.과 Table 3.에 방위각에 따른 영역별 트리 개시 시간 시험(V-t) 결과에 대한 Weibull 분포와 형상 파라미터 (βt)를 각각 나타내었다.

Table 3. Parameters from the V-t test.

Sample Group	βt
12시	0.54
3시	0.73

where, β : shape parameter

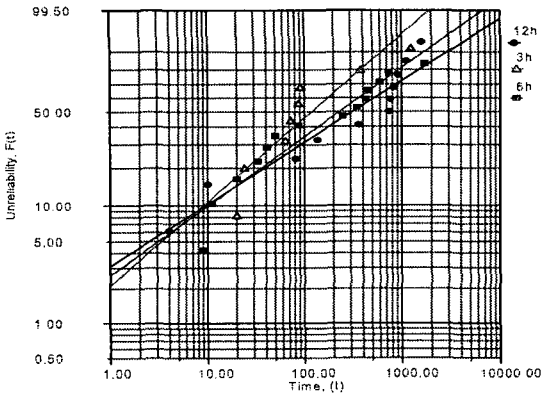


Fig.6. Electrical tree initiation time in V-t test.

Table 3.에서 알 수 있듯이 V-t 시험 결과에서도 트리 개시전압 시험결과와 유사하게 3시 방향에서의 형상 파라미터가 높은 결과를 보였다.

아래 Eqn. 3.에 나타난 바와 같이 트리 개시전압에 대한 형상 파라미터(βv)는 개시 시간에 대한 형상 파라미터(βt)와 수명지수 n 을 계수로 하여 서로 비례하므로, 각각의 영역별 형상 계수를 통해 수명지수 n 을 구할 수 있다.

$$\beta v = n \beta t \quad \text{Eqn.3}$$

앞서 얻어진 형상 파라미터와 Eqn. 3. 을 이용하여 얻어진 각 영역별 수명 지수 n (life exponent)을 Table 4.에 나타내었다.

Table4. Life Exponents(n) from the parameters.

Sample Group	12시	3시	6시
n	11.8	12.6	10.7

비등방성이 상대적으로 낮은 영역(3시 방향)의 수명지수 n 이 그렇지 않은 영역(6시, 12시 방향)에 비해 상대적으로 높은 값을 가지는 결과를 보였다. 비록 실 케이블에 비해 가혹한 조건에서의 시험인 관계로 여기에서 얻어진 값이 케이블 자체의 수명 지수라고 볼 수는 없으나 비등방성 영역별 상대 비교는 가능하다고 볼 때, 비등방성이 가장 높은 영역(6시 방향)의 수명지수가 낮은 비등방성을 보이는 영역(3시 방향)에 비해 약 2 정도 낮은 결과를 보임을 알 수 있다.

4. 결론

이상의 기계적, 전기적 특성 시험 결과로부터 다음

과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 흐름 패턴의 관점에서 살펴본 비등방성 영역(12시, 6시 방향)은 상대적으로 낮은 비등방성 영역(3시 방향)에 비해 인장 강도가 낮은 결과를 보였다

(2) 3시 방향의 형상 파라미터(βv)가 12시, 6시 방향의 형상 계수보다 훨씬 높은 값을 보였으며, 이로부터 비등방성 영역 내에 절연강도에 있어 큰 편차를 가지는 지점이 존재할 가능성이 높음을 알 수 있다.

(3) 시계 방향에 따른 비등방성 영역은 서로 다른 수명 지수를 보임을 알 수 있었으며, 특히 3시 방향에 비해 용융 XLPE가 모여지는 6시 방향의 비등방성 영역의 수명지수가 가장 낮은 값을 보였다. 이상의 결과로부터 초고압 XLPE 케이블의 비등방성이 전기, 기계적 절연 성능에 영향을 미침을 알 수 있으며, 따라서 기존에 알려진 절연체 결함(보이드, 이물, 돌기 등)과 아울러 비등방성 역시 XLPE 케이블의 절연 성능에 영향을 주는 인자로 고려되어야 함을 알 수 있다.

참고 문헌

- [1] Berdala J. et al., "A.9.1 Performances of XLPE under high voltages stress", 95 Jicable
- [2] M. Mammeri, C. Laurent, and J. Salon, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 1, Feb. 1995.
- [3] Toshikatsu Tanaka and Allan Greenwood, Advanced Power Cable Technology, Vol. II, 1983, pp. 32-33.
- [4] M. N. Arbab and D. W. Auckland, IEEE Proceeding, Vol. 136, Pt A, pp. 73-78, 1989.
- [5] E. David, J-L Parpal, and J. P. Crine, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 3, No. 2, April, 1996.
- [6] G.C. Montanari et al., IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 3, No. 1, February, 1996.