

초고압 전력케이블 절연체의 Flow Pattern에 따른 절연성능 고찰

이승엽, 김영호, 이상진, 김동욱, 최명규
LG전선(주) 전력연구소

Dielectric Strength According to Flow Pattern in EHV Power Cable Insulation

Seung-Yop LEE, Young-Ho KIM, Sang-Jin LEE, Dong-Wook KIM, Myung-Kyu CHOI
LG Cable Ltd.

ABSTRACT-Insulation layers in XLPE power cables may have some patterns generated in the manufacturing process. They are called 'flow patterns' and show flow history of molten polyethylene between inner and outer semiconducting layers. Flow patterns are even seen with naked human eyes and suspected to be inhomogeneity of insulation, weakening insulation performance. Investigated in this paper is electrical treeing resistance and ac breakdown strength according to flow patterns. Experiments of electrical treeing and ac breakdown strength by means of ramp tests were conducted using newly developed electrode system with point-to-plane structure and sphere-to-sphere structure, respectively. All results were analyzed with the application of statistics, showing little differences.

통하여 통계적인 방법으로 해석하였으며, 이를 토대로 각 방향에 대한 절연 성능을 비교하였다.

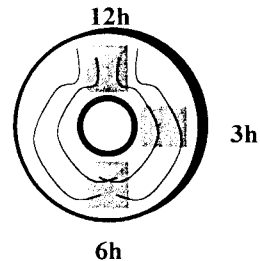


그림.1 케이블 절연체 내부에 형성된 Flow Pattern과 방향각에 따른 시료 채취 위치

1. 서 론

초고압 XLPE 케이블은 제조시 액상의 PE를 흘러보내어 절연층을 형성하게 되는데, 이때의 고온 액상 PE의 흐름은 케이블 제조가 끝나서 냉각된 이후에도 케이블 절연층에 남게 된다. 절연체 내부에 흰 띠 모양의 라인이 도체를 감싸듯 연속적으로 대칭되게 형성되는 이러한 이력을 Flow Line 또는 Flow Pattern이라 하며, 이는 압출기로부터 흘러 들어온 액상 원료의 흐름 이력(Flow History)을 나타내는 것으로 여겨진다.¹ 이러한 흐름 이력은 케이블을 길이 방향에 수직하게 절단한 단면(그림.1)으로부터 확인할 수 있으며, 원료가 주입된 방향(12h), 흘러간 방향(3h), 합쳐진 방향(6h)으로 각각 분류할 수 있다.

서로 다른 형태의 Flow Pattern은 케이블 절연체의 방향각에 대한 비등방성을 나타내는 것으로 여겨질 수 있으며, 이는 케이블 전체의 절연 성능의 평가에도 영향을 줄 가능성이 있으므로, 방향각에 따른 절연 성능에 대한 검토의 필요성은 높다고 할 수 있다.

본 논문에서는 전력 케이블 제조시 절연체 내부에 형성되는 Flow Pattern의 방향각에 따른 국부적인 절연 특성에 대한 비교를 하기 위하여 Ramp Test에 의한 전기 트리 개시 전압과 Constant Voltage Test에 의한 전기 트리 전진 길이를 측정하였다. 또한 일반적인 절연 성능에 대한 측정을 위하여 방향각에 따른 교류 절연 파괴치를 측정하였다.

측정된 데이터는 정규 분포 함수를 이용한 분산 분석을

2. 실험 방법

2.1 전기 트리 실험

전기 트리 실험을 위해 사용된 시료는 수직식 연속 가교 (Vertical Continuous Vulcanization, VCV) 설비를 사용하여 3중 동시 압출(Triple Common Extrusion) 방식으로 제조된 154kV급 전력 케이블 절연체에서, Flow Pattern의 방향각에 따라 12h, 3h, 6h 방향(그림.1)에서 채취된 케이블 슬라이스의 내외도를 그대로 유지한 채, 내도 쪽에는 고압부 침전극(Ogura, r=5μm)을 삽입하고 외도는 접지와 연결하여, 실제 케이블 내도 반도체 돌기 부분에 형성되는 전계와 유사한 방향 및 분포를 가지도록 제작하였다(그림.2).

침전극의 형성은 침전극과 절연 물질을 함께 물딩시킬 때 발생하는 열적, 화학적, 물리적 스트레스를 피하기 위해서, 침전극을 절연 물질 내부로 삽입하는 방법을 채택하였으며, 침전극을 삽입시키는 경우 외부로부터 가해진 힘이 절연 물질 내부에 기계적인 스트레스를 발생시킬 수 있으므로,² 고압부 침전극을 미세하게(200μm) 삽입시켜 침전극 삽입시 발생될 수 있는 기계적인 스트레스를 최소화시켰다.³

이를 위해 새로운 개념의 진일보된 구조의 전극이 고안되었는데, 제작된 전극 시스템은 고압부 침전극을 삽입시킬 때 편광 현미경을 이용하여 관찰하며 기계적인 스트레스가 발생하지 않는 범위 내에서 삽입을 완료하고, 그 상태 그대로 유지되도록 고정시켜, 삽입된 침전극이 움직이며 발생시키는 보이드나 크랙을 방지할 수 있는 구조를 가지는 전극 시스템이다.

전기 트리 개시 전압을 측정하기 위해서 Ramp Test(또는 Short Time Test) 방법을 적용, 승압률 1kV/sec로 전압을 인가하여 12h, 3h, 6h 각 방향에 대해 각 100회씩 총 300회의 실험을 수행하였고,⁴ 전기 트리 전진 길이를 측정하기 위해서 Constant Voltage Test 방법을 적용, 상기의 전기 트리가 개시된 시점에 10kV를 1시간 동안 인가하여 12h, 3h, 6h 각 방향에 대해 각 100회씩 총 300회의 실험을 수행하였다.

모든 시료의 준비 과정에서 고압부 침전극 선단 부위에 보이드나 크랙의 존재 여부를 광학/편광 현미경(Leica Q600)을 사용하여 사전에 확인하였으며, 전기 트리 개시 실험 과정에서 전기 트리의 발생 여부 또한 광학 현미경(Olympus SZ)과 CCD 카메라를 연결 사용하여 실시간으로 첫 채널이 발생되는 현상을 관찰하였다.

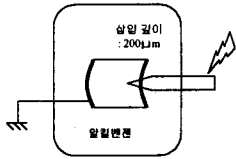


그림.2 전기 트리 실험

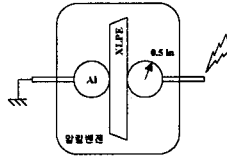


그림.3 교류 절연 파괴 실험

2.2 교류 절연 파괴 실험

전기 트리 실험에 사용된 것과 동일한 케이블에서 내도로부터 외도까지 두께 1mm로 채워진 절연체를 구-구 전극(Al, r=0.5 inch, 그림.3)과 Ramp Test 방법을 적용, 승압률 3.5kV/sec로 전압을 인가하여⁵ 12h, 3h, 6h 각 방향에 대해 각 100회씩 총 300회의 실험을 수행하였다.

3. 실험 결과 및 검토

3.1 전기 트리 개시 전압(ETIV)

Ramp Test에 의한 전기 트리 개시 전압(ETIV, Electrical Tree Initiation Voltage)의 결과를 [표.1]과 [그림.4]에 나타내었다. 12h, 3h, 6h 각 방향의 트리 개시 전압 분포를 분석하기 위하여 통계적인 기법을 적용하여, 귀무 가설 $H_0: \mu_{12h} = \mu_{3h} = \mu_{6h}$ 에 대해 신뢰 수준 95%로 t-검정 및 F-검정(ANOVA, Analysis of Variance)을 실시한 결과, $P=0.785 > 0.05$ 로 판명되었으므로 귀무 가설을 채택하여 각 방향별 ETIV는 $ETIV_{12h} = ETIV_{3h} = ETIV_{6h}$ 으로 차이가 존재하지 않음을 알 수 있다.

3.2 전기 트리 전진 길이(ETPL)

Constant Voltage Test에 의한 1시간 동안의 전기 트리 전진 길이(ETPL, Electrical Tree Propagation Length)의 결과를 [표.2]와 [그림.5]에 나타내었다. §3.1과 동일한 기법을 적용하여 분석을 실시한 결과, $P=0.014 < 0.05$ 로 판명되었으므로 귀무 가설을 기각하여 각 방향별 ETPL은 $ETPL_{12h} < ETPL_{3h} = ETPL_{6h}$ 으로 차이가 존재하는 것을 알 수 있다.

표.1 전기 트리 개시 전압의 결과[kV]

	N	Mean	StDev
12h	100	35.663	9.506
3h	100	35.863	9.175
6h	100	34.970	9.991
all	300	35.502	9.537

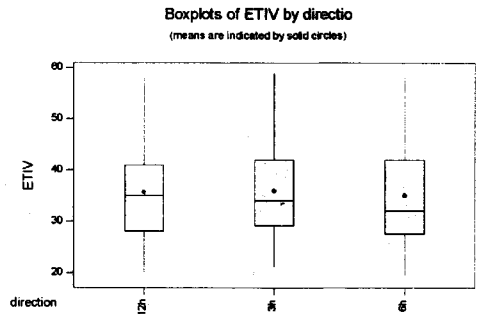


그림.4 전기 트리 개시 전압의 분포[kV]

표.2 전기 트리 전진 길이의 결과[μm]

	N	Mean	StDev
12h	100	84.24	35.59
3h	100	102.38	48.64
6h	100	97.16	45.14
all	300	94.59	43.12

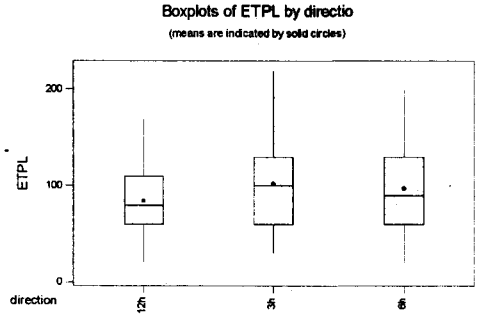


그림.5 전기 트리 전진 길이의 분포[μm]

표.3 교류 절연 파괴 강도의 결과[kV/mm]

	N	Mean	StDev
12h	100	50.487	2.940
3h	100	48.394	4.480
6h	100	50.154	3.290
all	300	49.725	3.693

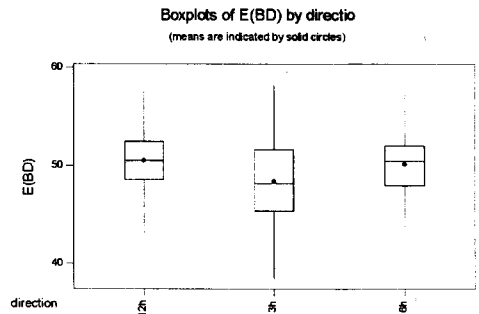


그림.6 교류 절연 파괴 강도의 분포[kV/mm]

Ramp Test에 의한 교류 절연 파괴 강도의 분포를 [표.3]과 [그림.6]에 나타내었다. §3.1과 동일한 기법을 적용하여 분석을 실시한 결과, $P=0.001$ (0.05 를 판명되어 귀무가설을 기각하여 각 방향별 교류 절연 파괴 강도는 $E(BD)_{12h} = E(BD)_{6h} > E(BD)_{3h}$ 과 같은 결과를 얻을 수 있다.

3.4 검토 및 분석

본 논문에서 분석에 적용된 통계적인 기법은 평균과 표준편차를 모두 고려하여 각 샘플의 모집단을 추정하는 방법으로서, 일반적으로 평균만 비교하는 방법에 비해 데이터의 분산 정도를 분석에 포함하기 때문에 신뢰도가 매우 높은 기법이다.⁶ [그림.4, 5, 6]의 Box-Plot은 각 데이터의 분포를 4등분하여 위 직선, 위 사각형, 아래 사각형 및 아래 직선으로 표현한 것으로서, 사각형 내부의 점은 각 집단 분포의 평균을 나타낸다.

Flow Pattern의 12h 방향은 압출시 외도 쪽으로부터 흘러 들어온 액상 PE가 내도 스크린에 부딪히며 기계적인 스트레스를 심하게 발생시킨 부분이고, 6h 방향은 좌우 대칭적으로 내도를 감싸듯이 흘러온 PE가 서로 합쳐지며 와류를 발생시켜 기계적인 스트레스를 심하게 형성시킨 부분인데 반해, 3h 방향은 액상 PE의 흐름이 비교적 안정된 균일한 부분으로서 상대적으로 작은 기계적 스트레스가 존재하는 부분이다.¹

§3.1의 결과는 Flow Pattern의 특징적인 세 방향에 대해 ETIV의 차이가 없음을 보여주는 것으로서, Flow Pattern이 케이블 절연체의 국부적인 절연 성능에 크게 영향을 주지 않음을 나타낸다.

§3.2의 결과는 각 방향별 ETPL의 차이가 존재함을 보여주며, 12h 방향은 3h와 6h 방향에 비해 단위 시간당 전기 트리의 진전 길이가 상대적으로 짧음을 나타낸다. 이는 발생된 전기 트리의 성장이 12h 방향에서 효과적으로 억제되고 있음을 의미하는 것으로 볼 수 있으며, 액상 원료의 주입 과정에서 전기적인 성능에 유리하도록 lamella 형태의 morphology가 형성될 수 있다는 주장에 비추어 설득력을 가진다. ETPL 결과의 또다른 특징은 각 집단별 표준 편차가 매우 크다는 것인데, 이는 성장된 전기 트리의 형태와도 무관하지 않은 것으로서, 본 실험의 경우(전기 트리가 발생된 직후 10kV를 1시간 동안 인가) 시료에 따라 트리형 및 부시형이 무작위로 발생하였는데, 이러한 현상이 전기 트리 길이의 편차를 크게 만드는 원인이라고 생각된다.

§3.3의 결과에서는 각 방향별 E_{BD} 의 차이가 존재하여 두께 1mm 시편의 교류 절연 파괴 강도는 12h와 6h가 3h보다 상대적으로 높다. E_{BD} 의 결과는 앞의 두 경우보다 각 집단의 표준 편차가 훨씬 작는데, 이는 실험상의 예러가 개입될 소지가 침전극을 형성하는 경우에 비하여 매우 적음을 보여주는 것이라 할 수 있다.

본 논문에서 얻어진 결과를 종합적으로 정리하면, Flow Pattern의 각 방향별 전기적인 성능은 어떤 특정한 방향이 모든 경우에 대하여 일반적으로 우수하거나 또는 그와 반대의 일정한 경향을 보이는 대신에 랜덤한 특성을 나타내는 것을 알 수 있다.

본 논문에서는 초고압 전력 케이블 절연체 내부에 형성되는 Flow Pattern의 방향각에 따른 전기 트리 개시 전압, 전기 트리 진전 길이 및 교류 절연 파괴 강도에 대한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다:

1. Ramp Test를 통해 얻어진 전기 트리 개시 전압은 평균적으로 약 35.5kV의 값을 가지며, 12h, 3h 및 6h 방향에서 차이를 보이지 않으며 분포한다.
2. Constant Voltage Test를 통해 얻어진 10kV/1hr.에서의 전기 트리 진전 길이는 평균적으로 약 94.6 μ m의 값을 가지며, 12h 방향보다 3h 및 6h 방향에서 큰 값을 가지며 분포한다.
3. Ramp Test를 통해 얻어진 교류 절연 파괴 강도는 평균적으로 약 49.7kV의 값을 가지며, 12h 및 3h 방향이 6h 방향보다 큰 값을 가지며 분포한다.
4. 전기적인 절연 성능을 평가하는 각 실험의 결과가 전체적으로 일정한 경향을 보이지 않고 랜덤하게 나타나는 것으로 미루어, Flow Pattern 방향과 전기적인 절연 성능은 별다른 상관 관계를 가지지 않는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 Flow Pattern의 특징적인 세 방향에 대한 전기적인 절연 특성만을 다루었으나, 향후에는 물리적, 화학적 및 기계적인 접근이 다각도로 이루어져 케이블 절연체의 방향각에 따른 품질 특성을 종합적으로 밝혀내는 시도가 필요하다고 여겨진다.

5. 참고 문헌

- [1] Fourmigue JM. et al., Performance of XLPE under high voltages stress, 95 Jicable Trans., pp. 231-235, 1995.
- [2] J. Griac et al., On the Compatibility of Single and Double Needle Tests for Treeing Resistance, IEEE Trans. EI, Vol. 17 N 4, pp. 356-358, 1982.
- [3] 이승엽 외, 전극 구조에 따른 전기 트리 개시 특성 비교, 대한전기학회 춘계 학술연구 발표회 논문집, pp.54-58, 1999
- [4] ASTM D149, ASTM D3756, IEC 1072
- [5] ASTM D149, USA, 1992
- [6] 박성현, 현대 실험 계획법, 민영사, 1999