

초고압 절연체 XLPE의 침전극에 따른 전계분포와 AC절연파괴특성

안병철, 홍진웅
 광운대학교 전기공학과

Electric Field Distribution and AC Dielectric Breakdown Properties according to Needle Electrode in EHV Insulators of XLPE

Byung-Chul An and Jin-Woong Hong

Department of Electrical Engineering, Kwangwoon University

Abstract : 최근 전력수요의 급증과 더불어 기기의 소형화와 경량화를 위해 고분자절연재료의 사용이 증가하였으며, 근래 들어 환경성의 문제가 거론되면서 반영구적인 절연재료의 요구가 급증하였다. 그로인하여 초고압 케이블의 절연체로서 가교폴리에틸렌이 사용되어지고 있다. 이에 본 논문에서는 초고압전력용 케이블에서 절연체로 사용되고 있는 가교폴리에틸렌(XLPE) 내부전계분포 및 파괴전압과의 상관관계를 알아보기 위해 케이블에 침 전극을 삽입하여 두께를 0.5, 1, 1.5[mm]변화시켜 파괴전계를 검출하였으며, 또한 와이브 해석을 통한 파괴전압의 척도파라미터를 검출하여, 시뮬레이션 인가전압으로 사용하였다. 시뮬레이션 경계요소법(BEM)을 이용한 3차원 전계해석 프로그램으로 조사하였다.

Key Words : EHV insulators, Electric field distribution, boundary elemental method, needle electrode, dielectric breakdown

1. 서 론

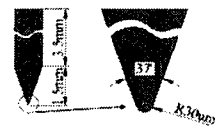
21세기에 들어오면서 전력케이블의 초고압화가 빠르게 진행되고 있으며 전력 전송을 위한 절연시스템의 고신뢰성이 요구되고 있다. 폴리에틸렌은 재료의 탁월한 전기적 성질을 가지고 있으며, 온도변화에 대한 타력성과 습기, 화학, 오존 등에 대한 특성이 우수하며, 저가인 재료이므로 전력Cable의 절연 및 외피 재료로 광범위 하게 사용된다. 또한 성형 및 그러나 저밀도 폴리에틸렌은 수분 등이 침투하면 장기간의 전기적 Stress에 의해 Crack이 발생하는 단점이 있다. XLPE는 저밀도 폴리에틸렌 (Low density Polyethylene : LDPE)에 가교제(DCP)를 혼합하여 가교설비로 LDPE를 가교시켜 폴리에틸렌 구조를 결합 상태(가교 상태)로 만들어 폴리에틸렌에 열경화성의 정탄성 성질을 부여한 재료로 고무 유황 처리와 비슷한 가교 과정에 의해 폴리에틸렌 분자는 가교 폴리에틸렌 (Cross-Linked Polyethylene : XLPE)이 되며 가교된 폴리에틸렌은 우수한 열적 특성 및 전기적인 성질이 개선된다^[1,2].

본 논문에서는 초고압 케이블의 절연체로 사용되고 있는 XLPE에 대하여 AC 파괴실험과 BEM(Boundary Element Method)를 이용한 시뮬레이션 프로그램을 사용하여 XLPE 두께 변화에 따른 절연층에서 전계분포를 측정하였다. XLPE 내부에 삽입한 침 전극의 두께를 조절하며 측정된 AC 파괴전압을 측정하여 얻은 결과를 와이브 분포 해석하여 파괴전압을 구하고 그 값을 Simulation program에 적용하여 각 두께에서 XLPE의 파괴 전계값을 구한 결과를 소개한다.

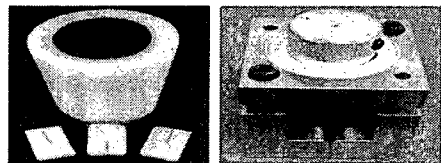
2. 실험

2.1 AC Breakdown Test

그림 1은 시료 및 전극삽입 틀을 나타내고 있으며, 그림 (b)는 154 [kV] 전력케이블이다. 케이블의 절연층을 16×40×30 [mm] 크기로 제작하였다. 또한 XLPE 내부에 삽입할 침 전극은 직경 1 [mm]인 텅스텐 재질의 바늘을 에칭법에 의해 침 선단 곡률반경 30 [μm]으로 조정하여 전극삽입 틀을 이용하여 시편내부에 두께를 0.5~2.0 [mm]로 조정하며 삽입하였다. 접지 측 전극은 내부 반 도전층에 도전성 테이프를 직접 접착하여 사용하였다.



(a) Needle electrode



(b) Insulators (c) Inserting tool

그림 1. 시료 및 전극삽입 장치

Fig. 1 Specimens and electrode device

AC파괴실험은 인가전압은 1~26 [kV]이며 전압인가 방식은 승압속도 1 [kV/s]로 step 법으로 인가한 후 파괴 시까지 전압을 승압하였으며, 코로나방전을 억제하기 위해 정도 1000 [cSt]의 실리콘오일 내에서 시행하였다^[3]. 각 두께에 따라 10회 이상의 파괴실험을 실시하여 최대 및 최소값을 제거한 후 나머지 데이터를 이용하여 와이블 해석을 하였다.

2.2 Simulation

BEM(Boundary Element Method) 이용한 'IES(Integrated Engineering Software)'사의 3D 시뮬레이션 프로그램 'Coulomb'을 사용하여 그림2에서와 같이 곡률반경 30 [μm]의 텅스텐 침전극과 시료형상을 만든 후 침전극을 시료 내부에 삽입, 절연층 두께를 0.5~1.5 [mm]로 되도록 설계한 후, AC파괴실험을 통하여 얻은 각 두께 별 파괴 전압값(주파수 60[Hz])을 전극에 인가하고 삽입된 침전극에서부터 접지까지의 전계분포를 조사하였다. 아래의 표1은 종류에 따른 비유전율과 전도도를 나타내고 있으며, 이들의 물성을 전계분포 조사에 이용하였다.^[4]

표 1. 시료물성

Table 1. Physical properties of specimen

material properties	air	W	XLPE	semiconductive layer
ϵ_r	1.006	1	2.4	2.782
σ [S/m]	1×10^{-14}	1×10^{17}	1×10^{-16}	5.8×10^{-15}

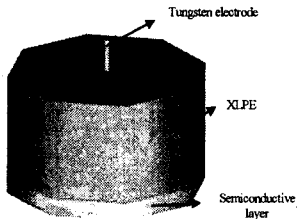


그림 2. 시뮬레이션의 전극형상

Fig. 2 Shape of needle electrode in simulation

그림 2는 시뮬레이션에 사용된 시료의 구조형상을 나타낸 것으로 2 [mm]의 반도체층을 포함하고 있는 지름 15 [mm] 높이 13 [mm] XLPE에 침전극곡률반경에 따라 삽입한 형상이고 30 [μm]~50 [μm]의 곡률반경을 가진 지름 1 [mm]의 텅스텐 침전극을 나타낸다. 인가전압은 AC파괴실험을 통하여 얻은 데이터를 기초로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 AC Breakdown Test

표 2는 두께에 따른 AC절연파괴실험을 나타낸 것으로 동

일조건하에서 10회 이상 측정된 데이터 중 최대 및 최소값을 제외한 값이다. 절연파괴전압을 AC파괴실험을 통해서 다음과 같은 결과값을 얻었다.

표 2. AC 파괴시험

Table 2. AC breakdown test

D [mm] \ Test	0.5	1.0	1.5
1	14	17	13
2	15	17	13
3	16	20	14
4	16	21	14
5	17	22	15
6	18	22	15
7	19	22	15
8	19	23	15
9	24	24	16
10	25	24	16
Avg.	16.4	21.2	14.6

이렇게 얻은 데이터들은 일반적으로 산만하게 분포되어 있기 때문에 통계처리를 하여 그 성질을 정량적으로 평가할 필요가 있다. 데이터 처리에 이용하는 확률분포는 와이블 분포, 정규분포, 지수분포, 감마분포 등 다수가 있다. 그 중 수명평가나 파괴통계에서는 정규분포나 와이블 분포가 많이 이용되고 있다. 이 실험에서는 고전압기기 열화통계에 가장 많이 쓰이는 와이블 분포를 사용하였다. 와이블 분포는 '최약점파괴확률분포'라고 불리며, 그 누적확률분포는 확률변수 X의 실험값을 x라고 하면

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x - x_1}{x_s}\right)^m\right] \quad (x \geq x_1)$$

$$= 0 \quad (x < x_1)$$

로 표현되고 확률변수 X의 실험값이 x이하로 되는 확률이 F(x)인 것을 의미한다. 여기서 x_1 , x_s , m는 각각 위치 parameter, 척도 parameter, 형상 parameter로 불려지고 있다. x_1 은 이 값 이하에서는 절대로 절연파괴 등의 현상이 발생하지 않는다고 말할 수 있는 하한값이다. x_s 는 누적파괴율 63.2%에 상당하며, 평균적인 파괴강도 대응하고 있다. 예를 들면, 시료에 전압 V를 인가할 때의 누적파괴확률 F(V)가 와이블 분포에 따른 때에는 최저파괴전압으로 하여 다음 식으로 표현한다.

$$F(V) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V - V_1}{V_s}\right)^m\right] \quad (V \geq V_1)$$

$$= 0 \quad (V < V_1)$$

실험을 통하여 얻어진 데이터가 이 와이블 분포에 따른다고 가정하여 V_1 , V_s , m를 추정한다. 간소화를 위해 위치 p를 0($V_1=0$)으로 하여 V_s , m의 값을 추정한다. 데이터를 파괴전압이 작은 순으로 나열하고, 다음에 i번째의 데이터 V_i 에 대하여 다음 식으로 계산하여 누적확률 F_i 를 대응시켜

표를 작성한다.

$$F_i = \frac{i}{n+1} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

여기서 n은 데이터 수이다.[5] 작성한 표를 와이볼 확률지에 플로트한다. 이 데이터 점에 대하여 직선으로 적용하고, 그 직선의 기울기로부터 형상parameter(m)을 그 직선과 $F=63.2\%(V=VS$ 로 될 때의 F값)을 교차하는 점 E의 값으로부터 척도 parameter를 얻는다.[5]

표3은 와이볼 해석에 의한 척도parameter값을 나타낸 것이다.

표 3. 두께변화에 따른 인가전압

Table 3. Applied voltage according to thickness

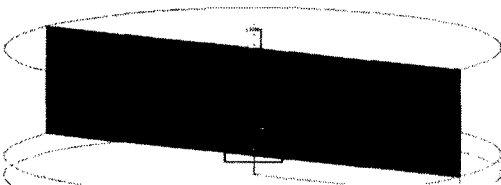
D[mm]	0.5	1.0	1.5
V_s [kV]	15.4	18.6	23.18

AC파괴실험을 통하여 평균 파괴전압은 0.5 [mm]일 때 16.4 [kV], 1.0 [mm]일 때 21.2 [kV], 1.5 [mm]일 때 14.6 [kV]을 각각 얻었고 이 데이터를 와이볼 분포해석하여 얻은 파괴전압은 0.5 [mm]일 때 15.4 [kV], 1.0 [mm]일 때 18.6 [kV], 1.5 [mm]일 때 23.18 [kV]을 얻었다.

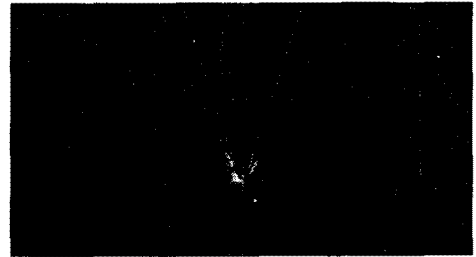
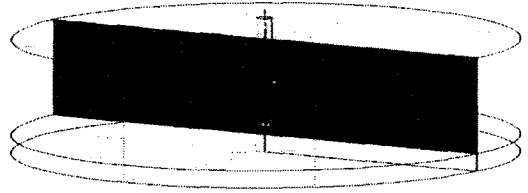
실제 파괴평균전압과 예측 파괴전압의 차는 각각 0.5 [mm]일 때 1 [kV], 1.0 [mm]일 때 2.6 [kV], 1.5 [mm]일 때 23.18 [kV]을 얻었다. 실제 평균전압과 예측 파괴전압의 편차는 0.5 [mm]일 때 0.707, 1.0 [mm]일 때 1.84, 1.5 [mm]일 때 6.06으로 변화하였다. 두께의 증가는 절연층 내부에 불순물 존재확률을 높여주고, 이로인한 절연층의 캐리어 밀도를 증가시키기 때문이라고 생각되어진다.

3.2 Simulation

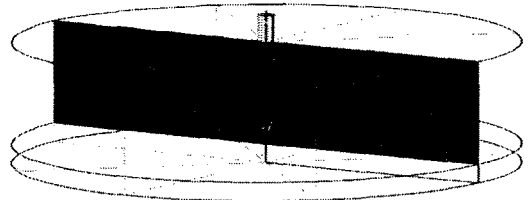
그림 3은 절연층 두께에 따른 전계분포 Contour와 침전극 선단주변의 전계분포 Contour를 확대하여 분석한 것을 도시하였다. 대부분의 전계값이 침전극 선단에서 나타나며 그림 (a)는 절연층 두께가 0.5 [mm]일 때의 전계분포로 침단부의 전계는 $1.012E+02 \sim 1.265E+02$ [kV/mm]의 분포를 나타내었고 그림(b)는 절연층두께 1.0 [mm]일 때의 전계분포로 침단부의 전계는 $1.275E+02 \sim 2.012E+02$ [kV/mm]의 분포로 증가하였으며, 그림 (c)는 절연층 두께를 1.5[mm]로 증가시키울 때 침단부의 전계분포로 침단부의 전계가 $1.435E+02 \sim 2.869E+02$ [kV/mm]로 더 증가한 것을 볼 수 있다.



(a) 0.5 [mm]



(b) 1.0 [mm]



(c) 1.5 [mm]

그림 3. 두께에 따른 전계 Contour

Fig. 3 Contours of electric field due to thickness

그림 4는 두께에 따른 파괴 전계값을 나타내는 그래프이다. 절연층두께 0.5 [mm]일때의 침선단 전계값은 69.5 [kV/mm], 절연층하부(반 도전층계면) 전계값은 2.22 [kV/mm]로 나타났다. 절연층두께 1.0 [mm]일때의 침선단 전계값은 72.8 [kV/mm], 절연층하부(반 도전층계면) 전계값은 2.01 [kV/mm]로 나타났다. 절연층두께 1.5 [mm]일때의 침선단 전

계값은 73.0 [kV/mm], 절연층하부(반 도전층계면) 전계값은 1.99 [kV/mm]로 나타났다.

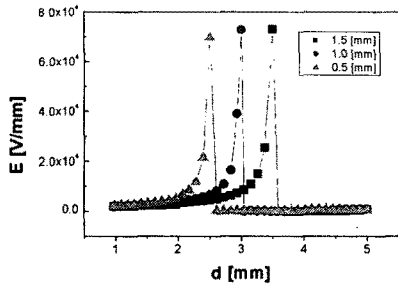
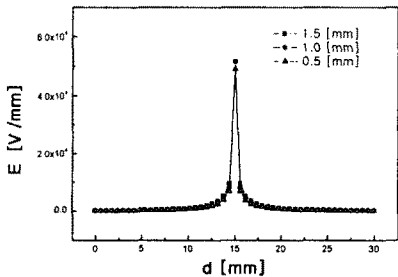
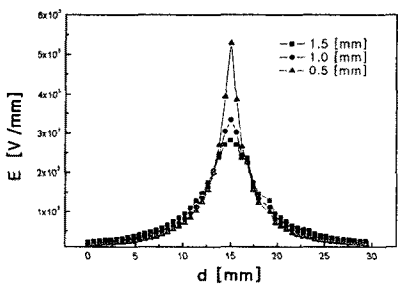


그림 4. 절연층 두께에 따른 수직 전계값
Fig. 4 Vertical electric field values due to Insulator thickness



(a) needle tip



(b) bottom surface

그림 5. 절연층두께에 따른 수평 전계값
Fig. 5 Horizontal electric field values due to Insulator thickness

그림 5는 침선단과 절연층하부에서의 전계분포를 나타내는 그래프이다. 침선단 선단에서의 전계값은 대부분 침선단 전극 중심으로 대칭적인 분포를 보이고 있다.

표4는 침선단 부분의 파괴 전계값을 나타낸 것으로 전계값은 대부분 침선단 선단에서 집중되어 나타나며 평균 73.35×10^3 [V/mm] 크기에서 XLPE의 절연파괴가 이루어

지는 것을 알 수 있었다.

표4. 침 선단에서의 파괴 전계값

Table 4. Breakdown electric field value at needle tip

D[mm]	0.5	1.0	1.5
E[V/mm]	6.95×10^4	7.28×10^4	7.30×10^4

4. 결론

초고압 절연체 XLPE의 침전극에 따른 전계분포와 AC 절연파괴특성의 실험 결과는 다음과 같다.

AC파괴실험을 통하여 평균 파괴전압은 0.5 [mm]일 때 16.4 [kV], 1.0 [mm]일 때 21.2 [kV], 1.5 [mm]일 때 14.6 [kV]을 각각 얻었고 이 데이터를 와이볼 분포해석하여 얻은 파괴전압은 0.5 [mm]일 때 15.4 [kV], 1.0 [mm]일 때 18.6 [kV], 1.5 [mm]일 때 23.18 [kV]을 얻었다.

실제 파괴평균전압과 예측 파괴전압의 차는 각각 0.5 [mm]일 때 1 [kV], 1.0 [mm]일 때 2.6 [kV], 1.5 [mm]일 때 23.18 [kV]을 얻었다. 실제 평균전압과 예측 파괴전압의 편차는 0.5 [mm]일 때 0.707, 1.0 [mm]일 때 1.84, 1.5 [mm]일 때 6.06으로 변화하였다.

와이볼 분포해석으로부터 얻은 파괴전압을 시뮬레이션 프로그램 인가전압에 적용한 결과 XLPE의 침전극 선단에 모인 전계값은 대략 70 [kV/mm]가 된다는 결과를 얻었다.

참고 문헌

- [1] K. S. Suh and C. R. Lee, "Insulation material of developing trend for electric supply power cable in ground" Proceedings of KIEE, Vol. 46, No. 4, pp.34-39, 1997.
- [2] Wenyuan Li; Evaluation Mean Life of Power System Equipment with Limited End-of-Life Failure Data; IEEE Tran. Power Systems, Vol. 19, No. 1, pp.236-242, 2004.
- [3] T.J. Gallaghe, A.J. Pearmain, "HIGH VOLTAGE Measurement, Testing and Design", JOHN WILEY&SONS Ltd., pp.66-72, 1983
- [4] T.Y. Kim and J. W. Hong, 'The analysis of discharge distribution due to the inner void of Extra high voltage cable'. KIEE Int. tran. on Elec. and appl, vol. 5-c, No. 4, pp.155-160, 2005.
- [5] Wendai Wang and Dimitri B. Kececioglu ; Fitting the Weibull Log-Linear Model to Accelerated Life-Test Data ; IEEE Tran. Reliability, Vol.49, No.2, pp.217-223, 2000.