

## 보이드 위치에 따른 XLPE 전계분포

박형준, 김근식, 신현택, 이종필, 김귀열\*, 이수원\*\*, 홍진웅  
광운대학교, 한국과학기술대학\*, 한국철도대학\*\*

### Electric Field Distribution of XLPE due to Position of Void

Hyoung-jun Park, G-S Kim, H-T Shin, J-P Lee, G-Y Kim\*, and S-W Lee\*\*, J-W Hong  
Kwangwoon University, Korea University of Technology and Education\*,  
Korea National Railroad College\*\*

#### Abstract

This paper is aimed at determining the e-field distribution by apply voltage of air void, which can be generate air void in the XLPE cable for ultra high voltage. E-field distribution had an effect in XLPE due to the type and position of void, compared and studied. This method of analysis is based on the quasi-static electromagnetic 3D simulation program by boundary element method (BEM): Applied AC 3[kV], discretization of 2000 elements, 4 angular periodicity, The result of experiment indicate that E-field distribution appeared the highest levels on the void position of electrode 2[mm] outer boundary and shape of the smallest inner angle in the void. This will serve to explain the XLPE cable degradation studied of possible, connected cable variation of position and shape of void effects to e-field concentration.

**Key Words** : boundary element method, degradation, e-field distribution, Void, discretization.

## 1. 서 론

폴리에틸렌은 전기절연특성, 유전특성 및 내화학성이 우수한 고분자로 전기·전자분야에서 폭넓게 사용되고 있다. 특히 XLPE는 PE의 열적특성과 전기절연특성이 우수하여 저압에서 초고압 케이블 절연재료로 넓게 사용되고 있으나, 케이블 접속시 내부에 보이드가 존재하여 전계집중이 나타나고 이 전계의 영향으로 국부 절연파괴가 발생될 수 있다. 본 연구에서는 열화에 의한 보이드 전계분포를 알아보기 위해 IES사의 3차원 경계요소법 프로그램을 사용하여 유전체 내에 공기 보이드가 존재할 때 고전압 3[kV] 인가 시에 보이드의 위치와 종류의 변화에 따른 전계분포를 조사하였다. 또한, 케이블을 접속할 때 발생하는 경우의 수를 모델링하기 위하여 시료 내부 보이드의 위치에 따른 전계분포의 변화를 시뮬레이션하였고, 보이드의 형태를 구, 원통, 정육면체 형태로 모델링하여 전계분

포도를 조사하였다. 3D 시뮬레이션의 결과, 보이드의 위치가 전극 경계면에서 2[mm] 지점 전계분포밀도가 가장 조밀한 것으로 확인되었다. 한편, 보이드에 주변에 강한 전계집중현상이 발생하였으므로 보이드 주변에서 부분방전이 쉽게 일어날 수 가능성이 대단히 높다. 원형 보이드보다 각진 형태의 보이드에서 전계집중현상이 강하게 나타나는 것을 확인하였다.

## 2. 시뮬레이션

### 2.1 조건

3차원 경계요소 프로그램을 사용해서 XLPE를 두께 1.9[mm]씩 3층으로 적층하고 공기 보이드를 넣은 후 보이드 위치를 변화시키고 교류 3[kV]을 인가할 때 나타나는 전계분포를 비교하였다. 보이드는 전극의 중앙과 경계, 경계 2[mm] 지점으로 이동시켰다. 또한, 보이드의 형태는 각각 정육면체, 구, 원통형으로 설정하였고 보이드의 반지름 및 길

이를 조정하여 1[mm]로 체적을 일괄적으로 조사하였다. 본 시뮬레이션에서 사용된 틀은 BEM(경계요소법)을 사용하는 3차원 범용 프로그램인 IES사의 COULOMB을 사용해서 조사하였다.

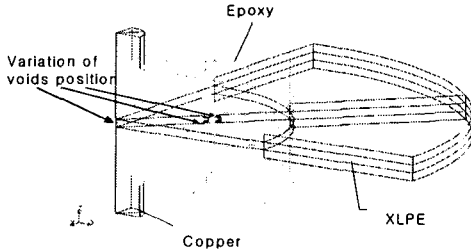


그림 1. 보이드 위치.  
Fig. 1. Position of void.

그림 1은 BEM에서 장점을 살려 모델의 해석시간을 줄이고 간소화하기 위해 각주기성(angular periodicity)을 90°로 주어 실제 모델의 1/4 형태로 체적을 형성한 것이다.

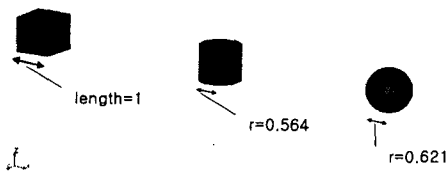


그림 2. 보이드 형태와 길이[mm].  
Fig. 2. Shape and length of void.

그림 2는 이 실험에서 사용된 보이드가 1[mm]이 되도록 체적 형성 시 크기를 조정하였다. 3차원 모델링을 통한 전계집중을 조사하기 위해 BEM으로 모델을 설계하고 경계조건(Boundary condition)으로 전압 3[kV]를 인가하고 2000개의 삼각형 망(Triangle mesh)로 이산화(discretization)을 통한 요소분할을 해서 분석하였다. 정전계 모델에서 BEM은 FEM(유한요소법)에 비해 모델의 해석시간을 단축시킬 수 있다.

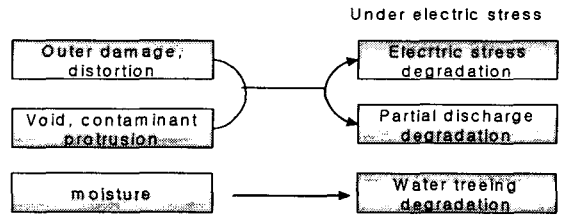


그림 3. 전기응력을 받는 XLPE 케이블 열화요소  
Fig. 3. Degradation factors in XLPE cables under electric stress

그림 3은 XLPE 케이블에 오랜 기간동안 전기응력이 주어진 경우 열화 요소 알고리즘을 세 가지 항목으로 도식화한 것이다. 케이블 외부 손상이나 왜곡, 보이드나 오염을 통해 전기응력열화나 부분방전열화가 일어나고, 수분을 통한 수 트리 열화에 의한 전계 집중이 일어난다.[3] 이 연구에서는 고전압 3[kV] 인가 시에 케이블 접속 시 발생할 수 있는 공기 보이드 위치변화에 따른 전계집중을 시뮬레이션하였다.

표 1. 보이드의 형태와 크기.  
Table 1. Shape and volume of void.

Classification	Sizes
Cube	Length=1[mm]
Cylinder	Radius=0.564[mm]
Sphere	Radius=0.621[mm]

표 2. 물성.  
Table 2. Physical properties.

Classification	Relative permittivity ( $\epsilon_r$ )	Conductivity (S/m)
Air	1.00059	0
Copper	$1 \times 10^9$	$5.8 \times 10^7$
Epoxy	4.9	$6.66 \times 10^{-18}$
XLPE	2.4	$1 \times 10^{-16}$

표 1은 본 실험에서 사용된 보이드 체적1[mm]과 형태에 따른 크기를 표 2는 사용된 물성을 나타낸다.

## 2.2 이론

$$E = E_x \bar{a}_x + E_y \bar{a}_y + E_z \bar{a}_z \quad (2.1)$$

$$E_x = \text{Re}(E_{x0} e^{j\phi_x} e^{j\omega t}) = E_{x0} \cos(\phi_x + \omega t) \quad (2.2)$$

$$E = E_x \angle \phi_x + E_y \angle \phi_y + E_z \angle \phi_z \quad (2.3)$$

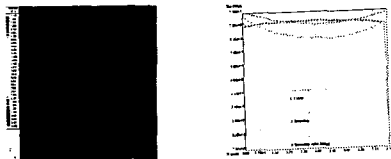
수식 (2.1)은 교류 인가 시에 순시 준-안정 사인 전계를 데카르트 좌표로 표현한 것이다. 수식 (2.2)에서  $E_y, E_z$  나 에 경우도 동일하게 적용되며 크기나 위상, 시간 의존 각도는  $E_{x0}, \phi_x (\phi_x + \omega t)$  로 표현된다. 수식 (2.3)에서  $E_x, E_y, E_z$  는 전계의 크기를,  $\phi_x, \phi_y, \phi_z$  는 위상차를 나타내고 있다.[4] 본 연구에서는 상부 전극에 교류 3[kV]를 인가하고 위상차는 0으로 조사하였다.[4]

$$\underline{k}(\omega, T) = \underline{k}'(\omega, T) + j\omega \underline{\epsilon}'(\omega, T) = j\omega \underline{\epsilon}(\omega, T) \quad (2.4)$$

유한한 공간에 그림 1과 같은 두 전극을 가진 유전체 내의 전계를 계산할 때, 수식 2에 전개한 것처럼 전계 증가는 단순하게 보이드 형태에만 의존하는 것이 아니고 유전체 내부 보이드나 기체에 채워진 물질에 의해 영향을 받으며, 복합 특성 전도율로 설명될 수 있다. 여기서  $\underline{\epsilon}$  은 복소 유전율이고  $\epsilon'$  은 실제 유전율이며,  $k'$ 는 허수이다. 유전체에서 시간과 온도 의존성에 따라 정의될 수 있다.[5]

## 3. 실험 결과 및 고찰

아래 그림 4는 무 보이드이며 그림 (a)는 전극의



(a) contours (b) graph

그림 4. 무 보이드 수직면 전계분포  
Fig. 4. Vertical e-field distribution of no voids.

중심을 윤곽도로, (b)는 위치에 따른 수직면 전계를 그래프로 조사한 것이다. 전극 경계 2[mm]의 경우에 전계집중이 높게 나타나는 것을 확인했다.

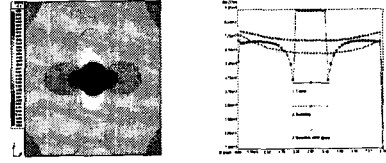


그림 5. 구형 보이드 중앙.  
Fig. 5. Center of sphere void.

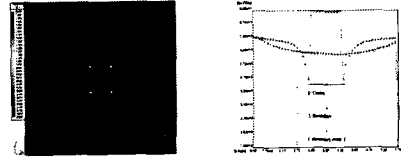


그림 6. 구형 보이드 경계.  
Fig. 6. Boundary of sphere voids.

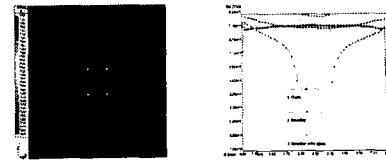


그림 7. 구형 보이드 경계 외부 2[mm].  
Fig. 7. 2[mm] Outer boundary of sphere voids.

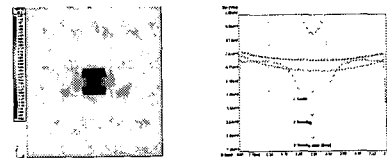


그림 8. 원통형 공기 보이드 중앙.  
Fig. 8. Center of cylinder voids.

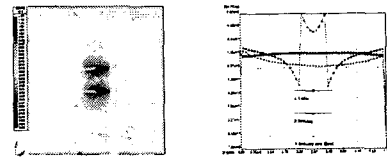


그림 9. 원통형 공기 보이드 경계.  
Fig. 9. Boundary of cylinder void.

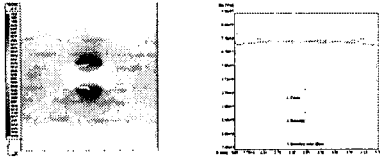


그림 10. 원통형 보이드 경계 외부 2[mm].  
Fig.10. 2[mm] Outer boundary of cylinder void.

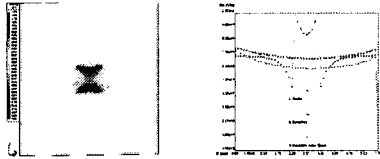


그림 11. 정육면체 보이드 중앙  
Fig. 11. Center of cube void.

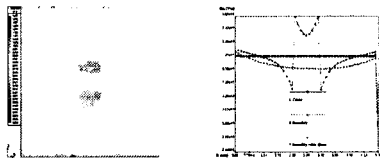


그림 12. 정육면체 보이드 경계  
Fig. 12. Boundary of cube void.

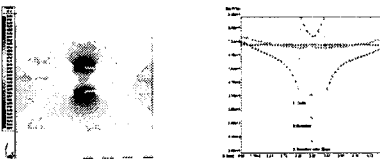


그림 13. 정육면체 보이드 경계 2[mm]  
Fig. 13. 2[mm] outer boundary of cube void.

그림 5에서 그림 13은 공기 보이드 형태와 위치에 따른 전계분포도이다. 교류 고전압 위상차를 0°로 하고 전극 중앙, 경계, 경계 2[mm]를 수직면으로 인가한 경우에 보이드가 있는 면(Plane)만 윤곽도로 나타났다. 그림 5에서 그림 7은 보이드가 구형일 경우를 나타낸 것이다. 보이드의 위치가 전극 2[mm]에 있을 경우에 가장 큰 전계집중을 나타내며, 보이드의 형태가 구형이므로 보이드 내, 외의 전계가 대칭을 이루고 있는 것으로 사료된다. 그림 8에서 10은 보이드가 원통형일 경우를 나타낸 것이다. 보이드 내부각에 따른 'edge effect'에 의해서

보이드 표면을 따라 국부적인 부분방전이 발생해 각진 부분에 전계가 집중된 것으로 사료된다.[6] 그림 10에서 그림 12는 보이드가 정육면체일 경우를 나타낸 것이다. 구형이나 원통 보이드보다 상대적으로 보이드의 내부각이 크기 때문에 가장 높은 전계집중이 나타나고 있는 것을 확인했다. 또한, 보이드 위치에 따라서 전극 중앙에서 멀어질 수록 보이드 내부에 전극 안쪽이 편향된 불평등 전계가 나타나고 있는 것을 확인했다.

#### 4. 결론

보이드 위치에 따른 XLPE 전계분포는 전극 중심을 기준으로 보이드를 경계와 경계 2[mm]로 이동시켰을 때의 수직면 전계분포를 조사한 결과 정육면체, 원통, 구형 순으로 보이드 형태가 구와 유사해질 때 교류 3[kV] 인가 시 국부적인 보이드 방전으로 인한 전계집중이 12[%] 작아지는 것을 확인하였다. 보이드 위치에 따라서 전극에서 2[mm] 지점에 있을 때 가장 큰 전계집중이 나타나는 것을 확인하였다.

#### 참고 문헌

- [1] 김탁용, 김근식, 고길영, 이수원 외 4명 “내부 보이드 형상변화에 따른 전기적열화특성” 2003년도 대한전기학회 하계학술대회.
- [2] 이동훈, 박재운, 박홍재, 고희석, “이중 절연 방전관과 구형 유전체의 전계 분포 시뮬레이션” 한국전기전자재료학회 2003 하계학술대회는논문집. p.1143-1146
- [3] Shosh Katakai, Member, IEEJ, J-power System Corp. “Design of XLPE cable and soundness confirmation methods to extra high voltage XLPE cable” p.1411, 2002 IEEE
- [4] IES, 3D properties guide Version 5.2. p.4-40
- [5] P. Harthez, Th. Brosche, et al. “Methods of calculating the field enhancement depending on void shape.” 2.127. p.6.
- [6] 이덕출, 황명환 “고전압 프라즈마 공학” 동일출판사 p.76, 1999