

# 케이블 접속재 부분방전 특성에 미치는 보이드의 영향

신종열\* · 홍진웅†

\*삼육의명대학 자동차과 · 광운대학교 전기공학과  
(2003. 7. 29. 접수 / 2003. 9. 15. 채택)

## Influence of Partial Discharge Properties due to Void in Cable Joint Parts

Jong-Yeol Shin\* · Jin-Woong Hong†

\*Department of Automotive Engineering, Sahmyook College  
Department of Electrical Engineering, Kwangwoon University  
(Received July 29, 2003 / Accepted September 15, 2003)

**Abstract :** To investigate the partial discharge and electric field distribution in cable joint parts, we measured the partial discharge and electric field in specimen. The specimens which cross-linked polyethylene (XLPE) and ethylene propylene diene ethylene(EPDM) are used to insulating material for underground cable and cable jointing parts. The polymers are used to insulating material in switchgear which is a kind of transformer equipment and in ultra-high voltage cable. Its using is increasing gradually, the electrical insulation properties are not only excellent, but also mechanical property is excellent. And because it is possible to be made void of several type in insulator while it is produced, which the electrical field distribution is changed by void, it has a critical influence to insulator performance. The underground cable is connecting by the jointing material, insulating breakdown and the electric ageing which are caused by several mixing impurity and the damage of cable insulator layer, which reduced the life of cable while intermediate joint kit is connected. Therefore, the computer simulation is used to estimating insulator performance, XLPE is used to the insulating material of ultra-high voltage cable and EPDM is used to insulator layer in joint material kit, and which are produced as specimen. And it is analyzed the electric field concentrating distribution and partial discharge by modeling of computer simulation in void and cable joint kit.

**Key Words :** partial discharge, electric field distribution, cross-linked polyethylene, ethylene propylene diene ethylene, insulating breakdown, cable joint kit

### 1. 서 론

산업이 급속히 발전하고 사회 구조의 전반적인 변화로 산업체가 대도시에 집중됨에 따라 인구의 도시 집중화를 초래하게 되고, 이에 따른 전기 에너지의 공급과 수요가 커지면서 자연히 각종 전력기기의 대용량화와 초고압화가 진행됨으로써 전력공급의 안정성과 절연의 신뢰성이 요구되고 있다<sup>1,2)</sup>.

따라서 도시의 환경과 전력공급의 변화를 가져옴으로써 전력공급 시스템이 가공방식에서 지중화로 바뀌면서 지중 케이블의 수요가 증가하고, 이에 따라 지중 고압 케이블의 절연재료로 cross-linked poly-

ethylene(XLPE)이 많이 사용되고 있으며, 고압 케이블의 중간 접속재로 ethylene propylene diene methylene(EPDM)을 몰딩하여 사용하고 있다<sup>3)</sup>. 또한 케이블 제조 작업 중에 절연체 내부에 여러 모양의 보이드가 생성될 수 있고, 이런 보이드는 케이블 내부에 전계 집중을 발생시켜 케이블의 절연성능을 현저하게 저하시키게 된다<sup>1,3)</sup>.

최근에는 부분방전(partial discharge: PD) 측정을 위한 다양한 방법이 제시되고 있으며, 빠른 데이터 전송 및 처리, 정밀분석 등을 위한 컴퓨터 프로그램을 이용한 분석 방법이 일반화되고 있는 추세이다<sup>4)</sup>.

따라서, 본 연구에서는 중간 접속재 작업과정이나 제조과정에서 불순물의 혼입이나 케이블 절연층의 손상 등이 원인이 되어 예기치 못하는 때와 장소

†To whom correspondence should be addressed.  
ealab@daisy.kw.ac.kr

에서 케이블의 절연과피와 전기적 열화가 일어나 케이블의 수명 단축은 물론, 전기적 사고로 인명 피해를까지 발생할 수 있으므로 전기 안전과 제반 문제를 해결하기 위해 보이드의 부분방전 특성과 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 전계분포 현상을 고찰하고자 한다<sup>9)</sup>.

## 2. 시료 및 실험

### 2.1. 시료

초고압 지중 케이블의 절연재료로 사용되고 있는 XLPE(이하 X로 표기)와 초고압 지중 케이블의 접속재로 사용되고 있는 EPDM(이하 E로 표기) 시료의 부분방전 특성을 조사하기 위하여  $10^{-4}$ [g]까지 측정할 수 있는 전자저울을 사용하고 핫 프레스로 가압 성형한 후에 시료를 두께 1[mm]의 시트(sheet)형태로 제작하였고, 시료의 물성은 Table 1과 같다.

또한 접속재 내부 보이드의 모양이 부분방전 특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 원형, 사각형, 사각형 모서리를 라운드 처리한(이하 fillet 표기) 보이드를 전극 중앙, 전극의 경계면 및 전극경계면의 내·외측 2[mm] 위치에서 보이드 내부에 공기를 넣은 시료를 컴퓨터로 시뮬레이션하고, 동일 조건에서 부분방전 측정 실험을 하였으며, Fig. 1은 보이드의 위치이고, Fig. 2는 시료의 배치를 보여주고 있다. 실험에 사용된 전극은 평판 대 평판이고, 일정한 압력을 유지하고 연면방전을 방지하기 위해 하부전극을 예폭시로 물딩하고 스프링으로 시료를 압착하여 만들었다.

Table 1. Physical properties of specimen

test item	sample	XLPE	EPDM
melt index [g/10min]		0.41	1.02
density [g/cc]		1.30	0.90
dielectric constant (60[Hz])		2.40	2.87
product Co.		L. Co.	H. Co.



Fig. 1. Position of void

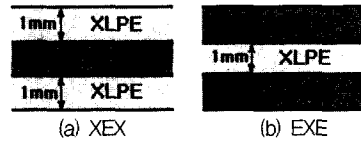


Fig. 2. Array of specimen

### 2.2. 실험

지중 케이블 중간 접속재에 대한 전계분포를 해석하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램은 IE Co.의 ELECTRO 2D를 이용하여 모델링 한 시료에 60 [Hz], 3[kV]의 전압을 인가하였을 때, 보이드의 위치와 모양 및 시료의 배열에 따른 전계분포의 변화를 조사하여 케이블 접속재에서 발생할 수 있는 전계분포를 해석하고, 보이드 시료에 전압을 인가하면 부분방전이 발생하게 되며, 측정된 신호는 AVO Co.에서 개발한 부분방전 해석 프로그램을 이용하여 3차원적으로 해석할 수 있도록 위상, 방전전하량 및 방전발생수를 인식하고 방전 패턴을 구현하였다.

## 3. 결과 및 고찰

지중 케이블 접속재 시료인 XLPE와 EPDM가 전기적 특성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 전계분포에 관한 시뮬레이션을 하고, 부분방전을 측정하고 분석하였다.

### 3.1. 전계분포 시뮬레이션

#### (1) 무보이드

Fig. 3은 EXE로 배열된 무보이드 시료의 전계분포를 조사하기 위하여 시료를 삽입한 상부 전극과 하부 전극 사이에 3[kV]의 교류전압을 인가할 때, 평행판 전극 사이의 전계분포는 평등전계를 나타내고, 전극경계면에서 멀어질수록 전계강도는 점점 작아지는 것을 확인 할 수 있다. 그러나 전극경계면에서 외측 2[mm] 지점에서는 계면전계분포밀도가 가장 크게 나타남을 확인할 수 있다.

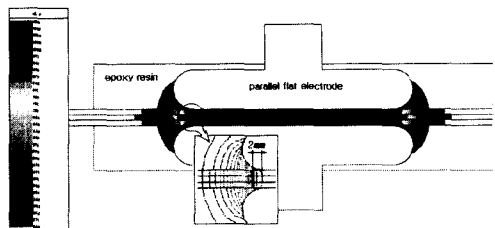


Fig. 3. E-field simulation without void

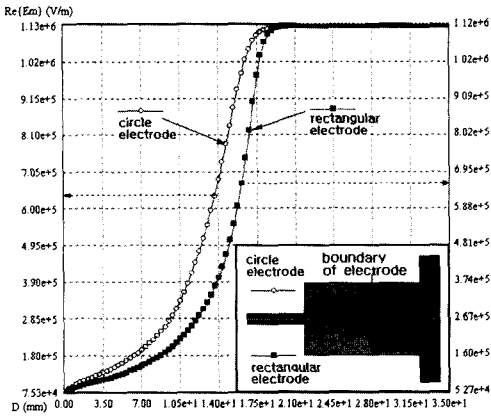


Fig. 4. Horizontal E-field distribution

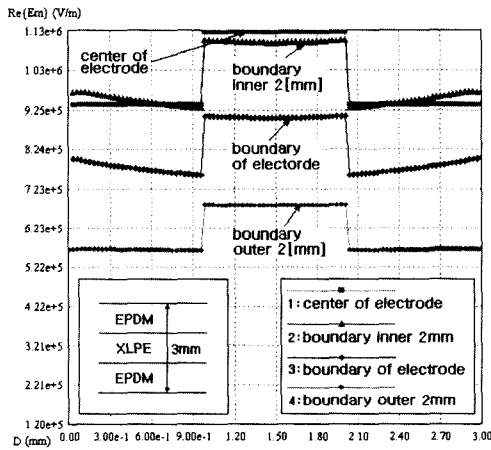


Fig. 5. Vertical E-field distribution

Fig. 4는 전극 중심으로부터 전극 외부 35[mm] 지점까지의 전극 모양에 따른 수평 전계분포를 나타낸 것으로 전극 내부는 평등전계이지만 전극 경계면에서 멀어질수록 25[%] 정도의 기울기로 작아지며, 원형전극의 전계완화효과가 사각전극보다 더 큰 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 전극의 중앙과 경계면, 경계면 내·외측 2[mm] 지점에서의 수직 전계분포도로서 전극의 중앙에서는 평등전계이고, 경계면 내측 2[mm] 지점에서는 전극 중앙과 비슷하나 전극에서 전계를 완화시키기 위한 전극 곡률반경 때문에 경계면 외측 2[mm] 지점에서는 60[%] 정도로 낮아지고, 경계면에서의 전계분포는 다른 부분보다 80[%] 정도로 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 또한 평판전극 사이의 전계는 전극에서 멀어질수록 낮아지고, 시료에서 중앙과 바깥쪽 사이의 전계 차이는 전극 중앙부에서

가장 크고 전극의 경계면에서부터 멀어질수록 점점 작아지고 중간층에 XLPE를 배치한 EXE 배열의 시료에서의 전계 크기는 XLPE의 비유전율이 EPDM 보다 크므로 EPDM을 중간에 배치한 XEX 배열의 시료보다 상대적으로 높게 나타난다.

(2) 보이드 위치에 따른 전계분포

시료의 배열 구조에 따른 보이드의 전계분포 특성을 조사하기 위하여, Fig. 6은 EXE 배열에서 공기 보이드를 전극중앙과 전극 경계면에 위치시키고, Fig. 7은 XEX 배열의 시료에서 공기 보이드를 전극 중앙과 전극 경계면에 위치하게 하여 시뮬레이션 하여 얻은 전계분포 결과이다. 평행판 전극 내부에서 무보이드일 경우는 평등전계분포를 나타내지만, 보이드가 존재하면 전계 집중현상이 강하게 발생되어 불평등 전계가 된다. 또한 전극 경계면과 전극 경계면 내·외측 2[mm] 지점에서도 무보이드이면 평등전계를 나타내지만, 보이드가 있으면 불평등 전계를 나타낸다. 배열이 XEX와 EXE인 시료의 전계분포를 비교하면 XLPE의 비유전율이 EPDM에 비하여 상대적으로 높기 때문에 EPDM 부분의 전계값이 낮고 XLPE 부분의 전계값이 더 높게 나타난다. Fig. 7은 XEX 배치의 보이드 위치별 전계분포를 조사한 것으로 보이드 상·하, 좌·우에서 전계의 집중현상이 크게 완화되는 것을 확인할 수 있는데 이것은 EPDM의 비유전율의 기여로 사료된다.

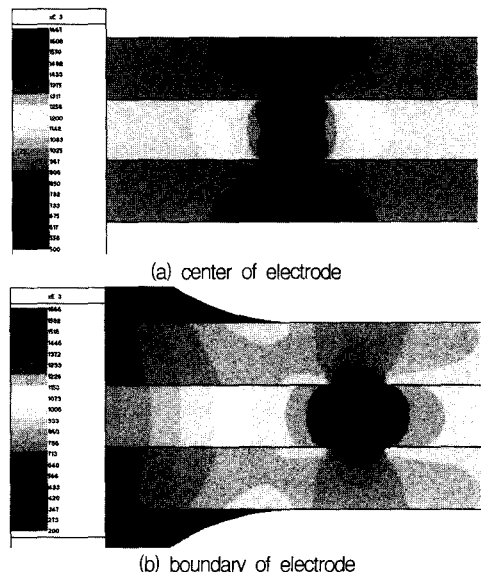


Fig. 6. E-field distribution due to position(EXE)

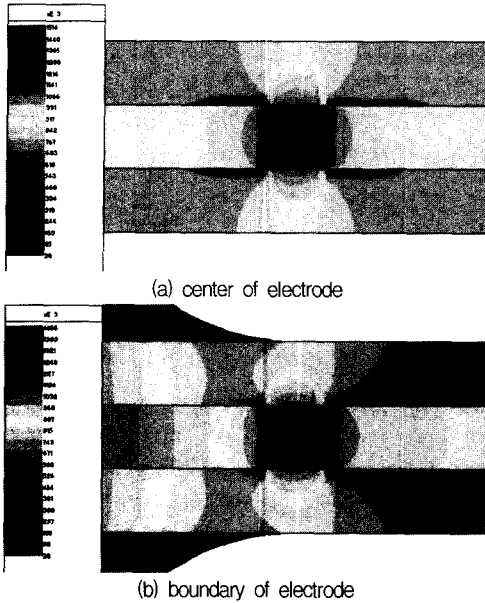


Fig. 7. E-field distribution due to position(XEX)

Table 2는 시료 배열과 보이드의 위치에 따른 최대 전계값을 나타낸 것으로, 특히 XEX 배열에서는 전극의 중앙에서 경계면 쪽으로 멀어질수록 최대 전계값이 작아지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 보이드 주변에는 전계분포 밀도가 아주 높게 나타나므로 무보이드보다 훨씬 더 큰 전계 분포 집중현상으로 인하여 케이블 절연체 내부에서 보이드가 발생되면 절연재료의 열화가 촉진되어 절연파괴가 되므로 전기적 안전에 영향을 미친다.

**(3) 보이드 모양에 따른 전계분포**

보이드 모양에 따른 전계분포를 조사하기 위하여 Fig. 8에서는 시료를 EXE 형태로 배열하고 전극경계면 외측 2[mm]에서의 원형, 필렛, 사각형의 공기 보이드에 따른 전계분포를 나타낸 것으로써 보이드 내부의 전계분포 집중 현상은 사각 형태의 보이드에서 가장 강하게 나타나고, 경계에 가깝고 각진 부분에서도 강하게 나타나는 것을 확인하였으며, 반면에 보이드가 경계면에서 멀고 원형일수록 전계집중이 완화되므로 전극의 곡률 반경을 3.5[mm]로 하여 모델링 한 보이드를 시뮬레이션 하였다. Table 3은 시료의 배열이 EXE와 XEX인 것을 보이드의 모양을 변화시키면서 시뮬레이션 한 전계값으로 보이드가 원형에 가까울수록가 최대 전계값이 가장 낮아지며 전계분포가 완화되는 것을 확인할 수 있었다.

Table 2. Emax. field due to position in air void

classification	center of electrode	boundary of electrode
EXE [V/m]	$1.67 \times 10^6$	$1.67 \times 10^6$
XEX [V/m]	$1.52 \times 10^6$	$1.45 \times 10^6$

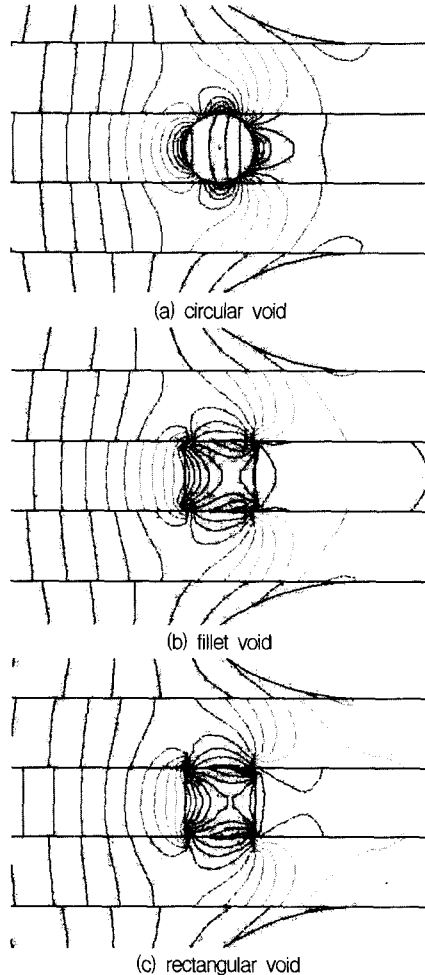


Fig. 8. E-field distribution due to void shape

Table 3. Emax. field due to void shape

classification	circular void	fillet void	rectangular void
EXE[V/m]	$1.32 \times 10^6$	$1.41 \times 10^6$	$1.51 \times 10^6$
XEX[V/m]	$1.12 \times 10^6$	$1.27 \times 10^6$	$1.33 \times 10^6$

**(4) 충전제에 따른 전계 분포**

지중 고압 케이블을 사용하는 현장에서는 대부분 공기 보이드가 발생하므로 본 실험에서는 EXE 시료 배열에서 전극경계 외측 2[mm]에 존재하는 보이드 내부에 공기, 수분 및 실리콘유 등을 충전하고,

전계분포 현상을 확인하기 위해 컴퓨터 프로그램을 시뮬레이션 하였다. Fig. 9는 보이드에 공기, 물, 실리콘유 등을 충전한 전계분포도이고, Table 4는 보이드의 위치와 형태 및 충전재에 따른 최대 전계값을 나타내었다.

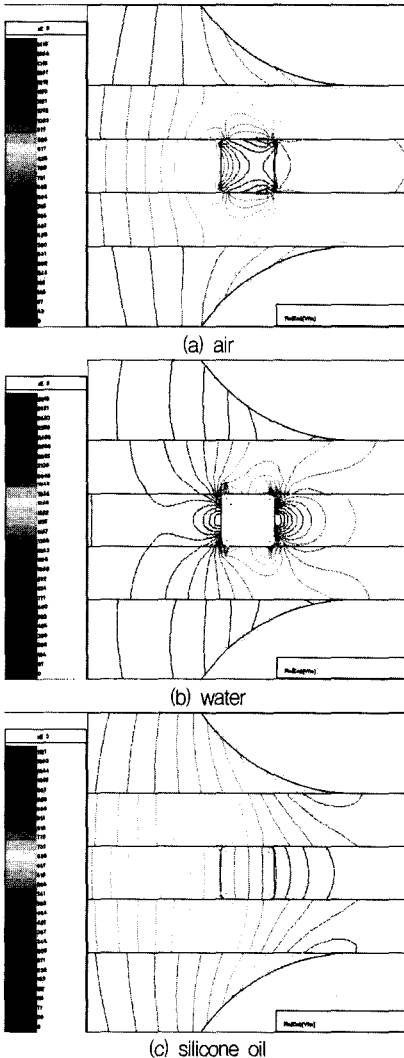


Fig. 9. E-field distribution due to filled material

Table 4. Emax. field due to filled material in void

filled position \ material	air	water	silicone oil
center of void	$1.32 \times 10^6$	$2.10 \times 10^6$	$1.07 \times 10^6$
boundary of fillet void	$1.47 \times 10^6$	$2.56 \times 10^6$	$1.07 \times 10^6$
boundary outer 2[mm] of rectangular void	$1.33 \times 10^6$	$3.46 \times 10^6$	$1.08 \times 10^6$

케이블 접속 부분에 공기 보이드가 형성될 경우에는 Fig. 9(a)와 같이 공기 보이드에서는 전계집중 현상이 발생되어 전계분포가 균등하지 않으므로 케이블을 열화시키는 원인으로 작용하여 케이블의 수명은 단축되고 이에 따른 전기적 안전에 문제가 발생할 수 있다.

Fig. 9(b)는 보이드 내부에 수분이 존재하는 경우로서 보이드 경계 부분에 전계분포 밀도가 아주 높게 나타나게 되고, 최대 전계값도 다른 충전재에 비해 2배 정도 크게 나타난다. 따라서 보이드 내부에 수분이 존재하면 도전성을 띠게 되므로 전계집중 현상이 일어나 케이블 절연재의 열화를 촉진시키고 기절연과피에 이르게 되면 전기적 사고가 발생할 수 있다. Fig. 9(c)는 보이드 내부에 실리콘유를 충전시킨 것으로서 전계분포가 보이드의 영향을 거의 받지 않음을 확인할 수 있다. 즉 보이드에 실리콘유를 충전하면 경계면에서의 전계분포가 시료와 거의 동일하므로 현장에서는 케이블 접속작업을 할 때에 케이블 접속재 내부에 실리콘유를 발라주어 일정한 전계분포를 유지하게 되면 케이블 및 케이블 접속재의 열화현상을 줄일 수 있으므로 절연과피에 따른 전기적 사고를 방지할 수 있어서 현장에서는 이 방법을 이용하고 있다.

### 3.2. 부분방전

#### (1) 무보이드

Fig. 10은 무보이드일 때의 부분방전 특성을 나타 내낸 것이며, 무보이드 시료를 XEX 형태로 배열하고, 시료를 삽입한 상부전극과 하부전극 사이에 AC 60[Hz], 12[kV]의 전압을 인가하여 부분방전 특성을 조사하였으며, 또한 모델링 한 시료에 컴퓨터 프로그램(ELECTRO 2D)을 이용하여 시뮬레이션 결과 최대 방전발생 수는 12이고, XEX 배열에서 전계집중이 완화되는 것을 확인할 수 있었다.

#### (2) 보이드

시료에 보이드가 있는 경우의 부분방전 특성을 조사하기 위하여 시료를 XEX 형태로 배열로 하고, 중간층 시료인 EPDM에 지름 6[mm]의 원형 보이드를 형성한 후 AC 60[Hz], 7[kV]의 전압을 인가하여 부분방전 측정 및 실험한 결과, 무보이드보다 방전 개시전압이 낮아졌고, 최대 방전발생수가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 11은 AC 60[Hz], 7[kV]에서 보이드가 있을 때의 부분방전 특성을 나타낸

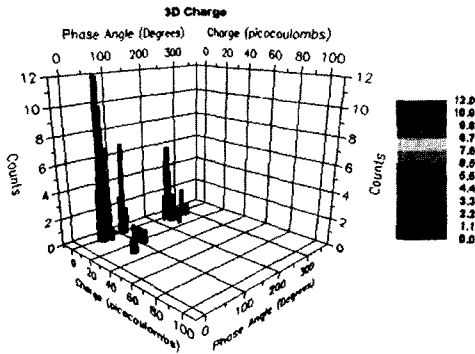


Fig. 10. Partial discharge of non-void(XEX)

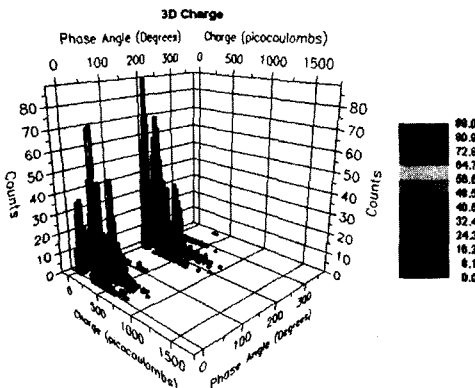


Fig. 11. Partial discharge of void(XEX)

것으로 컴퓨터 시뮬레이션 결과에서처럼 XEX의 시료 배열에서 전계분포가 완화되는 것을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

케이블 접속재의 전기적 특성을 조사하기 위하여 부분 방전 측정과 시뮬레이션으로 전계분포를 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 시료에 보이드가 존재하면 전계집중현상이 발생하여 무보이드일 때보다 전기적 열화와 절연과피

등을 초래하여 안전에 영향을 미친다.

2) XLPE-EPDM-XLPE 형태로 시료를 배열했을 때의 전계완화현상이 가장 두드러짐을 확인하였다.

3) 수평 전계분포에서는 보이드 내부 전계가 보이드 외부 전계보다 높고, 수직 전계분포에서는 전계분포 현상이 상·하 대칭이며, 보이드 부근에서 전계분포가 일그러짐으로 불평등 전계 집중 현상이 발생함을 확인하였다.

4) 보이드에 실리콘유로 충전하면 경계면에서의 전계분포가 시료와 거의 동일하고 보이드가 원형에 가까울수록 전계분포가 완화됨을 확인하였다.

감사의 글 : 이 논문은 2002년도 광운대학교 교내 학술연구비 지원에 의해 연구되었음

#### 참고문헌

- 1) K. Lida, J. S. Kim, S. Nakamura, and G. Sawa, "Effects of Molecular Structure on Electrical Conduction in Low density Polyethylene above its Melting Point", IEEE Trans. Electr. Insul, Vol. 27, No. 2, pp. 301~328, 1992.
- 2) J.Y. Jeong, H.S. Ryou, G. B. Hong, "A Numerical Study of Smoke Movement with Radiation in Atrium Fires", Trans. of KISFE, Vol. 15, No.1, pp.16~22, 2001.
- 3) Carson, R. A. J. Low - temperature dielectric relaxation in polyethylene. Proc. R. soc. A, 332, 255~266, 1973.
- 4) A. Krivda, "Automated Recognition of Partial Discharge", IEEE Trans. Die. and Elect. Insul. Vol. 2, pp. 796~821, 1995.
- 5) T. Tanaka, et al, "Dielectric Characteristics of Interface in Prefabricated Joints of Extra high voltage XLPE Cables", Summary CIGRE Paper No. 125 AA, pp. 1~19, 2000.