

경계요소법을 이용한 전력케이블 접속부의 전계해석 (Electric Field Analysis of Power Cable Joint Point using Boundary Element Method)

조 경 순(Kyung-Soon Cho)¹⁾

요 약

지중전선로에 있어서 케이블을 연결하는 중간 접속재에 발생하는 전계 집중, 각종 불순물의 침투 및 케이블 절연층의 손상은 궁극적으로 열화 및 절연파괴를 야기하게 되어 케이블의 수명을 단축시키고 있다. 본 연구에서는 경계요소법을 이용하여 초고압 케이블 절연재료로 널리 사용되고 있는 가교폴리에틸렌과 접속재 키트의 절연층으로 사용되고 있는 EPDM의 전계분포를 시뮬레이션 하였다. 시료는 두께 1[mm]로 3장을 중첩한 것으로 모델링하여 컴퓨터 시뮬레이션을 하였다. 전계해석 결과 보이드 내부의 defect는 silicone oil에 의해 전계집중을 약화시킴을 확인하였고, XLPE보다 EPDM의 전계분포가 낮게 유지됨을 확인하였다.

ABSTRACT

There are many unfavorable conditions that lead to shortening life of cable by causing dielectric breakdown and aging such as field concentrations occurring in intermediate materials linking each cables, penetration of various impurities, and undermining of cable insulation layers. This paper simulated investigated partial discharge properties of XLPE which is widely used for ultra high voltage cable insulation materials and EPDM which is being used as insulation layer of cable joint materials kit, using Boundary Element Method. The result of computer simulation showed that inner-Void defect caused silicone oil to weaken the E-field effect, and we also found that E-field distribution in EPDM remained relatively lower than that in XLPE.

1. 서론

경제 성장에 따라 전력수요가 급격히 증가하고 있고 이에 따른 전력계통 및 기기의 고압화 대응량화의 영향으로 고압용 케이블의 사용이 증가하

고 있다. 그러나 케이블 접속부의 종단 처리시 방수불량, 외부 반도체층 미제거 절연거리 미확보, 전기적 스트레스 제어 미확보, 절연체 손상에 따른 절연체 열화, 비규격 접속재 사용, 시공품질 미확인 등의 원인으로 전계집중 부위가 발생하여

1) 정회원 : 서일대학 컴퓨터응용시스템 전임강사

논문심사 : 2003. 3. 14.

심사완료 : 2003. 4. 7.

※ 본 논문은 2001년도 서일대학 학술연구비에 의해 연구되었음.

지락 및 절연파괴가 발생하고 있고, 이는 전력의 품질 및 안정화 측면에서 중대한 문제가 된다. 본 연구에서는 케이블의 전계분포 해석을 경계요소법을 이용하여 해석하고 고장의 원인이 되는 미소 공극 및 불순물의 영향을 파악함으로써 사고예방 및 케이블 수명의 연장에 기여하고, 시뮬레이션 방법의 개발을 통하여 비용 및 시간의 절약을 도모하고자 전력케이블용 접속재의 모델링을 통하여 정상상태의 전계분포를 해석하고, 발생 가능한 경우를 상정하여 불순물 및 미소 공극이 존재할 때의 전계분포를 비교 해석하였다.

이때 수치해석적인 방법으로는 유한요소법(FEM)이 일반적으로 사용되나, 유한요소법은 모델의 요소분할(mesh generating)이 어렵고 후처리과정(post-processing)이 복잡하다. 본 연구에서는 모델의 내부 요소분할이 아닌 경계면의 해석을 통하여 전계해석의 새로운 방안으로 제안되고 있는 경계요소법(BEM)을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 이를 통하여 제한된 시간에 많은 양의 데이터를 취득하고 해석할 수 있었다.

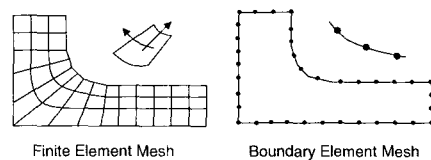
2. 경계요소법

자연현상에서 일어나는 많은 문제들은 미분방정식의 형태로 모델링되지만, 이들 미분방정식을 해석적인 방법으로 풀 수 있는 것은 대부분 선형 상미분방정식이나 편미분방정식과 같이 초기조건과 경계조건 또는 초기-경계 조건들이 매우 간단히 주어지는 문제에 국한하므로, 비선형 미분방정식의 형태로 나타나는 실제적이고 복잡한 물리적 현상을 해석적인 방법으로 문제를 해결하기에는 거의 불가능에 가깝다고 할 것이다. 이러한 이유로 컴퓨터의 출현과 함께 해석적 방법의 한계를 극복하기 위하여 컴퓨터를 이용하여 문제에 대한 근사해를 구하는 방식인 수치해석을 도입하였으며, 수치해석은 컴퓨터의 발달과 아울러 점점 더 새롭고 복잡한 문제를 다루게 되었고 이를 효과적

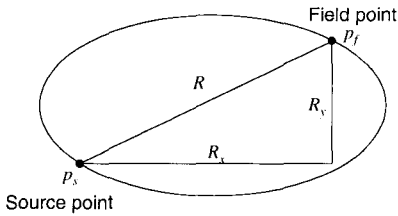
으로 해결하기 위한 알고리즘의 개발의 필요성을 제기해 오며 많은 발전을 해왔다.

수치해석 방법으로는 유한요소법, 유한차분법, 경계요소법, 다중격자법, 영역분할법등이 있으며, 전계해석에는 유한요소법(FEM)이 주로 사용되었다. 유한요소법은 물리적 대상에 대한 각 물리변수를 유한요소의 합으로 표시하여 분리된 부분구간의 해석을 조합하면 관련된 유한요소의 방정식계가 만들어져서 원하는 문제의 해를 구한다. 방정식계를 세우는 변분법에는 최소자승법, 가중합수를 이용한 나머지 법, Galerkin법, Rayleigh-Ritz법 등이있다. 이런 변분해석은 수치작업을 아주 간단하게 해주고 근사해의 오차를 추정하는 기준으로 사용되며, 사용된 구간들이 작으면 작을수록 오차는 0에 가깝게 된다. FEM의 과정은 해석영역을 미소영역으로 요소(element) 분할하고, 각 요소마다 요소 및 절점번호를 부여한다. 부여된 번호를 토대로 각 요소의 지역요소행렬식(local matrix)을 만들고, 이들을 모아서 하나의 커다란 전역행렬식(global matrix)을 만든다. 이 전역행렬에 대한 연산과정을 거쳐 최종적인 해를 얻는다. 그러나 유한요소법을 이용하여 비선형 문제를 풀 경우 계산시간이 문제가 되어 효율성을 높이기 위한 새로운 방법에 연구가 진행되고 있다.

경계요소법은 편미분 방정식으로 표현된 경계값 문제를 경계상의 값에 관한 연립 1차 방정식으로 변환하여 수치 해석을 하는 방법으로서, 영역의 경계만을 요소로 분할하므로 입력 데이터의 작성이 쉽게 되는 특징이 있기 때문에 Solid model external field problem에 적합한 해석방법이다.



[그림 1] 유한요소법과 경계요소법
[Fig 1] Finite Element Method and Boundary Element Method



[그림 2] 2차원 원형영역
[Fig 2] 2 Dimensional Round Domain

경계적분방정식은 Dirac delta 함수 $\nabla^2 u' = \delta(p_s)$ 로 부터

2차원 기본해

$$u'(p_s) = \frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \quad q_s'(p_s) = \frac{-1}{2\pi R^2} (R_s n_s + R_v n_v) \text{ 와}$$

3차원 기본해

$$u'(p_s) = \frac{1}{4\pi R} \quad q_s'(p_s) = \frac{-1}{4\pi R^2} (R_s n_s + R_v n_v + R_n n_n) \text{ 를 얻을 수 있다.}$$

Laplace 방정식에 U*를 곱하면

$$u^*(\nabla^2 u) = 0$$

기본해에 퍼텐셜 U를 곱하면

$$u(\nabla^2 u^*) = u\delta(p_s)$$

두 식으로부터

$$u(\nabla^2 u^*) - u^*(\nabla^2 u) = u\delta(p_s)$$

여기에 체적 V를 적분하여

$$\int_V [u(\nabla^2 u^*) - u^*(\nabla^2 u)] dV = \int_V u\delta(p_s) dV$$

Green's function을 적용하면

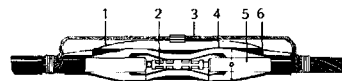
$$\int_S [u^* \nabla u \cdot \mathbf{n} - u \nabla u^* \cdot \mathbf{n}] dS = \int_V u\delta(p_s) dV = c(p_s)u(p_s)$$

이것을 경계 적분 방정식(Boundary Integral Equation)이라고 한다.

2. 접속부 모델링

[그림 3]은 실제 초고압 지중전선로 케이블 중간 접속재로 사용하고 있는 케이블 접속재 모습과 키트에 케이블을 접속할 때의 내부 단면도를 나타낸 것이다. 그림에서 5번은 실제 케이블에서의 절연체로 사용하고 있는 XLPE의 모습이고, 4번은 중간접속재 키트의 EPR의 모습이다. 실제 케이블에서는 접속면에서의 구조가 E-X-E의 구조로 이루어지게 되는데 본 연구에서는 실제 구조배열과 비교를 위해 다른 구조도 임의적으로 배열을 하였다.

본 연구에서는 중간접속재료에 대한 전계 분포와 전계값을 해석하기 위해 모델링한 시료와 시료의 접속부, 전극과의 접촉면 및 접속부 내부 보이드에서 나타나는 전계 분포를 3[kV], 5[kV], 10[kV]의 전압을 시료에 인가하였을 때와 3개의 층으로 구성된 시료의 배열을 실제 케이블 접속재에서의 배치와의 비교를 하였을 경우의 전계강도를 해석하였다.



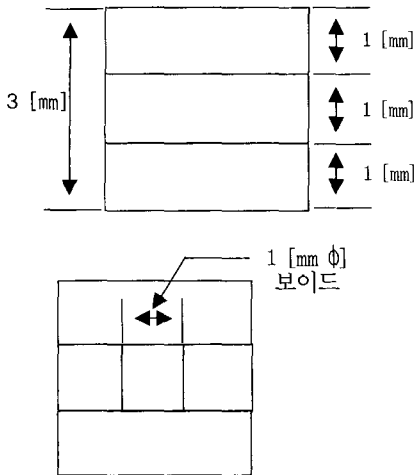
- grounding wire (접지선)
- splice housing (몰체)
- conductor contact sleeve (압착스리브)
- cable insulation (케이블 절연체)
- neutral wires (중성선)
- grounding eye (접지눈)

[그림 3] 케이블 접속부 단면도
[Fig. 3] Cross Section of Cable Joint Point

중간 접속재 키트 내부에서 케이블과 중간접속재를 결합 후, 작업과 케이블의 노화로 인하여 중간 접속재 내부에 보이드가 발생하여 공기가 침투되었을 때 절연내력의 저하로 인하여 케이블의 절연파괴를 발생시킨다. 따라서 이에 대한 전계 강도와 전계의 분포를 알아보기 위하여 경계요소법을 이용, 접속부 내부의 보이드에서의 전계 분포와 시료와 전극에서의 전계 강도와 분포를 <표 1>과 같이 배열하여 모델링하였으며, 접속부내부 보이드에서의 전계분포를 알아보기 위하여 모델링된 보이드의 중앙을 기준으로 하여 좌우, 상하 1.5 [mm]씩, 총 3[mm]로 나누어 해석하였다. 물성은 <표 2>와 같다.

〈표 1〉 배열
(Table 1) Arrangement

classification	3 [kV]	5 [kV]	10 [kV]
air defect	E-X-E	E-X-E	E-X-E
	X-E-X	X-E-X	X-E-X
silicone oil filled	E-X-E	E-X-E	E-X-E
	X-E-X	X-E-X	X-E-X



〈그림 4〉 케이블 접속부 모델링
(Fig. 4) Modeling of Cable Joint Point

〈표 2〉 물성
(Table 2). Physical Properties

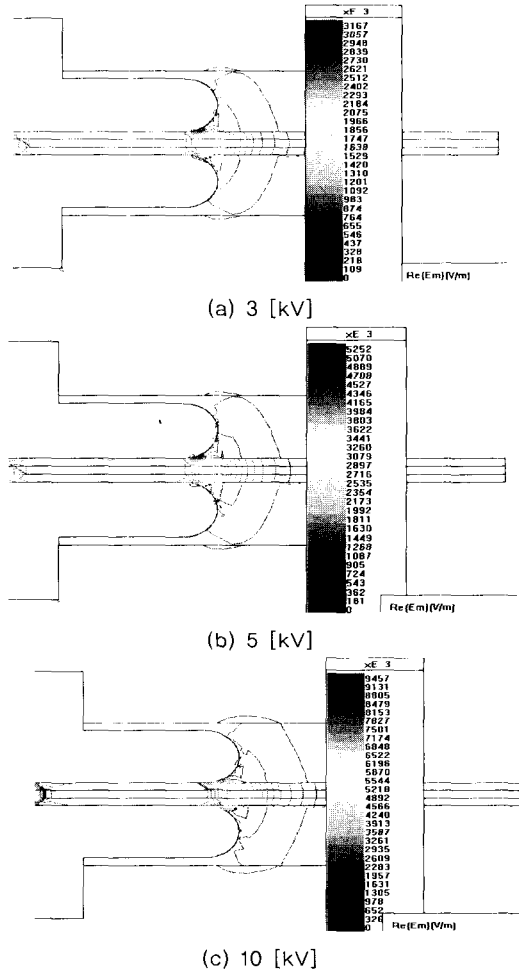
Test item	Sample	XLPE	EPDM
Melt index [g/10min]		0.41	1.02
Density [g/cc]		1.301	0.90
Elongation rate [%]		508	450
Dielectric constant (60[Hz])		2.4	2.872
Tensile strength [kg/cm ²]		108	72.98
Product Co.		L. Co.	H. Co.

3. 보이드 존재 시 전계분포 해석

일반적으로 케이블의 절연물질로 사용되고 있는 XLPE는 성형압출시에 여러 모양의 보이드를 생성되어서 전계의 분포를 변화시켜서 절연성능에 치명적인 결함으로 나타나게 된다. 이러한 보이드 내부 결함 중에서 가장 많이 발생하는 것이 공기

보이드이다.

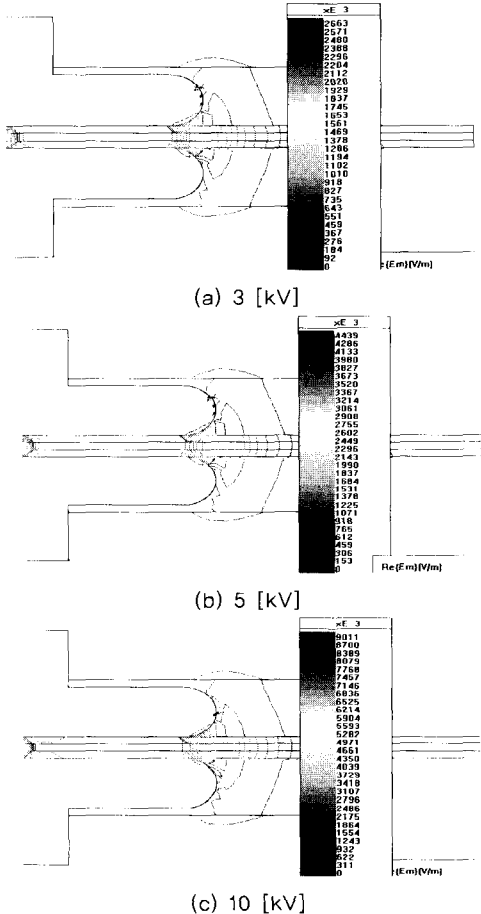
〈그림 5〉는 인가전압 3, 5 및 10[kV]에서 시료와 전극에서의 전계 강도와 전계 분포를 나타낸 것이다.



〈그림 5〉 E-X-E 구조의 전계 분포도
(Fig. 5) E-field Distribution Chart of E-X-E Structure

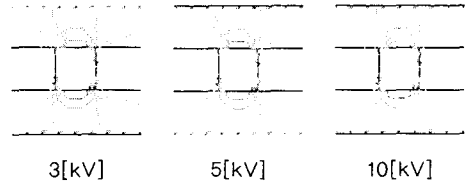
결과로부터 접속부와 전극이 만나는 접합면 부근과, 보이드 내부에서 전계의 집중이 발생하는 것을 알 수가 있다. 이는 접속부 내부 보이드 결함이 전계의 집중을 발생시키는 것이라 사료되고, 중간시료로 사용되고 있는 XLPE에서의 전계분포 또한 커짐을 나타내고 있다. 그리고, 인가전압이 증가될수록 그림에서 보여주듯이 거의 비례적으로 전계의 값도 상승하고, 전계의 집중도 커지고 있

음을 보여주고 있다. 이는 전계의 값이 간격이 일정할 경우 전압의 상승에 비례하기 때문으로 사료된다.

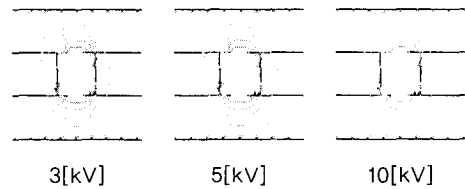


[그림 6] X-E-X 구조의 전계 분포도
[Fig. 6] E-field Distribution Chart of E-X-E Structure

[그림 6]은 X-E-X로 구성된 접속부를 시뮬레이션하여 해석한 그래프이다. 내부 보이드로 인하여 전계의 집중이 발생하고 전계 분포도 집중되는 것을 확인하였다. 그러나, 중간시료가 EPDM으로 구성되었을 때에는 전계의 분포가 좌우로 넓게 분포되고 있음을 확인하였다. 이로 인하여 접속부 내부에 불순물이 존재하더라도 EPDM이 XLPE보다 전계를 완화시키는 효과가 큰 것으로 사료된다.

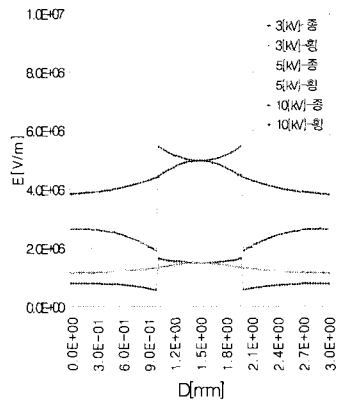


[그림 7] E-X-E 구조의 전계 분포도
[Fig. 7] E-field Distribution Chart of E-X-E Structure

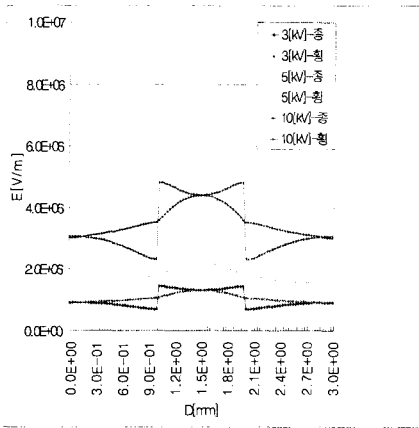


[그림 8] X-E-X 구조의 전계 분포도
[Fig. 8] E-field Distribution Chart of X-E-X Structure

[그림 7]과 [그림 8]은 공기보이드로 구성된 접속부 내부 보이드에서의 전계 분포를 나타낸 그림이다. E-X-E로 구성된 보이드와 X-E-X로 구성된 보이드를 비교해보면 X-E-X로 구성된 시료의 보이드 내부에 집중되어있는 분포곡선이 조금 더 선명도가 흐리고, 좌우로 점차적으로 퍼지고 있는 것을 확인할 수가 있다. 이는 위에서 언급한 것과 마찬가지로 중간접속부가 EPDM으로 구성되어 있는 것이 더욱 절연성이 좋게 나타나고 있는 것으로 확인되었다.



(a) E-X-E



(b) X-E-X

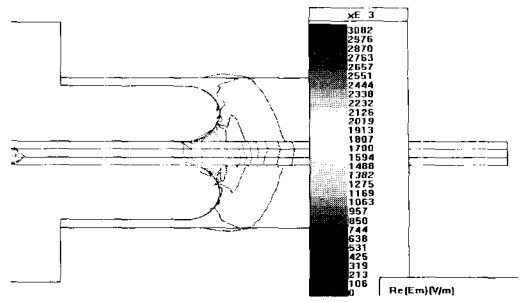
[그림 9] 보이드에서의 전계 분포도
[Fig. 9] E-field Distribution Chart of Void

[그림 9]에서는 접속부 내부의 보이드를 중심으로 하여 좌우, 상하 1.5[mm]씩 총 3[mm]의 크기를 거리로 하여 E-X-E와 X-E-X의 전계값을 비교한 그림이다. 그림에서 낮은 전계를 유지하다가 보이드 중심에서 가장 높은 전계 값을 가짐을 확인할 수 있었다. 그리고 위에서 설명한 것과 같이 인가전압의 상승으로 인하여 전계 값이 상승함을 알 수 있었다.

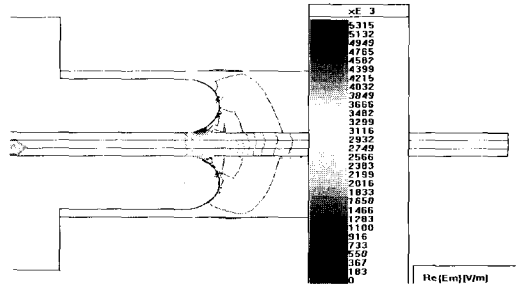
4. 실리콘유 함침시 전계분포 해석

케이블과 중간 접속재 키트를 연결할 때 케이블의 외피에 실리콘오일을 도포하게 되는데 이는 케이블의 원활한 접속을 위해서이다. 그러나, 이러한 과정에서 보이드가 생긴 경우 실리콘오일이 보이드 내부에 침투되었을 때, 하나의 결함으로 작용하게 되어 불순물로 작용을 하게된다.

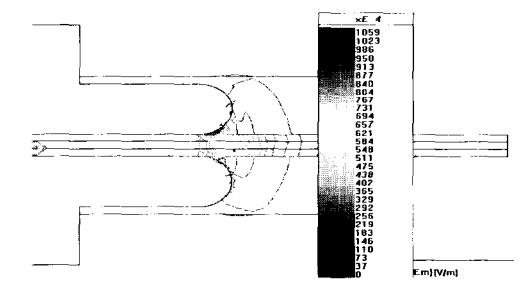
따라서 본 항에서는 이러한 경우를 모의하여 시뮬레이션을 통하여 전계 강도와 전계 분포를 해석하여 그래프로 나타내었다.



(a) 3 [kV]



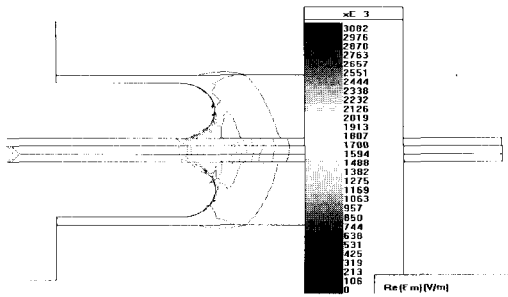
(b) 5 [kV]



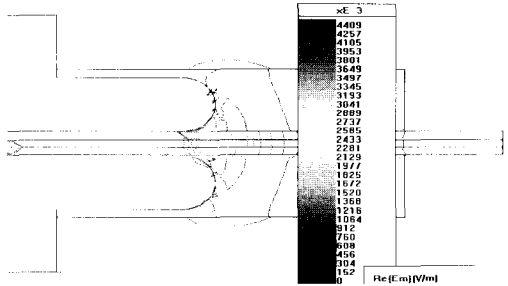
(c) 10 [kV]

[그림 10] E-X-E 구조의 전계 분포도
[Fig. 10] E-field Distribution Chart of E-X-E Structure

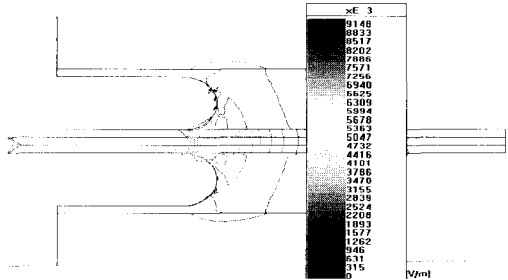
[그림 10]은 E-X-E로 구성된 보이드 내부에 실리콘오일이 채워져 있을 경우를 모의한 결과이다. 역시 접속부 내부의 보이드와 시료와 전극이 교차하는 지점에서 전계의 집중이 발생하는 것을 알 수가 있고, 인가전압이 상승할수록 전계의 값도 비례하여 커지고 있음을 확인할 수 있다. 공기 보이드로 구성된 보이드와 비교해보면 전계의 값이 조금 더 낮게 나옴을 확인할 수가 있는데, 이는 실리콘오일이 절연성이 공기보다 더욱 좋다는 것을 확인할 수 있다.



(a) 3 [kV]



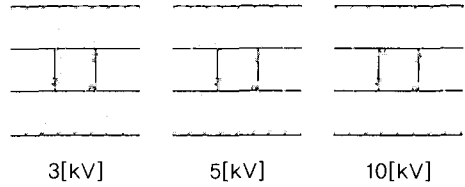
(b) 5 [kV]



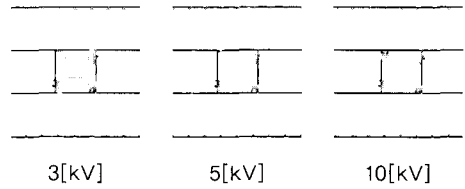
(c) 10 [kV]

[그림 11] X-E-X 구조의 전계 분포도
[Fig. 11] E-field Distribution Chart of E-X-E Structure

[그림 11]은 접속부가 X-E-X로 구성된 경우의 시뮬레이션 해석 그래프이다. 전계 분포가 접속부 내부와 접촉면에서 많이 밀집되어 있는 경우를 확인할 수 있고, 인가전압이 증가될수록 전계의 값이 상승하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나, 공기보이드와 마찬가지로 중간 시료가 EPDM으로 구성되어있는 경우 전계의 값이 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

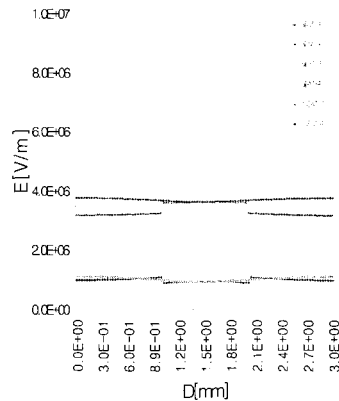


[그림 12] E-X-E 구조의 전계 분포도
[Fig. 12] E-field Distribution Chart of E-X-E Structure

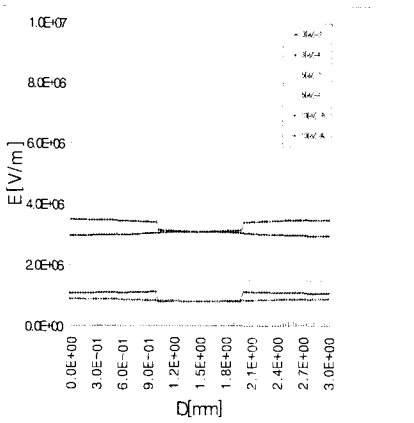


[그림 13] X-E-X 구조의 전계 분포도
[Fig. 13] E-field Distribution Chart of X-E-X Structure

[그림 12], [그림 13]은 실리콘오일 함침으로 구성된 접속부 내부 보이드에서의 전계 분포를 나타낸 그림이다. E-X-E로 구성된 보이드와 X-E-X로 구성된 보이드를 비교해보면 X-E-X로 구성된 접속부의 보이드 내부에 집중되어있는 분포곡선이 조금 더 선명도가 흐리고, 좌우로 점차적으로 퍼지고 있는 것을 확인할 수가 있다. 이는 위에서 언급한 것과 마찬가지로 중간시료가 EPDM으로 구성된 접속부가 절연성이 좋게 나타나고 있는 것으로 확인할 수 있다.



(a) E-X-E



(b) X-E-X

[그림 14] 보이드에서의 전계 분포도
[Fig. 14] E-field Distribution Chart of void

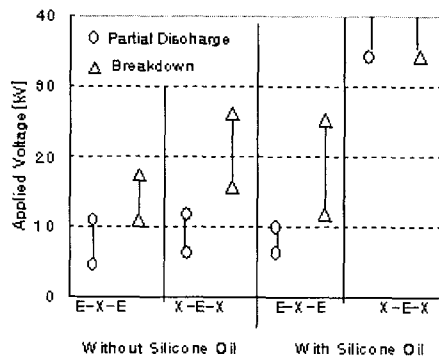
[그림 14]는 실리콘오일 함침에서의 내부 보이 드 전계 분포도를 나타낸 그림으로 (a), (b)를 비 교해보면 중간시료가 EPDM인 경우 전계 값이 많 이 낮아졌음을 보이고, 일반적으로 보이드 중앙에 서의 전계 값이 주위보다 낮아짐을 확인하였는데, 앞의 [그림 13]과 비교해보면 대조적으로 나타나 고 있음이 확인된다. 이는 실리콘오일의 절연성이 크다는 것을 보여주고 있다.

5. 평가 및 결론

<표 3>은 보이드 내부의 전계값을 나타낸 것으 로 표에서 알 수 있듯이 중간 시료가 EPDM으로 구성된 접속부가 낮은 전압을 나타내고, 또한 공기보이드와 실리콘오일 함침을 비교하여 보면 실 리콘오일이 더욱 낮은 전계값을 나타내고 있음을 보여주고 있다.

<표 3> 모델링 시료의 전계 값
<Table 3> Value of the electric field on the modeling specimen

classification	3 [kV]	5 [kV]	10 [kV]
air void [V/m]	E-X-E 1.5×10^6	2.5×10^6	5.0×10^6
	X-E-X 1.3×10^6	2.2×10^6	4.4×10^6
silicone oil filled [V/m]	E-X-E 0.95×10^6	1.81×10^6	2.6×10^6
	X-E-X 0.8×10^6	1.5×10^6	3.0×10^6



[그림 15] 부분방전개시와 절연파괴 전압
[Fig. 15] Partial Discharge Inception and Breakdown Voltage

경계요소법을 이용한 전계해석 결과를 검증하 기 위하여 부분방전개시전압과 절연파괴전압을 측 정하였다.

[그림 15]는 부분방전개시전압 V_i 및 절연파괴 전압 V_B 를 나타낸다. 실리콘 오일을 함침시키지 않은 보이드에서 E-X-E 구조의 V_i 는 약 7kV, V_B 는 약 15kV인 것과 비교하여 실리콘오일을 첨 가한 경우는 V_i 는 비슷하나 V_B 는 약 20kV로 5kV 정도 높게 된다. 또 X-E-X 구조에서는 실리콘 오일을 첨가하지 않은 경우 V_i 는 12kV 이하, V_B 는 약 20kV정도이나 실리콘 오일을 첨가한 경우에 는 30kV이상의 전압에서 부분방전은 관측되지 않 고 35kV 정도에서부터 부분방전과 절연파괴가 측 정 되었다.

이는 실리콘오일을 첨가함으로 인해 결합 주변 의 공극이 소실되기 때문에 V_i 및 V_B 가 높아졌 기 때문으로 사료되며 시뮬레이션의 결과와도 일

치된다.

이상으로부터 케이블의 중간 접속재 XLPE와 EPDM을 사용하여 모델링한 중간 접속재 내부에서 부분방전 특성과 경계요소법을 이용한 시뮬레이션으로 전계 분포와 강도를 해석한 결과 접속부 내부의 보이드에 결함이 존재할 경우 EPDM이 XLPE보다 전계를 완화시키는 효과가 큰 것을 확인할 수 있었다. 또한 접속부 내부 보이드에 공기와 실리콘오일이 채워져 있는 경우, 실리콘오일이 절연파괴 발생을 억제함을 확인하였다.

※ Reference

- [1] D. H. Cho, Y. W. Lee, J. W. Hong, "A trend of research for a new insulating materials", Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Materials Engineering vol. 9, no. 8, pp. 859-866, 1996.
- [2] R. E. James and B. T. Phung, "Development of computer-based measurements and their application to pattern analysis", IEEE Trans. Die. and Elect. Insul. Vol. 2, pp838-856, 1995.
- [3] A. Krivda, "Automated Recognition of Partial Discharge", IEEE Trans. Die. and Elect. Insul. Vol. 2, pp. 796-821, 1995.
- [4] L. Corbelli, "Developments in Rubber Technology", ed. by A. Whelan and K. S. Lee, vol. 2, p. 120, Applied Science Publishers, London, 1985.
- [5] J. A. Riedel and R. V. Laan, "The Vanderbilt Rubber Handbook", ed. by R. F. Ohm, p. 136, R. T. Vanderbilt Co. Inc., 1990.
- [6] R. J. Arhart, IEEE Electr. Insul. Magazine, 9, 34, 1993.
- [7] F. H. Kreuger, "Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment", Butterworths., pp. 129-152, 1989
- [8] T. Tanaka and A. Greenwood, "Effects of Charge Injection and Extraction on Tree Initiation in Polyethylene", IEEE Trans. Pas., Vol. PAS-97, No. 5, pp. 238-242, 1997.
- [9] Ogata. S, Maekawa. Y, Terashima. K, Okiai. R, Yoshida. S, Tamanouchi. H, Yokoyama. S, "Study on the dielectric characteristic of DC XLPE cables", Power Delivery, IEEE Transactions Vol. 5, pp. 1239-1247, July, 1990.
- [10] H. Fukangwa, et al, "Insulation properties of 250kV DC XLPE cables", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 7, pp. 3175-3184.
- [11] L. Gao, W. Guo, X. Qui and H. Wang, "Study of improvement of withstand strength of polyethylene in cables using special additives", Proc. Int. Symp. Electr. Insul. Matls. Nagoya, Japan, pp. 369, 1993.
- [12] Tairo et al., "Prediction of Breakdown by Void Discharge Aging", JIEE. Vol. 110, No. 11, pp. 342-346, 1990.

조 경 순



1991 광운대학교 공과대학
전기공학과 (공학사)
1993 광운대학교 대학원
전기공학과 (공학석사)
1998 광운대학교 대학원
전기공학과 (박사과정수료)
1998 ~ 현재 : 서일대학
컴퓨터 응용시스템전공
전임강사
관심분야 : 컴퓨터인터페이스,
열화진단 및 수명예측