

초고압 선로 진단장치용 외함 절연설계

김기준^{1,a}

¹ 인천대학교 메카트로닉스공학과

The Insulation Design of Enclosure for Diagnostic Device in Extra High Voltage Line

Ki-Joon Kim^{1,a}

¹ Department of Mechatronics Engineering, Incheon National University, Incheon 406-772, Korea

(Received February 3, 2015; Revised February 9, 2015; Accepted February 10, 2015)

Abstract: In this paper, in order to avoid equipment malfunction due to electromagnetic waves, which can occur when high-voltage live line diagnostic device fabrication, the enclosure structure of the diagnostic device with power lines that can minimize the EMI (electromagnetic interference) was modeled using the FEM (finite element method). Simulation examined the strength of the electric field in the required thickness, material and regions where there is a control board while changing the curvature radius of the corner making the enclosure, and By applying a mechanical design and simulation results that occur during the actual production has been designed for the final design. Most of the simulation results for the electric field is concentrated in the final model, the inner edge of the enclosure could be confirmed that the stable structure.

Keywords: Enclosure, Diagnostic device, EMI, Modeling, FEM

1. 서론

최근 전력기술과 IT기술을 융·복합하여 고품질의 안정적 전력공급 및 서비스를 가능하게 하는 차세대 전력 인프라 기술을 위해 스마트 그리드 사업화가 추진되어지고 있다 [1-3]. 전력시스템 사업은 고품질의 전력공급과 시스템 전체의 효율 향상과 신뢰도를 중시하게 되었으며, 보다 향상된 전력 IT기술을 전력망에 도입하여 고신뢰도를 목표로 전력산업 구조를 개편하고 있다 [1,4-6]. 이에 따라 송전선로의 점검 및 정비업무

또한 증가하고 있으며, 현재 선로 점검은 사선에서 활차를 이용한 선로점검 및 활선에서 원거리 망원경에 의한 육안검사로 선로를 점검하고 있다. 작업자의 활차 점검은 고소 및 협소한 공간 상태에서 작업자가 점검하는 방법으로 매년 안전사고가 발생하고 있으며, 육안검사는 원거리 점검으로 정확한 진단이 어렵다는 문제점을 안고 있다.

최근 이러한 문제점을 해결하기 위해 활선에서 무인으로 점검할 수 있는 더미 및 무인헬기를 이용한 점검 방법 적용을 시도하고 있으나 초고압 대전류로 인해 장치의 오동작으로 인한 추락사고를 유발할 수 있으며, 추락 시 선로를 단락시킬 수 있으므로 연구수준에 멈춰있다. 본 논문에서는 진단을 위해서는 초고압선 근처에 접근해야 되므로 절연효과를 조사하여야 하며, 내

a. Corresponding author; kijoon@inu.ac.kr

부전자장비에서 발생할 수 있는 외부 전자파 간섭 (electromagnetic interference, EMI)에 영향을 최소화 할 수 있는 구조를 모델링하고 이를 기초로 진단 장치의 외함설계의 최적화 모델링을 제안하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 모델링

절연모델링 타킷은 J사에 개발하고 있는 송전선로를 자주하면서 케이블 표면의 결함을 검출하는 장치로 그림 1과 같은 구조를 가지고 있다.

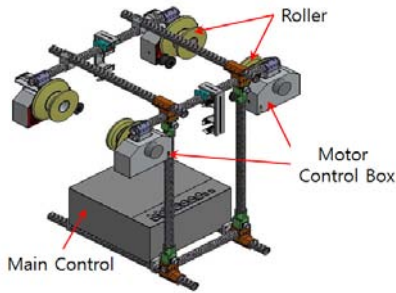


Fig. 1. Structure of equipment.

그림 2에서와 같이 개발장치 중 구동 로울러는 송전선로에 근접하고 있어 절연설계가 매우 요구되는 위치이기 때문에 본 논문에서는 구동 로울러의 모터 제어박스 부분에 대한 절연 및 전자파 차폐 시뮬레이션을 시도하였다.

그림 3은 구동롤러 부분의 설계 구조를 나타내고 있으며, 롤러 내부에는 모터, SMPS, 제어보드 등이 존재하며, 모터는 내부적으로 절연 설계되어 있기 때문에 모터보다는 SMPS와 제어보드에 대하여 고려해야만 했다.



Fig. 2. Roller of equipment.

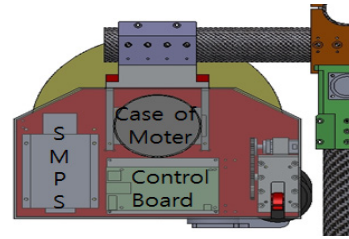


Fig. 3. Design of driving roller.

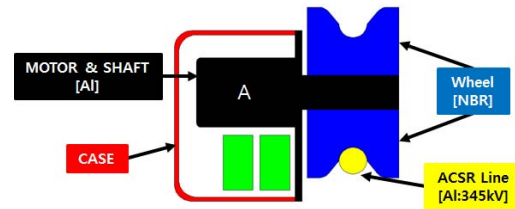


Fig. 4. Modeling for simulation.

또한 기기의 하중을 버티기 위해 모터 고정부는 5 mm 이상의 철판을 적용해야만 하는 문제점이 있었으며, 모터 외부 케이스는 알루미늄 재질로 도출된 구조를 고려해야만 했다.

시뮬레이션을 위한 모델링은 그림 4와 같이 모터케이스가 플레이트로부터 돌출되는 형상(A 부분)으로 설계하였으며, 기본 구조를 외함 재질은 ABS, 외함의 두께는 5 mm, 곡률반경은 20 mm로 설정한 후, 재질을 PTFE, XLPE, PC, Epoxy, Bakelite로 변화시키면서 유전율에 따른 전계 분포를 조사하였으며, 외함의 두께는 3, 5, 10, 15, 20, 30 mm로 변화시키면서 두께 특성을 조사하였다. 곡률반경은 0, 5, 10, 20으로 변화시켰으며, 표 1은 시뮬레이션 조건에 대하여 나타내고 있다. 시뮬레이션 조건은 345 kV 송전선로에서 최대 전류 1 kA의 조건으로 소스원을 제공하였다.

시뮬레이션을 위한 모델링은 그림 4와 같이 모터케이스가 플레이트로부터 돌출되는 형상(A 부분)으로 설계하였으며, 기본 구조를 외함 재질은 ABS, 외함의 두께는 5 mm, 곡률반경은 20 mm로 설정한 후, 재질을 PTFE, XLPE, PC, Epoxy, Bakelite로 변화시키면서 유전율에 따른 전계 분포를 조사하였으며, 외함의 두께는 3, 5, 10, 15, 20, 30 mm로 변화시키면서 두께 특성을 조사하였다. 곡률반경은 0, 5, 10, 20으로 변화시켰으며, 표 1은 시뮬레이션 조건에 대하여 나타내고 있다. 시뮬레이션 조건은 345 kV 송전선로에서 최대 전류 1 kA의 조건으로 소스원을 제공하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 두께 특성

절연층의 두께를 표 1에서 나타낸 바와 같이 3~30 mm로 변화시키면서 두께 변화에 따른 전계 분포를 조사하였다. 전계의 집중도는 모서리 부분과 전극과 가장 가까운 위치에서 발생할 수 있으므로 그림 5(a)에서 나타낸 것처럼 ①과 ② 위치에서 전계 분포를 조사하였다. ①의 위치에서 3 mm일 때 내부에서 3.72×10^5 V/m의 전계가 나타났으며, 30 mm에서는 3.77×10^5 V/m로 더 큰 값을 나타내었다. 그러나 모서리 외부로 갈수록 3 mm 시료는 단위 미터당 1.11×10^7 V/m이지만, 30 mm에서는 3.98×10^5 V/m로 급격히 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. ②의 위치에서도 두께가 두꺼울수록 전계는 더 크게 나타나지만, 전계의 변화량은 3 mm에서 단위 미터당 7.38×10^6 V/m에서 5.63×10^6 V/m로 떨어짐을 확인할 수 있었다.

Table 1. Condition of simulations.

Condition	Thickness (mm)	Material	Radius of curvature (mm)
Variation of thickness	3	ABS	20
	5		
	10		
	15		
	20		
	30		
Variation of material	5	PTFE	20
		XLPE	
		ABS	
		PC	
		Epoxy	
		Bakelite	
Variation of radius	ABS		0
			5
			10
			20

두께가 얇을수록 전계의 세기는 외함을 뚫고 외부에 넓게 분포됨에 반해 두께가 증가하면서 외함의 모서리 부분에 전계가 집중되어 나타남을 볼 수 있다. 이로 인해 두께의 증가로 전계의 진행을 억제하는 것으로 사료된다.

그림 6은 ②의 위치에서 거리에 따른 전계분포를 나

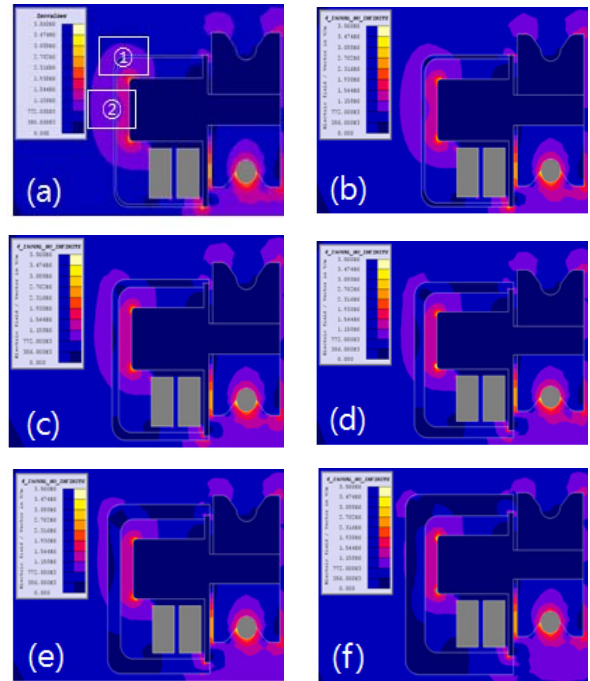


Fig. 5. Electric field by thickness (a) 3 mm, (b) 5 mm, (c) 10 mm, (d) 15 mm, (e) 20 mm, and (f) 30 mm.

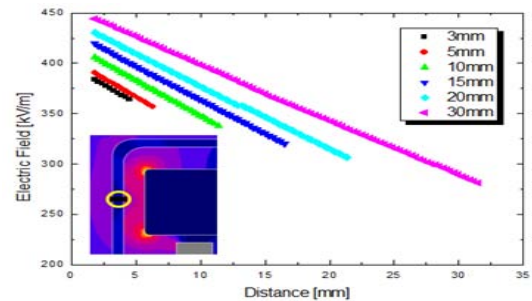


Fig. 6. Curve of electric field.

타낸 것으로 30 mm일 때 3 mm 보다 내부 표면에서의 전계가 6.04×10^4 V/m로 더 크게 나타나지만, 변화량은 15 mm까지 약 7.3×10^6 V/m이었다가 두께가 20 mm로 증가될 때 6.51×10^6 V/m, 30 mm일 때 5.63×10^6 V/m로 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 절연층의 두께의 증가는 전계의 관통을 힘들게 하기 때문에 표면에 많이 집중되는 현상이 나타나지만, 절연층으로 급격히 전계의 세기를 감소시키는 것으로 사료된다.

3.2 유전율 특성

유전율에 따른 전계 분포를 조사하기 위해 절연재료의 유전율에 따라 PTFE (polytetrafluorethylene, $\epsilon_r=2.1$), XLPE (cross-linked polyethylene, $\epsilon_r=2.3$), ABS (acrylonitrile butadiene styrene, $\epsilon_r=2.8$), PC (polycarbonate, $\epsilon_r=3.0$), epoxy($\epsilon_r=5.0$), Bakelite ($\epsilon_r=8.0$)로 유전율이 틀린 물질에 대해서 동일 두께와 곡률반경을 주고 시뮬레이션하였다.

전체적인 전계 분포를 보면 유전율의 증가에 따라 넓은 외함 모서리 부분에 전계가 집중되는 현상을 확인할 수 있었으며, 모터케이스(알루미늄) 주변에 넓게 전계가 분포됨을 확인할 수 있었다. 이러한 현상에 대해서 정량적 값을 확인하기 위해 그림 8과 같이 ①외함의 내부면, ②외함의 외부표면, ③모서리 부분의 내부면, ④모서리 부분의 외부표면, ⑤외함 절연층의 내부에 대해서 조사하였다.

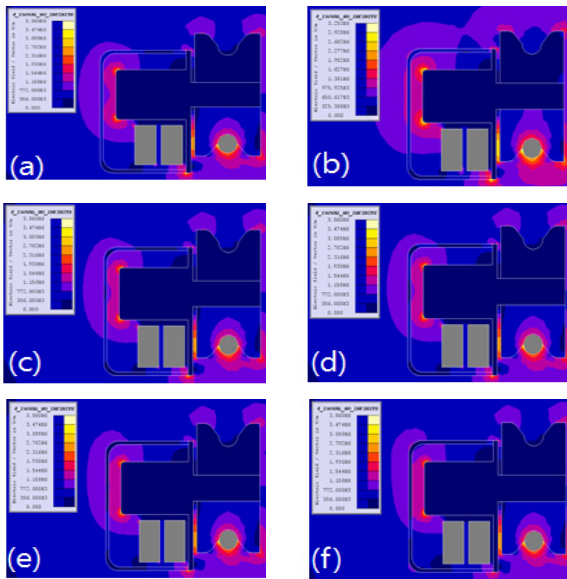


Fig. 7. Electric field by thickness (a) PTFE, (b) XLPE, (c) ABS, (d) PC, (e) epoxy, and (f) bakelite.

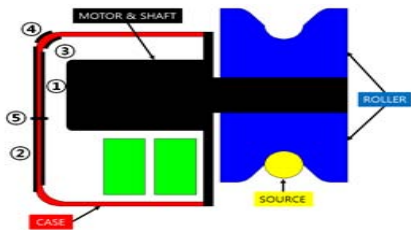


Fig. 8. Measuring location.

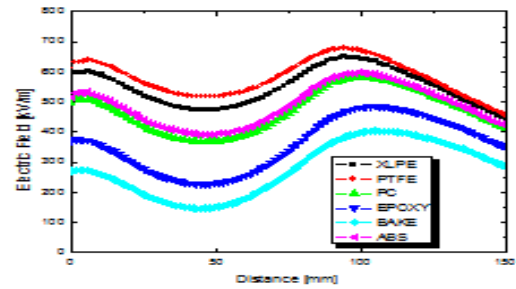


Fig. 9. Curve of electric field at inner case.

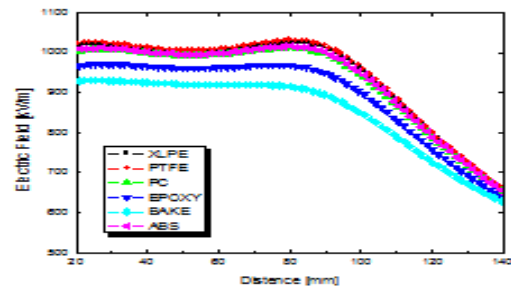


Fig. 10. Curve of electric field at outdoor case.

그림 9와 10은 외함의 내부(①영역)와 외부(②영역)에 대한 전계분포를 나타낸 것으로 ①영역에서는 PTFE에서 최대 전계가 6.79×10^5 V/m에서 최소 전계가 4.55×10^5 V/m의 값을 나타냈으며, 유전율이 가장 높은 Bakelite에서는 최대 전계가 4.04×10^5 V/m에서 최소 전계 1.46×10^5 V/m의 값을 나타내었다. 전체적으로 유전율의 증가는 외함 내부 전계를 감소시키는 효과를 나타냄을 확인할 수 있었다.

②영역에서도 ①영역과 동일하게 유전율이 낮은 PTFE에서 가장 높은 전계값인 1.03×10^6 V/m의 값을 나타냈었으며, Bakelite에서 최고값은 9.49×10^5 V/m의 값으로 8% 정도로 낮아짐을 확인할 수 있었다. 즉 유전율의 증가는 전계의 진행을 막게 되어 대부분 모터케이스와 내부 공간에 분포하게 된다고 사료된다 [3,7].

그림 11과 12는 외함 모서리 부분에서의 내부(③영역)와 외부(④영역) 전계 분포를 나타낸 것으로 PTFE에서 최고값은 6.13×10^5 V/m를 나타냈으며, 최저값은 4.44×10^5 V/m가 나타났다. Bakelite에서는 최고값은 3.18×10^5 V/m이며, 최저값은 9.95×10^4 V/m

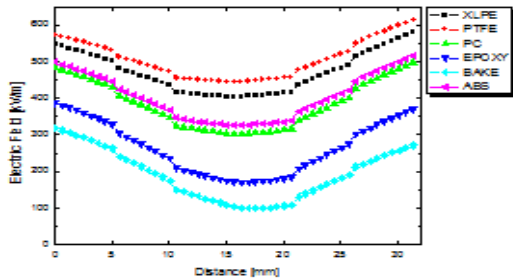


Fig. 11. Curve of Electric Field at inner corner.

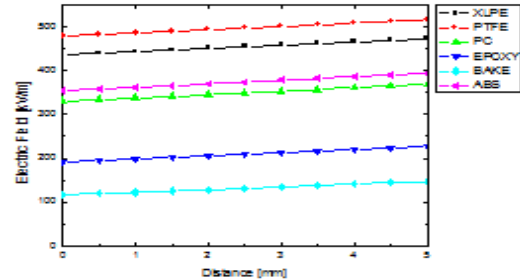


Fig. 13. Curve of electric field at inner material.

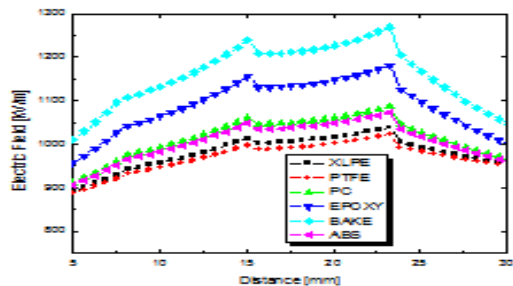


Fig. 12. Curve of electric field at outdoor corner.

의 값을 나타내었다. 전체적으로 유전율의 증가로 내부에서는 48% 감소함을 확인할 수 있었다. 모서리로 인해 전계의 집중현상은 유전율의 증가로 현저하게 감소시킴을 확인할 수 있었다.

④영역에서는 PTFE에서 최댓값이 1.02×10^6 V/m, 최솟값이 8.20×10^5 V/m이었으나, Bakelite에서는 최댓값 1.27×10^6 V/m, 최솟값 8.27×10^5 V/m을 나타냈다. 외함의 모서리는 전계의 집중을 유도하고 유전율이 높을수록 전하축적이 높으므로 전위경도가 크게 나타나기 때문에 전계가 높아진다고 사료된다 [6,8,9].

그림 13은 ⑤영역에서의 분포를 나타낸 것으로 모터 케이스와의 거리에 따라 PTFE에서는 5.16×10^5 V/m의 값을 나타냈으며, Bakelite는 1.47×10^5 V/m의 값으로 유전율의 증가는 전계의 감소를 나타내었다. 전체적인 전계의 변화량도 PTFE에서는 7.49×10^6 V/m 이었고, Bakelite는 6.13×10^6 V/m으로 유전율의 증가는 안정적인 변화를 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

유전율 증가에 따른 전계값은 유전율 비율과 거의 동일한 값을 나타내었으며, 내부 쪽에서는 Bakelite를 적용할 때 PTFE보다 72% 감소하였으며, 외부에서는 76% 감소하였다.

3.3 곡률반경 특성

외형 제작 시 각진 부분은 전계의 집중현상을 유도하기 때문에 곡률반경을 적용하여 전체적으로 곡선 구조로 제작하면 좋지만, 곡률반경이 커지면 케이스의 크기가 증가하기 때문에 될 수 있으면 각진 부분이 좋다. 이러한 상관관계로 인해 최적의 곡률반경을 찾기 위해 모서리 부분의 곡률반경을 0에서 부터 20 mm로 변화시키면서 최적의 상태를 조사해 보았다.

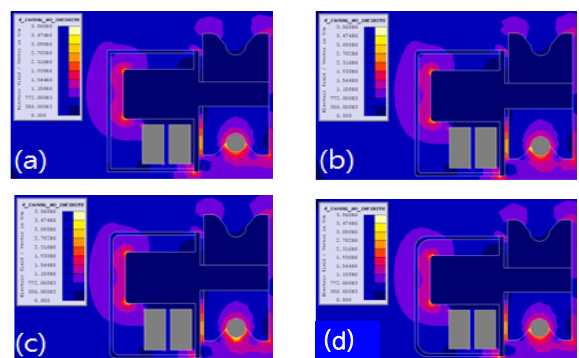


Fig. 14. Electric field by radius (a) 0 mm, (b) 5mm, (c) 10 mm, and (d) 20 mm.

그림 14는 곡률반경 변화에 따른 시뮬레이션 결과를 나타낸 것으로 곡률반경이 작을수록 모서리 부분에서 전계가 집중되어지는 현상을 확인할 수 있었으며, 곡률

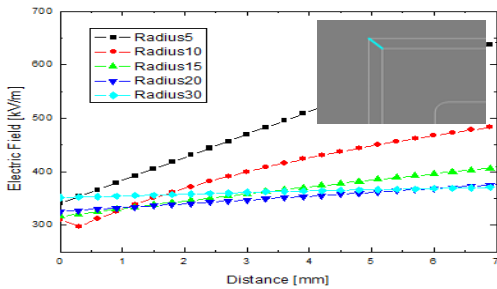


Fig. 15. Curve of electric field at conner.

반경 20 mm인 형상에서는 외부 전계 분포가 거의 일형으로 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

그림 15는 모서리 부분에서 절연층 내부와 외부 사이의 전계 분포를 조사한 것으로 거리에 따라 선형적인 증가를 나타내지만 곡률반경 작은 경우에 변화폭이 매우 큰 것으로 나타났다. 또한 곡률반경이 10 mm에서 변화량이 1.31×10^7 V/m, 20 mm에서 7.14×10^6 V/m, 30 mm에서 2.76×10^6 V/m의 값을 나타내었다. 또한 0 mm에서는 최댓값과 최솟값의 변화량이 89%였으며, 5 mm에서는 57%, 10 mm에서는 30%, 20 mm에서는 15%, 30 mm에서는 6%의 차이가 나타났다. 곡률반경의 증가는 전계 분포를 안정적으로 만들어주지만, 제작을 고려했을 때 20 mm 이상을 설정하면 안정적으로 형성될 것으로 사료된다 [8].

3.4 최종형상 전계분포

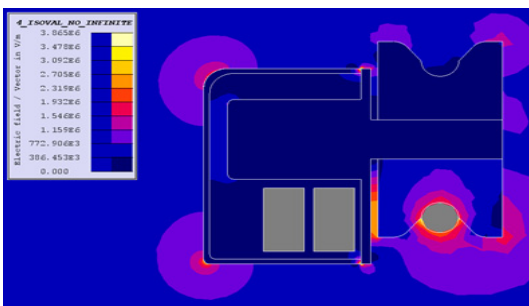


Fig. 16. Simulation of the final shape.

그림 16은 다양한 시뮬레이션 결과와 설계를 고려해서 두께는 5 mm, 물질은 ABS, 곡률반경은 20 mm로 설정한 후 시뮬레이션을 해 보았다. 최종 형상에서는 외

Table 2. Physical table of simulations.

Position	Material	Permeability	Resistivity (Ω cm)
Case	ABS	2.8	-
Outdoor paint	Conduction paint	1	1 k
Roller	NBR	5.4	1 M

함 외부에는 도전 페인팅을 0.5 mm로 페인팅을 하였으며, 표 2는 시뮬레이션에 적용한 재료들의 물성표이다.

시뮬레이션 결과 전계는 모서리 부분과 외함과 금속 표면이 접하는 부분에 주로 발생하였으며, 내부에는 전계가 거의 나타나지 않음을 확인할 수 있었다.

4. 결론

초고압 선로 진단장치 외함 절연설계를 위해 기계적 구조와 전기적 해석을 위해 다양한 부분을 고려해야 하지만, 본 논문에서는 기계적 부분을 최소화하고 전기적 해석 위주 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

○ 두께가 증가하면서 외함의 모서리 부분에 전계가 집중되었으며, 15 mm 이상의 두께에서는 기울기가 완만하게 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

○ 유전율인 높으면 전체적으로 전계의 세기를 감소시키지만, 모서리 부분에서는 반대로 전계의 집중현상이 더 강하게 나타남을 확인할 수 있었다.

○ 곡률반경은 15 mm 이상에서 안정적으로 변화됨을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 인천대학교 2014년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

[1] P. Werle, V. Wasserberg, H. Borsi, and E. Gockenbach, *2nd International Conference on Dielectrics and Insulation* (2000).
 [2] M. A. Heald, *Am. J. Phys.*, (1984).
 [3] P. K. Banerjee and R. Buterfield, *Boundary Element Methods in Engineering Science* (Mcgraw-Hill, 1981)

- [4] C. A. Brebbia, J.C.F. Telles, and L. C. Wrobel, *Boundary Element Techniques* (Springer-Verlag, 1984)
- [6] D. L. Logan, *A First Course in the Finite Element Method* (PWS Publishing Company Inc., 1993)
- [7] M. Khalifa, *High-Voltage Engineering: Theory and Practice* (Marcel Dekker Inc., New York, 1990)
- [8] N. O. Sadiku, *Numerical Techniques in Electro-magnetics* (CRC Press, 1986)
- [9] *User guide Flux11, 3* (Jaewoo Tech. Co., Ltd., 2014)