

경계요소법을 이용한 표면 거칠도에 따른 아라미드 절연지의 전계분포 해석

김탁용[†] · 안병철 · 조경순 · 박형준 · 홍진웅

광운대학교 전기공학과

(2006. 7. 28. 접수 / 2006. 10. 12. 채택)

Analysis of Electric Field Distribution according to Surface Roughness of Aramid Insulating Paper Using Boundary Element Method

Tag-Yong Kim[†] · Byung-Chul Ahn · Hyung-Jun Park · Kyung-Soon Cho · Jin-Woong Hong

Department of Electrical Engineering, Kwangwoon University

(Received July 28, 2006 / Accepted October 12, 2006)

Abstract : In this paper, we investigated the electric field distribution according to the roughness in aramid insulating paper for electric machine. Aramid insulating paper has been used to electric insulating of the traction motor and generators for large capacity. We studied the electric field distribution using boundary element method for Aramid insulating paper. As a result of simulation, the electric field increased according to the surface roughness existence. Electric field decreased due to radius of surface roughness reduction, and Electric field concentration appeared at electrode boundary and rough surface.

Key Words : aramid paper, boundary element method, electric field, surface roughness

1. 서 론

최근 컴퓨터의 발달로 손으로 계산하기 힘들었던 고차방정식을 쉽게 해석 할 수 있는 각종 프로그램이 발달하였고¹⁾ 경계요소법은 수치해석방법의 하나로서 영역전체를 요소분할 하는 유한요소법과는²⁾ 달리 경계만을 요소분할, 해석하여 대상의 차원을 낮추고 요소수 및 절점수를 감소시켜 해석대상의 해석시간을 줄일 수 있다는 장점을 가지고 있어³⁾, 선형 정전계 문제에서는 높은 신뢰성을 가지고 있다⁴⁾.

아라미드 절연지는 주로 전력용 변압기의 대용량화에 따른 신뢰성 개선을 위해 사용되어 왔으며⁵⁾ 기존 절연유와 함께 사용함으로써 경제성을 향상시킬 수 있어, 초고압 설비에서 사용하기 위한 연구가 진행되고 있다⁶⁾. 대형 회전기기의 Slot liner 및 상 절연, 소형 모터의 열 가공, 대용량 변압기의 층간, 배리어, 탭 및 리드 절연 그리고 회전기용 철판

말단 등에 사용되는 두께 0.5[mm] 아라미드 절연지는⁷⁾ 원재료 분자구조가 섬유질 결합분자이고 매우 안정한 방향족 폴리아미드의 분자구조를 가지고 있어 우수한 전기절연특성을 가지고 있다. 하지만 아라미드 절연지를 적층하여 사용 시에 오랜 기간 동안 외상이나 왜곡, 보이드, 오염물질, 요철 등으로 계면의 거칠도에 의한 전계집중으로 인하여 절연파괴를 초래하는 경우가 있다⁸⁾.

따라서 본 논문에서는 경계요소법을 이용한 2차원 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 3층으로 적층된 아라미드 절연지의 인공표면거칠도와 보이드에 따른 전계분포를 해석한 결과를 소개하고 아라미드 절연지에 표면거칠도와 보이드 존재 시 전기적 특성에 미치는 영향을 조사하여 절연체에서 고장방지를 최소화하고 신뢰성을 확보하기위한 연구를 하였다^{9,10)}.

2. 시료 및 실험

2.1. 시료

시료인 아라미드 절연지의 결합구조를 관찰한 것

[†] To whom correspondence should be addressed.
skrdyd@kw.ac.kr

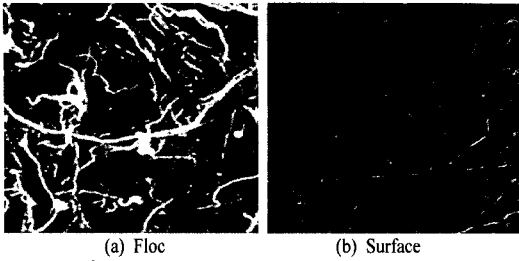


Photo 1. Structure of specimen.

이 Photo 1로 (a)는 기계적 강도를 강하게 하는 floc 섬유이고 (b)는 시료의 표면 사진으로 미세한 섬유 질로 결합된 것으로 전기적 특성과 기계적 특성이 우수한 절연재료임을 알 수 있다. 일반적으로 절연지의 두께는 0.05~0.75[mm]로 제작하고 절연 및 기계적 강도가 우수하며, 탄성 및 유연성을 갖기 위해 표면을 팽택처리 한다.

Fig. 1은 CIGRE 전극법으로 설계한 시료형상으로 Fig. 1(a)는 두께 0.5[mm] 아라미드 절연지 3장을 적층하여 설계한 원시료의 형상이고 Fig. 1(b)는 거침면이 단면(單面)으로 존재 시, 그림 Fig. 1(c)는 거침면이 양면(兩面)으로 존재 시, 그리고 Fig. 1(d)는 양면으로 거침면이 존재하고 장방형 보이드가 존재 시 형상이다. 거침도의 표면은 공기로 설정하고 3층으로 적층된 아라미드 절연지의 중앙 절연지에 보이드를 삽입하였으며, 중앙 절연지와 하부 절연지 사이의 단면과 양면에 각각 지름 30[μm]의 거침도 길이가 5.5[mm]로 설계하고 거침면 길이가 동일한 상태에서 거침도 반경을 2, 4배로 증가시켜 변화에 따른 전계분포를 조사하였다. 한편 시뮬레이션 해석을 위한 물성은 Table 1과 같다.

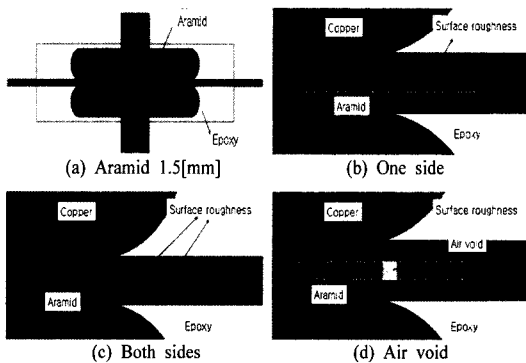


Fig. 1. Schematic diagram of specimen.

Table 1. Physical properties

Classification	Air	Aramid	Copper	Epoxy
Permittivity (ϵ_r)	1.00006	3.5	1	4.9
Conductivity (σ)	5×10^{-17}	5×10^{-15}	5.8×10^7	6.6×10^{-18}

2.2. 실험

본 실험에서는 아라미드 절연지의 거침도 변화 및 보이드에 따른 전계분포를 조사하기 위해 Boundary element method으로 제작된 IES co.의 전계 해석 프로그램 ‘Electro’를 사용하였다¹⁰⁾. 정전계에서 전계는 각각의 공간에 위치에서 상수벡터로 표현될 수 있고, 정적상태 sine 전계에서 각각의 공간원소는 전계로 설명되고 위상을 따라 구별된다. 각각의 공간원소는 벡터가 아닌 위상이라 정의하고 위상은 벡터가 공간각을 갖는 동안 시간각인 instantaneous quasi-static sinusoidal coordinate system인 데카르트 좌표로서 표현될 수 있다.

모델형상은 CIGRE 전극법으로 설계하고, 상부전극에 교류 20[kV] 60[Hz]을 인가하고 하부전극은 접지하였으며 상·하 전극은 동 위상으로 설정하고, 형상을 해석하기 위해 요소를 삼각형 형태 3000개로 이산화 하였으며 이것은 형상이 원호로 된 부분이 존재할 경우에 정사각형의 그물망보다 삼각형 그물망으로 이산화할 경우가 더 근접한 결과 값을 얻을 수 있기 때문이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 전계 등고선 분포

Fig. 2는 원시료의 전계 등고선도로 Fig. 2(a)는 전극 경계면을 중심으로 확대한 전계 등고선을 나타낸 것으로 전계의 집중은 전극경계부분의 전극곡률 반경에 의한 것이다.

Fig. 2(b)는 중앙 절연지와 하부 절연지 사이에 단면 거침도를 설정한 것으로 전극경계와 거침도가 존재하는 부분에서의 전계집중을 확인한 것으로 전극 곡률반경에 따른 전계집중과 거침도에 의한 전계집중의 공동기여에 의한 것으로 사료된다.

Fig. 3(a),(b)는 거침면이 단면으로 존재하는 시료의 거침도 반경을 2배, 4배로 증가시켜 얻은 전계 등고선도이다.

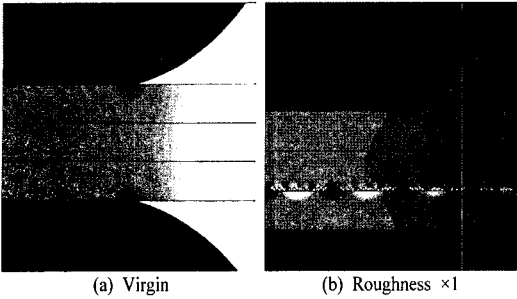


Fig. 2. Electric field distribution contour of virgin and one side roughness sample.

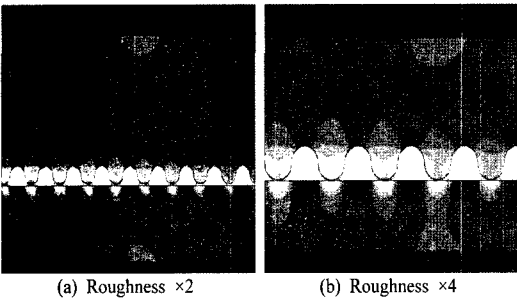


Fig. 3. Electric field distribution contour of one side roughness samples.

전극 곡률반경이 시작되는 곳을 중심으로 거칠기 내부 곡률반경 경계부분에 높은 전계집중이 나타남을 확인하였다. 절연지보다 상대적으로 공기의 비유전율이 작기 때문에 내부에 전계가 집중되는 것으로 보인다. 이것은 거침면 반경이 2배로 증가되면 거침도에 의한 전계집중과 시료사이에 존재하는 공기 양의 증가로 전계값이 커지나, 거침면 반경이 4배로 커지면 전계완화현상의 기여로 약간 줄어들을 확인 할 수 있다¹¹⁾.

Fig. 4(a),(b)는 거침면이 양면으로 존재하는 시료의 거침도 반경을 2배, 4배로 증가시킨 전계 등고선도이다. 거침면의 반경이 2배로 커지면 거칠기에 따

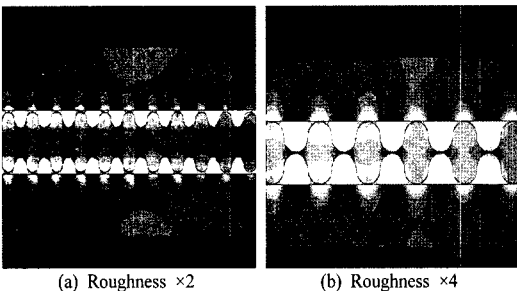


Fig. 4. Electric field distribution contour of both side roughness samples.

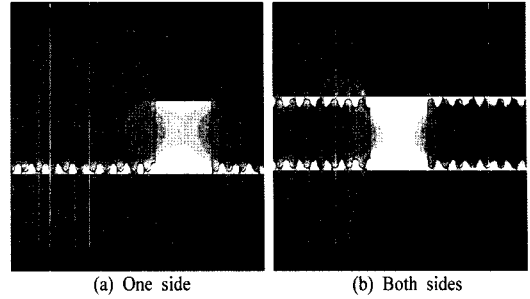


Fig. 5. Electric field distribution contour of void samples.

Table 2. Max E-field contour according to roughness

Classification			E-field value	
Virgin			$1,353 \times 10^7$ [V/m]	
No void	Roughness	One side	$1,375 \times 10^7$ [V/m]	
		Both sides	$2,289 \times 10^7$ [V/m]	
	Roughness $\times 2$	One sides	$5,636 \times 10^7$ [V/m]	
		Both sides	$5,245 \times 10^7$ [V/m]	
	Roughness $\times 4$	One side	$4,711 \times 10^7$ [V/m]	
		Both sides	$4,446 \times 10^7$ [V/m]	
Void				
			One side	$6,346 \times 10^7$ [V/m]
			Both sides	$5,404 \times 10^7$ [V/m]

른 전계집중과 충전된 공기의 기여로 전계분포 값은 커지나, 곡률 반경이 4배로 커지면 충전 공기의 기여보다 거침면의 곡률 반경에 따른 전계완화로 전계집중 값이 약간 감소됨을 확인 할 수 있다¹²⁾.

Fig. 5 (a),(b)는 장방향 보이드가 전극 경계면에 존재하고 단면과 양면으로 거침도가 존재할 때를 나타낸 전계 등고선도이다.

장방향 보이드를 중심으로 전계집중이 나타나며 거침도가 존재하는 위치에서도 전계집중이 나타나는 것을 확인 하였다. 인공 보이드 내부 각에 의해 전계가 내부로 편향된 것으로 보인다. 이는 비유전율이 원시료에 비해 낮은 공기가 보이드 내부에 존재하므로 전계가 집중 된 것으로 사료된다¹³⁾. Table 2는 거침도에 따른 시료의 전계분포를 정리한 것으로 보이드 존재 시 전계값은 증가하였고 거침도가 존재 시에도 전계값은 증가하였다. 또한 거침면의 반경 증가는 전계완화에 기여함을 확인하였으며, 그리고 보이드 유·무와 거침도 반경에 따른 수평전계와 수직 전계를 조사하였다.

3.2. 수평면, 수직면전계 해석위치

Fig. 6은 수평면, 수직면전계의 해석위치를 나타낸 것으로 수평면 전계의 경우 상부전극과 경계를

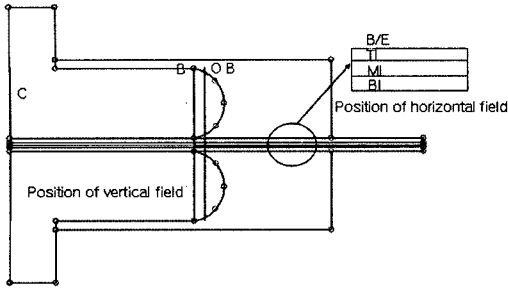


Fig. 6. Position of electric field(horizontal or vertical).

이루는 아라미드 절연지부분(B/E), 3층 적층된 아라미드 절연지 상부(TI), 중부(MI) 그리고 하부(BI) 부분에서 거리(d)에 따른 전계(E)를 측정하였고 측정거리는 전극부분에서 시작하여 외부절연지 말단까지로 설정하며, 수직면 전계는 각각 전극중앙(C), 전극경계(B) 그리고 전극외측 0.7[mm](OB)위치에서 거리(d)에 따른 전계(E)를 측정하였고 측정거리는 상부전극경계에서 하부전극경계까지로 설정하였다.

3.3. 수평면 전계분포

두께 0.5[mm] 시료를 3층으로 적층하고 교류 20 [kV]의 전압을 인가했을 때 수평면 전계분포를 조사한 것이 Fig. 7이다. 그림에서 전계집중은 전극 경계의측에서 가장 높음을 확인 하였다. 따라서 수평면 전계를 보다 자세히 조사하기 위하여 전극경계부

분(B/E)과 3층 적층된 아라미드 절연지의 상부(TI), 중앙(MI), 하부(BI) 위치에서 전극경계부터 아라미드 절연지 끝부분까지 조사하였다. Fig. 7(a)는 원시료의 수평전계분포를 나타낸 그래프로 하부 절연지에서 가장 큰 전계값이 조사되었고, 크기는 4.19×10^7 [V/m]를 얻었다. Fig. 7(b)는 거칠도가 단면, 양면존재 시의 수평전계분포를 나타낸 그래프로 단면거칠도가 존재하는 중앙 절연지(MI/O), 단면거칠도가 존재하는 하부절연지(BI/O), 양면거칠도가 존재하는 중앙절연지(MI/B) 그리고 양면거칠도가 존재하는 하부 절연지(BI/B)에서의 수평전계분포를 나타낸 그래프로 단면 거칠도를 갖는 시편에서는 중앙 절연지(MI/O)에서 가장 큰 전계값 3.99×10^7 [V/m]을 나타내고, 양면 거칠도를 갖는 시편은 중앙절연지(MI/B)에서 전계값 3.8×10^7 [V/m]로 5[%] 감소함을 확인하였으며 두 시료 모두 거칠도가 존재하는 절연지 중앙에서 전계가 집중되는 것을 확인 하였으며, 이것은 거칠도의 존재로 인하여 발생하는 전계집중으로 인한 현상으로 사료된다. Fig. 7(c)는 같은 조건에서 거칠도를 2배로 증가시켰을 때 수평면 전계분포를 나타낸 것으로 단면거칠도 시편의 중앙 절연지에서 전계값이 4.96×10^7 [V/m]를 얻었으며, 양면거칠도 시편의 중앙 절연지에서는 전계값이 4.58×10^7 [V/m]로 8.2[%] 감소하여 Fig. 7(b)와 같은 현상이 나타남을 확인할 수 있었다. Fig. 7(d)은 같은 조건에서 거칠도 반경

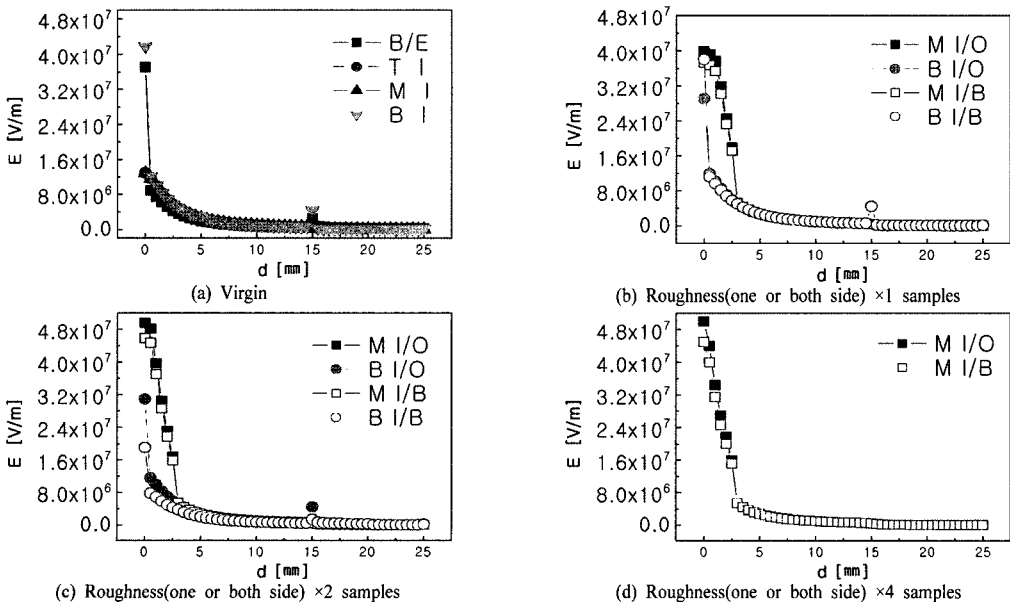


Fig. 7. Horizontal E-field distribution according to roughness.

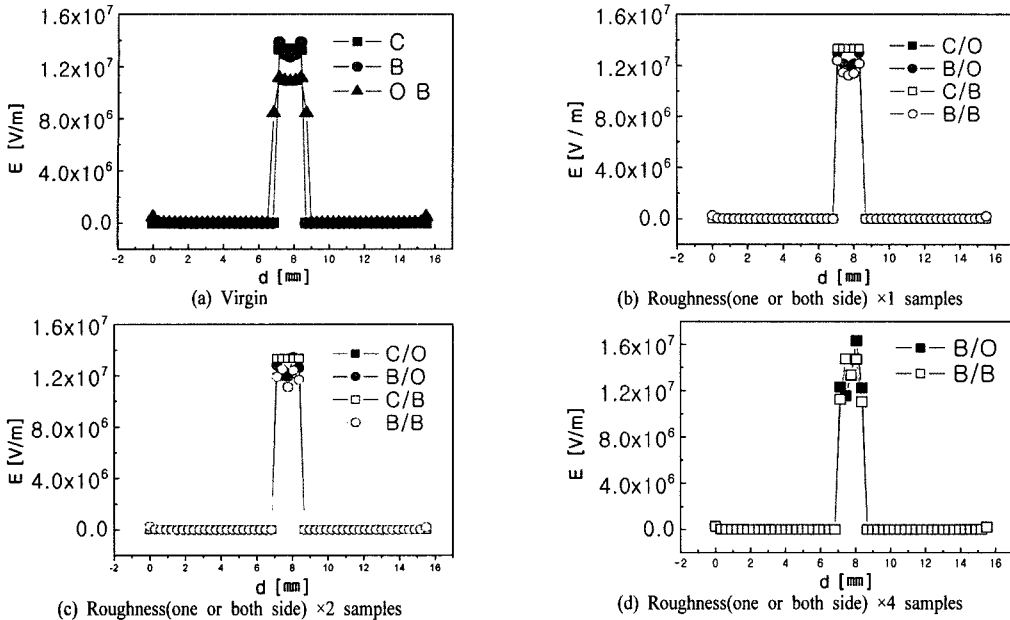


Fig. 8. Vertical E-field distribution according to roughness.

을 4배로 증가시킨 시료의 수평전계분포를 나타낸 그래프로 단면 거침도가 존재하는 중앙 절연지에서 가장 큰 전계값 4.99×10^7 [V/m]을 얻었고 양면 거침도 시편의 중앙 절연지에서는 4.5×10^7 [V/m]로 10[%] 감소함을 확인하였다. 이는 거침도 반경의 증가로 인한 전계완화현상으로 사료된다.

3.4. 수직면 전계분포

같은 조건에서 수직면 전계분포를 조사하기 위하여 전극곡률반경이 시작되는 경계를 중심으로 각각 전극중앙(C), 전극경계(B), 경계외측 0.7[mm](OB)위치의 수직면상에서 전계분포를 조사하였다. Fig. 8(a)는 원시료의 수직전계분포를 나타낸 그래프로 전극곡률반경에 의한 전극경계 위치에서 전계집중이 나타났으며, 전극경계와 전극외측 0.7[mm]에서의 수직전계분포는 아라미드 절연지에 의하여 대칭적으로 전계분포가 나타남을 확인할 수 있었고, 최대값은 전극경계에서 1.39×10^7 [V/m]을 얻었다. Fig. 8(b)는 거침도 존재 시의 수직전계분포를 단면거침도 시편의 전극중앙(C/O), 전극경계(B/O), 양면거침도 시편의 전극중앙(C/B), 그리고 양면거침도 시편의 전극경계(B/B)에서 나타낸 그래프로 단면 거침도 시편은 전극경계(B/O)에서 1.29×10^7 [V/m], 양면 거침도는 전극경계(B/B)에서 1.24×10^7 [V/m]로 4[%] 감소하여 동일 시료에서의 수평전계분포와 같은 현상이

나타남을 확인 할 수 있었다.

Fig. 8(c)는 거침도의 반경을 2배로 증가시킨 시료의 수직전계분포를 나타낸 그래프로 단면거침도 시편의 전극경계(B/O) 위치에서 전계집중을 나타내며, 크기는 1.34×10^7 [V/m]을 얻었고 양면거침도 시료(B/B)는 1.24×10^7 [V/m]로 단면 거침도 시료에 비하여 8[%] 감소함을 확인하였고, 단면거침도 시료의 (B/O)경우 전극경계와 전극외측 0.7[mm]위치에서 거침도의 존재로 인한 비대칭적인 전계분포가 형성되는 것도 확인할 수 있었다. Fig. 8(d)는 같은 시료의 거침도 반경을 4배로 증가하고 수직전계분포를 단면거침도의 전극중앙(C/O), 전극경계(B/O), 양면거침도의 전극중앙(C/B) 그리고 전극경계(B/B)에서 나타낸 것으로 최대값은 단면 거침도 시료의 전극경계위치(B/O)에서 1.63×10^7 [V/m]을 얻었고, 양면 거침도 시료(B/B)는 1.47×10^7 [V/m]로 단면 거침도에 비하여 10 [%] 감소하였고 전계집중 현상은 거침면이 단면거침도 시료에 비하여 양면거침도 시료에서 전계집중이 대칭적으로 나타남을 확인할 수 있었다.

4. 결론

거침도에 따른 아라미드 절연지의 전계분포를 경계요소법으로 연구한 결과, 전계등고선에서는 전극 경계면과 거침도에 따라 전계집중의 변화를 확인하

였다. 단면 거칠기 시료는 원시료 보다 전계값이 1.6 [%] 증가 하였지만, 양면 거칠기 시료는 원시료 보다 전계값이 69[%] 증가 하였다. 이것은 단면 거칠도시료에 비하여 양면거칠도 시료의 거칠도가 증가하여 전계집중이 증가한 것이라 사료된다. 거칠도의 수평, 수직 전계분포에서는 전극경계면과 거칠도가 존재하는 위치에서 가장 큰 전계집중이 되는 것을 확인 하였다. 수평전계분포에서 시료의 거칠도 반경을 2 배로 증가시키면 양면 거칠도 시료는 단면 거칠도에 비하여 전계집중이 8.2[%] 감소함을 확인하였고 4배로 증가시키면 10[%] 감소함을 확인하였으며, 수직 전계분포에서 거칠도 반경을 2배로 증가시키면 양면 거칠도 시료는 단면 거칠도에 비하여 8[%] 감소함을 확인하였고 4배로 증가시키면 양면 거칠도는 단면 거칠도에 비하여 10[%] 감소하였으며, 전계집중 현상은 거칠면이 단면에 비하여 양면에서 전계집중이 대칭적으로 나타남을 확인할 수 있었다. 거칠기의 증가는 전계집중을 발생할 수 있고 또한 거칠기의 반경증가는 첨예도의 감소로 인하여 전계집중은 완화되지만 주위가 공기로 채워지므로 전체적인 전계집중은 증가된 것으로 사료되고, 공기 보이드가 존재 시 원시료에 비해서 상대적으로 비유전율이 낮은 보이드를 중심으로 전계가 집중되는 것을 확인 하였다. 이것은 거칠도형성시 불규칙적인 거칠기를 평균적으로 설정하여 인공거칠도를 형성한 결과라 사료된다.

참고문헌

- 1) Banerjee, P.K., and R. Butterfield, "Boundary Element Methods in Engineering Science", McGraw-Hill, pp. 15~30, 1981.
- 2) Brebbia, C. A., J. C. F. Telles and L. C. Wrobel, "Boundary Element Techniques," Springer-Verlag, pp. 100~120, 1984.
- 3) 境界要素法研究会編, "境界要素法の理論と應用", コロナ社, pp. 53~60, 1986.
- 4) N. Tosaka and T. Nakayama, "境界尿素法基本", pp. 183~187, 1995.
- 5) 이기철, "21세기의 변압기 기술", Dupont AFS 사업부, p. 29, 2000.
- 6) Bhatia, A., "Aramid papers with improved dimensional stability", Electrical Electronics Insulation Conference, and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference Proceedings, pp. 409~410, 18-21, 1995.
- 7) Ul-Haq, S., "Influence of moisture on dielectric strength in polyamide (aramid) paper", Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Annual Report. Conference on, pp. 325~328, 2003.
- 8) Smith, J. D. and Hatfield, L. L., "Measurement of the effect of surface roughness on flashover", Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Annual Report, Conference on, pp. 47~52, 1988.
- 9) Brebbia, C. A., "The Boundary Element Method for Engineers", Pentech Press, pp. 25~30, 1978.
- 10) IES, "3D properties guide version 75.2", pp. 3~15, 1980.
- 11) Mahdy, A. M., Anis, H. I., Ward, S. A., "Electrode roughness effects on the breakdown of air-insulated apparatus", Dielectrics and Electrical Insulation of the IEEE, Volume 5, Issue 4, pp. 612~617, 1998.
- 12) Wiltanen, D. O., Goudie, J., Teran, H. A. R., "Surface breakdown test results of mineral oil and silicone oil with Kraft paper and Nomex", Electrical Insulation, Conference Record of the IEEE International Symposium on, pp. 254~257, 1992.
- 13) Fothergill, J. C., "Electrical breakdown and degradation measurements", Physical Characterisation of Polymeric Dielectrics, IEE Colloquium on, viii, p. 21, 1989.