

# 보이드에 따른 아라미드 절연지에 전기적 특성

박형준 · 신종열\* · 홍진웅

광운대학교 전기공학과 · \*삼육의명대학 자동차과

## 1. 서 론

고온 절연재를 사용하는 변압기에서 새로운 기술로서 소형 경량화, 절연유 감소, 난연성, 용량증가 및 저 손실을 포함한 경제성, 친환경성 및 안전성 혜택을 사용자에게 제공하고 있다. 이러한 기술은 1980년대 미국과 유럽에서 공동으로 개발되었으며, 최근에는 우리나라, 중국, 아르헨티나, 파라과이, 남아프리카, 대만 및 호주를 포함한 국가에서도 점차 적용되어지고 있다. 이러한 변압기의 제조와 용도에 따른 제조업자와 사용자에게 지침을 주기 위해 새로운 규격(IEEE std 1276-1997)이 제정되었다. 전력회사, 산업체 및 철도회사가 주요 사용자이며 이러한 새로운 기술을 적용한 변압기들이 변화를 주도하고 있다. 아라미드를 주로한 고온 절연재는 용량증가와 신뢰성 개선을 위해 전력용 및 배전용 변압기에 사용되며 경제성 측면에서 기존 절연유와 함께 사용할 수 있다<sup>1)</sup>. 이러한 고온 절연재는 용량증가와 신뢰성을 개선하기 위해 전력용 및 배전용 변압기에 사용되며 경제적 측면에서 기존 절연유와 함께 사용될 수 있다. 아라미드 절연지는 최근까지 초고압 설비에서 연구가 활발하게 이루어져왔다. 특히, 대형 회전기기의 Slot liner 및 상 절연, 소형 모터의 열 가공, 대용량 변압기의 층간, 배리어, 탭 및 리드 절연, 회전기용 열철판 말단(end lamination)에 사용되는 두께 0.5[mm]인 아라미드 절연지는 원재료 분자구조가 섬유질 결합분자이다. 그러나 오랜 기간 동안 외상이나 왜곡, 보이드, 오염물질, 용기에 의한 국부적인 전계집중을 통한 부분방전이나 수분에 의한 수 트리(Water tree) 열화는 전기절연특성에 심각한 손상을 주어 전력계통에 손실을 가져온다. 따라서, 본 논문에서는 아라미드 절연지에 인공 표면거침도와 보이드 존재 시 전기적 특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 아라미드 절연지를 3층 적층하고 표면 거침도와 보이드의 영향에 대하여 연구한 결과를 소개한다.

## 2. 시뮬레이션

### 2.1 형상설계

본 실험에서는 아라미드 절연지에서 보이드와 거침도에 따른 전계분포를 조사하기 위해 전압에 따른 전계강도를 경계요소법(적분 방정식)을 기반으로 한 2차원 범용 프로그램인 Integrated Engineering Software Co.의 준안정-정전계 해석 프로그램인 Electro를 사용하여 대형 회전기기인 건인전동기 내부 절연체에서 고장방지를 최소화

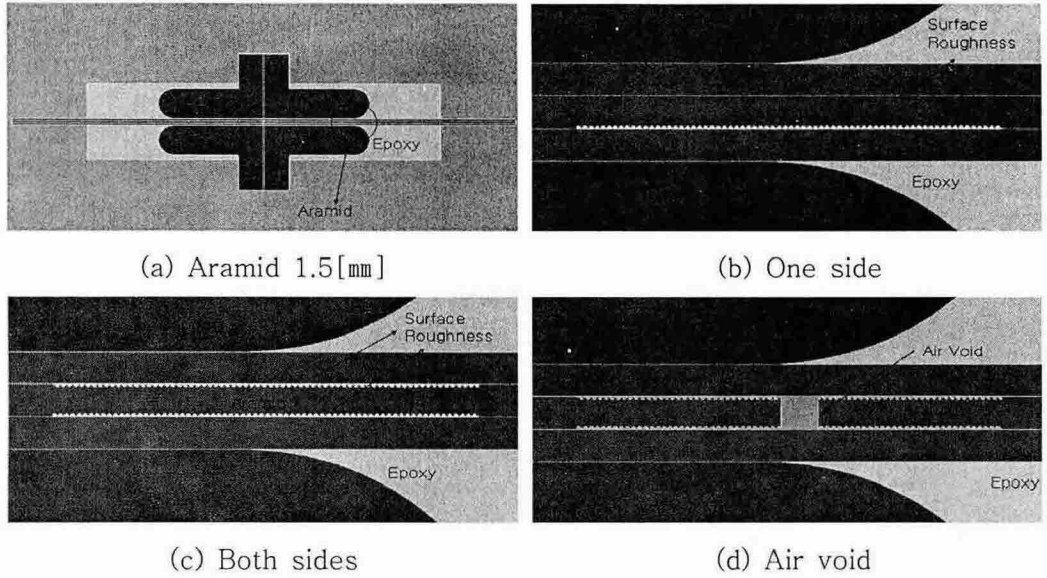


Fig. 1 Schematic diagram of electrode

하고 안정적인 운용 및 신뢰성을 확보하기 위한 연구를 하였다.

첫 단계로, 설계대상인 CIGRE(International Council on Large Electric Systems)전극법에 의한 형상을 2차원 평면으로 설계하였다. 1921년에 프랑스에서 제정된 CIGRE는 국제적 전력사업조직으로서 전력사업에 환경성 및 경제성 등을 주도해가고 있다. Fig. 1은 CIGRE 전극법에 의한 전극형상도이다. (a)는 원시료의 형상이다. 아라미드 절연지 두께는 0.5[mm]로 3장을 적층하여 1.5[mm]로 조사하였다.

Fig. (b)는 거침도가 단면으로 존재 시, Fig. (c)는 거침도가 양면으로 존재 시, Fig.(d)는 양면으로 거침도를 설정한 정방형 보이드가 존재 시 형상이다. 아라미드 절연지 3층에서 2, 3층 사이에 보이드를 단면과 양면으로 각각 지름 30[μm]에 거침도 길이를 5.6 [mm]로 전계분포를 조사하였다.

Table 1. Properties of material

Classification	Aramid	Air	Copper	Epoxy
Relative permittivity ( $\epsilon_r$ )	3.5	1.0006	1	4.9
Conductivity( $\sigma$ )	$5 \times 10^{-17}$	0.02	$5.8 \times 10^7$	$6.6 \times 10^{-18}$

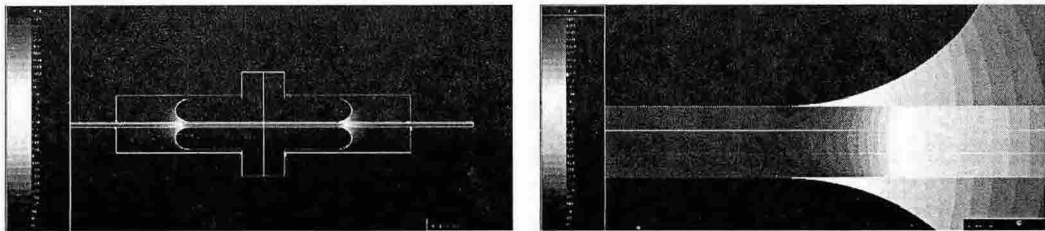
표 1은 본 연구에서 설정한 물질의 특성이다. 전계값을 산출하기 위해 비유전율과 전도율을 사용하였다.

## 2.2 전계 도표 (Electrostatic field plot)

전계 분포도는 전계집중의 정도를 가시화하여 조사하기 위한 것으로, 윤곽선 도표는 색상에 종류에 따라 적색이 가장 높고, 청색이 가장 낮은 집중도로 조사된다.

### 2.2.1 윤곽선 도표 (Contours plot)

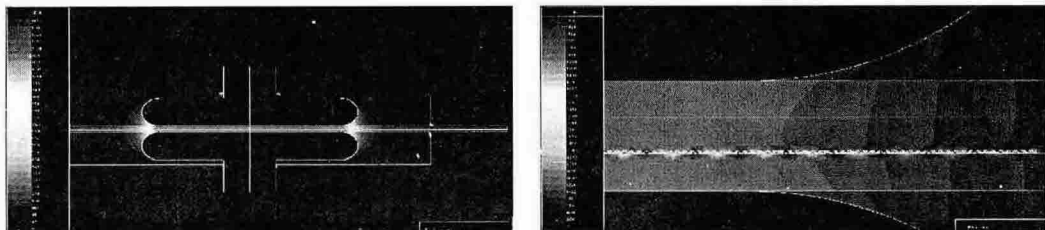
Fig. 2는 원시료에 2차원 전계분포도를 나타낸 것이다. (a)는 2차원 전체를, (b)는 보이드와 거침도가 있는 부분을 국부적으로 조사하였다. 2-(b)에서 연면방전을 방지하기 위한 곡률반경이 시작되는 부분에 전계가 가장 높은 값이 조사되었다. Fig 3 ~ 4은 거침도 단면, 양면이 존재 시에 전계분포이다. 거침도에 따른 전계강도가 곡률반경이 시작되는 부분을 중심으로 집중되어있다. 이는 아라미드 절연지에 비해 상대적으로 비유전율이 낮은 공기거침도가 전계분포가 가장 높은 값을 나타나는 것으로 사료된다.



(a) All

(b) Part

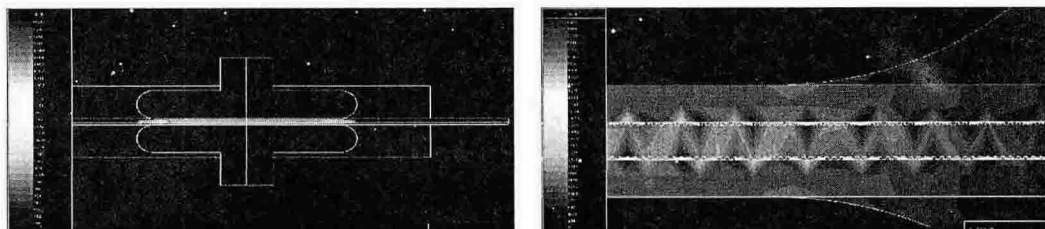
Fig.2 Virgin



(a) All

(b) Part

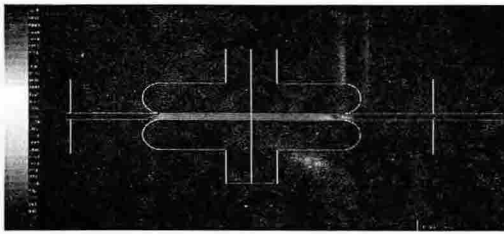
Fig.3 Roughness of the one side



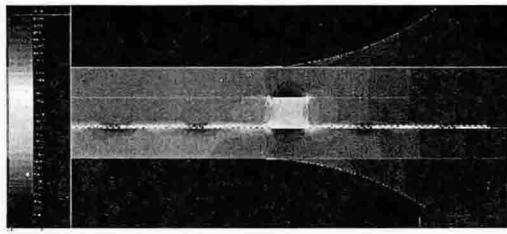
(a) All

(b) Part

Fig.4 Roughness of the both sides

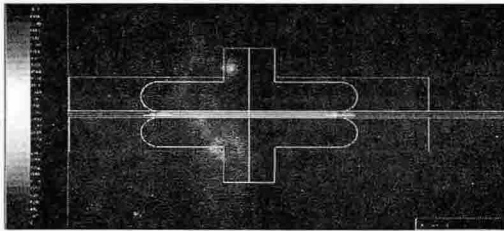


(a) All

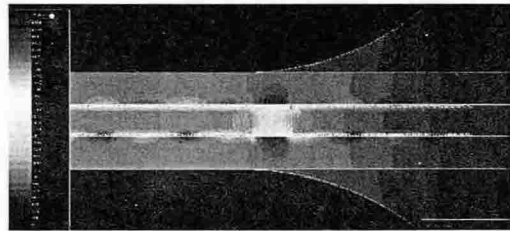


(b) Part

Fig 5. Roughness of the one side in void



(a) All

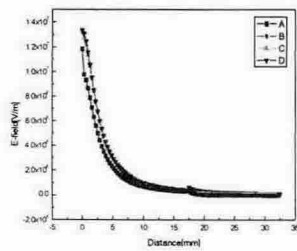


(b) Part

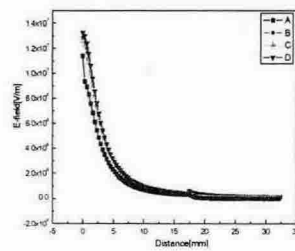
Fig 6. Roughness of the both sides in void

### 2.2.2 거침전계분포 (Electric field distribution of the surface roughness)

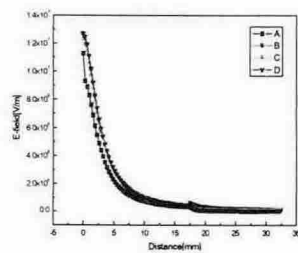
거침 전계분포는 수직면과 수평면에서 나타는 전계집중을 그래프로 조사하였다.



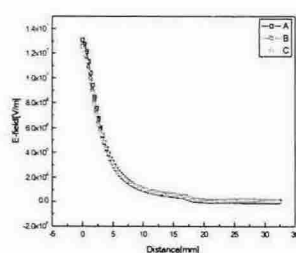
(a) Virgin



(b) One sides



(c) Both sides



(d) Center

Fig. 7 Graph for boundary of the electrode

수평면은 전극경계를 중심으로 원시료 말단까지 분포를 조사하였으며, 수직면은 수평면에서 가장 높은 전계집중이 조사된 곳을 중심으로 여러 경우를 비교하여 조사하였다.

Fig 5 ~ 6은 정방형 보이드가 있을 때 전계분포도이다. Fig. 6에 보이드 면적이 증가에 따라서 양면 거침도가 가장 높은 값으로 조사되었다.

Fig. 7은 전극경계를 중심으로 한 수평면 전계분포도이다. Fig. 7-(a)는 원시료, (b)는 거침도가 단면으로 존재 시, (c)는 양면 (d)는 전극 중앙에 전계분포를 각각 비교한 것이다. 또한 그래프에서 A는 전극중앙, B는 전극경계, C는 상부에 절연지 중심, D는 중앙에 적층한 절연지 중심에 수평면 전계를 그래프로 조사하였다. 또한 곡률반경이 시작되는 전극 경계면을 중심으로 수평면 분포를 조사하였다. 그 결과 경계 외측 0.32[mm]에서 가장 높은 값이 조사되었다. 이는 전극 곡률반경으로 인한 전계분포가 집중되는 것으로 사료된다. Fig. 8은 전극 경계를 중심으로 보이드가 존재 시 경계 외측 0.32 [mm] 수직면 전계분포이다. (a)는 원시료, (b)는 거침도가 단면, (c)는 양면, (d) 경계 외측 0.32[mm] 지점일 때 수직면 분포를 원시료, 단면, 양면 거침도를 각각 비교하였다. Fig. 7에서 가장 높은 전계집중으로 조사된 경계 외측 0.32[mm] 지점으로부터, A는 전극 경계, B는 경계, C는 경계외측 0.32[mm] 지점에 전계분포를 비교하였다. 그 결과 Fig. 8-(b) ~ (c)에서 거침도가 존재하는 영역에 전계가 증가하는 것을 확인하였다. Fig. 8-(d)의 경우에 거침도에 유, 무에 따른 경계외측 0.32[mm] 지점에 전계분포를 조사한 결과, 양면 거침도가 존재한 (c)에서 가장 높은 전계집중이 조사되었다.

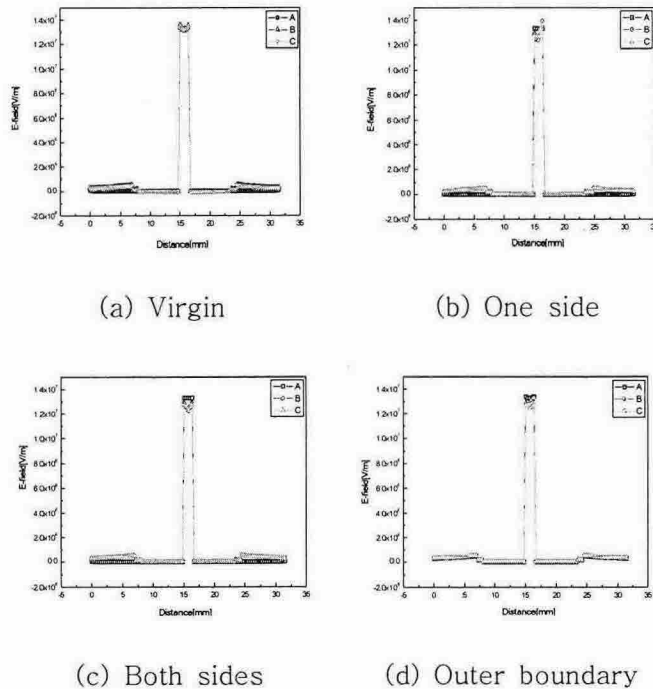


Fig 8. Graph for vertical of the electrode

Table. 2 Maximum value for the contour plot

(a) Part of contour plots

(b) All of contour plots

Classification		Electric field max. value [V/m]	Classification		Electric field max. value [V/m]
Virgin	Aramid	$1368 \times 10^4$	Virgin	Aramid	$1412 \times 10^4$
	One side	$1423 \times 10^4$		One side	$6130 \times 10^4$
	Both sides	$5585 \times 10^4$		Both sides	$6412 \times 10^4$
Air void	One side	$6671 \times 10^4$	Air void	One side	$4321 \times 10^4$
	Both sides	$6696 \times 10^4$		Both sides	$6438 \times 10^4$

표 1, 2는 거침도와 보이드 종류에 따른 윤곽선 도표(Contour plot)에서 나타나는 전계의 최대값을 비교하였다. 표 1은 보이드와 거침도가 존재하는 영역에 전계분포를 비교하였는데, 거침도와 보이드 존재에 따라 구리보이드 양면에 전계분포가 높게 조사되었다. 표 2는 전계 최대값을 확대해서 조사한 것이다. 표 1과 같은 결과를 보였으며, 형상 전체적인 전계분포를 비교한 결과 표 1보다 높은 수치가 조사되었다.

### 3. 결론

보이드와 거침도에 따른 아라미드 절연지의 수직·수평 전계분포를 비교, 분석한 결과 아라미드 절연지에 거침도의 크기가 증가할수록 전계집중 최대값이 커졌으며, 공기 보이드 존재하면 원시료에 비해서 상대적으로 비유전율이 낮은 보이드를 중심으로 전계가 집중되는 것을 확인하였다. 또한 양면으로 거침도가 존재하고 공기 보이드가 있으면 가장 높은 전계집중을 확인하였다. 이것은 보이드에 부피증가에 따라 전계분포가 가장 높게 집중된 것을 확인하였다.

### 참고 문헌

- [1] F.H Kreuger, "Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment", Butterworths & Co. Ltd, pp 15-28, pp. 50-71, 2001.
- [2] Mazen Abdel-Salam et. al, "High-Voltage Engineering Theory and Practice", Marcel Dekker, Inc., pp. 373-414, 2000.
- [3] M. Defourny, "The boundary element method applied to electric field computation", The boundary element Techn. 1996 June.
- [4] C.A Brebbia. "Boundary element techniques in computer-aided engineering", Martinus Nijhohh publishers, 1984