2004년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2004.7.14-16

경계요소법과 유한요소법에 의한 함침 절연지의 전계해석

박 형준, 김 균식, 신 종열*, 박 희두**, 이 충호***, 이 수원****, 홍 진웅
광운대학교, 삼육의명대학*, 삼척대학교**, 충주대학교***, 국립철도대학교****

Electrical Field Analysis of Impregnation Insulation Paper according to the BEM and FEM methods

Park Hyoung-Jun, Kim Gyun-Sig, Shin Jong-Yeol*, Park Hee-Doo**, Lee Chung Ho***, Lee Su-Won****, Hong Jin-Woong
Kwangwoon University, Samyook Colleage*, Samchok National University**, Chungju University***, Korea National Railroad Colleage****.

Abstract - This paper describes the use of Armaid papers and varnishes in electric motors.
We compare with boundary element method(BEM) and finite element method(FEM) by calculated electric field strength. Several computer software package to perform such calculations based on electrostatic field and applicable DC are available.

Keywords: Armaid papers, Varnish, Boundary element method, finite element method, Electric field strength

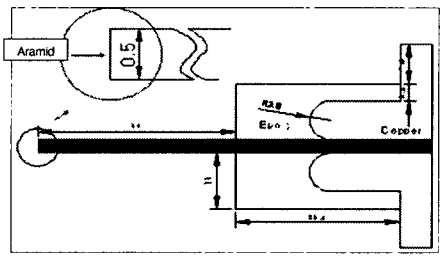
1. 서 론

대형 회전기기의 슬롯 라이너(Slot liner) 및 상절연, 소형 모터의 열가공, 대용량 변압기의 층간, 배리어, 탭 및 리드 절연, 모터 전동자용 열철판 말단(End lamination)에 사용되는 두께 0.5[㎜]인 아라미드 절연지는 원재료 분자구조가 섬유질 결합분자이다. 특히, 절연강도를 강하게 해주는 고분자인 Fibrid와 기계적 강도를 증가시키는 Floc를 혼합, 절연지 형태로 가공한 방향족 폴리아미드로서 우수한 전기적 특성을 가지고 있다. 이러한 고온 절연재는 용량증가와 신뢰성 개선을 위해 전력용 및 배전용 변압기에 사용되며 경제성 측면에서 기존 절연유와 함께 사용될 수 있다. 또한, 바니시는 전동기 내부 계자 및 전기자 코일에서 절연특성을 얻고 신뢰성을 확보하기 위한 탄성, 불충만성, 낮은 점성, 단일성분 및 가열처리가 가능한 수지이다. 이런 우수한 절연특성과 함침특성은 우수한 액체 절연체로서 전기기관차 및 전기동차의 견인전동기 계자 및 전기자 함침용 절연재료로 사용되고 있다. 하지만 함침과정 중 코일 또는 층간 기동 가열과정에서 고전압 인가 시 전계집중현상이나 온도상승효과에 의한 절연파괴가 일어나 전기적 특성을 약화시킨다.[1, 2]. 본 연구에서는 아라미드 절연지와 바니시를 양면코팅한 경우, 전기적 특성을 비교하기 위하여 전압에 따른 전계강도를 경계요소법(적분 방정식)을 기반으로 한 3차원 범용 프로그램인 Integrated Engineering Software 사의 준안정-정전계 해석 프로그램인 COULOMB®과 유한요소법(미분 방정식)을 기반인 FEMLAB 3®을 사용하여 대형 회전기기인 견인전동기 내부 절연체에서 고장방지를 최소화하고 안정적인 운용 및 신뢰성을 확보하기 위한 연구를 하였다.

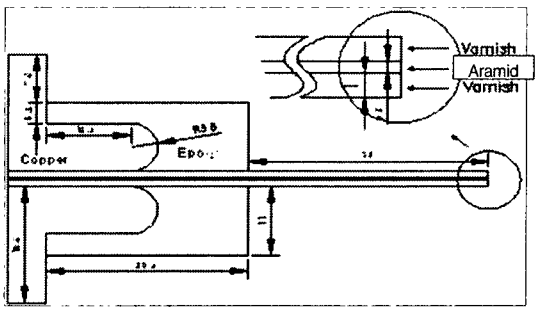
2. 시뮬레이션

2.1 형상 설계

첫 단계로, 원래 모델과 바니시를 양면 코팅한 모델을 연구하기 위해서 형상을 대칭 모델로 간략화하였다. 각각 표면에 주기성을 주어 1/2 축대칭 형태로 설정하였다. 이는 전계분포강도를 산출하기 위한 해석시간을 줄이기 위함이다. CIGRE(International Council on Large Electric Systems) 전극법에 의해서 형상을 설계해 주었다. 1921년에 프랑스에서 제정된 CIGRE는 국제적으로 전력사업조직으로 전력사업에 환경성 및 경제성 등을 주도해가고 있다. 두 번째로 전압을 인가하기 위해 두 개의 형상 상부전극에 각각 100[V], 500[V], 1000[V]를 인가하였으며 하부전극은 접지로 설정하였다. 이 때 상부전극 도메인은 경계요소법과 유한요소법에서 준안정상태 방정식을 적용해 설계하였다. 세 번째 단계로 형상을 이산해주기위해서 다각형 약 3000개 요소망(mesh)으로 분할하였다. 마지막으로 각각의 해석기(Solver)를 자동으로 설정하여 조사하였다.



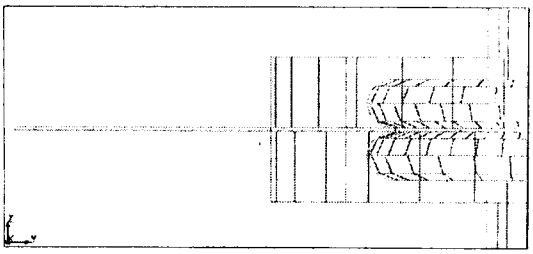
(a) Aramid 0.5[㎜]



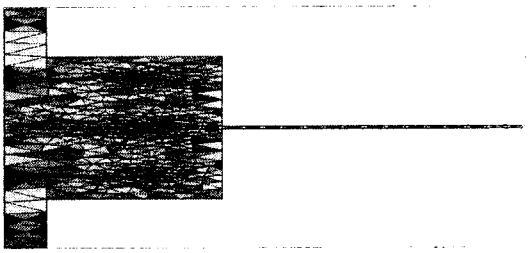
(b) Coating Varnish 2.5[㎜]

그림 1. 아라미드와 바니시 코팅한 형상도.
Fig 1. Geometry Diagram of Aramid and Coating Varnish

그림 1은 시뮬레이션에서 사용한 형상 2차원 수직면 축대칭 단면도이다. 본 전극은 연면방전방지를 위해 구리에 에폭시를 몰딩했으며 축대칭모형으로 해석시간을 단축해서 시뮬레이션하기 위해 실제 모형에 1/2 크기로 설정하였다. 그림(a)는 아라미드 절연지 0.5[㎜]를 그림(b)는 상, 하로 바니시 코팅을 1[㎜]로 설정하였다.
주로 전기기기 모터에서 사용하는 액체유전체 수지로서 범용으로 사용되는 절연 바니시를 코팅하여 내열성 및 전기적 절연특성을 향상시켜 설계하였다.



(a) BEM.



(b) FEM.
그림 2. 이산화 방법
Fig 2. Discret method.

위의 그림 (a)와 (b)는 경계요소법과 유한요소법으로 다각형 약 1000개 요소분할한 2차원 평면도이며 이산법의 차이가 명확하게 나타나고 있다. 경계요소법은 유한요소법과는 달리 대상물의 경계만을 요소분할하여 이산화 시 빠르게 할 수 있다.
형상에서 전계최대값은 도메인 경계에서 나타나므로 경계분할만으로 해결가능하다. 또한 내부 계산은 후처리과정에서 구할 수 있으므로 시간을 절약할 수 있다. 유한요소법은 해석 대상을 정형화된 유한한 크기의 요소로 분할, 각 요소에 전류이론을 적용하고 각 요소간의 관계식을 고려하여 전체 식을 구성한 후 선형 방정식을 풀어 형상의 전계강도, 자속 등을 해석하는 방법으로 주로 구조해석에 널리 쓰이고 있다.

표 1. 물질의 특성.
Table 1. Properties of material.

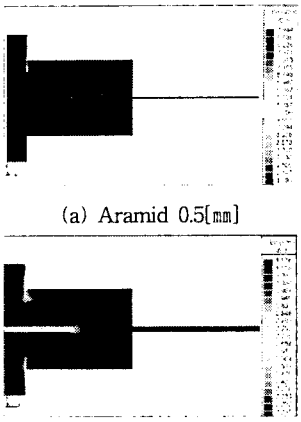
Classificaiton	Aramid	Varnish	Copper	Epoxy
Relative Permittivity(ϵ_r)	3.5	3.57	1	4.9
Conductivity(σ)	5×10^{-17}	0.027	58×10^{5}	6.6×10^{-14}

표 1은 본 연구에서 설정한 형상의 물질의 특성이다. 전계값을 산출하기 위해서 비유전율(ϵ_r)과 전도율(σ)을 사용하였다.

2.2 전장 도표(Electrostatic Field Plot)

2.2.1 경계요소법에서 전계값.

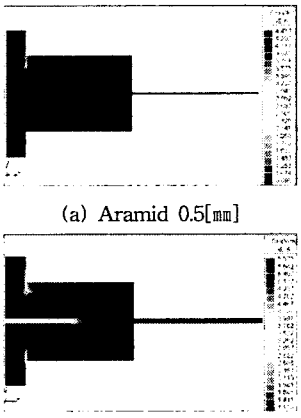
그림 3은 형상 상부전극에 100[V]를 인가 시 표면 전계값을 윤곽도표(Contour Plot)으로 비교하였다. 형상 내부 표면에서 나타나는 전계값을 색좌표로 표현해 준 것으로 아라미드 0.5[㎜]는 에폭시와 구리전극경계에서 최대값이 8.944×10^{5}[V/m]이고 바니시 2.5[㎜]는 1.176×10^{5}[V/m]가 조사되었다. 전압 인가 시 아라미드와 바니시 두께의존성에 의해 전계가 약 1/5로 감소한 것으로 사료된다.



(a) Aramid 0.5[㎜]

(b) Coating Varnish 2.5[㎜]

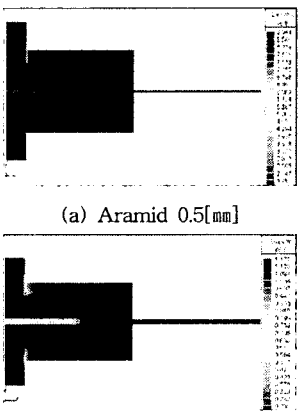
그림 3. 100[V]인가 시 전계분포도
Fig. 3. E-field distribution plot applied 100[V]



(a) Aramid 0.5[㎜]

(b) Coating Varnish 2.5[㎜]

그림 4. 500[V]인가 시 전계분포도
Fig. 4. E-field distribution plot applied 500[V]



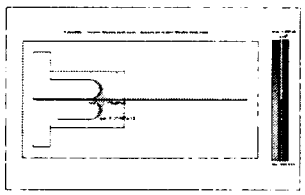
(a) Aramid 0.5[㎜]

(b) Coating Varnish 2.5[㎜]

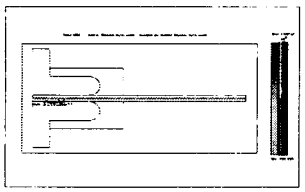
그림 5. 1000[V]인가 시 전계분포도
Fig. 5. E-field distribution plot applied 1000[V]

그림 4는 아라미드 0.5[㎜]와 바니시 2.5[㎜] 최대값이 각각 4.472×10^{6}[V/m]과 5.875×10^{5}[V/m]로 조사되었다. 두께가 증가하면 바니시와 아라미드 내부표면에 전계가 반비례하여 감소하는 것을 확인하였다. 그림 5는 아라미드 0.5[㎜]와 바니시 2.5[㎜] 최대값이 각각 8.944×10^{6}[V/m]과 1.176×10^{6}[V/m]로 조사되었다.

2.2.1 유한요소법에서 전계값



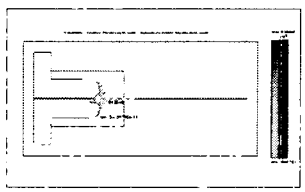
(a) Aramid 0.5[㎜]



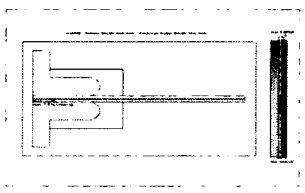
(b) Coating Varnish 2.5[㎜]

그림 6. 100[V]인가 시 전계분포도
Fig. 6. E-field distribution plot applied 100[V]

그림 6는 유한요소법에 의해서 다각형으로 요소분할 후 형상 상부전극에 100[V] 인가 시 표면 전계값을 두께에 따라 비교한 것이다. 유한요소법으로 해석 결과 아라미드 0.5[㎜]일 때 4.2084×10^{5}[V/m], 바니시 2.5[㎜]에서 2×10^{5}[V/m]로 조사되었다. 또한 아라미드 0.5[㎜]일 때는 연면방전에 의한 형상내부 표면전계강도가 경계요소법에 비해 넓게 분포되는 것을 조사하였다. 이는 유한요소분할에 따른 아라미드 표면 전계가 상, 하 구리전극 끝에 연면방전에 의해 전계가 집중되는 것을 확인하였다.

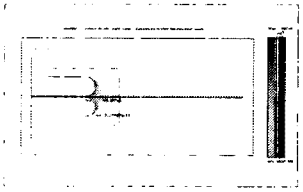


(a) Aramid 0.5[㎜]

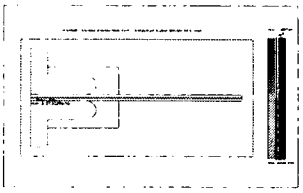


(b) Coating Varnish 2.5[㎜]

그림 7. 500[V] 인가 시 전계분포도
Fig. 7. E-field distribution plot applied 500[V]



(a) Aramid 0.5[㎜]



(b) Coating Varnish 2.5[㎜]

그림 8. 1000[V]인가 시 전계분포도
Fig. 8. E-field distribution plot applied 1000[V]

그림 7는 500[V] 인가 시를 비교한 것으로 아라미드 0.5[㎜]의 최대값은 2.1042×10^{5}[V/m]을 바니시 2.5[㎜]인 경우 10×10^{5}[V/m]을 나타내었다. 따라서, 전압증가 시 전계가 약 1/5로 감소한 것을 확인하였다.
그림 8은 1000[V] 인가 시를 비교한 것이다.
아라미드 0.5[㎜]의 최대값은 4.208×10^{6}[V/m]을 바니시 2.5[㎜]인 경우 2×10^{6}[V/m]을 나타내었다.
유한 요소의 경우에도 두께의존성에 의해 시료두께가 5배 증가하면 전계가 약 1/2로 감소하는 것을 확인하였다. 또한, 경계요소법과는 다르게 구리전극 경계 외측부분과 아라미드 내부에 전계가 집중한 것을 조사하였다. 이는 유한요소 분할에 의해 도메인 내부 표면에 전계가 아라미드 절연지에 집중되는 것으로 사료된다.

3. 결 론

경계요소법과 유한요소법에 의한 함침 절연지의 전기적 특성은

1. 100[v], 500[v], 1000[v] 인가 시 전압에 따라 전계가 증가하는 것을 확인하였다.
2. 아라미드 0.5[㎜]와 바니시 2.5[㎜] 두께에서 전압증가 시 형상내부표면전계분포가 두께의존성에 의해서 BEM은 약 1/8로 FEM은 약 1/5로 감소하였다.
3. BEM과 FEM 모두, 전압을 증가 시에 형상내부표면 전계강도가 비례하여 증가하는 것을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

[1] 박형준, "내부 보이드가 절연 바니시의 전기적 특성에 미치는 영향", 한국전기전자재료학회 , p. 472, 2003.
[2] 이기철, "21세기의 변압기 기술", Dupont AFS 사업부.
[3] IES, 3D properties guide Version 5.2, p.4-40
[4] Blackmore, P., and Birwhistle, D. "Surface Discharge on Polymeric Insulator Shed Surfaces" IEEE Trans Electrical Insulator, Vol. 4, No 2, April 1997, pp. 210 217.
[5] M.D.R Beasly. J.H Pickles et al.,"Comparative study of three methods for computing electric fields" Proc. IEEE, Vol.126 n°1 January.
[6] M. Defourny, "The boundary element method applied to electric field computation:generation computation and results with examples in the high voltage field", The boundary element Techn. 1986 June.