# 아라미드계 절연지(Aramid paper)의 온도의존성과 전압의존성

박형준, 이종필, 박희두*, 신종열**, 이수원***, 홍진웅
광운대학교, 삼척대학교*, 삼육의명대학**, 국립철도대학교***

# Temperature dependence and Voltage dependence of Aramide Paper

Hyoung-Jun Park, Jong-Pil Lee, Hee-Doo Park*, and Soo-Won Lee**, Jin-Woong Hong
,Kwangwoon University, Samchok National University*, Samyook Colleage, Korea National Railroad College***

**Abstract**

In this paper, the properties of temperature dependence and voltage dependence of Aramid paper were studied to understand electrical characteristics, to be regarded as the excellent insulation. Aramid paper and pressboard had being applied various motor, generator. We used to Finite Elemental Method of simulation tool, and improved optimal insulating design of insulating Aramid according to calculated those.

**Key Words** : Temperature dependence, Voltage dependence, Finite Element Method, Aramid paper

## 1. 서 론

고온 절연재를 사용하는 변압기에서 새로운 기술로 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 대한 제조업체와 사용자에게 지침을 주기위해 새로운 규격(IEEE std 1276-1997)이 제정되었다. 전력회사, 산업체 및 철도회사가 주요 사용자이며 이러한 새로운 기술을 적용한 변압기들이 변화를 주도 하고 있다. 아라미드를 주로한 고온 절연재는 용량증가와 신뢰성 개선을 위해 전력용 및 배전용 변압기에 사용되며 경제성 측면에서 기존 절연유와 함께 사용될 수 있다.[1] 또한, 바니시는 전동기 내부 계자 및 전기자 코일에서 전기 절연특성을 얻고 신뢰성을 확보하기 위한 탄성, 불충만성, 낮은 점성, 단일성분 및 가열처리 가능한 절연특성과 코팅특성이 우수한 액체 절연체로 폴리부타디엔 수지로서 사용되고 있다.

하지만 코팅과정에서 코일 또는 층간에 기동 시 가열과정에서 인가 고전압에 따른 전계 집중현상이나 온도상승효과에 의해 절연체에 열화현상 및 절연파괴가 일어나 전기적 특성을 약화 시킨다. 본 논문에서는 특히 전기기관차용 절연지로 사용되고 있는 아라미드계 절연지를 코팅용 바니시 폴리부타디엔 수지를 사용하여 양면 코팅시료를 견인전동기 고정자 성형과정과 동일한 조건으로 설정하여 절연지와 코팅 전 시료의 전기적 특성을 비교 연구하기 위하여 전계에 따른 전계분포도, 체적고유저항 온도의존성 실험 결과를 유한요소법을 기본으로 한 FEMLAB 3을 사용하여 차량용 견인전동기의 절연체에서 고장방지를 최소화하고 안정적인 운용 및 신뢰성을 확보하기 위한 결과를 소개한다. [2]

## 2. 실 험

### 2.1 시뮬레이션

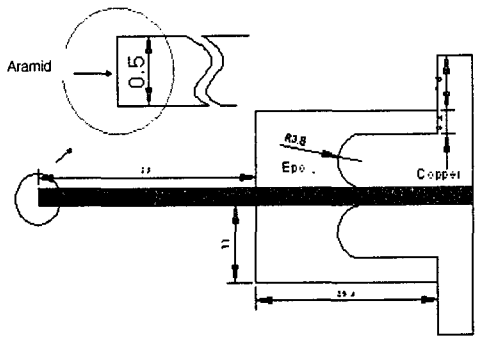
본 연구에서는 견인 전동기용 절연지로 사용되

고 있는 아라미드계 절연지와 바니시 코팅 절연지와 코팅 전, 후 시료의 전기적 특성을 비교 및 연구하기 위하여 전압에 따른 실제 체적고유저항을 측정한 실험값을 유한요소법이 기반인 컴퓨터응용공학 설비인 FEMLAB 3에 적용해 시뮬레이션 하였다.

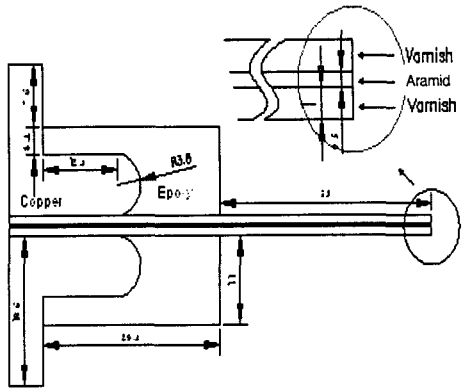
**표 1.** 물질의 특성.
**Table 1.** Properties of material.

| Classification | Aramid | Varnish | Copper | Epoxy |
|---|---|---|---|---|
| Relative Permittivity($\epsilon_0$) | 3.5 | 3.57 | 1 | 4.9 |
| Conductivity($\sigma$) | $5\times10^{-17}$ | 0.027 | $58\times10^{5}$ | $6.66\times10^{-18}$ |
| Density($\rho$) | 1050[$g$] | 1060[$g$] | 8700[$g$] | 1149[$g$] |
| Thermal Conductivity [K] | 157 | 350 | 3937 | 2 |

표 1은 시뮬레이션에 적용한 물질의 특성이다. 전압과 온도에 의한 현상을 연구하기 위해서 SI단위계로 비유전율($\epsilon_0$), 도전율($\sigma$), 밀도($\rho$), 열전도율($k$)을 적용하였다. 그림 1은 바니시 코팅한 형상의 평면 전면도이다. 상, 하로 바니시를 코팅하여 3층으로 설정해서 아라미드 0.5[㎜]와 비교하였다. 상부 전극에 100, 500, 1000[V]를 각각 인가하고 하부 전극을 접지한 후 온도를 실온, 80, 120 [℃]로 시간을 10분까지 변화시켰을 때 형상에 2차원 평면전도율을 표면도표(Surface plot), 전계분포를 등고선(Contour), 온도구배를 화살표(Arrow)와 유선(Streamline)으로 해석하였다.




(a) Aramid 0.5[㎜]




(b) Coating Varnish 2.5[㎜]

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

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 수지인 절연 바니시를 코팅하여 내열성 및 전기적 절연특성을 향상시켜 설계하였다.

### 2.2 시뮬레이션 관련이론

$$-\nabla((\sigma + j\omega C_0)\nabla V(J^e + j\omega p)) = 0 \qquad (1)$$

**수식 1.** 미소전류에서 준안정상태.
**Equation 1.** Quasi-state for small current.

수식 1은 시뮬레이션에 적용한 약전류에서 준안정상태방정식이다. 유한요소법은 어떤 도메인에서 표면심도가 있을 경우에 형상보다 훨씬 더 크면 전계와 자계 연계를 무시하는 것으로 위와 같이 근사된다. [3]

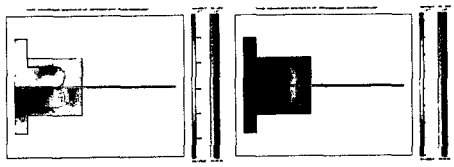
$$\delta_{ts}\rho C_p \partial T/\partial t - \nabla\cdot(k\nabla T) \qquad (2)$$
$$= Q + h_{trans}(T_{ext} - T) + C_{trans}(T^4_{ambtrans} - T^4)$$

**수식 2.** 전도대에 대한 열전달 방정식.
**Equation 2.** Heat transfer equation by conduction.

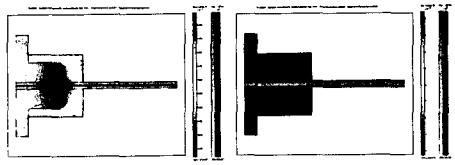
위에 수식 2는 전도대에 대한 열전달 방정식이다. 이번 조사에서는 외부온도변위요소를 배제하고 열전도율과 밀도의 변화를 SI단위계로 설정하였다. 또한, 아라미드 절연지의 시간, 온도 및 전압에 따른 실제 체적고유저항을 수치해석프로그램인 MATLAB 6.5를 사용해 실험값을 보간하여 시뮬레이션 하였다.

## 3. 결과 및 고찰

그림 2는 전압을 인가하고 100[V] 인가 시 아라미드 절연지에 나타나는 현상을 비교한 것이다. 전체적으로 온도와 전압에 따라 전계값과 도전율이 비례하여 증가하였으며 전극에서 구리전극 외측 1-2[㎜] 온도구배와 전도율이 가장 높은 것을 확인할 수 있었다.



(a) 22[℃] (b) 80[℃]



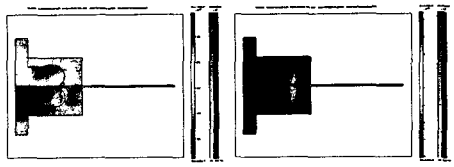
(c) 22[℃] (d) 80[℃]

**그림 2.** 100[V]인가 10분경과 시 아라미드 절연지 (a)-(b), 바니시 양면코팅 (c)-(d)의 온도 및 전계분포도.

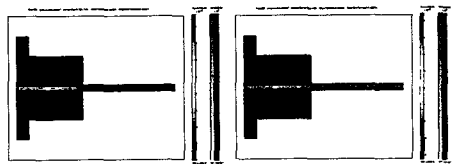
**Fig 2.** Temperature and E-field distribution plot of Aramid (a)-(b), Varnish coating (c)-(d) applied 100[V] at 10[min].

그림 3-4은 10분 후에 500[V], 1000[V]가 시 종류에 따른 전계 및 온도분포도이다.

(a)-(b)는 아라미드 절연지 0.5[㎜]이며 온도와 대한 분포도를 조사하였다. 실온 22[℃]는 저온이므로, 유선으로 조사한 기울기 크기가 구리전극 주변에서 산발적이지만 80[℃]에서는 전극주변에 유선이 집중되어있다. 이것은 온도증가로 인한 전극 주변에 유선수가 증가하는 것으로 사료된다.



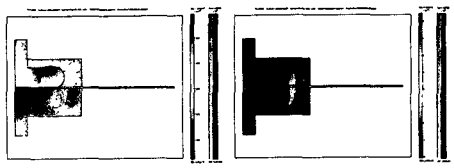
(a) 22[℃] (b) 80[℃]



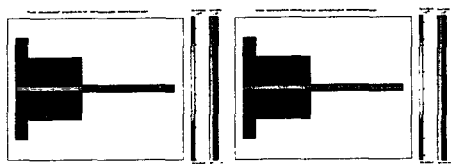
(c) 22[℃] (d) 80[℃]

**그림 3.** 500[V] 인가 시 온도 및 전계분포도.

**Fig. 3** Temperature and E-field distribution plot of applied 500[V] at 10[min].



(a) 22[℃] (b) 80[℃]



(c) 22[℃] (d) 80[℃]

**그림 4.** 1000[V] 인가 시 온도 및 전계분포도.

**Fig. 4** Temperature and E-field distribution plot of applied 1000[V] at 10[min].

도전율의 경우 저온에서 열도전율이 22[℃]비교적 높은 구리부근에 집중되는 것으로 조사되었다.

그림(a)-(d)에서 나타난 전계분포도를 보면 구리전극 밑에 전계집중이 조사되었다.

표 2. 10분경과 시 온도, 전압에 따른 전도도 및 전계 분포도.

**Table 2.** Conductivity and E-field distribution according to temperature, voltage after 10[min]

| Classification | | Conductivity max. value | E-field max. value |
|---|---|---|---|
| Aramid | 100[V] 22[℃] | $1.67\times10^{-17}$ | $4.206\times10^{5}$ |
| Aramid | 100[V] 80[℃] | $6.45\times10^{-16}$ | $4.206\times10^{5}$ |
| Aramid | 100[V] 120[℃] | $1.01\times10^{-13}$ | $4.206\times10^{5}$ |
| Aramid | 500[V] 22[℃] | $1.67\times10^{-17}$ | $2.104\times10^{6}$ |
| Aramid | 500[V] 80[℃] | $6.45\times10^{-16}$ | $2.104\times10^{6}$ |
| Aramid | 500[V] 120[℃] | $1.01\times10^{-13}$ | $2.104\times10^{6}$ |
| Aramid | 1000[V] 22[℃] | $1.67\times10^{-17}$ | $4.208\times10^{6}$ |
| Aramid | 1000[V] 80[℃] | $6.45\times10^{-16}$ | $4.208\times10^{6}$ |
| Aramid | 1000[V] 120[℃] | $1.01\times10^{-13}$ | $4.208\times10^{6}$ |
| Varnish Coating | 100[V] 22[℃] | $1.67\times10^{-17}$ | $2\times10^{5}$ |
| Varnish Coating | 100[V] 80[℃] | $6.45\times10^{-16}$ | $2\times10^{5}$ |
| Varnish Coating | 100[V] 120[℃] | $1.01\times10^{-13}$ | $2\times10^{5}$ |
| Varnish Coating | 500[V] 22[℃] | $8.74\times10^{-14}$ | $10\times10^{5}$ |
| Varnish Coating | 500[V] 80[℃] | $6.45\times10^{-16}$ | $10\times10^{5}$ |
| Varnish Coating | 500[V] 120[℃] | $1.01\times10^{-13}$ | $10\times10^{5}$ |
| Varnish Coating | 1000[V] 22[℃] | $8.74\times10^{-14}$ | $2\times10^{6}$ |
| Varnish Coating | 1000[V] 80[℃] | $6.45\times10^{-16}$ | $2\times10^{6}$ |
| Varnish Coating | 1000[V] 1000[℃] | $1.01\times10^{-13}$ | $2\times10^{6}$ |

이는 구리전극에 전도율이 에폭시에 비해 상대적으로 크고 전극에 곡률 반경으로 인해 국부적인 전계집중이 일어나는 것으로 사료된다.

표 2에 아라미드 절연지 0.5[㎜]와 상, 하로 바니시 2[㎜]를 코팅한 형상에서 전도율과 전계 최대값을 비교하였다. 아라미드 절연지 내부전계를 조사한 결과 온도와 전압을 인가하였다. 아라미드 절연지 0.5[㎜]에서는 인가전압에 비례하여 100[V]는 $4.206\times10^{5}$[V/m]가 나타나고 500[V]에서 5배, 1000[V]에서 10배 값을 확인하였다. 한편, 바니시를 1[㎜]를 양면으로 코팅한 2.5[㎜] 경우에는 두께의존성에 의해 전계가 반으로 감소하였다.

또한, 10분 후 아라미드 절연지 0.5[㎜]보다 바니시를 코팅한 경우에는 500[V] 22[℃]와 100[V] 22[℃]에서 온도, 전압에 따른 도전율이 상대적으로 높아지는 것을 확인하였다.

## 4. 결 과

아라미드 절연지 0.5[㎜]와 바니시 코팅시료 2.5[㎜]에 전압, 온도, 시간을 변화 시 도전율과 전계분포 및 온도 기울기를 조사한 결과.

1. 아라미드 절연지 0.5[㎜]와 바니시 코팅시료 2.5[㎜]를 비교 시 코팅시료는 구리전극 내, 외부 1-2[㎜]에서 곡률반경으로 인한 온도에 따른 도전율이 높아지는 것을 수직면 전계 분포도에서 표면윤곽선으로 확인하였다.
2. 실제 체적고유저항을 MATLAB 6.5와 연동해서 보간 시에 바니시코팅은 고전 저온영역에서 도전율이 증가하는 온도의존성을 확인하였다.
3. 아라미드 절연지 0.5[㎜]와 바니시 코팅시료 2.5[㎜]에서 두께와 전압에 따라 아라미드 내부전계가 증가하는 것을 확인하였다.
4. 10분 후에 도전율, 전계 및 온도의존성을 표면윤곽선과 유선 및 화살표로 확인하였다.

## 참고 문헌


[1] 이기철, "21세기의 변압기 기술", Dupont AFS 사업부.

[2] 박형준 외5인 "내부 보이드가 절연 바니시의 전기적 특성에 미치는 영향", 한국전기전자재료학회 , p. 472, 2003.

[3] COMSOL CO. LTD, "FEMLAB 3 user's guide", 2003.

[4] Mazen Abdel-Salam et. al, "High-Volage Engineering Theory and Practice", Marcel Dekker, Inc, p. 373-414, 2000.

[5] Il-Keun song et. al, "Thermal Analysis of Varnish Treated insulating Papers for Transformers", IEEE, p. 583, 2003.