

## 전력용 변압기의 절연유가 전계에 미치는 영향의 수치해석적 모델

신 판 석

한국전기연구소 전력기기연구실

## A Numerical Model of the Electric Field Distribution in Power Transformers

Shin Pan Seok

Power Apparatus Lab., KERI

## Abstract

The impact of the convected charges, which is caused by the electrification phenomena, in the oil-paper insulation systems of power transformers has been numerically investigated using FEM. The potential distribution of the oil-paper insulation system is assumed to be governed by three equations instead of the classical Laplace equation. When the charge density of oil and the conduction current are kept high, the field distortion of the interface in a power transformer is considerably distorted due to the convected charges.

## 1. 서 론

초고압 전력용 변압기의 사고원인을 분석하는데 크게 두가지의 접근방법이 사용되고 있다. 하나는 전력계통의 영향으로 인한 변압기내부의 절연파괴로 인한 사고와, 다른 하나는 변압기 내부의 절연유가 강제 순환되면서 발생하는 정전기적현상 (Electrification) 으로 전하가 절연지와 절연유에 분리 축적되어 상승되고 절연파괴가 이루어지게되며 이것이 사고를 유발시킨다는 것이다 (1,2,3,4).

본 연구에서는 절연유가 고체 절연체와의 마찰에 의해서 발생하는 정전기적현상의 영향을 유한요소법을 이용하여 재래식의 전위분포에 추가함으로써 합성전계는 절연유의 전하밀도에 크게 영향을 받으며 사고원인의 가능성과 절연강도설계에 고려되어야 할 점들을 고찰하였다.

유체-고체 절연계에서의 정전기적 현상(electrification) 은 석유산업에서 뿐만 아니라 증전기 제조 업체에도 잘 알려진 사실이다 (5,6,7,8,9,10). 정전하는 액체 절연물과 고체절연물 사이의 마찰로 인해서 발생하며, 전력용 변압기의 duct 에 절연유가 흐르면 정전하 분리가 일어나고 고체표면에는 전하축적이 이루어진다. 절연유와 pressboard 경계면에서 정전하가 발생되면 보통 정전하는 절연유속으로 분리가 되고 움직이는 고체절연물의 표면에 축적된다. 이렇게 축적되거나 분리된 전하는 전계 왜곡이나 부분방전 또는 절연파괴 까지도 일으키는 원인이 된다. 그러므로 전력용 변압기의 액체-고체 절연계의 전위분포를 결정하는데 정전기적인 현상을 반드시 고려하여야 한다.

## 2. 본 론

## 2.1 수치해석적 modeling

대부분의 AC 절연계통에서 절연물을 통해서 흐르는 소량의 전류는 용량성이며 절연물의 전도를 또는 저항을 고려할때의 전류는 저항성이고, 이것은 R.C 회로가되어 복소량의 전위분포는 impedance 분포의 함수가 될 것이다.

유한요소법을 이용하여 전력용변압기의 절연유-고체 절연계에 convected charge 가 미치는 영향을 modeling 하고저 한다. Convected charge 를 고려할때 3개의 지배방정식이 이 절연계통의 전위분포를 지배하게 된다.

$$\nabla \cdot (\epsilon - j\frac{\sigma}{\omega}) \nabla \phi = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \epsilon \nabla \phi = \rho \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \sigma \nabla \phi = 0 \quad (3)$$

$\epsilon$  는 유전율,  $\sigma$  는 도전율,  $w$  는 각속도,  $\phi$  는 전위,  $\rho$  는 전하밀도를 각각 나타낸다. 식 (1)은 복소수로 표시된 유전율의 영향을 보기위한 Laplace 방정식이고, 식 (2)는 절연유 전하밀도의 영향을 보기위한 Poisson 방정식이며, 식 (3)은 액체-고체 절연물 경계면에서의 전도 전류밀도의 영향을 보기위한 Laplace 방정식 (또는 conduction 방정식)이다.

수학적 modeling 을 위해서 다음과 같은 가정을 하였다.

- (가) 외부전압인가에 의한 전위분포를 계산하고 고전적인 전위분포에 전도도의 영향을 고찰하기 위해서는 식 (1)의 Complex Laplace 방정식을 푼다.
- (나) 절연유의 체적전하에 의한 정전계 분포해석을 위해서 식(2)의 Poisson 방정식을 푼다. 절연유의 체적 전하는 용량성 전위분포의 전원이되며 유전율만 고려된다.
- (다) 고체 절연물의 표면전하에 의한 전위 분포해석을 위해서 식(3)의 Conduction 방정식을 사용하고, 흐르는 절연유에 의한 표면전하는 저항성전류의 전원이되며 절연체의 전도도만 고려가 된다. 경계조건으로 절연체의 경계면에서는 선전류밀도로 가정한다.
- (라) 합성전계분포를 계산하기 위해서 식(2)와 식(3)의 결과를 식(1)의 결과에 더하게 되며 결과는 정현함수적으로 변하는 량이 된다.
- (마) 식(1),(2),(3)의 결과를 합성하기 위해서 계산과정 중에 기하학적인 구조와 절점은 변하지 않는다.

이상과 같은 가정하에서 식(1), (2), (3)을 각각 Galerkin 방법에 의해서 2 차 삼각요소에 의한 유한요소법으로 formulation 하였으며, 2 차 평면해석과 축대칭해석을 병행하였다.

2.2 변압기 model 의 계산 에

전력용 변압기의 액체-고체 절연계를 해석하기 위해서 core-type 과 shell-type 을 각각 modeling 하였다. 절연유의 체적전하에 의한 전계 계산시에 도전율은 영(zero)으로 하며 체적전하밀도는 구동함수로 작용한다. 또한 전도 방정식을 푸는 경우 선전류밀도가 사용되고

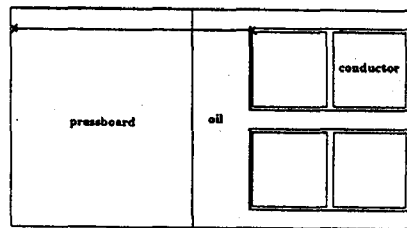
유전율은 영(zero)으로 가정한다. 이들 두 해는 DC로 가정되며 Complex Laplace 방정식, 식(1), 에 중첩함으로써 합성된 전위 분포를 얻게된다. 보다 실질적인 modeling을 위해서 표 1 에 나타난 바와같이 실험실적으로 얻어진 자료들을 사용하였다.

특 성	절 연 유	절 연 지
유 전 율	2.5	5.0
도 전 율	10 pS / m	0.1 pS / m
부피전하밀도	100 $\mu\text{C} / \text{m}^3$	-

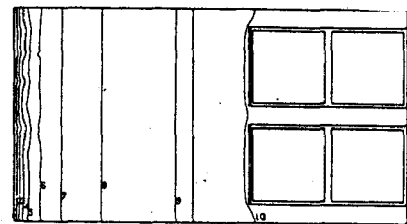
표 1. 절연유와 절연지의 특성

절연유의 부피 전하밀도는 보통 1~200  $\mu\text{C} / \text{m}^3$  [4,6] 이며 경계면에서의 전류밀도는 1~100  $\text{pA} / \text{cm}^2$  로 보고되고 있다 [6].

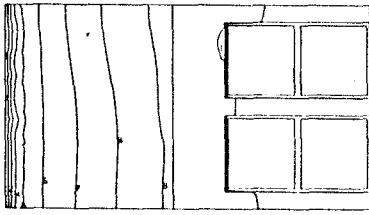
그림1. (a)는 전력용변압기의 축대칭 해석을 위한 core-type model 을 표시하고 (b)는 고전적인 전위분포에 따른 등전위선을 나타내며 (c)는 외부전원을 10.0KV로 인가하고 전하밀도가 1000  $\mu\text{C} / \text{m}^3$ , 경계면의 전류밀도가 1.0nA/cm인 것으로 가정했을때 합성 등전위곡선이 상당한 변화가 있음을 보여주고 wt=0 에서 최고 12.6KV 가 됨으로서 약 26%의 전계 변화가 발생된다고 할수 있다.



(a) 축대칭 해석을 위한 core-type model

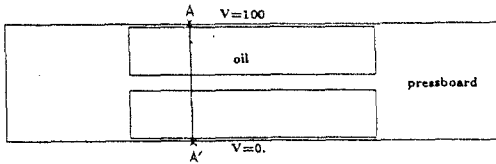
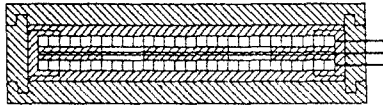


(b) 고전적인 전위분포

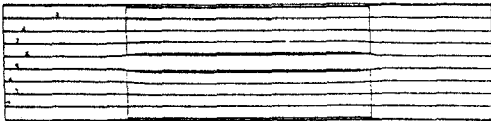


(c) 합성도 전위분포 (wt=0, max. 12.6KV)

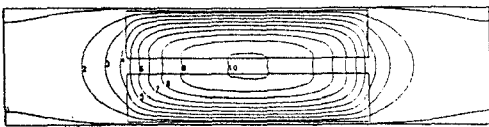
그림 1. Core-type model ( 외부전계 10KV, 전하밀도  $1000 \mu\text{C}/\text{m}^2$ , 전류밀도  $1.0\text{nA}/\text{cm}$  )



(a) shell-type model



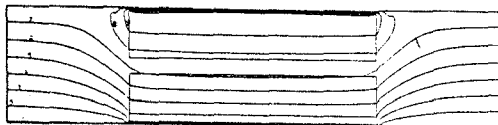
(b) 고전적인 등전위곡선



(c) 체적전하밀도에 의한 등전위 곡선 ( $1000 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ )



(d) 선전류에 의한 등전위곡선 ( $2\text{nA}/\text{cm}$ )



(e) 합성된 등전위곡선 (wt=0, max. 26.5KV)

그림 2. shell-type model ( 외부인가전압 20KV )

그림 2(a)는 shell-type의 전력용 변압기를 modeling 한 것이며 (b)는 고전적인 방법에 의해서 계산된 전계의 등전위선을 보여주고 있다. (c)는 절연유의 체적 전하밀도  $1000 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 에 의한 전계분포를 표시하며, (d)는 선전류에 의한 전계 분포의 등전위곡선이며  $2\text{nA}/\text{cm}$ 의 선전류를 가정하였다. (e)는 (b), (c), (d)를 합성한 (wt=0에서의) 전계분포로서 외부인가전압이 20KV일 때 최고 26.5KV까지 상승되는 것을 보여주고 있으며, 전위 분포가 절연유의 전하밀도와 선전류에 의해서 상당한 영향 (13%)을 받고 있음을 보여 준다.

그림 3은 shell-type model의 어느 일직선상에 나타나는 각 경우의 전위를 나타내며 합성전위는 선형적으로 변하게 된다는 것을 알수 있다.

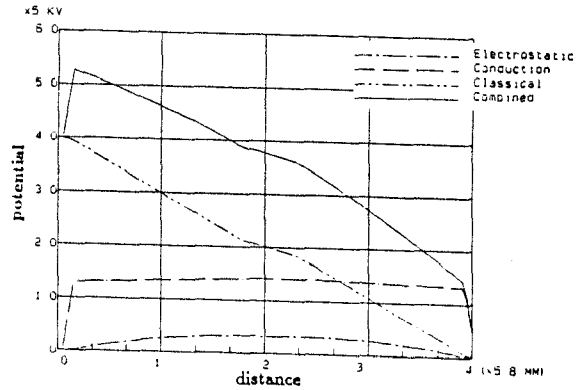


그림 3. 그림 2(a)의 A-A' 선상을 따라 표시된 shell-type model의 각 case별 전위.

### 3. 결 론

전력용 변압기의 절연유와 고체절연물 ( 절연지 나 pressboard) 경계면의 정전기적 현상에 의해서 발생된 전하의 영향을 유한 요소법을 이용하여 modeling 하였다. 이 현상을 3개의 기본 지배 방정식을 가정하여 계산하였고 실험실적 자료를 사용하여 core-type 과 shell-type의 변압기 절연계를 model로 하여 계산한 결과 합성전위 분포는 상당히 왜곡 되었으며 (core-type에서 26%, shell-type에서 13%) 이러한 국부적인 전위상승은 변압기내에서의 부분방전이나 flashover 또는 절연파괴를

충분히 일으킬 수 있는 것으로 판단된다.

전력용 변압기의 절연유-고체 절연물에 대한 많은 실험이 수행되어 신뢰할만한 자료가 주어진다면 이 modeling의 계산 결과도 신뢰하게 될 것이다.

또한 고체 절연물의 표면에서 발생하는 전하축적에 대한 이론적 고찰과 함께 수치해석적 model 방법도 다각도로 연구되어야 할 것이며 전력용 변압기의 설계 관점에서 절연유와 고체 절연물의 구조적인 문제가 검토되고 변압기의 유지 보수면에서도 절연유의 감시제도를 체계화 함으로써 전력용 변압기의 대형 사고를 방지하고 신뢰도를 향상시킬 수 있을 것이다.

#### (참고문헌)

- [1] S. Shimzu, H. Murata and M. Honda, "Electrostatics in Power Transformer", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-98, pp. 1244-1250, 1979.
- [2] R. Tamura et al., "Static Electrification by Forced Oil Flow in Large Power Transformer", IEEE trans. on PAS, Vol. PAS-90, pp. 335-343, 1980.
- [3] S. M. Gasworth, J. R. Melcher and M. Zahn, "Flow - Induced Charge Accumulation In Thin Insulating Tubes", IEEE Trans. on EI, Vol. 23, No. 1, pp. 103-115, 1988.
- [4] T.V. Oommen, "Static Electrification Properties of Transformer Oil", IEEE Trans. on EI, Vol. EI, Vol. EI-23, pp. 137-146, 1988.
- [5] M. Ieda et al., "Suppression of Static Electrification of Insulating Oil for Large Power Transformers", IEEE Trans. on EI, Vol. EI-23, pp. 153-157, 1988.
- [6] M.J. Lee, "Laboratory Model Studies of Electrokinetic Effects in Power Transformers", Ph. D. thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, May 1988.
- [7] M.J. Lee and J.K. Nelson, "dielectric Integrity Associated with Circulating Insulating Fluids", IEEE trans. on EI, Vol. 23, No. 4, pp. 7070713, August 1988.
- [8] N. Kitamura and K. Horii, "Behavior of electrostatic Charge and Velocity Distribution of Petroleum Flowing in Relaxation Pipe", IEEE Trans. on EI, Vol. 23, No. 1, pp. 117-121, 1988.
- [9] A. Klinkenberg, "electrostatics in the Petroleum Industry", Elsevier Publication Co., 1958.
- [10] P.S. Shin, "Hybrid Finite-Boundary Element Analysis of Time Harmonic Electromagnetic Fields", Ph. D. Thesis, RPI 1989.