

100kVA 주상용 몰드 변압기의 온도분포 해석

조 한 구, 이 운 용

한국전기연구원

The Temperature Distribution Analysis of Mold transformer

Han-Goo Cho, Un-Yong Lee

Korea Electrictechnology Research Institute

Abstract

The mold transformers have been widely used in underground substations in large building and have some advantages in comparison to oil-transformer, that is low fire risk, excellent environmental compatibility, compact size and high reliability. In addition, the application of mold transformer for outdoor is possible due to development of epoxy resin. The mold transformer generally has cooling duct between low voltage coil and high voltage coil. A mold transformer made by one body molding method has been developed for small size and low loss, but it needs some cooling method because heat radiation between each winding is difficult.

The life of transformer is significantly dependent on the thermal behavior in windings. Many transformer designers have calculated temperature distribution and hot spot point by FEM(finite element method) to analyze winding temperature rise.

In this paper, the temperature distribution and thermal stress analysis of 100kVA pole cast resin transformer for power distribution are investigated by FEM program.

Key Words : Mold transformer, Temperature distribution, FEM, Coling duct, Pole type

1. 서 론

유입 변압기는 현재까지 주류를 이루고 있지만 수배전설비의 고신뢰성 측면과 오일의 환경오염, 누유 등이 문제로 되고 있으며, 폭발사고에 따른 화재위험을 가지고 있다. 따라서 화재에 대한 안전성 및 유지보수의 경제성과 편리함에 대한 요구가 증가되고 있다.

최근 변압기 관련 기술동향을 보면, 이러한 유입 변압기의 단점을 보완하기 위해 난연성 오일 등을 절연유로 채택하여 화재의 위험을 감소시키는 난연성 유입 변압기에 대한 연구가 이루어지고 있다. 또한 대용량 변압기로 갈수록 필요성이 요구되는 소형·경량화를 위해 우수한 내열재료를 채택한 변압기를 비롯하여 무부하손이 기존의 철심재료보

다 월등히 적은 아몰퍼스 철심 변압기, 권선을 에폭시로 몰딩 절연하는 몰드 변압기도 연구되고 있다. 그밖에도 초고압 가스절연 변압기, 초전도 변압기 등도 연구되고 있다[1].

몰드 변압기는 난연성을 구비한 에폭시 몰딩부와 공기층의 복합절연으로 구성되어 있다. 몰드 변압기가 난연성의 변압기로서 주목을 이루고 있는 것은 가격에 비해 에너지 절감, 안전성, 환경 측면 및 간편한 유지보수 등 여러 가지 이점이 있기 때문이다.

몰드 변압기는 절연성능이 우수한 에폭시 수지를 효과적으로 활용한 합리적 절연설계에 따라 유입 변압기 및 건식 변압기와 비교하여 소형·경량화 할 수 있다[2]. 특히, 고압권선과 저압권선이 합

게 몰딩되는 일체형 몰드 변압기는 기존형보다 소형화가 가능하지만, 방열면적의 감소로 인한 열적 문제를 해결하는 것이 중요하다.

최근 변압기 수치해석 분야는 전계, 자계, 전위 진동, 온도분포, 열응력, 열유체 해석 등에 대해서 연구되고 있다[3-5]. 변압기의 수명은 권선의 열적 특성에 의해 크게 좌우되며, 이러한 권선온도 상승을 분석하기 위해 많은 변압기 설계자들이 수치해석을 통하여 권선의 온도분포, hot spot 온도특성, 열응력 분포 등을 분석한다. 이러한 수치해석을 통해 변압기의 설계시간, 비용 등을 저감할 수 있다 [6].

변압기를 소형화, 경량화시키기 위하여 권선의 전류밀도를 높이는 방법으로 H중 절연지 적용하는 방법과 기존 고압 및 저압권선이 분리된 몰드 변압기와는 달리 1, 2차 권선을 일체형으로 주형하는 방법 등이 있다. 따라서, 본 논문에서는 H중으로의 적용에 있어서 우선 일체형 구조에 따른 100kVA 주상용 몰드 변압기를 설계하고 덕트에 따른 특성을 유한요소법 프로그램을 통해 검토하였다.

2. 몰드변압기의 동향

2.1 몰드변압기의 동향

현재 사용되고 있는 변압기들은 대부분 유입변압기로 몰드변압기에 비해 크기가 크며, 화재의 위험성을 가지고 있다. 이에 비해 몰드변압기는 소형화 및 화재위험성이 적으며 유지보수의 경제성 등의 장점이 있어 계속 사용이 확대되고 있다.

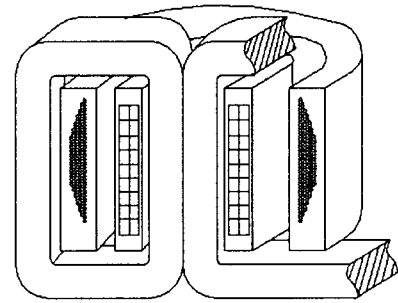
몰드변압기란 철심 및 권선이 절연유 중에 잠겨 있지 않고 권선을 에폭시 등의 수지를 사용하여 고체 절연화 시킨 변압기로, 일반적인 구조는 고압권선과 저압권선을 분리하여 에폭시 수지로 몰딩하고 철심을 중심으로 동심배치된다. 고압권선과 저압권선 사이의 갭이 절연 및 냉각용 덕트역할을 하게된다. 하지만 전체적인 크기가 커지게 되어 소형화 및 저손실화를 목적으로 일체주형방식의 몰드변압기도 개발되고 있다.

3. 몰드변압기의 열해석

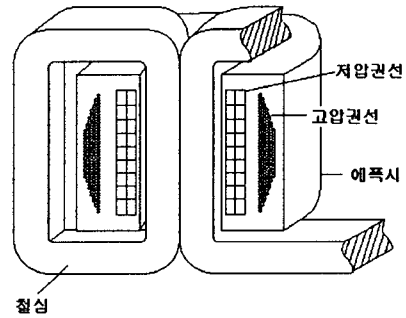
3.1 일체형 몰드 변압기

일반적인 지상 설치형 몰드 변압기의 권선구조는 그림 1(a)와 같이, 고압권선과 저압권선이 분리

되어 있으며, 각 권선 사이에 덕트가 삽입된다. 그러나, 일체형 몰드 변압기의 경우는 고압권선과 저압권선이 함께 몰딩되어 그림 1(b)와 같은 구조를 갖는다[7].



(a) 기존방식



(b) 일체형

그림 1. 몰드 변압기의 권선구조

3.2 일체형 몰드 변압기의 열해석

일체형 몰드 변압기는 외함의 통풍구조를 통해 자연대류에 따른 공기냉각 방식으로 이루어진다. 몰드 변압기의 축대칭 모델에서 열전도 방정식은 식 (1)과 같으며, 외부 경계조건은 식(2), (3)과 같다.

$$k_r \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -Q \quad (1)$$

$$q = h_{ic}(T - T_c(z)) : \text{내부벽} \quad (2)$$

$$q = h_{ec}(T - T_a) : \text{외부표면} \quad (3)$$

여기서, T : 온도 (°C)

T_a : 외부 분위기 온도 (°C)
 $T_c(z)$: 공기덕트의 온도 (°C)
 q : 열속 (W/m²)
 k_r, k_z : r방향과 z방향으로의 열전도율 (W/m °C)
 Q : 손실 (W/m³)
 h_{ic}, h_{ec} : 내부 벽과 외부 표면에서의 대류열전달 계수(W/m² °C)

대부분의 경우, 권선이나 철심에서 발생하는 열을 권선간이나 철심 사이에 있는 공기덕트 내에서의 자연대류 열전달에 따라서 냉각된다. 일반적으로 평균 온도상승 θ 는 식 (4)로 계산되지만, 제정수는 많은 실험 및 실측 데이터에 따라 설정된다. 여기서 n, K_1, K_2 는 정수이며 F는 풍량에 따른 계수, W는 발열량(kW), S : 방열면적 (m²)이다.

$$\theta = K_1 \cdot \left(\frac{K_2}{F} \cdot \frac{W}{S} \right)^n \quad (4)$$

덕트 구조의 설계모델에 대한 온도분포를 예측하기 위해 유한요소법(FEM) 상용 프로그램인 MSC/Nastran for Windows 프로그램을 사용하였다. 설계 변압기의 구성 재료인 에폭시, 저압 및 고압코일, 유리섬유 등에 대한 열전도율, 열팽창계수, 비열 등의 열적 파라미터들을 선정하였으며, 표 1에 각 재료들의 열적 파라미터를 나타내었다.

표 1. 각 재료의 열적 파라미터.

재 료	열전도율 (W/m · °C)	열팽창계수 (10 ⁻⁶ /°C)	비 열 (kcal/kg · °C)
에폭시수지	0.25	65	-
동 선	384	17	0.092
유리섬유	10.4	7	0.19

부하조건으로는 저압 및 고압코일에 흐르는 전류에 따른 발열량을 지정하고 변압기 외함 내부의 자연대류 조건을 설정하여 시뮬레이션을 하였다. 자연대류 설정 시의 온도조건은 기존에 외함 내부에 몰드변압기의 대류특성을 실험을 통해 확인하여 48°C로 설정하였다. 변압기 열해석을 위한

MSC/ Nastran의 해석과정을 그림 2에 나타낸다.

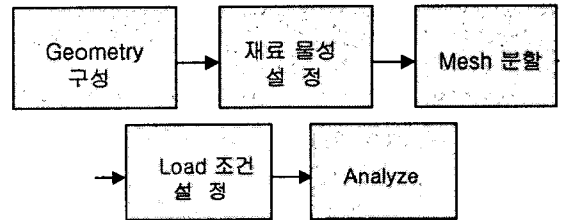


그림 2. 해석 수순

2.3 몰드변압기의 온도분포 해석

본 연구에서는 100kVA 외철형 주상 변압기로 응용하기 위해 일체형 주형방식의 덕트를 갖는 모델을 설계하고, 모델에 대해서 MSC/Nastran for Windows의 Thermal analysis를 이용하여 온도분포를 해석하였다. 각 구성재료 에폭시, 저압, 고압코일, 유리섬유 등의 열적 파라미터들을 선정하고, Load 조건으로 저·고압코일에 흐르는 전류에 따른 발열량을 설정하고 변압기 주위를 자연대류조건으로 설정하였다.

그림 3은 100kVA 모델링(덕트 3층)에 대한 온도 해석 결과를 나타내었다. Hot spot 온도는 99.57°C로 고압권선 1(HV 1)에서 나타났지만, 저압권선(98.09°C)과 고압권선의 온도차가 거의 없었다. 또한, 고압권선 2(HV 2) 부분에서 최고 온도가 83.01°C로 저압권선 1(HV 1)보다 약 15°C 정도가 낮았다.

그림 4는 각 부분을 분할해서 나타낸 것이다. 100kVA 설계 모델에 대한 열해석을 검토했던 결과들을 표 2에 나타내었다.

표 2. 설계모델의 열해석 결과

발열량 [W/mm ³]	권선의 방열면적[dm ²]	외함의 방열면적 [dm ²]	열해석 결과
LV:0.0000304 HV:0.0000259	174.40	상부: 480 하부: 2007	LV:106.2 HV: 97.24



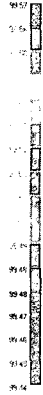
그림 3. 온도분포 해석 결과



(c) 저압권선 2 코일부분



(a) 에폭시 몰딩부분



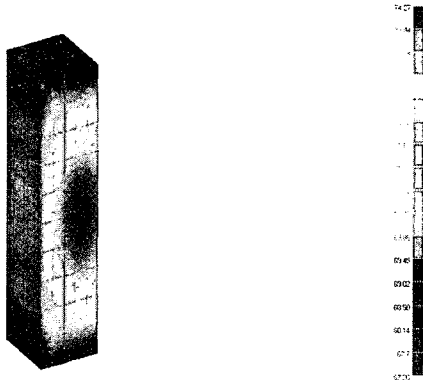
(d) 고압권선 1 코일부분



(b) 저압권선 1 코일부분



(e) 고압권선 2 코일부분



(f) 철심부분

그림 4. 각 부분의 온도분포 해석결과

4. 결 론

소형화 및 저손실화를 목적으로 일체형 주형방식의 몰드변압기에 대해서 온도분포를 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- [1] 2차 권선 사이에 덕트를 설계하여 온도분포를 해석한 결과 주변온도에 따른 최고온도의 변화를 비교했을 때 덕트가 있을 때와 없을 때 차이가 나타났다. 이는 덕트가 1차적으로 1차, 2차 권선사이의 열전달을 용이하게 하는 기능을 하는 것으로 사료된다.
- [2] 고압권선 1(HV 1)에서 Hot spot가 나타났으며, 저압권선(98.09℃)과 고압권선의 온도차가 거의 없었다.
- [3] 최고온도는 고압권선 2(HV 2) 부분에서 나타났으며, 저압권선 1(HV 1)보다 약 15℃ 정도가 낮았다.

참 고 문 헌

- [1] 조한구, “옥외용 몰드 주상변압기의 적용기술”, 한국전력공사 기술개발, 제46집, 2001.
- [2] 津野隆司, “新型モールド變壓器”, 電氣評論, 1996.
- [3] Takeshi Noda, Shunichi Takahira, “重電機器를 支配する熱流體 解析”, Takaoka Review, Vol. 47, No. 3, p. 68, 2000.
- [4] Linden W. Pierce, “Predicting hottest spot

temperatures in ventilated dry type transformer windings”, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 9, No. 2, 1994.

- [5] Toshiya Nakayama, Takeshi Noda, Tomoaki Banno, “Numerical Analysis Technology of Molded Equipment”, Takaoka Review, Vol. 43, No. 4, 1998.
- [6] 조한구, 이운용, “몰드 절연물의 해석기술”, 전기전자재료학회논문지, 15권, 7호, 2002.