

주상용 몰드 변압기의 온도분포 해석과 온도상승 시험

조 한 구 · 김 석 수 · 이 운 용 · 이 중 득
한국전기연구원

The Temperature Distribution Analysis and Temperature Rise Test of Pole Mold Transformer

Han-Goo Cho · Seok-Sou Kim · Un-Yong Lee · Jong-Doug Lee
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - In this paper, the temperature distribution and thermal stress analysis of 50kVA pole mold transformer for power distribution are investigated by FEM program. The temperature rise test of designed mold transformer is carried out and test result is analyzed compare to simulation data.

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)

1. 서 론

몰드변압기는 유입변압기와는 달리, 난연성이 우수하고 소형화가 가능하며, 또한 최근 예폭시 수지의 발달로 인해 옥외용 몰드변압기로의 적용도 가능하다. 국내에서는 현재 일반적으로 사용되고 있는 몰드변압기는 공장, 빌딩 등 지상설치형 뿐이지만, 국외에서는 몰드변압기를 주상변압기로 적용하기 위한 연구가 진행되고 있다. 일반적인 몰드변압기의 구조는 고압코일과 저압코일 사이에 냉각덕트를 만들어 각각 분리되어 있는 구조를 가지고 있지만, 변압기 전체의 소형화 및 저손실화를 목적으로 일체주형방식의 몰드변압기도 개발되고 있다. 하지만, 일체주형방식의 몰드변압기는 1차권선과 2차권선 사이에서의 방열이 어렵기 때문에 방열면적을 확대하기 위한 효과적인 냉각구조가 필요하다[1, 2].

최근 변압기 최적설계를 위해 수치해석을 이용하여 많은 연구가 되고 있는데, 해석사례로는 전계해석, 자계해석, 전위전동해석, 온도분포 해석, 응력해석 등이 있다. 특히 변압기 운전시 발생하는 열은 절연물의 열화를 초래하여 변압기의 성능저하 및 수명을 단축시키기 때문에, 권선의 온도상승은 허용온도를 넘지 않도록 설계하는 것이 중요하다. 따라서 설계 변압기의 권선온도상승이 얼마나 되는지, 미리 수치해석으로 온도분포 해석을 함에 따라 설계비용 및 설계시간을 감소시킬 수 있다[3, 4].

본 논문에서는 주상용 몰드변압기로의 적용을 위해 먼저 유한요소법을 이용하여 설계 변압기의 온도분포를 해석하였으며, 이를 바탕으로 몰드변압기를 제작하였다. 또한 제작된 변압기에 대해서 온도상승 시험을 실시하여 열적 문제를 검토하였다.

2. 몰드 변압기의 열해석

2.1 몰드 변압기의 열전달

몰드변압기의 축대칭 모델에서 열전도 방정식은 식(1)과 같으며, 외부 경계조건은 식(2), (3)과 같다[5].

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

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

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

여기서, T : 온도 (°C)

대부분의 경우, 권선이나 철심에서 발생하는 열을 권선간이나 철심 사이에 있는 공기덕트 내에서의 자연대류 열전달에 따라서 냉각된다. 일반적으로 평균 온도상승 θ 는 다음 식으로 계산되지만, 제정수는 많은 실험 및 실측 데이터에 따라 설정된다.

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

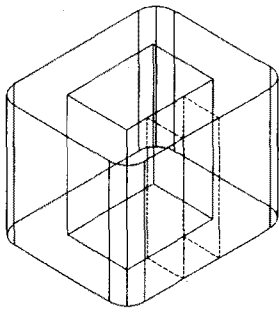
여기서 n, K_1, K_2 는 정수이며 F는 풍량에 따른 계수, W는 발열량(kW), S : 방열면적(m²)이다.

2.2 몰드 변압기의 온도분포 해석

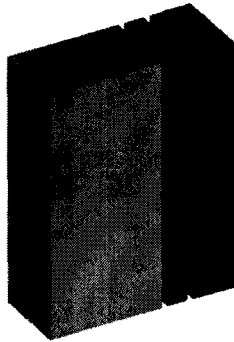
표 1은 적용하고자하는 주상변압기의 사양을 나타내며, 그림 1은 열해석을 위한 변압기 3차원 모델링을 나타낸다(전체의 10%).

표 1. 적용 주상변압기의 사양 [6]

철심형태	내철형
용량	50kVA
1차전압	13200 V
2차전압	230/115
절연재료	F종
주파수	60 Hz
상수	단상



(a)



(b)

그림 1. 변압기 모델링

온도분포 해석은 FEM 프로그램(MSC사의 Nastran)을 통해 각 구성재료인 에폭시수지, 저·고압코일, 유리섬유 등에 대해 열전도율, 열팽창계수, 비열 등의 열적 파라미터들을 선정하여 실시하였다. 부하조건으로 저·고압코일에 흐르는 전류에 따른 발열량을 지정하고 변압기 주위를 자연대류 조건으로 설정하여 시뮬레이션을 하였다.

그림 2는 해석 결과 나타난 온도분포이다. Hot spot 온도는 저압권선에서 나타났으며, 그 값은 119.5℃로 나타났다. 또한 고압권선의 중심온도는 약 80℃로, 철심은 60~70℃ 정도로 나타났다.

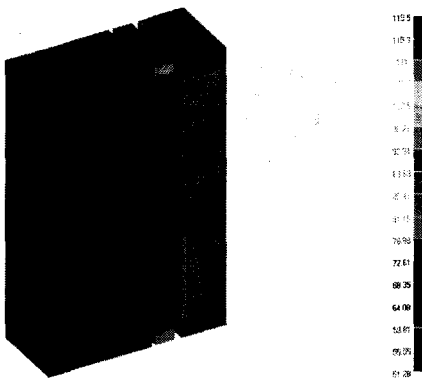


그림 2. 변압기의 온도분포 해석결과

2.3 몰드 변압기의 온도상승시험

위와 같이 열해석을 통해 설계모델을 검토한 후, 시제품을 제작하여 권선저항, 무부하 및 부하시험, 온도상승

시험 등을 시행하였다. 측정된 제작 변압기의 권선저항, 여자전류, 무부하손, 부하손 등을 표 2에 나타낸다.

표 2. 변압기의 기본특성 값

측정값(측정온도: 5.4℃)	
	15.97 Ω
	4 mΩ
	100.8 W
	451.2 W
	0.5%

제작 변압기에 대한 온도상승 시험은 등가부하법으로 시행되었으며, 시험장면을 그림 3에 나타내었다. 또한 변압기의 각 부분마다 표면온도의 값을 측정하기 위해 온도센서를 부착시켜 기록계로 측정하였다.

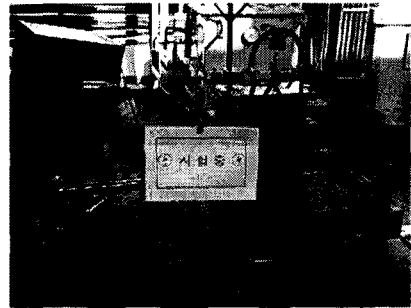


그림 3. 온도상승 시험

그림 4는 온도상승 시험시 각 부분의 온도센서위치를 나타낸다. 온도상승시험 후, 각 온도센서의 값을 측정한

결과, 각 부분의 표면온도 최종값은 표 3과 같이 나타났다.

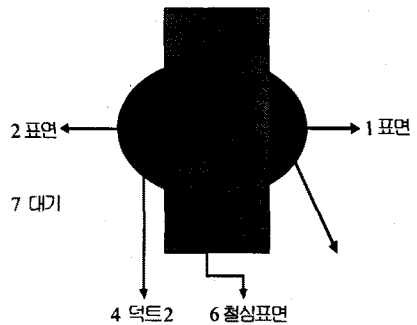


그림 4. 온도센서 위치

표 3. 각 위치별 표면온도값

센서위치	저온시 온도(°C)	동온시 온도(°C)
1	11.7	72.9
2	11.3	72.5
3	15.9	97.6
4	15.2	103.2
5	15.6	23.2
6	27.2	43.4
7	6.4	9.4

- [6] ES 141-533~545. "일단접지 주상변압기". 한진구매시방서, 2001.
 [7] IEC 726. "Dry Type Power Transformers", 1982.

온도상승 시험후, 저항법으로 고압권선과 저압권선의 온도상승값을 계산한 결과[7], 저압권선은 91K, 저압권선은 115.46K로 나왔다. 물론 열해석에서 나타났던 온도상승값과는 약간은 차이가 있었으나, 거의 유사한 경향을 보였다. F종 몰드변압기의 온도상승 제한값이 120K이므로 제작품의 온도상승은 합격으로 판정되었다.

3. 결 론

본 논문에서는 주상변압기로 적용하기 위해 몰드변압기를 설계, 제작하여 시험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 먼저 주상변압기의 사양에 적합한 50kVA 변압기를 설계하여, 유한요소법 프로그램을 통해 설계모델의 온도분포를 예측하였다. hot spot 온도는 저압권선 중심부이며, 온도가 119.5°C 정도로 예상된다.
- 2) 설계모델을 제작하여 기본특성 값을 측정한 결과, 고압측 권선저항값은 15.97Ω, 저압측 권선저항값은 4mΩ, 무부하손이 100.8W, 부하손이 451.2W 등으로 측정되었다.
- 3) 온도상승 시험결과 덕트표면의 온도가 103.2°C까지 올라가는 것을 알수 있었으며, 저항법을 통해 계산된 고·저압권선의 온도상승값은 91, 115.46[K]로 유한요소법을 통해 해석된 값과 약간의 차이는 있었으나, 유사한 온도분포를 보였다.
- 4) 제작 변압기의 온도상승정도는 제한값을 만족하였으므로 주상용 몰드변압기로 적용가능 할 것으로 사료된다. 향후 옥외적용을 위한 외함 및 수지기술을 연구할 예정이다.

(참 고 문 헌)

- [1] Takashi Hasegawa, "Application Technology of Molded Products in the Field", Takaoka Review, Vol.43, No.4, pp.66-72, 1996.
- [2] Linden W. Pierce, "An Investigation of The Temperature Distribution in Cast Resin Transformer Windings", IEEE Trans. Power Delv., Vol.7, No.2, pp. 920-926, April 1992.
- [3] Linden W. Pierce, "Predicting Hottest Spot Temperatures in Ventilated Dry Type Transformer Windings", IEEE Trans. Power Delv., Vol.9, No.2, pp. 1160-1169, April 1994.
- [4] 조한구, 이운용의 2인, "주상용 몰드변압기의 온도분포와 열용력 해석", 한국전기전자재료학회 논문지, Vol.14, No.4, pp.297~301, 2001.
- [5] A. Fernandes-Costa et al. "Prevision of The Thermal Behavior of Dry Type Cast Resin Transformers", Electric Machines and Power Systems, 20:261-272, 1992.