Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers. Vol. 14, No. 4, pp. 297~301, 2001.

논문 14-4-6

주상용 몰드변압기의 온도분포와 열응력 해석

The Temperature Distribution and Thermal Stress Analysis of Pole Mold transformer

조한구, 이운용, 한세원, 김석수
(Han-Goo Cho, Un-Yong Lee, Se-Won Han, Seok-Sou Kim)

Abstract

In this paper, the temperature distribution and thermal stress analysis of 50kVA pole cast resin transformer for power distribution are investigated by FEM program. The one body molding model (Model 1) and air duct model (Model 2) are designed and their temperature distribution are analysed. The temperature rise value is about 105.5 deg in the model 1 and 65.28 deg in the model 2. The temperature change of secondary winding is more than primary winding according to load ratio. The concentration part of Von Mises Stress occurs at interface between glass fiber and epoxy.

Key Words : Mold transformer, Temperature distribution, FEM, Cooling duct

1. 서 론

몰드변압기는 유입변압기와는 달리, 난연성이 우수하고 소형화가 가능하며, 또한 최근 에폭시 수지의 발달로 인해 옥외용 몰드변압기로의 적용도 가능해졌다. 우리나라에서는 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, 전위진동해석, 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 주상변압기로의 적용을 위해 일체주형방식의 몰드변압기와 공기덕트를 가지는 몰드변압기에 대해서 온도분포를 열해석 프로그램으로 해석하여 비교 분석하였다. 또한 변압기 부하율에 따른 권선의 온도변화와 열응력 분포 등을 검토하였다.

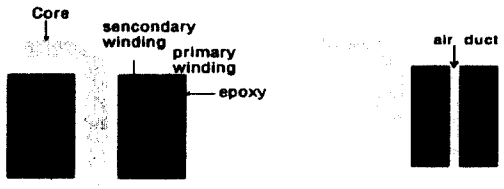
한국전기연구원 전략기술연구단
(경남 창원시 성주동 28-1
Fax: 055-280-1673
E-mail : hgcho@keri.re.kr)
2001년 1월 5일 접수, 2001년 2월 19일 1차심사완료
2001년 3월 12일 2차심사완료

2. 몰드변압기의 열해석

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 잠겨있지 않고 권선을 에폭시 등의 수지를 사용하여 고체절연화 시킨 변압기로, 일반적인 구조는 고압권선과 저압권선을 분리하여 에폭시 수지로 몰딩하고 철심을 중심으로 동심배치된다[5]. 고압권선과 저압권선 사이의 갭이 절연 및 냉각덕트 역할을 하게된다. 그러나 전체적인 크기가 커지게 되어 소형화 및 저손실화를 목적으로 일체주형방식의 몰드변압기도 개발되고 있다. 그림 1에 덕트방식(기존방식)과 일체주형방식의 권선구조를 나타낸다. 일체주형방식으로 제조할 경우, 1차권선과 2차권선 사이에서의 방열이 어려워지기 때문에 권선의 온도상승을 어떻게 억제하는 가가 중요한 문제로 된다. 즉 냉각면적의 감소를 보충하기 위해 발생손실의 저감과 효율적인 냉각구조를 연구할 필요가 있다.



(a) 일체주형 방식 (b) 공기덕트 방식

그림 1. 권선구조의 비교.

Fig. 1. Comparing with one body molding method and air duct method.

거의 대부분의 몰드변압기가 옥내에 설치되나 특별한 경우에는 빌딩의 옥상 또는 주상 등의 옥외에 설치하여야 할 필요가 있다. 유입변압기와는 달리 몰드변압기는 철심부 및 몰딩된 권선이 노출된 상태이기 때문에 바로 옥외에 설치할 수 없으며 외부 환경의 조건에 적합한 외함 내에 설치해야한다. 또한 옥외 설치시는 단자의 인출방법이 옥내용과 달리 부싱 또는 다른 방법으로 인출해야되는 등 여러 가지의 점검사항들이 있다. 하지만 내후성, 내크랙성, 안전성 등이 우수한 옥외용 에폭시 수지를 사용할 경우 외함없이 변압기를 만들 수 있다.

2.2 몰드변압기의 열전달

몰드 변압기의 축대칭 모델에서 열전도 방정식은 식 (1)과 같으며, 외부 경계조건은 식(2), (3)과 같다 [6].

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

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

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

여기서, T : 온도 (℃)
T_a : 외부 분위기 온도 (℃)
$T_c(z)$: 공기덕트의 온도 (℃)
q : 열속 (W/m^2)
k_r, k_z : r방향과 z방향으로의 열전도율 (W/m ℃)
Q : 손실 (W/m^3)
h_{ic}, h_{ec} : 내부 벽과 외부 표면에서의 대류열전달 계수(W/m^2 ℃)

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

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

여기서 n, K_1, K_2 는 정수이며 F는 풍량에 따른 계수, W는 발열량(kW), S : 방열면적(m^2)이다.

2.3 몰드변압기의 온도분포 해석

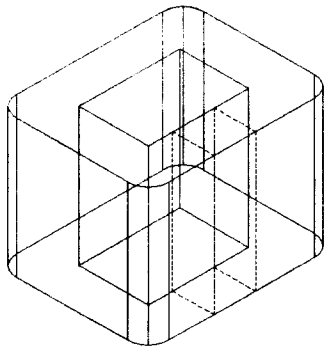
본 연구에서는 몰드변압기를 50kVA 주상변압기(절연등급: F종)로 응용하기 위해 일체주형방식의 모델(모델 1)과 공기덕트를 가지는 모델(모델 2) 등을 설계하여 2가지 모델에 대해서 FEM 상용 프로그램인 MSC/Nastran for Windows의 Thermal analysis를 이용하여 온도분포를 해석하였다. 적용개발하기 위한 주상변압기 사양은 표 1과 같다.

표 1. 주상변압기의 사양.
Table 1. The specification of pole transformer.

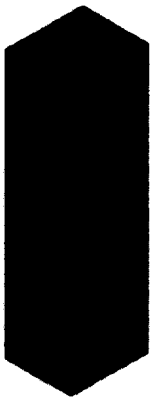
철심형태	내철형
용 량	50kVA
1차전압	13200 V
2차전압	230/115
절연재료	F종
주파수	60 Hz
상수	단상

온도분포 해석은 프로그램을 통해 각 구성재료인 에폭시, 저압, 고압코일, 유리섬유 등에 대해 열전도율, 열팽창계수, 비열 등의 열적 파라미터들을 선정하고, Load 조건으로 저·고압코일에 흐르는 전류에 따른 발열량을 설정하고 변압기 주위를 자연대류 조건으로 설정하여 시뮬레이션하였다. 그림 2는 모델 1의 3차원 모델링 모습을 나타낸다. 실제 해석부분은 점선부분으로 전체의 10% 해당부위이다.

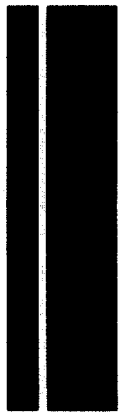
해석결과는 그림 3에 나타내었다. 모델 1의 경우 hot spot 온도가 135.5℃로 저압코일에서 나타났으며, 모델 2의 경우는 hot spot 온도가 95.28℃, 고압



(a) 모델링 부분(전체의 10%)



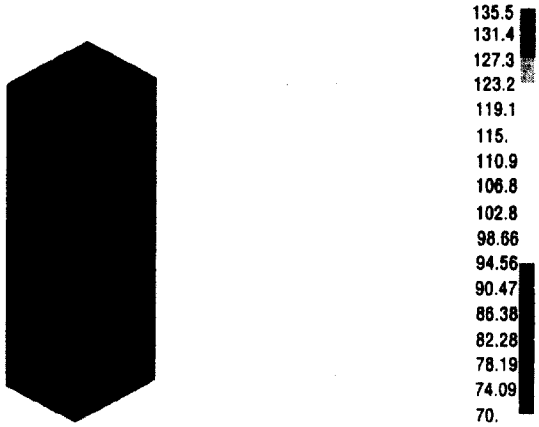
(b) 모델 1



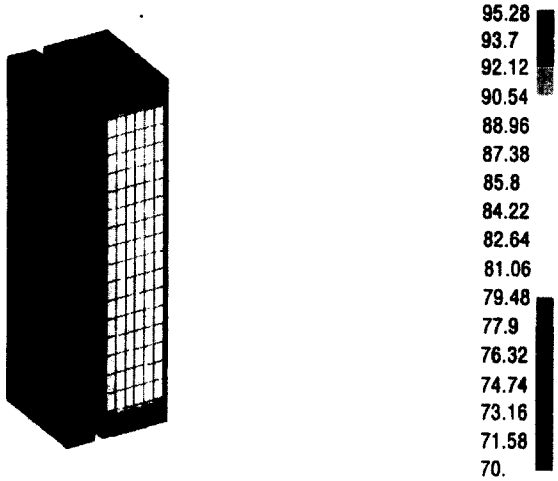
(c) 모델 2

그림 2. 설계 변압기의 모델링 (요소수는 약 2만개).
Fig. 2. The modeling of designed transformer.

코일은 81.6℃로 모델 1의 경우보다 온도상승이 낮게 나왔다. 몰드변압기 F종의 경우 온도상승한도는 100deg, 절연물 허용최고온도는 155℃이므로, 절연물 허용최고온도는 두 모델 모두 만족하지만 온도상승한도의 경우 모델 1의 경우는 105.5 deg(주위온도 30℃로 가정), 모델 2의 경우는 65.28℃로 모델 2의 경우만 만족하였다[7]. 일체형의 hot spot 온도를 더욱 낮추기 위해서는 코일의 발열량을 낮추거나 방열면적을 보다 확대시켜야 한다. 또한 열전도율이 좋은 충진제를 에폭시에 첨가하여 열방산을 개선할 수 있다.



(a) 모델 1의 온도분포



(b) 모델 2의 온도분포

그림 3. 각 모델의 온도분포.
Fig. 3. The temperature distribution of each model.

또한 모델 2에 대한 부하율 변화에 따른 저압, 고압코일의 온도변화를 해석한 결과 그림 4과 같이, 부하율이 증가함에 따라 고압코일보다는 저압코일 쪽의 온도변화가 더 심하였다.

그림 5는 현재 제작중인 모델 2 변압기의 저압권선부의 모습을 나타낸다.

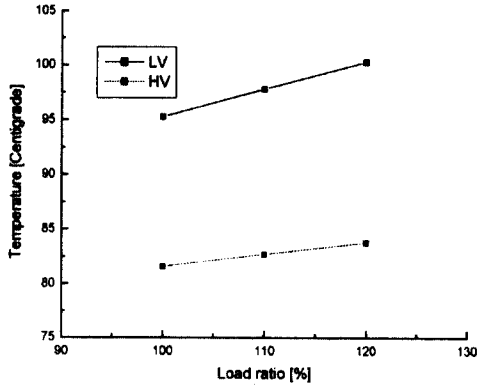


그림 4. 모델 2 변압기의 부하율에 따른 온도변화.
Fig. 4. The temperature change according to load ratio in the model 2.

그림 5. 제작중인 모델 2 변압기의 모습.
Fig. 5. The feature of model 2 is manufactured.

2.4 몰드변압기의 열응력 해석

물체의 온도변화에 대하여 발생하는 자유팽창 또는 수축이 탄성벽에 의해 저지당하므로 자유팽창량 및 수축량에 해당하는 압축 및 인장으로 인한 실제의 길이로 변형시키는데 필요한 내부응력과 같은 크기의 응력이 발생하는데 이것을 열응력(thermal stress) 이라고 한다. 온도가 상승할 경우에는 압축열응력이 발생하고 온도가 하강할 때는 인장 열응력이 발생한다[8].

몰드변압기의 경우 열팽창계수가 서로 다른 물질들로 이루어지는데 특히 수지와 도체, 또는 절연물과의 열팽창계수의 차이에 의해 열응력이 커지게 된

다. 모델 1의 경우, 일차권선과 2차권선이 일체로 몰드됨에 따라 수지에 발생하는 열응력이 증대될 것으로 예상된다. 실온에서의 열응력분포를 앞에서의 온도분포 데이터 결과를 바탕으로 해석한 결과, 그림 6과 같이 Von Mises Stress가 집중되는 곳은 유리섬유와 에폭시의 계면에서 발생하였으며[9], 이로인해 이 부분에서 내부크랙이 가장 먼저 발생할 것으로 생각된다.

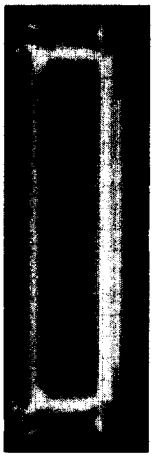


그림 6. 모델 1의 열응력 분포(Von Mises Stress).
Fig. 6. The thermal stress distribution of model 1.

3. 결 론

소형화 및 저손실화를 목적으로 한 일체주형방식의 몰드변압기와 공기덕트를 가지는 몰드변압기에 대해 온도분포 및 열응력을 해석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 모델 1의 경우 hot spot 온도가 135.5℃로 저압코일에서 나타났으며, 모델 2의 경우는 hot spot 온도가 95.28℃, 고압코일은 81.6℃로 모델 1의 경우보다 온도상승이 낮게 나왔다. 몰드변압기 F종의 경우 온도상승 한도는 100 deg, 허용최고온도는 155℃이므로 모델 1과 모델 2 모두 만족하나, 허용온도상승한도에서 모델 1이 기준온도를 벗어났다. 이는 코일의 발열량을 낮추거나 방열면적을 보다 확대시켜 해결해야하며, 또는 열전도율이 좋은 충진제를 에폭시에 첨가하여 열방산을 개선해야한다.
2. 온도분포 결과를 바탕으로 열응력을 해석한 결과, Von Mises Stress가 집중되는 곳은 유리섬유와 에폭시의 계면에서 발생하였으며, 이로인해 이 부분에서 내부크랙이 발생할 것으로 생각된다.

향후, 모델 1, 2의 시제품을 제작하여 온도상승시험에 따른 시뮬레이션 결과의 검증을 실시할 예정이며, 모델 1 변압기의 방열에 대한 연구도 계속 진행할 것이다.

참고 문헌

[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] 최경, "자동수렴성을 갖는 반도체 유한요소 해석 프로그램 개발", 전기전자재료학회지, Vol. 6, No. 2, pp. 137-146, 1993.

[5] 김태성 외 2인, "에폭시 수지의 경화형태와 전기절연특성과의 연관성", 전기전자재료학회지, Vol. 3, No. 2, pp. 81-89, 1990.

[6] 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.

[7] IEC 726, "Dry Type Power Transformers", 1982.

[8] 오세일, "재료역학", 동명사, pp.86-87, 1982.

[9] 이종호 외 2인, "유리섬유/에폭시 복합절연재료의 계면접착력 개선에 관한 연구", 전기전자재료학회지, Vol. 8, No. 2, pp. 136-143, 1995.