

논문 19-12-15

일체형 주상용 몰드 변압기의 온도분포 및 특성 비교

Temperature Rise Test and Temperature Distribution Analysis of Pole Mount Mold Transformer with One-body Molding

조한구^{1,a}, 이운용¹, 강택수¹, 최인혁²

(Han-Goo Cho^{1,a}, Un-Yong Lee¹, Tack-Sou Kang¹, and In-Hyuk Choi²)

Abstract

The mold transformers have been widely used in underground substations of large building and have some advantages when compared with oil-transformer. Those advantages are low fire risk, environmental compatibility, compact size and high reliability. The mold transformer is generally known to have cooling duct between low voltage and high voltage coil. To achieve better compact structure and low loss, mold transformers made by one body molding method has been developed. Nevertheless, such kinds of transformer need better cooling method because heat radiation between each winding is still of problem. The life of transformer is significantly dependent on the thermal behavior in windings. Many designers have calculated temperature distribution in transformers and hot spot point by finite element method(FEM) to analyze winding temperature rise. In this paper, the temperature distribution analysis of 100 kVA pole mold transformer for power distribution were investigated by FEM program and the thermal analysis results were compared with temperature rise test.

Key Words : Mold transformer, Temperature distribution, Air duct, Pole mount, One body molding, FEM

1. 서론

유입 변압기는 현재까지 주류를 이루고 있지만 수배전설비의 고신뢰성 측면과 오일의 환경오염, 누유 등이 문제로 되고 있으며, 폭발사고에 따른 화재 위험을 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 요구

되는 소형·경량화를 위해 우수한 내열재료를 채택한 변압기를 비롯하여 무부하손이 기존의 철심 재료보다 월등히 적은 아몰피스 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. 또한, 주상용 유입 변압기는 폭발사고에 따른 화재의 발생 가능성 및 오일 분출에 따른 환경 오염 등 많은 문제점을 가지고 있으며, 특성 시험중에서 중요한 단락강도 특성이 열악하다.

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

1. 한국전기연구원 재료응용연구단
(경남 창원시 성주동 28-1)
2. 한전전력연구원 송전기술연구그룹
a. Corresponding Author : hgcho@keri.re.kr
접수일자 : 2006. 8. 9
1차 심사 : 2006. 9. 30
심사완료 : 2006. 11. 15

게 몰딩되는 일체형 몰드 변압기는 분리형보다 소형화가 가능하지만, 방열면적의 감소로 인한 열적문제를 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]. 또한, 변압기를 소형화, 경량화를 위하여 권선의 전류밀도를 높이는 방법으로 H중 절연저 적용하는 방법과 기존 고압 및 저압권선이 분리된 몰드 변압기와는 달리 1, 2차 권선을 일체형으로 주형하는 방법 등이 있다.

본 논문에서는 주상용 유입변압기와는 전혀 다른 몰드 변압기로 일체형 구조에 따른 100 kVA 주상용 몰드 변압기를 설계하고 덕트에 따른 온도 분포 특성을 유한요소법 프로그램을 통해 검토하였으며, 설계된 변압기를 제작하여 온도상승시험을 통해 해석 결과와 비교 분석 검토하고자 하였다.

2. 몰드변압기의 열해석

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

몰드 변압기란 철심 및 권선이 절연유 중에 잠겨있지 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 냉각을 위한 덕트 역할을 하게 된다. 하지만 전체적인 크기가 커지게 되어 소형화 및 저손실화를 목적으로 일체형 주형방식의 몰드변압기도 개발되고 있다.

2.1 일체형 몰드 변압기

일반적인 지상 설치형 몰드 변압기의 권선구조는 그림 1(a)와 같이, 고압권선과 저압권선이 분리되어 있으며, 각 권선 사이에 덕트가 삽입된다. 그러나 일체형 몰드 변압기의 경우는 고압권선과 저압권선이 함께 몰딩되어 그림 1(b)와 같은 구조를 갖는다[7].

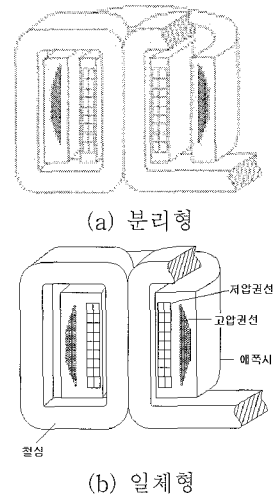


그림 1. 몰드 변압기의 권선구조.

Fig. 1. Geometric structure of winding in mold transformer.

표 1. 100 kVA 주상변압기의 사양.

Table 1. Specification of pole mount mold transformer.

철심 형태	외 철 형
용 량	100 kVA
1차전압	13200 V
2차전압	230 V
절연재료, 수지	F중
주파수	60 Hz
상 수	단상

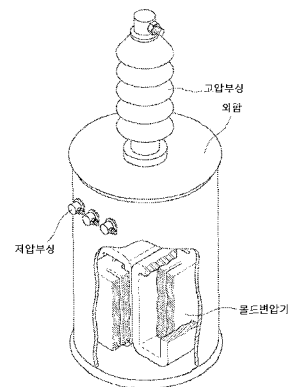


그림 2. 주상 몰드변압기 구조.

Fig. 2. Structure of pole mount mold transformer.

본 연구에서 검토하는 변압기는 주상용으로 용량이 100 kVA인 몰드 변압기로 그 사양은 표 1과 같이, 1차 전압이 13200 V, 2차 전압이 230 V이다. 이며, 설계된 몰드 변압기의 개략적인 구조를 그림 2에 나타내었다.

2.2 몰드 변압기의 열해석

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[8].

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

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

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

- 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)

덕트 구조의 설계모델에 대한 온도분포를 예측하기 위해 유한요소법(FEM) 상용 프로그램인 MSC/Nastran for Windows 프로그램을 사용하였다. 설계 변압기의 구성 재료인 에폭시 수지, 저압 및 고압 코일, 유리섬유, 철심 등에 대한 열전도율, 열팽창 계수, 비열 등의 열적 파라미터들을 선정하였으며, 표 2에 각 재료들의 열적 파라미터를 나타내었다.

표 2. 각 재료의 열적 파라미터.

Table 2. Thermal parameters of materials.

재료	열전도율 (W/m·°C)	열팽창계수 (10 ⁻⁶ /°C)	비열 (kcal/kg·°C)
에폭시수지	0.25	65	-
동선	384	17	0.092
유리섬유	10.4	7	0.19
철심	28.5	11	-

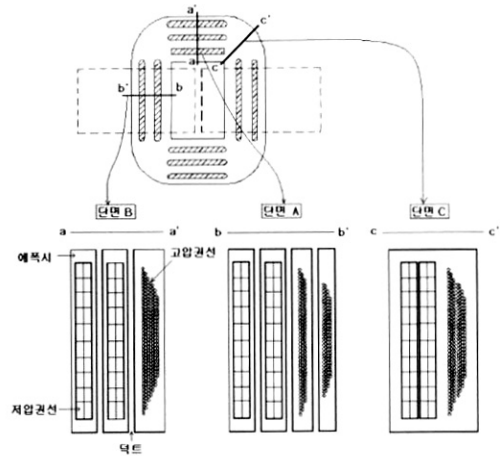


그림 3. 설계변압기의 내부구조.
Fig. 3. Inner structure of transformer.

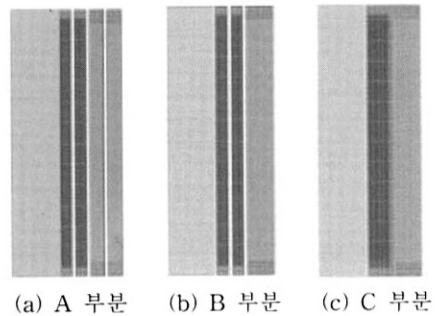


그림 4. 그림 3에서 나타낸 A, B, C 부분에 대한 해석 모델링.
Fig. 4. Modeling of A, B, and C parts shown in Fig. 3.

부하조건으로는 저압 및 고압코일에 흐르는 전류에 따른 발열량을 지정하고 변압기 외함 내부의 자연대류 조건을 설정하여 시뮬레이션을 하였다. 자연대류 설정시의 온도조건은 기존에 외함 내부에 몰드 변압기의 대류특성을 실험을 통해 확인하여 48 °C로 설정하였다. 설계 변압기의 특징은 고압권선과 저압권선이 일체형이면서 덕트가 2-3층 구조로 된 특징이 있다. 변압기의 해석부분은 그림 3과 같이 덕트가 3층인 A부분, 덕트가 2층인 B부분, 덕트가 없는 C부분 등으로 나누어 검토하였다. 그림 4는 100 kVA 설계 변압기에 대한 각 부분의 모델링을 나타낸다.

2.3 주상 몰드변압기의 온도상승시험

시제작 변압기에 대한 온도상승시험은 등가부하법으로 하였으며, 최종 온도 상승분(K)은 철손 및 동손시의 열저항과 냉저항값으로 부터 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 몰드변압기의 온도분포 해석

그림 5는 A, B, C 각 부분의 열해석에 따른 온도분포 결과를 나타낸다.

그림 5(a)와 같이 3층 덕트로 구성된 A 부분의 경우, 바깥쪽 고압권선의 온도는 81.39 °C, 안쪽 고압권선은 98.89 °C, 바깥쪽 저압권선은 90.76 °C, 안쪽 저압권선은 92.58 °C로 나타났으며, 최고온도의 위치는 고압권선 안쪽으로 나타났다.

2층 덕트로 구성된 B 부분의 경우는 고압권선은 112.5 °C, 저압권선 바깥쪽은 91.6 °C, 저압권선 안쪽은 125.8 °C로 최고온도가 A 부분보다 26.91 °C 더 높게 나타났다. 덕트가 없는 C 부분의 경우는 고압권선은 139.4 °C, 저압권선은 143.9 °C로 A 부분보다 최고온도가 45.01 °C 높게 나타났다. Hot spot 온도는 저압권선에서 143.9 °C로 계산되었으며, 몰드 변압기에 대한 열해석 결과가 위와 같이 저압권선과 고압권선의 평균온도와 hot spot 온도의 차가 약 40 °C 차이가 나타나는 경향을 보고한 바가 있다[8]. 또한, 기존에 보고한 논문에서도 덕트가 있는 권선구조와 덕트가 없는 권선구조에 대한 열해석 결과에 따르면 약 40 °C 정도의 차이가 나타나는 것을 확인한 바가 있다[9]. 각 부분의 해석결과를 표 3에 나타내었다.

표 3. 설계변압기의 각 부분별 열해석 결과.

Table 3. Results of thermal analysis in each model type.

위치	A 부분 (3층덕트)		B 부분 (2층덕트)		C 부분 (덕트없음)
고압권선	바깥쪽	81.39 °C	112.5 °C		139.4 °C
	안쪽	98.89 °C			
저압권선	바깥쪽	90.76 °C	바깥쪽	91.6 °C	143.9 °C
	안쪽	92.58 °C	안쪽	125.8 °C	

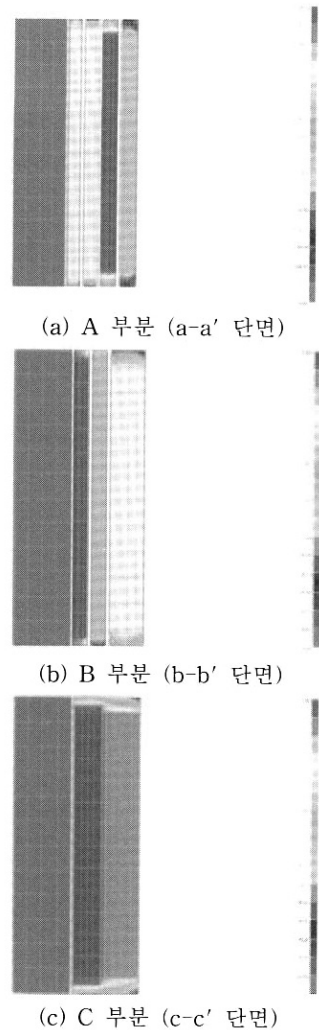


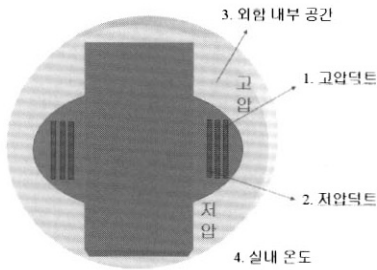
그림 5. 열해석 결과.

Fig. 5. Thermal distribution analysis of A, B and C parts.

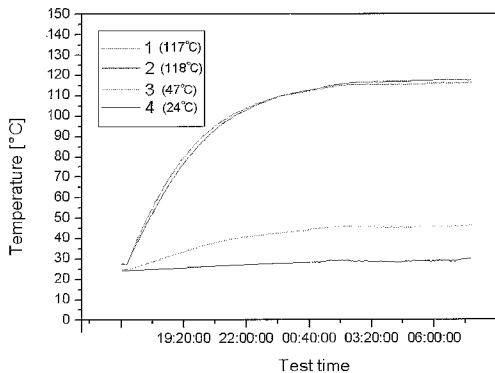
3.2 몰드변압기의 온도상승시험

시제작 몰드변압기에 대한 등가부하법에 의한 온도상승시험을 시행하였다. 그림 6(a)는 온도상승 시험시 변압기에 부착한 센서의 위치를 나타내며, 그림 6(b)는 포화된 후의 각 센서의 최종온도를 나타낸다. 센서는 고압권선 부분의 덕트, 저압권선 부분의 덕트, 외함 내부 및 외부 등에 설치하였다.

최종 포화온도를 확인한 결과, 고압권선 덕트부분은 117 °C, 저압권선 덕트부분은 118 °C, 외함 내부는 47 °C, 외함 외부의 시험장 실내온도는 24 °C로 나타났다.



(a) 온도센서의 부착 위치



(b) 포화온도

그림 6. 온도상승시험 결과.

Fig. 6. Sensor location and test result of temperature rise.

온도상승시험에서 측정된 권선 저항법으로 계산된 고압 권선의 최종 온도 상승 값은 87.47 deg, 저압 권선은 91.7 deg로 나타났다. 50 kVA 주상용 몰드 변압기에 대한 연구 결과의 온도상승정도보다도 낮은 온도상승 값을 보였다[10]. 주위온도가 24 °C로 포화된 고압권선 중심온도는 최종온도상승값과 주위온도를 합한 111.77 °C, 저압권선은 116 °C로 계산되었다. 온도상승시험에서는 결국 덕트가 없는 C 부분에서의 열이 덕트가 존재하는 A, B부분으로 열이 이동하면서 최종적으로 포화된다. 앞 절에서의 열해석 결과를 보면 고압권선의 경우 A와 C 부분의 평균온도(가장 낮은 온도와 높은 온도에 대한 평균값)를 구하면 110.4 °C로 나타나고, 저압권선의 경우는 A와 C 부분의 평균온도를 구하면 117.33 °C로 나타났다. 이들 해석결과는 실험에서 나타난 온도상승시험에서 포화된 권선 중심온도와 거의 유사한 결과 값이 나타난 것을 알 수 있다.

4. 결론

일체형 구조에 따른 100 kVA 주상용 몰드 변압기를 설계하고 덕트에 따른 온도분포 특성을 유한요소법 프로그램을 통해 검토하였으며, 설계 변압기를 제작하여 온도상승시험을 시행하고 그 결과를 열해석 데이터와 비교 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- [1] 일체형 구조에서 3층 덕트, 2층 덕트, 덕트가 없는 부분으로 나누어 각 부분에 대한 열해석을 검토한 결과 3층 덕트 부분이 최고온도가 98.89 °C로 가장 낮게 나타났으며 2층 덕트의 경우는 125.8 °C, 덕트가 없는 부분은 무려 143.9 °C로 높게 나타났다. 이러한 결과는 3층 덕트의 효과적인 냉각능력을 확인할 수 있다.
- [2] 설계 변압기에 대한 열해석 결과를 검토한 후, 몰드 변압기를 제작하여 등가부하법으로 온도상승시험을 시행한 결과, 포화된 변압기의 고압권선 최고온도는 111.77 °C, 저압권선 최고온도는 116 °C로 나타났다. 이러한 결과는 열해석 결과에서 나타난 평균 온도값과 비교한 결과 거의 유사한 값으로 나타났다.

- [3] F종 100 kVA 주상 몰드 변압기의 온도상승제한 값은 100 deg로 본 설계변압기는 고압권선은 87.47 deg, 저압권선은 91.7 deg로 문제가 없는 것으로 확인되었으며 덕트 설계 효과를 확인할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] 조한구, "육외용 몰드 주상변압기의 적용기술", 한국전력공사 기술개발, 제46집, p. 46, 2001.
- [2] 津野隆司, "新型モールド變壓器", 電氣評論, p. 11, 1996.
- [3] N. Kamizawa and M. Kobayahi, "Some examples of computer simulation for transformer design", Takaoka Review, Vol. 42, No. 2, p. 26, 2000.
- [4] L. W. Pierce, "Predicting hottest spot temperatures in ventilated dry type transformer windings", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 9, No. 2, p. 160, 1994.
- [5] T. Nakayama, T. Noda, and T. Banno, "Numerical analysis technology of molded

- equipment", Takaoka Review, Vol. 43, No. 4, p. 60, 1998.
- [6] 조한구, 이운용, "몰드 절연물의 해석기술", 전기전자재료학회논문지, 15권, 7호, p. 33, 2002.
- [7] 前田孝夫, "一體注型方式によるモールド變壓器", 日本電氣協同研究會, SA-91-70.
- [8] A. Fernandes-costa and Manuelvaz-Guedes, "Prevision of The Thermal Behavior of Dry-Type Cast Resin Transformers", Electric Machines and Power Systems, p. 261, 1992.
- [9] 조한구, 이운용, 박영두, "일체형 주상용 몰드 변압기의 덕트에 따른 열해석 특성 연구", 전기전자재료학회논문지, 17권, 3호, p. 348, 2004.
- [10] 조한구, 이운용, "50 kVA 주상용 몰드 변압기의 설계 및 특성평가", 한국전기전자재료학회 2002춘계학술대회논문집, p. 298, 2002.