

## 에폭시수지로 몰딩된 권선의 열전달 특성 연구

### Analysis of Heat-transfer on Winding composed with Epoxy-resin

이현진\*, 허창수\*, 조한구\*\*, 이기택\*\*, 서유진\*\*\*

(Hyun-Jin Lee, Chang-Su Huh, Han-Goo Cho, Ki-Taek Lee, Yu-Jin Suh)

#### Abstract

This paper presented the characteristic of Heat-transfer on the winding composed with Epoxy-resin in a 50 kVA cast-resin dry type transformer. The resin cast transformer is used widely in supplying electricity systems. However, to know the thermal characteristics of that is very useful in designing, manufacturing, and maintaining, there is no pertinent method to calculate this. In this paper, Based on the results of the physical characteristics and the simulation by commercial software using FEM method, we established the prototype Model for this. According to that Model, an analysis on a variation of the hottest spot temperature was discussed as a function of thermal conductivity for the individual windings composed with Epoxy-resin. The thermal conductivity of the individual windings with reference to upper way was discussed.

**Key Words** : Transformer, FEM, Thermal simulation, Epoxy-resin

#### 1. 서 론

몰드 변압기의 제일 큰 문제점으로는 열에 의한 열화를 들 수 있다. 몰드변압기는 내부에서 발생하는 열이 변압기를 구성하는 각 구성요소, 즉, 권선을 구성하는 코일, 코일 소선간의 절연을 위한 에폭시와 기타 절연체의 혼합물, 그리고 고·저압 권선간의 절연을 위한 에폭시의 열열화를 일으키는 주요 원인이 되고 있다. 따라서, 변압기의 특성상 절연과 냉각을 분리할 수 없음으로서 완전 밀봉된 몰드변압기는 온도 변화에 따른 팽창 및 냉각에 관한 연구와 함께 절연설계가 요구된다.

열해석 방법에는 식을 통해서 계산하는 방법도 있지만 기존하는 식들은 실제 운용의 결과와는 어느 정도 다른 차이가 있는 것으로 알려져 있다.

본 논문에서는 기존하는 식에 의한 열 계산 방법을 사용하지 않고 시뮬레이션을 이용한 열해석 방법으로 F.E.M.을 사용하여 이를 해석하고자 한다. 시뮬레이션을 이용하여 몰드변압기 특징에 대한 예측이 가능해진다면, 몰드변압기의 제작에 소비되는 비용과 시간을 많이 줄일 수 있을 것이다. 여기서 얻은 시뮬레이션 해석 결과를 비교 분석한 자료는 다음에 이어질 여러 종류의 변압기 설계·해석·유지 자료로 쓰이고 또한 변압기 모델에 변형을 주었을 때 실제 변압기의 제작·실험 없이도 자료를 얻을 수 있는 하나의 방법으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 시뮬레이션 과정에서 가장 문제점으로 떠오른 것이 바로 2차 에폭시복합물 권선의 열전도도(Thermal Conductivity) 결정이다. 이를 알아보기 위해 다음과 같은 실험방법을 따

\* : 인하대학교  
(인천광역시 용현동 402-751,  
Fax: 032-863-5822  
E-mail : g2011079@inhavision.inha.ac.kr)  
\*\* : 한국전기연구원  
\*\*\* : (주)서진설계기술단

랐다. 실제 변압기를 제작하여 변압기 둘레에 썸머커플(Thermocouples)을 설치하여 최고 온도를 일차적으로 실측하였고 이 실측한 값을 기준값으로 선택하였다. 시뮬레이션 Program에서 2차 권선의 열전도도 값을 정의해주는 부분에 여러차례의 수정을 통해 시뮬레이션 결과치가 기준값에 맞도록 결과를 도출하였다. 이에 앞서, 2차 권선의 구성 특징을 알고 있기 때문에 열전도도 값을 대략 예측할 수 있다. 즉, 2차 권선의 주된 구성 물질은 구리이므로 구리의 열전도도보다 작은 값이 나올 것으로 판단된다. 시뮬레이션에 쓰여진 열전도도 범위는 도체의 열전도도 범위 즉 10 ~ 100 cal/mKsec 사이로 잡았다. 시뮬레이션은 2차 권선에 흐르는 전류와 권선 저항을 실측하여 이로부터 얻을 수 있는 각 권선부의 발열량을 계산하여 각 권선에 적용하였다. 여러 차례의 시뮬레이션을 통해서 위에서 실측한 값에 근사한 결과와 비교하여 2차 권선부의 열전도도를 결정하였다.

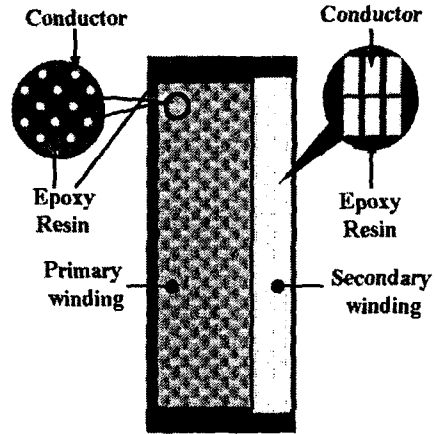


그림 2. 각 권선 구성.  
Fig. 2. Components of windings.

## 2. 실험

### 2.1 시작품 제작 및 시뮬레이션 영역선택

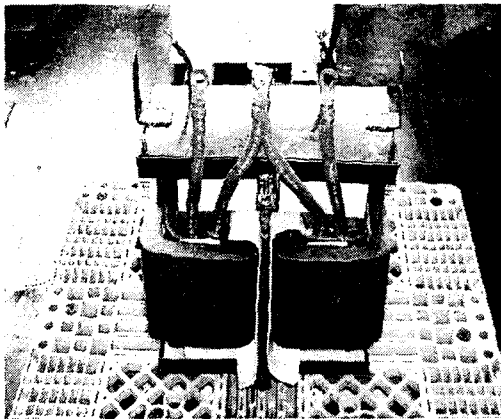


그림 1. 시작품.

Fig. 1. Prototype cast-resin transformer.

1차 권선과 2차 권선 사이에 Hole이 있는 시작품을 제작하였다. 그림 1에 제작된 시작품을 나타내었다.

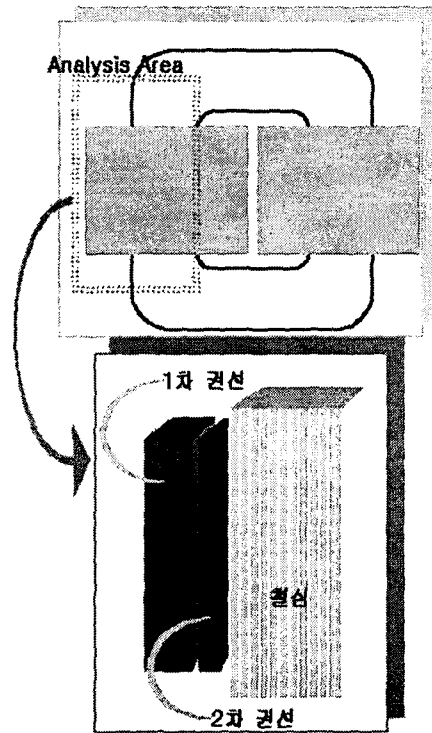


그림 3. 시뮬레이션 영역 결정.  
Fig. 3. Determination of simulation on area.

시작품에서 각 권선부의 특징은 1차 권선과 2차 권선이 서로 다르다. 1차 권선의 특징은 다량의 에

폭시에 단면적인 적은 구리 도선으로 이루어져 있고 2차 권선은 그에 비해 단면적이 크고 소량의 에폭시 수지로 몰딩된 형태이다. 이를 그림 2, 표 1에 나타내었다.

표 1. 권선 구조.

Table 1. Constitution of individual windings.

구분	구성
일차 권선	단면적이 적은 구리도선과 에폭시수지
이차 권선	단면적이 큰 구리도선과 에폭시수지

시작품을 시험한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다. [표 2. 참조]

표 2. 시작품 시험값.

Table 2. Values measured on the prototype cast-resin transformer in the tests.

구분	일차 권선	이차 권선
저항 [ $\Omega$ ]	15.97	0.004
턴 수	2180	38
코일의 평균길이 [mm]	879	641
동 손[W]	201.00	123.23
최고점 온도[ $^{\circ}\text{C}$ ]	91.73	115.46
효율[%]	98.82	
여자 전류율[%]	0.506	

표 2에서 얻은 시험치에서 시뮬레이션의 각 권선의 발열량을 계산하여 이를 각 권선부의 물질적인 특징과 함께 적용하였다. 시뮬레이션 영역은 그림 3에 나타내었다.

### 3. 결과 및 고찰

최대 온도는 2차 권선에서 나타나기 때문에 2차 권선의 열전도도를 먼저 결정하여야 한다. 먼저 2차 권선의 열전도도를 측정한 결과는 그림 4에 나타내었다. 2차 측의 열전도도는 위 시험값과 시뮬레이션을 통한 열전도도 변화에 따른 최대 온도값의 변화치를 비교하여 350 [W/mK]이라는 값을 얻었다. 1차 권선의 경우도 위 과정을 반복하여 시행한다. 1차 권선 열전도도값을 결정하는데 쓰이는 최대 온도는 1차권선의 최대온도가 아니고 2차 권선의 최대 온도임을 인지하여야 한다. 여기서 위 과정을 반복하여 1차 권선의 열전도도를 0.15 [W/mK]로 결정하였다. 그림 4, 5에 나타내었다.

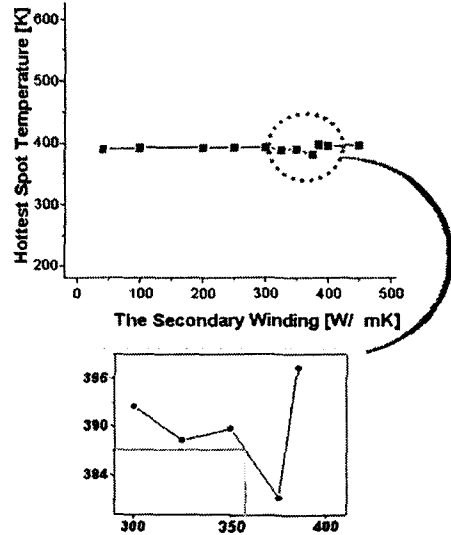


그림 4. 열전도도에 따른 최고온도 변화.

Fig. 4. Hottest spot temperatures as a function of the thermal conductivity. (secondary winding)

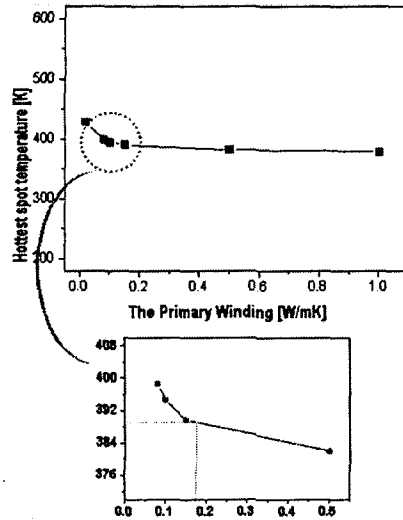


그림 5. 열전도도에 따른 최고온도 변화.

Fig. 5. Hottest spot temperatures as a function of the thermal conductivity. (primary winding)

#### 4. 결 론

1차 권선 구성 성분비와 2차 권선 구성 성분비를 살펴본다면 1차 권선 인 경우 열전도도는 에폭시 수지의 그것과는 별 차이 없을 것으로 판단된다. 왜냐하면 발열은 단면적인 적은 구리 도선의 저항에 의해 구리 도선에서만 일어난다. 발생된 열을 외부로 전달하는 역할은 다량의 에폭시 수지가 맡고 있기 때문이다. 이 변압기에서 에폭시의 역할은 첫째가 절연이고, 두 번째가 권선 발열에 의해 발생된 열을 외부로 전달하는 역할이다. 그러나, 에폭시 수지는 열전달 특성은 아주 열악하다.

위에서 실행한 시뮬레이션 결과와 실측에 의한 데이터 값의 비교를 통해서 얻을 수 있는 2차 권선 열전도도는 350 [W/mK]이었고 1차 측의 열전도도는 0.15 [W/mK]이었다.

에폭시 몰드 변압기의 경우 그 구성요소 각부 즉, 권선과 철심의 발열에 의한 온도 상승을 분석해 내는 것은, 변압기를 설계하고, 제작하여, 장기간 사용하는데 있어서 중요한 요소로서 중요하다. 변압기 발열부 특히 1차측과 2차측 권선에서의 최고 온도(Hottest spot temperature)는 변압기의 설계와 제조에 있어서 중요한 핵심 사항이 된다. 이러한 값들을 설계할 때 알고 있다면, 좀 더 효율적인 제조와 운용이 가능해질 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 에너지관리공단 에너지절약연구(1999-E-EL02-E-44) 지원으로 수행되었음.

#### 참고 문헌

- [1] Linden W. Pierce, "Specifying and Loading Cast-Resin Transformers", IEEE Trans. Industry Applications. Vol. 29, no. 3, pp. 590-599, May/June, 1993
- [2] T. Chao, "Solid cast transformers", IEEEIAS Pulp Paper Conf, pp. 140-147, 1991
- [3] 임달호, "전기계의 유한요소법", 동명사, pp. 1-5, 1992
- [4] Takashi Hasegawa, "Application Technology of Molded Products in the Field", Takaoka

Review, 1996

- [5] "전기재료 종합연구", 한국전기연구원, pp. 21-24, 1987
- [6] "고체 물리학 실험? 경희대학교 물리학과
- [7] 천희영외 1, "전기기계", 청문각, 1995
- [8] Linden W. Pierce, "An Investigation of the The Temperature Distribution in Cast Resin Transformer Windings", IEEE Trans. Power Delv., Vol.7, No.2, April 1992
- [9] 오무송외 1, "전기기기설계", 형설출판사, 1996
- [10] Linden W. Pierce, "Predicting Hottest Spot Temperatures in Ventilated Dry Type Transformer Windings", IEEE Trans. Power Delv., Vol.9, No.2, April 1994
- [11] A. Remandes-Costa et al, "Prevision of The Thermal Behavior of Dry Type Cast Resin Transformers", Electric Machines and Power Systems, 20:261-272,1992
- [12] 조한규외 4, "주상용 몰드변압기의 온도분포와 열용량 해석", 전기전자재료학회논문지 No. 4, 2001
- [13] IEC 726, "Dry Type Power Transformers", 1982
- [14] W.E Featheringill, "Power transformer Loading". IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 1A-19, no. 1, pp. 21-27, Jan./Feb. 1983