

# FEM을 이용한 24MVA 몰드변압기의 Hot-spot 위치 분석 연구

(Analysis on the Hot-spot Temperature Location of a 24MVA  
Cast Resin Transformer by FEM)

김영배\* · 이정우 · 신판석\*\*

(Yong-Bae Kim · Jung-Woo Ha · Pan-Seok Shin)

## Abstract

This paper calculates the core and copper losses as heating sources of a 24MVA cast resin transformer, and analyzes the thermal distribution of the transformer to find out its hot-spot area by FEM program. Since the winding of the transformer is composed with many series and parallel circuits, the analyzing model of the winding is simplified and modelled by axi-symmetric domain. As the results, the maximum temperature is estimated by 137°C in the upper part of the low-voltage winding. The maximum temperature has discrepancy of approximately 10°C, which is able to be considered as an acceptable error range in the design stage of power transformers. For the overall pattern of the temperature distribution is almost same as test results, the analyzing method can be a useful tool to find out a hot-spot area of the winding.

Key Words : Thermal Analysis, Core Loss, Copper Loss, FEM, Hot-Spot Temperature

## 1. 서 론

변압기의 운전 시 권선에는 전류가 흐르게 되고 줄 손실(Joule's loss)에 의한 열이 발생하게 된다. 이때 발생된 열은 권선부위와 절연물의 온도를 높게 되

며, 온도가 높아질수록 절연물의 열화는 가속화되어 변압기의 수명은 짧아지게 된다. 일반적으로 변압기의 수명은 내부의 전반적인 열적 특성보다는 특정 부위의 온도 값에 의해 결정되며, 특히 최고점의 온도(Hot-spot temperature) 값이 허용치 이상으로 상승할 경우 열화가 가속화 되어 변압기의 수명은 급격히 감소한다. 이때 각 재료의 물성치를 해당 영역에 적용하여 계산된 권선과 철심의 손실은 온도해석의 열원이 된다. 전력용 변압기는 정지기이므로 철손과 동손이 주요한 손실이고 이것에 표유부하손이 더해진다. 1차측이 전원에 접속되면 무부하에서도 철손이 생기므로 철손을 무부하손이라고도 한다. 또한, 권선 중에 생기는 동손은 저항손이라고 하며 부하에 의하여 변

---

\* 주저자 : 홍익대학교 전기공학과 박사과정  
\*\* 교신저자 : 홍익대학교 전기공학과 교수  
\* Main author : Hongik University Electrical Engineering Ph.D. course  
\*\* Corresponding author : Hongik University Electrical Engineering Professor  
Tel : 041-860-2593, Fax : 041-863-7605  
E-mail : nhb0108@naver.com  
접수일자 : 2012년 4월 20일  
1차심사 : 2012년 6월 5일, 2차심사 : 2012년 6월 15일  
심사완료 : 2012년 7월 2일

화하므로 부하손이라고도 한다. 표유부하손은 누설 자속에 의하여 외함, 구조 프레임, 볼트 등에 생기는 손실로 이론적인 식으로는 정확하게 계산하기는 어려우며, 설계시에 표유부하손은 보통 전체부하 손의 5% 이내로 산정한다[1].

일반적으로 변압기의 열적 특성의 해석을 위해서 대수적인 수식을 이용하는 예측 방법을 사용하여 왔다 [1]. 이 방법은 대수적인 수식을 이용하여 간단하게 권선의 평균 온도를 예측할 수 있는 장점을 가지고 있으나 내부의 온도 분포 및 최고 온도에 대한 예측은 할 수 없었다. 또한 변압기의 냉각 방식과 절연지의 특성이 변경될 경우 물질의 특성을 고려하는 것이 매우 어렵다. 이러한 문제점의 해결을 위하여 유한요소법(Finite Element method ; FEM)을 이용한 수치해석 방법을 이용하여 열해석을 수행하게 되었다. 이것은 2차원 시뮬레이션을 통한 변압기의 온도 특성에 대한 신뢰할 만한 예측이 가능해진다면, 온도 분포모의검증에 따른 손실저감으로 전력용 변압기의 제작에 소비되는 시간 및 비용의 절감 효과를 가능하게 할 것이다.

본 논문에서는 변압기의 hot-spot 온도 위치를 분석하기 위하여 24MVA(22.9/6.6kV) 몰드변압기를 model로 선정하여 전자기적인 특성과 열원을 계산하고, 정상상태의 온도분포를 해석하였다. 열해석은 변압기 내부의 유체운동에 의한 대류(convection)는 고려하지 않고 전도(conduction)에 의한 것만 해석했으며 대류는 경계에서 열이 발산되는 비율(열전달율  $W/m^2\text{C}$ )을 고려하여 시뮬레이션을 행하였다.

본 논문은 24MVA 배전용 몰드 변압기의 코일절연물의 컴팩트화를 위해 온도 분포를 해석하였고 그림 1 (a)는 24MVA 몰드변압기의 설계 모델을 3D형상으로 나타낸 것이고, 그림 1 (b)는 저압권선과 고압권선을 축대칭(axial symmetry)으로 모의하기 위한 FEM 해석 모델이다.

온도 분포 경향의 해석은 그림 2와 같이 저압, 고압 권선의 각 코일의 상세도면을 모델링하여 FEM 해석으로 Hot spot의 온도와 위치를 중점적으로 분석해 보았다. 해석 모델은 설계 권선의 치수와 모델을 그대로 반영하고, 저압 권선은 그림 2 (a)에서 보는 것과 같이 1턴 당으로 모델링하였고, 1턴을 확대하면 그림 2 (b)

와 같이 저압도체의 5×2를 1턴으로 계산하였다. 각각의 저압도체의 설계치와 절연물의 두께는 합으로 설계하였다. 또한 고압권선의 턴 당 모델링 (2×2, 3)은 저압권선의 턴 당 모델링(5×2)과 서로 다르다.

24MVA, 22.9/6.6kV 배전용 몰드 변압기의 사양은 표 1과 같으며, F종절연으로 효율은 99.12%이다.

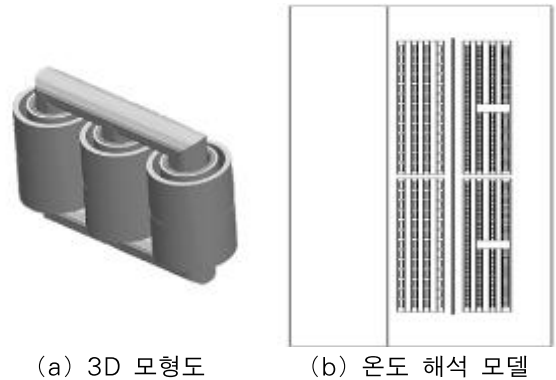


그림 1. 24MVA 몰드 변압기 모델  
Fig. 1. Model of a 24MVA mold transformer model

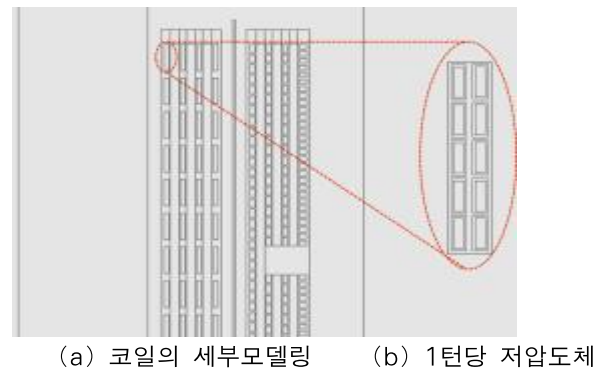


그림 2. 코일의 상세 모델링  
Fig. 2. Detailed modeling of the winding

표 1. 24MVA 몰드변압기의 기본 사양  
Table 1. The basic specifications of the 24MVA mold transformer

|                    |      |          |       |
|--------------------|------|----------|-------|
| 용량MVA              | 24   | 부하손kW    | 102.4 |
| 1차 전압 kV           | 22.9 | 무부하손[kW] | 23.1  |
| 2차 전압 kV           | 6.6  | 임피던스%    | 12.6  |
| 절연종류Classification | F    | 효율 100%  | 99.12 |

## 2. 이론고찰

### 2.1 열계 지배 방정식

일반적인 열계 해석은 대류를 고려해야 하므로, 기체 유동은 정상 상태의 난류 유동으로서 지배방정식은 다음의 식 (1), (2) 및 (3)으로 표시되는 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식으로 구된다.

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \tag{1}$$

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \rho \vec{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} \tag{2}$$

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \nabla^2 \tag{3}$$

여기서  $\rho$ 는 밀도  $kg/m^3$ ,  $\vec{v}$ 는 유체속도  $m/s$ ,  $\vec{g}$ 는 중력 가속도  $m/s^2$ ,  $p$ 는 압력  $N/m^2$ ,  $\mu$ 는 점성계수  $kg/m \cdot s$ ,  $c_v$ 는 정적비열  $kJ/kg \cdot K$ ,  $T$ 는 온도  $K$ ,  $Q$ 는 단위체적당 공급되는 열량  $W/m^3$ .  $k$ 는 열전도율  $W/m \cdot K$ 이다[2].

본 연구에서는 대류를 고려하지 않고 전도만을 고려하게 되므로 식 (3)만을 이용하여 지배방정식이 간단해지고, 실험실적인 경계조건을 정확하게 부여하여 온도분포를 계산하게 된다. 정상상태에서는 해석영역의 내부에너지 변화량을 의미하는 식 (3)의 좌변을 0으로 놓고 해석하게 된다. 식 (3)을 풀기위한 경계조건은 변압기의 철심 또는 권선의 표면에서 열유동이 일정하다고 가정하면 다음 식과 같은 경계조건식을 도출할 수 있다.

$$k \frac{\partial T}{\partial n} + h(T - T_0) = 0 \tag{4}$$

여기서  $n$ 은 경계면에서의 단위법선벡터,  $h$ 는 표면 열교환계수  $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ,  $T_0$ 는 외기의 주변온도를 나타낸다.

### 2.2 전자기적 열원

#### 2.2.1 히스테리시스손

히스테리시스 손실은 자성체의 B-H 곡선에 따른 결과로서 나타나며, 자기회로에 전압이 인가되면 초기에 한 방향으로 자기 쌍극자가 배열되고, 이후 다른 방향으로 자화될 때 자기쌍극자의 배열이 달라지는 에너지 변화 현상을 의미한다. 히스테리시스 손실은 B-H 곡선의 내부 면적에 비례하여 증가되며, 포화의 조건에 근접할수록 곡선 내부의 면적과 매 Cycle당 손실 에너지가 부수적으로 증가하게 된다. 교변하는 외부 자계로 강자성체의 자화에 필요한 에너지는 손실로서 자성체의 온도 상승을 야기시킨다. 따라서 히스테리시스 곡선 일주에 요하는 단위 체적 당 에너지  $W_h$   $J/m^3$ , 즉 단위 체적 당 히스테리시스 손실은 교류의 주파수가 1초 동안 fHz이면,  $P = f w_h$   $W/m^3$ 의 전력이 열로 변환(철손)되며 절연체를 열화시킨다. Steinmentz 실험식에 의하면 체적  $V[m^3]$ 인 자성체의 경우 히스테리시스 상수  $\eta$ 를 고려하여 히스테리시스 손실은 다음과 같다.

$$P_h = \eta \cdot f \cdot V \cdot B_m^{1.6} W \tag{5}$$

#### 2.2.2 와류손

와류손은 자성체의 교변자속에 의해 자성체 내부의 미소 순환전류(전류의 회전, 와전류)에 의해 나타나며, 이 전류에 의해  $I^2 R$  만큼의 열손실이 발생하게 된다. 철심으로 자성체를 사용하는 경우 철판을 sheet 형태로 적층해 사용함으로써, 이 와류손을 최소화한다. 와류손  $P_e$ 를 최소화하기 위한 방법으로 성층 철판(laminated core), 압분 철심(dust core) 및 페라이트 등을 사용한다.

와전류가 도체 내에 발생하면 와류손  $P_e$ 에 의한 줄열의 발생 및 정상 전류 분포에 영향을 미친다.

$$P_e = A \sigma (t f B_m)^2 W \tag{6}$$

여기서  $A$ 는 비례상수,  $\sigma$ 는 도체의 전도율  $[S/m]$ ,  $f$

는 주파수  $f$ ,  $B_m$  은 최대자속밀도  $T$ ,  $t$  는 도체의 두께  $mm$  이다.

본 연구에서 FEM 프로그램은 철손을 산출하기 위해 위에서 언급한 Bertotti 공식인 식 (7)을 이용한다. 이 식은 아래와 같이 히스테리시스 손실항, eddy 손실(Classical eddy loss)항, excess 손실항으로 되어 있다[3].

$$P_{loss} = [k_h B_m^2 f + \frac{\pi^2 \sigma d^2}{6} (B_m f)^2 + k_e (B_m f)^{\frac{3}{2}} + 8.67] k_f \quad (7)$$

여기서 히스테리 손실 항과 와전류 손실 항은 각각의 계수  $k_h$  와  $k_e$  를 가지게 되는데 이는 위의 식 (7)의 철손해석에 필요한 재질 특성 및 손실 특성으로 표 2 와 같다.

표 2. 철손 계산에 사용된 변수  
Table 2. The variables used to calculate core loss

| 변수       | 설 명  | 단위                                       |
|----------|--|--|
| $B_m$    | maximum flux density at the node concerned | T  |
| $f$      | frequency                                  | Hz                                       |
| $\sigma$ | conductivity                               | ( $\Omega m$ )-1                         |
| $d$      | lamination sheet thickness                 | m  |
| $k_h$    | coefficient of hysteresis loss             | W.s/T <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>       |
| $k_e$    | coefficient of excess loss                 | W/(T s-1) <sup>3/2</sup> /m <sup>3</sup> |
| $k_f$    | stacking factor(fill factor)               | ( $0 \leq k_f < 1$ )                     |

### 2.2.3 동 손

직류로 측정했을 때 1차 저항이  $r_1[\Omega]$ , 2차 저항이  $r_2[\Omega]$  이라면 변압기 동손은 다음 식으로 주어진다.

$$P_e = k_m I_1^2 (r_1 + a^2 r_2) \quad (8)$$

여기서  $k_m = \text{교류저항/직류저항} = 1.1 \sim 1.25$  이고  $I_1$  은 1차 전류  $A$ ,  $a$  는 권수비이다. 도체가 교류가 통하는 경우에는 누설 자속으로 인하여 도체 단면에서의 전류 밀도가 불균일하게 되어 저항이 증가한 것과 같은 효과가 나타난다. 이것을 피하기 위해서는 서로 절연된 도체들을 병렬로 사용하거나 도체의 위치를 도중에서 반전시키는 전위를 행하면 더욱 좋다. 권선의 직류 저항  $r$  을 계산으로 구하기 위해서는 다음 식에 의한다[4].

$$r = \frac{\rho_0 w l}{A} (1 + \alpha t) \Omega \quad (9)$$

여기서  $\rho_0$  는 0°C에서의 저항률  $\Omega \cdot m$ ,  $w$  는 직렬로 접속된 권수,  $l$  은 평균 1회선의 길이  $[m]$ ,  $A$  는 도체 단면적  $[m^2]$ ,  $t$  는 권선의 온도°C,  $\alpha$  는 0°C에서의 저항의 온도계수로 구리는 0.00426, 알루미늄은 0.00435 이다.

### 2.2.4 손실의 온도보정

모든 전기기기는 운전 중 각 부분에 손실이 생기고, 이 손실은 열로 변하여 기기의 온도를 상승시키므로 주위 온도보다 높은 온도(규정으로는 상승 한도 55°C)로 된다. 정지하고 있는 기기를 실내 온도로 시험(무부하시험, 단락시험 등)해서 그 효율이나 특성을 구해도 운전 중의 효율이나 특성과는 다르다. 따라서 운전 중의 변압기 상승 한도를 정해야 한다. 이 온도를 기준 온도라 하고 국제 규격(IEC)에서 F종 절연은 주위 온도가 25°C일 때 75°C로 정하고 있다.

변압기에 생기는 손실의 온도에 대한 영향을 생각하여 보면 무부하손 중의 히스테리시스 손은 보통 사용 온도에서는 변화하지 않고, 와전류손은 온도의 변화에 따라 철심의 전기 저항이 변화하기 때문에 어느 정도 변화한다. 그러나 무부하손은 대부분이 히스테리시스 손이므로 온도가 변화해도 보통 사용 온도에서는 변화하지 않는 것으로 간주하여도 문제가 없다. 부하손 중의 동손은 온도의 증가에 따라 권선의 저항이 증가한다. 그러나 표유부하손은 누설 자속에 의한 와전류 손이므로 온도가 상승하면 와전류 발생 장소의 전기

저항이 증가하여 오히려 와전류가 감소해서 와전류손, 즉 표유부하손이 감소하게 된다[5].

### 3. 해석 결과

해석에 필요한 온도 분포 해석을 위한 재질 특성은 표 3과 같다.

표 3. 재질 특성  
Table 3. Material properties

| 재질      | 열전도도<br>$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ | 비열<br>$J/m^3 \cdot ^\circ C$ |
|---------|----------------------------------|------------------------------|
| Core    | 20                               | $3.519 \times 10^6$          |
| winding | 394                              | $3.459 \times 10^6$          |
| Air     | 0.02                             | $0.8796 \times 10^6$         |
| Epoxy   | 0.8                              | $0.9 \times 10^6$            |

해석은 설계 사양에 맞추어 온도 분포 해석에 중점을 주었으며, 각 권선 저항은 20°C를 기준으로 저압 권선은  $0.00366\Omega$ , 고압권선은  $0.25366\Omega$ 이다. 턴수는 저압권선은 102턴, 고압권선은 357턴이다.

온도 분포 해석은 프로그램 해석상 유동해석에 제약이 있기 때문에 최대한 설계 조건에 맞추기 위해 경계 조건을 설정하였으며, 냉각 덕트의 대류, 복사값을 60°C와 0°C로 설정하였다. 철심과 권선의 경우 설계치 손실 값을 계산하여 입력하였으며, Barrier의 재질특성은 Epoxy와 동일하게 하였다. 그림 3은 전체 변압기 모델의 온도분포 해석 결과이다.

온도 해석 결과, 저압, 고압 권선의 상부 90% 지점에서 Hot spot이 형성됨을 알 수 있고 하부에서부터 상부까지의 온도는 64~137°C으로 형성되어 있다. 다음 그림 4와 그림 5는 각 검정선(Path)에 따른 온도 분포 결과이다. 그림 3에서 나타난 검정선(Path) A, B, C, D는 저압권선과 고압권선의 세로방향에 대한 온도로서 저압권선에서 최대 137°C, 고압권선에서 최대 123°C로 나타난다. 직선(Path) 1, 2, 3, 4는 저압권선과 고압권선의 상부 및 하부에 대한 온도로서 Hot spot은 상부 저압권선에서 최대 137°C, 상·하부의 온도 차이는 약 20°C의 차이를 보인다.

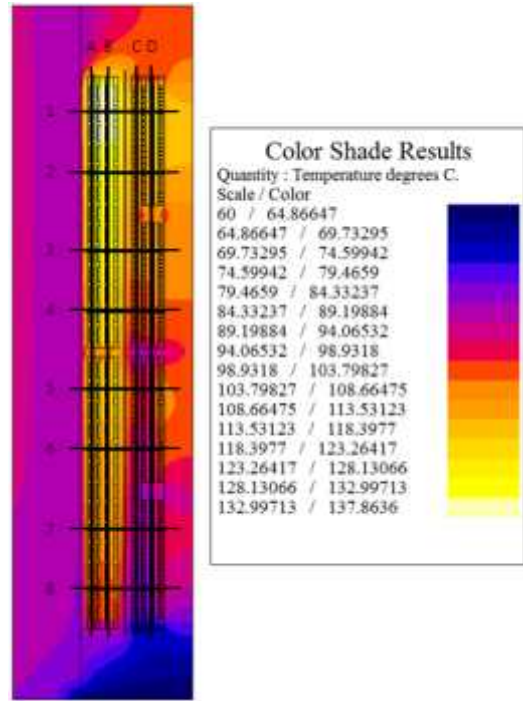


그림 3. 전체 모델의 온도 해석 결과  
Fig. 3. Temperature analysis of the entire model

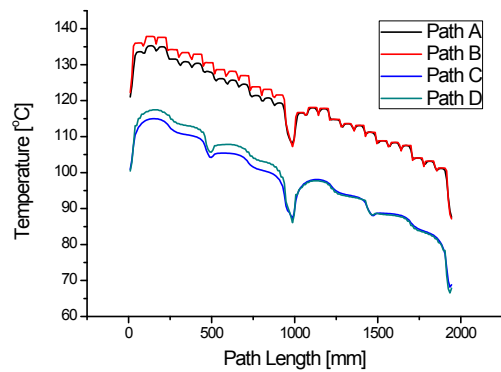


그림 4. 세로 path에 따른 온도 분포  
Fig. 4. Temperature distribution in a vertical path

그림 3과 같이 Hot-spot 온도는 저압 코일 상부 90%지점에서 나타났으며 최고 온도는 137°C로 실제 온도 126°C와 11°C 가량 차이가 난다. 변압기 코일의 컴팩트화를 위해 코일 상해도면에서 절연물의 폭을 외부도체 6mm에서 5mm로 내부도체 3mm에서 2.7mm로 절연물의 열전도도는  $0.8W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 에서

1.09 W/(m<sup>2</sup>·C)로 개선된 모델로 상부 Hot spot온도는 136.3°C로 1.5°C 감소함을 알 수 있다.

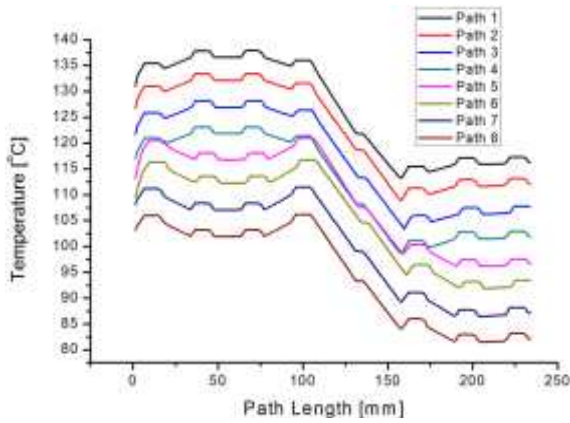


그림 5. 가로 path에 따른 온도 분포  
Fig. 5. Temperature distribution in a horizontal path

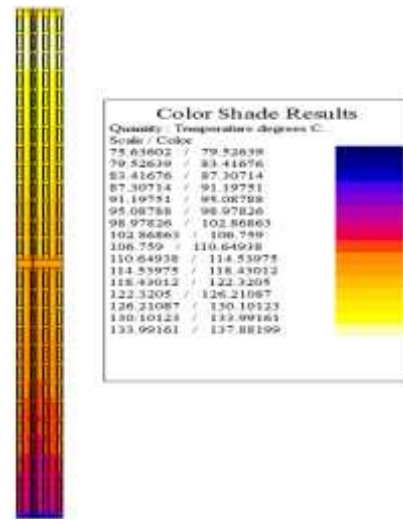


그림 7. 저압 코일의 세부 온도 해석  
Fig. 7. Detailed analysis of the low-voltage winding temperature

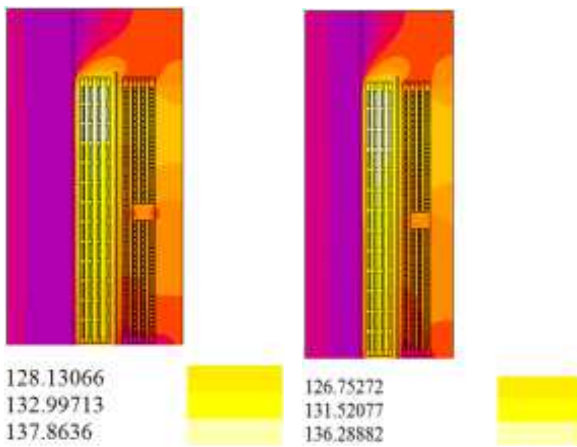


그림 6. 코일 온도 분포 (상부 Hot-spot 부분)  
Fig. 6. Temperature distribution in the winding (the upper part of Hot-spot)

Hot-spot 온도의 위치에 해당되는 저압코일을 세부적으로 해석을 진행하였다. 경계조건의 수정이 불가피하기 때문에 코일의 외부 경계조건으로 대류 값을 상부 25°C, 하부 15°C로 고정하였다. 온도의 경우 Hot spot이 137°C로 저압 코일 상부 2턴에 분포하였다. 해석결과는 그림 7과 같고 상·하부의 온도 분포는 그림 8과 같다.

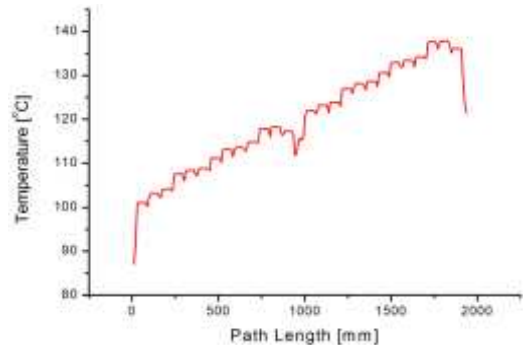


그림 8. 저압 코일 상, 하부 Path의 온도 분포  
Fig. 8. Upper, lower path the temperature distribution of low-voltage windings

온도 분포 해석 결과, 저압코일의 하부에서부터 절연물에 대한 온도 감소를 제외하면 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 설계된 변압기 코일의 온도 분포와 같으며 Hot-spot 온도는 전체 해석과는 다르게 10°C의 차이를 보인다. 코어와 공기를 제외한 경계조건의 설정에 차이가 생기는데 전체적인 경계 조건의 변화로 온도를 인위적으로 바꾸기 보다는 2D 온도 해석의 장점을 살려 좀 더 세부적인 해석을 진행하여 흐름을 파악하는데 중점을 두었다.

또한 Flux 2D를 이용한 온도분포 해석결과는 계측 시 상부와 하부온도의 차이가 선형적이지는 않지만

FEM해석에서는 전자기적 열원에 의한 온도분포를 해석하는 것이다. 이것은 Hot-spot의 위치나 온도분포의 경향을 분석하는 방법으로는 FEM 2D해석이 시간이 절약될뿐 아니라 최적설계치의 수정도 쉽게 이루어질 수 있으므로 설계과정에서 활용할 수 있는 좋은 방법이라고 할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 24MVA 몰드 변압기의 온도 분포를 해석하였다. 철손은 계산이 쉽지 않으므로 보정된 스타인메츠 방정식을 이용하여 계산한 자료를 입력하였으며, 해석한 결과 설계 모델의 온도 분포와 유사함을 알 수 있다. Hot spot은 저압 권선의 상부 2~3턴 부분에서 발생하고 137°C로서 F중 절연의 온도상승한도 이내로 분석되었다. 프로그램 해석상 실제 온도 계측과 조건이 다를 수는 있지만, 공학적으로 유용한 결과를 유추할 수 있다는 점은 변압기 특성상 내부의 온도 계측이 상당히 어렵기 때문에 FEM을 이용한 온도해석은 변압기를 개발하는데 예산, 시간 및 측정하기 어려운 온도측정 부위의 해석하는데 유용한 방법이 될 것이며, Hot-spot을 예측하는데 크게 도움이 될 것으로 보인다.

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임. (No. 2012010937)

#### References

[1] S. V. Kulkarni and S. A. Khaparde, "Transformer Engineering Design and Practice.", Marcel Dekker, 2004.

[2] Jeong Keun Lee, "Thermal Fluid Flow Analysis for Temperature Characterization of Cast-Resin Transformer in Distribution Power System Using CFD", Soongsil Univ. Master's thesis, 2010.  
 [3] Mechler, G.F. and Girgis, R.S., "Calculation of spatial loss distribution in stacked power and distribution transformer cores.", IEEE Trans on Power Delivery, Vol. 13, no. 2, pp.532-537, April 1998.  
 [4] Bean, R.L., Chackan, N., Moore, H.R., and Wentz, E.C., "Transformers for the electric power industry.", McGraw-Hill Book Company, pp.364-402, New York, 1959.  
 [5] Wojciech A. Pluta, "Specific Total Loss Components Under Axial Magnetization in Electrical Steel Sheets With Different Degree of Loss Texture", IEEE Trans on Mag., Vol. 44, no. 11, pp. 3832-3835, November 2008.

#### ◇ 저자소개 ◇



**김영배 (金英培)**

1982년 9월 19일생. 2009년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2009년 홍익대학교 전기공학과 졸업(석사). 현재 홍익대학교 전기공학과 박사과정.



**하정우 (河政佑)**

1978년 1월 9일생. 2004년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2007년 홍익대학교 전기공학과 졸업(석사). 2009년 홍익대학교 전기공학과 박사과정 수료. 현재 (주)효성중공업 연구소 선임연구원.



**신판석 (申判錫)**

1953년 1월 28일생. 1977년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1986년 미국 R.P.I. 전기공학과 졸업(석사). 1989년 미국 R.P.I. 전기공학과 졸업(박사). 1980~1993년 한국전기연구원 선임연구원. 1993년~현재 홍익대학교 전기공학과 교수.