

CFD에 의한 전력용 변압기의 온도 상승 예측

안현모, 한성진
 동아대학교 전기공학과

Temperature Rise Prediction for Power Transformer by Computational Fluid Dynamics

Hyun-Mo Ahn, Sung-Chin Hahn
 Dept. of Elec. Eng. Dong-A University

Abstract - 본 논문에서는 전력용 변압기 온도상승을 예측하기 위해 CFD 상용 프로세서인 Fluent를 이용하였다. 온도상승의 원인이 되는 전력손실은 자계 상용 프로세서인 Maxwell을 이용하였으며, 자체해석에 의해 얻은 전력손실을 유체역학과 열전달을 동시에 고려한 열유동해석의 열원으로 적용하였다. 해석의 정확도를 향상시키기 위해 변압기 권선의 형상을 실제형상과 유사하게 모델링하였으며, 해석결과와 타당성을 검증하기 위해 온도 상승 시험을 통해 얻은 측정값과 비교하였다.

1. 서 론

최근 국부적인 전력 급증 문제를 해결하기 위해 전력기기의 고효율화 및 대용량화가 이루어지고 있지만 대용량화는 전력기기의 크기를 키우게 되어 도시 공간의 효율적인 활용에 제한이 따른다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 전력기기의 대용량화를 진행하면서 소형화와 경량화 기술 개발이 이루어져야 할 것이다. 전력용 변압기의 소형화 경량화는 같은 용량에서 크기가 작아지게 되면 단위 체적 당 열 발생률이 증가하여 온도 상승을 유발한다. 온도 상승 범위를 규격(Standard)에서 제한하는 일정한 한도로 유지하기 위해 냉각작용이 매우 중요시해진다. 유입식 변압기의 냉각작용은 주로 대류에 의해 발생하는 열전달로 이루어지며, 만약 냉각작용이 불충분하여 온도상승이 제한범위를 초과하게 되면 절연물의 급속한 열화가 진행되면서 이상 전압 또는 외부 단락 등이 발생하여 전기적, 기계적 스트레스에 의해 전력용 변압기의 수명 단축이 일어난다. 이처럼, 전력용 변압기의 수명은 열적 특성에 큰 영향을 받으므로 변압기 내부의 온도상승 및 최고점(Hot-Spot) 온도를 정확히 예측하는 것이 매우 중요하다 [1].

본 논문에서는 전력용 변압기의 온도상승을 예측하기 위해 전자계-열계 결합해석기법을 이용한 열유동 해석을 수행하였다. 온도상승을 일으키는 열원인 전력손실은 1차, 2차 권선에 정격전류가 흐를 때 권선에서 발생하는 부하손실인 동손과 무부하시 철심에서 발생하는 철손을 고려하였으며, 이들은 전자계 해석을 통해 계산하였다. 이때, 권선의 저항값은 온도변화에 따라 크기가 달라지므로 결합해석 기법으로 증가하는 전력손실을 고려하였으며, 전력손실을 열원으로 하여 전력용 변압기의 온도 상승을 예측하였다. 온도상승시험을 통해 얻은 측정값과 결합해석기법을 이용한 열유동해석 결과를 비교하여 온도 상승 예측의 타당성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 전자계해석

2.1.1 전력손실

전력용 변압기에서 발생하는 전력손실은 크게 부하손실과 무부하손실로 나뉜다. 부하손실에는 동손과 표유부하손이 있으며, 무부하손실에는 무부하 시 발생하는 동손과 철손이 있다. 변압기 권선의 전기저항률은 온도에 의해 영향을 받아 열해석의 결과에 영향을 준다. 온도에 영향을 받는 전기저항률을 이용해 식(1)과 같이 온도에 따른 저항값을 계산할 수 있다. 변압기 권선에서 발생하는 전력손실의 크기는 권선에 흐르는 전류와 저항값을 고려한 식(2)을 통해 계산할 수 있다 [2-3].

$$R(T) = \frac{\rho_{e,0}[1 + \alpha_e(T - T_0)]\ell}{A_c} \quad (1)$$

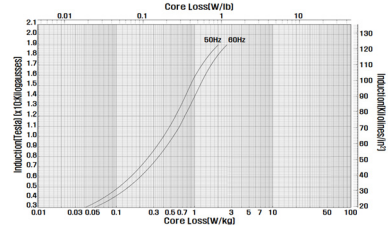
$$P_w = I^2 R(T) \quad (2)$$

여기서, $R(T)$ 는 권선 저항(Ω), $\rho_{e,0}$ 는 기준온도에서의 전기저항률 ($\Omega \cdot m$), α_e 는 도체의 온도계수($1/^\circ C$), T 는 온도($^\circ C$), A_c 는 도체의 단면적(mm^2), ℓ 은 권선의 길이, P_w 는 권선의 손실(W), I 는 권선에 흐르는 전류(A)이다.

변압기 철심의 전력손실 계산하기 위해 식(3)의 Bertotti 모델을 이용해 계산한다. Bertotti 모델의 초과손실은 Steinmetz 실험식에서 발생하는 오차를 줄이기 위해 사용되어 철손계산의 정확도를 향상시킬 수 있다. 이때, 손실에 관련된 계수는 철심의 비선형적인 특성을 나타낸 그림 1의 철손데이터를 통해 얻을 수 있다 [3].

$$P_c = \{K_h f B_m^2 + K_c (f B_m)^2 + K_e (f B_m)^{1.5}\} w \quad (3)$$

여기서, P_c 는 철심의 손실(W), B_m 은 최대자속밀도(T), K_h 는 히스테리시스손실(Hysteresis Loss) 계수, K_c 는 와전류손실(Eddy Current Loss) 계수, K_e 는 초과손실(Excess Loss) 계수, w 는 철심의 중량(kg)이다.



<그림 1> 철손데이터

2.2 열유동 해석

2.2.1 열유동 지배방정식

열은 일반적으로 전도, 대류, 복사의 방식 중 하나 또는 둘 이상의 방식으로 전달되며, 변압기 내부에서의 열전달은 대부분 냉각 오일의 순환에 의한 대류가 가장 큰 비중을 차지한다. 냉각 오일의 동특성은 열-유동 해석을 통해 예측할 수 있으며, 변압기 내부에서 발생하는 열전달 현상에 의해 변압기의 정확한 온도분포를 예측할 수 있다. 변압기의 내부 유동현상 및 온도 분포를 파악하기 위한 유체역학 지배방정식으로는 식(4)의 연속방정식과 식(5)의 운동방정식 그리고 식(6)의 에너지방정식으로 구성된 편미분 방정식을 동시에 고려해야 한다. 특히, 자연대류에서는 아래의 세 가지 방정식을 결합하는 것이 중요하다 [3].

연속방정식

$$\nabla \cdot \rho \vec{v} = 0 \quad (4)$$

운동방정식

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (5)$$

에너지방정식

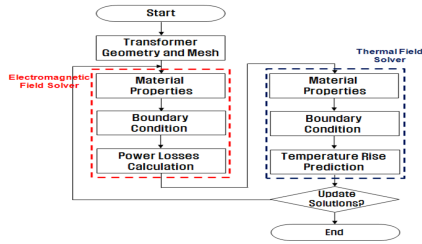
$$\rho c_v \frac{DT}{Dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \nabla^2 (kT) + \Phi \quad (6)$$

여기서, ρ 는 밀도(kg/m^3), \vec{v} 는 유체속도(m/s), \vec{g} 는 중력가속도(m/s^2), p 는 압력(N/m^2), μ 는 점성계수($kg/m \cdot s$), c_v 는 정적비열($kJ/kg \cdot K$), T 는 온도(K), Q 는 단위체적당 외부에서 공급되는 열량(W/m^3), k 는 열전도도($W/m \cdot K$), 그리고 Φ 는 산일에너지이다.

2.3 전자계-열계 결합해석

전자계 영역에서 물질의 특성데이터는 온도에 의해 영향을 받아 열해석의 결과에 영향을 준다. 온도에 따른 저항의 변화는 온도상승의 원인이 되는 열원의 크기를 변화시키게 되며, 이러한 관계는 전자계-열계 결합해석을 이용해 고려하였다. 결합해석의 순서도는 그림 2와 같으며,

전자계-열계 결합해석을 통해 온도상승 예측의 정확도를 향상시킬 수 있다.



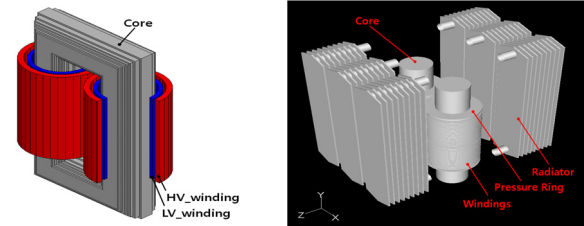
〈그림 2〉 전자계-열계 결합해석 흐름도

2.4 해석모델

변압기 내부에서의 열전달은 절연유의 순환에 의한 대류가 큰 부분을 차지하고 있다. 열유동 해석은 전자계해석과는 달리 구조물의 영향을 많이 받게 되어 권선과 권선 사이에서 절연유가 흐를 수 있도록 유류 덕트를 고려해 권선을 모델링하였으며, 자연대류 방식의 변압기의 방열판도 실제와 유사한 형상으로 모델링하였다. 본 논문의 해석모델은 단상 내철형의 구조로 형상은 그림 3과 같으며, 변압기의 사양은 표 1에 나타내었다.

〈표 1〉 해석모델 사양

구 분	사 양
정 격 용 량	1[MVA]
정 격 전 압	6600 / 690[V]
주 파 수	60[Hz]
냉 각 방 식	유입자냉식(ONAN)



〈그림 3〉 변압기 해석모델

2.4 해석 결과

2.4.1 열원선정

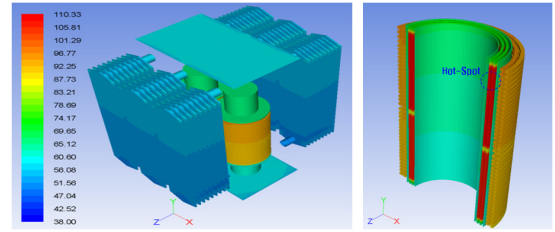
본 논문에서는 전력용 변압기의 온도상승을 일으키는 열원인 전력손실을 계산하기 위해 3차원 전자계해석을 수행하였다. 이때, 권선에서 발생하는 전력손실은 식(2)를 이용해 계산하였고, 철심의 전력손실은 자계해석으로 얻은 철심의 자속밀도 분포와 철손데이터를 Bertotti 모델에 적용해 계산하였다. 계산된 전력손실을 철심과 권선의 체적을 고려하여 전력손실 밀도로 환산하였으며, 이를 열유동해석의 열원으로 적용하였다. 철심과 권선의 전력손실밀도는 표 2에 나타내었다.

〈표 2〉 전력손실밀도

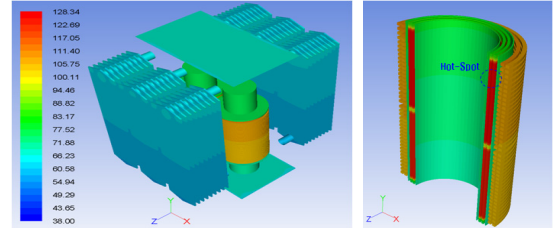
구 분	전력손실밀도 [W/m ³]	
권 선	고압 권선 (HV)	163020.6
	저압 권선 (LV)	188305.7
철 심	10335.3	

2.4.2 해석모델의 온도분포

본 논문에서는 전자계-열계 결합해석기법의 타당성을 검증하기 위해 결합해석기법이 적용되지 않은 모델과 적용된 모델을 해석하여 시험을 통해 얻은 데이터와 비교하고자 한다. 열유동 해석은 CFD 사용프로그램인 Fluent를 이용해 열유동 해석을 하였다. 그림 4는 기존해석모델과 결합해석모델의 온도분포를 나타내고 있으며, 두 가지 해석모델의 Hot-Spot은 유사한 위치(저압권선의 상부)에서 발생하였다. 기존해석모델의 Hot-Spot 온도는 약 110.3[°C]로 환경온도를 고려하였을 때 약 83.4[°C]의 온도가 상승하였고, 결합해석모델의 Hot-Spot 온도는 약 128.3[°C]이며, 환경온도를 고려하였을 때 약 101.4[°C]의 온도가 상승하였다. 결합해석모델은 기존해석모델의 Hot-Spot 온도보다 약 18[°C]가 증가한 결과를 얻었다. 두 가지 해석모델의 권선과 방열판에서 일어난 온도 상승 해석결과를 표 3에 나타내었으며, 해석의 타당성을 검증하기 위해 온도상승 시험을 통해 얻은 측정값과 비교하였다.

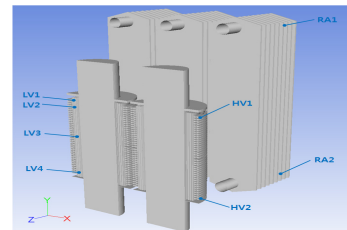


(a) 기존해석모델



(b) 결합해석모델

〈그림 4〉 해석모델의 온도분포



〈그림 5〉 변압기 온도센서 위치

〈표 3〉 온도상승 데이터

구 분	LV1	LV2	LV3	LV4	HV1	HV2	RA1	RA2
기존해석모델 [°C]	75.5	83.4	57.4	71.8	57.9	53.2	29.2	24.1
결합해석모델 [°C]	92	101.4	68.5	86.9	70.4	66	39.3	28
측정값 [°C]	87.7	-	64.2	78.9	63.5	61	40.9	25.7

3. 결 론

본 논문에서는 전력용 변압기의 온도 상승 예측의 정확도를 향상시키기 위해 CFD를 이용한 열유동 해석을 수행하였다. 해석모델의 온도상승을 예측하기 위해 온도상승의 원인이 되는 권선과 철심의 전력손실을 계산하였다. 권선의 전력손실은 온도에 따른 변화를 고려하기 위해 전자계-열계 결합해석기법을 이용하였고, 철심의 전력손실을 계산하기 위해 Bertotti 모델을 이용하였다. 계산된 전력손실을 열계해석의 소스원으로 적용하여 열유동해석을 수행하였으며, 온도상승 예측의 타당성을 검증하기 위해 온도상승 시험에 의해 얻어진 측정값과 비교하였다. 그 결과 저압권선에서 약 6.7[%], 고압권선에서 약 8.7[%], 방열판에서 약 6.1[%]의 평균오차가 발생하였다. 본 논문에서 전력용 변압기의 온도상승을 예측하기 위해 사용된 CFD를 초고압 전력용 변압기 설계에 적용할 수 있을 것을 기대한다.

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP) (No. 2009H100100164)과 한국전기연구원(KERI)의 지원을 받아 기본연구사업으로 수행한 결과입니다.

[참 고 문 헌]

- [1] Zhanq Tao, Cai Jin-ding, "Study on Life Prediction Method of Oil Immersed Power Transformer", Electric Insulation and Dielectric Phenomena, Oct. 2008, pp. 486-489.
- [2] J. H. Harlow, "Electric Power Transformer Engineering", CRC Press, 2007.
- [3] H-M Ahn, Y-H Oh, S-C Hahn, "Experimental Verification of Temperature Rise Prediction for Power Transformer by Coupled Electromagnetic-Thermal-Fluid Analysis", INTERMAG, Apr. 2011.
- [4] 노오연, "점성유동이론", 박영사, 2007.