유입변압기의 고효율화를 위한 열적특성 평가기술

오연호〈한국전기연구원 전력기기연구센터 선임연구원〉

1 서 론

변압기는 크게 전류가 흐르는 도체와 절연지, 그리고 철심과 각종 지지물로 구성되어 있다. 변압기 운전 시 도체에는 전류가 흐르게 되고 주울열(Joule heating)과 와전류손(Eddy current loss)에 의한 열이 발생하게 된다. 이 때 발생된 열은 권선부위와 절연물의 온도를 높이게 되며, 온도가 높아질수록 절연물의 열화는 가속화되어 변압기의 수명은 짧아지게 된다. 일반적으로 변압기의 수명은 내부의 전반적인 열적 특성보다는 특정 부위의 온도 값에 의해 결정되며[1], 특히 최고점의 온도(hot spot temperature) 값이 허용치 이상으로 상승할 경우 절연내력의 저하로 인해 변압기의 수명은 급격히 감소한다[2].

최근의 전력용 변압기는 고효율 및 소형화의 추세에 따라 크기와 무게가 감소하고 있지만, 이로 인해 권선의 단위 체적당 열발생률은 증가하고 있어, 냉각설계 및 온도특성 파악에 있어서 보다 세밀하고 정밀한 정보를 요구하고 있다.

변압기의 열적특성을 파악하기 위한 방법으로는 크게 대수적인 수식을 이용하는 방법과 수치해석적인 방법이 있다. 전자의 방법은 다양한 피시품의 온도상승 시험을 통해 입력전류 대비 온도상승 계산식을 만들어서 변압기의 열적특성을 평가하는 방법이다. 이 기법은 간략하고 빠르게 열적특성을 평가할 수 있다는 장점을 갖고 있으므로 대부분의 제작업체에서 많이 사용하여 왔다[3]. 그러나 신제품 설계 시 유연성이 떨어지는 단점이 있으며 특정 부분의 온도, 특히 변압기의 수명에 큰 영향을 미치는 최고점의 부위와 온도를 계산하는 것이 거의 불가능하다는 단점이 있다.

수치해석을 통한 방법은 컴퓨터를 이용하여 변압기의 상세한 부위 혹은 전체 영역을 계산하는 방법으로서 세밀한 온도분포를 파악할 수 있으며, 제품 개발에 유연성을 제공하는 등의 장점이 있으나 많은 시간과 인력의 투자를 요구하는 단점도 존재한다. 하지만 최근 하드웨어와 수치해석 기법의 폭발적인 성장과 발전으로 말미암아 복잡하고 대규모적인 분야의 해석이 가능하게 되었다. 또한 지속적으로 개발되어 온 사용자 중심의 상용 유체해석 프로그램은 수치해석에 투자해야 하는 인력 및 시간 손실을 최대한 줄여준다. 그러므로 최근의 친환경 절연물인 식물유의 적용과 소형화 및 경량화에 따른 제품 크기 감소 등의 신기술 신제품 개발에는 필연적으로 수치해석을 통한 열적특성 평가를 수행해야 한다.

본 연구에서는 상용 유체해석 프로그램을 이용하여 1MVA 유입식 변압기의 열적특성을 평가하였으며, 시험결과와의 확인을 통해 신뢰성을 검증하였다.

2. 피시품 변압기

변압기의 온도상승 해석기법 검증을 위한 피시품 모델의 사양을 표 1에 나타내었다. 그림 1에는 피시품 변압기의 권선 형상을 나타내었다.

표 1. 피시품 모델의 주요 사양

정격용량(KVA)		1000
상수/정격주파수(Hz)		1/60
정격 전압	고압권선(kV)	6.6
	저압권선(kV)	0.69
측정 저항	고압권선	0.139Ω
	저압권선	1.359mΩ
절연유		KSC 2301 1종 4호
냉각방식		자연대류 냉각방식

변압기의 온도상승 시험은 단락법으로서 철손을 보완하기 위해 정격전류의 11%의 전류를 더 입력한다. 그림 2는 온도상승 시험 현장을 나타내고 있다. 최고 온도상승값은 88.5℃로서 저압권선 상부에서 발생하였다.

3. 변압기의 온도상승 해석기법

3.1 해석모델

그림 3에서 해석모델의 구조가 좌우로 대칭(symmetry)임을 알 수 있으며, 내부 냉각매질의 순환경로도 대칭으로 발생된다고 판단하여 실제 형상의 1/4만 취하여 온도특성을 계산하였다. 이러한 계산

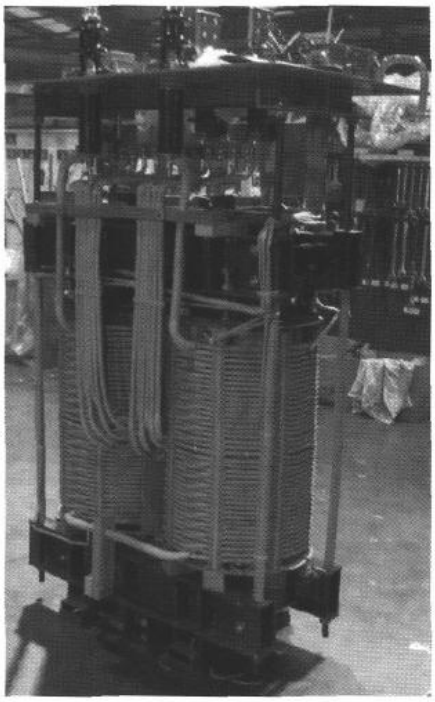

그림 1. 피시품 변압기의 권선 형상

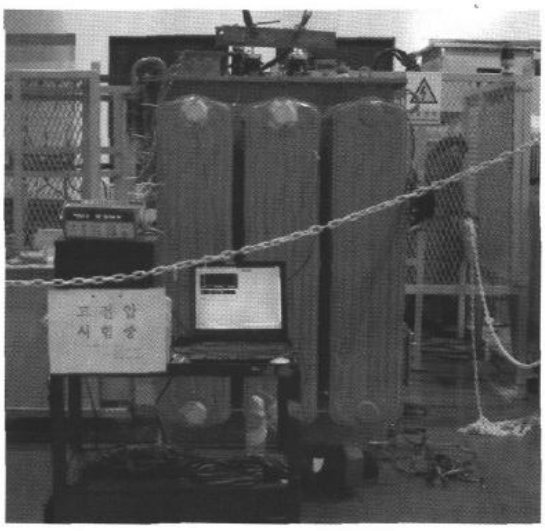

그림 2. 온도상승 시험

모델을 취함으로서 요소(mesh)수를 줄이고 계산 시간을 절약할 수 있다. 그림 4는 생성된 요소를 나타내고 있으며, 요소의 개수는 약 26만개이다.

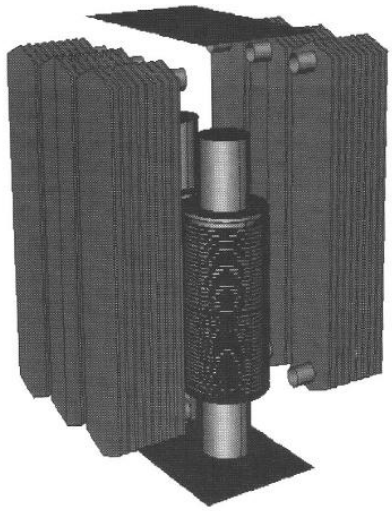

그림 3. 1MVA 변압기의 형상

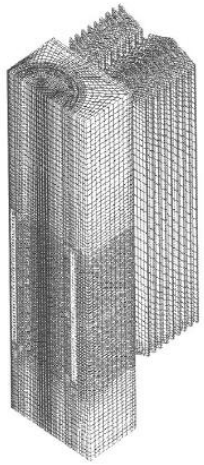

그림 4. 생성된 계산격자 (1/4모델)

3.2 지배방정식 및 경계조건

변압기 내부의 열전달 특성을 지배하는 보존방정식(질량, 운동량, 에너지)들은 다음과 같다.

질량 보존방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i) = 0 \qquad (1)$$

운동량 보존방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - (\rho - \rho_{ref})\, g_i \qquad (2)$$

에너지 보존방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i}(k\frac{\partial T}{\partial x_i}) + \frac{\partial p}{\partial t} + u_i\frac{\partial p}{\partial x_i} + \tau_{ij}\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \qquad (3)$$

여기서

$$\tau_{ij} = [(u_l + u_t)(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})] - \frac{2}{3}(u_l + u_t)\frac{\partial u_l}{\partial x_l}$$

x_{ij}: 데카르트좌표계($i, j = 1,2,3$),

ρ : 밀도,

u_{ij}: x_{ij} 방향의 절대 유속성분,

T : 온도,

h: 엔탈피,

p : 정체압력,

g_l: 중력가속도,

μ_l: 층류점성계수,

μ_t: 등방성난류점성계수

변압기내에서 대류하는 냉각매질의 난류(turbulence)를 고려하기 위하여 본 연구에서는 $k-\epsilon$ 난류모델을 이용하였다.

피시품 변압기의 구성요소로서는 절연유로 사용되는 광유(mineral oil), 철심의 재료인 규소강판(Silicone-Iron), 절연재료인 노멕스(Nomex), 그리고 도체인 구리 등이다. 표 2는 각 구성요소의 물성치를 나타내고 있다.

저압 및 고압 권선에는 표 3과 같은 열원을 입력하였다. 각 권선 및 철심의 열원은 다음과 같이 계산하였다. 먼저 정격전류의 11%를 더한 고압권선의 전류는 172.22A, 권선의 부피는 0.01957m^3, 저항은 0.139Ω이다. 따라서 고압권선의 손실은 주울열 법

칙에 의해

$$I^2R = 4{,}122.7\,W \tag{4}$$

이며, 단위체적당 손실W/m^{3}은 다음과 같다.

$$\frac{4{,}122.7\ W}{0.01957\ m^3} = 210{,}661\ W/m^3 \tag{5}$$

저압권선의 전류는 1,647.33A, 권선의 부피는 0.015157m^3, 저항은 0.001359Ω이다. 따라서 저압권선의 단위체적당 손실은 위의 계산방법에 의해 243,313W/m^{3}이다.

온도변화에 따른 저항의 변화율을 고려하기 위하여 다음과 같은 수식을 고려하여 적용하였다. 이 경우 온도변화에 따라 각 권선의 열원이 달라지게 된다.

$$R = R_0 + R_0 \times 0.004(T-273) \tag{6}$$

여기서 R_0는 기준 온도에서의 저항값이며, 온도 T의 단위는 절대온도 K이다.

표 2. 각 구성요소의 물성치

항목	Mineral Oil	Core	Nomex	Copper
밀도 (kg/m^3)	880	7650	720	8,978
비열(Cp) (J/kg-k)	1,800	452	913	381
열전도도 (W/m-k)	0.13	21.5	0.24	387.6
점도 (kg/m-s)	0.009	-	-	-

표 3. 각 권선의 열원

구 분	열원 W/m^3
고압 권선	210,661
저압 권선	243,313

변압기 내부에서 발생한 열량은 대기와 접해 있는 본체 및 방열핀을 통하여 외부 대기로 방출된다. 그러므로 본체 내부의 권선부와 절연유, 방열핀, 그리고 외부의 공기장을 동시에 해석하는 것이 바람직하다. 그러나 계산에 필요한 요소수가 증가하고, 계산 시간 및 수렴성에 큰 영향을 미치므로 본 해석에서는 외부의 공기장을 제외하여 계산하였다. 또한 피시품 변압기가 실내에 설치되어 있으므로, 태양열에 의한 복사열의 효과는 무시하였다.

외부의 공기장을 제외하고 본체만을 해석할 경우 두 매체가 접해있는 부분에서의 적절한 경계조건이 필요하다. 본 해석에서는 방열핀과 본체에 대류 열전달 계수(Heat Transfer Coefficient)를 이용하여 경계조건을 설정하였다. 대류 열전달 계수 h는 자연대류에서 수직평판에 대한 실험식 (7)과 (8)을 이용하여 구할 수 있다.

$$h = \frac{Nu_m k}{L} \tag{7}$$

$$Nu_m = 0.68 + \frac{0.67 Ra_L^{1/4}}{[1+(0.492/\mathrm{Pr})^{9/16}]^{4/9}} \tag{8}$$

$$\text{for } 10^{-1} < Ra_L < 10^9$$

여기서

Nu_m : Nusselt number,

Pr : Prandtl number,

L : 방열핀의 길이,

Ra : Rayleigh number,

k : thermal conductivity at atmospheric

식 (7)과 (8)을 이용하여 계산한 방열핀에 대한 대류 열전달 계수는 5.0W/m^2·℃이다.

변압기의 바닥은 단열조건을 취하였으며, 외부의 대기 온도는 22.5℃로 설정하였다. 복사열전달

모델로는 비교적 계산량이 적으면서도 정확한 Roseland 모델을 이용하였다.

4. 시험결과의 비교 및 검토

그림 5는 해석결과로서 방열핀의 온도를 나타내며, 그림 6은 권선의 온도분포를 나타낸다. 각 그림에서 괄호 내의 값은 시험값을 나타낸다. 해석결과 최고온도(Hottest spot)은 저압권 상부에서 106℃로서 주위 온도를 제외할 경우 96.5℃의 온도상승을 나타낸다. 시험결과는 88.5℃로서 약 92%의 정확도를 나타낸다. 권선 하부의 경우 해석결과는 92.2℃, 시험결과는 79℃로서 약 86%의 정확도를 나타낸다. 권선 하부에서의 오차가 큰 이유는 외부 대기를 포함한 해석이 되지 않고 변압기 외함과 방열핀 표면에 대류열전달 계수를 일률적으로 설정하였기 때문인 것으로 판단된다. 또한 복사 열전달 해석기법을 좀 더 정확한 모델로 설정할 경우 오차가 줄어들 것으로 판단되지만 계산량이 많아지는 단점이 있다.

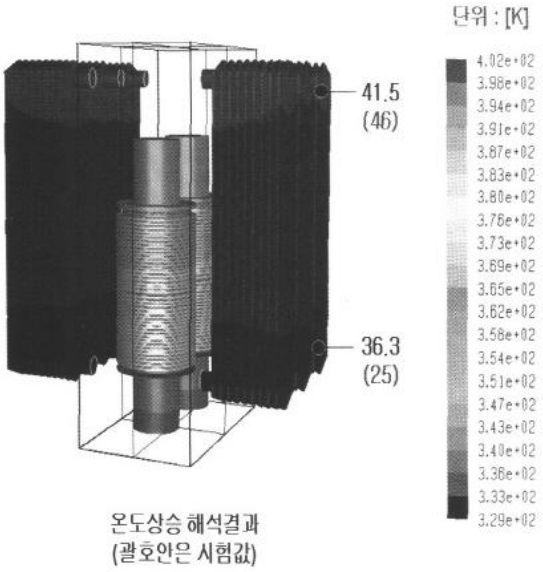

그림 5. 방열핀 온도분포

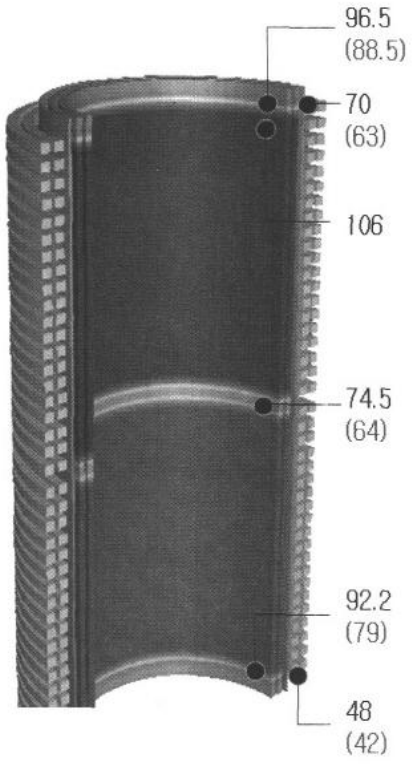

그림 6. 권선의 온도분포

5. 결 론

본 연구에서는 상용 유체해석 프로그램을 이용한 변압기의 열적특성 평가기법을 소개하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 변압기의 권선 및 철심 등의 내부구조물과 탱크 및 방열핀을 3차원으로 모델링하여 열전달 해석을 수행하였으며, 변압기의 열적특성을 평가할 수 있는 해석기법을 확립하였다.
2) 온도상승 시험결과와 비교한 결과 86%~92%의 정확도를 나타내었다. 오차의 원인으로는 경계조건 설정 시 대류열전달 계수 산정, 와전류 손실 미포함에 따른 것으로 판단된다.

현재 손실 계산을 위한 전자장 해석과 열전달 해석

을 결합하여 좀 더 정확한 열적특성을 평가하기 위한 기술개발이 진행 중에 있다. 본 연구결과를 이용하여 변압기의 온도특성을 사전에 파악함으로서 시험 및 제작 비용을 줄이는 것은 물론, 설계변수 개선에 따른 변압기의 냉각효과 증대에도 크게 기여할 것으로 판단한다.

참고문헌

[1] A.White, M.R.Daniels, "Thermal Assessment of Transformers", Cigre 1990 session, pp. 12-105, 1990. 9.
[2] W.Lampe, Pettersson, "Hot-Spot Measurements in Power Transformers", Cigre 1984 session, pp. 12-02, 1984. 8.
[3] K.Karsai D et al., Large Power Transformers, Oxford N.Y., pp. 351-359, 1987.
[4] 仲神 芳武 외 2인, "ガス變壓器冷却への 流れ解析技術の 適用", 富士時報, Vol.69, pp. 481-485, 1996. 9.
[5] M. Necati Ozisik, Heat Transfer, McGraw-Hill, Inc., pp. 422-436, 1985.
[6] J.N. Reddy, D.K. Gartling, The Finite Element Method in Heat Transfer and Fluid Dynamics, CRC Press, pp. 188-202, 1994.

◇ 저 자 소 개 ◇

오연호(吳年浩)
1969년 8월 25일생. 1998년 동아대학교 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전기연구원 HVDC연구본부 전력기기연구센터 선임연구원.
Tel : (055)280-1566
E-mail : dkhong@keri.re.kr