

변압기 3차원 온도분포 해석

송기동, 이우영, 오연호\*, 김세창\*  
한국전기연구소, 현대중공업(주) 변압기 설계부\*

3 - Dimensional Analysis of Temperature Distribution in Transformer

K.D.Song, W.Y.Lee, Y.H.Oh, S.C.Kim\*  
KERI, HHICO\*

**Abstract** - An analysis of temperature distribution in transformer is necessary for cooling design. But, it is very difficult to make that analysis because of the complicated structure of transformer. Particularly, if it is asymmetry, 3 dimensional analysis is required.

This paper presents the 3-dimensional analysis technique of temperature distribution in transformer using a commercial CFD program FLUENT and the applied results in a simple model.

1. 서 론

운전중인 변압기에서는 권선저항과 자속에 의해 권선 및 철심 부위에서 필연적으로 열이 발생하게 된다. 이러한 열은 냉각매질의 냉각성능을 저하시키고 절연물의 열화를 가져와 변압기의 성능저하 및 수명을 단축시키게 된다. 그러므로, 변압기 제작시 허용된 온도를 넘지 않도록 설계하는 것이 중요하며, 보다 효과적인 냉각을 위한 설계변수의 검증은 필수적이라 할 수 있다.

현재 제작사에서는 변압기의 냉각설계시 실험과 경험에 의한 간단한 수식을 통하여 설계변수를 검증하고 있다. 하지만 이 경우, 정확한 온도상승치를 계산하기 힘들며, 특정부위의 온도분포 파악이 힘들다는 단점이 있다. 또한, 경량화 및 소형화의 추세에 따른 새로운 냉각방식 및 냉각매질에 대한 검증이 매우 어렵고 유연하게 대처하기가 힘들다.

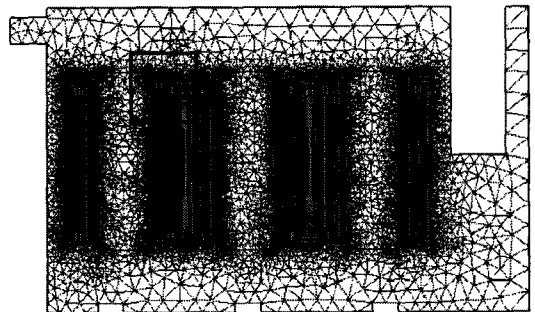
따라서, 이러한 단점을 극복하기 위해 컴퓨터를 이용한 수치해석 기법을 개발·적용하고자 하는 시도가 이루어져 왔다. 하지만 냉각오일, 절연지, 도체, 스페이서 등으로 구성되어 있는 변압기의 구조가 매우 복잡하여 수치해석을 위한 계산격자의 형성이 매우 어려울 뿐만 아니라, 계산의 수렴성 및 신뢰성을 향상시키기가 용이하지 않다. 그러므로 권선 및 스페이서 등을 단순화하여 축대칭 또는 2차원 해석을 하고 있는 실정이다. 최근에는 보다 빨라진 컴퓨터와 해석기법의 발달로 인해 2차원 해석을 할 경우, 어느 정도 근사하게 모델링할 수 있는 수준에 도달하였다[1]. 그러나, 대부분의 경우, 변압기의 구조가 비대칭이므로, 2차원 해석을 할 경우 정성적인 추이는 가능하나 정량적으로는 오차를 포함할 수밖에 없다. 그러므로 3차원 해석을 통해 2차원에서는 모델링할 수 없었던 변압기 내부의 비대칭적인 구조를 정확히 모델링하여 보다 정확한 해석결과를 확보할 필요가 있다.

본 논문에서는 상용 CFD 프로그램인 FLUENT를 이용하여, 변압기의 온도상승을 3차원으로 해석하였으며, 냉각매질의 종류와 냉각매질의 유입속도에 따른 온도변화를 검토하였다.

2. 본 론

2.1 해석기법의 개발

변압기를 2차원 축대칭, 또는 단순히 2차원으로 해석할 경우 권선을 제외한 내부 형상을 실제 치수와 거의 동일하게 모델링하여 해석할 수 있다. 그림 1은 3상 변압기의 2차원 해석시 생성된 계산격자를 나타내고 있다.



사각형안을 확대한 그림

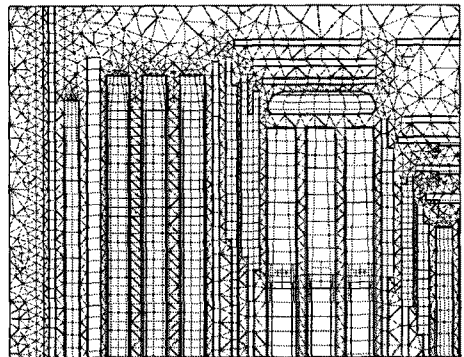


그림 1. 해석모델의 2차원 계산 격자

그러나 대부분의 변압기에서 냉각매질의 출입 부분이 비대칭인 경우가 대부분이며, 그 구조 및 위치에 따라 냉각효율의 차이가 크다. 또한 3상 변압기의 경우, 비대칭적인 요소로 말미암아 2차원 해석으로는 충분하지 않다. 따라서, 3차원 해석을 통한 정량적인 분석이 필요하다.

최근, 컴퓨터의 하드웨어 및 수치해석 기법의 눈부신 발전으로, 그동안 시스템의 성능과 시간상의 제약으로 인해 수행할 수 없었던 3차원 해석이 가능하게 되었다. 본 연구에서는, 실제 변압기를 단순화시킨 모델을 이용하여 3차원 해석기법을 개발하였으며, 그림 2에 해석 모델 변압기의 형상을 나타내었다. 냉각방식은 강제송풍 방식이며, 대칭성을 고려하여 1/2만 해석하였다.

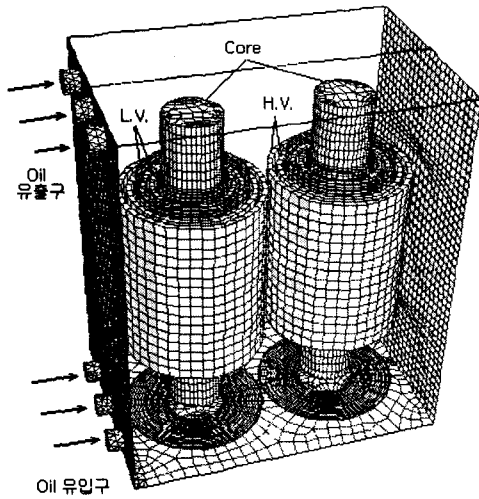


그림 2. 모델 변압기의 형상

3차원 해석기법을 개발하는데 있어서 가장 어려운 점은 권선 및 권선 사이의 덕트를 계산결과에 큰 영향을 주지 않는 범위내에서 적절히 단순화하는 것이었다.

특히, 도체를 감싸고 있는 절연지를 세밀히 모델링할 경우, 계산격자 수는 2배 이상 증가하게 되고, 계산시간 및 수렴성에 큰 영향을 미치게 된다. 이 경우, 박막 (Thin-Wall) 처리 기법을 이용하여 격자수를 줄일 수 있다. 즉, 권선의 모델링시에는, 절연지의 계산격자를 생성하지 않고 박막으로 처리한다. 대신 계산시에, 절연지의 두께와 물성치를 박막에 입력하므로써, 절연지의 열전달 효과를 고려하게 된다. 그리고, 권선 및 스페이서는 육면체 격자(Hexahedral Mesh)를 사용하고, 그 외의 부분은 사면체 격자(Tetrahedral Mesh)를 사용하는 복합 격자(Hybrid Mesh) 생성 방법을 이용하여 격자수를 최대한 줄였다. 또한, 해석결과에 영향을 미치지 않는 범위내에서 철심을 간략화하였으며, 생성된 전체 격자수는 약 82,000개 정도이다.

## 2.2 경계조건 및 초기조건

변압기의 주요 구성 요소로서는 광유, 실리콘유, R-temp유와 같은 냉각매질과, 철심의 재료인 규소강판 (silicone-Iron), 절연재료인 아라미드지(Aramid Paper: Nomex Paper), 도체재료인 구리(Copper) 등이다. 여기서, 온도분포 해석에 필요한 물성치는 대부분 구할 수 있으나, 철심의 재료로 사용되는 규소강판의 비열값이 현재로서는 정확하게 알려져 있지 않기 때문에 철심의 주성분인 철의 비열값을 이용하였다.

각각의 권선층과 철심에서 발생하는 열량(Heat Source)을 표 1과 같이 표시하였다.

표 1. 각 층의 열발생량

구 분	Heat Source [ $W/m^3$ ]
L.V. winding	2.4e5
H.V. winding	2.0e5
Core	1.5e4

각 재료의 물성치를 해당 영역에 부여하고, 권선 및 철심에는 표 1의 열량을 열원(Heat Source)으로 입력하였다. 또한 주위온도를  $40^{\circ}C$ 로 가정하였으며, 변압기 내부로 유입되는 냉각유의 유입속도를 1.0, 2.0, 3.0[m/s]로 변화시키면서 변압기 내부의 온도상승을 해석하였다.

## 2.3 해석 결과

그림 3은 냉각매질이 광유인 경우, 유입속도 1.0[m/s]에서 온도 분포 해석을 수행한 결과를 나타내고 있다. 최고 온도값(Hottest spot temperature)은  $400[K]$ 이며, 이는 주위온도가  $313[K]$ 임을 감안하면,  $87[K]$ 의 온도상승을 나타낸다.

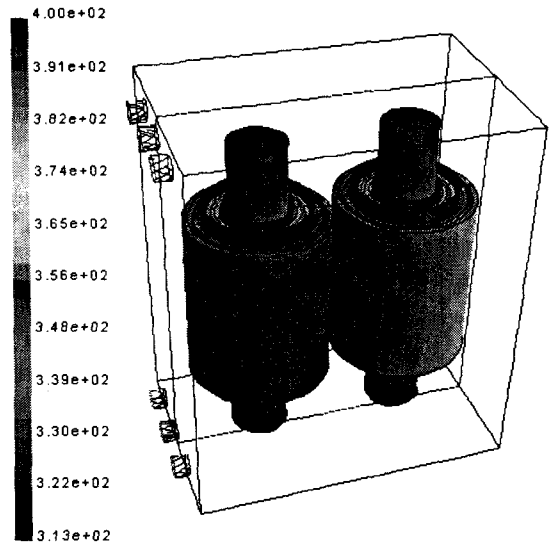


그림 3. 모델 변압기 내부의 온도분포 (냉각매질 = 광유, 유입속도 = 1.0[m/s])

그림 4는 냉각매질이 광유인 경우, 변압기 내부 유동 형태를 실선으로 보여주고 있으며, 유입속도 증가에 따른 최고온도 위치 변화를 나타내었다. 전체적인 유동의 흐름은 유입구를 통해 변압기 내부로 들어와 탱크 벽면을 따라 진행하는 형태이다. 그러나 오른쪽 벽면에 부딪치면서 속도가 떨어지게 되고, 일부는 유출구에 도달하기 전에 왼쪽 권선의 상부에서 다시 하부로 진행하는 유형을 보이고 있다.

유입속도 증가에 따른 최고온도의 위치는 해석결과, 왼쪽에서 오른쪽으로 이동하였으며, 이는 왼쪽 벽면의 덕트 내 유속증가에 따른 것으로 생각된다.

그림 5는 변압기 내부의 유속분포를 나타내고 있으며, 중앙 하부의 경우, 덕트에 대해 수직방향으로 빠르게 진행되는 냉각매질로 인해 하부로부터 덕트로 유입되는 냉각매질의 유속이 작은 것을 볼 수 있다. 따라서, 이 부분의 온도값이 높다는 것을 예측할 수 있으며, 그림 3에서 이 사실을 확인할 수 있다. 이러한 현상을 제거하기 위해서는, 냉각매질이 덕트의 하부로부터 덕트 방향과 수평으로 유입되도록 하여, 유동의 흐름이 원활하게 되도록 해야 할 것이다.

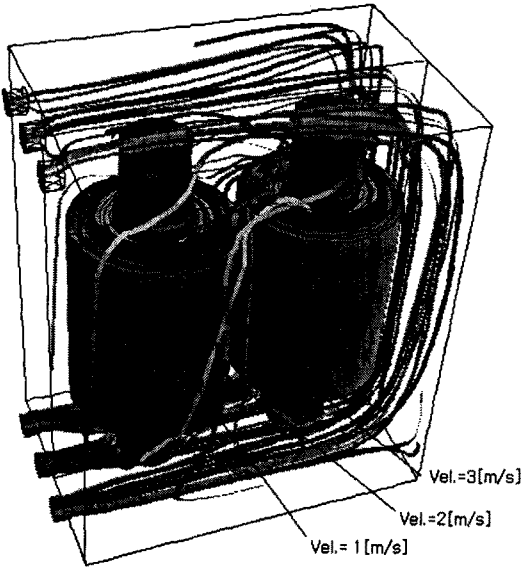


그림 4. 모델 변압기 내부의 유동 형태

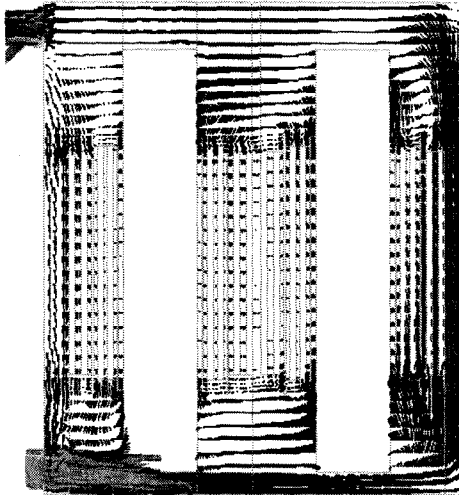


그림 5. 모델 변압기 내부의 유속분포 (냉각매질 = 광유, 유입속도 = 1.0[m/s])

그림 6에는 냉각매질 및 유입속도에 따른 최고온도값의 변화를 나타내었다. R-temp유인 경우에 최고 온도값이 가장 크게 나타났으며, 실리콘유, 광유의 순이었다. 각 냉각매질의 물성치를 살펴보면, 열전도도, 밀도, 비열 등에 있어서 큰 차이는 없으나, 점도값은 큰 차이를 보이고 있다. 점도가 큰 경우, 변압기 내부에서 순환하는 냉각매질의 유속이 느려지고 대류에 의한 냉각효과가 떨어진다. 따라서, 그림 6의 해석결과는 이러한 사실과 잘 설명해 주고 있다.

그림 6에서, 곡선의 기울기가 완만해지기 시작하는 지점의 유입속도는 R-temp유는 약 2.0[m/s], 실리콘유는 약 2.5[m/s], 광유는 약 3.0[m/s] 정도였다. 이것은 이 값보다 유입속도를 증가시키더라도, 냉각효과는 큰 차이가 없다는 것을 의미한다. 이를 토대로 각 냉각

매질에 따른 최적의 유입속도를 구하는데 본 자료가 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

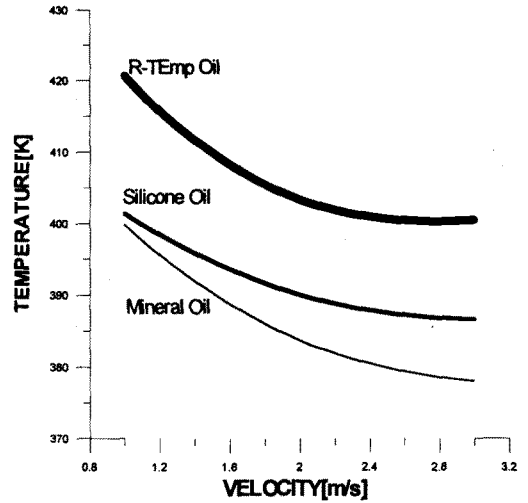


그림 6. 냉각매질 및 유입속도에 따른 최고온도 변화

### 3. 결 론

본 연구에서는 간단한 모델 변압기를 선정하여 3차원 온도 분포 해석기법을 개발하고, 냉각매질 및 유입속도에 따른 냉각효율을 비교·검토하였다. 계산 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 모델링시 권선 절연지를 박막 처리하고, 복합 격자 생성방법을 이용, 결과값에 큰 영향을 미치지 않는 범위 내에서 격자수를 최대한 줄여, 계산시간 및 수렴성을 향상시켰다.
- 2) 변압기 내부의 온도분포 특성을 유속분포 및 유동 형태와 연계하여 입체적으로 파악할 수 있었다.
- 3) 냉각매질에 따른 온도분포 해석결과, 최고온도의 크기는 R-temp유, 실리콘유, 광유의 순이었다. 또한 유입속도에 따른 냉각효과는 각 냉각매질마다 비선형적으로 증가하였으며, 일정속도를 넘어선 경우 유입속도 증가에 따른 냉각효과는 큰 차이가 없었다.

본 연구는 3차원 해석을 통한 변압기 온도분포의 정량적인 분석에 그 목적이 있으며, 이를 위해서는 시험결과와의 비교분석이 필수적이다. 조만간 온도상승시험이 예정중에 있으며, 시험결과와의 예측 및 비교분석시, 본 연구의 해석기법이 유용하게 이용되리라 판단된다.

본 연구는 산업자원부지원 중기거점 기술개발과제인 "경량화 변압기 개발"로 수행한 연구결과임.

### [참 고 문 헌]

- [1] 송기동, 박경엽, 오연호, 김세창, "초고압 변압기내 온도분포 해석", 전기기기연구회 추계학술대회, 제39회, p87-89, 1998
- [2] K.Karsai D et al., "Large Power Transformers", Oxford N.Y., 1987
- [3] 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, p481-485, 1996