

## 400KVA급 배전 변압기 열 유동해석

양시원\* · 김원석 · 권기영 · 이승구

### Numerical analysis for the distribution transformer design

S. W. Yang\*, W. S. Kim\*, K. Y. Kweon\* and S. K. Lee\*\*

**Keywords:** Distribution transformer(배전 변압기), Corrugated radiator(주름형 방열기), Heat transfer(열 전달), Optimization(최적화)

#### Abstract

This paper describes the numerical simulations in the cooling of the radiator in a distribution transformer. The aim of this work is the cooling optimization of the transformer by CFD simulations. A clear understanding of the cooling pattern in a radiator which is a main heat remover in the power transformer is essential for optimizing the radiator design increasing the thermal efficiency. In this paper we study the heat transfer and fluid flow in a 3-phase 400kVA transformer. The plate radiators of this transformer become wrinkled (corrugated radiator) and there are filled with transformer oil. The oil is circulated due to the natural convection driven by buoyancy effects through radiators so that the ultimate cooling medium is the surrounding air. In the design of transformers, it is of interest to minimize the cost and size of radiators. The obtained results show the temperature and flow distributions and the possibility to optimize the transformer with 3-dimensional CFD models using FLUENT.

#### 1. 서론

현재 국내 변압기 제작업체에서 판매중인 일반변압기는 대부분 주름형 방열기를 장착한 변압기로 Oil의 순환이 자연대류에 의해서만 이루어지는 특성을 가지고 있다. 이 주름형 방열기는 Oil의 유출입구가 따로 정해져 있지 않아 순환유량 및 속도를 제어/측정할 수 없고, 그에 의한 내부 열 교환 성능 역시 예측하기가 매우 힘들다. Fig.1은 현재 판매중인 일반 변압기 모델 중 400kVA급 22.9kV 모델로 본 연구에서 열 유동 해석을 수행한 모델이다. 실제 변압기 내부의 Oil 순환과 방열기의 열 전달 성능예측을 위해 Full 3D 모델로 작업하여 계산하였고, 내부 온도상승이나 Oil 유동에 영향을 줄 수 있는 가정을 최소로 하여 실제현상에 근접한 수치해석이 되도록 모의하였다. 본 연구를 통해 일반변압기 내부의 Oil 유동 및 온도상승 거동을 확인할 수 있었고, 계산과 실험결과를 비교하여 신뢰성을 검증하였다.

#### 2. 본론

##### 2.1 Grid 작업 및 경계조건 계산

Fig.2는 실제 400kVA의 배전 변압기를 3D 설계프로그램인 Solid-Edge를 이용해 모델링 한 것이고, 변압기 외부의 부싱이나 명패, Rounding, 변압기 밀받침 등 내부 온도상승과 방열기 열 전달 성능에 영향이 없다고 판단되는 부분은 삭제하고 단

순화하여 수치해석을 위해 최적화된 모델이다. 일반적으로 변압기 열 유동 해석모델에 가장 중요한 부분은 내부 권선의 온도상승, Oil의 온도상승 그리고 자연대류에 의한 Oil의 유동이다. 이러한 조건을 만족시키기 위해서는 먼저 최적화 된 Mesh generation 전략이 필요하다. 현재 보유하고 있는 Dell사의 Work-Station은 4개의 CPU와 16G의 메모리를 가지고 있으며, 최대 900만개의 Mesh를 사용한 모델링 계산을 수행할 수 있다. 본 연구에서 수행한 모델의 경우 그 내부 구조물의 복잡성을 고려하여, Full 3D 1/4 symmetric 모델로 Mesh작업을 수행하여도 1000만개 이상이 필요하였다. 따라서 변압기 내부에 Oil의 유동과 열 전달에 영향을 주는 요소를 제외하고 최대한 단순화하여 모델링 및 열 유동해석을 진행하였다.



Fig.1 400kVA 22.9kV Distribution transformer (Hyosung)

\* ㈜효성 중공업연구소, c1@hyosung.com

## 2.2 온도상승 시험 및 손실측정

Fig.3은 실제 변압기의 온도상승 시험을 위해 thermocouple을 장착하고 있는 모습을 나타내고 있다. 그림과 같이 일반적인 변압기 온도상승시험의 경우 thermocouple을 변압기 방열기 외벽 상 하단과 변압기 내부(상부) Oil에 직접 시킨다. 이때 외부 공기온도를 같이 측정하여 변압기 내 외부 온도와의 차이를 가지고 온도 상승치를 구할 수 있다. 하지만 실제 변압기 내부 권선의 온도는 일반적인 변압기 온도상승 시험에서는 구할 수 없으며, 측정된 Oil온도와 권선 저항 값을 실험식을 이용하여 계산하게 된다. 이러한 실험식 예측 값과 실제 측정값과의 차이를 알아보기 위해, 본 시험에서는 기존 시험실 측정값 외에 측정장비를 활용하여 변압기 내부 권선온도를 자체적으로 측정하였다.

일반모델의 시험실 및 자체 측정결과를 이용하여 상용 수치해석 코드의 모델링과 계산 결과의 정확도를 확인함으로써 해석의 신뢰성을 확보하였다.

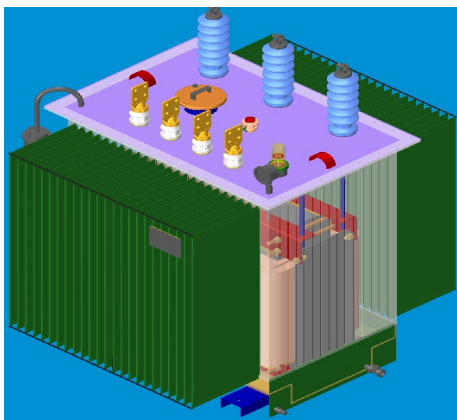


Fig.2 View of full 3D model of the transformer



Fig.3 Experiment of temperature rise of the transformer

시험에 사용된 온도센서는 광섬유를 이용하여 만든 센서로 Optical Fiber 라 하며, 섬유로 만들어졌기 때문에 변압기 절연성능에 영향을 미치지 않고 온도를 측정할 수 있는 장점을 가지고 있다. 하지만 일반적인 thermocouple에 비해 가격이 비싸고 연성이 약해 쉽게 부러질 수 있어 장착 시 유의해야 한다. Fig.4는 Sheet 권선의 전자계해석 결과로 이에 따르면 일반적인 변압기 내부 권선에 가장 많은 전류가 흐르는 부분이 바로 리드선 부분인 것을 알 수 있다. 따라서 변압기 내부의 온도상승 시험 중 최고 권선온도를 측정하기 위해서는 그림과 같은 리드부분에 센서를 삽입하여 온도를 측정해야 한다.

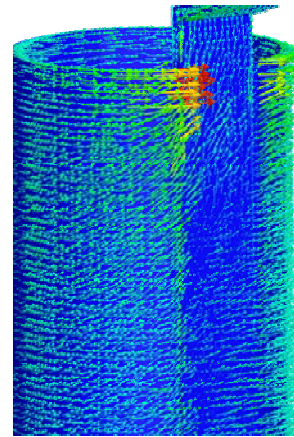


Fig.4 Result of the current density of the sheet winding

## 2.3 모델선정 및 계산결과

Fig.5는 일반변압기 Full 3D 기본모델 해설결과를 보여주고 있고 방열기 측 하단의 온도 분포가 방열기 상단의 그것과 비교하여 낮다는 것을 알 수 있다. 그 이유는 방열기 하단의 평균 순환 속도가 작아 열 전달에 필요한 Oil 유동이 매우 미미하여 발생한 결과임을 알 수 있었다. 따라서 기본 모델의 방열기 끝부분이 실제로 변압기 열 전달에 관여하지 않는 영역이 있음을 확인하였고, 이 결과를 활용하여 방열기 최적 설계를 위한 개선안이 도출되었다.

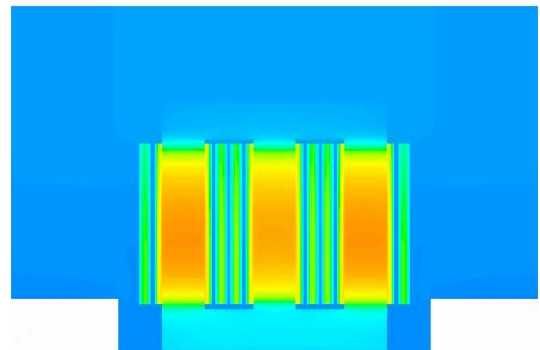


Fig.5 Temperature distribution of the transformer

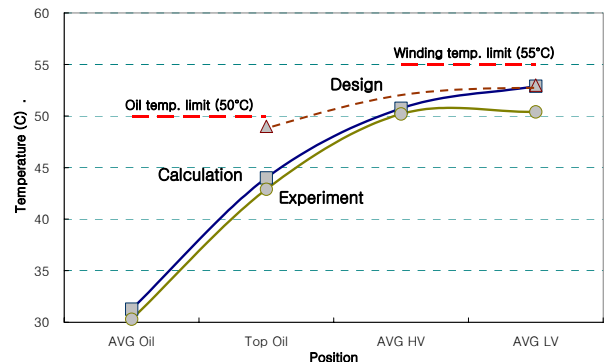


Fig.6 The comparison of the temperature rise

Fig.6은 실제 변압기의 온도상승 시험 측정치와 수치해석 결과를 비교한 그래프이다. X축의 항목은 AVG Oil(Average Oil Temperature rise), TOP Oil(Top Oil Temperature rise), AVG HV(Average HV Winding Temperature rise), AVG LV(Average LV Winding Temperature rise)을 나타내며 여기서 Winding은 변압기 내부에 감겨있는 권선을 말한다. Design은 변압기 설계를 하는



Tools을 바탕으로 한 계산 결과이며, Calculation은 수치해석 결과, Experiment는 시험결과를 말한다. 그림에서 알 수 있듯이 변압기의 전반적인 영역에서 수치해석 결과와 실험결과가 매우 흡사한 결과를 보여준다. 이를 바탕으로 기본모델에 대한 신뢰성을 확인하였으며 해석 기법 및 경계조건의 타당성도 확인할 수 있었다.

Table 1 은 일반변압기 방열면적 절감을 고려한 추가해석 모델을 보여주고 있으며 Case 1 을 기준으로 각각 방열기 측면과 하부의 면적을 25%, 11% 제거한 모델이다. 방열기 면적 제거 외의 다른 조건은 모두 동일하며, Case 3 의 경우 방열기 하부 면적 제거기준은 실제로 방열기 제작 가능한 단위가 최소 100mm 이기 때문에 전체 방열기 길이 900mm 중 100mm 를 제거하여 약 11%의 방열기 면적 제거 모델로 선정하였다.

Table 1 Cases of the reduced heat transfer area of the radiator

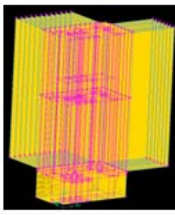
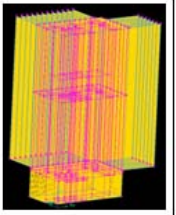
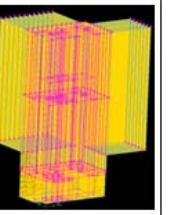
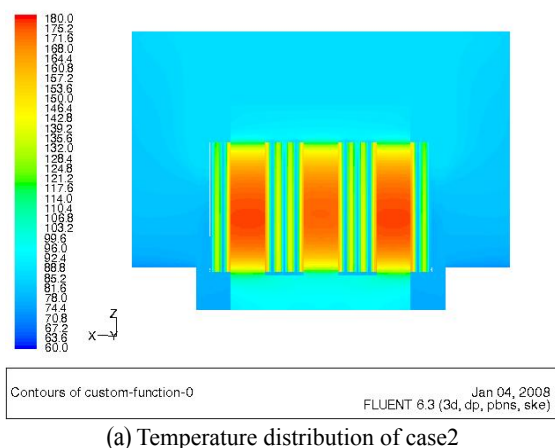
Item	Case 1	Case 2	Case 3
Gambit Model			
Feature	실제 변압기 모델	방열기 측면 25% 감소	방열기 하부 11% 감소

Fig.7, 8 에서 추가 해석모델 Case 2 와 Case 3 의 속도분포를 보면 Case 2 의 방열기 하단 Oil 속도가 현저하게 줄어드는 현상을 볼 수 있다. 이는 기본 모델과 마찬가지로 방열기 하부 측 열 전달 성능이 매우 미미함을 알 수 있다. Case 3 의 방열기 내부 속도분포를 보면 방열기 상단과 하단이 고른 속도분포를 보이며 순환하는 것을 볼 수 있다. 따라서 열 교환이 활발하게 일어나는 방열기 측면 면적을 제거하는 Case 2 보다 방열기 하단의 면적을 제거하는 것이 좀 더 효율적인 개선안이라 판단된다.



Case 1 의 해석 결과를 보면 변압기 상단에서 가열된 Oil 이 방열기로 유입되면서 벽을 따라 열 교환을 한 후 변압기 하부로 유입되는 현상을 볼 수 있다. 이때 방열기 하단부에서 유선이 헝클어지며 분산되는데 이는 실제로 방열기 하단부가 열 전달이 미미하여 전체 변압기의 냉각성능에 큰 영향을 미치지 못하는 원인이 된다. Case 2 는 전반적으로 균일한 Oil

흐름이 나타나지만 방열기 벽면에서 일어나는 주된 흐름은 볼 수 없다.

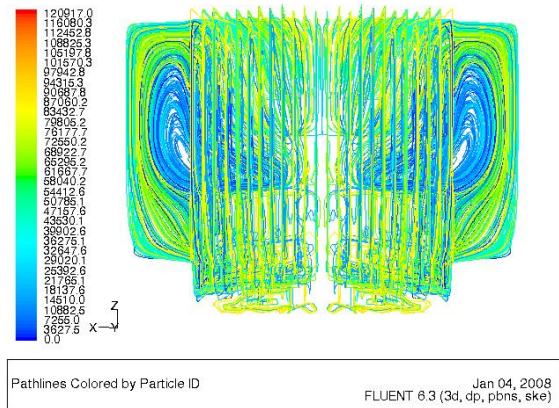


Fig.7 Case 2 Reduced 25% of the side heat transfer area of the radiator

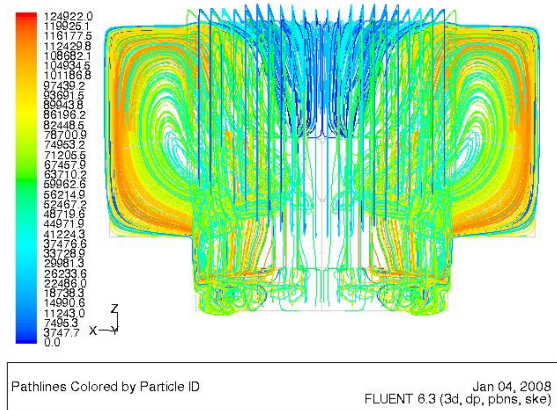
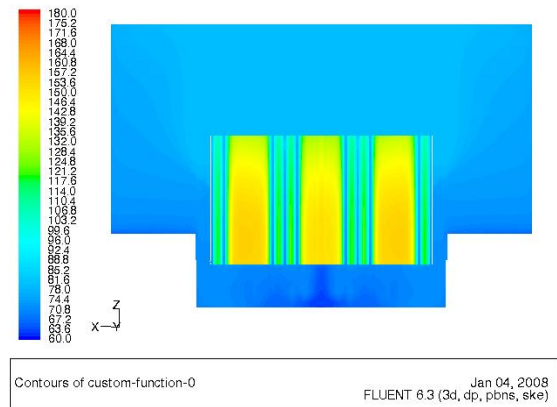


Fig.8 Case 3 Reduced 11% of the bottom heat transfer area of the radiator

그 이유는 방열기 측면의 25%의 면적을 제거하여 실제로 열 전달이 가장 활발히 일어나는 영역이 줄어들었기 때문이다. 방열기 측면 면적을 25% 제거한 결과 변압기 내부의 열 전달량이 감소되어 온도상승 제한치를 넘어가는 현상이 발생되었다. 마지막으로 Case 3 은 Case 2 에 비해 방열기 가장자리로 주된 Oil 의 흐름이 존재함을 알 수 있다. 이는 전체 방열기 면적을 최대한 활용하여 열 전달이 진행되고 있음을 볼 수 있고, 실제로 변압기 내부 온도상승이 방열기

측면제거에 따른 상승치 보다 적어, 방열기 하부면적 제거모델이 좀 더 효율적인 개선모델임을 확인하였다.

Fig.9 는 각 개선모델 별 변압기의 Oil 온도 및 권선부의 온도를 나타내고 있다. 그래프 중 계산 값과 시험 값은 기본모델에 대한 계산 및 온도상승 시험 값을 말하며, 계산 값 1은 Case 2을 계산 값 2는 Case 3의 계산결과를 의미한다. 계산 값 2의 그래프를 보면 AVG Oil, TOP Oil의 온도가 다른 해석결과와 상이한 것을 알 수 있다. 이는 방열기의 하부면적을 줄이면서 중력에 의한 절연유의 순환유량의 증대로 변압기 상하부 온도 차이가 줄어들어 나타나는 현상이라 판단된다. 계산값 1은 Oil 온도 제한치과 권선 온도 제한치를 모두 초과하였으며 설계기준에서 벗어남을 알 수 있다. 무리한 방열면적 절감으로 내부온도상이 초과하였으며 실제 변압기 적용 시 절연과피를 유발할 수 있으므로 주의하여야 한다. 계산값 2는 Oil 온도 제한치는 만족하였으나 권선온도 제한치를 약 1°C 초과하였으며 시험값의 결과 특성 (Curve)과 흡사한 결과는 보인다. 따라서 10%정도 방열기 하부면적 절감 시 권선온도 기준을 만족할 것으로 판단된다.

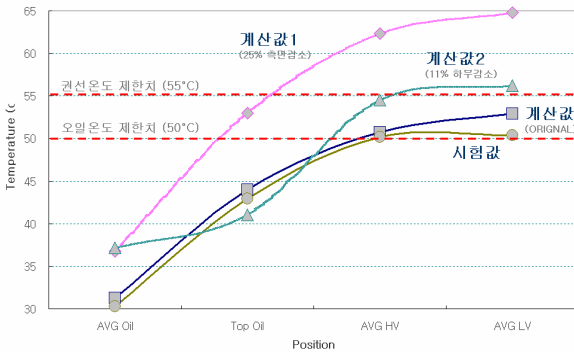


Fig.9 The comparison of the calculation result of all cases

### 3. 결론

당사에서 제작중인 주름형 방열기 타입의 일반변압기는 300kVA에서 1100kVA까지 시리즈화 되어있고, 이러한 변압기는 대부분 용량에 비례하여 방열기의 면적이 설계된다. 하지만 변압기 내부의 Oil 유동 특성이나 열 교환 성능에 의한 설계보다는, 보다 쉬운 방법인 방열기 높이는 유지하고 폭(길이)와 fin 수를 조절하여 설계하고 있으나, 본 연구를 통해 방열기 면적 저감 시 측면보다 하부의 면적을 제거하는 것이 변압기 전체 순환유량 증대 및 원가절감의 효과가 크다는 것을 확인할 수 있었다.

또한 전류의 밀도에 따른 손실 값을 권선의 손실로 입력하여 계산을 수행해야 하나 해석장비 (컴퓨터용량)의 한계로 권선의 내부를 실제와 같은 형상으로 모델링 하지 못하여 권선의 부분별 손실 입력이 불가능 하였다. 차후 권선의 상세 온도분포를 계산 할 경우 상기와 같은 부분별 전류밀도를 기준으로 한 손실 값을 바탕으로 입력 값을 적용하여 해석을 수행할 예정이다.

### 참고문헌

[1] Rajendra Ahuja, Robert M. Del Vecchio, Comparison of the Thermal Performance of FR3, a Natural Based Coolant with Transformer Oil, BRUGGE 2007, CIGRE-7

[2] F. Bachinger, P. Hamberger, Stead state and Transient Thermal Behavior of Transformers Filled with Various Insulating Liquids, BRUGGE 2007, CIGRE-12  
 [3] Patrick H. Oosthuizen and David Naylor, Third Edition, "An Introduction to Convective Heat Transfer Analysis", McGraw-Hill