

### 변압기 외함 자계손실/온도상승 계산 및 실증시험

김동현\*, 김창욱\*, 박성원\*, 최명준\*, 서흥석\*, 박상봉\*  
\* : 현대중공업

### Calculation of Loss/Temperature rise for Tank-wall of Transformer and Field-test

Kim Dong-Hyun\*, Kim Chang-Wook\*, Park Sung-Won\*, Choi Myung-Jun\*, Seo Heung-Seog\*, Park Sang-Bong\*  
\* : Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.

**Abstract** - 전자기 및 열/유동 해석 프로그램을 활용한 수치해석적 방법으로 변압기 외함의 자계손실과 온도상승을 계산하는 경우, 많은 시간이 소요되기 때문에, 설계 또는 고객 요구시 신속한 대응이 어렵다. 따라서 3차원 간이 계산법을 정립하여 신속 정확한 해석적 방법으로 접근할 필요가 있었다. 본 연구에서는 권선의 누설자속에 의해 발생하는 변압기 외함의 자계손실을 계산하고 이에 따른 온도상승을 추정하고자 하였다. 또한, 실제 변압기의 온도상승 시험을 통해 온도상승 계산 결과의 정확성을 검증하고자 하였다.

#### 1. 서 론

지속적으로 증가추세에 있는 전력부하로 인해, 전력계통이 초고압 또는 대용량 기기들을 필요로 하고 있으며, 전력용 변압기의 경우, 대용량 변압기의 수요가 증가하고 있는 실정이다. 일반적으로, 변압기의 용량이 커짐에 따라 권선에 의해 발생하는 누설자속이 증가하는 경향이 있으며, 이로 인해 발생하는 변압기 구조물의 stray loss는 국부과열의 우려를 증가시킨다. 결국, 이러한 국부과열 현상은 변압기 절연유의 열화를 일으키기 때문에, 변압기 운전에 부정적인 요인으로 잘 알려져 있다. 변압기 설계자들은 변압기의 권선, 구조물 등과 같이 각 부분별 온도상승 제한치를 넘지 않도록 설계업무를 수행하고 있으며, 또한 설계안이 얼마만큼의 여유를 확보하고 있는가에 대한 문제도 주요한 관심의 대상이다. 본 연구에서는 외함에서 발생하는 자계손실을 계산하고, 이를 토대로 외함의 국부과열 온도를 추정할 수 있도록 수치적 방법으로 계산식을 수립하였으며, 온도상승 시험을 통해 본 연구결과의 효용성을 입증하였다.

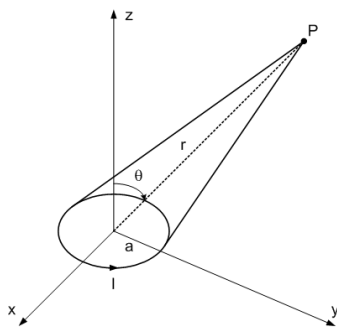
#### 2. 본 론

##### 2.1 권선 누설자속에 의한 외함의 자계 및 손실 계산

먼저, 변압기 권선에 의한 임의지점의 누설자속을 계산하고, 코아 및 외함 자계특성을 고려하여 계산값을 보정하였으며, 3차원 전자기해석 툴과 그 결과를 비교/검증하였다. 그리고, 이러한 자계강도를 토대로 외함의 와전류 손실을 계산하였다.

##### 2.1.1 원형전류에 의한 자계 계산

변압기 권선은 환형으로 되어 있고, 수십 개 이상의 권선층으로 구성 되어 있다. 전체 권선을 n개로 분할하여 각 성분별로 자계를 계산한 후 이 계산결과를 중첩함으로써 임의의 평면상의 자계를 계산할 수 있다. 이를 위해 <그림 1>과 같이 원형전류에 의한 자계 계산식을 도입하였으며, 이들은 식 (1), (2)와 같다.



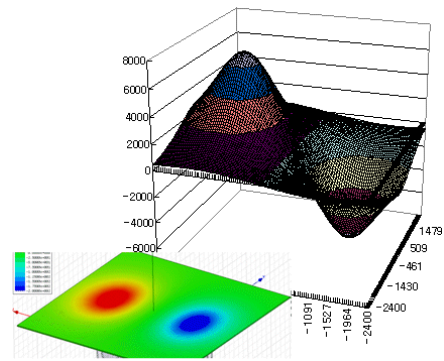
<그림 1> 원형전류에 의한 P점의 자계

$$H_r = \frac{Ia^2}{2r^3} \cos \theta \quad \text{식 (1)}$$

$$H_\theta = \frac{Ia^2}{4r^3} \sin \theta \quad \text{식 (2)}$$

##### 2.1.2 자계 계산 결과 검증

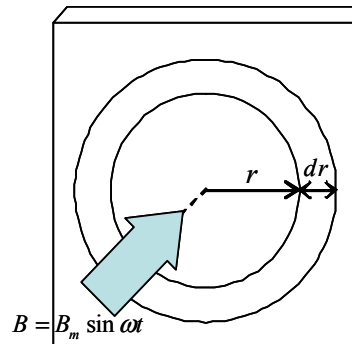
계산된 결과들은 외함 및 코아의 재질을 고려하여 보정인자를 통해 재계산되었으며, 이들 중 외함의 수직성분에 대한 자계계산 결과를 엑셀 차트를 이용해서 그래프로 나타내었다. 이를 전자기해석 툴인 Maxwell 3D의 계산결과와 비교하였으며, <그림 2>에 나타난 바와 같이, 전반적으로 잘 일치함을 알 수 있었다.



<그림 2> 자계계산결과 검증

##### 2.1.3 외함의 자계 손실 계산

일반적으로, 외함 상/하부에는 자계의 수직성분에 의해 손실이 발생하며, 중앙부에는 수평성분에 의해 손실이 발생한다. <그림 3>과 같이 수직성분의 자계에 의해 손실이 발생할 경우, 식 (3)을 이용해서 자계손실을 계산할 수 있다.



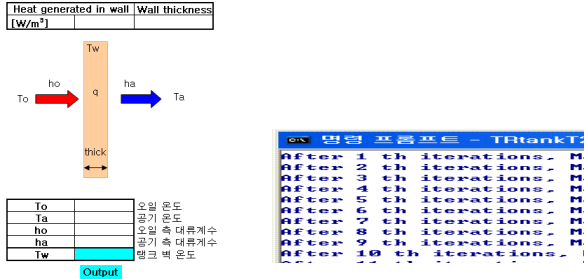
<그림 3> 수직성분의 자계에 의한 도체판에서의 자계 영향

$$P = \frac{1}{4\rho} \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot B_m^2 \cdot r^2 \cdot \eta \quad \text{식 (3)}$$

( $\rho$  : 도체 저항률,  $f$  : 주파수,  $B_m$  : 자속밀도 최대값,  $\eta$  : 손실 보정계수)

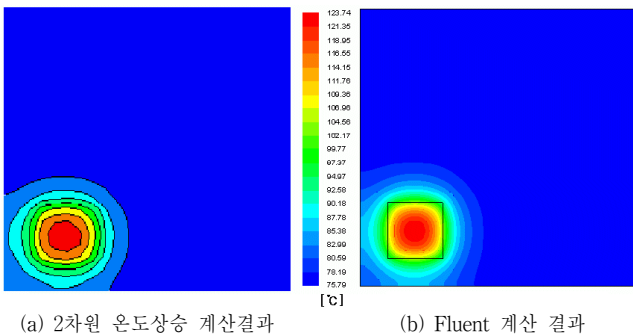
## 2.2 1차원/2차원 온도상승 계산

외함에 차폐판이 없는 경우는, 2.1.3절에서 언급한 바와 같이, 외함의 상/하부 또는 중앙부에서 손실이 많이 발생한다. 이러한 경우, 외함의 두께는 고정되어 있고 발열면적 또한 넓기 때문에 1차원 온도상승 계산식을 적용한 엑셀시트를 이용하여 외함의 온도를 추정하였다. 이에 반해, 차폐판이 있는 경우는, 외함과 차폐판의 좁은 경계부에서 발열현상이 발생하기 때문에, 2차원 온도상승 프로그램을 활용하여 그 온도를 예측하였다.



〈그림 4〉 1차원/2차원 온도상승 계산을 위한 엑셀시트 및 프로그램

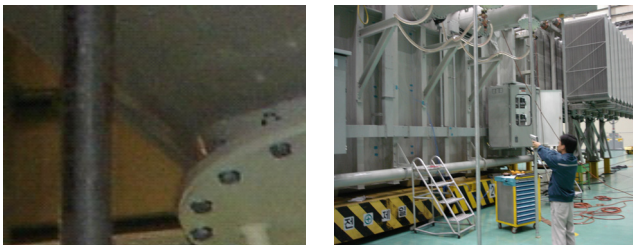
2차원 온도상승 계산 프로그램을 활용한 결과값을 Origin 프로그램을 활용하여 contour한 결과와 열/유동 해석 프로그램인 Fluent의 계산결과를 비교하여 〈그림 5〉에 나타내었으며, 그림에서 알 수 있듯이, 두 결과가 잘 일치함을 알 수 있다.



〈그림 5〉 계산결과 비교/검증

## 2.3 온도상승 시험을 통한 온도예측 결과 검증

3상 500[MVA] 변압기를 대상으로 온도상승 시험을 실시하였으며, 〈그림 6〉과 같이 접촉식 온도센서를 변압기 외함에 부착하여 외함의 온도를 실측하였다. 또한, 이와 병행하여 시험결과와 신뢰성을 높이기 위해 비접촉식 레이저 온도측정기로 온도를 재측정 하였으며, 두 가지 방법에 의한 온도측정 결과는 잘 일치하였고, 〈표 1〉에 온도측정 결과를 나타내었다.



〈그림 6〉 온도상승 시험 및 온도 측정 사진

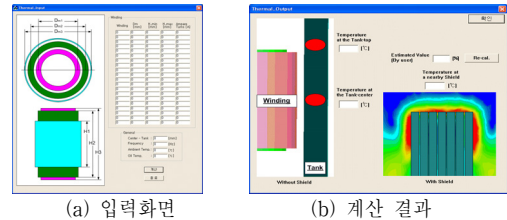
온도 측정 결과, 변압기 외함의 상부온도가 85 - 95[°C] 범위 내에 분포하였으며, 이 결과와 2.2절에서 언급한 2차원 온도상승 계산 프로그램을 활용하여 계산한 결과를 비교했을 때 5[°C] 이내의 근소한 차이를 보였다. 이로써, 본 연구를 통해 수립한 외함의 손실 및 온도상승 계산방안이 유용하게 활용될 수 있음을 확인하였다. 향후, 온도상승 계산의 정확성을 높이기 위해, 추가적인 시험데이터를 확보하여 지속적으로 연구결과를 보완할 필요는 있을 것으로 사료된다.

## 〈표 1〉 온도측정 결과

측정 Point	측정온도[pu]	측정 Point	측정온도[pu]
# 101	0.48	# 112	1.00
# 102	0.48	# 113	0.53
# 103	0.73	# 114	0.55
# 104	0.47	# 115	0.97
# 105	0.49	# 116	0.99
# 106	0.51	# 117	0.89
# 107	0.66	외기온도	0.39
# 108	0.50	Top oil	0.93
# 109	0.66	Radiator In	0.45
# 110	0.55	Radiator Out	0.86
# 111	0.67	-	-

## 2.4 외함의 자계손실 및 온도상승 계산 프로그램 개발

본 연구를 통해, 외함의 자계손실 계산식 수립, 온도상승 계산을 위한 엑셀시트 및 도스 기반의 프로그램이 개발되었으며 실제적으로 이 결과들을 활용하기 위해서는 사용자 편의를 고려한 하나의 프로그램으로 통합할 필요가 있었다. 따라서, 〈그림 7〉과 같이, Visual C++ 코드로 작성된 윈도우즈 기반의 프로그램을 개발하였다.



〈그림 7〉 외함 자계손실/온도상승 계산 프로그램

## 3. 결 론

전자계 및 열/유동 해석 프로그램을 활용한 수치해석적 방법으로 변압기 외함의 자계손실과 온도상승을 계산하는 기존의 업무 프로세스의 경우, 많은 시간이 소요되기 때문에, 설계 또는 고객 요구시 신속한 대응이 어렵다. 따라서 3차원 간이 계산법을 정립하여 신속 정확한 해석적 방법으로 접근할 필요가 있었으며, 본 연구에서는 권선의 누설자속에 의해 발생하는 변압기 외함의 자계손실을 계산하고 이에 따른 온도상승을 추정하였다.

원형전류에 의한 자계를 계산하고 이를 중첩함으로써 임의 평면상의 자계를 계산하였고, 철심 및 외함의 재질을 고려하여 이 값을 보정하였다. 이 결과를 Maxwell 3D 프로그램 계산결과와 비교하였으며, 그 결과 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다. 이렇게 계산된 자계를 토대로, 외함의 와전류 손실을 계산하였다. 이와 병행하여, 1차원/2차원 온도상승 계산식 수립 및 도스기반 프로그램을 개발하였으며, 이를 활용하여 최종적으로 외함의 온도상승을 예측하였다.

본 연구를 통해, 수립한 온도상승 계산결과를 검증하기 위해, 3상 500[MVA] 변압기를 대상으로 온도상승 시험을 수행하였으며, 예측된 값과 실측된 값의 차이는 5[°C] 이내의 범위였고, 결과적으로 서로 잘 일치함을 알 수 있었다.

검증을 마친 연구결과들을 통합하고, 사용자 편의성을 고려하기 위해 Visual C++ 코드를 활용하여 윈도우즈 기반의 외함 온도상승 계산 프로그램을 개발하였다.

향후, 추가적인 시험데이터를 확보하여 지속적으로 개발 프로그램을 보완할 예정이며, 또한, 외함 이외의 변압기 구조물에도 적용이 가능하도록 본 연구결과를 확대 적용할 계획이다.

## [참 고 문 헌]

- [1] 이윤종, "신편전기기기", 동명사, 1986
- [2] David K. Cheng, "Field and Wave Electromagnetics", 1992
- [3] 우형주, "전기자기학", 문운당, 1999
- [4] 이준엽 외 1명, "유입변압기 tie-plate 온도상승 계산법의 신뢰성 연구", 현대중공업 과제 완료보고서
- [5] 김동현 외 3명, "변압기 대전류 리드부 온도저감을 위한 설계 및 시험 평가기술 개발", 현대중공업 과제 완료보고서