

CFD를 이용한 환경친화형 전력용 변압기의 열유동해석

김지호*, 김종왕*, 권동진**, 우정욱**, 구교선**, 이항범†
 송실대학교 전기공학과*, 한전전력연구원 송배전연구소**

Thermal Fluid Flow Analysis of Environment-Friendly Power Transformer Using CFD

Ji-Ho Kim*, Jong-Wang Kim*, Dong-Jin Kweon**, Jung-Wook Woo**, Kyo-Sun Koo**, Hyang-Beom Lee†
 Soong Sil University*, KEPCO Research Institute**

Abstract - 본 논문에서는 환경친화적이고, 인화점 및 발화점이 높아 화재의 위험도가 낮은 식물성 절연유를 기존 변압기의 광유를 대체로 사용하기 위한 열적 특성을 열유동해석을 이용하여 온도분포를 수치해석을 통하여 예측하였다. 해석모델로는 154kV 급 단상 내철형 유입자냉식 변압기를 대상으로 CFD 해석을 수행하였으며, 광유와 식물성 절연유는 부하의 변화에 따른 온도특성을 파악하는 동시에 핫스팟(hot spot)을 예측하였다. 본 논문은 변압기를 3차원 모델링하여 유동 및 온도 분포를 해석한 결과, 변압기의 내부 온도 및 핫스팟 추적에 대하여 변압기 온도 분포 해석결과는 식물성 절연유의 적용 및 냉각 설계 변경에 기초자료를 활용될 것이다.

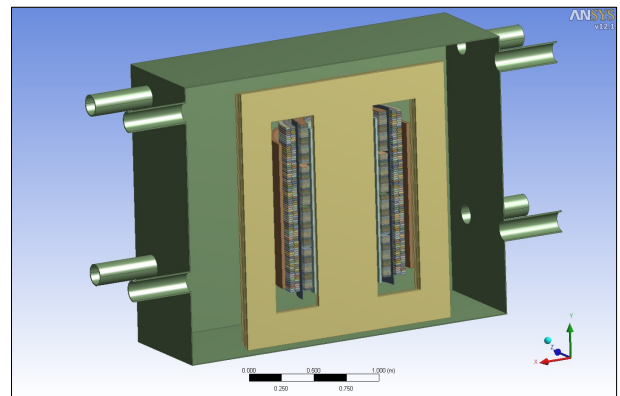
철심을 축으로 하여 각 층을 이루고 있다. 저압권선과 고압권선은 유로를 경계로 각각 4개의 층과 6개의 층으로 구분되었다. 실제 변압기의 권선은 일정 두께 이상의 절연지로 둘러싸인 구리도체를 나선형으로 감아서 구성하고 권선과 권선 사이에 스페이서(spacer)를 배치하여 냉각효과를 높여줄 수 있는 구조로 설계 및 제작을 하게 된다. 하지만 실제 변압기와 같이 모델을 구성하면 해석 대상이 복잡해지고 해석에 필요한 시간 자원이 증가하기 때문에 해석결과에 영향을 최소화하면서 절연유가 통과할 수 있도록 권선 사이의 유로를 확보하고 권선의 형태는 원통형으로 단순화시켰다. 또한 해석모델은 해석시간을 줄이고 수렴성을 높이기 위해 OLTC가 제거된 상태에서의 대칭(symmetry)모델이기 때문에 1/2 형상만 모델링하여 해석하였다. 해석모델의 온도분포는 열원의 크기가 큰 저압권선과 고압권선의 영역에서 증가할 것이라 가정하고, 저압권선과 고압권선을 세부적으로 모델링하고 안경권선과 탭권선은 단순하게 모사하였다. 해석모델에 그림은 <그림 1>에 나타내었다.

1. 서 론

산업의 발달과 급속한 경제 성장으로 전력설비는 매년 지속적으로 증가하고 있다. 도심지역의 인구 집중현상이 가속화되므로 전력수요는 지속적인 급증현상을 보이고 있다. 전력설비 중 소비자에게 전력을 직접 공급하는 전력변환기인 변압기는 매우 중요한 역할을 하고 있다. 전력수요의 지속적인 상승으로 인해 변전소의 추가적인 건설의 필요성이 늘어나고 있다. 하지만 이와 같은 상황과는 달리, 도시 확장에 따른 변전소의 부지 확보로 기존의 옥외 변전소 대신에 옥내 변전소 및 지하 변전소의 건설이 늘어나고 있는 실정이다. 이러한 설치공간의 부족현상과 서비스의 향상에 대한 요구가 증대되어 소형화, 저손실화, 고효율화로 개발하고 있다.

옥내 및 지하 변전소에 설치되는 변압기는 화재발생을 억제하기 위하여 난연성 절연유를 사용하고 있으며, 난연성 절연유의 종류에는 실리콘 절연유, HMWH, 합성 에스터(synthetic ester), 식물성 절연유 등이 있다. 이들 중 식물성 절연유는 1990년대 개발되어 적용된 역사는 가장 짧지만, 난연성 절연유 중에서 가장 높은 발화점과 생분해도 특성을 보유하고 있으며, 광유와 혼합되어도 우수한 특성을 유지하는 장점을 가지고 있다. 특히, 다른 절연유와는 달리 천연식물에서 추출한 성분을 원료로 하고 있어, 최근 세계적으로 친환경성의 중요성과 대체 절연유의 필요성의 증가로 식물성 절연유를 대체 절연유로써 사용하는 사례가 증가하고 있다. 하지만 식물성 절연유의 점도(40℃, 33cSt)가 광유의 점도(40℃, 9.2cSt)에 비해 3배 가량 높아 대류에 의한 열방출을 방해하므로 적용 시 고려해야만 한다.

이에 본 논문은 높은 점도 특성을 가진 식물성 절연유의 전력용 변압기 적용을 위한 변압기 온도 특성 파악 및 냉각 시스템의 검증에 최종목표로, 이를 위해 CFD(computational fluid dynamics)해석을 통한 변압기의 열유동해석을 수행하여 변압기의 온도 특성 파악을 수행하는 동시에 핫스팟(hot spot)을 예측하였다. 해석에 변압기는 154kV 전력용 변압기를 해석 모델로 선정하여 광유와 식물성 절연유를 유입자냉식의 자연대류로 설정하여 난류 현상을 해석하였다. 75%, 100% 부하에 따른 온도 분포 및 핫스팟 지점을 예측하였고, 이를 위해 저압권선 및 고압권선의 유로 부분의 세밀한 격자 생성을 수행하였다.



<그림 1> 전력용변압기의 세부 권선 3D 모델링

해석모델의 구성 영역을 각각의 구성재료인 철심, 저·고압권선, 절연유, 절연지 및 외함 등에 대한 밀도, 비열, 열전도도, 점도 등의 열적 파라미터를 선정하여 해석하였다. 해석모델의 주요 재질에 대한 열적 파라미터를 <표 1>에 나타내었다. 절연유의 경우 밀도, 비열, 점도, 열전도도 등은 온도에 따라 물성치가 변화하는 값을 사용하였다.

<표 1> 해석모델의 열유동해석을 위한 물성치

구분	열전도도	밀도	비열(열용량)
	$W/(m \cdot K)$	kg/m^3	$J/(kg \cdot K)$
철심	21.7	7,933	470
코일	385	8,930	401
절연지	0.2	1.14	1.5

2. 본 론

2.1 해석모델

본 논문에서 사용되는 변압기는 154kV 단상 전력용 변압기로 정격전압 154kV/23kV이며, 냉각방식은 OA/FA로 부하에 따라 두 단계로 조정되어 사용된다. 철심의 형태는 단상 3각(leg)으로 중심 철심에 권선이 감겨있는 형태의 내철형 타입이다. 권선의 재질은 구리이며, 철심의 재질은 규소강판(30PH105)을 사용하였다. 권선의 구조는 내철형 중심 철심에 권선이 감겨있는 형태로 안쪽부터 고조파 성분을 제거하기 위한 안경권선, 저압권선인 2차권선, 고압권선인 1차권선, OLTC와 연결된 1차 탭(tap)권선이다. 권선의 구조는 원형 디스크 형태의 권선으로 중앙

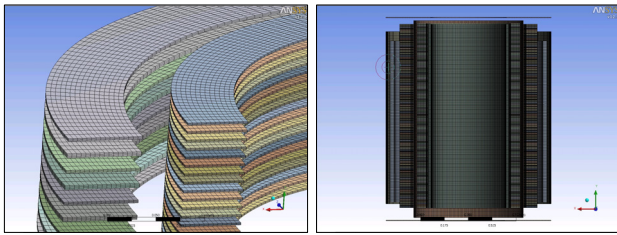
변압기 권선에 전류가 흐르면 열이 발생하고 이는 도체와 권선을 포함하고 있는 내부의 온도상승에 원인이 된다. 권선과 철심의 재질에 따른 손실을 계산하여 온도 상승의 원인을 계산하여야 한다. 변압기의 손실은 권선과 철심에서의 손실이 대부분이며, 이는 자체해석 및 실험을 통하여 손실을 열원으로 이용할 수 있다.

부하손실인 동손과 무부하손실인 철손만을 고려하였으며, 온도의 변화에 영향을 받는 권선의 저항값은 정상상태의 해석임을 감안하여 고려하지 않았다. 권선에서 발생하는 전력손실밀도는 저압권선과 고압권선의 동손과 철손에 의해 계산하였다. 고압권선에 비해 많은 소손수를 가진

고압권선에서 상대적으로 높은 전력손실밀도가 발생하였다. 고압권선에서는 $140,720 W/m^3$, 저압권선에서는 $201,590 W/m^3$ 의 전력손실밀도를 갖는다.

2.2 해석모델의 격자생성

모든 유동영역의 해석에 있어서 격자에 대한 의존성은 계산에 사용되는 하드웨어가 제한적일 뿐 아니라, 계산에 소모되는 시간 또한 무한할 수 없기 때문에 필수적이다. 보통 격자의 수가 많을수록 해석의 정확도는 높아지지만 계산에 소모되는 하드웨어의 양과 시간은 크다. 또한 격자의 왜도(skewness)에 따라 해석 결과의 수렴 여부 및 해석 결과가 전혀 달라지는 결과를 얻을 수 있다. 본 논문에서는 보다 적은 격자를 통해 해석의 신뢰성을 높이고자 사면체, 육면체, 피라미드, 프리즘 격자를 혼용한 하이브리드(hybrid) 격자를 사용하였다. 권선 사이의 유속에 대한 정확한 결과를 얻기 위하여 저·고압권선부의 절연유가 이동하는 부분을 더욱 세밀하게 격자를 나누어 격자수가 약 3,100만개로 해석시간이 약 162시간 정도가 소요되었다.



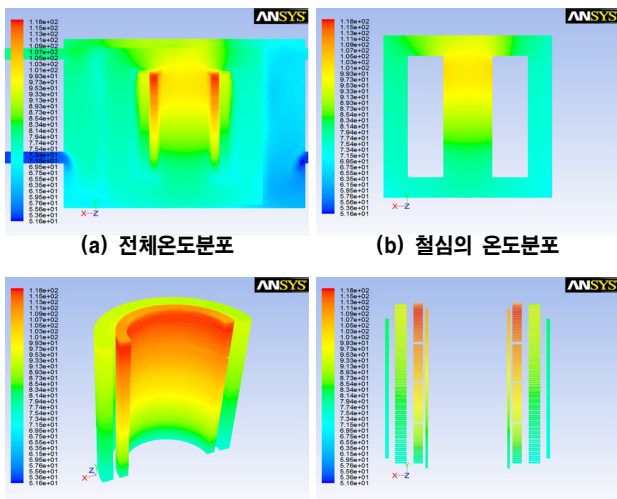
(a) 권선 사이의 유로 격자생성 (b) 권선 및 plate의 격자 생성

〈그림 2〉 전력용변압기의 격자생성

2.3 해석결과

전력용변압기에 적용될 식물성 절연유의 온도분포 및 핫스팟의 예측을 위하여 광유에 대한 해석 결과와 비교하였다. 변압기의 부하는 75%, 100%를 적용하였으며, 각각의 부하 모델에 동일하게 온도에 따른 물성치 변화를 적용하였다.

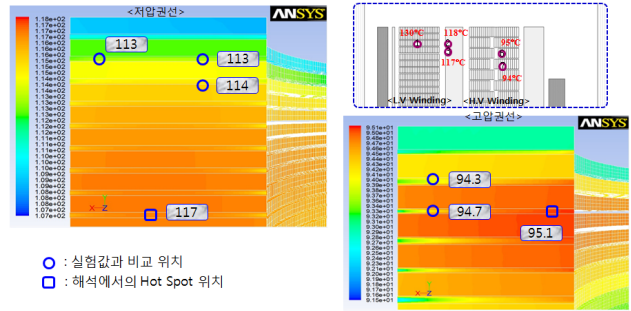
〈그림 3〉은 해석모델 중 식물성 절연유의 100% 부하에서의 각 부분의 온도분포를 나타낸 것이다. 식물성 절연유는 광유에 비하여 점도가 높기 때문에 광유를 사용하였을 때보다 온도가 증가하였다. 온도 분포는 51°C에서 118°C로 나타났으며, 온도에 따른 밀도의 변화에 의하여 상부에 높은 온도가 나타났다.



(a) 전체온도분포 (b) 철심의 온도분포 (c) 권선의 평면 온도분포 (d) 권선의 단면 온도분포

〈그림 3〉 식물성 절연유의 100% 부하에서의 온도분포

〈그림 4〉는 식물성 절연유를 사용한 변압기의 100% 부하에서의 핫스팟 온도를 파악하기 위하여 저·고압권선의 위치별 온도분포를 나타낸 것이다. 최고점 온도는 저압권선의 상부 9~10 turn 사이에서 나타났으며 이때의 온도는 저압권선에서는 117°C와 고압권선에서는 95.1°C가 나타났다. 실제 측정치와는 약 13°C 가량의 온도 차를 보이고 있다. 부하가 증가함에 따라 권선의 평균 온도는 더 높게 나타났으며, 가장 온도 차이가 많이 나는 부분은 고압권선보다 저압권선에서 더 많은 차이를 보였으며, 이는 저압권선의 손실이 고압권선의 손실보다 더 커질 뿐만 아니라 권선의 단위 체적이 저압권선이 작기 때문에 저압권선 부분의 온도가 증가하는 것을 확인할 수 있다.



〈그림 4〉 저·고압권선의 온도분포 비교(식물유의 100%부하)

〈표 2〉는 광유와 식물성 절연유의 부하의 변화에 따른 온도분포를 나타낸 것이다. 일반적으로 운용 부하를 75%로 간주할 경우 최고점 온도 예상 위치에서의 온도는 광유의 경우 68.5°C, 식물성 절연유의 경우 95.4°C로 나타났으며, 주위온도 20°C에서 약 48.5°C 및 75.4°C로 온도상승이 된 것을 확인할 수 있다.

〈표 2〉 부하에 따른 절연유의 온도분포 비교

구분		철심 온도분포	저압권선 온도분포	고압권선 온도분포	최고점 온도
광유	75% 부하	38.3 ~ 60.7	46.8 ~ 68.5	45.3 ~ 57.3	68.5
	100% 부하	54.7 ~ 72.9	59.4 ~ 90.0	58.9 ~ 76.3	90.0
식물유	75% 부하	57.4 ~ 81.8	64.1 ~ 95.4	61.9 ~ 76.2	95.4
	100% 부하	67.5 ~ 96.6	76.1 ~ 117.0	74.1 ~ 95.1	117.0

본 논문의 해석결과는 실제 온도상승시험 결과와 약 10~15°C의 차이를 보이고 있다. 해석결과와 차이를 보이는 이유는 해석 모델에서는 프레스 보드와 하부의 권선을 지지하는 덕트부분을 고려하지 않았으며 권선부의 온도증가에 따른 저항의 변화를 고려하지 않았기 때문에 해석 결과가 낮게 나온 것으로 판단된다.

3. 결 론

본 논문에서는 생분해도가 높아 환경친화적이고, 인화점 및 발화점이 높아 화재의 위험성이 낮은 식물성 절연유를 기존의 전력용 변압기에 광유를 대체하기 위해 CFD 해석을 통한 온도분포를 파악하였다. 이를 위해 기존에 변압기에 사용된 광유와 식물성 절연유에 대한 온도분포를 비교하였고, 이때의 해석에 적용한 절연유는 각각의 열적 특성에 변화를 줄 수 있는 파라미터인 밀도, 열전도도, 비열, 점도는 온도에 따라 변화하는 값을 사용하였다. 해석에 적용한 절연유별 각각의 철심 및 권선에서의 온도분포를 파악하였으며, 핫스팟 지점을 예측하였다. 해석 결과 광유 및 식물성 절연유의 해석 결과 모두 상부로 올라갈수록 온도가 증가함을 보였으며, 부하가 증가함에 따라 저압권선의 온도 차이가 더 크게 나타났다. 식물성 절연유의 경우, 광유보다 점도가 크기 때문에 전체의 온도분포 및 핫스팟 온도가 높은 것을 확인할 수 있었다. 향후 본 논문에서의 해석결과와 실험결과와의 비교를 위해 온도해석과 온도상승시험을 통하여 식물성 절연유의 온도분포의 정확한 예측을 통하여 전력용 변압기에 광유를 대신하여 식물성 절연유를 적용함을 검토할 뿐만 아니라 변압기 냉각 성능 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (R-2008-32)주관으로 수행된 과제임.

[참 고 문 헌]

- [1] "IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Natural Ester Fluids in Transformer", IEEE Std C57.147, 2008
- [2] Harold Moore et. al., "Summary of In-Progress Testing for Power Transformer Application of FR3 Fluid", Cooper power system report, 2007
- [3] Jean-michel Mufuta, "Modeling of the mixed convection in the windings of a disc-type power transformer", Applied Thermal Engineering 20 (2000) 417-437,