

식물성 절연유를 적용한 배전급 유입 변압기의 냉각 특성 연구

홍동진\*, 김철숙\*, 김중경\*  
(주)효성 중공업연구소\*

Study on the Cooling Characteristics of Distribution Transformer by Using Vegetable Oil

Dongjin Hong\*, Chul-sook Kim\*, Joong-Kyoung Kim\*  
Power & Industrial Systems R&D center, Hyosung Corporation\*

**Abstract** - 식물성 절연유는 기존에 사용되던 광유와 비교하여 우수한 생분해성 및 뛰어난 난연 특성을 가지고 있다. 반면에 광유 대비 높은 점도로 인하여 냉각 효과가 떨어지기 때문에 효과적인 사용을 위해서는 변압기 내부 온도 상승에 따른 특성 검토가 필요하다. 본 연구에서는 배전급 유입변압기에 대하여 광유와 식물성 절연유의 내부 온도 분포 특성 비교를 위한 시제품을 제작하여 실제 내부 온도를 측정하고 3차원 해석을 통하여 광유와 절연유의 열적 특성을 비교하였다.

1. 서 론

생활수준의 향상에 따라 에너지 소비가 급격히 늘어나고 있다. 특히 전력 수요는 지속적으로 증가하고 있으며, 그에 따라 변압기의 과부하로 인한 고장 및 사고가 급격히 증가하고 있다[1]. 변압기의 사고는 폭발로 이어지고 변압기 내부의 절연유로 인한 2차 화재의 원인이 될 수 있다. 또한 최근의 환경 기후 협약에 의한 규제 강화에 따라 변압기의 안정성과 함께 친환경성이 점차적으로 부각되고 있다.

식물성 절연유는 기존의 광유에 비해 절연 성능이 좋고 화학적으로 안정하며 생분해성이 뛰어나다. 따라서 누유로 인한 환경오염의 문제가 없으며, 일반 광유에 비해 2배 이상 높은 인화점을 가지고 있어 화재 안정성 측면에서도 유리하다. 또한 절연지의 수분을 흡수하여 열화 속도를 줄임으로써 변압기 수명을 연장시키며, 권선 온도 상승 한도도 높일 수 있다. 이러한 이유로 기존 절연유를 식물성 절연유로 대체하고자 하는 노력이 진행 중이다. 국외에서는 이미 식물성 절연유를 사용한 변압기를 제조해 오고 있으며, 설치환경에 따른 운용기준이 마련되어 있다. 국내에서도 식물성 절연유를 적용한 변압기가 개발되었으나, 사용 경험이 부족하고 장기 내구성 확보를 위한 신뢰성 데이터가 많지 않기 때문에 사용량이 많지 않은 실정이다[2].

이러한 장점에도 불구하고 광유에 비해 3~5배정도 높은 점도는 변압기의 냉각에 악영향을 끼칠 수 있다. 특히 자연대류를 사용한 냉각 방식을 채택한 변압기는 냉각에 필요한 유동에 영향을 줄 수 있으며, 낮은 온도에서 쉽게 응고되어 유동성이 떨어지기 때문에 시동 시 또는 휴한기 지역 등에서의 효과적인 사용을 위해서는 변압기 내부 온도 상승에 따른 특성 검토가 필요하다[3]. 본 연구에서는 배전급 유입변압기에 대하여 식물성 절연유의 내부 온도 분포 특성을 알아보기 위하여 시제품 제작하여 실제 내부 온도를 측정하고 3차원 해석을 통하여 열적 특성을 비교하였다.

2. 본 론

2.1 시제품 변압기 제작 및 시험

시험을 위해 제작된 변압기는 3상 60Hz, 22.9kV/380V, 500kVA급 변압기로 동일 모델에 대하여 광유(IEC60296)와 식물성 절연유(FR-3)를 각각 적용하여 시험하였다. 절연유의 냉각을 위하여 Corrugate 타입의 방열기가 사용되었다. 유온의 측정은 유면 85mm 아래에서 유면온도계를 사용하여 측정하였으며, 권선의 온도는 저항법을 사용하여 측정되었다. 표 1은 온도 상승 시험에 의한 결과를 나타내고 있다. 시험결과는 일반 광유의 유온도를 기준값으로 하여 상대적으로 표기하였다. 시험 결과 식물성 절연유를 적용할 경우 높은 점도에 의하여 광유에 비해 높은 온도 분포를 보이고 있음을 확인할 수 있다.

〈표 1〉 온도 상승 시험 결과

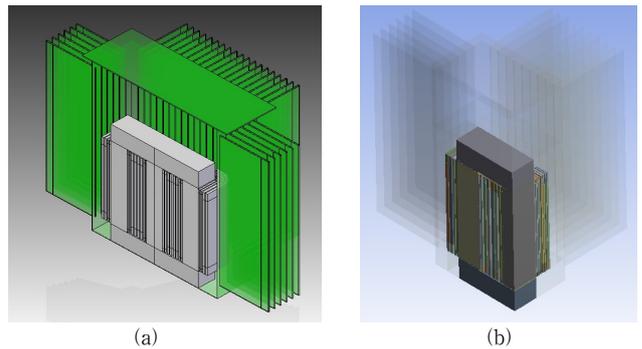
	일반 광유		FR-3	
	HV	LV	HV	LV
유온도	100		101.6	
권선온도	108.1	113.8	117.6	117.2

2.2 온도분포 해석

식물성 절연유를 적용한 유입 변압기의 냉각 성능을 최적화하기 위해서는 다양한 설계 조건의 변경이 요구되며, 그에 따른 검증이 필요하다. 시험을 통한 온도 측정의 경우 실제적인 검증 결과를 얻을 수 있으나 비용과 시간적 측면에서 수치 해석적 방법을 사용하는 것이 유리하다. 따라서 시험 데이터를 기반으로 한 해석 모델을 사용하여 parametric study를 통해 식물성 절연유 적용 변압기에 대한 냉각 설계 변경의 기초 자료로 활용하고자 하였다. 우선 본 논문에서는 식물성 절연유의 유동 및 열 특성을 알아보기 위한 시뮬레이션을 수행하였다.

2.2.1 해석 모델

해석을 위해 시제품 변압기와 동일한 형상의 변압기를 모델링하였다. 그림 1은 해석에 사용된 변압기의 형상과 계산 모델을 나타내고 있다. 변압기의 형상이 대칭적 구조를 나타내고 있고, 제한된 격자 범위 내에서 내부의 복잡한 유로 형상을 실제와 가깝게 모사하기 위해 그림 1(b)에 나타난 바와 같이 1/4의 대칭 모델을 사용하였다.



〈그림 1〉 변압기 형상 및 계산 모델

2.2.2 경계 조건

계산에 사용된 권선과 철심의 손실을 표 2에 나타내었다. 변압기 내/외부의 열전달은 전도, 대류, 복사에 의해 이루어지거나 전도나 대류와 비교하여 복사에 의한 열전달은 작기 때문에 고려하지 않았다. 철심의 경우 이방성의 특성을 나타내므로 각방향에 대하여 각기 다른 열전도 값을 적용하였으며, 계산을 위해 사용된 광유와 식물성 절연유의 물성치는 각 제작사에서 제공된 값을 사용하였다.

〈표 2〉 손실 조건

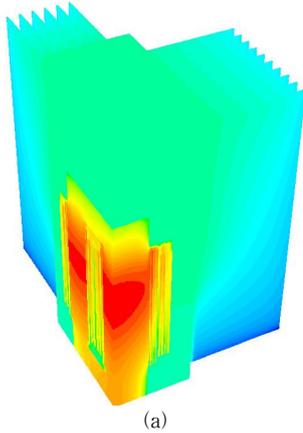
	Power dissipation(W/m <sup>3</sup> )
Core	18030.18
LV	194659.90
HV	133369.7

2.2.3 해석 결과

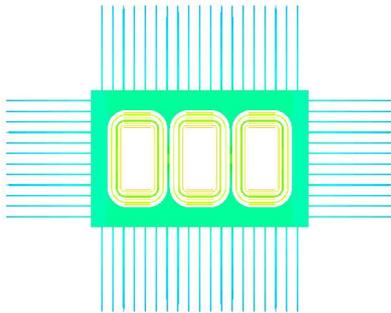
표 3은 식물성 절연유의 사용에 따른 변압기 내부의 온도 계산 결과를 보여주고 있다. 온도 상승 시험 결과와 해석 결과를 비교해 보면, 유온도의 경우 2% 이하의 오차를 보였으나, 권선 온도 예측 시 계산 결과가 측정치에 비해 높게 나타났다. 이는 변압기 형상을 모델링함에 있어 권선과 철심 주위의 유로가 실제와 다르게 단순화되었기 때문인 것으로 판단된다.

〈표 3〉 해석 결과

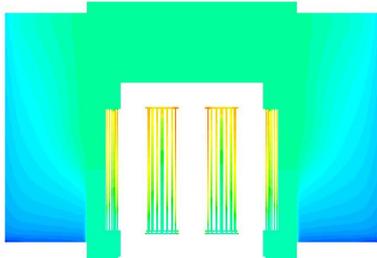
(°C)	FR-3	
	HV	LV
유온도	56.09	
최고 유온도	80.12	
권선온도	71.37	75.99
Gradient	15.28	19.9
최고 권선온도	77.43	83.04



(a)

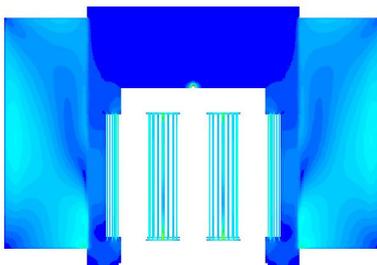


(b)



(c)

〈그림 2〉 변압기 내부 온도 분포



〈그림 3〉 변압기 내부 속도 분포

그림 2는 3차원 해석에 의한 변압기 내부의 온도 분포를 나타내고 있다. 권선과 철심의 손실로 인해 발생한 열이 방열핀에 의해 냉각되면서 변압기 내부를 순환하는 자연 대류 유동에 의한 온도 분포를 보여주고 있다. 권선과 철심에서 발생한 열을 흡수한 절연유의 유동은 방열핀 상부로 이동하고 방열핀에 의해 냉각되어 방열기 하부를 지나 권선과 철심 사이의 유로를 거쳐 다시 상부로 유입되는 일반적인 변압기 온도 분포 특성을 보여주고 있다. 이러한 유동의 이동은 그림 3의 내부 속도 분포를 통해서 확인할 수 있다.

일반적인 유입 변압기의 경우 권선 사이의 유로는 대부분 수 mm의 작은 덕트 구조로 이루어져 있으며, 본 연구에 사용된 변압기의 방열핀 또한 5~6mm의 얇은 유로를 형성하고 있기 때문에 점도가 높은 식물성 절연유를 사용할 경우 유동의 흐름이 방해받아 냉각 성능의 감소로 이어질 수 있다. 따라서 이러한 식물성 절연유에 대한 유동 특성에 대한 이해가 필요하다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 식물성 절연유를 사용한 배전급 유입 변압기의 내부 유동 및 온도 분포 특성을 실험과 3차원 CFD 해석을 통하여 비교하였다.

유입 변압기의 경우 권선 주위에 설치된 유로를 통하여 손실에 의해 발생한 열을 냉각하게 된다. 이때 사용된 유로는 대부분 수 mm의 아주 작은 덕트 구조이므로 절연유의 유동이 냉각 성능에 큰 영향을 미치게 된다. 시험 결과, 식물성 절연유를 사용하였을 때 광유에 비하여 변압기 내부의 온도가 높게 상승함을 확인하였다. 식물성 절연유를 사용한 변압기 온도 특성 예측의 결과는 실제 변압기에 식물성 절연유를 적용하기 위한 설계 변경의 기초 자료로서 사용 될 수 있다. 하지만 단순화된 해석 모델로 인하여 실제 변압기의 권선 온도 예측에 대한 정확성을 높일 필요가 있다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Lee, C. W., Kim, M. K., Choi, D. W., Lee S. J., "Cause and measures in the power transformer of the fire and explosion", Electric equipment, Vol.24, pp.60~69, 2007
- [2] 이병성, 박철배, 송일근, 한상욱, "식물성 절연유를 사용한 배전용 변압기의 온도변화 특성", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2008
- [3] 김철수, 차창환, 조상문, 이승호, "식물성 절연유를 적용한 전력용 변압기 3차원 온도분포 해석", 대한기계학회 추계학술대회 논문집, 2010