

식물성 절연유 변압기의 냉각특성 변화에 따른 최고점온도 특성 해석

Characteristic Analysis of Hot Spot Temperature according to Cooling Performance Variation of Natural Ester Transformer

김 지 호* · 이 향 범†
(Ji-Ho Kim · Hyang-Beom Lee)

Abstract - Natural ester has a higher biodegradability, flash and fire points, and a greater permittivity compared to conventional mineral oils. However, natural ester also has a higher pour point, viscosity, and water content. These characteristics hamper circulation and the electrical properties of oil-filled transformer. Thus, this paper applied electromagnetic-thermal-flow coupled analysis method to predict temperature distribution inside 154kV single phase power transformer using natural ester. It modeled in the actual appearance for the tank and winding of the power transformer to improve the accuracy of analysis and applied heat flow analysis that considered hydromechanics and heat transfer at the same time. It calculated the power loss, the main cause of temperature rise, from winding and core with electromagnetic analysis then used for the heat source for the heat flow analysis. It then compared the reasonability of result of measurement analysis based on the result acquired from temperature rise test using FBG sensor on the power transformer.

Key Words : CFD analysis, Cooling performance, Natural ester, Power transformer, Temperature rise test

1. 서 론

전기기기의 절연은 만일 한 가지라도 미비한 점이 있으면 파괴되며, 기계의 기능을 정지시키고 만다. 변압기는 사용 전압이 가장 높은 기기이며, 점점 대형화해가고 있는 시점에 절연재료의 신뢰성은 매우 중요하다. 변압기라 하면 이전에는 거의 유입식이었기에 내유성이라는 점에서 비교적 한정된 재료가 사용되어 왔으나, 화학공업의 비약적인 발전에 따라 현재는 건식, 불연성 유입, 가스 절연 등 새로운 방식의 변압기가 실용화되고 있고, 경제성, 화재안전성, 환경 문제를 고려할 때 어떤 재료가 변압기에 사용되게 될지는 선불리 예상할 수 없다.

최근 개발되는 전력기기는 환경 기후 협약에 따른 규약의 대응으로 경제성의 향상, 소형화에 대한 요구의 증가와 더불어 인체 및 자연 친화성을 고려한 사회 환경을 고려해야 한다는 의식이 높아지고 있다. 현재 사용되고 있는 변압기의 절연 및 냉각매체인 광유는 유독성, 가연소성, 폭발성의 단점을 가지고 있다. 이는 에너지, 환경, 경제가 연계된 기술 개발 정책이 요구하는 CO₂ 배출량 절감 및 친환경성 측면

에서 불리하다. 뿐만 아니라 앞으로 석유고갈시대에서 광유는 경제성 또한 잃게 될 것이므로 식물성 절연유의 검토가 더욱 필요하다. 최근 선진국에서는 식물성 절연유를 변압기의 절연유로 적용하기 위한 연구가 진행되고 있고, 실제로 적용 예도 늘고 있다. 식물성 절연유는 높은 생분해도를 가졌기 때문에 환경오염이 거의 없고 인화점이 300℃ 이상으로서 광유(140℃)나 R-Temp(275℃)보다 우수하다. 하지만 점도(40℃, 33cSt)가 광유의 점도(40℃, 9.2cSt)에 비해 3배가량 높아 대류에 의한 열 방출을 방해하므로 적용시 고려해야만 한다[1, 6, 7].

광유를 포함한 다른 절연유와 식물성 절연유의 특성 비교에서 절연 파괴강도, 인화점, 생분해도, 절연지 열화, Sludge 생성이 광유를 포함한 다른 절연유들과 비교했을 때 거의 동등하거나 동등 이상으로 우수하다. 하지만 점도가 광유에 비해서 40℃에서 100℃ 사이에서 약 3배가량 높다. 유입변압기에서 절연유의 점도는 변압기 내부의 열원으로부터 발생한 열을 대류에 의해 방출시키는데 있어 중요한 요인이다. 대류는 일반적으로, 온도에 기인한 밀도 구배로 중력에 의한 체적력이 유동을 일으키는 것이기 때문이다. 그러므로 식물성 절연유의 높은 점도로 인해 변압기 내부에서 광유에 비해 대류가 일어나기 어려워 냉각효과가 저하될 것으로 예상된다[1, 6].

따라서 절연유의 효율적인 냉각을 위하여 펌프와 팬(fan)을 사용하여 냉각시키는 송유풍냉식을 사용한다. 식물성 절연유의 경우 높은 점도로 인하여 100% 부하에서 핫스팟(hot spot) 온도가 130℃까지 상승하기 때문에 더욱 효율적인 냉각이 필요한 실정이다. 이에 따라 본 논문은 송유풍냉식의

† Corresponding Author : School of Electrical Engineering, Soongsil University, Korea

E-mail : hyang@ssu.ac.kr

* School of Electrical Engineering, Soongsil University, Korea

접수일자 : 2015년 11월 9일

수정일자 : 2015년 11월 16일

최종완료 : 2015년 11월 18일

냉각방식을 적용한 상태의 온도특성을 살펴보기 위하여 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics ; CFD) 해석을 수행하였다. 실제 변압기에 냉각을 위하여 펌프를 적용하게 되면 유입구의 속도가 증가하고 절연유의 유입, 유출시의 유량이 증가하게 된다. 본 논문은 변압기에 펌프 및 팬이 설치되었다고 가정하고, 유입구의 속도와 온도를 조정하여 핫스팟 온도를 비교하고, 그 위치변화를 비교하였다.

2. 식물성 절연유 특성 및 열유동해석이론

2.1 식물성 절연유의 냉각 성능관련 요소

절연유의 주요 역할은 절연뿐만 아니라 냉각성능도 중요하다. 냉각과 관련된 특성들은 점도, 비열, 열전도도 등이 있다. 그중 점도는 유체의 유동성을 판단하는 척도이다. 절연유는 점도가 낮을수록 권선 주변에서 온도가 상승된 절연유가 방열기로 빠르게 이동하여 열을 방출할 수 있으므로, 절연유는 낮은 점도 특성이 요구된다. 비열은 1g의 물질을 1℃ 높이는데 필요한 열량, 열용량은 비열과 물질의 질량의 곱으로 표시된다. 따라서 비열이 높고, 절연유가 많을수록 권선의 온도가 절연유로 배출되더라도 절연유의 온도상승이 상대적으로 적기 때문에 냉각에 유리하게 작용된다. 또한 열전도도는 단위시간동안 뜨거운 면에서 차가운 면으로 전달되는 에너지를 의미하며, 높은 열전도도는 권선의 온도를 빠르게 흡수하고, 방열기에서 온도에너지를 빨리 배출할 수 있으므로 냉각에 유리하게 작용된다[6].

식물성 절연유는 표 1과 같이 높은 점도 특성 때문에 광유에서보다 냉각성능의 저하될 것으로 예상되지만, 표 2에서와 같이 열전도도와 비열 특성이 좋아 냉각성능의 저하는 어느 정도 보안을 할 수 있을 것으로 보인다. 그러나 정확한 냉각성능에 대한 평가는 점도, 열전도도, 비열 등이 특성이 정량적으로 분석된 사례가 없으므로, 식물성 절연유 적용시 유동 해석을 통해 냉각성능을 파악할 필요가 있다.

표 1 절연유별 점도특성

Table 1 The viscosity by insulating oil

종류 점도	광유	실리콘유	HMWH	식물성 절연유	
				합성	천연
40℃기준	9.2	37.0	123.5	29.0	34.2
100℃기준	2.3	15.5	12.6	6.0	8.2

* HMWH(high molecular weight hydrocarbon)

표 2 광유 및 식물성 절연유의 열전도 및 비열

Table 2 Comparison of thermal conductivity and specific heat

구분	종류	광유	식물성 절연유
	열전도도 $W/(m \cdot K)$		0.1248
비열 $J/kg \cdot K$		1,988	2,110

2.2 변압기의 핫스팟(hot-spot) 온도 및 수명

전력용 변압기는 권선, 철심, 외함, 방열기, 절연지, 부싱, 절연유 등 복합적인 요소로 구성되어 있다. 복합적 요소 중 한 가지 부품이 고장 날 경우, 부품 교체가 가능하다면 지속적인 운전이 가능하지만, 부품의 교체가 불가능하거나 또는 교체 비용이 과다할 경우 변압기에 수명에 도달했다고 판단할 수 있다. 변압기 부품 중 교체가 불가능한 대표적인 부품은 절연지로 절연지가 열화 되어 한계 수명에 도달되었을 때 변압기도 한계 수명에 도달되었다고 판단할 수 있다[4].

절연지의 열화에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 권선에서 발생하는 열로, 이 열은 변압기 부하 운전시 손실에 의해 발생된다. 변압기는 권선 온도를 지시하는 기능이 있지만, 이것은 평균 권선온도이며, 냉각구조, 권선배치 등 설계 사양에 따라 권선 위치 간 온도차가 발생하며, 가장 뜨거운 권선의 위치를 핫스팟(hot spot)이라 지칭하고, 이곳이 절연지의 열적 스트레스가 가장 큰 지점이다. 따라서 절연지의 열화가 가장 빠르게 진행되며, 열화에 의한 절연사고 확률도 가장 크게 된다. 그러므로 변압기의 핫스팟 지점 및 온도는 변압기의 수명과 밀접한 관계를 가진다[4, 5].

핫스팟 온도는 IEC 60076-7과 IEEE C57.106에서 설명하고 있다. 변압기의 핫스팟 온도는 주변온도, 부하에 따른 권선 온도상승 및 핫스팟 온도 보정치의 합을 표현된다. IEEE에서는 주변온도 30℃, 정격부하에서 권선 온도상승 65℃ 및 핫스팟 온도 보정치 15℃를 합하여 정격부하에서 변압기의 핫스팟 온도 110℃를 기준으로 하고 있다[5].

IEEE loading guide에서는 절연지에 대해 온도에 따른 열화특성 곡선을 제시하고 있으며, Mr. Mchhane은 가속열화 실험을 바탕으로 한 식물성 절연유 변압기에서의 열화특성 곡선을 IEEE 열화곡선과 비교하여 설명하고 있다[6].

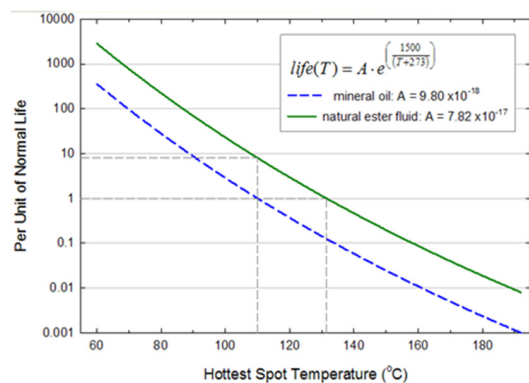


그림 1 광유와 식물성 절연유의 수명곡선

Fig. 1 Life curve of mineral oil and natural ester

그림 1은 광유와 식물성 절연유의 절연지 열화곡선을 나타낸 것으로 파란색 점선은 광유, 녹색 실선은 식물성 절연유에서의 절연지의 열화특성을 나타낸 것이다. 이 결과는 식물성 절연유에서 절연지의 열화가 상대적으로 느리기 때문에 수명이 약 5~8배 증가하며, 식물성 절연유의 핫스팟 온도가 약 20℃ 이상 높더라도 동등한 한계수명을 가진다고 말하고 있다. Cooper inc.에서는 이와 같은 이유를 식물성

절연유의 높은 수분포화능력이 절연지의 수분을 흡수하여 절연지의 가수분해 열화를 감소시키기 때문이라고 설명하고 있다[6, 7].

식물성 절연유 변압기는 핫스팟 온도가 상승되어 수명이 단축되는 단점과 가수분해의 감소로 수명이 증가되는 장점을 모두 가지고 있다. 따라서 식물성 절연유를 적용한 변압기의 수명은 핫스팟 온도에 따라 증가할 수도 단축될 수도 있을 것이다. 식물성 절연유의 경우 HMWH(high molecular weight hydrocarbon)보다 점도가 낮지만, 팜유보다는 높은 특성이 있다. 식물성 절연유의 높은 수분포화 특성은 변압기 수명을 증가시키는데 장점으로 작용될 것이며, 상대적으로 높은 식물성 절연유의 점도로 인한 핫스팟 온도의 상승은 열적 스트레스를 증가시켜 수명을 감소시킬 수 있다. 핫스팟 온도는 변압기 설계사양, 부하에 따라 다르게 나타나므로, 국내 변압기에 적용할 경우 핫스팟 온도가 얼마나 상승될 것인가에 대한 검토가 필요하다.

2.3 열 유동 지배방정식

유체 중에 온도차가 존재하면 열의 이동이나 흐름이 생긴다. 열전달은 일반적으로 전도, 대류, 복사의 방식 중 하나 또는 그 이상의 방식으로 일어나며, 식물성 절연유 변압기의 내부에서 발생하는 열의 흐름은 대부분이 절연유의 순환에 의한 대류가 가장 큰 비중을 차지한다. 절연유의 순환에 의한 대류는 열 유동해석을 통해 예측할 수 있으며, 이를 통해 식물성 절연유 변압기의 내부 온도 분포를 예측할 수 있다. 변압기의 내부 유동현상 및 온도분포를 파악하기 위한 유체역학 지배방정식은 연속방정식과 운동량 방정식 그리고 에너지 방정식으로 구성되어 있다[2, 5]

연속방정식

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \tag{1}$$

운동량 방정식

x-성분 :

$$\rho(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}) = \rho g_x + \mu(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}) \tag{2}$$

y-성분 :

$$\rho(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}) = \rho g_y + \mu(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}) \tag{3}$$

z-성분 :

$$\rho(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z}) = \rho g_z + \mu(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}) \tag{4}$$

에너지 방정식

$$\rho c_p (u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z}) = k(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}) + \mu \Phi + q' \tag{5}$$

여기서, ρ 는 밀도 [kg/m^3], \vec{v} 는 유체 속도 [m/s], \vec{g} 는 중력 가속도 [m/s^2], μ 는 점성계수 [$kg/m \cdot s$], c_p 는 정적비열 [$kJ/kg \cdot K$], T 는 온도 [K], q' 는 단위체적당 외부에서 공급되는 열량 [W/m^3], k 는 열전도율 [$W/m \cdot K$], 그리고 Φ 는 소산 함수이다. 자연대류 문제에서 g_x, g_y, g_z 는 각각 좌표축 x, y, z 에 대한 \vec{g} 의 성분이다.

3. 해석방법 및 결과

3.1 해석방법

본 논문에서 적용한 변압기는 154kV 단상 전력용 변압기로 정격전압 154kV/23kV, 사용주파수 60Hz이며, 냉각방식은 OA/FA로 부하에 따라 두 단계로 조정되어 사용된다. 단상으로 운용 시에는 45/60MVA이다 권선의 재질은 구리(copper)이며, 철심의 재질은 규소강판(30PH105)을 사용하였다. 철심의 형태는 3각(leg)으로 중심철심에 권선이 감겨있는 형태의 내철형 타입이다.

그림 2와 같이 해석 모델은 대칭(symmetry)모델이기 때문에 해석시간을 줄이고 수렴성을 높이기 위해 1/2 형상만 모델링하여 해석하였다. 해석모델의 온도분포는 열원의 크기가 큰 저압권선과 고압권선을 세부적으로 모델링하였으며, 안정권선과 탭(tap)권선은 단순하게 모사하였다.

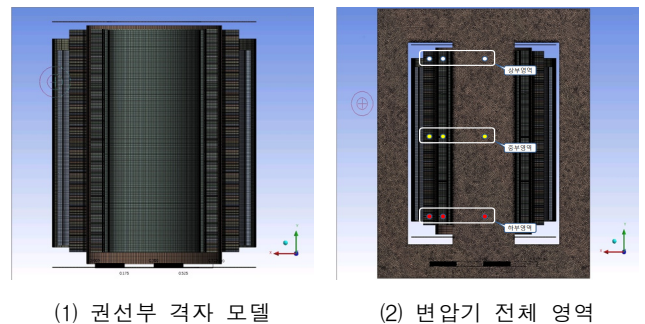


그림 2 해석 모델의 격자생성
Fig. 2 mesh generation of the analysis model

식물성절연유의 냉각을 위하여 송유풍냉식(FOA) 냉각방식을 적용하고자 유입속도와 유입온도를 변화하여 각 부의 온도 분포 및 핫스팟(hot spot) 온도와 위치 결과를 비교하였다. 이는 냉각팬을 동작하였을 경우 변압기 하부의 유입 온도가 낮아짐을, 냉각펌프가 동작하였을 경우 변압기의 하부 유입속도가 높아짐을 가정하였다. 온도상승시험을 통하여 100% 부하에서의 유입구 속도와 온도를 측정하여 측정된 값을 유입부의 기준속도 및 기준온도로 결정하고, 유입속도의 경우는 일정비율로 증가시켜 해석을 수행하고, 유입온도는 일정비율로 감소시켜 해석을 수행하였다. 표 3과 표 4는 해석모델에 적용한 유입구 속도와 온도의 비율을 나타낸 것이다. 유입구의 유입초기속도 중 1.0935 cm/s는 냉각펌프가 미동작시 절연유의 하부속도를 나타낸 것이며, 유입초기 온도의 42℃는 ONAN 100% 부하시 절연유의 하부 온도를 나타낸 것이다.

표 3 송유풍냉식(FOA) 적용을 위한 유입속도 초기 값
Table 3 The initial value of inlet velocity for FOA

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
비율[%]	100	120	140	180	220
유입초기속도 [cm/s]	1.0935	1.3122	1.5309	1.9683	2.4057

표 4 송유풍냉식(FOA) 적용을 위한 유입온도 초기 값
Table 4 The initial value of inlet temperature for FOA

	Case 6	Case 7	Case 8	Case 9	Case 10	Case 11
유입초기 온도[°C]	42	40	35	30	25	20

3.1 해석결과

그림 3은 유입속도 변화에 따른 각 부의 온도분포를 비교한 결과이다. 이는 실제 펌프를 가동하여 식물성 절연유를 강제적으로 대류 시킬 때 각부의 온도를 살펴볼 수 있는 결과이다. 이때의 유입속도의 초기 값은 표 3과 같이 case 1부터 case 5까지 값으로 고정된 후, 절연 및 온도상승에 영향을 받는 고압권선과 저압권선, 상부, 중부, 하부에서의 온도분포를 비교하였다. 유입속도가 증가하면 전체적인 온도가 감소하지만, 각 부분에 따라 그 증가되는 부분도 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

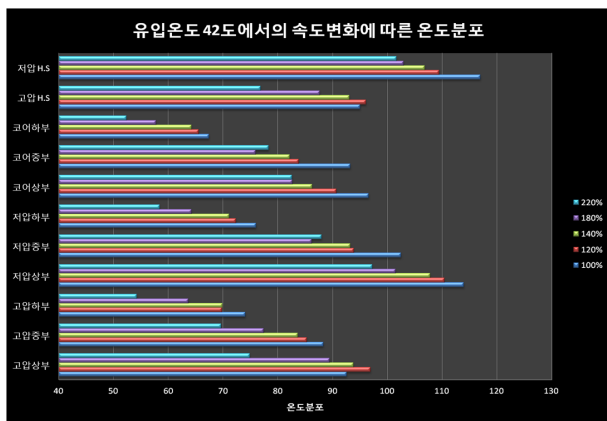


그림 3 유입속도 변화에 따른 온도해석
Fig. 3 The results of temperature analysis according to the variation of inlet velocity

그림 4는 유입온도 변화에 따른 각 부의 온도분포를 확인한 결과이다 이는 실제 냉각팬을 가동하여 식물성 절연유를 강제 냉각시켰을 때의 결과를 나타낸 것이다. 유입속도를 case 1과 case 5를 기준으로 최고속도와 최저속도의 값으로 유입온도를 표 4와 같이 case 6부터 case 11까지 변화하며 해석한 결과이다. 100% 부하에서 실측한 유입온도는 42°C이다. 실제 유입 초기온도가 감소하게 되면 전체적인 온도뿐만 아니라 핫스팟 온도가 감소하지만 그때 핫스팟온도가 발생하는 위치는 변화하는 것을 확인할 수 있었다.

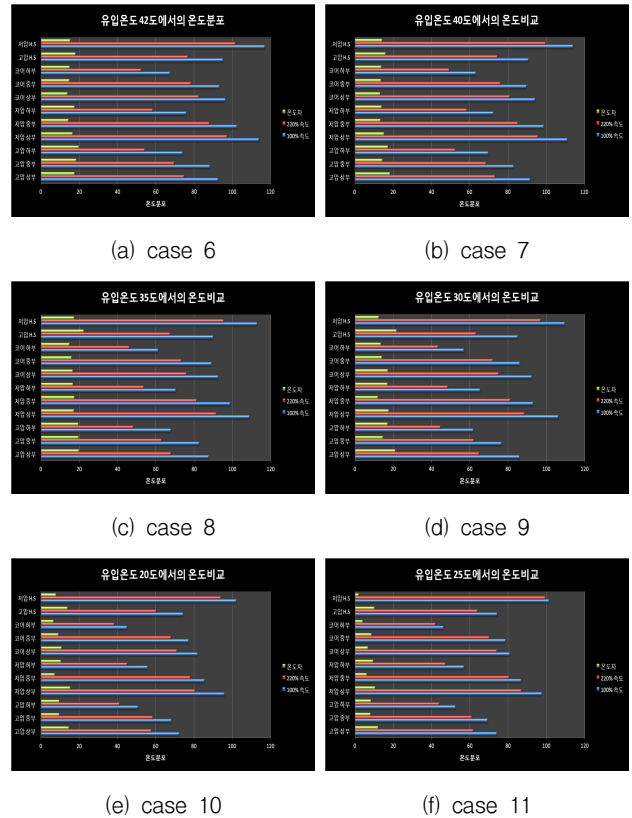


그림 4 유입온도 변화에 따른 온도해석
Fig. 4 The results of temperature analysis according to the variation of inlet temperature

그림 5는 고압권선과 저압권선의 유입온도와 유입속도의 변화에 따른 핫스팟온도를 비교한 결과이다. 전반적으로 유입온도가 높은 경우, 유입속도가 느린 경우 핫스팟온도가 발생하는 것을 확인할 수 있었으며 전반적으로 핫스팟온도가 나타나는 부분의 위치는 저압권선에서 대략 3~8 turn 사이에서 발생하였다. 유입구의 유입속도가 증가할수록 핫스팟의 위치는 상부로 올라가는 것을 해석결과를 통해 확인할 수 있었다.

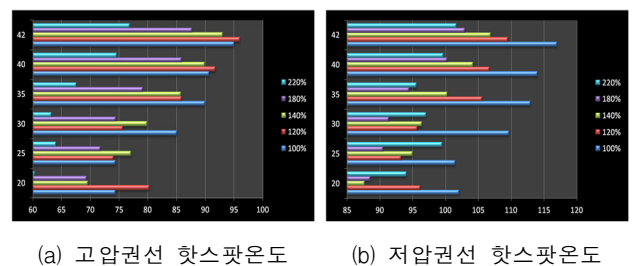
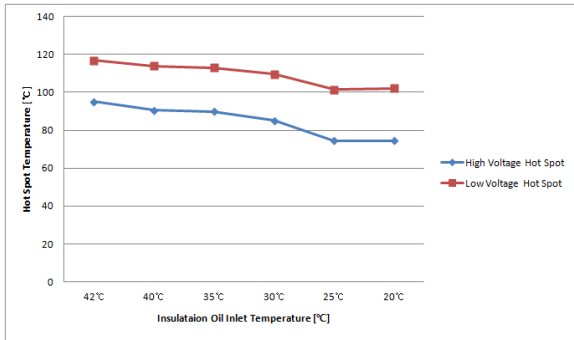


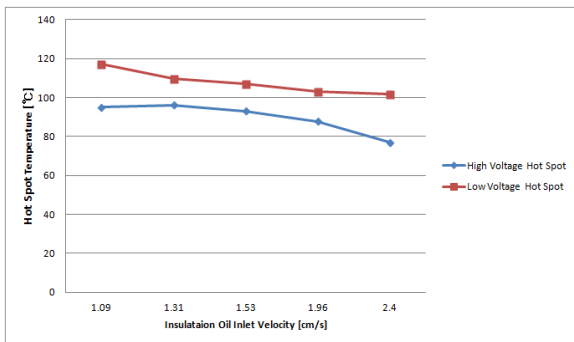
그림 5 유입온도 및 속도 변화에 따른 핫스팟온도 비교
Fig. 5 The comparison of the hot spot temperature according to the variation of inlet temperature and velocity

초기유입온도 및 초기유입속도를 기준으로 핫스팟 온도를 비교한 결과는 그림 6에 나타내었다. 냉각팬 보강에 따라

유입구의 온도는 42℃에서 20℃로 낮추었을 때 핫스팟 온도가 약 15℃의 온도가 감소되는 것을 확인할 수 있었고, 냉각펌프 동작에 따라 약 16℃의 온도가 감소되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 부하용량에 따라 온도 증가에 따라 적절한 냉각팬과 냉각펌프의 동작은 변압기의 온도를 낮추는 효과가 있을 수 있으며, 점도가 높은 식물성 절연유의 대류를 용이하게 해 줄 수 있다.



(a) 냉각팬 보강에 따른 Hot Spot 온도 비교



(b) 냉각펌프 동작에 따른 Hot Spot 온도 비교

그림 6 냉각성능 개선에 따른 Hot Spot 온도 비교

Fig. 6 the comparison of hot spot temperature according to the improvement of cooling performance

4. 결 론

식물성 절연유의 경우 높은 점도로 인하여 100% 부하에서 핫스팟(hot spot)온도가 130℃까지 상승하기 때문에 더욱 효율적인 냉각이 필요한 실정이다. 따라서 본 논문은 펌프와 팬을 사용하여 송유풍냉식의 냉각효과를 적용한 결과를 예측하기 위하여 식물성 절연유를 절연유로 사용하여 냉각펌프 및 팬을 적용한 CFD 해석을 수행하였다. 초기 유입온도와 유입속도는 100% 부하에 대한 실험결과를 바탕으로 초기 값을 설정하였다. 식물성 절연유의 점도에 의해 절연유의 순환에 영향을 주기 때문에 온도분포가 광유보다 증가하게 되고, 이에 냉각방식의 변경을 통해 온도 분포의 예측을 위하여 본 논문은 펌프 및 팬을 사용한 냉각방식을 경계조건의 변경을 통하여 결과를 얻을 수 있었다. 본 논문의 결과를 바탕으로 식물성 절연유를 사용한 변압기의 온도상승에 대한 타당성을 검토할 수 있을 것이다.

References

- [1] Kweon, D. J., Koo, K. S.. "The Characteristics of fire prevention for Less Flammable Fluid of Transformers". Proceedings of the KIIEE conference. Vol. 2010 No. 9, pp. 201-202 (2010)
- [2] K. Preis, O. Biro, G. Buchgraber, and I. Ticar, "Thermal Electro- magnetic Coupling in the Finite-Element Simulation of Power Transformers", IEEE Trans. Magnetics, vol. 42, no.4, pp. 999-1002, (2006)
- [3] Ahn, H. M., Oh, Y. H., Hahn, S. J., "Heat Transfer Analysis of Coupled Electromagnetic-Thermal Field for Power Transformer". Trans. of the KIEE, Vol.58 No.11, pp.2155-2161. (2009)
- [4] Kim, J. H., Kim, Y. M., Ro, K. C.. "Analysis of transformer sheet winding losses and temperature rise" Proceedings of the KIEE conference. Vol. 2005, No.10, pp. 23-25. (2005)
- [5] J. Smolka, A. J. Nowak, Luiz C. Wrobel, "Numerical modeling of thermal processes in an electrical transformer dipped into polymerized resin by using commercial CFD package Fluent,". Computers & Fluids, Vol. 33, pp.859~868 (2004)
- [6] IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Natural Ester Fluids in Transformers, IEEE Std C57.147 (2008)
- [7] Z. Wang et. al., "New Insulation Fluids : Use of Environmentally Friendly Fluids in Power Transformers", CIGRE, 2007

저 자 소 개



김 지 호 (金 志 濂)

2004년 숭실대 전기공학과 졸업. 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 (주) 에너테크 연구소장



이 향 범 (李 亨 範)

1989년 서울대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1995~1996년 기초전력공학공동연구소 전임연구원. 1996~1998년 군산대학교 전기공학과 전임강사. 1998년~현재 숭실대학교 전기공학부 교수