Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 39, No. 4 pp. 449~455, 2015
J. Korean Soc. of Marine Engineering (JKOSME)
http://dx.doi.org/10.5916/jkosme.2015.39.4.449

ISSN 2234-7925 (Print)
ISSN 2234-8352 (Online)
Original Paper

변압기용 ONAF 방식 방열기의 팬 배치에 따른 냉각특성 연구

김국겸[1] · 서용권[2] · 강상모†

(Received December 29, 2014 ; Revised April 16, 2015 ; Accepted May 19, 2015)

Numerical Study of the Effect of Fan Arrangement on the Cooling Performance of the ONAF Type Radiator for Power Transformer

Kuk-Kyeom Kim[1]· Yong Kweon Suh[2]· Sangmo Kang†

요약: 전력용 변압기 용량의 증대와 고효율화에 따른 권선의 단위체적당 열발생량의 증가 및 이에 따른 절연성능의 저하는 전력용 변압기의 수명과 신뢰성에 큰 영향을 준다. 이러한 문제점은 방열기의 냉각성능을 증가시킴으로써 해결이 가능하다. 본 연구는 ONAF(Oil Natural Air Forced) 형식의 변압기의 방열기에 대해 공기의 강제대류를 일으키는 팬의 위치에 따른 냉각성능 평가를 통하여 냉각효과가 가장 큰 팬의 위치를 찾기 위한 것이다. 해석에는 유동해석 상용소프트웨어를 사용하였으며, 해석시간의 단축을 위하여 오일의 냉각유로를 단순화시켰고 팬의 지름을 일정하게 두고 팬의 위치를 다양하게 변화시켜가며 해석을 실행하였다. 해석 결과 팬의 수직적인 위치 변화는 냉각성능에 크게 영향을 주지 않았으나 팬이 변압기의 전방영역에 위치할 경우 후방영역의 배치보다 온도강하가 큰 것을 확인할 수 있었다.

주제어: 변압기, ONAF 형식 방열기, 강제대류, 냉각성능, 팬 배치

Abstract: Owing to the trend of an increase in capacity and high-efficiency requirement, the life and reliability of power transformer depend significantly on the amount of heat generation per unit volume and the degradation of insulation oil. These problems can be solved by enhancing the cooling performance of the radiator. The purpose of this study was to find a suitable position of fans for a better cooling effect given by the forced-convection of air in an ONAF (Oil Natural Air Forced) type transformer. In the simulation, commercial software was used for flow analysis, and the cooling passage of the oil was simplified to shorten the time taken for computation. With the diameter of the fan fixed at a constant value, the analysis was performed only by changing the position of the fans. As a result, a vertical position change of the fans does not affect the cooling performance significantly. However, the temperature drop given by the fans positioned on the front region of the transformer is larger than that on the rear region.

Keywords: Transformer, ONAF type radiator, Forced-convection, Cooling performance, Fan arrangement

1. 서 론

최근 전력사용의 증가에 따른 전력계통 부하의 급증으로 인해 변압기 용량이 증가되고 있으며, 더불어서 온도상승으로 의한 과열문제가 대두되고 있다. 변압기의 온도상승은 내부 절연물의 수명을 단축시키고, 허용온도를 초과하게 되면 내부의 압력상승으로 인하여 변압기의 폭발을 초래할 수도 있다. 또한, 원자재 가격의 상승으로 방열기의 사이즈를 키우지 않는 조건에서 효율적인 냉각시스템을 고안할 필요성이 대두되고 있다.

변압기란 전자유도 작용으로 배전전압을 부하에 적당한 전압으로 높이거나 낮추거나 또는, 전류의 값을 바꾸는데 사용되는 기기이다. 전원에 연결되는 1차 권선과 부하에 연결되는 2차 권선은 같은 철심 주위에 감겨있다. 대용량 변압기에서는 방열이 잘되도록 변압기의 몸체인 탱크의 외부에 절연유(mineral oil)의 순환을 통하여 냉각될 수 있도록 파이프나 방열기를 설치하며, 팬(fan)을 장착하여 강제대류의 효과를 증가시켜 방열효과를 높이는 방식도 존재한다.

이러한 변압기용 방열기는 방열 방식에 따라 크게 2가지로 분류된다. 내부 절연유와 주위 공기의 자연대류를 통하여 발생한 열을 대기 중으로 방출시키는 ONAN(Oil Natural

† Corresponding Author (ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8152-185X): Department of Mechanical Engineering, Donga-A University, 37 Nakdong-daero 550beon-gil, Saha-gu, Busan, Korea, E-mail: kangsm@dau.ac.kr, Tel: 051-200-7636
1 Department of Mechanical Engineering, Donga-A University, E-mail: wickedness1@nate.com, Tel: 051-200-6982
2 Department of Mechanical Engineering, Donga-A University, E-mail: yksuh@dau.ac.kr, Tel: 051-200-7648

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright ⓒ The Korean Society of Marine Engineering

Air Natural) 냉각방식과 방열기에 팬을 설치하여 공기의 강제대류 효과를 이용하는 ONAF(Oil Natural Air Forced) 냉각방식이 있다**[1]**. 본 논문은 ONAF형식의 방열기에서 팬의 배치에 따른 냉각특성을 연구한 것이며, 본 연구의 목적은 팬의 배치에 따라 냉각성능을 비교하여 높은 효율을 낼 수 있는 배치방법을 찾는 데 있다.

2. 수치해석 방법

2.1 해석 형상

유동해석에는 상용프로그램인 ANSYS CFX를 사용하였다. 해석용 모델은 다음과 같은 단순화 방침에 따라 형성하였다. 첫째로, 기하학적으로 최대한 단순한 형상을 생성하여 격자의 신뢰성과 해석시간의 감소를 얻고자 하였으며, 둘째로, 방열기에로의 공기공급은 단순히 팬 크기의 원형 단면을 설정하여 팬의 사양에 부합하는 유량을 산정하여 유량조건으로 부여하였다. 실제는 팬의 회전에 따른 스월 효과가 예상되지만 문제의 단순화를 위하여 고려하지 않았다. 방열기의 설계에 있어 1조(multi-fin)란 핀(fin)이 여러 개 모여 한 개의 그룹을 이루는 단위를 의미한다. 본 논문에서는 20개의 핀을 가지는 조 단위의 방열기를 구현하여 그곳에 설치된 팬을 통한 강제대류를 구현하고자 하였다**[2]**.

일반적인 대용량 방열기의 길이는 2000~4000mm, 폭은 대체적으로 520mm를 사용한다**[3][4]**. 본 연구에서는 방열기의 폭은 520mm로 취하며 길이는 해석 시간의 단축을 위하여 2000mm로 선정하였다. 그리고 핀의 단면 형상은 실제로는 냉각성능 증대를 위해 유로 상에 돌출부를 두고 있으나 직사각형의 단순한 모양으로 생성하였고, 변압기 내, 외부의 불필요한 형상들을 생략하여 최종 모델을 생성하였다. 본 연구의 목적이 팬의 배치에 따른 냉각성능의 경향파악에 중점을 두는 것이므로 이러한 단순화는 타당성을 가진다. **Figure 1**은 방열기의 일반적인 구조를 나타낸 것이며, 해석에 적용된 모델의 형상은 **Figure 2**에 나타내었다.

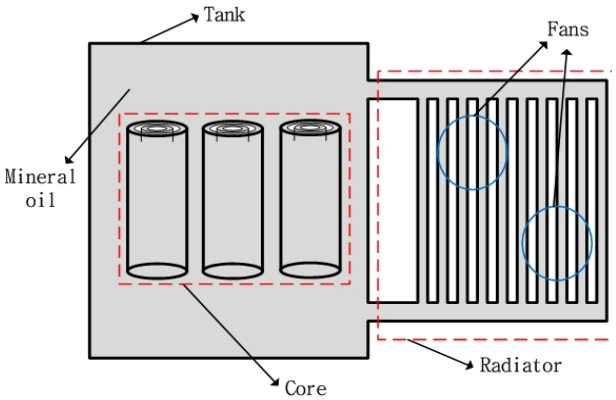
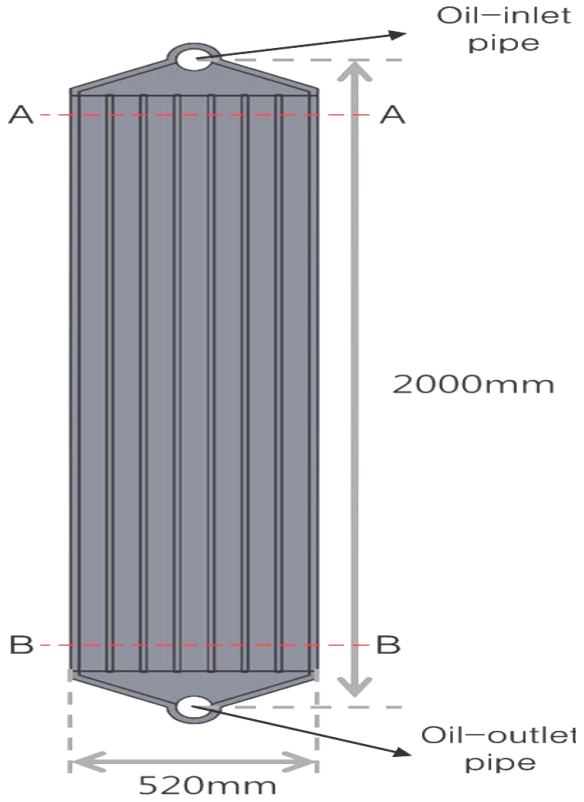
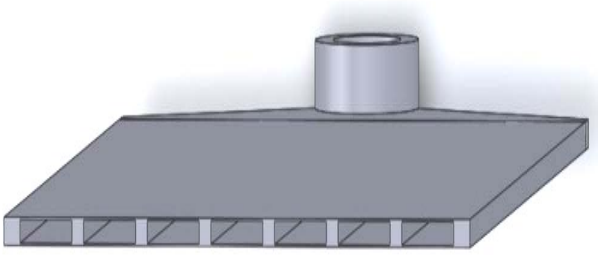


Figure 1: Sketch of the key elements an electric transformer and cooling radiator



(a) Front view of a fin



(b) Perspective view of the inner passage of a fin cut

Figure 2: Simplified fin model for ONAF type radiator. Cross-sections A-A and B-B denote the vertical locations of the sections where the numerical data is presented in Section 3.

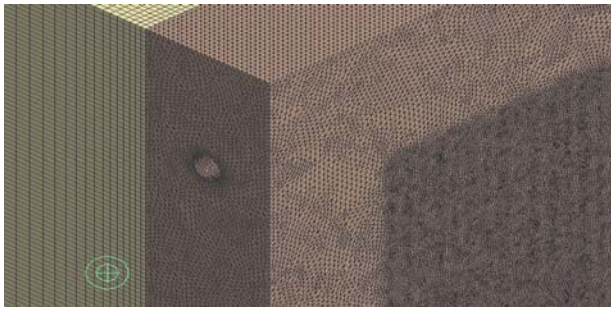
2.2 격자생성

격자의 생성은 CFX 자체 격자 생성프로그램을 사용하였다. 해석용 도메인(domain)은 절연유(oil), 금속(solid), 공기(air) 이렇게 3개로 나뉜다. 격자생성의 용이함을 위하여 형상의 유사성이 큰 절연유와 금속 도메인을 하나로 묶었으며, 공기 도메인은 따로 나누어 격자를 생성하였다. 절연유와 금속 도메인은 중심을 기준으로 상하, 좌우 대칭성을 띠고 있으므로 1/4모델만 격자작업을 진행하였다.

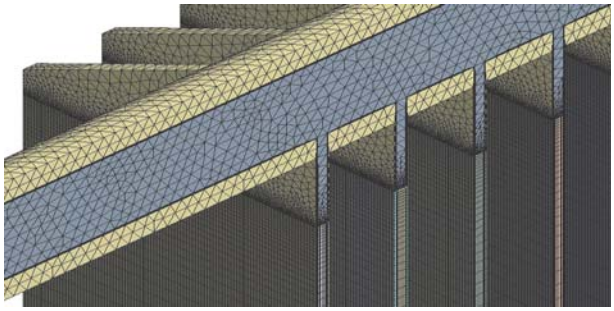
절연유 도메인은 특히 금속 도메인과 접하는 부분의 얇

은 경계층에서 유동과 열전달 관련 변수의 변화가 클 것이기 때문에 벽면에 격자를 집중시키기 편리한 육면체격자(hexa mesh)를 사용하여 벽면과의 열전달 특성에 신뢰성을 높일 수 있도록 하였다; 벽면 가까이 가장 작은 격자의 경우 그 크기는 0.4mm 정도이다. 공기 도메인은 방열기 가까이 있는 영역과 그 외의 영역을 분리하여 서로 다른 조밀도로 격자계를 형성하였다. 즉 방열기와 접해있는 영역은 신뢰성 확보를 위하여 프리즘 격자(prism mesh)를 이용하여 격자를 조밀히 생성하여 유동의 정밀한 해를 얻고자 하였으며, 팬과 다소 거리가 먼 영역은 육면체 격자를 이용하여 거리에 따라 격자의 수를 감소시켰다. 금속 도메인은 절연유와 공기 도메인보다는 격자의 수에 민감하지 않으므로 프리즘 격자를 이용하여 최소의 격자수로 격자망을 구성하였다.

해석에는 총 2600만개의 격자(element)가 사용되었으며, 공기 도메인에 1100만개, 절연유와 금속 도메인에 1500만개가 사용되었다. **Figure 3 (a)** 과 **(b)**는 해석에 사용된 격자의 형상을 나타낸 그림이다.



(a) Air domain



(b) Oil and solid domain

Figure 3: Typical surface meshes.

2.3 재료의 물성치와 경계조건

Table 1은 해석에 사용된 절연유(광유, mineral oil)의 75℃의 물성치를 나타낸다.

Table 1: Properties of mineral oil

Specific heat(C_p)	2060 [J/(kg K)]
Density(ρ)	846 [kg/m^3]
Dynamic viscosity(μ)	0.0032 [kg/(m s)]
Thermal conductivity(k)	0.127 [W/(m K)]

해석에 사용한 절연유의 주요 물성치는 다음과 같은 온도의 함수를 통하여 구하였다**[5]**.

$$
\begin{aligned}
k &= 0.15217 - 7.16\times10^{-5}\,T \\
\rho &= 1067.75 - 0.6376\,T \\
\mu &= 0.00213 + 38657\exp(-T/19.96) \\
C_p &= 821.19 + 3.563\,T
\end{aligned}
\tag{1}
$$

절연유의 입구에서의 온도는 75℃로 유입되게 하였다**[5]**. 공기 도메인은 30℃를 기준으로 작동유체를 선정하였다. 기준온도를 다소 높은 온도인 30℃로 설정한 이유는 다음과 같다. 공기 온도가 충분히 낮으면 팬의 도움 없이 자연대류만으로도 변압기의 냉각이 가능하다. 공기의 온도가 높아질수록 팬에 의한 강제대류 효과를 더욱 필요로 하므로 이러한 환경을 구현하기 위하여 일반적인 대기의 온도보다 다소 높은 온도인 30℃를 택한 것이다. 그리고 금속은 알루미늄(aluminum)으로 선정하였고 해석프로그램에서 제공되는 물성치를 사용하였다; 예를 들면, 열전도도는 237W/mK로 설정하였다.

해석모델은 절연유도메인에서는 층류(laminar)를 적용하였고, 공기도메인에서는 표준 $k-\epsilon$모델에 의한 난류를 적용하였다**[6]**. 팬은 California, Inc.에서 제공되는 팬의 사양을**[7]** 기준으로 설정하였다: 대용량 변압기에 흔히 이용되는 사양으로서(날개 수는 5개), 직경은 600mm로 선정하여 해석에 적용시켰다. 공기 도메인에서 팬 영역을 제외한 나머지 영역은 오프닝(opening)조건을 부여하여 유체의 유입과 유출이 가능하도록 설정하였다.

최종적으로 도메인의 구성과 경계조건을 적용한 해석에 사용된 모델의 구성은 **Figure 4**에 나타내었고, 주요 경계조건은 **Table 2**에 나타내었다.

Table 2: Boundary and initial conditions

Oil	Inlet	0.6kg/s
	Outlet	0 Pa
	Initial temperature	75℃
Air	Mass flow rate in each fan	2.65 kg/s
	Opening temperature	30℃

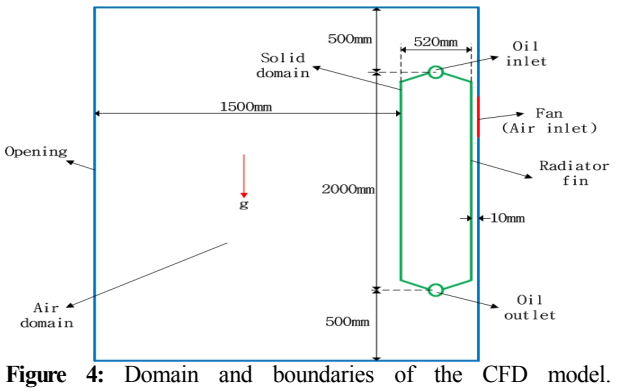


Figure 4: Domain and boundaries of the CFD model. Detailed oil domain within the radiator fins is not shown

3. 결과 및 고찰

3.1 압력 분포

팬을 부착하지 않은 경우의 수치해석 결과로서 **Figure 5**는 방열기 전체 영역에서의 전압력 분포를 보인 것이다. 전압력은 위쪽의 유입관에서부터 각 핀으로 유체가 유입되면서 손실로 인하여 전압력이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 한편, 핀 내부에서의 전압력을 관찰한 결과 전방에 위치한 핀(낮은 핀 번호 : **Figure 5**의 하단 참조)에서 전압력이 낮고, 후방의 핀으로 갈수록 점차 전압력이 증가한다. 그 이유는 전방에 위치한 핀일수록 핀 내부 유속이 커서 유입관에서의 유입 손실이 후방의 핀에 비해 크기 때문인 것으로 짐작된다. **Figure 6**은 유입부에서 5mm 아래(A-A 단면), 유출부에서 5mm 위(B-B 단면) 지점(**Figure 2(a)** 참조)에서의 각 핀의 단면평균 전압력과 더불어 유입관로 및 유출관로의 축을 따르며 측정한 단면평균 전압력을 그래프로 그린 것이다. 유입관과 유출관에서의 전압력은 예상대로 상류에서 높고 하류에서 낮은 분포를 보인다. 이에 따라 전방에 위치한 핀 내부의 압력강하가 후방 핀 보다 더 크다.

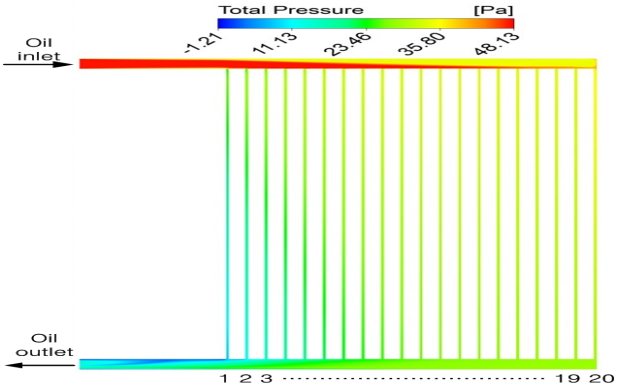


Figure 5: Contour of the total pressure in the oil passage without fans. Numbers on the bottom refer to the identities of 20 fins.

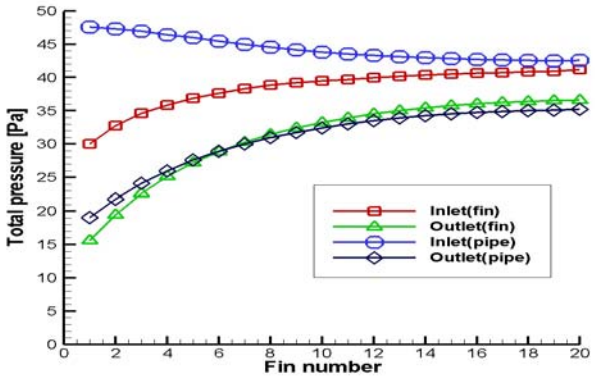


Figure 6: Total pressure distributions versus fin number (refer to **Figure 4**) in each fin without fans. The total pressure was obtained on the inlet section of fins (A-A ; squares), outlet section of fin s(B-B ; triangles), and along the corresponding sections of the inlet pipe (circles) and outlet pipe (diamonds).

3.2 속도 분포

Figure 7의 유속분포를 보면 유입관에서는 후방 핀으로 갈수록 속도가 점점 느려지고, 유출관에서는 전방 핀으로 갈수록 절연유들이 모여들기 때문에 유속이 점차 커지는 것을 확인할 수 있다. 그리고 각각의 핀 내부에서의 유속은 전방의 핀일수록 내부의 절연유의 속도가 빠르며, 가장 끝단의 핀으로 갈수록 속도는 점점 느려지는데 그 이유는 앞서 설명한 바와 같이 후방 핀일수록 유입 및 유출관로 사이의 압력강하가 상대적으로 적기 때문이다. **Figure 8**은 각 핀에서의 평균속도를 그래프로 나타낸 것이다. 핀 번호 1의 유속은 핀 번호 20의 유속의 3배 정도임을 확인할 수 있다.

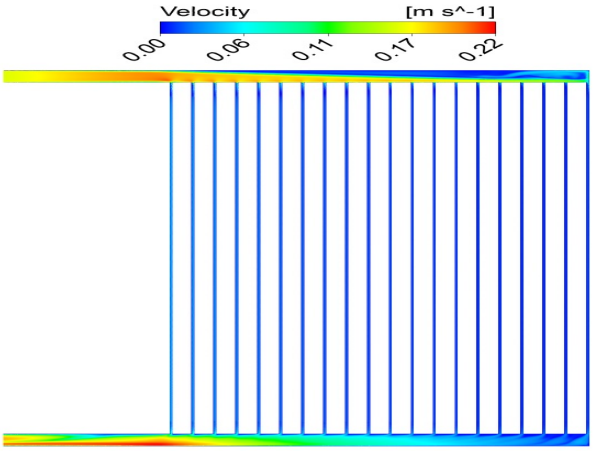


Figure 7: Contour of the velocity in the oil passage without fans

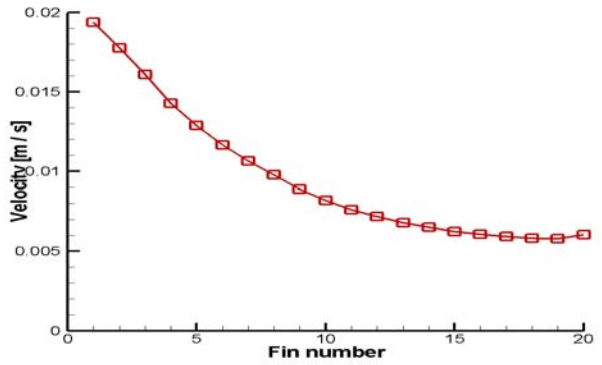


Figure 8: Velocity distribution versus fin number without fans. The velocity was obtained on the inlet section(A-A) as shown in **Figure 2 (a)**

3.3 팬이 없을 경우의 전열특성

유입 및 유출관로를 포함한 전체 유동장의 온도분포는 **Figure 9**에 나타내고 각 핀의 내부(B-B 단면, **Figure 2 (a)** 참조)에서의 평균온도는 **Figure 10**에 나타냈다. 해석결과에서 볼 수 있듯이 입구에서 멀어지는 후방 핀일수록 온도감소 효과가 더욱 높은 것을 볼 수 있다. 이는 유속분포에서 언급한 것처럼 후방의 핀에서 속도가 작아져서 냉각시간이 증가되기 때문이다. 각 핀에서의 출구온도를 평균하면 72.

4℃이며, 온도감소(temperature drop)는 2.6℃가 냉각되어 출구부에서 유출되는 것을 확인하였다.

자연대류만을 이용하여 방열기를 냉각할 시에는 핀을 길게 제작하여 절연유가 냉각될 수 있는 시간을 늘려 온도감소를 더욱 늘려주나 본 해석에서는 해석 시간의 단축을 위하여 핀의 길이를 짧게 생성 하였으므로 매우 낮은 냉각효과를 보이고 있다. 본 해석은 이후 팬을 배치하여 강제대류 효과를 추가하였을 시의 냉각성능과 비교하기 위한 목적으로 수행한 것이다.

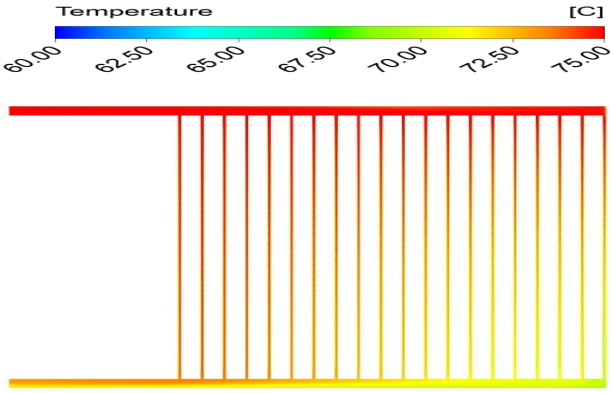


Figure 9: Contour of temperature in the oil passage without fans

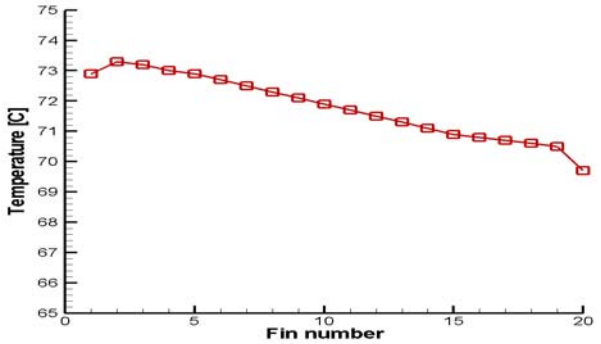


Figure 10: Temperature distribution at section B-B (**Figure 6**) versus the fin number without fans

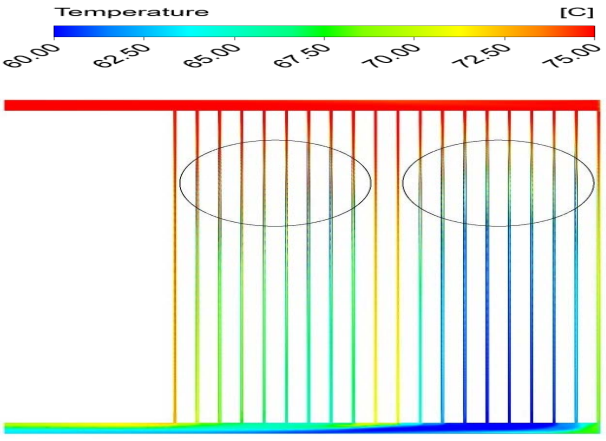
3.4 두 개의 팬을 설치한 경우의 전열특성

같은 용량의 공기 팬을 두 개 설치한 경우의 강제대류 효과를 주어 수치 해석한 결과를 제시하고 검토한다. 해석에 적용한 팬의 배치방법은 상단(top), 하단(bottom), 전면(front), 후면(rear) 그리고 중앙(middle) 이렇게 5가지로 구분하여 해석을 진행하였다. 여기서 중앙배치라 함은 20개의 핀을 기준으로 하여 중앙에 있는 핀들에 팬이 상하로 배치된 것을 말한다. 그리고 설치한 팬의 위치를 1번 핀의 중심점을 기준으로 하는 좌표 (X, Y)로 나타내면, 상단은 (0.315, 0.5)[m]와 (1.015, 0.5)[m]의 위치에, 하단은 (0.315, -0.5)[m]와 (1.015, -0.5)[m]의 위치에 2개의 팬의 중심이 놓이도록 배치하였고, 전방은 (0.315, ±0.5)[m], 중앙은 (0.665, ±0.5)[m], 후방은 (1.015, ±0.5)[m]의 위치에 각각 2개의 팬의 중심이 놓이도록 배치하였다. 모든 해석에서 팬의 직경은 600mm, 각 팬의 공기 유량은 2.65kg/s로 설정하였다.

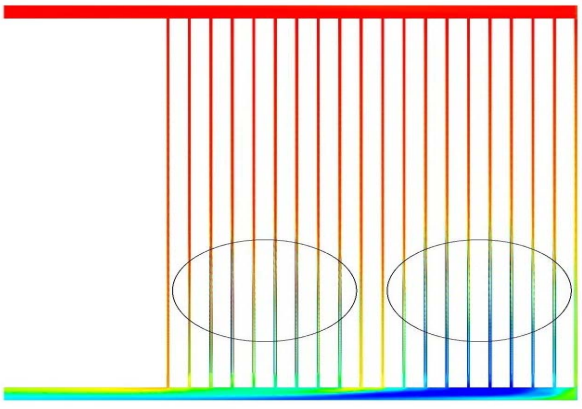
3.4.1 상, 하단 배치

상, 하단에 팬을 배치하였을 경우 전체 온도분포는 **Figure 11**에 나타내었고, 각 핀에서의 평균온도를 단면 B-B상에서 나타낸 것이 **Figure 12**이다. 상단 배치의 경우 유출관의 출구에서의 평균온도는 65.8℃, 하단배치의 경우 65.9℃로 각각 9.2℃, 9.1℃의 온도감소를 보였다. 자연대류만을 이용한 냉각보다 약 6.6℃가 높은 온도감소 효과를 보였다.

상, 하단의 2가지 배치의 효과를 상호 비교하였을 때 0.1℃의 차이를 보이므로, 냉각성능은 비슷한 것을 알 수 있다. 따라서 팬의 배치를 수직적으로 달리 하는 것은 냉각성능에 미치는 영향이 적다는 것을 판단 할 수 있다. 그리고 각 핀의 출구에서의 평균온도를 보인 **Figure 12**에 의하면 전방에 위치한 팬의 냉각효과 보다는 후방에 위치한 팬의 냉각효과가 더 크다는 것을 확인할 수 있다. 이 또한 핀 내부에서의 유속의 차이 때문이라 판단된다. 하지만, 후방의 핀에는 적은 유량이 유입되어 온도강하는 크지만 냉각용량은 전방의 핀과 비교하여 상대적으로 적다는 것을 확인하였다.



(a) Top arrangement of fans



(b) Bottom arrangement of fans

Figure 11: Contour of temperature with (a) top and (b) bottom arrangement of fans

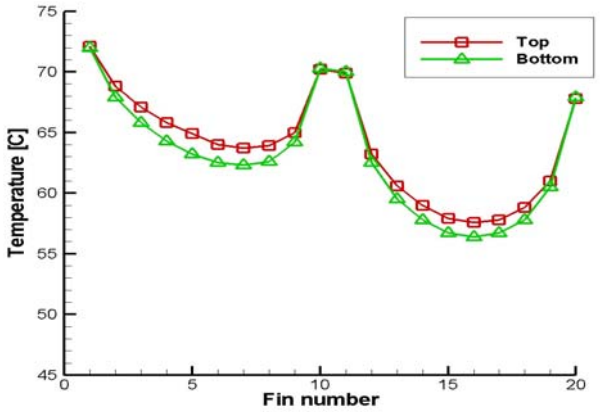


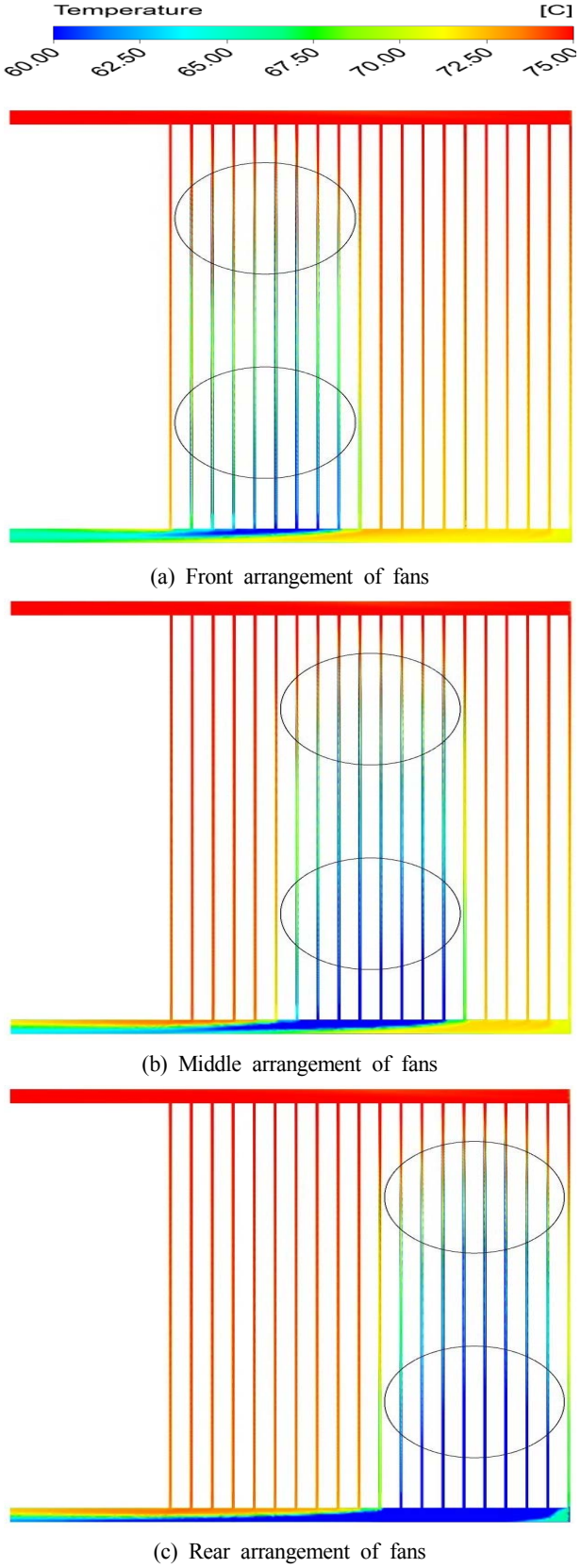
Figure 12: Temperature distribution at section B-B versus the fin number with the top and bottom arrangement of fans

3.4.2 전방, 중앙, 후방 배치

Figure 13은 전방, 중앙, 후방에 팬을 배치한 경우의 전체 영역에 걸친 온도분포를 나타낸 그림이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 팬이 배치된 위치의 핀에서 절연유의 냉각효과가 큰 것을 확인할 수 있다. 그리고 유출관의 출구단면에서의 온도분포를 보면 전방 팬 배치에서 온도분포가 더욱 균일한 것을 볼 수 있고, 후방배치에서는 유출관로의 출구단면의 위쪽이 전방에 위치한 핀으로부터의 고온 유체가, 아래쪽이 후방에 위치한 핀으로부터의 저온 유체가 자리잡고 있다. 팬을 설치하지 않은 경우에서도 **Figure 10**에서와 같이 후방의 핀들이 더 잘 냉각되었고 여기에 후방에 팬을 설치함으로써 전방과 후방에서의 냉각효과는 더욱 심화되었기 때문에 이러한 성층화 현상이 발생한 것으로 이해할 수 있다.

Figure 14는 전방, 중앙, 후방 배치의 경우에 있어서 각 핀의 출구부에서의 평균온도를 나타낸 그림이다. 팬이 부착되어 있는 부분에서의 온도감소 효과가 높은 것을 확인할 수 있다. 전방배치와 후방배치를 비교하면 후방배치의 경우가 온도감소효과가 큰 것을 확인할 수 있는데, 이는 앞에서 설명한 바와 같이 후방 핀일수록 유속이 느려 냉각효과가 더욱 커지기 때문이다. 그러나 냉각용량은 온도감소에 덧붙여 유량도 같이 고려해야 하므로 **Figure 14** 만으로는 판단할 수 없다.

냉각용량의 비교는 결국 유출관의 출구단면에서의 평균온도를 비교함으로써 가능하다. 수치해석 결과를 보면, 전방배치의 경우 출구에서 평균온도는 65.4℃로 9.6℃의 온도감소를, 중앙은 67℃로 8℃의 온도강하를, 후방은 67.3℃로 7.7℃의 온도강하를 보였다. 이로부터 전방배치의 경우가 냉각용량이 더 큰 것을 확인할 수 있다. 정리하면, 전방배치인 경우 핀 내부에서의 온도강하는 더 작지만 유량이 더 많기 때문에 냉각용량은 후방배치보다 더 커서 유출관에서의 출구에서 평균온도는 전방배치의 경우가 더 낮은 것이다.



(a) Front arrangement of fans

(b) Middle arrangement of fans

(c) Rear arrangement of fans

Figure 13: Contour of temperature with (a) front, (b) middle and (c) rear arrangement of fans

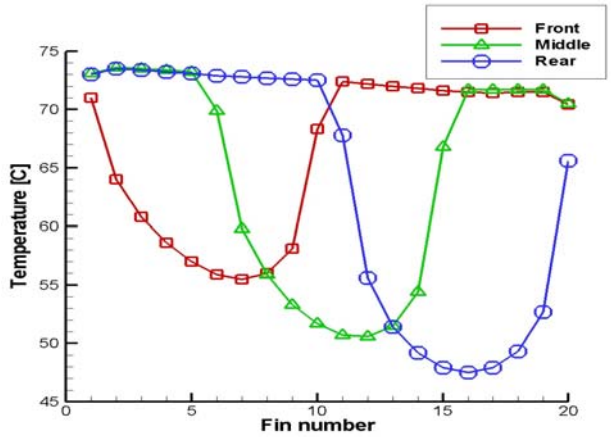


Figure 14: Temperature distributions at section B-B versus the fin number with front, middle and rear arrangement of the fans

3.4.3 팬 배치에 따른 온도감소 - 정리

최종적으로 각각의 배치에 따른 온도감소 효과(즉, 유입관로의 유입단면과 유출관로의 유출단면의 온도 차이)를 **Figure 15**에 나타내었다. 자연대류만을 고려하였을 시 온도강하는 매우 낮아 냉각성능이 많이 낮으며, 팬을 통하여 강제대류효과를 더해줌으로써 냉각성능이 향상 되는 것을 확인할 수 있다.

각각의 팬의 배치를 비교하였을 때 팬을 후방에 배치하는 경우가 온도감소효과가 가장 낮았으며 팬의 배치를 전, 후방으로 변화시키며 중앙, 전방으로 갈수록 온도감소 효과가 상승하는 것을 알 수 있다. 그리고 상단배치와 하단배치는 전방배치보다 다소 낮은 온도감소를 보이지만 후방, 중앙 배치 때 보다 약 1℃이상 더 높은 온도감소효과가 있는 것을 확인할 수 있다.

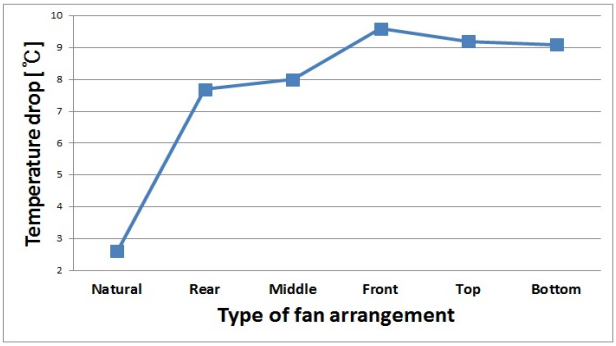


Figure 15: Temperature drop of each fan arrangement

4. 결 론

본 연구에서는 대용량 변압기에 사용되는 방열기의 팬의 배치방식에 따른 냉각성능을 비교해석 하였으며, 해석결과를 고찰한 결과는 다음과 같다.

(1) 유입관로와 유출관로 상에서 전압력은 상류가 하류보다 더 큰 분포를 보이며, 이에 따라 전방에 위치한 핀의 전압력강하가 후방에 위치한 핀보다 더 커서 핀을 통한 절연유의 유속도 전방 핀이 더 큰 특징을 보인다.

(2) 외부공기의 자연대류에 의한 열전달 수치해석결과, 핀 내부 절연유의 유속차이로 인하여 후방 핀에서의 온도강하가 전방보다 더 크며, 유입관로의 유입면과 유출관로의 유출면 사이의 온도강하는 2.6℃정도로 예측되었다.

(3) 팬을 배치하여 강제대류의 영향을 주었을 때는 자연대류만을 고려하여 해석한 결과보다 온도강하는 약 6~7℃ 이상의 차이를 보였다.

(4) 팬의 배치는 상하 변화보다는 전, 후방변화에서 더 큰 냉각효과를 기대할 수 있으며, 내부 유속이 빠른 전방의 핀일수록 강제대류의 효과를 통한 냉각이 더욱 효과적이다.

후 기

본 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20134010200550)입니다.

References

[1] J. K. Seong, M. J. Choi, S. G. Woo, B. S. Baek, and J. S. Hur, “Evaluation of the cooling capacity for oil immersed transformer radiator using numerical analysis,” Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers Autumn Conference, pp. 61-65, 2012 (in Korean).

[2] H. J. Kim, S. W. Yang, W. S. Kim, K. Y. Kweon, and M. J. Lee, “Cooling characteristic analysis of transformer’s radiator,” Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers Spring Conference B, pp. 1920-1925, 2007 (in Korean).

[3] Darshal Engineering Works, http://www.darshalradiators.com/power-transformer-radiator.html, Accessed March 10, 2014.

[4] S. M. Cho and C. S. Kim, “Classical approach and CFD analysis for calculating radiator efficiency for power transformer,” Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers Autumn Conference, pp. 2733-2738, 2010 (in Korean).

[5] H. S. Kim, M. G. Kim, and J. K. Kim, “Analysis of the cooling characteristic for the radiator in a large power transformer,” Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers Autumn Conference, pp. 1678-1683, 2011 (in Korean).

[6] ANSYS CFX, Solver Theory Guide, Released 13, ANSYS Inc., 2011.

[7] California Turbo, Inc., http://www.californiaturbo.com/cfm_features.htm, Accessed March 12, 2014.