

히트싱크의 자연대류 열유동 특성 분석[§]

정태성^{*†} · 강환국^{**}

* 인하공업전문대학 기계설계과, ** (주)루티마

Investigation of Natural Convective Heat Flow Characteristics of Heat Sink

Tae Sung Jung^{*†} and Hwan Kook Kang^{**}

* Dept. of Mechanical Design, Inha Technical College,

** Lutima Co. Ltd.

(Received June 19, 2012 ; Revised October 4, 2012 ; Accepted October 11, 2012)

Key Words: Heat Sink(히트싱크), Natural Convection(자연대류), Heat Transfer(열전달), Correlation(상관식), Numerical Analysis(수치해석), Installation Direction(설치방향), Nusselt Number(누셀 수), Rayleigh Number(레이리 수)

초록: 제품의 성능 및 신뢰성 향상을 위하여 효과적이고, 적절한 방열장치의 중요성이 지속적으로 부각되고 있다. 현재 가장 널리 쓰이는 방열장치는 알루미늄 압출식 평행핀 형상의 히트싱크(heat sink)로 이의 설계를 위해서는 방열량과 최대 허용온도 등에 대한 목표가 결정되어야 하며, 사용 환경 및 설치 방법에 따른 열전달 계수의 예측이 이루어져야 한다. 본 연구에서는 히트싱크의 베이스가 수직, 수평상태를 유지함에 따라 나타나는 핀 주변의 자연대류 유동 특성을 전산모사 해석을 통해 고찰하였다. 또한, 일반적인 자연대류형 히트싱크를 대상으로 수평 및 수직상태에서의 열적 성능 실험을 수행하였으며, 기존의 연구결과와 비교함으로써 설치방향이 히트싱크 방열성능에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 실험결과 수평상태의 경우는 수직인 경우에 비하여 약 10~15% 열전달 계수의 감소가 발생하였다.

Abstract: To ensure proper functioning of electrical and mechanical systems, cooling devices are of great importance. A heat sink is the most common cooling device used in many industries such as the semiconductor, electronic instrument, LED lighting, and automotive industries. To design an optimal heat sink, the required surface area for heat radiation should be calculated based on an accurate expectation of the heat flow rate in the target environment. In this study, the convective heat flow characteristics were numerically investigated for a vertically installed typical heat sink and a horizontally installed one in free convection using ANSYS CFX. Comparative experiments were carried out to reveal the quantitative effect of the installation direction on the cooling performance. Moreover, the result was analyzed using the dimensionless correlation with the Nusselt number and Rayleigh number and compared with well-known theories. Finally, it was observed that the cooling performance of the vertically installed heat sink is approximately 10~15% better than that of the one in natural convection.

- 기호설명

Nu : 누셀 수
Ra : 레이리 수
Pr : 프렌틀 수
Gr : 그라스호프 수

L : 특성길이 [m]
A : 방열면적 [m²]
T : 온도 [°C]
q : 열유속 [W/m²]
h : 대류 열전달계수 [W/m²K]
k : 열전도도 [W/mK]
g : 중력가속도 [m/s²]
α : 열확산율 [m²/s]
β : 체적 팽창 계수 [K⁻¹]
υ : 운동 점성 계수 [m²/s]

§ 이 논문은 2012년도 대한기계학회 생산 및 설계공학부문 춘계학술대회(2012. 6. 26.-27., 대전컨벤션센터) 발표논문임.

† Corresponding Author, tsjung@inhac.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서 론

각종 기계 및 전기전자 기기에서 온도 증가는 제품의 오작동 및 고장발생률을 급격히 증가하고 수명을 감소시키는 주요 요인으로 제품의 성능 및 신뢰성향상을 위하여 효과적이고, 적절한 방열장치의 중요성이 지속적으로 부각되고 있다.⁽¹⁾

현재 가장 보편화된 방열장치는 베이스로부터 전달된 열을 전열면적 확장용 핀(fin)을 통해 대기로 방출하는 압출식 압출식 평행핀 형상의 히트싱크(heat sink)이다. 압출식 히트싱크는 구조적 한계에도 불구하고 뛰어난 경제성으로 인하여 널리 사용되고 있으며, 이의 방열성능을 향상시키고자 공기 유동 형태에 따른 열전달 특성 분석과 대류 열전달 계수의 증가를 위한 핀의 형상과 구조 최적설계 등 관련 연구가 꾸준히 이루어져 왔다.⁽²⁻⁶⁾

냉각장치의 개발을 위해서는 방열량과 사용 환경 및 최대 허용온도 등에 대한 제어 온도 목표가 결정되어야 하며, 냉각 장치 구조, 설치 환경과 방법에 따른 열전달 계수 예측이 이루어져야 한다. 본 연구는 히트싱크의 설계자료를 확보하기 위한 기초연구로서 설치환경에 따른 히트싱크의 자연대류 유동특성과 방열성능에 대하여 분석하였다.

히트싱크를 LED 조명 특히 가로등이나 보안등으로 사용되는 경우 방열성능 향상을 위한 팬(fan)의 사용이 어렵고, LED 가 중력장 방향으로 빛을 분산하도록 설치되기 때문에 히트싱크의 베이스는 항상 수평상태를 유지하게 된다. 이러한 구조의 히트싱크는 베이스는 수평방향으로 핀은 수직방향으로 설치되기 때문에 가열된 공기가 부력에 의하여 상승한 후 찬 외기가 핀 사이의 공간으로 유입될 때 핀을 따라 수평방향으로 유동함에 따라 열전달 성능의 저하를 초래할 수 있다.

이러한 관점에서 본 연구에서는 히트싱크의 베이스가 수직 및 수평상태를 유지함에 따라 나타나는 핀 주변의 자연대류 유동 특성을 전산모사 해석을 통해 고찰하였다. 또한, 일반적인 압출 구조의 자연대류형 히트싱크를 대상으로 수평 및 수직 상태에서의 열적 성능 실험을 수행하였으며, 기존의 연구결과와 비교함으로써 설치방향이 히트싱크 방열성능에 미치는 영향에 대하여 분석하였다.

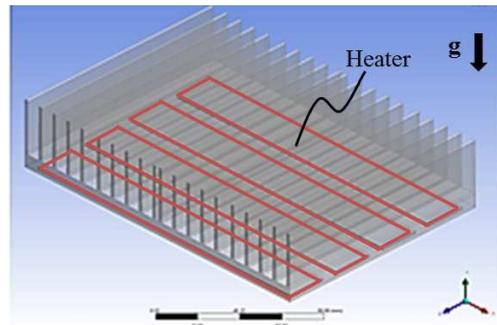
2. 히트싱크의 자연대류 해석

2.1 해석 조건

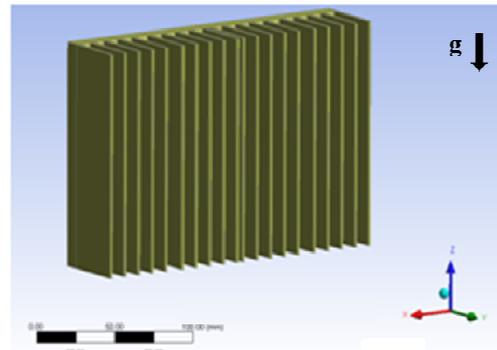
설치방향에 따른 히트싱크의 유동 및 열전달 특성을 파악하고자 Ansys CFX 12 를 이용하여 전산

Table 1 Specification of heat sink

Dimension of base	200mm x 140mm
Height of fin	41.5mm
Thickness of fin	2mm
Pitch of fins	7mm
No of fins	20
Material	Aluminum



(a) Horizontally installed



(b) Vertically installed

Fig. 1 Installation direction of heat sink

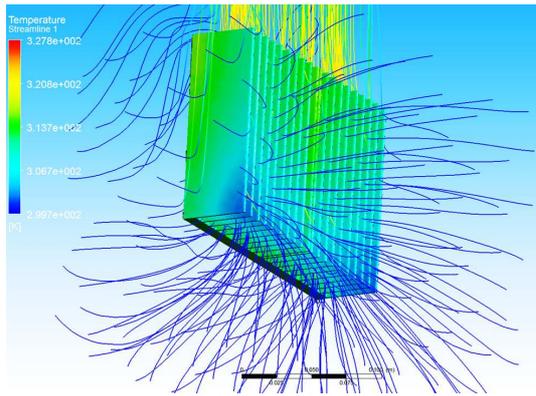
모사 해석을 수행하였다. 해석에서 자연대류 유동은 Boussinesq 근사 모델을 적용하였으며, 정상상태, 비압축성, 층류유동으로 가정하였다. 해석에 적용한 히트싱크의 상세 사양은 Table 1 과 같다.

Fig. 1(a)와 같이 190×25mm 크기의 열원 4 개에 총 30W 의 열부하를 균일한 열유속으로 발열하도록 설정하였으며, 설치된 열원 및 설치 표면은 단열 조건으로 가정하였다. 히트싱크 주위의 300K 공기가 부력에 의하여 발생한 유동에 의해 자유롭게 출입하도록 개방된 경계조건을 적용하였으며, 복사 열전달은 무시하였다. 해석영역의 크기는 수직형 히트싱크의 경우 히트싱크 높이의 1.5 배로, 수평형은 히트싱크 높이의 5 배로 설정하였고, 모두 사각(tetra)격자로서 열이 발생하고 대류가 일어

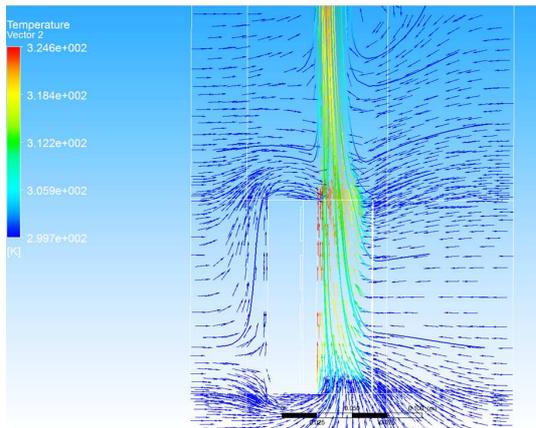
나는 부분인 핀 베이스 및 핀 주변에는 격자를 조밀하게 생성하였다. 수직형 히트싱크 해석의 노드 수는 1,409,692 개, 수평형은 2,506,204 개이다.

2.2 해석 결과 및 고찰

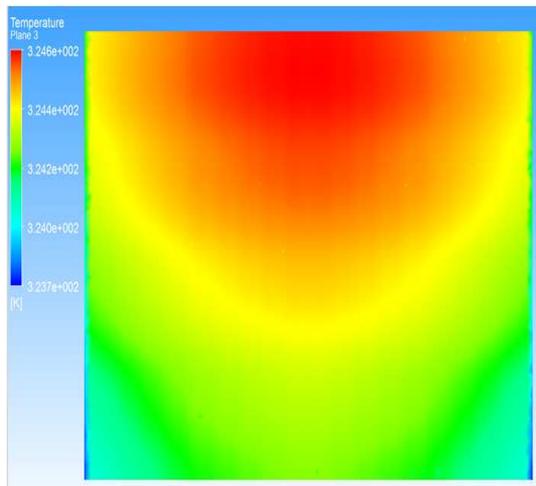
Fig. 2 는 수직으로 설치된 히트싱크 주변에서 정상상태 자연대류 유동의 유선(a)과 중앙단면에



(a) Streamline



(b) Velocity vector

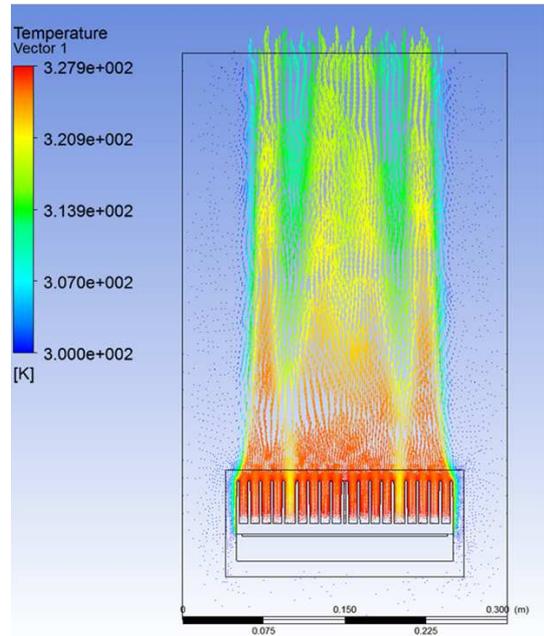


(c) Surface temperature

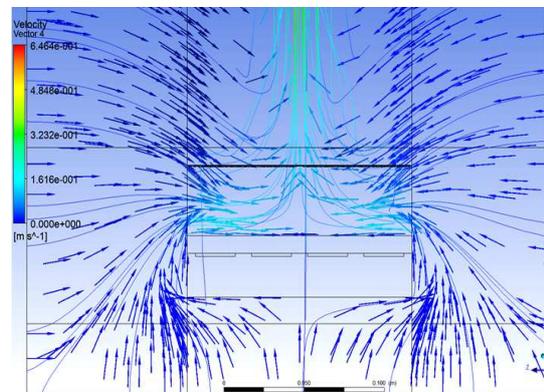
Fig. 2 Predicted flow and temperature profile of vertically installed heat sink

서의 벡터(b) 및 베이스 표면 온도분포(c)의 해석 결과를 나타낸다.

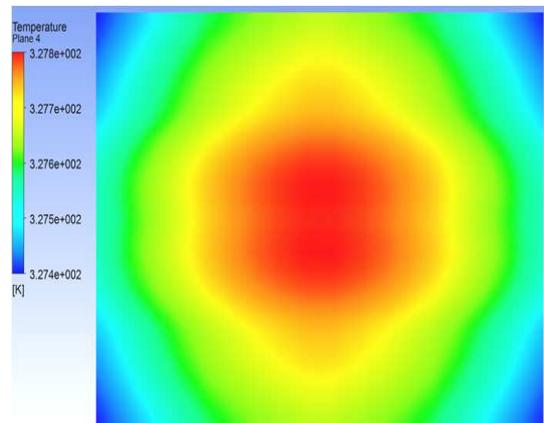
Fig. 2(b)에서 가열된 공기는 밀도 차로 인한 부



(a) Streamline



(b) Velocity vector



(c) Surface temperature

Fig. 3 Predicted flow and temperature profile of the horizontally installed heat sink

력에 의해 상향 유동하며, 유동방향의 출구 상부에서 수직 방향으로 가장 빠른 유속을 보이고 있다. 또한, 히트싱크 하부의 핀 주변에서 다량의 공기 유입이 이루어지고 있으며, 수직방향의 중, 상에서도 외기가 유입되어 출구방향으로 공기 질량 유동율이 증가됨을 알 수 있다.

Fig. 2(c)에서 히트싱크 하부의 핀 사이로 유입된 차가운 공기가 가열되어 부력이 발생되고 상향 유동하는 과정에서 가열되기 때문에 히트싱크 베이스 표면 온도는 상부가 하부에 비하여 상대적으로 높은 온도를 나타내고 있다. 그러나 본 해석에서 히트싱크의 길이가 140mm 로 비교적 짧고, 앞에서 설명한 것과 같이 핀의 중, 상단에서 수평방향으로의 저온의 공기 유입에 따른 냉각효과에 의해 베이스의 표면 온도차는 1°C 미만의 낮은 값을 보이고 있다.

Fig. 3 는 수평으로 설치되는 경우, 중앙단면에서 공기 유동 및 베이스 온도 분포를 나타낸다.

Fig. 3(b)에서 보면, 히트싱크의 중앙 상부에서 수직방향으로 가장 빠른 유속을 보이고 있으며 이를 중심으로 핀의 길이방향을 따라 수평방향 성분을 갖는 공기의 유동을 확인할 수 있다. 히트싱크 상부 공기의 최고 유속은 수평으로 설치된 경우가 수직인 경우보다 빠른 것으로 파악되나 유입되는 공기의 평균 유속은 상대적으로 낮아 전반적으로 유동율이 감소함을 알 수 있다. 이는 차가운 외기가 측면에서 유입된 후 중앙부로 유동하며 가열되어 부력에 의하여 상향 유동하는 과정에서 상대적인 유동길이 증가에 의한 핀과의 마찰 및 부력에 의한 수직방향 유동과 유입공기의 수평방향 유동에서의 전단력 증가에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 3(c)는 베이스의 온도 분포를 나타낸 그림으로 유동해석 결과에서 보는 것과 같이 측면에서 유입된 후 중앙부로 이동하며 가열된 공기가 상승하며 유출하기 때문에 수직의 경우와 다르게 중앙부 온도가 상대적으로 과열되어 있다. 수평의 경우는 수직의 경우와 비교하여 동일 열부하에서 베이스 평균온도가 약 3°C 높은 값을 보이고 있으나, 전 표면에 걸친 온도차는 수직의 경우와 유사하게 1°C미만의 값을 보이고 있다.

3. 히트싱크의 방열성능 실험

3.1 실험장치의 구성 및 실험 방법

히트싱크의 성능 실험을 위하여 Table 1 과 같은 사양의 압축형 히트싱크에 표면에 전열그리스를

도포한 후 전산해석에서와 동일한 크기의 모사발열체를 제작하여 설치하였다. 온도를 측정하고자 열전대 (K-type, 0.12mm)를 Fig. 4 와 같이 히트싱크 표면 5 개소 및 공기의 입구, 출구에 설치하였다. 직류전원공급장치(DRP-3010D, 디지털전자)와 전력량계(WT210, Yokogawa)로 모사발열체의 전력을 제어, 측정하였다. 히트싱크 베이스가 수직상태를 유지하도록 설치하고 전력을 공급하여 모든 측정점의 온도가 정상상태에 이르면 각 측정점의 온도를 기록하였다. 단계적으로 열부하를 변경하며 동일한 방법으로 실험을 수행하였다. 수평 상태의 경우에도 동일한 방법으로 성능실험을 수행하였다.

Table 2 Experimental results for cooling performance of heat sink

Installation direction	Heat flow rate (W)	Temperature difference (°C)	Heat transfer coefficient (W/m ² K)
Vertical	11.95	11.52	4.05
	18.41	16.57	4.33
	23.21	19.32	4.69
	25.81	21.58	4.67
	28.14	22.63	4.85
	34.32	26.90	4.98
Horizontal	12.66	14.68	3.36
	14.95	16.56	3.52
	19.76	20.96	3.68
	22.37	22.60	3.86
	26.84	25.88	4.05
	32.53	29.06	4.37

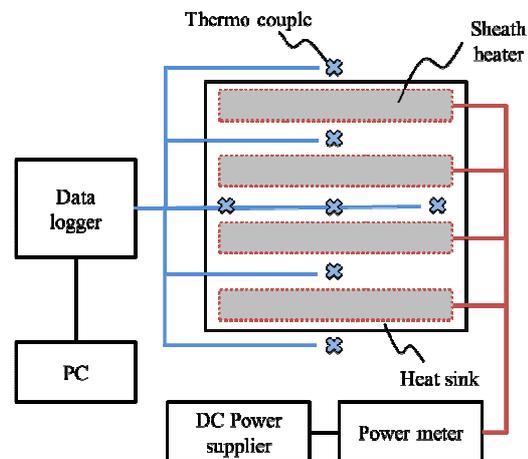


Fig. 4 Experimental set up for measuring the cooling performance of heat sink

3.2 실험결과 및 고찰

Table 2 와 Fig. 5 는 열원이 설치되어 있는 히트싱크의 베이스면이 수직인 경우 및 수평인 상태에서 열부하에 대한 열전달 계수를 나타낸 것이다. 그림에는 측정된 베이스 면의 평균온도도 함께 나타내었다. 실험에서 수직상태나 수평의 경우 베이스 표면의 온도차는 전 열부하 범위에서 1°C미만의 낮은 값을 유지하여 해석결과와 일치하였다. 또한, 2.2 절의 30W 에 대한 해석결과와 비교하면 외기와의 온도차가 수직과 수평에서 각각 24K 와 27K 의 값을 보여 본 절의 실험결과와 매우 잘 일치하고 있다.

Fig. 5(a)의 대류 열전달 계수는 베이스 측정점 온도의 평균값과 외기 온도와의 차 및 단열된 열원 공급 표면을 제외한 총 표면적(0.2564m²)으로부터 계산한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 열

부하가 증가함에 따라 열전달 계수는 비교적 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었으며, 이는 온도 상승에 따른 부력 증가에 의한 전형적인 자연대류 열전달 계수의 특성으로 파악된다. 실험 범위에서 히트싱크가 수직으로 설치된 경우 열전달 계수는 4~5W/m²K 의 값을 나타내고 있으며, 수평으로 설치된 경우에는 3.4~4.4W/m²K 의 범위를 보여 상대적으로 낮은 값을 나타내고 있다. 또한, 동일 열부하에서도 수평의 경우 평균 베이스 표면온도는 수직의 경우에 비하여 약 3~4°C 높게 나타나고 있다. 이는 앞서 고찰한 것과 같이 수평의 경우에 부력유동 방향과 외기유입 방향이 상이하하여 유동저항의 증가에 따른 유동을 감소에 의한 것으로 파악된다.

Table 3 은 실험값의 무차원 상관관계를 파악하고자 각 열부하에서 Nusselt 수와 Rayleigh 수를 다음의 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 계산한 것이다.

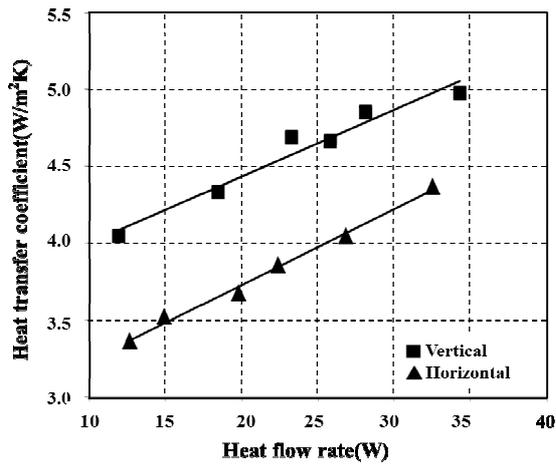
$$Nu_L = \frac{hL}{k} \tag{1}$$

$$Ra_L = Gr Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} \tag{2}$$

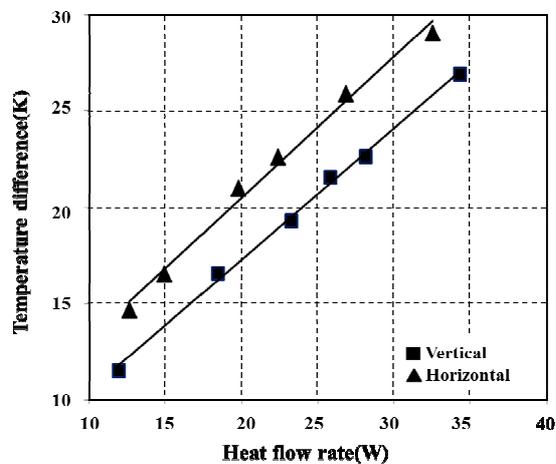
여기서, T_s와 T_∞는 각각 벽면 및 공기의 온도, k는 공기의 열전도율이고, L은 특성길이로써 본 연구에서는 핀의 길이로 정의하였다.

한편, Churchill 과 Chu 의 연구에서 가열된 수직 평판의 층류 유동에 대한 Nu-Ra 상관식을 다음과 같이 제시한 바 있다.

$$Nu_L = 0.68 + \frac{0.670Ra_L^{1/4}}{[1 + (0.492 / Pr)^{9/16}]^{4/9}} \tag{3}$$



(a) Heat transfer coefficient



(b) Temperature difference

Fig. 5 Heat transfer coefficient and temperature difference at various heat flow rate

Table 3 Ra versus Nu at various heat flow rate

Installation direction	Heat flow rate (W)	Nu	Ra
Vertical	11.95	21.54	3.15E+06
	18.41	23.07	4.29E+06
	23.21	24.95	5.00E+06
	25.81	24.83	4.83E+06
	28.14	25.81	5.84E+06
	34.32	26.49	6.91E+06
Horizontal	12.66	17.90	3.87E+06
	14.95	18.74	4.41E+06
	19.76	19.57	5.51E+06
	22.37	20.55	5.95E+06
	26.84	21.53	6.80E+06
	32.53	23.24	7.61E+06

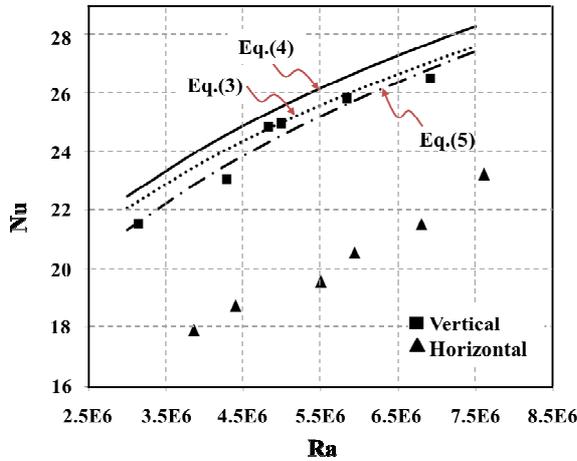


Fig. 6 Nu number versus Ra number

수평 평판의 자연대류 열전달에 대하여서는 McAdams 에 의해 제시된 상관식(4)와 1970 년도에 Jones 과 Smith 가 개발한 상관식(5)이 널리 사용되고 있으며, 다음과 같다.^(7,8)

$$Nu_L = 0.54Ra_L^{0.25} \quad (10^4 \leq Ra_L \leq 10^7) \quad (4)$$

$$Nu_L = 6.7 \times 10^{-4} Gr Pr \left[1 - e^{-\left(\frac{0.746 \times 10^4}{Ra_L} \right)^{0.44}} \right]^{1.7} \quad (5)$$

(0 < L < 0.0508m)

Fig. 6 은 기존의 연구에서 제시한 상관식 (3), (4), (5) 와 앞서 실험 결과로부터 계산한 Ra 수에 따른 Nu 수를 도시한 것이다. 그림에서 수직 또는 수평 상태 모두 Ra 수 증가에 따라 Nu 수는 증가하는 경향을 보이며, 수직의 경우 Nu 수는 약 22~27 의 값을 보인다. 동일 구간에서 수평인 경우는 열전달 계수가 감소함에 따라 약 17~22 범위로 상대적으로 낮은 값을 보이고 있다.

또한, 수직으로 설치된 히트싱크의 실험값은 기존 연구에서 제시된 식 (3), (4), (5)와 비교하여 경향과 값에서 비교적 잘 일치하고 있다. 기존의 상관식이 등은 평판에 대한 결과이며 또한 편효율 등을 고려하지 않았음에도 불구하고 비교적 잘 일치하는 것은 실험범위 내에서 히트싱크 베이스의 온도편차가 1℃ 미만으로 낮아 비교적 등온을 유지하였고, 공기와의 온도차도 최대 27℃미만으로 Ra 수가 작았으며, 대류 열전달 계수도 낮아 상대적으로 편효율이 높았기 때문으로 판단된다. 반면, 수평으로 설치된 경우 실험값은 기존의 연구보다 약 25% 낮은 값을 보이고 있는데, 이는 앞서 분석한 바와 같이 수평으로 설치

된 히트싱크의 경우 좁은 핀 사이 공간으로 수평유동이 발생하여 유동저항이 증가되는 유동 형태인데 반하여, 관련 연구의 상관식들은 단순한 수평 평판에 대한 것으로 본 연구와 유동 형태가 상이하기 때문으로 설명된다. 따라서 LED 조명용 히트싱크와 같이 지면에 대하여 수평으로 설치되는 히트싱크를 설계하는 경우 수직상태의 상관관계에서 수평상태에 따른 방열성능 감소율을 고려하는 것이 필요하다.

4. 결론

본 연구에서는 수직과 수평으로 설치된 일반적인 히트싱크의 방열 특성을 파악하고자 전산모사 해석을 통해 핀 주변 자연대류 유동 특성을 분석하였으며, 압출구조의 히트 싱크를 대상으로 수평 및 수직상태에서의 열적 성능 실험을 수행하였다. 실험와 해석결과는 비교적 잘 일치하였으며 실험결과를 Nusselt 수와 Rayleigh 수의 무차원 상관관계로 정리하여 기존의 연구 결과와 비교하였다.

본 연구의 결과를 활용하여 일반적인 히트싱크형 자연대류 방열장치를 설계할 때 히트싱크의 설치 방향을 고려하여 적절한 설계가 가능할 것으로 기대된다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 유동 해석 결과 수평상태의 히트싱크는 핀 사이로 수평 유동하는 공기의 유동저항에 의해 수직의 경우보다 상대적으로 유동율이 감소하였다.
- (2) 이러한 유동 특성에 의하여 실험결과 수평상태의 경우는 수직인 경우에 비하여 약 10~15% 열전달 계수의 감소가 발생하였으며, 동일한 발열량을 제어할 경우 그만큼 방열 면적을 넓게 설계하여야 한다.
- (3) Nu-Ra 수의 무차원 해석결과 등은 평판에 대한 기존의 상관식은 수직방향의 실험 결과와 비교적 잘 일치하였으나, 수평의 경우에 대하여서는 약 25% 정도 차이를 보였다.

후 기

본 연구는 2011 년 중소기업청 산학연협력 기업 부설연구소 지원사업 ‘차세대 조명용 방열 장치 설계 및 제조기술 개발’ 과제 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

(1) Lee, I. G., Lee, S. W., Kang, K. M. and Jang, S. Y.,

- 2004, "Heat Flow Analysis in the Newly Developed Wave Heat Sink by Computational Simulation," *Kor. J. Mater. Res.*, Vol. 14, No. 12, pp.870~875.
- (2) Yu, S. H. and Lee, K. S., 2011, "Heat Transfer from Rectangular Fins with a Circular Base," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 35, No. 5, pp. 467~472.
- (3) Hwang, Y.K., Kim, J. H. and Cho, Y. S., 1998, "An Experimental Study of Heat Sink Thermal Characteristics and Optimum Design," *Proceedings of SAREK, summer*, pp. 257~262.
- (4) Yuncu, H. and Anbar, G., 1998, "An Experimental Investigation on Performance of Rectangular Fins on a Horizontal Base in Free Convection Heat Transfer," *Heat and Mass Transfer*, Vol. 33, pp. 507~514.
- (5) Hwang, S. H., Park, S. J. and Lee, Y. L., 2010, "A Study of Optimal Thermal Design for a 10W LED Lamp," *J. of the KAICS*, Vol. 11, No. 7, pp. 2317~2322.
- (6) Yu, S. H., Jang, D. S. and Lee, K. S., 2012, "Thermal Analysis of a Radial Heat Sink with Radiation and Natural Convection," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 36, No. 4, pp. 385~390.
- (7) Gebhart, B., Jaluria, Y., Mahajan, R. L. and Sammakia, B., 1988, *Bouyancy-Induced Flow and Transport*, Hemisphere Publishing, pp.92~95.
- (8) Incropera, F. P. and DeWitt, D. P., 2001, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 5th ed.*, John Willey & Sons, pp.438~461.