

마이크로 힌 배열 주위의 자연대류 열전달에 관한 실험 관계식

김진섭[†] · 이준식^{*}

Empirical Correlation for Natural Convective Heat Transfer around Microfin Arrays

Jin Sub Kim and Joon Sik Lee

Key Words : Natural Convection(자연대류), Microfin array(마이크로 힌 배열), Empirical Correlation(실험 관계식)

Abstract

Microfin arrays with fin heights of 100 μm and 200 μm and six different spacings from 30 μm to 360 μm are fabricated using the DRIE process. Natural convective heat transfer around the microfin arrays on both vertical and horizontal surfaces is experimentally examined. It turns out that the orientation effect of microfin arrays is negligible compared with macrofin arrays. The obtained heat transfer coefficients are compared with the existing heat transfer correlation for the macrofin arrays. It is concluded that the existing macro-correlation is no longer valid for the microfin arrays. Relevant empirical correlations for microfin arrays on the vertical and horizontal surfaces are presented based on the present experimental data.

기호설명

A	: 면적 (m^2)
c	: 비열 (J/kg K)
g	: 중력가속도 (m/s^2)
H	: 힌 높이 (m)
h	: 열전달계수 ($\text{W/m}^2\text{K}$)
k	: 열전도계수 (W/mK)
L	: 배열 높이 (m)
Q	: 열전달량 (W)
r	: 수력반경 (m)
S	: 배열 간격 (m)
T	: 온도 (K)
ΔT	: 온도차 [$= T_w - T_\infty$]
t	: 시간 (s)
V	: 부피 (m^3)

Greek symbols

α	: 열확산계수 (m^2/s)
β	: 열팽창계수 ($1/\text{K}$)

ν	: 동점성계수 (m^2/s)
ρ	: 밀도 (kg/m^3)

Subscripts

net	: 순열전달량
w	: 표면 온도
∞	: 대기 온도

1. 서론

힌과 같이 면적 증대를 통해 열전달량을 향상시키는 방법은 전자 장비들 내에서 발생하는 열을 제거하는 주요한 수단으로 여겨져 왔다. 특히 자연대류는 적은 비용과 작은 소음을 요하는 상황에서 강제대류보다 선호될 수 있다. 힌 주위의 자연대류 열전달 현상에 대한 연구는 이미 오래 전부터 이루어져 왔으며, 그 실험 결과들로부터 다양한 실험식들이 확립 되어 있다.^(1,2) 하지만 최근 들어 미소스케일에서의 현상에 대한 관심이 증대되면서, 이러한 기존의 실험식들이 마이크로/나노스케일에서도 유용한지가 의문시되고 있다. 마이크로 공정 기술의 발달은 전자, 생물, 기계 각 분야에서 소형화를 가능하게 했으며, 그 결과로 박

[†] 삼성전자 영상디스플레이 사업부
E-mail : js1978.kim@samsung.com
c. p. : 016-298-9436

^{*} 서울대학교 기계항공공학부

막 트랜지스터의 게이트 길이는 나노스케일까지 내려갔고, 소량의 채널로 질병 검사가 가능한 바이오칩이 등장하고 있으며^(3,4), 가속도계나 마이크로미러 같은 초소형MEMS 기구들이 제작되고 있다. 이러한 소형화의 추세로 인해 미소스케일에서의 열 및 유체 유동에 관한 엄밀한 이해가 요구되고 있다.⁽⁵⁾

마이크로/나노스케일에서 열유동 현상은 매크로스케일과는 본질적으로 차이를 나타내게 된다. ⁽⁶⁻⁸⁾ Guo 와 Li ⁽⁹⁾는 매크로스케일의 채널 유동과 비교해서 마이크로 채널에서의 특징적인 열유동 현상에 대해 연구했다. 그들의 분류에 따르면 마이크로 채널에서는 마찰에 의한 압축성 효과, 표면 거칠기 효과, 지배적인 힘의 변화, 채널 벽을 통한 축방향 열전도 등의 네 가지 크기 효과가 나타나게 된다. 이 네 가지 중에서 지배적인 힘의 변화는 자연대류 열전달에서 크기 효과를 일으키는 본질적인 요소이다. 매크로스케일에서는 관성력이 점성력에 비해 지배적이므로 관성력과 부력의 평형관계에 의해 자연대류 현상이 결정이 되지만, 마이크로스케일에서는 점성력의 영향이 증대되고 관성력은 상대적으로 작아지면서 점성력과 부력의 평형관계가 자연대류를 결정하게 된다. 이러한 평형 관계의 변화로 인해 매크로스케일에서 확립된 실험 관계식이 마이크로스케일에서도 유용한지에 대한 검증이 필요하다.

이 연구를 통해 이미 확립되어 있는 MEMS 공정 기술을 이용하여 마이크로 흰 배열을 제작하고 자연대류 조건하에서 흰 배열의 열전달 특성을 알아보려 한다. 먼저 흰 배열의 방향을 수직과 수평으로 바꿨을 때 열전달의 차이를 조사하였다. 이를 통해 마이크로스케일로 크기가 작아지면서 방향 특성이 어떻게 변하는지 알아 볼 수 있다. 다음으로 실험 결과를 바탕으로 기존의 매크로 관계식의 유용성을 검토해 보고 보다 적합한 실험 관계식을 제시할 수 있었다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

마이크로 흰 배열은 MEMS 공정을 이용하여 제작하였다. 우선 500 μm 두께의 실리콘 웨이퍼 위에 전기 절연을 위하여 SiO_2 산화막을 5000 Å 입히고 아래 면에 히터로서 사용하기 위한 백금 박막을 스퍼터링으로 증착하였다. 흰 형상은 DRIE(Deep Reactive Ion Etching) 공정을 통해 형성

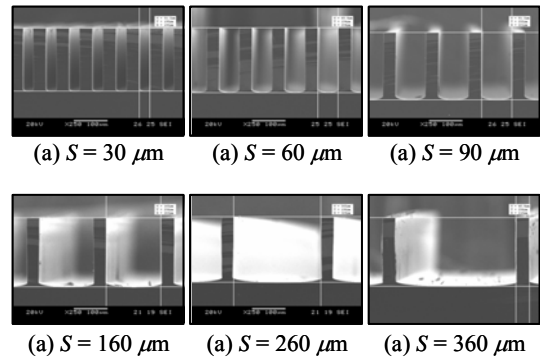


Fig. 1 SEM images of microfin arrays

하였다. DRIE 공정은 실리콘 웨이퍼에 큰 형상비를 갖는 깊은 골을 만들기 위해 폴리머 증착, 폴리머 식각, 실리콘 식각의 3 단계를 반복하여 비등방성 식각을 달성하는 공정 기법이다.⁽¹⁰⁾ 흰 배열의 전체 크기는 10 mm x 16 mm이며, 흰 높이는 100 μm 와 200 μm 두 가지로 제작하였으며 흰 두께는 40 μm 이다. 흰 사이의 간격은 30 μm 에서 360 μm 까지 6 가지로 제작하였다. Figure 1 은 200 μm 흰 높이를 가지고 6 가지 흰 간격을 갖는 마이크로 흰 배열의 SEM(Scanning Electron Microscope) 이미지를 보여준다.

실험 장치는 수직 및 수평 방향에 따라 두 가지로 구성하였다. Figure 2 는 수직 방향에서의 테스트를 위한 실험 장치 개략도를 보여준다. 외부 유동에 의한 영향을 막기 위해서 자연 대류가 발생하는 주 측정 부분은 폴리카보네이트 재질의 위가 트인 커버 챔버 안에 위치한다. 커버 챔버는 가로 세로 25 cm이며 50 cm의 높이를 가진다. 대기 온도를 측정하기 위하여 주 측정부와 일정 정도 떨어진 위치에 30 AWG 열전대를 설치하였다. 오른쪽 확대 그림에서 보듯이 두 개의 동일한 흰 배열을 맞붙임으로써 흰 배열 뒷면을 통한 열손실을 무시할 수 있었다. 즉 대칭 구조이기 때문에 측정된 열전달량을 반으로 나누면 한 개의 흰 배열을 통한 자연 대류 열전달량을 구할 수 있다. 흰 배열의 온도 측정을 위해 맞게 되는 두 개의 흰 배열 사이에 100 μm 두께의 얇은 열전대를 삽입하였다. 25 μm 의 가느다란 구리선이 흰 배열 바닥면에 증착된 백금 히터와 연결되어 있으며 반대쪽으로는 회로 기판을 지나 파워 서플라이와 연결되어 있다. 이 흰 배열 조립부는 커버 챔버 중앙에 Fig. 2 과 같이 위치하게 된다. 수평 방향의 실험 장치의 구성은 수직 방향과는 다소 차이를 보인다. Figure 3 는 수평 방향 테스트를 위한 실험 장치이다. 방향에 따라 실험 장치의 구성이 달라지는 이

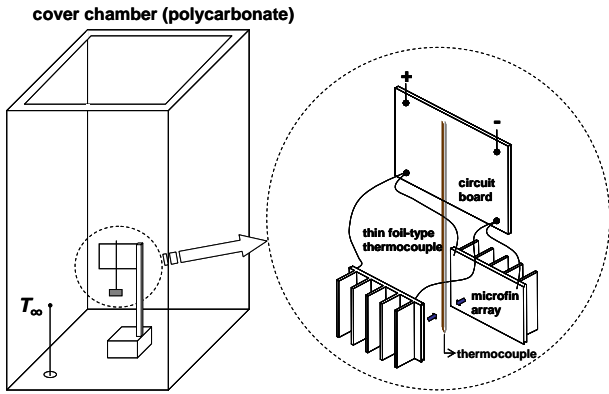


Fig. 2 Test apparatus and test assembly for the vertical tests

유는 수직 방향에서는 동일한 두 개의 흰 배열을 맞붙여서 뒷면을 통한 열손실을 없앨 수 있는 대칭 형태의 디자인이 가능하지만, 수평 방향에서는 이러한 설계가 불가하기 때문이다. 대신에 큰 단열 블록을 흰 배열 바닥면에 부착함으로써 열손실을 최소화하고 있다. 열전도계수가 낮은 폴리스티렌 블록($k \approx 0.027 \text{ W/mK}$)을 단열 블록으로 사용하였다. 흰 배열과 단열 블록 사이에는 온도 측정을 위해 $100 \mu\text{m}$ 두께의 얇은 열전대를 삽입하였다.

2.2 실험 방법

수직 방향에서는 대칭 구조를 통해 열손실이 없다고 간주할 수 있기 때문에 정상 상태 측정을 통해 열전달 계수를 얻어낼 수 있다. 대기 온도와 흰 배열의 온도가 같아지게 되면 흰 배열에 전원을 공급한다. 흰 배열의 온도가 초기에 상승하다가 일정해지고 정상 상태에 이르렀을 때 흰 배열의 온도와 대기 온도 및 입력 파워를 측정한다. 흰 배열 양단에 걸리는 전압을 측정하고, 1Ω 표준 저항을 회로에 직렬로 연결하여 전류를 측정하였다. 이 값으로부터 흰 배열에 공급되는 총 열전달량을 구할 수 있다. 이 총 열전달량은 자연 대류 뿐만 아니라 복사에 의한 열전달량도 포함하고 있기 때문에 흰 배열 표면에서의 복사량을 평가하여 빼주어야 한다. 이상이 수직 방향에서의 정상 상태 측정 방법이며, 수평 방향에서는 단열 블록을 통한 열손실이 존재하기 때문에 과도 상태에서의 온도 측정을 통해 열전달 계수를 얻을 수 있다. Hassani 와 Hollands⁽¹¹⁾는 3 차원 체적에서의 자연 대류 현상을 연구하기 위해 과도 상태에서의 온도 거동으로부터 열전달 계수를 구하였다. 과도 상태의 자연대류 열전달의 지배 방정식은 다음과 같다.

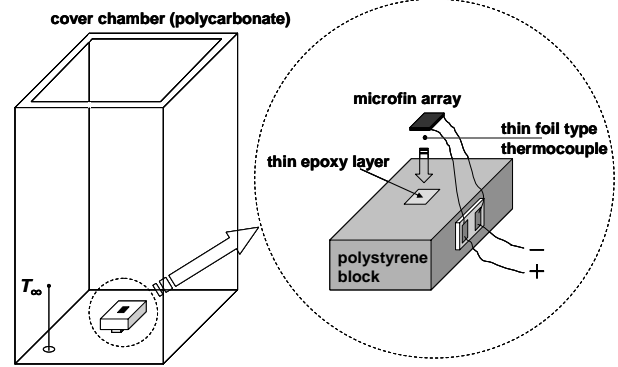


Fig. 3 Test apparatus and test assembly for the horizontal tests

$$\rho V c \frac{dT_w}{dt} = Q_{net} - hA(T_w - T_\infty) \quad (1)$$

Q_{net} 는 총 열전달량에서 열 손실을 뺀 양이며 시간에 따라 측정된 온도 데이터와 식 (1)로부터 열전달 계수를 얻어낼 수 있다. 수직 방향, 수평 방향 공통적으로 전원 공급은 DC 전원 공급기 (Agilent 6032A)로 이루어지며 전압 및 전류, 온도 측정은 데이터 수집 장치(Agilent 34970A)를 통해 이루어졌다. 실험의 전 과정은 Labview 로 제어하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수직 방향 흰 배열 주위의 자연대류

수직 방향 흰 배열 주위의 자연대류 열전달 계수는 정상 상태에서의 측정으로부터 얻어질 수 있었다. 이와 같이 얻어진 온도차와 열전달 계수는 자연대류를 지배하는 무차원 변수인 Rayleigh 수와 Nusselt 수로 변환할 수 있다.

$$Nu_r = \frac{hr}{k} \quad (2)$$

$$Ra^* = \frac{g\beta\Delta T r^3}{\nu\alpha} \left(\frac{r}{L} \right) \quad (3)$$

여기서 r 은 흰 배열의 형상 변수들을 잘 대표하는 수력반경으로서 $r = 2HS/(H + S)$ 로 정의된다. Rayleigh 수는 흰 배열의 수직 방향 길이, L 의 영향을 고려한 수정 Rayleigh 수의 형태를 가진다. 이와 같은 무차원 변수의 정의는 매크로 스케일의

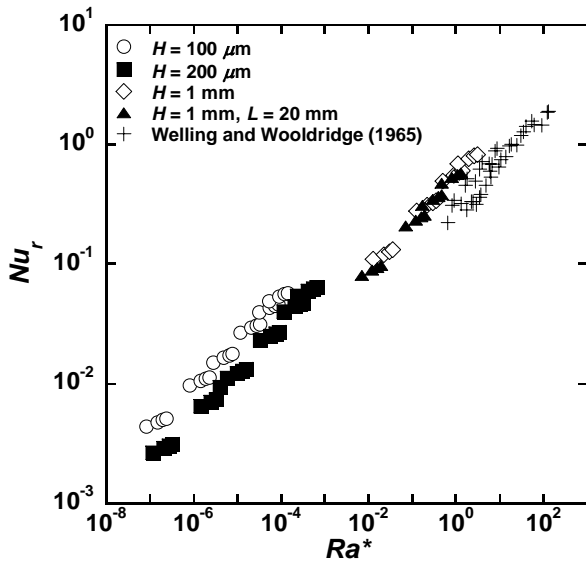


Fig. 4 Nusselt number variation for microfin arrays and minifin arrays on the vertical surface

흰 배열 연구들에서 일반적으로 사용되어 왔다. 특히 Welling 과 Wooldridge⁽¹⁾는 흰 높이가 6.35 mm에서 19.05 mm에 이르는 매크로 흰 배열 주위의 자연 대류 실험을 수행하였다. 이와 비교를 위해 본 실험 결과로 얻어진 Nusselt 수의 변화를 Welling 과 Wooldridge⁽¹⁾의 결과와 함께 Fig. 4 에 나타내었다. 마이크로 흰 배열의 흰 높이는 100 μm 와 200 μm 두 종류이고, 추가로 흰 높이가 1 mm인 미니 흰 배열에 대한 결과도 첨부되어 있다. Rayleigh 수의 변화에 따른 Nusselt 수의 변화는 전반적으로 선형 관계를 보이는 것을 볼 수 있다. 그러나 마이크로 흰 배열로 가면서 흰 높이에 따른 차이가 커지는 것을 볼 수 있는데, 마이크로 스케일로 갈수록 유동이 약해지면서 상대적으로 형상의 영향이 커지는 것으로 생각할 수 있다. 이러한 형상 변수의 영향이 증대되는 것을 실험 관계식을 유도할 때 감안할 수 있다.

3.2 수평 방향 흰 배열 주위의 자연대류

수직 방향에서 수력 반경, r 을 특성 길이로 사용한 것과 달리 수평 방향 흰 배열 주위의 자연대류 실험에서는 일반적으로 배열 간격, S 를 특성 길이로 사용해 왔다. 그에 따라 수평 방향에서 정의되는 Nusselt 수와 Rayleigh 수는 다음과 같다.

$$Nu_s = \frac{hS}{k} \quad (4)$$

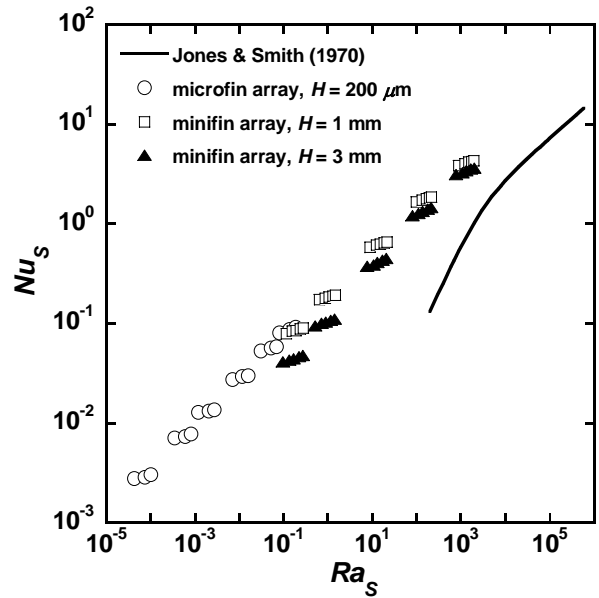


Fig. 5 Nusselt number variation for fin arrays on the horizontal surface

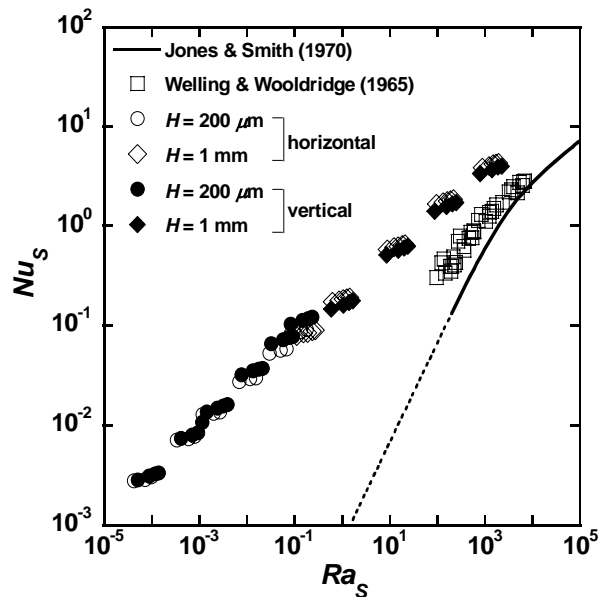


Fig. 6 Orientation effect on Nusselt number for fin arrays on the horizontal and vertical surfaces; $L = 10$ mm (fixed)

$$Ra_s = \frac{g\beta\Delta TS^3}{\nu\alpha} \quad (5)$$

Jones 와 Smith⁽²⁾는 수평 방향 매크로 흰 배열 주위의 자연대류에 관한 실험을 수행하였고, Rayleigh 수가 200 이상인 경우에 적용 가능한 실험식을 제시하였다. Figure 5 는 본 실험 결과를 Jones 와 Smith⁽²⁾의 실험식과 함께 나타내었다. 실

험 결과는 Jones 와 Smith⁽²⁾의 실험식이 적용 가능한 구간 ($Ra_s > 200$)에서도 차이를 보이며 Rayleigh 수가 더 감소할수록 실험식과 본 실험 결과의 차이는 더욱 커질 것으로 예상할 수 있다. 수직 방향에서와 마찬가지로 흰 높이에 따라 Nusselt 수의 차이가 나타나며 흰 높이가 작아질수록 Nusselt 수는 증가하고 있다.

수직 방향과 수평 방향에서 각각 상이한 특성 길이로 정리되어 있기 때문에 한 그래프 위에서 비교하기 위해서는 특성 길이를 하나로 일치시켜야 한다. 특성 길이를 배열 간격, S 로 일치시켜 나타낸 그래프가 Fig. 6 이다. 기존의 매크로 흰 배열에서의 결과들은 수직 수평 방향에 따른 차이가 두드러져 보인다. 수직 방향에서의 실험인 Welling 고 Wooldridge⁽¹⁾의 Nusselt 수는 수평 방향인 Jones 와 Smith⁽²⁾의 Nusselt 수보다 큰 값을 보인다. 중력 방향을 고려할 때 수직 방향이 수평보다 다소 우수한 것은 당연해 보인다. 반면에 흰 높이가 감소하여 미니 흰이나 마이크로 흰이 되었을 때 방향에 따른 차이는 현저히 감소하는 것을 볼 수 있다. 방향에 따른 차이가 줄어드는 것은 자연 대류의 부력 유동 자체가 그만큼 약화되었음을 나타내며, 전도에 의한 열전달이 주요해짐을 의미한다. 이런 상황에서 열전달 계수는 형상의 영향을 크게 받게 된다.

3.3 마이크로 흰 배열에 대한 실험 관계식

매크로 흰 배열 주위의 자연대류 실험 결과로부터 유도된 실험 관계식들은 마이크로 흰 배열에는 더 이상 적합하지 않은 것으로 나타났다. 마이크로 흰 배열에 적용 가능한 실험 관계식을 도출하기 위하여 흰 배열의 형상 변수들의 영향을 고려하는 것이 필요하다. 수직 방향에서 Nusselt 수와 Rayleigh 수로 나타내어진 무차원 그래프의 x 축을 Fig. 7 에서와 같이 흰 형상 변수들이 고려된 수정 Rayleigh 수로 변환할 수 있다. 여기서 $(r/H)^4(r/L)^4$ 항은 흰 높이의 영향과 배열 길이의 영향을 고려한 항으로 생각할 수 있다. 결과적으로 실험 데이터의 선형성이 크게 향상되는 것을 볼 수 있으며, 다음과 같은 지수 관계식으로 정리할 수 있다.

$$Nu_r = 1.18 \left[Ra_r \left(\frac{r}{H} \right)^4 \left(\frac{r}{L} \right)^4 \right]^{0.147} \quad (6)$$

실험 데이터와 식 (6)의 평균 오차는 6.3 %이다. 식 (6)은 $100 \mu\text{m} \leq H \leq 1 \text{ mm}$, $10 \text{ mm} \leq L \leq 20 \text{ mm}$ 그

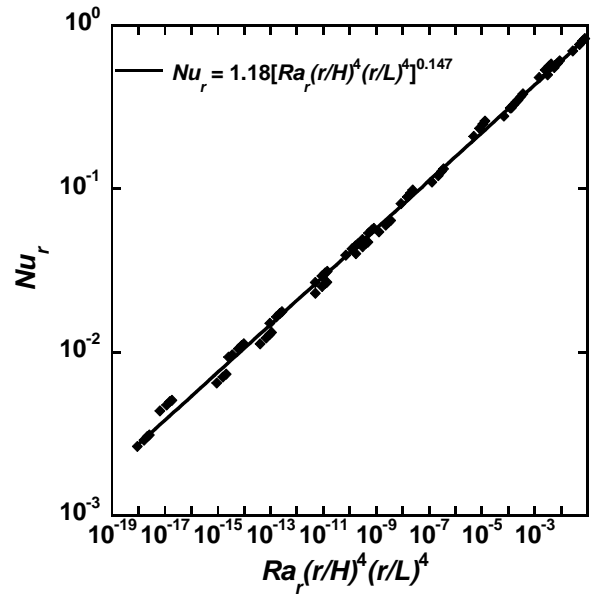


Fig. 7 Fitted empirical correlation about Nusselt number variation with modified Rayleigh number in microfin arrays and minifin arrays on the vertical surface

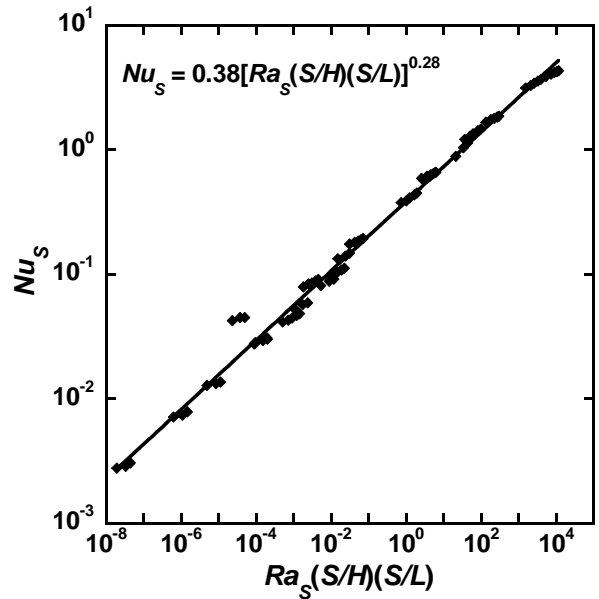


Fig. 8 Modified empirical correlation about natural convection around microfin arrays and minifin arrays on the horizontal surface

리고 $0.15 \leq S/H \leq 7.7$ 인 범위에서 적용 가능하다. 수평 방향에서 마이크로 및 미니 흰 배열 주위의 자연대류에 대한 실험식을 도출하기 위해 수직 방향에서와 마찬가지로 형상 변수들의 영향을 고려하여 Fig. 5 의 x 축, Ra_s 를 $Ra_s(S/H)(S/L)$ 로 변환하였다. 관계식의 적용 범위를 좀 더 확대하기 위해 마이크로($H = 100 \mu\text{m}$)에서 매크로($H = 6 \text{ mm}$)에 이

르는 5 개의 흰 배열에 대한 실험 데이터가 추가되었다. Figure 8 의 형상 변수가 고려된 무차원 그래프는 Fig. 5 에 비해서 선형성이 향상되는 것을 볼 수 있다. 변환된 그래프로부터 다음과 같은 실험식을 도출할 수 있다.

$$Nu_s = 0.38 \left[Ra_s \left(\frac{S}{H} \right) \left(\frac{S}{L} \right) \right]^{0.28} \quad (7)$$

식 (7)의 평균 오차는 11 %정도이며, $100 \mu\text{m} \leq H \leq 6 \text{ mm}$, $2.5 \text{ mm} \leq L \leq 45 \text{ mm}$ 그리고 $30 \mu\text{m} \leq S \leq 5 \text{ mm}$ 에서 적용 가능하다.

4. 결 론

수직 수평 방향에서 마이크로 흰 배열 주위의 자연 대류에 대한 실험을 수행하고 실험 결과를 바탕으로 마이크로 흰 배열에 적합한 실험 관계식을 도출할 수 있었다.

- (1) 수직 및 수평 방향에서 마이크로 흰 배열 주위의 자연대류 실험 결과는 기존의 매크로 관계식에서 크게 벗어나는 것을 볼 수 있고, 흰 형상에 따른 열전달 성능 차이가 마이크로 흰으로 갈수록 커지는 것을 볼 수 있었다.
- (2) 기존의 매크로 흰 배열 실험 결과는 방향에 따라 열전달 성능에 차이를 보였으나, 마이크로 및 미니 흰 배열로 가면서 수직 및 수평 방향에 따른 열전달 성능의 차이가 줄어드는 것을 확인하였다.
- (3) 흰 배열의 형상 변수들의 영향을 고려하여 마이크로 흰 배열에 적합한 실험 관계식을 도출하였으며, 수직 방향 관계식은 약 6.3 %, 수평 방향 관계식은 약 11 %의 평균 오차를 나타냈다.

참고문헌

- (1) Welling, J. R. and Wooldridge, G. B., 1965, "Free Convection Heat Transfer Coefficients From Rectangular Vertical Fins," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 87, pp. 439-444.
- (2) Jones, C. D. and Smith, L. F., 1970, "Optimum Arrangement of Rectangular Fins on Horizontal Surfaces for Free Convection Heat Transfer," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 92, pp. 6~10.
- (3) Erickson, D. and Li, D., 2004, "Integrated Microfluidic Devices," *Analytica Chimica Acta*, Vol. 507, pp. 11-26.
- (4) Bashir, R., 2004, "BioMEMS: State-of-the-Art in Detection, Opportunities and Prospects," *Advanced Drug Delivery Reviews*, Vol. 56, pp. 1565-1586.
- (5) Darabi, J., 2002, "Micro- and Nanoscale Heat Transfer: Challenges and Opportunities," *Heat Transfer Engineering*, Vol. 23, no. 2, pp. 1-2.
- (6) Guo, Z. Y. and Wu, X. B., 1997, "Compressibility Effect of the Gas Flow and Heat Transfer in a Microtube," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 40, No. 13, pp. 3251-3254.
- (7) Papautsky, I., Brazzle, J., Ameal, T. and Frazier, A. B., 1999, "Laminar Fluid Behavior in Microchannels Using Micropolar Fluid Theory," *Sensors and Actuators A-Physical*, Vol. 73, pp. 101-108.
- (8) Mala, G. M. and Li, D., 1999, "Flow Characteristics of Water in Microtubes," *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol. 20, pp. 142-148.
- (9) Guo, Z. Y. and Li, Z. X., 2003, "Size Effect on Single-Phase Channel Flow and Heat Transfer at Microscale," *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol. 24, pp. 284~298.
- (10) Madou, M. J., 2002, *Fundamentals of Microfabrication: the Science of Miniaturization*, 2nd ed., Boca Raton, Fla., CRC Press.
- (11) Hassani, A. V. and Hollands, K. G. T., 1989, "On Natural Convection Heat Transfer From Three-Dimensional Bodies of Arbitrary Shape," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 111, pp. 363~371.