

파라핀 슬러리를 사용한 다칩모듈의 냉각특성

조 금 남* · 최 민 구**

(1997년 12월 10일 접수)

Cooling Characteristics of the Multichip Module Using Paraffin Slurry

Keumnam Cho and M. G. Choi

Key Words : Multichip Module(다칩모듈), Paraffin Slurry(파라핀 슬러리), Mass Fraction(질량분율), Rectangular Channel(사각채널), Heat Transfer Coefficient(열전달계수)

Abstract

The present study investigated the effects of the experimental parameters on the cooling characteristics of the multichip module cooled by the indirect liquid cooling method using water and paraffin slurry. The experimental parameters are mass fraction of 2.5~7.5% for paraffin slurry, heat flux of 10~40W/cm² for the simulated VLSI chips and Reynolds numbers of 5,300~15,900. The apparatus consisted of test section, paraffin slurry maker, pump, constant temperature baths, flowmeter, etc. The test section made of in-line, four-row array of 12 heat sources for simulating 4×3 multichip module which was flush mounted on the top wall of a horizontal rectangular channel with the aspect ratio of 0.2. The inlet temperature was 20°C for all experiments. The size of paraffin slurry was constant as 10~40μm before and after the experiment. The chip surface temperatures for paraffin slurry with the mass fraction of 7.5% showed lower by 16°C than those for water when the heat flux is 40W/cm². The local heat transfer coefficients for the paraffin slurry with the mass fraction of 7.5% were larger by 17~25% than those for water at the first and the fourth row. The local heat transfer coefficients reached to a row-number-independent, thermally fully developed value approximately after the third row. The local Nusselt numbers at the fourth row for paraffin slurry with the mass fraction of 7.5% were larger by 23~29% than those for water.

기 호 설 명

A : 표면적, m²

C_p : 정압비열, kJ/kg · K

D_h : 수력 직경, m

h : 국부 열전달계수, W/m² · K

k : 열전도율, W/m · K

L : 길이, m

Nu : 누셀트수 (=hL_s/k_f)

Pr : 프란틀수 (=μ_f C_p/k_f)

q'' : 열유속, W/cm²

R : 저항, Ohm

Re : 레이놀즈수 (=ρ_fUD_h/μ_f)

T : 온도, °C

U : 채널입구에서의 유속, m/s

V : 전압, Volt

δ : 불확실성

*회원, 성균관대학교 기계공학과

**회원, 성균관대학교 대학원

μ : 점성계수, Ns/m^2

ρ : 밀도, kg/m^3

하첨자

f : 작동유체

i : 채널 입구조건

s : 칩

상첨자

+ : 무차원

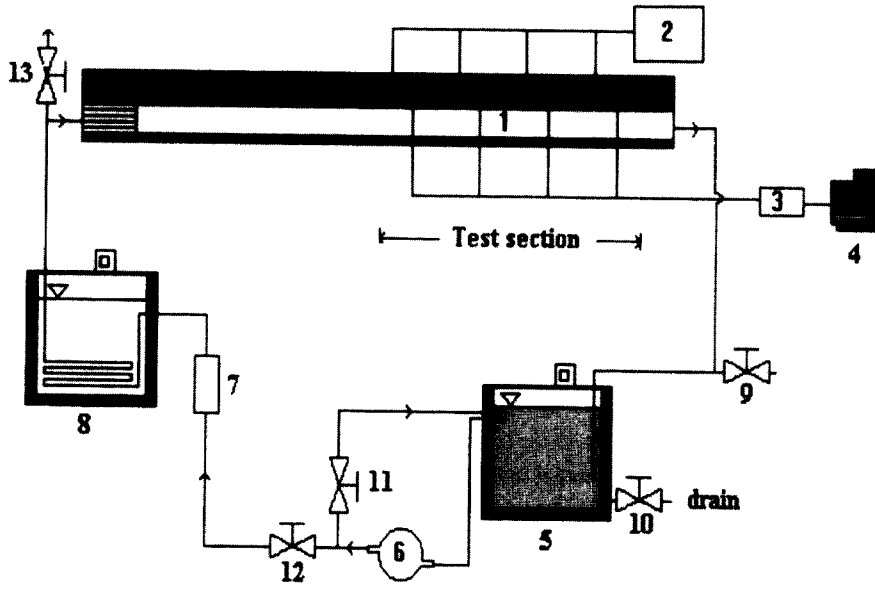
1. 서 론

집적화된 VLSI (Very Large Scale Integrated) 칩에 대해 다칩모듈은 실장의 전체적인 크기와 무게를 줄여 전체 시스템의 부피와 비용을 줄이고 실장 내에서 칩들을 연결하므로 시스템의 신뢰성과 처리속도를 향상시킬 수 있다. 다칩모듈과 같이 실장밀도가 큰 경우 모듈에서 발생하는 열량을 효과적으로 제거할 수 있는 냉각방식의 개발이 요구된다. 단일칩의 경우 상업용은 65°C , 군사용은 $110\sim 125^\circ\text{C}$ 로 내부온도를 제한하며 다칩모듈의 경우는 $75\sim 85^\circ\text{C}$ 범위로 제한하고 있다. 최근 사용되는 다칩모듈은 제한온도가 55°C 정도로 낮아지는 추세를 보인다. 이러한 추세는 1990년대 말에 예상되는 단일칩에서 제거해야 할 열유속이 $50\sim 100\text{W/cm}^2$ 범위, 그리고 다칩모듈에서는 모듈을 구성하는 칩들의 발열량을 모듈면적으로 나눈 열유속이 약 25W/cm^2 정도가 된다.^(1~5) 다칩모듈 냉각방식으로 액체 냉각방식이 사용되어 왔으며, 작동유체로 절연성과 화학적으로 안정된 fluorocarbon계열의 냉각제를 사용하는 직접 냉각방식이 주로 사용되었다. 직접 액체 냉각방식은 크게 단상을 사용한 강제대류 냉각방식^(6,7)과 풀비등 냉각방식,^(8,9) 그리고 강제대류비등 냉각방식^(10~11)으로 구분된다. 그러나 근래는 전체 시스템의 유지 보수문제와 냉각유체의 열히스테리시스로 인한 열충격 문제 때문에 직접 냉각방식보다 간접 냉각방식이 사용되고 있다. 내부온도를 제한온도 이하로 유지시켜 다칩모듈의 오동작을 억제하고, 간접 냉각방식을 사용함에 따라 발생하는 열저항을 최소화하여 높은 열량을 효과적으로 제거할 수 있는 새로운 액체 냉각방식이 요구된다. 따라서, 본 연구에서는 간접 액체 냉각방식에 잠열량을 이용하여 칩표면온도를 제한온도로 낮

출 수 있는 상변화물질 슬러리 냉각방식의 전열특성을 조사하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에서 사용한 장치의 개략도는 Fig. 1에 나타나 있다. 실험장치는 시험부, 슬러리제작부, 온도조절부, 유량조절부, 전원공급부와 계측부로 구성되었다. 시험부의 상세도는 Fig. 2와 같으며 다칩모듈 부와 채널부로 구성되어 있다. 다칩모듈 부는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 12개의 모사칩들을 4행과 3열 형태로 배열하였으며 모사칩 각각은 전형적인 VLSI 전자칩의 크기인 $1.27\text{cm}\times 1.27\text{cm}$ 를 갖는다. 모사칩간의 간격은 칩의 크기와 동일한 1.27cm 로 하였다. 모사칩 하부에 구리로 만든 열심을 부착하고 다른 부분은 단열시켜 열이 구리관을 통해 모사칩 하부 즉 사각채널로만 방출되도록 하였다. 모사칩의 발열량을 얻기 위한 히터로 $45.1\Omega/\text{m}$ 인 니켈크롬 열선 히터를 사용하였다. 열선히터를 사용한 이유는 12개의 모사칩에 대한 저항값을 일정하게 유지하기 쉽기 때문이다. 각 히터의 저항은 $18.2\pm 0.2\Omega$ 이며 직류전원 공급기를 통해 0.03V 의 정확도로 전원을 공급하였다. 동판의 크기는 히터와 동일하며 ($1.27\text{cm}\times 1.27\text{cm}$) 두께는 6mm 였다. 동판의 두께가 2mm 로 얇은 경우 동판내부의 중심부와 가장자리에 3개의 보정된 열전대를 설치하여 측정된 결과, 각 동판내의 온도차가 최대 5°C 까지 나타났으나 동판의 두께가 6mm 인 경우 전체 열유속범위에서 최대 0.5°C 의 온도차 이내였다. 온도계측은 동판에 직경 0.7mm 구멍을 가공한 후 열전대 (T-type, 5mil)를 삽입하여 이루어 졌으며 실험에 사용한 열전대는 실험 온도구간에서 표준 RTD를 이용해 $\pm 0.15^\circ\text{C}$ 이내로 보정되었다. 사각채널부는 아크릴을 가공하여 제작하였다. 뉴톤유체의 완전발달된 단상 층류유동의 경우 사각채널의 종횡비에 따른 채널내 전열특성을 기준 문헌⁽¹²⁾에서 찾아 볼 수 있다. 본 연구의 경우와 유사한 사각채널의 윗면이 균일한 열유속으로 가열되고 다른 면들이 단열되어 있는 경우 종횡비가 0.2 인 경우에 압력강하를 고려한 전열성능이 가장 우수하게 조사되었다. 본 연구에서는 난류영역내 유동을 다루므로 문헌의 자료를 그대로 적용할 수 없으나 열원의 배치와 사각채널의 제작 가능성을 고려하여 종횡비 $0.2(76.7\pm 0.1\text{mm}\times 15.4\pm 0.2$



- 1. Rectangular channel
- 2. DC power supply
- 3. Data acquisition system
- 4. Personal computer
- 5. Constant temperature bath
- 6. Pump
- 7. Flow meter
- 8. Cooling chamber
- 9-13. Valves

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus.

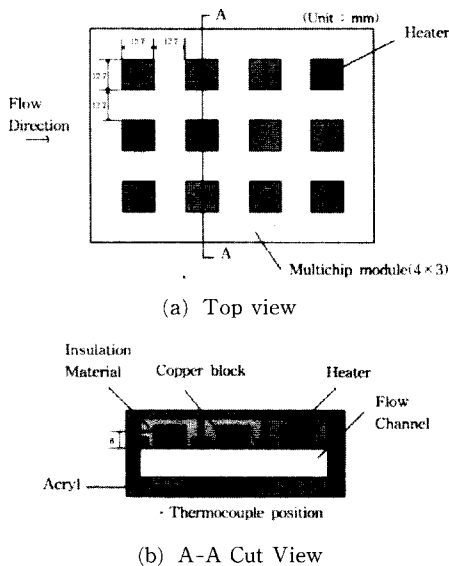


Fig. 2 Details of the test section.

mm)를 선택하였다. 사각채널의 수력직경(D_h)은 2.56 cm이며 시험부 입구에서의 난류 완전발달 유동조건을 만족시키기 위해 수력직경의 약 40배 정

도인 100 cm의 입구길이(entrance length)를 두었고 균일 입구 유동조건을 위해 사각채널 입구에 허니컴을 위치시켰다.

다칩모듈을 모사한 불연속 발열체가 존재하는 사각채널내 냉각성능에 영향을 미치는 실험변수들로 파라핀 슬러리의 질량분율, 열유속 및 레이놀즈수를 선정하였다. 열유속은 직류전력 공급기에 의해 모사칩에 공급하는 열량을 모사칩의 발열면적으로 나눈 값으로 열유속범위는 $10 \sim 40 \text{ W/cm}^2$ 이다. 사각채널의 수력직경으로 구한 레이놀즈수는 5,300~15,900 범위였으며, 실험은 완전발달 난류 유동조건에서 이루어졌고 시험부내의 유입온도는 20.0°C 로 일정하게 유지시켰다. 상변화물질로는 DSC(Differential Scanning Calorimetry)로 측정했을 때 43.6°C 의 용해온도와 175.6 kJ/kg 의 용해 잠열을 갖는 파라핀을 사용하였으며 파라핀을 미세한 입자로 만들기 위해 유화제(Triton X-100)가 사용되었다. 파라핀 슬러리의 질량분율은 2.5, 5, 7.5%이었다.

실험을 수행한 절차는 다음과 같다. 상변화물질, 물과 유화제의 정확한 양을 결정한 후, 항온조 내

에 증류수와 유화제를 넣어 충분히 희석시켰다. 향온조내의 온도를 상변화물질의 상변화 온도보다 높게 설정한 후 각 질량분율에 해당하는 상변화물질을 향온조내에 넣었다. 액체상태의 증류수, 파라핀계 상변화물질, 유화제 혼합물을 교반기를 이용하여 충분히 혼합시킨 후 펌프를 이용하여 냉각조내로 유입시켰다. 냉각조내부의 온도는 파라핀계 상변화물질의 상변화 온도보다 낮은 상태로 유지시켰으며 냉각조 내부온도에 의해 채널입구에서의 유체온도가 결정된다. 생성된 파라핀 슬러리의 표본을 채널 입구에 있는 밸브를 통해 채취한 후, 현미경으로 파라핀 슬러리 입자크기를 측정하였다. 원하는 상변화물질 슬러리를 유량조절 밸브를 이용해 일정한 유동율로 시험부 방향으로 흘려 보냈다. 시험부에 설치한 모사칩에 직류전력 공급기를 이용해 일정한 열유속으로 열을 공급하고 열전대를 이용하여 모사칩 각 열에서의 온도와 채널내의 유체온도를 측정한다. 각각의 질량분율에 따라 직류전력 공급기의 전압을 바꾸어 각 모사칩 표면에서의 열유속을 변경시켜 가며 각 모사칩 표면에서의 온도와 채널의 입출구온도를 측정하였다.

3. 자료처리 및 오차해석

오차해석에 대한 식은 Moffat⁽¹³⁾이 제시한 식 (1)을 사용하였다. 식 (1)에서 y 는 구하고자 하는 값이고, $\delta x_1, \delta x_2, \dots$ 은 y 에 영향을 주는 변수들인 x_1, x_2, \dots 들의 불확실성을 나타낸다.

$$\delta y = \left(\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \delta x_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \delta x_2 \right)^2 + \dots \right)^{1/2} \quad (1)$$

국부 열전달계수는 칩에 공급한 열유속을 칩표면 온도와 채널 입구온도와 차로 나누어 구해지며 이는 식 (2)에 나타나 있다. 열유속은 공급한 전압과 전열선의 저항을 이용해 구해진다.

$$h = \frac{q''}{(T_s - T_i)} = \frac{V^2}{RA_s (T_s - T_i)} \quad (2)$$

식(1)을 이용하여 구한 국부 열전달계수와 열유속에 대한 오차해석식은 식 (3)과 (4)와 같다.

$$\frac{\delta h}{h} = \sqrt{\left(\frac{\delta q''}{q''} \right)^2 + \left(\frac{\delta T_s}{T_s - T_i} \right)^2 + \left(\frac{\delta T_i}{T_s - T_i} \right)^2} \quad (3)$$

$$\frac{\delta q''}{q''} = \sqrt{\left(\frac{\delta R}{R} \right)^2 + \left(2 \frac{\delta V}{V} \right)^2 + \left(2 \frac{\delta L_s}{L_s} \right)^2} \quad (4)$$

실험범위에서 δR 은 0.2Ω, δV 는 0.03V, δL_h 는

0.02 mm이다. 식 (4)를 이용해 구한 열유속에 대한 오차범위는 $\pm 1.15 \sim \pm 1.19\%$ 이며, 식 (3)을 이용해 구한 국부 열전달 계수에 대한 오차는 $\pm 2.79 \sim \pm 3.04\%$ 범위이다.

4. 결과 및 고찰

4.1 파라핀 슬러리 입자크기

파라핀 슬러리를 다음과 같이 만들었다. 증류수가 들어 있는 조내에 유화제(emulsifier)를 먼저 충분히 희석시킨다. 파라핀의 상변화온도 이상으로 조내의 온도를 올리고 질량분율 2.5, 5, 7.5%에 해당하는 파라핀을 녹여 물, 파라핀, 유화제 혼합물용액을 만든 후 교반기를 이용하여 잘 혼합시킨다. 열교환기를 통해 파라핀의 용융점 이상의 온도를 갖는 물, 유화제, 파라핀 혼합용액을 상변화온도 이하로 냉각시켜 미세한 크기의 입자를 생성시켰다. 슬러리내 입자의 크기는 유화제의 양과 교반 속도에 의해 결정된다. 본 실험에서는 유화제의 양을 반복 실험을 통해 정했고, 파라핀에 대한 유화제의 질량분율은 3.3%로 2.5, 5, 7.5%의 파라핀 질량분율에 대해 동일하게 적용하였다. 파라핀계 상변화 물질은 물에 비해 밀도가 작기 때문에 물과 혼합시키면 위로 뜨게 된다. 따라서 채널내를 유동하는 입자들의 크기가 큰 경우 막힘현상이 발생할 수 있으므로 미세한 입자를 유지해야 한다. 대표적으로 질량분율 2.5와 7.5%에 대한 파라핀 슬러리 입자크기를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 파라핀 슬러리 입자크기는 파라핀의 질량분율에 관계없이 10~40μm의 범위였다. 따라서 각 질량분율의 파라핀에 대해 적용한 유화제의 농도로 3.3%가 적절함을 알 수 있었다. 또한 실험시작과 종료 후에도 입자의 크기는 Fig. 3에서 알 수 있듯이 변화가 없었다.

4.2 모듈내 온도변화

파라핀의 질량분율에 따른 다칩모듈내 1행과 4행에서의 칩 표면온도 분포가 열유속 10과 40W/cm², 레이놀즈 수 15,900에 대해 Fig. 4에 나타나 있다. 1행과 4행에 대한 칩 표면온도는 각 행을 구성하는 세계의 칩 표면온도를 산술평균하여 구하였다. 실험범위내에서 각 행 세계 칩 표면온도는 $\pm 1.1^\circ\text{C}$ 이내에서 일치하였으며, 이는 측정된 칩 표면 평균 온도의 $\pm 1.2\%$ 이내에 해당한다. 칩 표면온도는 1

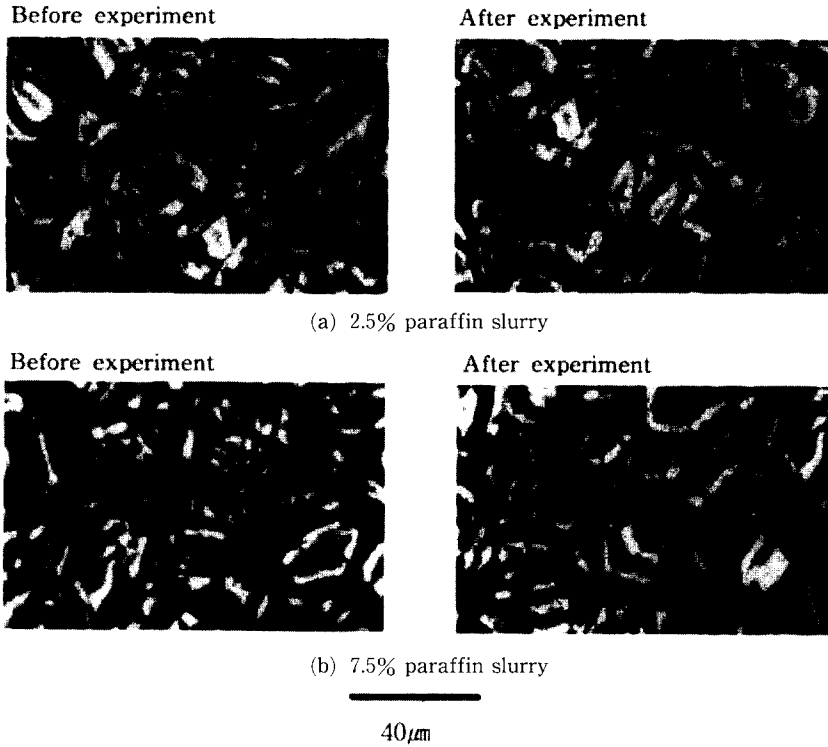


Fig. 3 Photographs of paraffin slurry with the mass fraction of 2.5% and 7.5%.

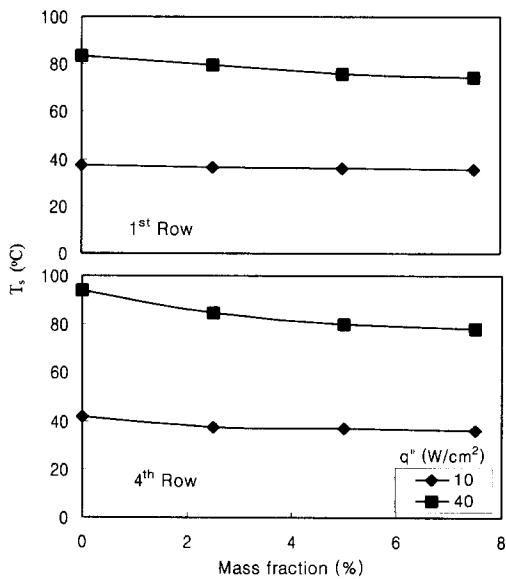


Fig. 4 Chip surface temperatures at the 1st and 4th row vs. mass fraction (when Re_{Dh} is 15,900).

행과 4행에서 열유속이 10과 40W/cm²일 경우 모

두에 대해 질량분율의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 열유속이 10W/cm²로 작을 때, 질량분율이 0에서 7.5%로 증가함에 따라 1행에서는 2.1°C, 4행에서는 5.5°C 만큼의 표면온도 감소가 나타났다. 이에 비해 열유속이 40W/cm²으로 클 때 질량분율이 0에서 7.5%로 증가함에 따라 1행에서는 9.2°C, 4행에서는 15.8°C 만큼의 표면온도 감소가 나타났다. 열유속이 10W/cm²일 때, 칩 표면온도가 상변화물질의 융해온도보다 낮으므로 상변화에 의한 잠열 냉각효과가 없어서 질량분율의 실험범위 내에서 40W/cm²일 경우보다 작은 칩 표면온도차이를 나타냈다. 열유속이 40W/cm²일 때, 질량분율의 증가에 따라 표면온도의 감소정도가 크게 나타나는 것은 파라핀 슬러리의 상변화에 의한 잠열 냉각효과가 질량분율의 증가에 따라 크기 때문이다. 이는 10W/cm²의 낮은 열유속 보다 40W/cm²의 높은 열유속에서 파라핀 슬러리가 물에 비해 우수한 냉각특성을 나타냄을 보이고 있다.

열유속에 따른 다칩모듈의 1행과 4행에서의 칩 표면온도를 파라핀의 질량분율과 레이놀즈수 15,900에 대해 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 4에서와

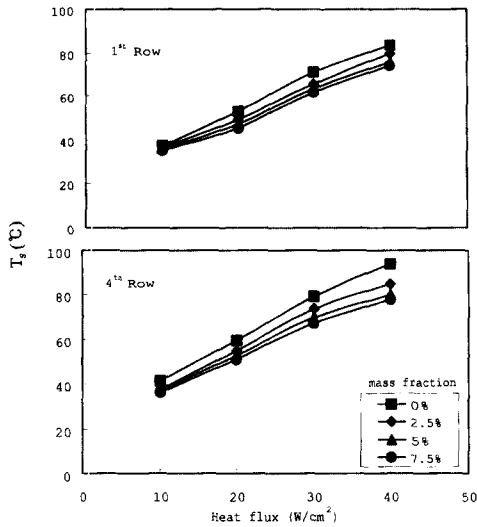


Fig. 5 Chip surface temperatures at the 1st and 4th row vs. heat flux (when Re_{Dh} is 15,900).

마찬가지로 칩 표면온도는 각 행을 구성하는 세 칩 표면온도를 산술 평균하여 구하였다. 칩 표면온도는 1행과 4행 모두에 대해 열유속에 따라 증가하는 경향을 나타내며 질량분율이 0%인 물에 비해 파라핀 슬러리의 경우 낮은 칩 표면온도를 보여 준다. 그러나 1행과 4행 모두에서 전체 열유속 범위에 대해 파라핀의 질량분율 증가량에 따른 표면온도의 감소폭은 작아 진다. 1행보다 4행의 경우에 심하게 나타났으며, 4행에서 열유속이 $40W/cm^2$ 일 때 질량분율이 2.5%에서 7.5%로 증가함에 따라 표면온도의 감소 폭은 9.1, 4.6, 2.1°C로 작아졌다. 이는 질량분율이 증가해도 칩 표면 주위의 파라핀 슬러리가 용해되는 양의 증가폭이 선형적으로 증가하지 않고 있기 때문이다. 따라서 열유속이 $40W/cm^2$ 일 때 파라핀의 질량분율을 7.5%이상으로 증가시켜도 큰 표면온도의 감소를 기대할 수 없음을 나타내는 것이다. 용해잠열을 이용한 파라핀 슬러리 냉각방식은 물보다 우수한 냉각특성을 나타내어 다칩모듈내의 온도를 낮게 유지시켜 주므로, 다칩모듈의 최고 제한온도인 85°C 범위내에서 $40W/cm^2$ 이상의 높은 열유속인 경우에도 적용될 수 있다.

4.3 시험부내 국부 열전달계수

파라핀 슬러리의 질량분율에 따른 1행과 4행에서의 국부 열전달계수들을 최대 레이놀즈수인 15,900에서 열유속이 10과 $40W/cm^2$ 일 때 Fig. 6에 나타

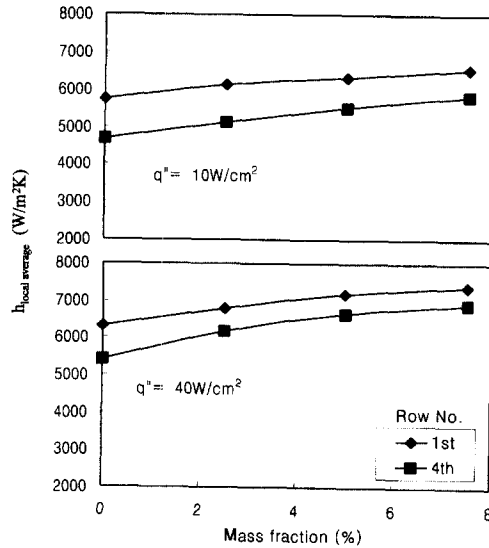


Fig. 6 Local heat transfer coefficients vs. mass fraction of paraffin slurry (when Re_{Dh} is 15,900).

내었다. 국부 열전달계수들은 각 행을 구성하는 세 개의 칩 표면온도를 산술 평균한 값과 시험부내 입구온도를 이용하여 식 (2)로부터 구했다.

윗면에 불연속 발열체가 존재하는 사각 채널 내에서 bulk온도를 정의하기 위해서는 각 열원이 존재하는 채널 단면에서의 온도분포를 알아야 한다. 그러나 각 열원에서의 온도분포가 상이하며, 칩 근처에서는 매우 급격한 온도분포를 나타낼 것이다. 이에 따라 사각 채널내의 bulk온도를 구하기가 어렵기때문에 시험부 입구온도를 기준으로하여 국부 열전달계수를 구했다.

질량분율이 0에서 7.5%로 증가함에 따라 열전달 계수값은 10과 $40W/cm^2$ 의 열유속에 대해 1행, 4행 모두 5%의 질량분율 이후에 완만한 증가 추이를 나타내고 있다. 특히 4행의 경우 $40W/cm^2$ 의 열유속에 대해 질량분율의 증가에 따라 국부 열전달계수의 증가폭은 13, 7.7, 3.6%로 감소하였다. 이를 통해 레이놀즈수가 15,900일 때 열유속 10~ $40W/cm^2$ 범위에서 질량분율이 7.5%이후에서 국부 열전달계수가 수렴하여 질량분율이 7.5% 이상으로 증가하여도 열전달 계수의 증가는 크지 않을 것임을 알 수 있다.

파라핀 슬러리의 질량분율에 따른 1행과 4행에서의 국부 열전달계수들을 물에 대한 국부 열전달계수로 나누어 구한 무차원 국부 열전달계수(h^*)를

최대 레이놀즈 수인 15,900에서 열유속이 10과 40W/cm²일 때 Fig. 7에 나타내었다.

열유속 10과 40W/cm²에 대한 무차원 국부 열전달계수값의 변화는 1행보다는 4행에서 두드러지며 1행과 4행 모두에서 열유속 10W/cm²보다는 40W/cm²인 경우가 무차원 국부 열전달계수 값이 크게

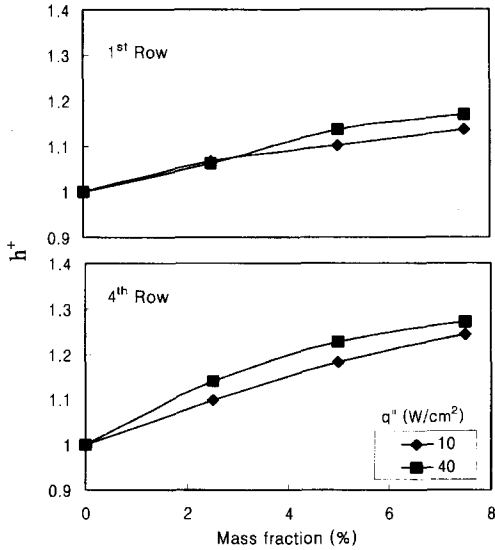


Fig. 7 Dimensionless local heat transfer coefficients at the 1st and 4th row (when Re_{Dh} is 15,900).

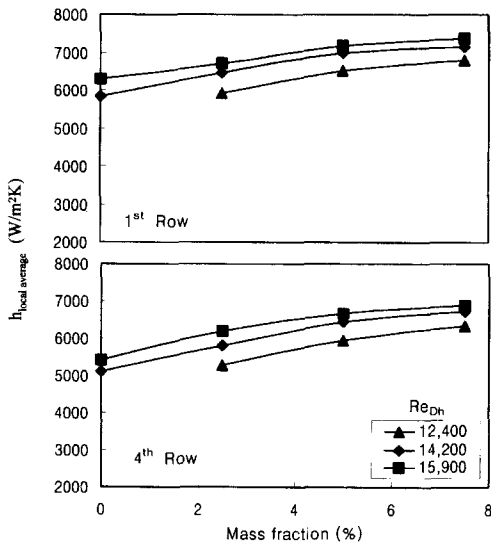


Fig. 8 Local heat transfer coefficients vs. mass fraction of paraffin slurry (when heat flux is 40W/cm²).

나타났다. 특히 질량분율 5%에 대해 1행의 경우 3.3%, 4행의 경우 3.8%정도 큰 무차원 국부 열전달계수값을 나타냈으며, Fig. 6에서의 마찬가지로 무차원 국부 열전달계수의 증가 폭은 1행과 4행 모두 질량분율 5%이후에서 감소하는 경향을 나타내었다.

파라핀 슬러리의 질량분율에 따른 1행과 4행에서의 국부 평균 열전달계수들을 최대 열유속인 40 W/cm²에 대해 레이놀즈 수 12,400과 14,200과 15,900일 때 Fig. 8에 나타내었다. 레이놀즈수가 12,400일 때, 물의 경우 칩 표면온도가 110℃이상이므로 커져서 의미가 없으므로 국부 열전달계수 값을 나타내지 않았다. 질량분율 범위내에서 1행과 4행 모두에 대해 레이놀즈 수가 증가함에 따라 국부 열전달계수 값이 증가했다. 그러나 레이놀즈수 증가에 따른 국부 열전달계수의 증가폭은 감소하여, 질량분율 2.5%에 대해 레이놀즈수가 14.3%에서 28.5%로 증가할 때 1행의 경우 열전달계수 값은 9.2%에서 13.0%로, 4행의 경우 9.9%에서 16.8%로 증가폭이 감소하였다. 질량분율 7.5%에 대해서도 마찬가지로 1행의 경우 5.2%에서 8.5%로, 4행의 경우 6.2%에서 8.7%로 증가폭이 감소하였다. 이는 강제대류 냉각시 국부 열전달계수의 증가폭은 레이놀즈수의 0.8이하의 승으로 비례하기 때문이다.

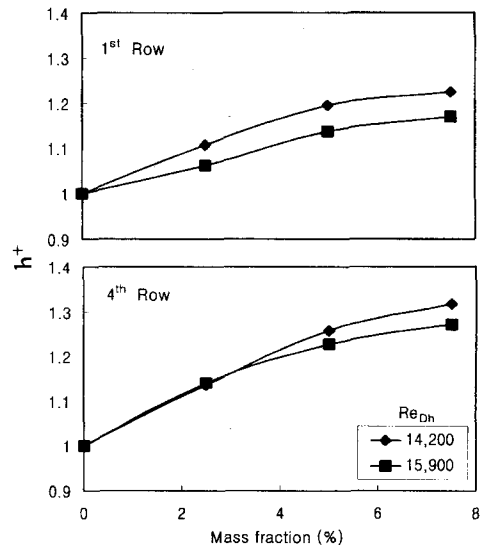


Fig. 9 Dimensionless local heat transfer coefficients at the 1st and 4th row vs. mass fraction of paraffin slurry (when heat flux is 40W/cm²).

파라핀 슬러리의 질량분율에 따른 1행과 4행에서의 무차원 국부 열전달계수들을 최대 열유속인 40W/cm²에 대해 레이놀즈 수 14,200과 15,900일 때 Fig. 9에 나타내었다. 1행보다는 4행에서 무차원 국부 열전달계수 값이 컸으며 열유속 40W/cm²에 대해 무차원 국부 열전달계수 값은 레이놀즈수 15,900보다 14,200인 경우가 1행과 4행 모두 큰 값을 나타낸다. 이는 강제대류시 국부 열전달계수 값이 물의 경우는 레이놀즈수의 0.8승에 비례하는 관계를 나타내지만 파라핀 슬러리의 경우는 레이놀즈수의 0.8이하의 승으로 비례하기 때문이다. 4행보다는 1행에서 레이놀즈 수에 의한 영향이 두드러지며 질량분율 7.5%에서 1행의 경우 무차원 국부 열전달계수 값은 레이놀즈수가 14,200일 때가 레이놀즈수가 15,900일 때보다 4.6%만큼 큰 값을 나타냈고, 4행의 경우 3.4%정도 큰 값을 나타냈다. 이를 통해 레이놀즈수가 큰 경우 유속에 의한 단상 강제대류 열전달효과가 지배적임을 알 수 있으며 잠열을 이용하는 파라핀 슬러리의 냉각효과를 증대시키기 위해서는 열유속에 따라서 적절한 유속의 선택이 중요함을 알 수 있다. Fig. 7에서와 마찬가지로 각 레이놀즈 수에 대해 1행과 4행 모두 질량분율 5%이후에서 무차원 열전달계수 값이 수렴하는 경향을 나타내었다. 특히 1행의 경우 레이놀즈수 14,200에서 질량분율 증가에 따른 무차원 국부 열전달계수 값의 증가폭이 10.6, 7.8, 2.5%로 줄어

들었다.

물과 파라핀의 질량분율 7.5%에 대한 국부 열전달계수들을 행번호에 따라 최대 레이놀즈수인 15,900에서 열유속이 10과 40W/cm²일 때 Fig. 10에 나타내었다. 물과 7.5% 파라핀 슬러리 모두에 대해 행번호의 증가에 따라 3행이후에서 열전달계수의 감소 폭이 점차 작아 짐을 알 수 있다. 열유속 40W/cm²에 대해 물의 경우 행번호의 증가에 따라 국부 열전달계수 값의 감소 정도는 8.4, 4.9, 2.3%로 작아졌으며 7.5% 파라핀 슬러리는 5.0, 1.8, 0.8%로 작아졌다. 열전달계수의 감소 정도로부터 알 수 있듯이 3행 또는 4행 이후에서(칩 길이의 5배 또는 7배 이후에서) 열적 완전발달조건이 나타나고 있으며 이는 타 연구⁽¹⁴⁾의 결과와도 유사하다. 각 행에 대해 7.5% 파라핀 슬러리가 물에 비해 큰 열전달계수를 나타내며 특히 질량분율 7.5%인 경우 1행과 4행에서 물에 비해 17~25%정도 큰 열전달계수값을 나타낸다. 이는 파라핀 슬러리가 물에 비해 우수한 냉각제임을 나타내는 것이다.

물에 대한 1행과 4행에서의 국부 열전달계수로부터 구한 누셀트수를 레이놀즈수의 함수로 나타낸 Incropera 등⁽⁷⁾의 실험자료와 비교하여 Fig. 11에 나타내었다.

Incropera 등⁽⁷⁾은 물을 이용해 채널 내에서 칩

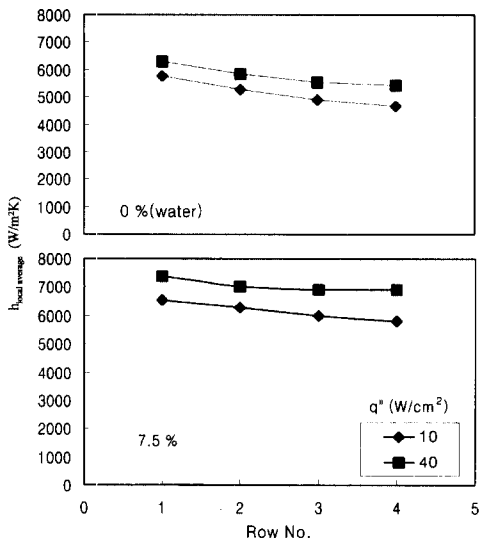


Fig. 10 Local heat transfer coefficient vs. row number (when Re_{Dh} is 15,900).

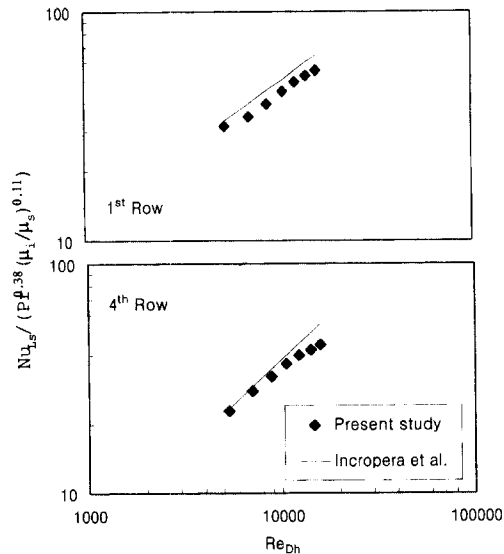


Fig. 11 Comparison with the correlation by Incropera et al.⁽⁷⁾ for water (when the heat flux is 10W/cm²).

냉각특성을 조사한 점에서 본 실험과 유사하나 열원을 채널 밀면에 위치시킨 점에서 차이가 있다. 그가 제시한 상관식은 $10\text{W}/\text{cm}^2$ 의 열유속까지에 대해서만 적용되며 식의 형태는 다음과 같다.

$$Nu_{Ls}/(\text{Pr}^{0.38}(\mu_i/\mu_s)^{0.11}) = a Re_{Dh}^b \quad (5)$$

식의 a, b는 상수이며 Table 1에 나타나 있다.

1행과 4행 모두에 대해 Incropera 등⁽⁷⁾의 실험과 동일한 열유속 $10\text{W}/\text{cm}^2$ 에서 1행의 경우 4~13%, 4행의 경우 2~17%정도 작은 값을 나타내었다. 이는 Incropera 등⁽⁷⁾과 같이 열원이 채널 밀면에 위치해 있는 경우 자연대류의 영향으로 냉각특성이 증대되기 때문이다. 본 연구에서 구한 물에 대한 상관식의 계수들은 Table 1에 나타나있다. 상관식에 대한 결정계수는 0.99이었다. Incropera 등⁽⁷⁾의 결과에 비해 레이놀즈수에 따른 누셀트수의 변화에 대한 기울기가 약간 작게 나타났다.

파라핀 슬러리의 질량분율에 따른 1행과 4행에서의 누셀트수를 $10\text{W}/\text{cm}^2$ 의 열유속일 때 레이놀즈수에 따라 Fig. 12에 나타내었다. 동일한 레이놀즈수에 대해 1행보다는 4행에서 파라핀 슬러리와 물에 대한 누셀트수의 차이가 크게 나타났다. 1행과 4행 모두에 대해 레이놀즈수 증가에 따라 파라핀 슬러리가 물에 비해 큰 누셀트수를 나타내며 특히 레이놀즈수가 15,900일 때 질량분율 7.5%의 파라

핀 슬러리는 물에 비해 4행에서 23%만큼, 1행에서 14%만큼 큰 누셀트수를 나타내었다. 열유속이 $10\text{W}/\text{cm}^2$ 에서 각 질량분율에 대한 1행과 4행에서의 누셀트수에 대한 상관식의 계수들을 Table 1에 나타내었다. Incropera 등⁽⁷⁾의 상관식과 비교할 때 1행과 4행 모두에서 유사한 크기의 기울기를 나타내며 y축 절편에 해당하는 계수 값들은 7.5% 파라핀 슬러리가 1행의 경우 44.3%, 4행의 경우

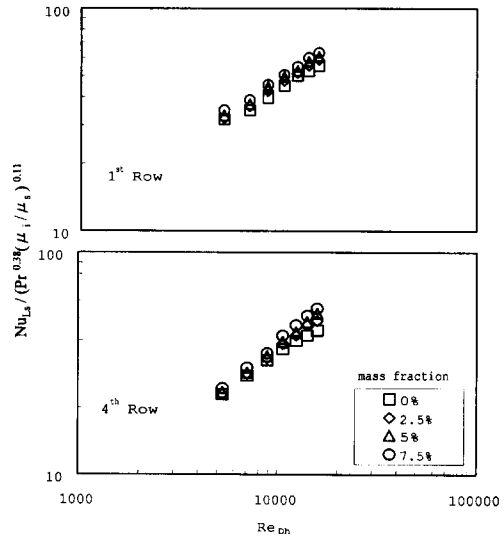


Fig. 12 Nusselt number vs. Reynolds number (when the heat flux is $10\text{W}/\text{cm}^2$).

Table 1 Values of coefficient a and b for water and paraffin slurry in Eq. (5) (when the heat flux is $10\text{W}/\text{cm}^2$).

	Mass fraction	Row No.	a	b
Incropera et. al. ⁽⁷⁾	0%	1	0.194	0.60
		4	0.029	0.78
Present Work	0%	1	0.323	0.53
		4	0.120	0.61
	2.5%	1	0.253	0.56
		4	0.055	0.70
	5%	1	0.237	0.57
		4	0.039	0.74
	7.5%	1	0.280	0.56
		4	0.032	0.77

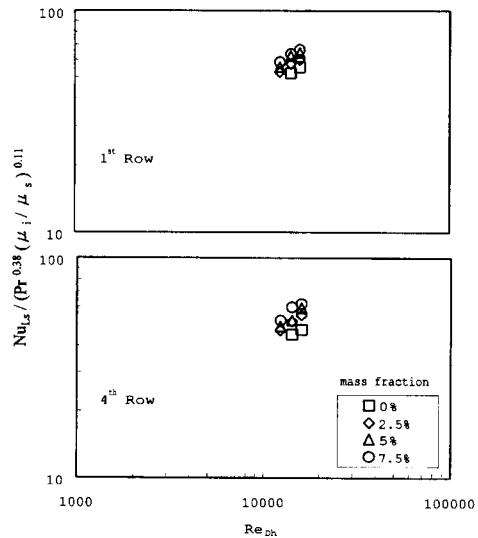


Fig. 13 Nusselt number vs. Reynolds number (when the heat flux is $40\text{W}/\text{cm}^2$).

12.4%만큼 큰 값을 나타내었다.

파라핀 슬러리의 질량분율에 따른 1행과 4행에서의 누셀트수를 $40\text{W}/\text{cm}^2$ 의 열유속일 때 레이놀즈수에 따라 Fig. 13에 나타내었다. 4행의 경우 레이놀즈수가 15,900일 때 질량분율 7.5%의 파라핀 슬러리는 물에 비해 29%만큼, 1행의 경우 19%만큼 큰 누셀트수를 나타내었다. 물에 비해 파라핀 슬러리의 전열 성능향상은 레이놀즈 수가 증가함에 따라 더 크게 나타났다. 상변화를 통해 액체상태로 된 파라핀의 열전도계수는 물에 비해 23%정도로 작은 값을 나타낸다. 따라서 전체 실험범위 중 저 레이놀즈수 범위에서는 액체상태의 파라핀이 칩 표면에 존재하는 시간이 고 레이놀즈수 범위보다 상대적으로 길어 오히려 전열성능을 저하시키게 된다.

4. 결 론

(1) 유화제를 이용하여 만들어진 파라핀 슬러리의 입자크기는 $10\sim 40\mu\text{m}$ 범위내에서 일정하게 유지되었으며, 입자의 크기는 실험 전후에서 동일하였다.

(2) 질량분율이 7.5%인 파라핀 슬러리의 경우는 물에 비해 열유속이 $40\text{W}/\text{cm}^2$ 일 때 16°C 정도 낮은 칩 표면온도를 나타냈으며 1행과 4행에서 17~25% 정도 큰 국부 열전달계수값을 나타내었다.

(3) 용해잠열을 이용한 파라핀 슬러리 냉각방식은 물보다 우수한 냉각특성을 나타내어 다칩모듈내의 온도를 낮게 유지시켜 주므로, 다칩모듈의 최고 제한온도인 85°C 범위내에서 $40\text{W}/\text{cm}^2$ 이상의 높은 열유속인 경우에도 적용될 수 있다.

(4) 열유속과 레이놀즈수 실험범위에서 파라핀 슬러리와 물을 사용한 경우 3행 또는 4행(칩 길이의 5배 또는 7배) 이후에서 국부 열전달계수의 실험오차 범위 이내로 열적 완전발달 조건이 나타났다.

(5) 열유속이 $10\text{W}/\text{cm}^2$ 일 때 Incropera 등⁽⁷⁾의 결과와 2~17%이내에서 일치하였다.

(6) 질량분율이 7.5%인 파라핀 슬러리는 $10\sim 40\text{W}/\text{cm}^2$ 의 열유속 범위에서 물에 비해 23~29%만큼 큰 열전달 특성을 나타냈다.

후 기

본 연구는 1996년도 교육부 학술연구조성비(기계공학: ME96-A-08)에 의하여 연구되었으며 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Hannemann, R., Bar-Cohen, A., 1986, "High Heat from a Small Package," *Mechanical Engineering*, pp. 36~42.
- (2) Nakayama, W., 1986, "Thermal Management of Electronic Equipment: A Review of Technology and Research Topics," *Appl. Mech. Rev.*, Vol. 39, pp. 1847~1867.
- (3) Incropera, F. P., 1988, "Convection Heat Transfer in Electronic Equipment Cooling," *Trans. of the ASME, J. Heat Transfer*, Vol. 110, pp. 1097~1111.
- (4) Bar-Cohen, A., 1992, "State-of-the-Art and Trends in the Thermal Packaging of Electronic Equipment," *Trans. of the ASME, J. Electronic Packaging*, Vol. 114, pp. 257~270.
- (5) Bar-Cohen, A., 1994, "Trends in the Packaging of Computer Systems," *Cooling of Electronic Systems*, Kakac, C., Yuncu, H. and Hijikata, K., Eds., Kluwer Academic Publishers, pp. 17~45.
- (6) Baker, E., 1972, "Liquid Cooling of Microelectronic Devices by Free and Forced Convection," *Microelectronics and Reliability*, Vol. 11, pp. 213~222.
- (7) Incropera, F. P., Kerby, J. S., Moffatt, D. F., Ramadhyani, S., 1986, "Convection Heat Transfer from Discrete Heat Sources in a Rectangular Channel," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 29, pp. 1051~1058.
- (8) Mudawar, I., Anderson, T. M., 1990, "Parametric Investigation into the Effects of Pressure, Subcooling, Surface Augmentation and Choice of Coolant on Pool Boiling in the Design of Cooling Systems for High Power Density Electronic Chips," *Trans. of the ASME, J. Electronic Packaging*, Vol. 112, pp. 357~382.

- (9) Park, K. A., Bergles, A. E., 1987, "Natural Convection Heat Transfer Characteristics of Simulated Microelectronic Chips," *Trans. of the ASME, J. Heat Transfer*, Vol 109, pp. 90~96.
- (10) Heindel, T. J., Ramadhyani, S., Incropera, F. P., 1992, "Liquid Immersion Cooling of a Longitudinal Array of Discrete Heat Sources in Protruding Substrates: II-Forced Convection Boiling," *Trans. of the ASME, J. Electronic Packaging*, Vol. 114, pp. 63~70.
- (11) Mudawar, I., Maddox, D. E., 1990, "Enhancement of Critical Heat Flux from High Power Microelectronic Heat Sources in a Flow Channel," *Trans. of the ASME, J. Electronic Packaging*, Vol. 112, pp. 241~248.
- (12) Hartnett, J. P. Kostic, M., 1989, "Heat Transfer to Newtonian and Non-Newtonian Fluids in Rectangular Ducts," *Advances in Heat Transfer*, Vol. 19, pp. 247~356.
- (13) Moffat, R. J., 1985, "Using Uncertainty Analysis in the Planning of and Experiment," *J. Fluid Engineering*, Vol. 107, pp. 173~182.
- (14) Garimella, S. V., Eibeck, P. A., 1990, "Heat Transfer Characteristics of an Array of Protruding Elements in Single Phase Forced Convection," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 33, No. 12, pp. 2659~2669.