

냉각제들에 따른 불연속 발열체의 냉각성능 연구

Study on the cooling performance of discrete heat sources using coolants

최민구*, 조금남**
M. G. Choi, K. N. Cho

Key words: Multichip module(다칩모듈), PF-5060(냉각제), Paraffin slurry(파라핀 슬러리), 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, PF-5060, and paraffin slurry. The experimental parameters were coolants including paraffin slurry with mass fraction of 2.5~7.5%, heat flux of 10~40 W/cm² for the simulated VLSI chips and Reynolds numbers of 3,000~20,000. The size of paraffin slurry was constant as 10~40 μm before and after the experiment. The chip surface temperatures for paraffin slurry were lower than those for water and PF-5060. The local heat transfer coefficients for the paraffin slurry were larger than those for water and the local heat transfer coefficients reached a row-number-independent and thermally-fully-developed value approximately after the third row. The local Nusselt numbers for paraffin slurry with a mass fraction of 7.5% were larger by 20~38% than those for water. The paraffin slurry with a mass fraction of 5% showed the best thermal and hydrodynamic characteristics when local heat transfer and pressure drop were considered simultaneously.

기 호 설 명

A : 면적 [m²]

C_p : 정압비열 [kJ/kgK]

D_h : 수력직경 [m]

EF : 항상계수, 식(14)

f : Fanning 마찰계수, $\Delta PD_h/2\rho LU^2$

h : 열전달계수 [W/m²K]

k : 열전도도 [W/mK]

L : 길이 [m]

Nu : Nusselt 수, hL_s/k_f

P : 압력 [Pa]

Pr : Prandtl 수, $\mu_f C_p/k_f$

q'' : 열유속 [W/cm²]

R : 저항 [Ohm]

Re : Reynolds 수, $\rho_f U D_h/\mu_f$

T : 온도 [°C]

U : 채널내 평균유속 [m/s]

V : 전원 [Volt]

x : 질량분율 [%]

* 성균관대학교 대학원

** 정회원, 성균관대학교 기계공학부

그리스 문자

- δ : 불확실성
- μ : 점성계수 [Ns/m²]
- ρ : 밀도 [kg/m³]

상첨자

- f : 작동유체
- i : 시험부 입구조건
- m : 파라핀 슬러리
- p : 파라핀
- s : 칩
- sat : 포화상태
- sub : 파냉
- w : 물

하첨자

- + : 무차원

1. 서론

1980년대 사용되던 SMT (Surface mounted technology) 실장기술은 더욱 집적화된 VLSI (Very large scale integrated) 칩 기술의 발전으로 1990년대에는 새로운 실장기술인 다칩모듈 (MCM, multichip module)로 대체되었다. 다칩모듈은 실장의 전체적인 크기와 무게를 줄여 전체 시스템의 부피와 비용을 줄이고 실장내에서 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℃, 군사용은 110~125℃로 내부온도를 제한하며 다칩모듈의 경우는 75~85℃범위로 제한하고 있다. 최근 사용되는 다칩모듈은 제한온도가 55℃정도로 낮아지는 추세를 보인다. 이러한 추세는 1990년대 말에 예상되는 단일칩에서 제거해야 할 열유속이 50~100 W/cm² 범위, 그리고 다칩모듈에서는 모듈을 구성하는 칩들의 발열량을 모듈면적으로 나눈 열유속이 약 25 W/cm²정도가 된다.⁽¹⁻⁴⁾ 다칩모듈 냉각방식으로 액체냉각방식이 사용되어 왔으며, 작동유체로

절연성과 화학적으로 안정된 fluorocarbon계열의 냉각제를 사용하는 직접냉각방식이 주로 사용되었다. 직접 액체 냉각방식은 크게 단상을 사용한 강제대류 냉각방식^(5,6)과 풀비등 냉각방식^(7,8), 그리고 강제대류비등 냉각방식^(9,10)으로 구분된다. 그러나 근래는 전체 시스템의 유지 보수문제와 fluorocarbon계 냉각유체의 열히스테리시스로 인한 열충격 문제때문에 직접냉각방식 보다 간접냉각방식이 사용되고 있다. 내부온도를 제한온도 이하로 유지시켜 다칩모듈의 오동작을 억제하고, 간접냉각방식을 사용함에 따라 발생하는 열저항을 최소화하여 높은 열량을 효과적으로 제거할 수 있는 새로운 액체냉각방식이 요구된다. 새로운 간접 액체냉각방식으로 파라핀 슬러리를 사용한 연구^(11,12)는 근래에 이루어지기 시작했으며 기존의 냉각제를 이용한 냉각방식과의 비교는 이루어지지 못했다. 따라서, 본 연구에서는 기존 액체냉각방식인 fluorocarbon계 냉각제를 사용한 냉각방식과 새로운 액체냉각방식인 파라핀 슬러리를 사용한 잠열 액체냉각방식을 다칩모듈 간접액체냉각방식에 적용하여 냉각특성을 비교함으로써 파라핀 슬러리를 사용한 액체냉각방식의 냉각성능 향상정도를 조사하였다.

2. 연구내용, 범위 및 방법

다칩모듈을 모사한 불연속 발열체의 냉각성능에 영향을 미치는 실험변수들로 냉각유체의 종류, 열유속 및 Reynolds 수를 선정하였다. 열유속은 직류전력 공급기에 의해 모사칩에 공급하는 열량을 모사칩의 발열면적으로 나눈 값으로 열유속 범위는 10~40 W/cm² 이다. 사각채널의 수력직경에 기초한 Reynolds 수는 3,000~20,000 범위였으며 실험은 완전발달 난류유동조건에서 이루어졌고 시험부내의 유입온도는 15℃로 일정하게 유지시켰다. 냉각유체로는 물, fluorocarbon계 냉각제인 PF-5060, 그리고 질량분율 2.5, 5, 7.5%의 상변화물질 슬러리를 사용하였다. PF-5060은 FC-72의 대체냉각제로 그 물성치가 Table 1에 나타나 있다. 상변화물질로는 DSC (Differential Scanning Calorimeter)로 측정했을 때 43.6℃의 용해온도와 175.6 kJ/kg의 용해잠열을 갖는 공업용 파라핀을 사용하였으며 측정치는 Fig. 1과 같고 그 물성치들은 Table 2와 같다. 파라핀을

Table 1 Properties of the Fluorinert liquids and water at 25°C and 1 atm

| Property | FC-72 | PF-5060 | water |
|------------------------------------|-------|---------|-------|
| Boiling point, °C | 56 | 56 | 100 |
| Density(Liquid), g/cm ³ | 1.68 | 1.68 | 1.0 |
| Viscosity(Liquid), cs | 0.4 | 0.4 | 0.9 |
| Surface tension, dyne/cm | 12.0 | 12.0 | 72 |
| Vapor pressure, kPa | 30 | 30 | 3.3 |
| Heat of vaporization, cal/g | 21 | 21 | 540 |
| Specific heat, cal/g°C | 0.25 | 0.23 | 1.0 |
| Pr number | 13.53 | 11.82 | 6.12 |

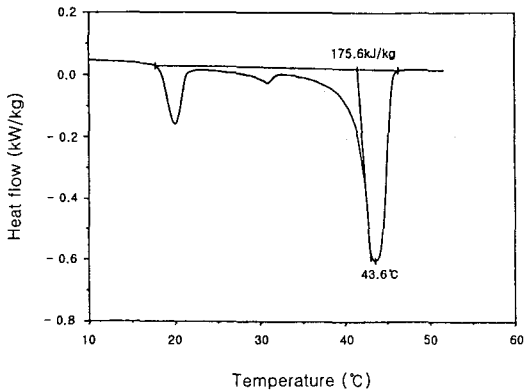


Fig. 1 Melting temperature and latent heat of the paraffin measured by DSC.

Table 2 Properties of Paraffin Waxes

| | | |
|---|--------|------|
| Melting temperature, °C | 43.6 | |
| Heat of fusion, cal/g | 42.1 | |
| Specific heat, cal/g°C (at 60°C for liquid) | Liquid | 0.60 |
| | Solid | 0.71 |
| Thermal conductivity, W/mK (at 60°C for liquid) | Liquid | 0.17 |
| | Solid | 0.24 |
| Density, g/cm ³ (at 60°C for liquid) | Liquid | 0.76 |
| | Solid | 0.82 |
| Viscosity, cP (at 60°C) | 3.14 | |
| Molecular weight, g/mol | 332 | |

미세한 입자로 만들기 위해 유화제 (Triton X-100)가 사용되었다. 본 실험에서 사용한 장치의 개략도는 Fig. 2에 나타나 있다. 실험장치는 시험부, 전원공급부, 항온조, 유량계와 계측부로 구성되었다. 시험부의 개략도는 Fig. 3과 같으며 다칩 모듈부와 채널부로 구성되어 있다. 다칩모듈부는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 7개의 모사칩들을 1×7형태로 배열하였으며 모사칩 각각은 전형적인 VLSI 전자칩의 크기인 1.27 cm×1.27 cm를 갖는다. 모사칩간의 간격은 칩의 크기와 동일한 1.27 cm로 하였다. 모사칩 하부에 구리로 만든 열심을 부착하고 다른 부분은 단열시켜 열이 구리판을 통해 모사칩 하부 즉 사각채널로만 방출되도록 하였다. 모사칩의 발열량을 얻기 위한 히터로 45.1 Ω/m인 니켈크롬 열선 히터를 사용하였다. 각 히터의 저항은 18.6±0.2 Ω이며 직류전원 공급기를 통해 0.03 V의 정확도로 전원을 공

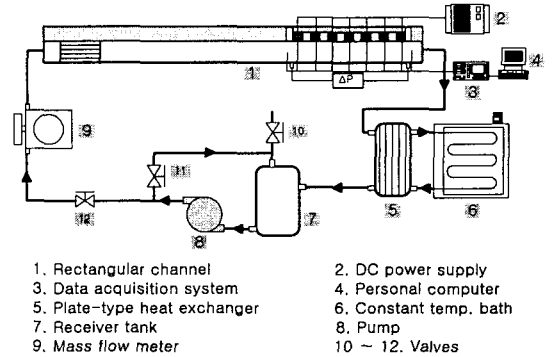


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus.

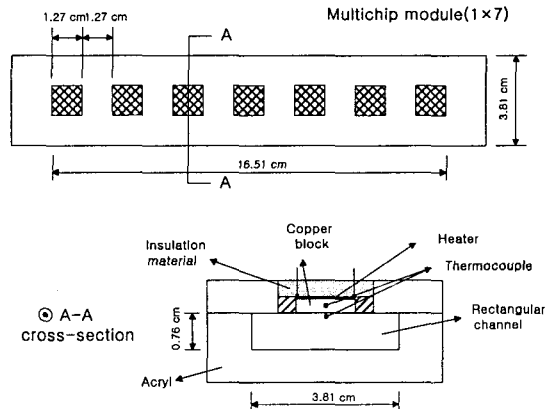


Fig. 3 Details of the test section.

급하였다. 동판의 크기는 히터와 동일하며 두께는 6 mm였다. 1행과 7행에 위치한 동판에 각각 세 개의 열전대로 측정된 동판내의 온도차는 동판의 두께가 2 mm정도로 얇은 경우 동판내의 온도차가 최대 5°C까지 나타났으나 6 mm인 경우 전체 열유속범위 및 Reynolds 수범위에서 최대 0.5°C의 온도차를 나타내었다. 동판에 직경 0.7 mm 구멍을 가공하고 열전대 (T-type, 5 mil)를 삽입하여 온도를 측정하였으며 실험에 사용된 열전대는 실험 온도구간에 대해 표준 RTD를 이용해 ±0.15°C 이내로 보정되었다. 사각채널부는 아크릴을 가공하여 제작하였다. 뉴튼유체의 완전발달된 단상 층류유동의 경우 사각채널의 종횡비에 따른 채널내 전열특성을 기존문헌⁽¹³⁾에서 찾아 볼 수 있다. 본 연구의 경우와 유사한 사각채널의 윗면이 균일한 열유속으로 가열되고 다른 면들이 단열되어 있는 경우 종횡비가 0.2인 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 (7.6±0.1 mm×38.1±0.1 mm)를 선택하였다. 사각채널의 수력직경 (D_h)은 1.27 cm이며 시험부 입구에서의 난류 완전발달 유동조건을 만족시키기 위해 수력직경의 약 50배 정도인 65 cm의 입구길이(entrance length)를 두었고 균일 입구유동조건을 위해 사각채널 입구에 허니컴을 위치시켰다.

열전도 해석을 통해 얻은 열원부에서 주위로의 열손실은 전체 열유속 범위의 2.1~3.3%였으며 해석에 사용한 각 부분의 열전도도는 동판 (386 W/mK), 아크릴 (0.2 W/mK), 동판에 히터를 부착하기 위해 사용한 열전도 실리콘 (1.6 W/mK), 동판 옆면 단열을 위해 사용한 고온용 RTV (0.1 W/mK), 그리고 히터의 위면 단열을 위해 사용한 Glass wool (0.038 W/mK)이었다.

파라핀 슬러리를 냉각제로 사용하는 경우 질량분율별로 물성치들이 변화하므로 같은 Reynolds 수에 대한 실험을 수행하기 위해 질량분율 별 물성치들을 고려하여 시험부내 입구유속을 결정하였다. 열원부에서의 열공급은 열전도 해석에 의해 계산된 열손실 만큼을 고려하여 전원을 공급하였으며, 시험부 입출구의 정압탭을 U-tube 압력계에 연결하여 시험부내의 차압을 측정하였다.

3. 자료처리 및 오차해석

오차해석에 대한 식은 Moffat⁽¹⁴⁾이 제시한 식을 사용하였다. 국부 열전달 계수는 칩에 공급한 열유속을 칩 표면온도와 칩 표면에 근접 (0.5 mm)한 유체온도의 차로 나누어 구해지며 이는 식(1)에 나타나 있다.

$$h = \frac{q''}{(T_s - T_f)} = \frac{V^2}{RA_s} / (T_s - T_f) \quad (1)$$

국부 열전달계수와 열유속에 대한 오차해석 식은 식(2), (3)과 같다.

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

$$\frac{\delta q''}{q''} = \sqrt{\left(\frac{\delta R}{R}\right)^2 + \left(2\frac{\delta V}{V}\right)^2 + \left(2\frac{\delta L_s}{L_s}\right)^2} \quad (3)$$

식(3)을 이용해 구한 열유속에 대한 오차범위는 ±1.93%이며, 식(2)를 이용해 구한 국부 열전달 계수에 대한 오차는 ±3.8%범위이다.

수력직경을 이용해 구한 Reynolds 수에 대한 오차범위는 ±0.3% 이내이며, 시험부내 마찰계수는 시험부내에서 측정된 압력강하를 이용하여 식(4)와 같이 구해진다.

$$f_{Fanning} = \frac{\Delta P D_h}{2 L_{test\ section} \rho U_i^2} \quad (4)$$

마찰계수에 대한 오차해석 식을 이용해 구한 마찰계수에 대한 오차범위는 ±1.8%이다.

4. 실험결과 및 고찰

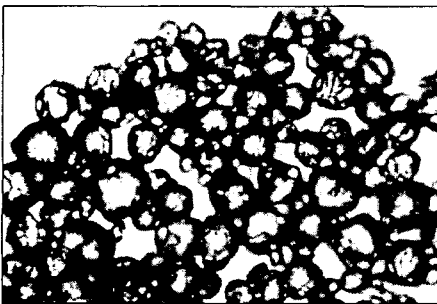
4.1 파라핀 슬러리 입자크기

파라핀 슬러리를 다음과 같이 만들었다. 증류수가 들어 있는 조내에 유화제를 먼저 충분히 희석시킨다. 파라핀의 상변화온도 이상으로 조내의 온도를 올리고 질량분율 2.5, 5, 7.5%에 해당하는

파라핀을 녹여 물, 파라핀, 유화제 혼합용액을 만든 후 교반기를 이용하여 잘 혼합시킨다. 열교환기를 통해 파라핀의 용융점 이상의 온도를 갖는 물, 유화제, 파라핀 혼합용액을 상변화온도 이하로 냉각시켜 미세한 크기의 입자를 생성시켰다. 파라핀 입자의 크기는 유화제의 양과 교반속도에 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 7.5%에 대한 파라핀 슬러리 입자크기를 Fig. 4에 나타내었다. 파라핀 슬러리 입자크기는 파라핀의 질량분율에 관계없이 10~40 μm 의 범위였다. 따라서 각 질량분율의 파



(a) Before experiment



(b) After experiment

40 μm

Fig. 4 Photographs of paraffin slurry with a mass fraction of 7.5%.

라핀에 대해 적용한 유화제의 최적 농도는 3.3%임을 알 수 있다. 또한 실험시작과 종료 후에도 입자의 크기는 Fig. 4에서 알 수 있듯이 변화가 없었다.

파라핀 슬러리를 작동유체로 사용하는 경우 열역학적 물성치인 밀도(ρ_m)와 비열($C_{p,m}$) 값은 식 (5), (6)을 이용하여 구하였다.

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{\left(\frac{x}{100}\right)}{\rho_p} + \frac{\left(1 - \left(\frac{x}{100}\right)\right)}{\rho_w} \quad (5)$$

$$\frac{1}{C_{p,m}} = \frac{\left(\frac{x}{100}\right)}{C_{p,p}} + \frac{\left(1 - \left(\frac{x}{100}\right)\right)}{C_{p,w}} \quad (6)$$

전달물성치인 점도 (μ_m)는 Shook⁽¹⁵⁾의 자료에서, 열전전도도 (k_m)는 이성혁과 신세현⁽¹⁶⁾이 보고한 식 (7), (8)을 이용해 구했다.

$$\frac{\mu_m}{\mu_w} = 1 + 3.08 \left(\frac{x}{100}\right) + 15.29 \left(\frac{x}{100}\right)^2 + 0.00273 \exp\left(20.47 \left(\frac{x}{100}\right)\right) \quad (7)$$

$$\frac{k_m}{k_w} = \left[\frac{2k_w + k_p - 0.023 \left(\frac{\rho_m}{\rho_p} \cdot x\right) (k_w - k_p)}{2k_w + k_p + 0.023 \left(\frac{\rho_m}{\rho_p} \cdot x\right) (k_w - k_p)} \right] \quad (8)$$

4.2 모듈내 온도변화

물, PF-5060, 그리고 질량분율 2.5%인 파라핀 슬러리에 의해 냉각되는 1행과 7행에서의 칩 표면온도 분포를 Reynolds 수 20,000에 대해 Fig. 5에 나타내었다. 칩 표면온도는 1행과 7행 모두에서 2.5% 파라핀 슬러리, 물, PF-5060 순으로 낮았다. PF-5060의 경우 열유속 40 W/cm^2 에서 칩 표면온도가 순간적으로 100°C 이상으로 상승하므로 그림에 나타내지 않았다. 열유속이 10 W/cm^2 로 작은 경우 PF-5060은 1행에서 물에 비해 21.7°C 높은 칩 표면온도를 나타냈으며 7행에서는 물에 비해 21.1°C 높은 칩 표면온도를 나타냈다.

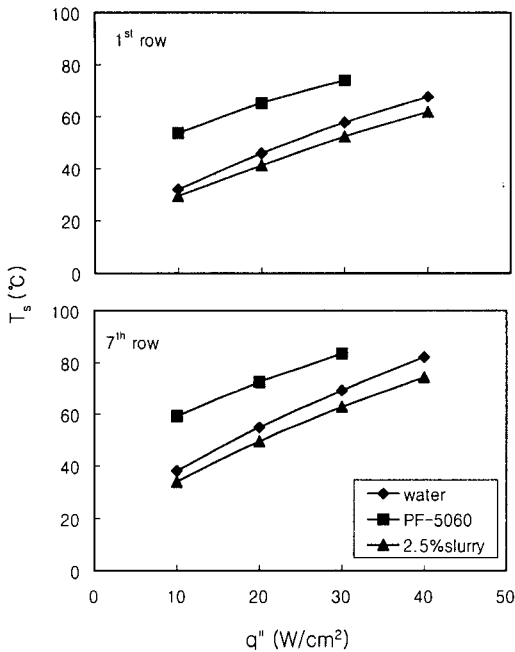


Fig. 5 Variation of surface temperatures at the 1st and 7th heater with heat flux ($Re_{Dh}=20,000$).

2.5% 파라핀 슬러리의 경우는 1행에서 물에 비해 2.7°C 낮은 칩 표면온도를 나타냈으며 7행에서 4.2°C 낮은 칩 표면온도를 나타냈다. 이에 비해 열유속 30 W/cm²인 경우 PF-5060은 1행에서 물에 비해 16.2°C 높은 칩 표면온도를 나타냈으며 7행에서는 물에 비해 14.2°C 높은 칩 표면온도를 나타냈다. 2.5% 파라핀 슬러리의 경우는 1행에서 물에 비해 5.5°C 낮은 칩 표면온도를 나타냈으며 7행에서 6.5°C 낮은 칩 표면온도를 나타냈다. 열유속이 작은 10 W/cm²에서 PF-5060의 경우 물에 비해 칩 표면온도가 크게 나타나는 것은 밀도와 정압비열 곱이 물의 38%로 작기 때문이며 30 W/cm²까지는 열유속 증가에 따라 물에 대한 칩 표면온도차가 작게 나타나는데 이는 비등잠열량에 의한 효과가 표면온도 상승을 줄이기 때문이다. 그러나 40 W/cm² 이상에서는 비등에 의해 생성된 기포 경계층이 칩 표면으로부터 이탈되지 못해 칩 표면온도가 순간적으로 제한 온도인 85°C 이상으로 상승하게 되어 전자칩에 큰 손상을 줄 수 있다 이에 비해 2.5% 파라핀 슬러리의 경우 열유속 40 W/cm²에서 물에 비해

1행의 경우 5.7°C, 7행의 경우 7.8°C 낮은 칩 표면온도를 나타냈다. 이를 통해 40 W/cm²의 높은 열유속에 대해 파라핀 슬러리가 물에 비해 우수한 냉각특성을 나타냄을 알 수 있다.

열유속에 따른 1행과 7행에서의 칩 표면온도 분포를 Reynolds 수 20,000에서 파라핀의 질량분율에 대해 Fig. 6에 나타내었다. 칩 표면온도는 1행과 7행 모두에서 열유속이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내며 질량분율이 0%인 물에 비해 파라핀 슬러리의 경우 낮은 칩 표면온도를 보여 준다. 그러나 1행과 7행 모두에서 전체 열유속 범위에 대해 파라핀의 질량분율 증가에 따라 표면온도의 감소하는 정도가 작아진다. 1행의 경우 열유속 40 W/cm²에서 질량분율 증가에 따라 6.9, 4.3, 3.3°C, 7행의 경우 질량분율 증가에 따라 7.8, 5.1, 4.4°C로 표면온도 감소정도가 43~50% 정도 작아진다. 이를 통해 열유속 40 W/cm²에 대해 파라핀의 질량분율을 7.5%이상으로 늘려도 큰 표면온도의 감소를 기대할 수 없음을 알 수 있다.

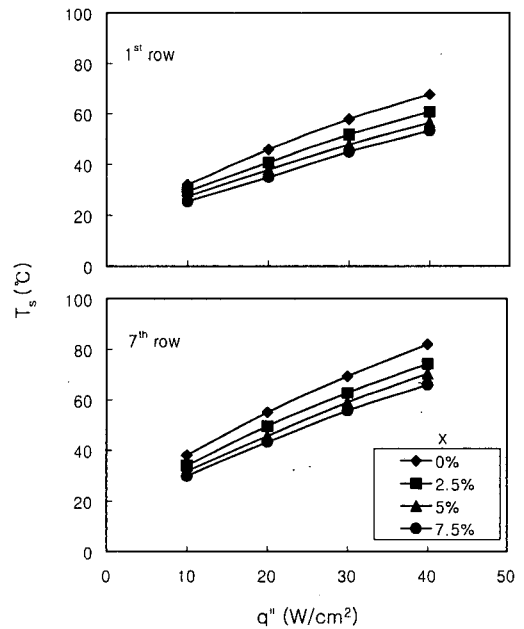


Fig. 6 Variation of surface temperatures at the 1st and 7th heater with heat flux ($Re_{Dh}=20,000$).

4.3 시험부내 열 및 유동특성

행번호에 따른 물, PF-5060, 질량분율 2.5%인 파라핀 슬러리에 대한 국부 열전달계수들을 최대 Reynolds 수인 20,000에서 열유속이 10과 30 W/cm²일 때 Fig. 7에 나타내었다. 국부 열전달계수들은 각 행의 칩 표면온도 값과 시험부내 칩 표면에 근접한 (0.5 mm) 지점에서 측정된 유체온도를 이용하여 구하였다. 뒷면에 불연속 발열체가 존재하는 사각 채널내에서 평균온도 (bulk temperature)를 정의하기 위해서는 각 열원이 존재하는 채널 단면에서의 온도분포를 알아야 한다. 그러나 각 열원에서의 온도분포가 상이하며, 매우 급격한 온도분포를 나타낸다는 것을 측정값을 통해 알 수 있다. 이와 같은 이유로 사각 채널내의 평균온도를 정의하기 곤란하며 따라서 본 연구에서는 시험부내 칩 표면으로부터 0.5 mm 떨어진 지점에서 측정된 유체온도를 기준으로 국부 열전달계수를 나타내었다.

물과 2.5% 파라핀 슬러리 모두에 대해 행번호의 증가에 따라 3행 이후에서 국부 열전달계수가 거의 일정해 짐을 알 수 있다. 열유속 30 W/cm²

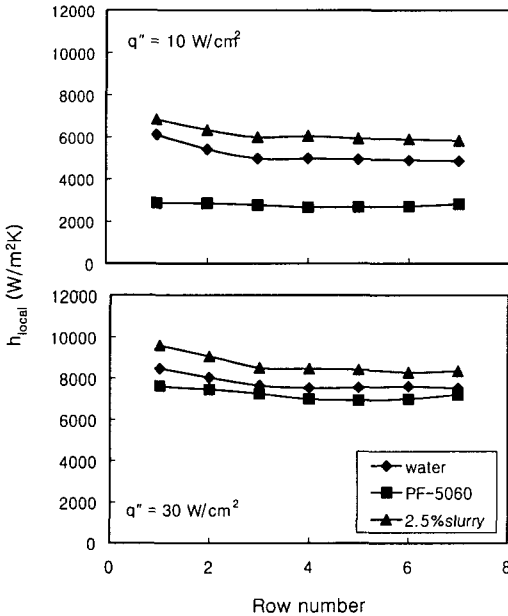


Fig. 7 Variation of local heat transfer coefficients with row number (Re_{Dh}=20,000).

일 때 물의 경우 1행에서 4행까지의 국부 열전달계수 값의 감소 정도는 5.5, 4.7, 1.6%, 그리고 2.5% 파라핀 슬러리도 6.2, 5.5, 0.6%로 3행과 4행 사이에서 작아지는데 이는 3행 이후에서 (칩 길이의 5 배 이후에서) 열적 완전발달조건이 나타나고 있음을 보여주는 것이다. 각 행에 대해 2.5% 파라핀 슬러리가 물에 비해 큰 열전달계수를 나타내며 1행과 7행에서 물에 비해 12~20% 정도 큰 열전달계수값을 나타낸다. 이는 파라핀 슬러리가 물에 비해 우수한 냉각제임을 나타내는 것이다. PF-5060의 경우 각 행에서의 국부 열전달계수 값의 변화가 물과 2.5% 파라핀 슬러리 보다 작게 나타났다. 열유속 10 W/cm²의 경우 각 행에 대해 일정한 열전달계수 값을 나타내며 이는 과냉 핵비등에 의해 칩 표면에서 생성된 기포들이 포화온도에 대해 41℃의 과냉도 ($\Delta T_{sub} = T_{sat} - T_i$)를 나타내는 액체에 의해 응축되기 때문이며, 열유속이 30 W/cm²로 큰 경우에는 액체에 의해 응축되지 못한 기포가 다음행에 영향을 주어 국부 열전달계수 값이 작아지게 된다. 그러나 과냉 핵비등이 발달함에 따라 5행 이후에서 열전달계수 값이 약간 증가하여 7행의 경우 물과 비슷한 국부 열전달계수 값을 나타내었다.

파라핀 슬러리의 질량분율에 따른 1행과 7행에서의 국부 열전달계수들을 물에 대한 국부 평균 열전달계수로 나눈 무차원 국부 열전달계수 값을 최대 Reynolds 수인 20,000에서 열유속이 10과 40 W/cm²일 때 Fig. 8에 나타내었다. 무차원 국부 열전달계수 값은 식(9)와 같다.

$$h^+ = \frac{h_{local, \text{paraffin slurry}}}{h_{local, \text{water}}} \quad (9)$$

열유속 10과 40 W/cm²에 대한 무차원 열전달계수값의 변화는 1행보다는 7행에서 두드러지며 1행과 7행 모두 열유속 10보다는 40 W/cm²인 경우가 물에 대한 파라핀 슬러리의 열전달계수의 무차원 값이 크게 나타났다. 열유속 40 W/cm²에서 질량분율 7.5%인 경우 1행에서 22.6%, 7행에서 43.7%정도 큰 열전달계수값을 나타내었다. 질량분율이 0에서 7.5%로 증가함에 따라 열전달계수 값은 10과 40 W/cm²의 열유속에 대해 1행과 7행 모두에서 5%의 질량분율 이후에 완만한 증가 추이를 나타내고 있다. 특히 7행의 경우 40

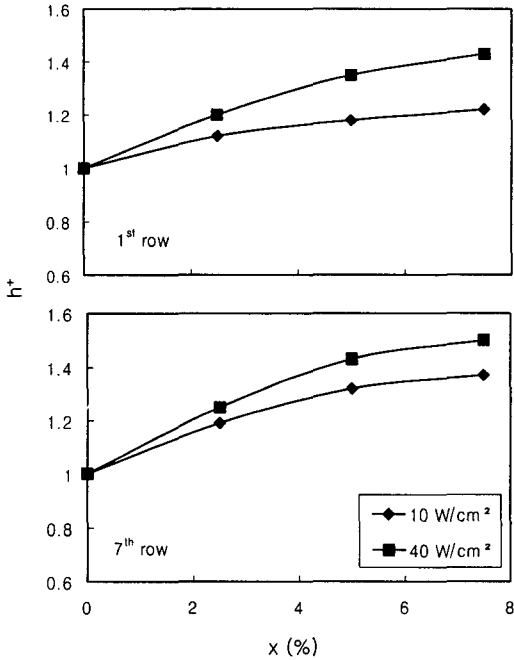


Fig. 8 Dimensionless local heat transfer coefficients at the 1st and 7th row ($Re_{Dh}=20,000$).

W/cm^2 의 열유속에 대해 질량분율의 증가에 따라 국부 열전달계수의 증가율이 25.6, 14.4, 5.0%로 감소하였다. 이를 통해 Reynolds 수가 20,000일 때 열유속 10~40 W/cm^2 범위에서는 7.5%이상으로 질량분율이 증가하여도 열전달 계수의 증가가 거의 없음을 예상할 수 있다.

PF-5060을 냉각유체로 사용하는 경우 7행에서의 비등곡선을 입구유속 0.43 m/sec ($Re_{Dh}=12,482$), 과냉도 41°C에 대해 Fig. 9에 나타내었다. 점 A와 같이 열유속이 작은 경우 단상 강제 대류 열전달이 지배적이며 열유속이 증가함에 따라 핵비등이 시작 (Incipience)되며 (점 B), 이 경우 8.8°C의 온도 overshoot를 나타낸다. 점 C이상에서는 열유속의 증가에 따라 비등이 활발해지며 부분 핵비등영역 (C-D)을 거쳐 완전발달 핵비등영역 (D-E)으로의 천이가 이루어 진다. 완전발달 핵비등영역에 비해 부분 핵비등영역이 길게 나타나는데 이는 큰 과냉도의 영향 때문이다. 열유속이 감소하는 경우도 상대적으로 짧은 완전발달 핵비등영역을 거쳐 부분 핵비등영역이 나타나며 온도 overshoot는 나타나지 않았다.

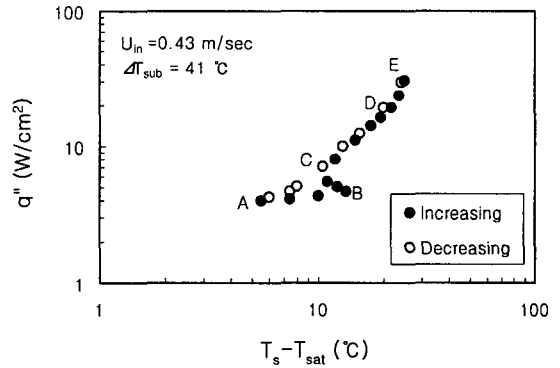


Fig. 9 Boiling curves at the 7th row using PF-5060.

국부 열전달계수로부터 구한 물에 대한 1행에서의 Nusselt 수를 Reynolds 수의 함수로 Incropera 등⁽⁶⁾의 실험자료와 비교하여 Fig. 10에 나타내었다. Incropera 등⁽⁶⁾의 실험장치는 본 실험과 유사하나 열원이 채널 밑면에 위치하고 있으며 제시한 관계식은 10 W/cm^2 의 열유속까지에 대한 것으로 식(10)과 같다.

$$\text{(for 1}^{st} \text{ row)} \\ Nu_{L_s} / (\text{Pr}^{0.38} (\mu_i / \mu_s)^{0.11}) = 0.194 Re_{D_h}^{0.6} \quad (10)$$

Incropera 등⁽⁶⁾의 실험과 동일한 열유속 10 W/cm^2 에서 1행의 경우 8~16%정도 작은 값을 나타내었으며 본 연구에 대한 관계식은 식(11)과

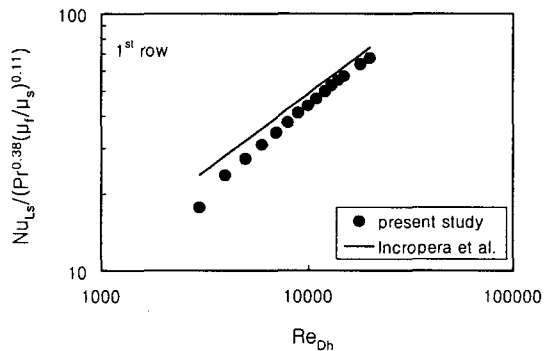


Fig. 10 Comparison with the correlation by Incropera et al.⁽⁶⁾ for water ($q''=10 W/cm^2$).

같다.

$$\text{(for 1}^{\text{st}} \text{ row)} \\ \text{Nu}_{L,1}/(\text{Pr}^{0.38}(\mu_i/\mu_s)^{0.11}) = 0.077 \text{Re}_{D_h}^{0.68} \quad (11)$$

관계식에 대한 결정계수 (R^2)는 0.99이며 본 연구의 결과가 작게 나타나는 것은 Incropera 등⁽⁶⁾과 같이 열원이 채널 밑면에 위치해 있는 경우 자연대류의 영향으로 냉각특성이 증대되기 때문이다.

파라핀 슬러리의 질량분율에 따른 1행과 7행에서의 Nusselt 수를 10 W/cm²의 열유속일 때 Reynolds 수에 대해 Fig. 11에 나타내었다. Nusselt 수, Reynolds 수, 및 Prandtl 수에 고려되는 파라핀 슬러리 혼합물의 물성치는 식(5)-(8)에 나타난 방법으로 구했다. 동일한 Reynolds 수에 대해 1행보다는 7행에서 파라핀 슬러리가 물에 비해 더 큰 Nusselt 수를 나타내었다. 1행과 7행 모두에 대해 Reynolds 수가 클 때 파라핀 슬러리와 물에 대한 Nusselt 수의 차이가 크게 나타나며 특히 Reynolds 수가 20,000일 때 7행의 경우 질량분율 7.5%의 파라핀 슬러리는 물에 비

해 32%정도, 1행의 경우 20%정도 큰 Nusselt 수를 나타내었다.

파라핀 슬러리의 질량분율에 따른 1행과 7행에서의 Nusselt 수를 40 W/cm²의 열유속일 때 Reynolds 수에 대해 Fig. 12에 나타내었다. 7행의 경우 Reynolds 수가 20,000일 때 질량분율 7.5%의 파라핀 슬러리는 물에 비해 38%정도, 1행의 경우 30%정도 큰 Nusselt 수를 나타내었다. 물에 비해 파라핀 슬러리의 전열 성능향상은 Reynolds 수가 증가함에 따라 더 크게 나타났다. 상변화를 통해 액체상태로 된 파라핀의 열전도계수는 물에 비해 23%정도로 작은 값을 나타낸다. 따라서 전체 실험범위 중 저 Reynolds 수 범위에서는 액체상태의 파라핀이 칩 표면에 존재하는 시간이 고 Reynolds 수 범위보다 상대적으로 길어 물에 대한 전열성능 향상정도가 작아지게 된다. Reynolds 수가 11,000보다 작은 경우는 칩 표면 온도가 순간적으로 100°C 이상으로 상승하므로 그림에 나타내지 않았다.

물, PF-5060, 각 질량분율의 파라핀 슬러리를 냉각유체로 사용하는 경우 시험부 입출구에서 측정된 압력차와 이를 이용하여 얻은 결보기 관찰

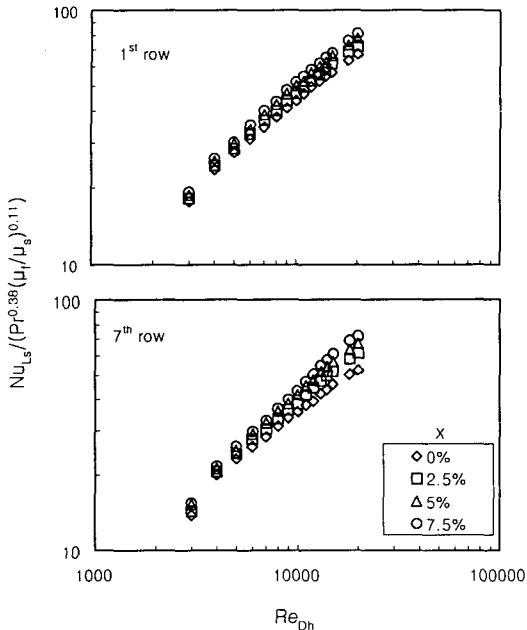


Fig. 11 Variation of Nusselt number with Reynolds number at the heat flux of 10 W/cm².

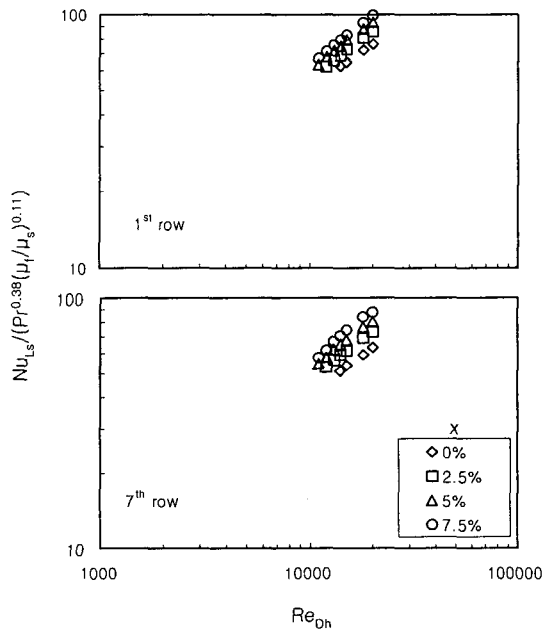


Fig. 12 Variation of Nusselt number with Reynolds number at the heat flux of 40 W/cm².

계수 (f , apparent fanning friction factor)값을 Fig. 13에 나타내었다. 매끈한 원관의 난류영역에서 적용되는 Blasius 식을 사각관에 적용한 수정 Blasius 식⁽¹³⁾은 식(12)와 같다.

$$f = 0.079 (Re_{Dh}^*)^{-0.25} \quad (12)$$

윗 식에서 Re_{Dh}^* 는 Kozicki Reynolds 수이며 식(13)과 같다.

$$Re_{Dh}^* = A(\rho U_i D_h / \mu) \quad (13)$$

식(13)에서 계수 A 는 Table 3과 같다.

물과 PF-5060의 경우 결보기 마찰계수 값은 수정 Blasius식과 $\pm 5\%$ 내에서 일치하였으며 이를 통해 시험부내에서의 압력강하는 매끈한 원관

Table 3 Values of A in Eq. (13)

| Aspect ratio | 1 | 0.75 | 0.50 | 0.23 | 0 |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| A | 1.125 | 1.106 | 1.029 | 0.878 | 0.667 |

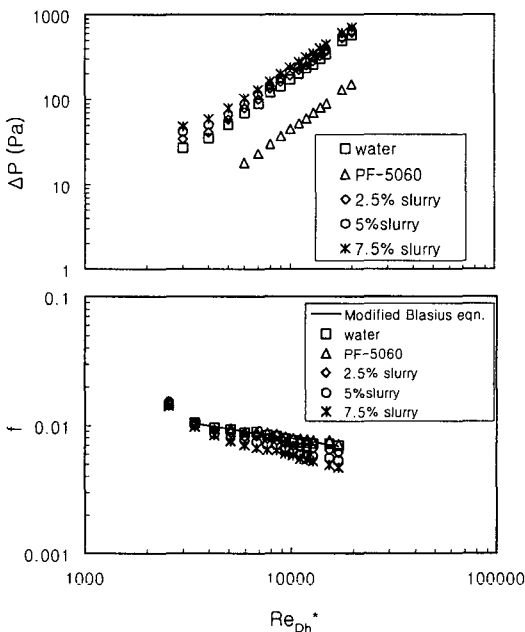


Fig. 13 Pressure drop and friction factor in the test section.

에서의 압력강하와 유사함을 알 수 있다. 파라핀 슬러리의 경우 물과 PF-5060에 비해 큰 압력강하를 나타내지만 결보기 마찰계수는 오히려 작은 값을 나타낸다. 이는 동일한 Reynolds 수에서 파라핀 슬러리의 점도 값이 커져서 평균유속이 증가하기 때문으로 판단된다. 또한 질량분율이 증가함에 따라 마찬가지로 압력강하는 증가하지만 결보기 마찰 계수는 작은 값을 나타내는데 이에 대한 이유도 동일한 Reynolds 수에서 파라핀 슬러리의 질량분율이 증가할수록 점도 값은 커지고 밀도 값은 작아져 결국 유속이 커지는 결과를 나타내기 때문이다.

앞에서 구한 국부 열전달계수와 압력강하 값을 이용하여 Reynolds 수 20,000에 대해 7행에서의 향상계수 (Enhancement factor)를 식(14)와 같이 정의하여 Fig. 14에 나타내었다.

$$EF = \frac{h^+}{\Delta P^+} \quad (14)$$

여기서 h^+ 는 식(9)와 같으며 ΔP^+ 는 파라핀 슬러리에 대한 압력강하를 물에 대한 압력강하 값으로 나눈 값이다.

열유속 10과 40 W/cm² 모두에 대해 질량분율 5% 파라핀 슬러리가 가장 큰 향상계수 값을 나타냈으며 이를 통해 시험부내에서의 열유동 특성을 모두 고려하는 경우 5% 파라핀 슬러리가 가장 우수한 성능을 나타냄을 알 수 있다.

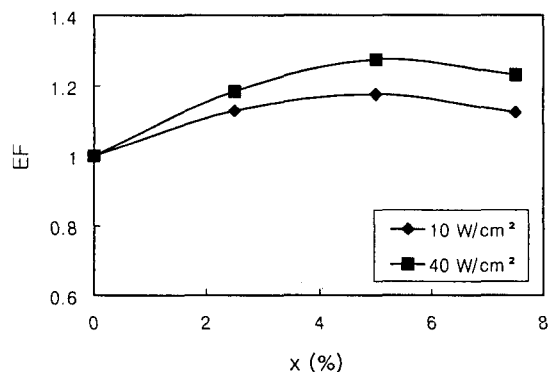


Fig. 14 Enhancement factor at the 7th row ($Re_{Dh}=20,000$).

4. 결론

(1) 유화제를 이용하여 만들어진 파라핀 슬러리의 입자크기는 10~40 μm 범위내에서 일정하게 유지되었으며, 입자의 크기는 실험 전후에서 차이가 없었다.

(2) 물, PF-5060, 그리고 질량분율 2.5%인 파라핀 슬러리를 냉각유체로 사용하는 경우 열유속 30 W/cm^2 에서 PF-5060은 물에 비해 14.2~16.2°C정도 높은 칩 표면온도를 나타냈으며 2.5% 파라핀 슬러리는 물에 비해 5.5~6.5°C정도 낮은 칩 표면온도를 나타냈다. 또한 1행과 7행에서 2.5% 파라핀 슬러리는 물에 비해 12~20% 정도 큰 국부 열전달계수 값을 나타내었다.

(3) 열유속과 Reynolds 수 실험범위에서 파라핀 슬러리와 물을 사용한 경우 3행 (칩 길이의 5배) 이후에서 열적 완전발달 조건이 나타났다.

(4) 열유속이 10 W/cm^2 일 때 대해 Incropera 등⁽⁶⁾의 결과와 8~16%이내에서 일치하였다.

(5) 질량분율이 7.5%인 파라핀 슬러리는 10~40 W/cm^2 의 열유속 범위에서 물에 비해 20~38%만큼 큰 열전달 특성을 나타냈다.

(6) 향상계수는 질량분율 5%인 파라핀 슬러리가 가장 큰 값을 나타냈으며 이를 통해 시험부내에서의 열유동 특성을 모두 고려하는 경우 5% 파라핀 슬러리가 가장 우수함을 알 수 있다.

(7) 용해잠열을 이용한 파라핀 슬러리 냉각방식은 물보다 우수한 냉각특성을 나타내어 다칩 모듈내의 온도를 낮게 유지시켜 주고, 40 W/cm^2 이상의 높은 열유속에서도 적용될 수 있음을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 1997년도 한국학술진흥재단 연구조성비(1997-001-E-00011)에 의하여 연구되었으며 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Nakayama, W., 1986, Thermal management of electronic equipment : A review of technology and research topics, *Appl. Mech. Rev.*, Vol. 39, pp. 1847-1867.
2. Incropera, F. P., 1988, Convection heat transfer in electronic equipment cooling, *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 110, pp. 1097-1111.
3. Bar-Cohen, A., 1992, State-of-the-Art and trends in the thermal packaging of electronic equipment, *ASME J. Electronic Packaging*, Vol. 114, pp. 257-270.
4. 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.
5. Baker, E., 1972, Liquid cooling of micro-electronic devices by free and forced convection, *Microelectronics and Reliability*, Vol. 11, pp. 213-222.
6. 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.
7. 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, *ASME J. Electronic Packaging*, Vol. 112, pp. 357-382.
8. Park, K. A., Bergles, A. E., 1987, Natural convection heat transfer characteristics of simulated microelectronic chips, *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 109, pp. 90-96.
9. 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, *ASME J. Electronic Packaging*, Vol. 114, pp. 63-70.
10. Mudawar, I., Maddox, D. E., 1990, Enhancement of critical heat flux from high power microelectronic heat sources in a flow channel, *ASME J. Electronic Packaging*, Vol. 112, pp. 241-248.

11. 조금남, 최민구, 1998, 파라핀 슬러리를 사용한 다칩모듈의 냉각특성, 대한기계학회 논문집 B권, 제22권, 제6호, pp.888-898.
12. Choi, M. G., Cho, Keumnam, 1998, Heat transfer characteristics of the multichip module with high heat flux, Proceedings, 11th International Heat Transfer Conference, Kyongju, pp.87-92.
13. 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.
14. Moffat, R. J., 1985, Using uncertainty analysis in the planning of and experiment, ASME J. Fluid Engineering, Vol. 107, pp. 173-182.
15. Shook, C. A., 1993, Slurry pipeline flow, Processing of Solid-Liquid Suspensions, Shamlou, P. A. Ed., Butterworth-Heinemann Ltd., Oxford, pp. 287-309.
16. 이성혁, 신세현, 1998, 미립자를 포함한 현탁액의 전단율에 의존적인 열전도율 측정, 대한기계학회 논문집 B권, 제22권, 제8호, pp. 1141-1151.