

# 마이크로 캡슐 잠열재 슬러리를 적용한 미소채널 열교환기의 열분배 성능평가

전 종 욱, 백 창 현, 김 용 찬<sup>†</sup>, 김 영 득\*, 최 종 민\*\*

고려대학교 기계공학과 대학원, <sup>†</sup>고려대학교 기계공학과, \*인덕대학 기계공학과, \*\*한밭대학교 기계공학과

## Experimental Study on the Heat Distribution in the Rectangular Mini Channel Heat Exchangers with MPCM Slurry

Jongug Jeon, Changhuyn Back, Yongchan Kim<sup>†</sup>, Young-Deug Km\*, Jong Min Choi\*\*

Graduate School of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

<sup>†</sup>Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

\*Mechanical System Engineering, Induk University, Seoul, Korea

\*\*Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea

**ABSTRACT:** The heat transfer performance and energy transport ability are relatively high due to higher specific heat. Therefore, it can be used in fields such as heating, ventilating, air-conditioning, refrigeration and heat exchangers. In this study, liquid-cooling heat exchangers were designed and tested by varying geometry and operating conditions. In addition, liquid-cooling heat exchangers were tested to provide performance data for MPCM slurry. The liquid-cooling heat exchangers had twelve rectangular channels with flow paths of 1, 2, 4 and 12. Silicon rubber heaters were used to control the heat load to the heat exchanger. Heat input ranged from 293 to 800 W, and inlet temperatures of working fluid varied from 15 to 27°C. The standard deviation of surface temperature was strongly affected by the coolant of MPCM Slurry. All MPCM-cooling heat exchangers showed higher cooling performance than the water-cooling heat exchanger except one path channel heat exchanger.

**Key words:** MPCM(마이크로 캡슐 잠열재), Heat transfer coefficient(열전달계수), Standard deviation (표준편차)

### 기 호 설 명

$A$  : 발열부 면적 [ $m^2$ ]

$h_o$  : 총괄 열전달계수 [ $W/m^2K$ ]

$Q$  : 발열량 [ $W$ ]

$Re$  : Reynolds 수

$\Delta T$  : 대수평균온도차 [ $^{\circ}C$ ]

$t$  : 온도 [ $^{\circ}C$ ]

$\sigma$  : 표준편차

### 하첨자

$D_h$  : 수력직경

$i$  : 입구 조건

$o$  : 출구 조건

$sm$  : 표면 평균

### 1. 서 론

최근에 이상열전달 유체인 잠열을 이용한 기능성 열유체에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 기능성 열유체는 상변화 온도범위에서 단상의 유체에 비해 훨씬 큰 비열을 가질 수

<sup>†</sup>Corresponding author

Tel : +82-2-3290-3366; fax: +82-2-921-5439

E-mail address : yongckim@korea.ac.kr

있게 되므로 이 특성을 다양한 방법으로 활용하려는 노력으로 볼 수 있다. 기능성 상변화 열유체 중에 대표적인 물질로 마이크로캡슐 잠열재 (MPCM : Micro encapsulated Phase Change Materials)가 있다. 상변화 물질에 따라 상변화 온도를 조절할 수 있고, 상변화온도에서 물질은 잠열의 큰 비열을 가질 수 있게 된다<sup>(1)</sup>. 비열의 증가는 축열의 증가를 의미하고 냉동기 운동측면에서 축열을 위한 물의 융점은 0℃ 이나 MPCM을 이용하여 0℃ 이상에서 냉동기를 운전시키면 COP의 증가를 가져올 수 있다.

냉열저장을 위한 MPCM의 농도를 30%로 만들면 축열밀도는 냉수 대비 2.5배가 증가한다는 연구가 있었고<sup>(2)</sup>, 마이크로 캡슐재 슬러리를 이용한 냉각을 할 경우 물로 냉각을 했을 때보다 관벽의 온도상승율을 급격히 저하시킬 수 있다는 것과 상변화 완료위치에 영향을 미치는 열유속, 잠열 슬러리의 평균유속 등이 연구되어졌다.<sup>(3)</sup> Lee<sup>(4)</sup> 등은 MPCM을 이용한 시스템에서 MPCM의 내구성을 실험하였고, 소규모 실내냉방 설비에 적용하여 열 매체를 물로 사용했을 경우보다 열용량으로 인한 에너지 절약효과가 크게 증가됨을 보였다.

이러한 MPCM 슬러리의 높은 열용량을 이용하여 실생활에 유용하게 적용하려는 노력이 활발히 진행되고 있다. 이에 본 연구에서는 MPCM 슬러리를 이용하여 통신장비용 사각 미니채널 열교환기의 열분배 성능과 열전달 성능의 변화를 실험적으로 연구해 보았다.

## 2. 실험장치

Fig. 1은 마이크로캡슐 잠열재를 적용한 액냉형 열교환기 실험장치이다. MPCM의 특성상 유동이 없는 상태가 지속되면 마이크로캡슐이 냉각액 상부에 부유하고 굳게 되므로 실험부의 열교환기를 교환할 때나 유사시에 실험장치 내의 장비들을 보호하기 위해 2개의 항온조가 사용되었고 MPCM 항온조에 MPCM을 회수한 후 물용 항온조를 이용하여 시스템 내를 세척할 수 있도록 설계되었다. 점도가 높은 MPCM을 순환시키기 위한 펌프로 다이어프램식 정량펌프(PRS 200 월로펌프)가 사용되었고, 유량은 코리올리 효과를 이용한 유량계가 사용되었다. 실험부는 항온항습

실에 위치해 있으며 실험부 입출구의 온도와 압력차를 측정하는 계측장비도 항온항습실에 위치해 있다.

실험에 사용된 열교환기는 알루미늄 판에 밀링을 사용하여 채널을 형성한 후 상판을 부착하고 용접 하였다. 열교환기 옆면이 용접으로 결합되더라도 실험 중 열변형이 발생하여 채널 간 유동이 섞일 수 있으므로 열교환기 내 채널 사이 공간에 나사를 체결할 수 있도록 설계하였다. 열교환기는 채널의 열교환 면적은 동일하게 맞추고 유로의 형상을 변화시켜 그 종류를 달리하였다. Fig. 2는 열교환기 형상을 보여주며, Table 1은 액냉형 열교환기의 제원을 나타내고 있다.

Table 3은 열전대와 RTD센서의 사양을 나타내고 있다. 실험부의 표면온도는 열전대를 이용하여 측정하였고, 온도 측정의 오차는 0.2℃ 이내이다. 실험부로 유입되고 열교환 후 유출되는 냉각유체의 온도는 RTD 센서로 측정하였다. 열전대는 실리콘 러버히터의 외부표면과 알루미늄 열교환기와 히터 사이인 내부표면에 부착하였고,

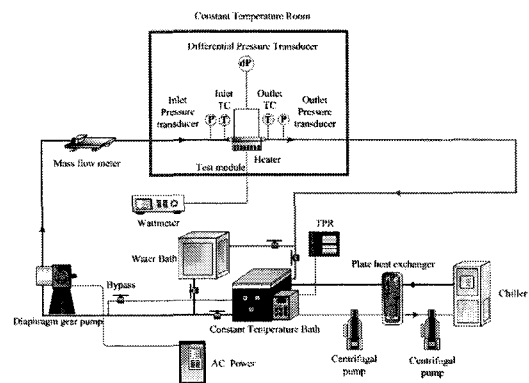


Fig. 1 Schematic diagram of the test rig.

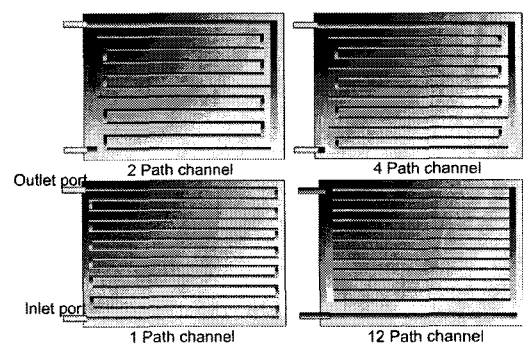


Fig. 2 Schematic diagram of the heat exchangers.

Table 2 Specifications of heat exchangers

Items	Specifications	
Material	Aluminium 5052	
Full size	Length×width×height	300×215×16 (mm <sup>3</sup> )
Flow channels	Width×height	5×3 (mm <sup>2</sup> )
Paths	Model 1	1 path
	Model 2	2 path
	Model 3	4 path
	Model 4	12 path

알루미늄 열교환기 반대편에도 부착하였다. 외부표면 16개, 내부표면 12개, 반대표면 12개, 총 38개의 열전대가 실험부에 부착 하였고, 실험조건에 따른 표면의 열 분배도가 분석될 수 있도록 Fig. 3에서 나타낸 위치에 부착하였다.

차압계(Yokogawa EJA 110A)는 실험부의 입출구 압력차를 정밀하게 측정하는데 사용하였으며, 큰 유량에서 압력차가 차압계의 범위를 벗어날 경우 차압계로 유입되는 압력은 차단되고, 입출구에 설치된 압력계(Setra C206)로 차압을 측정하였다. 냉각액의 유량측정은 코리올리 효과를 이용한 질량유량계(OVAL CN010C-SS-200R)를 사용하였고, 실험부에 통신판의 발열칩을 대신 할 발열부는 실리콘 러버히터를 사용하였으며, 히터의 발열량은 파워미터(Yokogawa electric Co. WT210) 값을 활용하여 슬라이더스로 조절하였다.

실험에 사용된 MPCM은 유기물 PCM으로써 유기물 PCM의 특징은 일반적으로 밀도가 낮고 잠열량이 작은 반면, 무기물 PCM에 비하여 부식성이 작고 부피팽창이 작다는 장점을 갖고 있다. 유기물 PCM은 멜라닌 캡슐에 싸여 있으며 물성

Table 3 Specifications of thermocouple and RTD sensor

Item	Specification	
	Thermocouple	RTD
Manufacturer	Watlow	Omega
Model	T-type	A class
Temperature range	-200℃ ~ 200℃	-200℃ ~ 450℃
Accuracy	±0.2℃	±0.05℃
Alloy combination	Copper/constant	Pt 100Ω

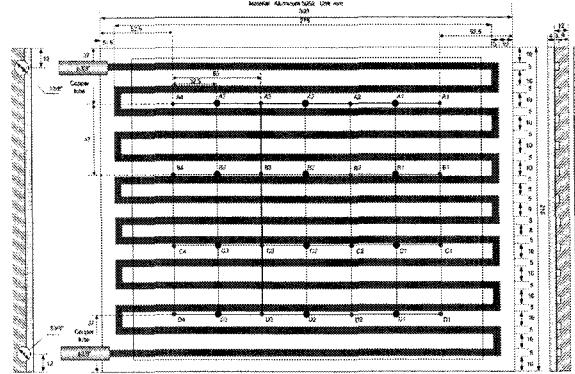


Fig. 3 Location of TC on the 1 path channel type heat exchanger.

Table 4 Property of Phase Change Material

Item	C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>
Melting point [℃]	28.2
Meiting heat [kJ/kg]	243
Thermal conductivity [W/m · K]	-0.15
Density [ $\times 10^2$ kg/m <sup>3</sup> ]Solid(Liquid)	0.85(0.78)
Specific heat [kJ/kg · K]Solid(Liquid)	1.8(2.3)
Temperature conductivity [mm <sup>2</sup> /s]	-0.087

치는 Table 4와 같다.

### 3. 실험방법

실험부는 외기영향을 받지 않도록 항온항습실에서 건구온도 25℃, 상대습도 50%를 유지시키며 실험을 진행하였다. MPCM을 냉각액으로 사용할 경우 물의 경우와는 달리 항온조의 히터를 사용할 수가 없다. 항온조의 히터를 직접 가열할 경우 캡슐의 심각한 손상을 초래하므로 판형 열교환기를 항온조의 히터를 사용하지 못하고 칠러온도를 조절하여 판형열교환기로 간접 열전달을 함으로서 MPCM의 온도를 맞추며 실험이 진행되

Table 5 Test condition

Operating parameters	Range	Reference data
Inlet temperature, °C	15 ~ 27	25
Mass flow rate, kg/h	25 ~ 120	50
Heat input, W	293 ~ 800	500 W
Ambient temperature	25℃, 50%RH	

었다. MPCM이 응고되는 특성상 순환펌프는 실험 중에 기준유량인 50 kg/h로 MPCM을 순환시키고, MPCM의 온도가 실험조건 온도  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$  내에서 안정되면 순환펌프인 다이어프램식 정량펌프의 스트로크 길이조절 다이얼을 이용하여 실험유량을 조절하였다. 이상의 조건이 만족하면 실리콘 러버히터에 전력을 조절하며 실험부에 열원을 제공하였다. 동일한 순서로 유량변화를 주며 실험을 진행하였고, 냉각액의 입출구 온도가 안정을 찾아  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$  안으로 들어오면 데이터를 받기 시작하였으며, 데이터는 20분간 받은 후 수집된 데이터의 평균값을 결과에서 고찰하였다. MPCM의 온도와 유량을 바꾸어 가며 실험부에 가해지는 발열량에 따라 히터표면의 냉각 정도를 측정하였다. 실험에 적용된 조건은 Table 5와 같다.

#### 4. 성능실험 결과

##### 4.1 열교환기의 열전달성능 비교

열교환기가 통신장비용 등으로 사용될 경우를 고려하여 열교환기에 부착되는 대체 발열부인 실리콘러버 히터의 외부 표면온도가 고찰 대상이 되는 온도이므로 열전달계수를 실리콘러버 히터와 접촉면의 열구리스, 그리고 알루미늄 열교환기의 두께가 모두 열저항으로 고려된 실험값인 총괄열전달계수를 사용하였고, 입출구 온도차는 LMTD(Log Mean Temperature Difference)를 사용하였다.

$$h_o = \frac{Q}{A \times \Delta T} \quad (1)$$

$$\Delta T(LMTD) = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (2)$$

$$\Delta T_1 = t_{sm} - t_i \quad (3)$$

$$\Delta T_2 = t_{sm} - t_o \quad (4)$$

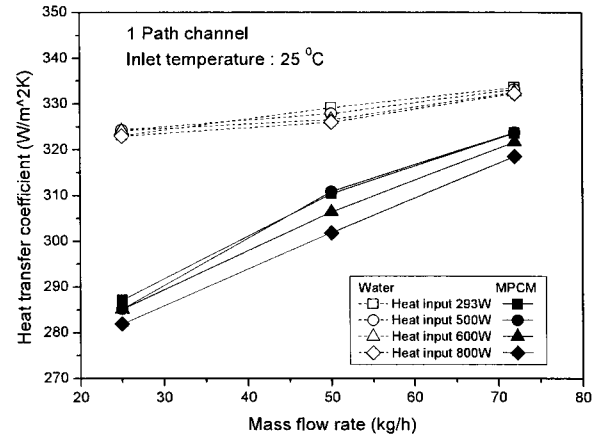


Fig. 4 Variation of heat transfer coefficient with mass flow rate at the constant inlet temperature( $25^{\circ}\text{C}$ ) in the 1 path channel.

Table 6 Comparison of Reynolds number of liquid coolants in 1 path channel

Mass flow rate	Water		MPCM	
	$Re_{Dh}$	Viscosity [kg/m-s]	$Re_{Dh}$	Viscosity [kg/m-s]
25 kg/h	1950	0.0008905	104	0.01673
50 kg/h	3899		208	
72 kg/h	5615		299	

MPCM의 열교환기 유입온도를  $25^{\circ}\text{C}$ 로 유지시킨 후 열부하 표면 냉각을 위해 열교환기 채널에 유량을 달리하며 그 영향력을 고찰하였다. Fig.4에 나타낸 바와 같이 단일패스의 경우 냉각액을 물로 사용했을 경우보다 열전달 성능이 낮게 나타났으나 유량에 따른 열전달계수 향상율은 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 동일한 유량대비 MPCM의 점성이 물보다 크므로 유동이 충분한 난류를 형성하지 못하기 때문이다. Table 6에서 보이는 것과 같이 단일패스에서 유량대비 레이놀즈수가 물에 비해 현저히 떨어지는데 이는 MPCM의 높은 점성에 기인한다.

Fig. 5는 4 path 채널 열교환기의 열전달 성능을 나타낸다. MPCM의 상변화 온도가  $28^{\circ}\text{C}$ 이고 전체 상변화 온도가  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  구간 내에서 이루어지는 점을 감안하면 유입온도  $15^{\circ}\text{C}$ 보다 유입온도  $19^{\circ}\text{C}$ 가  $25\text{ kg/h}$ 의 유속에서 열전달 성능이 크게 나오는 경향을 실험값과 같이 예측할 수 있으며, 상변화 온도에 가까운 유입온도  $27^{\circ}\text{C}$ 는 물에 비

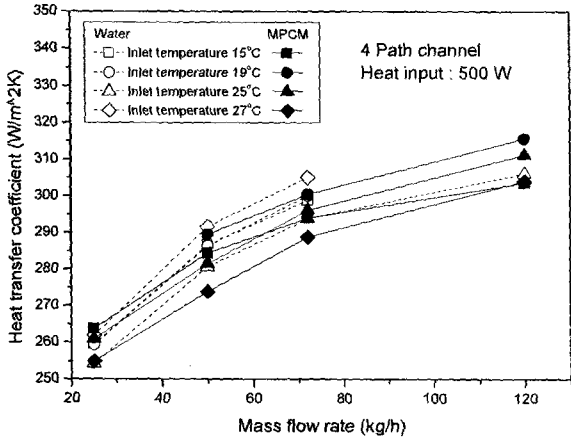


Fig. 5 Variation of heat transfer coefficient with mass flow rate at the constant heat input (500 W) in the 4 path channel.

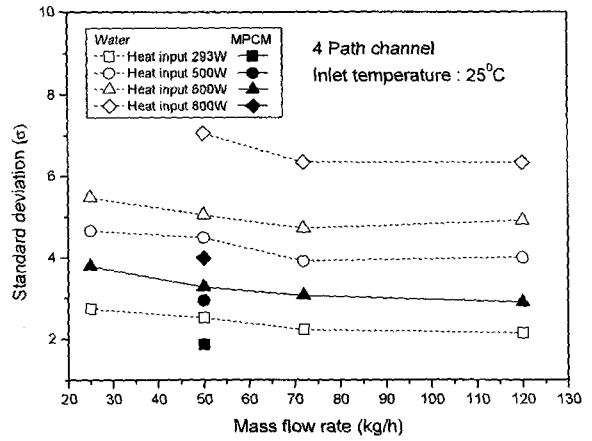


Fig. 7 Variation of standard deviation with mass flow rate at the constant inlet temperature (25°C) in the 4 path channel.

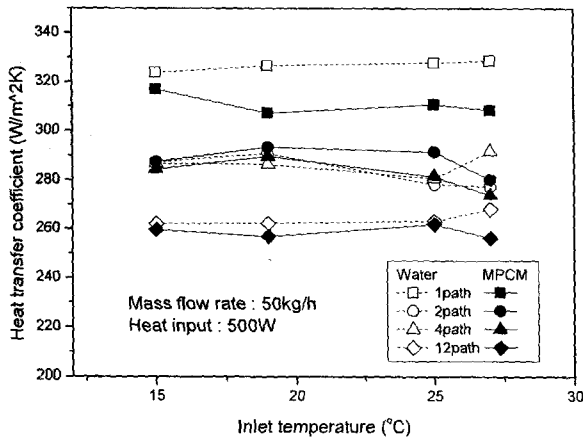


Fig. 6 Comparison of the heat transfer coefficient of heat exchangers with inlet temperature at the reference condition

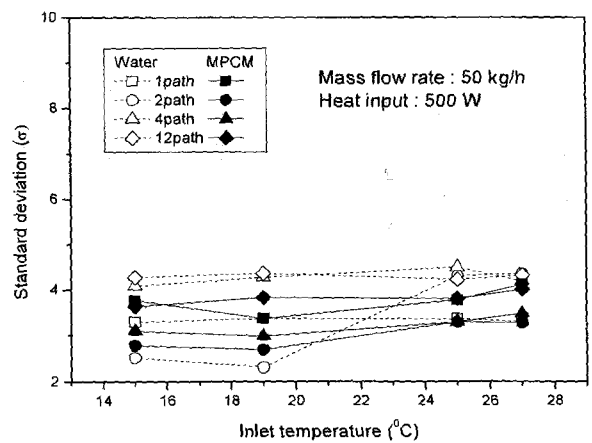


Fig. 8 Comparison of standard deviation of heat exchangers with inlet temperature at the reference condition.

해 열전달 성능이 더 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 채널별 기준조건에서 열전달 계수가 Fig. 6에서 비교되었고, 2 path와 4 path 채널 열교환기의 열전달계수가 물과 비슷하거나 좋게 나왔다. MPCM 유입온도 27°C의 경우는 모든 열교환기에서 열전달 성능이 물보다 떨어지는 것을 확인할 수 있고, 이는 상변화 후 열전달 성능의 향상이 떨어졌다고 볼 수 있다.

#### 4.2 열교환기의 열분배 성능비교

열교환기의 열분배 성능은 발열부 표면온도에 서의 온도분포에 대한 표준편차로 정의한다. 실리콘 러버히터의 외부표면에는 16개의 Thermo

couple이 붙어 있다. 16개 지점의 온도가  $T_1, T_2, T_3, \dots, T_{16}$ 이고 외부표면온도의 평균온도가  $T_{sm}$  이면 표준편차는 다음과 같이 구해진다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{16} (T_k - T_{sm})^2}{16}} \quad (5)$$

Fig. 7은 4 path 채널에서 MPCM을 냉각액으로 사용했을 경우가 물을 사용했을 때보다 표준편차를 크게 줄어드는 것을 보여준다. 이는 MPCM의 큰 열용량이 국부온도 상승을 제한한 것으로 해석된다. 채널별로 유입온도에 대한 표준편차 영향력을 살펴보면 2 path와 4 path 채널

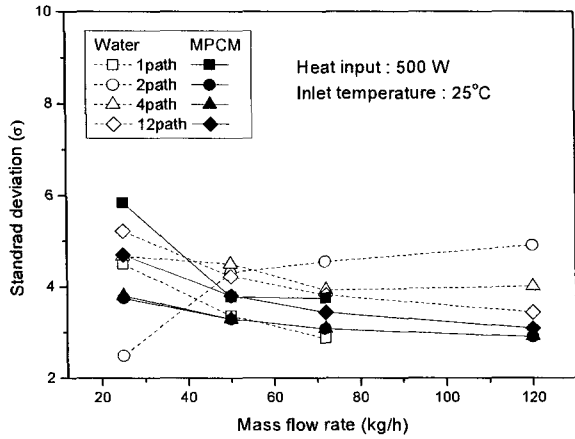


Fig. 9 Variation of standard deviation of heat exchangers with mass flow rate at the constant inlet temperature(25°C)

열교환기가 물에 비해 MPCM 슬러리를 사용하여 표준편차를 줄일 수 있으며 19°C 유입온도가 열분배를 위한 최적의 온도로 나타났다.(Fig. 8)

Fig. 9는 기준조건에서 유입유량을 달리하며 열교환기별 열분배 성능을 측정한 것이다. 저유량에서는 MPCM 슬러리의 열분배 성능이 물보다 떨어지고 고유량으로 갈수록 열분배 성능이 우수해지는 것을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 미소 사각채널 열교환기의 냉각액을 물과 MPCM 슬러리를 이용하여 그 냉각성능 및 열분배 성능을 고찰하였고, 열교환기 내부 유로의 형상을 바꾸어 주며 유로 형상 따른 영향력도 비교하였다. 그 결과는 다음과 같다.

(1) MPCM 슬러리의 열전달 성능에 대한 결과로 2 path와 4 path에서 물의 열전달 성능보다 향상된 결과를 보이며, 그 향상정도는 유입온도 19°C에서 가장 크게 나타난다.

(2) 냉각액 열교환기 유입온도를 PCM 상변화 온도와 유사한 27°C로 유입한 결과 열전달 성능이 물에 비해 감소한다. 이는 상변화 후의 과열에 의한 것이다.

(3) 발열량이 커질수록 물의 열분배 성능은 크게 떨어지는 반면 MPCM은 이를 효과적으로 낮

게 유지시킬 수 있는 것으로 나타났다. 국부온도 상승에 크게 영향을 받는 전자장비를 냉각하는데 MPCM의 사용은 일부하 변동에도 온도편차를 낮게 유지시키는 효과적인 냉각액이라고 할 수 있다.

(4) 열분배 성능의 향상은 유량증가에 따라 증가하는 것이 확인되었다.

## 후 기

본 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 수행되었으며(KRF-2004-042-D00023), 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. R. Yang, H. Xu, Y. Zhang, 2003, Preparation, physical property and thermal physical property of phase change microcapsule slurry and phase change emulsion, Solar Energy Materials & Solar Cells, 80, pp. 405-416.
2. J. G. Lee, Y.C. Choi, S. H. Hoon, Y. G. Kim, W. M. Lee, 2004, Characteristics of the thermal storage and transportation by MPCM slurry, Proceedings of the SAREK, 2004-S-064, pp. 382-387.
3. M. J. Kim, K. W. Park, 2005, Heat transfer characteristics of micro-encapsulated phase change material slurry, Proceedings of the SAREK, 05-W-030, pp. 284-288
4. H. J. Lee, J. K. Choi, J. G. Lee, 2003, An experimental study for manufacturing MPCM slurry and its application to a cooling system, Korean Journal of Air- Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 15, No. 5, pp. 352-359.
5. H. Bhowmik, C. P. Tso, K. W. Tou, F. L. Tan, 2005, Convection heat transfer from discrete heat source in a liquid cooled rectangular channel, Int. J. Applied Thermal Engineering, Vol. 25, pp. 2532-2542.