

MPCM을 적용한 액냉형 냉각기의 성능 특성에 관한 연구

진 중 욱, 김 용 찬*, 최 중 민**†, 현 동 수**, 윤 린**
고려대학교 기계공학과 대학원, *고려대학교 기계공학과, **국립한밭대학교 기계공학과

Performance Characteristics of Liquid-Cooling Heat Exchangers with MPCM Slurry Designed for Telecommunication Equipment

Jongug Jeon, Yongchan Kim*, Jong Min Choi**†, Dong Soo Hyun**, Rin Yun**
Graduate School of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul, 136-701, Korea
*Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul, 136-701, Korea
**Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 305-719, Korea

(Received June 12, 2006; revision received September 21, 2007)

ABSTRACT: Electric and telecommunication industries are constantly striving towards miniaturization of electronic devices. Miniaturization of chips creates extra space on PCBs that can be populated with additional components, which decreases the heat transfer surface area and generates very high heat flux. Even though an air-cooling technology for telecommunication equipment has been developed in accordance with rapid growth in electrical industry, it is confronted with the limitation of cooling capacity due to the rapid increase of heat density. In this study, liquid-cooling heat exchangers with MPCM slurries were designed and tested by varying geometry and operating conditions. The liquid-cooling heat exchangers with 4-paths showed higher cooling performance than the others. The cooling performance of liquid cooling heat exchanger with MPCM slurries was more enhanced than that of the air cooling system. It's performance was also slightly superior to that of the water cooling system at the inlet temperature of 19°C.

Key words: MPCM(마이크로캡슐잠열재), Heat load(열부하), Surface temperature(표면온도), Mass flow rate(질량 유량)

기 호 설 명

T : 온도 [°C]
 T_{sm} : 표면 평균온도 [°C]

그리스 문자

 σ : 온도 표준편차 [°C]

1. 서 론

통신용 전기·전자 장비 내부에는 고열유속의 발열칩이 다수 포함된 PCB 보드가 내부에 설치되어 있다. 전자통신장비들의 소형화, 고밀도화 및 고속화에 따라 통신기기에서의 열밀도가 급속히 증가하고 있다. 현재까지는 통신기기 냉각에 주로 공냉형 냉각기가 적용되고 있으나, 통신장비 내부의 국부적인 온도 상승을 제대로 해결하지 못하고 있고, 이미 공냉형 방식에서 팬과 냉각핀의 성능 개선은 한계점에 다다르고 있다. 따

† Corresponding author
Tel.: +82-42-821-1731; fax: +82-42-821-1587
E-mail address: jmchoi@hanbat.ac.kr

라서 지속적인 열밀도 증가에 대응하여 통신장비를 효과적으로 냉각시킬 수 있는 대체기술의 개발이 시급한 실정이다. 이에 대한 가장 현실적이고 실용화가 빠른 대안은 통신기에 액체냉각을 실시함으로써 장비내부의 온도를 최적 상태로 유지할 수 있는 냉각기술을 개발하는 것이다.^(1,2)

MPCM(Microencapsulated Phase Change Material) 슬러리는 아이스슬러리와 같은 에밀전 형태의 열매체가 가지는 취약점을 보완하고 현열보다 우수한 열저장 및 열전달 특성을 갖는 잠열을 이용하기 위해 개발되었다. MPCM 슬러리는 상변화물질이 고체와 액체 간의 반복되는 상변화 과정에서 물질 간에 서로 뭉쳐지는 것을 방지할 수 있으며, 열저장 및 동적인 열공급 측면에서 현열 방식보다 고효율화가 가능하므로 에너지의 경제적인 이용이 가능하다.^(3,4)

Incropera⁽²⁾는 전자장비 냉각에 자연대류를 이용한 방식, 채널유동을 이용한 방식 등 다양한 액체냉각 방법을 소개하였다. Lee et al.⁽⁵⁾은 채널의 개수에 따라 채널 폭을 각각 170 μm 에서 1000 μm 까지 변화시킨 사각 다채널열교환기를 직층형 다칩모듈에 적용하여 액체 냉각방식이 열저항을 크게 낮출 수 있음을 보였다. Kim and Park⁽⁶⁾은 단일직관에 대하여 MPCM 슬러리를 냉각유체로 사용하여 물에 비하여 관벽의 온도상승율을 감소시킬 수 있다는 연구 결과를 얻었다. 하지만, 대부분 수 μm 에서 수백 μm 의 마이크로채널을 이용한 단일칩용 냉각방식이 주를 이루고 있고, 수 mm 다채널에서 MPCM 슬러리를 적용한 액체냉각 방식에 대한 연구는 매우 부족한 실정이다.

본 연구에서는 현재 통신장비에 널리 적용되고 있는 공냉형 냉각기를 대신하여 MPCM 슬러리를 작동유체로 사용하는 액냉형 냉각기의 냉각성능을 분석한다. 이를 통해 MPCM을 이용한 통신기기용 액냉형 냉각기의 적용성 평가 및 액냉형 냉각기 설계의 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

Fig. 1은 통신기기용 액냉형 냉각기의 성능 실험장치를 나타낸다. 실험장치는 통신기기의 발열부와 액냉형 냉각기, 유량계, 펌프 및 항온조로 구성하였다. 항온조에는 냉동기와 전기히터가 설치되어 냉각기로 공급되는 냉각 유체의 입구온도

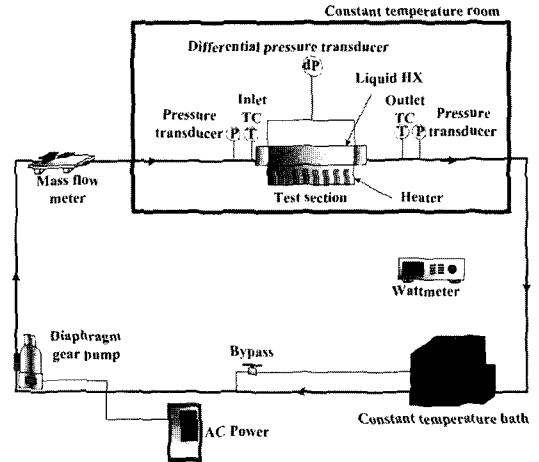


Fig. 1 Schematic diagram of the test setup.

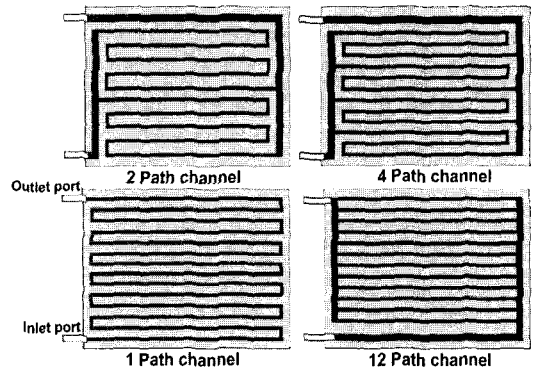


Fig. 2 Geometries of liquid-cooling heat exchangers.

를 조절하도록 구성하였으며, 가변속 다이어프램 방식 펌프에 의하여 냉각유체의 유량을 조절하였다. 액냉형 냉각기는 냉각유체의 분배에 따라 Fig. 2와 같이 4개의 모델을 설계하였고, Table 1은 액냉형 냉각기의 사양을 나타낸다. 액냉형 냉

Table 1 Specifications of heat exchangers

Items	Specifications	
Material	Aluminium 5052	
Full size	Length × width × height	300 × 215 × 16 (mm ³)
Channels	Width × height	5 × 3 (mm ²)
Paths	Model 1	1 Path
	Model 2	2 Path
	Model 3	3 Path
	Model 4	4 Path

Table 2 Properties of phase change material

Item	C ₁₈ H ₃₈
Melting point [°C]	28.2
Heat of fusion [kJ/kg]	243
Thermal conductivity [W/m · K]	0.15
Density [$\times 10^3$ kg/m ³]Solid(Liquid)	0.85(0.78)
Specific heat [kJ/kg · K]Solid (Liquid)	1.8(2.3)
Manufacturer	J&C Microchem

Table 3 Specifications of test instruments

Items	Measuring scale	Accuracy
Thermocouple	-200 °C ~ 200 °C	± 0.1 °C
RTD	-200 °C ~ 450 °C	± 0.05 °C
Power meter	0 ~ 600 V 0 ~ 20 A	± 0.1% of FS
Mass flow meter	0.52 ~ 5.2 kg/min	± 0.15% of RD

각기의 발열부는 통신기기의 PCB 발열부⁽⁷⁾를 모사하여, PCB와 유사한 재질을 갖는 실리콘 러버 히터(rubber heater)로 제작하여 액냉형 냉각기 표면에 부착하였다. 액냉형 냉각기와 실리콘 러버히터로 구성된 시험부를 최대한 단열하고 진구 온도 25 °C, 상대습도 50%로 유지되는 항온항습실에 설치하여 외부 영향을 최소화하였다. 히터의 발열량은 전력변환기를 이용하여 공급 전력량 조절을 통하여 변화시켰다.

MPCM 슬러리는 잠열재 종류 및 슬러리 농도에 따라 다양한 열전달 및 열저장 특성을 갖는다. 본 연구에서는 MPCM의 신뢰성 측면에서 상용화된 융점 28.2 °C의 노말옥타데칸을 MF 수지로 코팅한 10 μ m의 입자크기를 갖는 MPCM 슬러리(30% 질량비)를 사용하였으며, MPCM의 자세한 사양은 Table 2에 나타내었다.

주요 측정인자는 히터 가열용량, 히터 표면온도, 냉각유체의 유량 및 입·출구 온도이다. 히터 가열용량은 파워미터로 측정하였고, 히터 표면온도는 T형 열전대를 균일간격으로 히터 표면에 12개를 설치하여 측정하였다. 냉각유체의 입·출구 온도는 삽입형 RTD 센서를 이용하여 측정하였

으며, 유량은 코리올리 효과를 이용한 질량유량계를 이용하여 측정하였다. Table 3은 본 연구에 사용한 계측장비의 사양을 나타낸다.

히터 가열용량은 293 ~ 800 W, 냉각유체의 유량은 25 ~ 120 kg/h로 변화시켰으며, 냉각유체의 온도는 19 ~ 27 °C 범위에서 변화시키며 실험을 수행하였다. 냉각성능 평가 인자로는 히터의 최고 표면온도와 균일성 판단을 위한 온도분포 등을 사용하였다. 냉각유체의 입출구 온도가 ± 0.2 °C 범위에서 변화되고, 히터 표면온도가 ± 0.2 °C 이내에서 변화될 때 시스템이 안정되었다고 판단하고 2초 간격으로 20분간 데이터를 수집하였다.

3. 실험결과 및 고찰

MPCM 슬러리를 적용하여 설계된 액냉형 냉각기의 열부하 기준 설정 및 적용성 평가를 위하여, 현재 통신기지국 현장에 설치되어 사용되고 있는 공냉형 통신기기의 단위랙에 대하여 한 달간 PCB발열부에 열전대를 설치하여 표면온도를 측정하였다(Fig. 3). 통신기기 단위랙의 입구공기 최대 온도는 25.4 °C이고 토출공기 최대온도는 30.4 °C였으며, 발열부의 국부온도는 위치와 시간에 따라 25 °C에서 61 °C범위를 나타냈다. 출구온도는 30.4 °C를 나타냈음에도 불구하고 국부온도가 60 °C 이상 증가한 것은 공냉형 냉각기의 균일냉각성능의 한계로 판단된다.

Fig. 4는 현재 운전 중인 통신기기의 PCB 발열부를 실리콘 러버히터로 대체하고, 발열부의 열부하를 변화시키며 측정된 발열부 표면 최고온

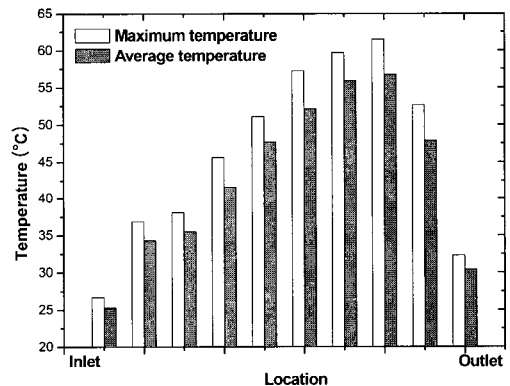


Fig. 3 Surface temperature of PCB with air cooling unit for one month.

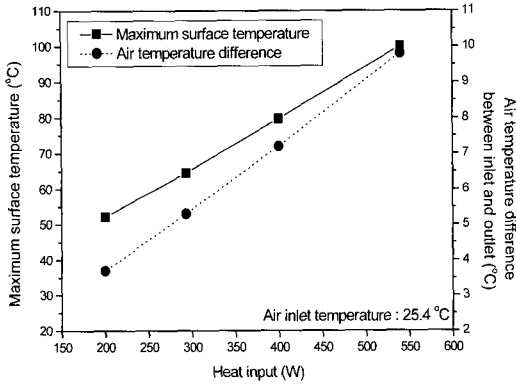


Fig. 4 Surface temperature and air temperature difference between inlet and outlet according to heat load.

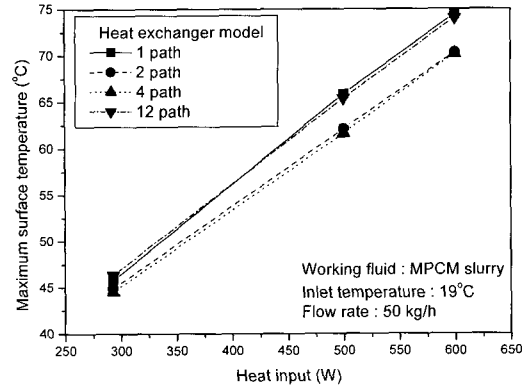


Fig. 6 Surface maximum temperature of heater according to heat input.

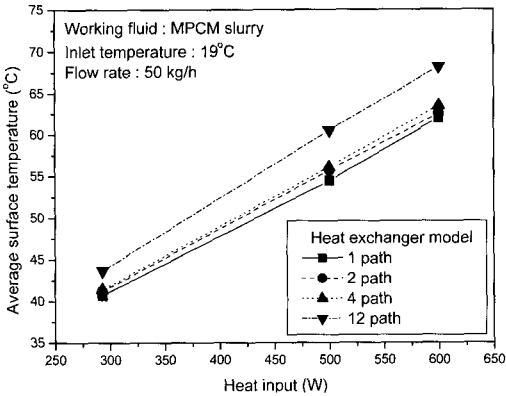


Fig. 5 Average surface temperature of heater according to heat input.

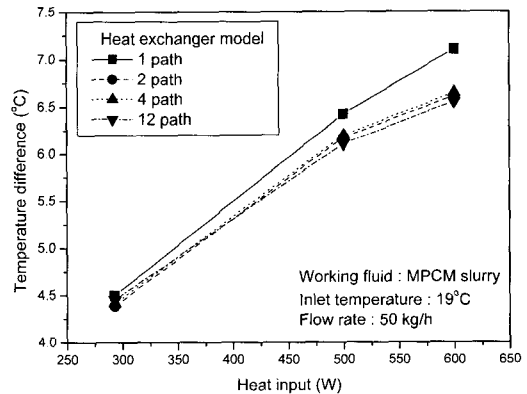


Fig. 7 Temperature difference between inlet and outlet of MPCM slurries according to heat input.

도와 공기의 입출구 온도차를 나타낸 것이다. 발열량 증가에 따라 히터 표면의 최고온도와 공기 입출구 온도차이는 선형적으로 증가하였다. 기지국 테이터로부터 최대 열부하 조건에서 국부 최고온도와 공기의 입출구 온도차이는 각각 61 °C와 5 °C를 나타내었는데, PCB를 실리콘 러버히터로 교체하여 측정된 결과 이에 해당되는 발열량은 293 W였다. 따라서, 본 논문에서는 293 W를 최소 발열량으로 선정하고, 설계된 MPCM 적용 액냉형 냉각기에 대하여 열부하 증가에 따른 냉각 성능 분석을 실시하였다.

Fig. 5~Fig. 7은 열부하 변화에 따른 4개의 열교환기 모델에 대한 히터 표면의 평균온도와 최고온도 및 MPCM 슬러리의 입·출구 온도차이

를 나타낸다. 열부하가 증가함에 따라 모든 열교환기 모델에 대하여 히터 표면 평균온도는 증가하였다. 모든 열부하에 대해서 12패스 모델의 표면 평균온도가 가장 높은 온도를 나타냈다. 이는 12패스 모델의 각 패스로의 불균일 유량분배 때문인 것으로 판단된다. 1패스 모델과 2패스 모델 및 4패스 모델은 1.6 °C 이내의 작은 평균온도 차이를 나타냈다. 최고 표면온도는 2패스와 4패스 모델이 모든 열부하 조건에 대하여 가장 낮은 값을 나타냈다. 가장 낮은 표면 평균온도를 나타낸 1패스 모델은 최고 표면온도는 높게 나타났는데, 이는 유동이 진행됨에 따라 MPCM 슬러리의 온도가 상승하여 히터 표면과 유체와의 온도차이 감소로 히터 표면온도가 상승하였기 때문이다.

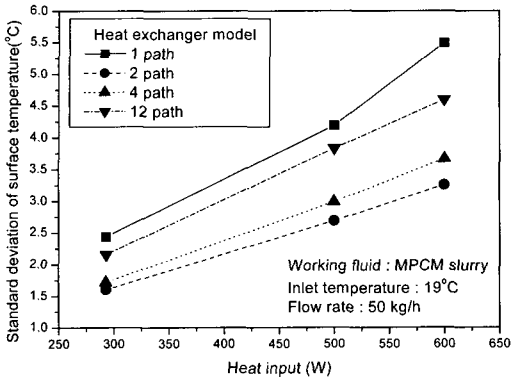


Fig. 8 Standard deviation of surface temperature according to heat input.

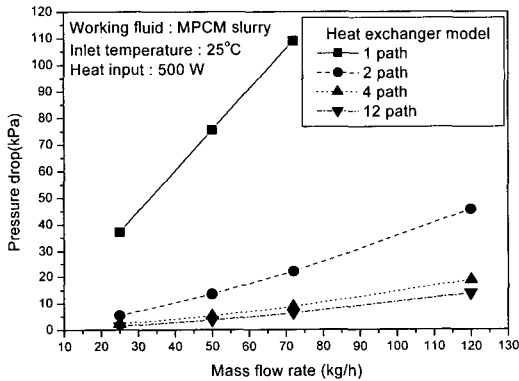


Fig. 9 Pressure drop according to mass flow rate.

Fig. 8은 식(1)에 의하여 계산된 히터 표면온도의 표준편차를 나타낸다. 1패스 모델은 다른 모델에 비하여 MPCM 입출구 온도 차이가 커서 히터 표면의 온도 표준편차가 가장 크게 나타났다. 2패스 모델과 4패스 모델 및 12패스 모델은 입출구 온도 차이는 유사하였으나, 패스가 증가함에 따라 각 패스 사이의 유량분배 차이가 증가하여 온도 표준편차가 증가하였다.

$$\sigma = \sqrt{\sum_{k=1}^n (T_k - T_{sm})^2 / n} \quad (1)$$

Fig. 9는 MPCM 슬러리의 유량 변화에 따른 각 열교환기 모델에 대한 입출구 압력강하를 나타낸다. 패스의 증가에 따라 총 유동면적이 증가하여 압력강하가 감소하였으나, 패스 수 증가에

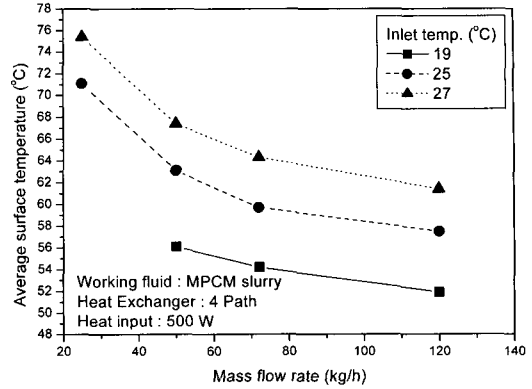


Fig. 10 Average surface temperature according to mass flow rate at various MPCM slurry inlet temperatures.

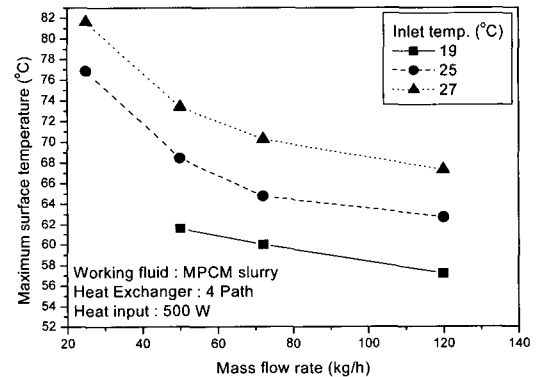


Fig. 11 Maximum surface temperature according to mass flow rate at various MPCM slurry inlet temperatures.

따라 각 패스로의 유량 분배 차이가 증가하여 4 패스 모델과 12패스 모델은 4.9 Pa이하의 작은 압력차이를 나타내어 대등한 압력강하 성능을 나타냈다.

표면온도 분석 결과로부터 4패스 모델과 2패스 모델이 다른 모델에 비하여 우수한 냉각성능을 나타냈고, 압력강하량은 4패스와 12패스 모델이 가장 낮게 나타났다. 따라서, 본 연구에서는 4패스 모델을 MPCM을 적용한 액냉형 냉각기에 적합한 모델로 선정하고 MPCM 슬러리의 운전조건 변화에 따른 성능 실험과 분석을 수행하였다. Fig. 10, Fig. 11은 히터의 발열량이 500 W일 때 MPCM 슬러리의 유량변화에 따른 발열부의 표면 평균온도와 최고 표면온도를 나타낸다.

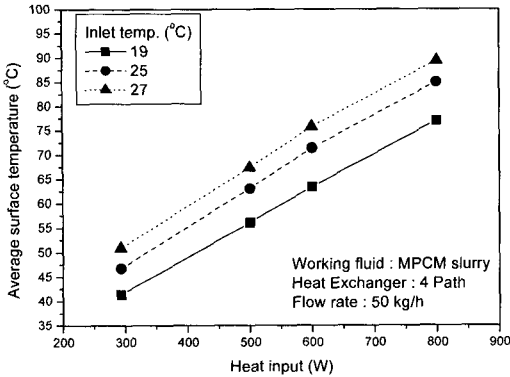


Fig. 12 Average surface temperature according to heat input at various MPCM slurry inlet temperatures.

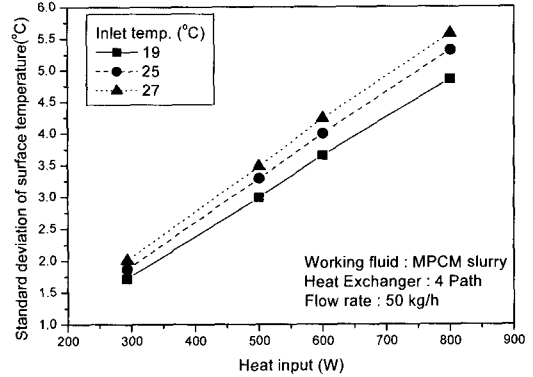


Fig. 14 Standard deviation of surface temperature according to heat input at various MPCM slurry inlet temperatures.

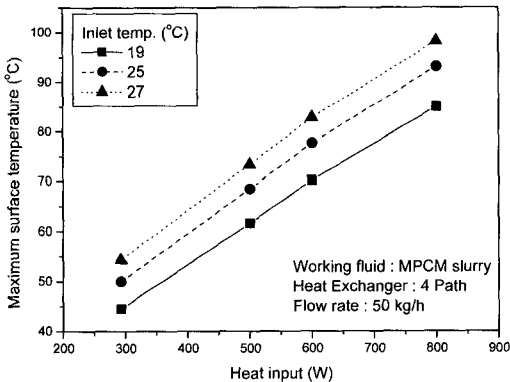


Fig. 13 Maximum surface temperature according to heat input at various MPCM slurry inlet temperatures.

MPCM 슬러리의 입구온도와 유량이 각각 25 °C 와 72 kg/h 일 때, 히터의 발열량이 500 W로 현재 통신기지국의 최대 열부하 대비 70% 증가한 경우에 국부 최고온도는 64.8 °C를 나타냈다. 통신기기의 허용 가능 온도가 65 °C보다 낮아 통신기기의 열적 안정성 확보가 가능하다.

Fig. 12, Fig. 13은 MPCM 슬러리의 유량이 50 kg/h 일 때, 4패스 열교환기의 열부하 변화에 따른 히터 표면의 평균온도와 최고표면온도를 각각 나타낸다. 발열량 증가에 따라 최고 표면온도 상승폭이 평균온도 상승폭보다 다소 크게 나타났다. 이는 발열량 증가에 따라 MPCM 슬러리 용액의 출구온도가 상승하여 Fig. 14에서 보여지듯이 열교환기 표면온도의 표준편차 상승과 함께

MPCM 슬러리와 히터 표면과의 온도 차이 감소 영역이 증가하였기 때문이다. MPCM 슬러리의 입구온도가 19 °C인 경우에는 열부하 증가에 따른 최고 표면온도 증가율과 온도편차 증가율이 25 °C와 27 °C에 비하여 미소하지만 작게 나타났다. 이는 열전달 과정에 MPCM이 상변화 온도구간을 갖는 특성 때문인 것으로 판단된다.⁽⁴⁾

MPCM 슬러리를 적용한 액냉형 냉각기와 물을 사용한 액냉형 냉각기에 대한 성능 비교와 함께 현재 널리 사용되고 있는 공냉형 냉각기와 냉각성능 비교를 수행하였다. Fig. 15는 MPCM 슬러리와 물을 사용하는 4패스 액냉형 냉각기의 히터전력량 변화에 따른 최고 표면온도를 나타낸다. MPCM 슬러리와 물의 질량유량은 모두 50 kg/h로 동일하다. 대부분의 발열량에 대하여 MPCM 슬러리 적용 냉각기와 물 적용 냉각기는 거의 유사한 최고 표면온도를 나타냈다. 하지만, 입구온도가 19 °C이고 발열량이 큰 경우에는 MPCM 슬러리 적용 액냉형 냉각기가 물을 사용한 냉각기에 비하여 다소 낮은 최고 표면온도를 나타냈다. MPCM 슬러리와 물을 사용한 냉각기의 성능 차이가 크지 않은 것은 MPCM이 상변화 구간을 갖고 층류유동이므로 단상의 유체에 미립자를 부유시켰을 때 유체에서의 질량전달 효과가 크지 않기 때문인 것으로 판단된다. 그러므로, MPCM의 잠열 특성과 질량전달 효과를 활용한 열전달 및 열용량 증대를 위해서는 통신기기 운전조건에 적합한 온도의 잠열물질과 난류도 증대 방안이 요구된다.

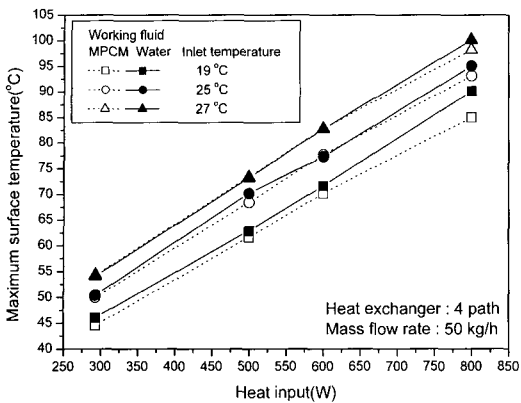


Fig. 15 Comparison of cooling performance of a MPCM cooled heat exchanger with that of a water cooled heat exchanger.

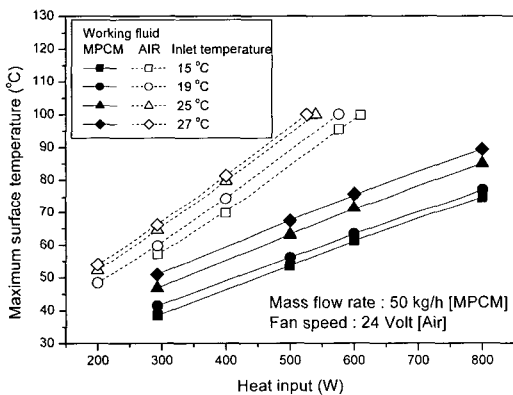


Fig. 16 Comparison of cooling performance of a MPCM cooled heat exchanger with that of an air cooling heat exchanger.

Fig. 16은 MPCM 적용 액냉형 냉각기와 기존의 공냉형 냉각기의 냉각성능을 나타낸다. 모든 열부하 조건에 대하여 MPCM 슬러리를 사용한 4패스 액냉형 냉각기가 공냉형 냉각기에 비하여 낮은 최고 표면온도를 나타냈다. 발열량이 293 W에서 600 W 범위에서 변화될 때 MPCM 적용 액냉형 냉각기는 공냉형 냉각기에 비하여 15 °C 이상의 낮은 최고 표면온도를 나타냈다. 액냉형 냉각기는 작동유체가 배관을 따라 고르게 분포되어 흐름에 따라 상대적으로 히터 표면을 고르게 냉각하지만 공냉형 냉각기는 구조적으로 유동 정체점을 가지므로 이 지점에서의 온도가 크게 상승하기 때문이다. 특히, 발열량 증가에 따라 최고

표면온도 상승폭은 액냉형 냉각기에서 상대적으로 작게 나타나고, 공냉형과 달리 유량증가로 최고 표면온도 저하가 가능하므로 향후 열밀도 증가 시에 액냉형 냉각기를 활용하여 효율적 대응이 가능할 것으로 예상된다.

4. 결론

본 연구에서는 통신기지국 현장 통신기기의 PCB 온도를 측정하여 운전 특성을 분석하여 액냉형 냉각기의 최소 기준 발열량을 선정하고, 이를 기반으로 설계된 4가지 모델(1패스, 2패스, 4패스, 12패스)의 액냉형 냉각기에 MPCM 슬러리를 적용하여 성능 실험을 수행하고 다음의 결론을 얻었다.

(1) 1패스 모델은 MPCM 슬러리의 출구 온도 상승으로 인한 냉각 성능 저하가 발생하고, 12패스 모델은 불균일 유량 분배에 의하여 성능 저하가 발생하였으며, 표면 최고온도 조절과 균일 냉각 및 압력강하 측면에서 4패스 모델이 가장 우수한 냉각성능을 나타냈다.

(2) MPCM 슬러리를 적용한 4패스형 액냉형 냉각기는 열부하 증가에 따라 최고 표면온도가 선형적으로 증가하였다. MPCM이 상변화 구간을 갖는 특성으로 인하여 냉각기의 입구온도가 19 °C 일 때가 25 °C와 27 °C인 경우에 비하여 열부하 증가에 따른 최고 표면온도 상승률과 온도편차 증가율이 작게 나타났다.

(3) 층류 유동에서 단상 유체에 미립자 부유에 의한 질량전달 효과가 크지 않아서 MPCM 슬러리와 물을 사용한 액냉형 냉각기의 열부하 변화에 따른 성능은 대등하였다. 그러나, 입구온도가 19 °C이고 발열량이 큰 경우에는 MPCM의 잠열 효과가 다소 증가하여 MPCM 슬러리를 적용한 냉각기의 성능이 물을 적용한 경우보다 다소 증가하였다.

(4) MPCM 슬러리 적용 액냉형 냉각기는 공냉형 냉각기에 비하여 유동 정체점에 의한 최고 표면온도 상승이 크지 않아서 우수한 냉각 성능을 나타냈으며, 열부하 증가에 따른 최고 표면온도 상승율도 작게 나타났다. 그러므로, MPCM 적용 액냉형 냉각기를 공냉형 냉각기에 대체하여 통신기기의 향후 열밀도 증가에 대응이 가능할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2005년도 한밭대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행되었음.

참고문헌

1. Kim, W. T. and Kim, K. S., 1996, Forced convective cooling characteristics with stacked modules of multi-PCB's in telecommunication cabinet, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 8, No. 2, pp. 230-239.
2. Incropera, F. P., 1995, Liquid Cooling of Electronic Devices by Single-Phase Convection, Jone Willy & Sons, Inc.
3. Inaba, H., 2000, New challenge in advanced thermal energy transportation using functionally thermal fluids, International Journal Thermal Science, Vol. 39, pp. 991-1003.
4. Lee, Y. J., Choi, J. K. and Lee, J. G., 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. Lee, H., Jeong, Y., Shin, J., Baek, J., Kang, M. and Chun, K., 2004, Package embedded heat exchanger for stacked multi-chip module, Sensors and actuators, Vol. 114, pp. 204-211.
6. Kim, M. J. and Park, K. W., 2005, Heat transfer characteristics of micro-encapsulated phase change material slurry, Proceedings of the SAREK, 05-W-030, pp. 193-198.
7. Jeon, J., Kim, Y., Choi, J. M. and Heo, J., 2005, Experimental study on the performance of an air-cooling system for telecommunication equipment, Proceedings of the SAREK, 05-W-051, pp. 323-328.