

# 상변화 물질을 조합한 히트파이프의 성능 특성에 관한 연구

박영학\*, 정의국\*, 부준홍†

## A Study on the Performance Characteristics of a Heat Pipe Combined with PCM

Young Hark Park\*, Eui Guk Jung\* and Joon Hong Boo†

Key Words: Phase Change Material(상변화 물질), Heat Pipe(히트파이프), Thermal Resistance(열저항), Operating Characteristics(작동특성)

### Abstract

This study deals with performance characteristics of heat pipe combined with a solid-liquid phase change material(PCM). The outer diameter of the heat pipe was 9.5 mm and the total length was 600 mm, where the evaporator, the adiabatic section and the condenser lengths were equally 200 mm. A paraffin wax having a melting point of 58.5°C was used as PCM. The paraffin container was attached to the adiabatic section of the heat pipe. The paraffin container had outer diameter of 18 mm, wall thickness of 1.2 mm and the total length of 100 mm. The heat pipe was tested with tilt angle of horizontal degree and favorite angle 10 degree, with evaporator lower position to provide stable operation of the heat pipe. Input thermal load was varied from 40 W, with increment of 40 W, to above 100 W until the maximum temperature of the heat pipe wall reached 200°C. Test results of the PCM heat pipe were presented in comparison with conventional heat pipe of the same basic dimensions. The performance was analyzed in terms of temperature distribution, thermal resistance and heat transport capability.

### 기호설명

$Q_{in}$  : 공급 열부하(W)  
 $R_{th}$  : 시스템 열저항(°C/W)  
 $T$  : 온도(°C)  
 $x$  : 열전대 위치(m)  
 $L$  : 히트파이프 길이(m)

### 하첨자

$e$  : 증발부  
 $c$  : 응축부

### 1. 서론

상변화물질(phase change material: 이하 PCM)은 주로 태양열 반응로와 같은 열저장 시스템에 적용하여 열을 효과적으로 저장하며 전자장비 및 열교환 기기에 접합하여 냉각용으로 사용하고 있다<sup>(1-3)</sup>.

고체-액체간 상변화시에 흡수하는 대량의 잠열을 저장 및 열매체로부터 열을 흡수함으로써 냉각용으로 적용이 가능하다. Lee et al은 PCM을 활용하여 이동전화기의 냉각성능에 관한 이론적 및 수치적 연구를 수행을 통하여 PCM의 온도상승 억제 기능을 보고하였다<sup>(1)</sup>. Cui et al은 태양열 히트파이프 수집기의 히트파이프 외벽에 PCM을 활용하여 시스템의 운전시간에 따른 각부 영역의 온도 분포를 조사하였다<sup>(2)</sup>. 이들은 PCM이 수집기

† 한국항공대학교 공과대학 항공우주 및 기계공학부

E-mail : jhboo@hau.ac.kr

TEL : (02)300-0107 FAX : (02)3158-2191

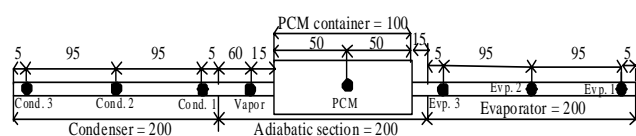
\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 대학원

의 성능향상과 작동유체의 온도진동을 감소시킬 수 있는 기능을 하고 있음을 보였다. Liu et al은 히트파이프 열교환기의 고온부와 저온부 사이에 PCM챔버를 설치하여 열교환기의 작동특성을 분석하여 PCM이 효과적으로 열의 저장 및 방출 기능을 하였음을 보고하였다<sup>(3)</sup>.

본 연구에서 구리/물 조합 히트파이프의 단열부에 PCM을 접합하여 PCM의 상변화에 따른 히트파이프의 성능을 조사하였으며 향후 이를 활용한 전자장비 냉각 및 에너지 절약에 활용할 수 있는 기초적인 연구 자료를 확보하고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

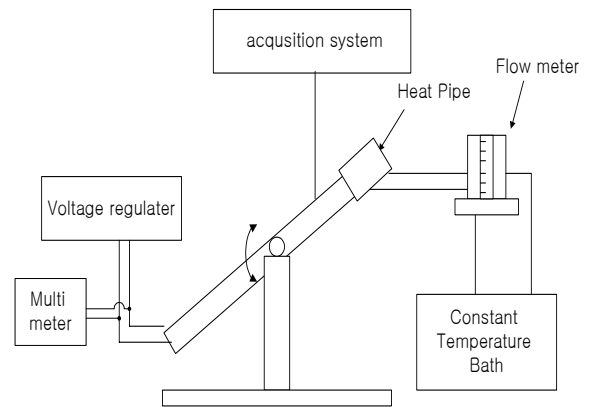
Fig. 1은 본 연구에서 제작 및 시험한 히트파이프의 사양과 열전대 위치를 보이고 있다. 히트파이프의 전체길이는 600 mm로서 증발부, 단열부 및 응축부 각각 200 mm로 제작하였다. 히트파이프 재질은 구리이며 외경 9.52 mm 및 내경 8 mm이다. 작동유체는 물로서 히트파이프의 워 구조물 내 증공 체적의 110%인 3 cc를 주입하였다. PCM 용기는 길이 100 mm 외경 22 mm, 내경 20 mm이며 총 체적이 24.3 CC이다. 히트파이프 단열부 외벽에 부착하여 PCM이 단열부 벽과 직접 접촉하여 히트파이프에서 PCM으로의 열전달이 용이하도록 하였다. 실험장치는 히터와 냉각기를 부착한 후 전체를 세라믹 울로 견고하게 단열하였다. 히트파이프의 상세한 사양을 Table 1에 수록하였다. Fig. 2는 히트파이프 성능실험을 위한 실험장치를 나타낸다. 히트파이프는 기울기 조절대 위에 놓여져 있으며 히트파이프의 기울기는 수평과 10°이다. 항온조에서 일정한 유량 5 GPH, 25°C를 공급하여 응축부에서 일정한 열이 회수되도록 구성하였다. 증발부에 열 공급을 위하여 전기저항식히터(220 V, 300 W)를 부착하였으며 전압조절기를 이용하여 일정한 열부하가 공급되도록 하였다.



**Fig. 1** Schematic of the PCM HP in this study and the thermocouple locations

**Table 1** Dimensions/materials of heat pipe

Pipe O. D.(mm)	9.52
Pipe I.D.(mm)	8
Pipe length(mm)	600
Pipe material	Copper
Mesh material	Stainless Steel 316, Mesh No.100, 2 Layers
Working fluid	Water
PCM	Paraffin wax, Melting point (58.5°C)



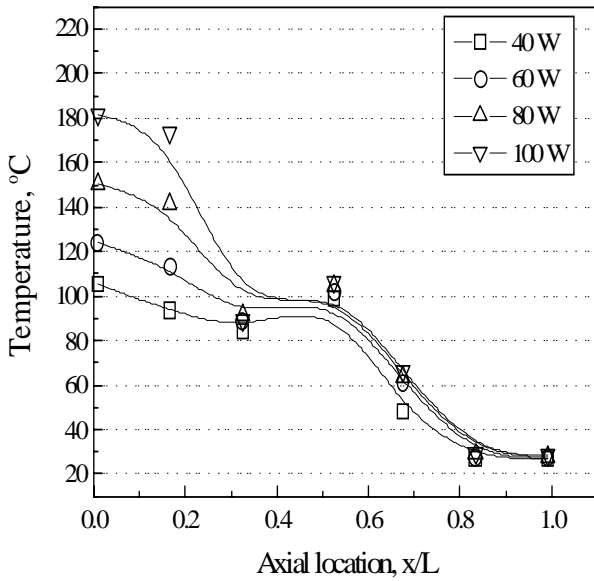
**Fig. 2** schematic of experimental setup

실험은 동일한 조건에서 PCM을 충전하지 않은 일반 히트파이프(Conventional HP)와 PCM을 충전한 히트파이프(이하 PCM HP)에 40 W에서부터 20 W간격으로 100 W까지의 열부하를 공급하였으며, 일반 히트파이프와 PCM HP의 성능을 비교 및 분석하였다.

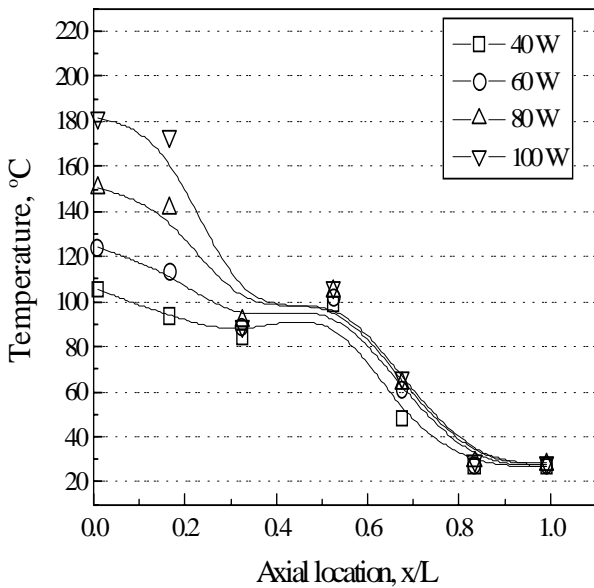
공급열부하에 대해 응축부에서 회수한 열량, 즉 실제 히트파이프에서 수송한 열부하는 평균 60% 이상으로서 이 차이는 중간의 열손실로 인한 것이다.

## 3. 실험결과 및 분석

Fig. 3은 수평자세에서 일반 히트파이프와 PCM HP의 공급열부하에 따른 정상상태 축방향 온도분포를 공급열부하에 따라 나타내었다. 히트파이프의 단열부 온도(Fig. 1의 Vapor)가 증발부 끝단 온도(Fig. 1의 Evp. 3)에 비하여 높게 나타나



(a) Conventional HP

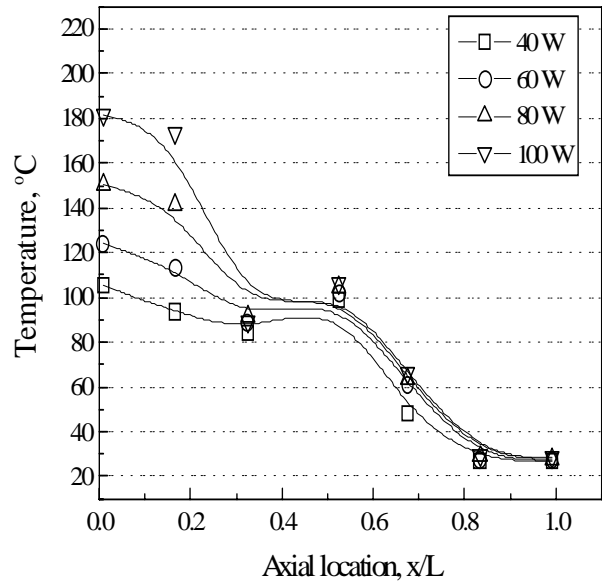


(b) PCM HP

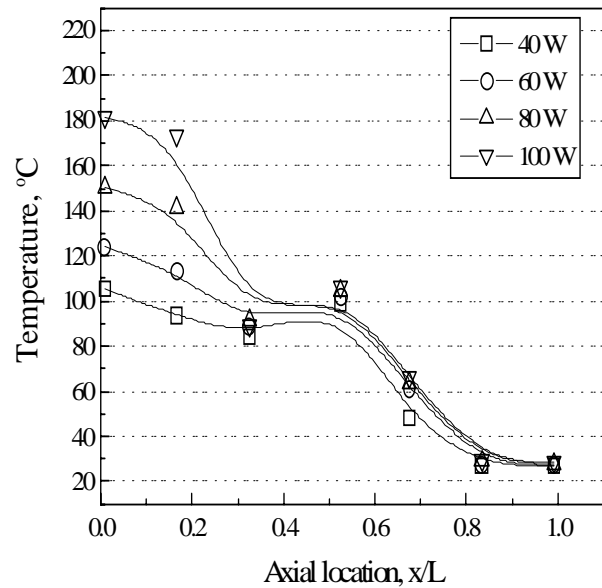
**Fig. 3** Axial temperature distribution of HP as a function of thermal load (Horizontal)

는 것이 관찰되었는데 이에 대한 원인은 아직 분석되지 않았다. 일반히트파이프와 PCM HP의 온도특성을 비교하였을 때 일반적으로 PCMHP의 증발부 외벽온도와 응축부 외벽온도가 최대 14% (공급열부하 80 W의 열전대 위치 0.17) 낮게 형성되었다. 이러한 특성은 증발부에 공급된 열의 일부분이 PCM에 저장되었기 때문으로 판단된다. 그러나 열전대 위치 0.325의 단열부 온도(Fig. 1의

Vapor)는 일반 히트파이프에 비하여 PCM 히트파이프가 최대 4% 이상(공급열부하 100 W) 높게 나타났다. 이 현상은 PCM 용기 부착에 따른 영향으로 추정된다. 한편, PCM HP의 응축부 외벽온도가 일반 히트파이프에 비하여 약 2% 낮아지는 현상을 관찰할 수 있는데, 이는 증발부로부터 이동되는 열의 일부가 PCM에 저장됨으로 인해



(a) Conventional HP



(b) PCM HP

**Fig. 4** Axial temperature distribution of heat pipe as a function of thermal load (favorite angle 10°)

응축부로 오는 열전달이 감소되었기 때문으로 생각된다.

Fig. 4는 증발부를 하부에 위치시킨 기울기(즉, favorite tilt)  $10^\circ$ 에서 일반 히트파이프와 PCM HP의 축방향 온도분포를 공급열부하에 따라 나타낸 것이다. 열부하가 40에서 80 W 범위까지는 증발부 영역에서 PCM HP의 온도는 일반 히트파이프에 비하여 축방향 위치에 따라서 높거나 낮았지만 차이는 2% 미만으로 매우 작았다. 그러나 공급열부하 100 W의 경우에는 PCM HP의 증발부 벽 온도가 최대 30% (Fig. 1의 Exp. 1) 낮게 형성되었다. 이러한 현상은 Fig. 3에서 상술한 바와 같다. 단열부 영역의 온도는 일반 히트파이프와 PCM HP의 차이가 2% 미만으로 작게 나타났다. 응축부 외벽의 온도는 PCM HP가 일반적으로 낮게 형성되었으며 공급열부하 100 W의 경우에 최대 4% 낮게 측정되었다.

Fig. 5에서 공급열부하에 따라 일반 히트파이프와 PCM HP의 작동온도를 비교하였다. 수평자세에서 PCM HP의 온도는 일반 히트파이프에 비하여 높게 나타났으며, 최대 4% (열부하 100 W에서) 이상 높아졌다. 이러한 경향에 대한 원인은 Fig. 3에서 설명한 바와 같다. 기울기  $10^\circ$ 에서 PCM HP의 작동온도는 일반 히트파이프에 비하여 공급열부하 40 W에서 80 W 범위에서 2% 이내에서 높게 형성되었다. 그러나 공급열부하 100

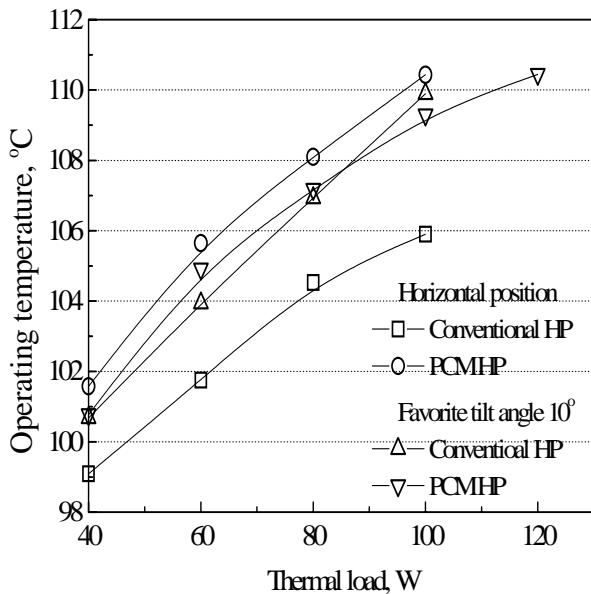


Fig. 5 Operating temperature as a function of thermal load

W에서는 일반 히트파이프에 비하여 낮게 측정되었다.

Fig. 6은 공급열부하와 기울기에 따른 히트파이프의 증발부 외벽평균온도를 비교하여 나타내었다. 외벽 평균온도는PCM HP의 경우가 낮게 형성되는 것을 확인 할 수 있다. 구체적으로 보면 수평자세에서는 최대 8%(열부하 80 W에서) 낮게

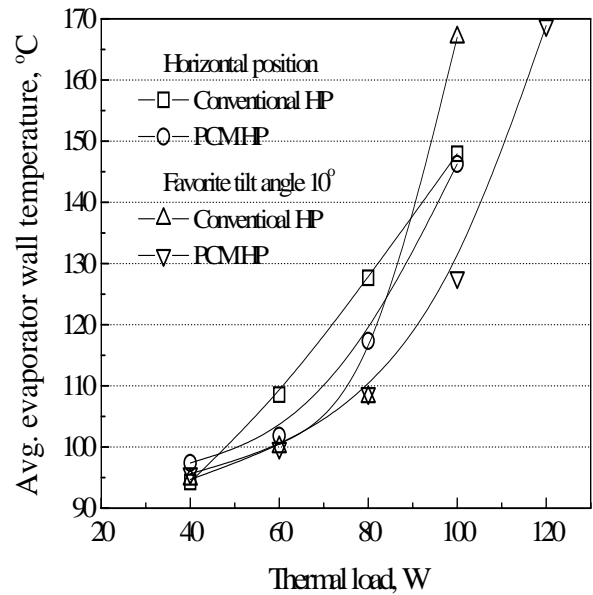


Fig. 6 Average evaporator wall temperature as a function of thermal load

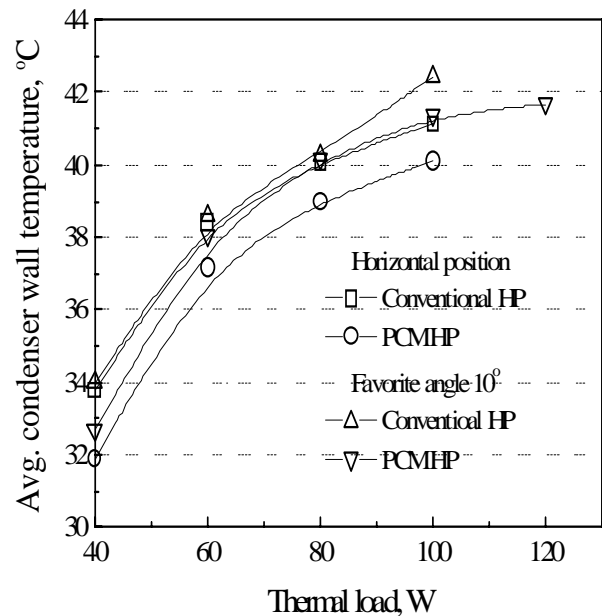


Fig. 7 Average condenser wall temperature as a function of thermal load

형성되었으며, 기울기 10°의 경우에 최대 23%(열 부하 100 W에서) 낮게 나타났다.

Fig. 7은 일반 히트파이프와 PCM HP의 공급 열 부하에 따른 응축부의 외벽평균온도를 보이고 있다. 일반 히트파이프에 비하여 PCM 히트파이프의 온도가 낮게 형성되었으나 그 차이는 2°C 미만으로 차이가 작게 나타났다.

Fig. 8은 일반 히트파이프와 PCM HP의 공급 열부하에 따른 평균열저항을 나타내었다. 열저항은 다음 식으로 계산하였다.

$$R_{th} = \frac{\overline{T_e} - \overline{T_c}}{Q_{in}} \quad (1)$$

여기서  $\overline{T_e}$ 는 증발부 외벽 평균온도,  $\overline{T_c}$ 는 응축부 외벽 평균온도,  $Q_{in}$ 은 시스템에 공급한 열부하이다.

기울기를 기준으로 일반 히트파이프와 PCM HP의 열저항을 비교하면, 수평자세일 때 PCM HP의 열저항 값이 낮게 측정되었고 공급열부하 80 W의 경우에 최대 10% 낮게 측정되었다. 기울기 10°일 때 일반 히트파이프에 비하여 PCM HP의 열저항이 최대 4%(공급열부하 40 W에서) 높게 측정되었지만, 공급열부하 100 W에서는 오히려 열저항이 30% 낮게 측정되었다.

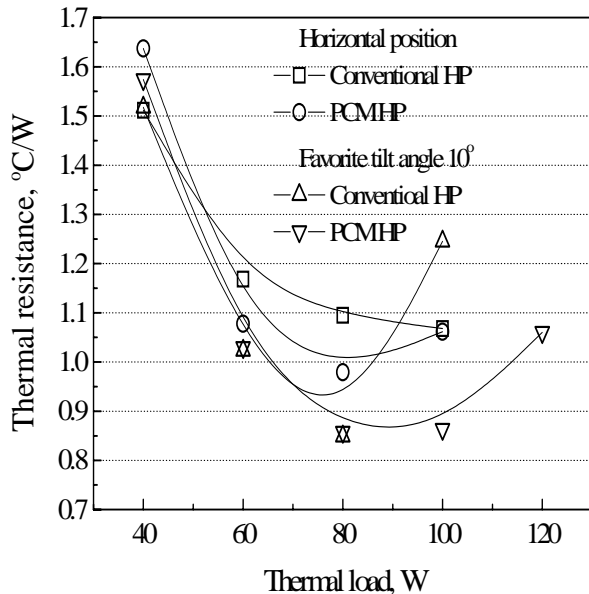


Fig. 8 Average thermal resistance as a function of thermal load

### 3. 결론

상변화 물질(PCM)을 히트파이프 단열부 외벽에 접합하여 수평과 기울기 10°에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 상변화 물질을 사용한 히트파이프는 증발부 외벽평균온도를 수평의 경우에 최대 8%까지 감소하였고 기울기 10°의 경우에 최대 23% 까지 감소하였다.
- (2) 수평자세에서의 실험에서 일반 히트파이프에 비하여 PCM HP의 작동온도가 최대 4% 정도 높게 측정되었으나, 기울기 10°의 경우에 일반 히트파이프와 PCM HP의 작동온도 차이가 매우 작게 나타났다.
- (3) 모든 경우에서 PCM HP는 일반 히트파이프에 비하여 응축부 외벽평균온도가 낮게 측정되었으나 그 차이는 2% 미만으로 매우 작았다.
- (4) 모든 경우에서 PCM HP는 일반 히트파이프에 비하여 평균열저항이 낮게 측정되었다.

### 참고문헌

- (1) Lee, S. J., Jeong, S. J. and Kim, W. S, 2005, "A Study of Cooling of Mobile Phone Using PCM Module," Transactions of the Korea Society of Mechanical Engineers(B), Vol. 29, pp. 1173-1181.
- (2) Cui, H., Wang, Z., Guo, Y., Xu, W. and Yuan, X, 2006, "Thermal Performance Analysis on Unit Tube for Heat Pipe Receiver," Solar Energy, Vol. 80, pp. 875-882.
- (3) Liu, Z., Wang, Z. and Ma, C, 2006, "An Experimental Study on Heat Transfer Characteristics of Heat Pipe Heat Exchanger with Latent Heat Storage. Part I: Charging only and Discharging only Modes, Energy Conversion & Management, Vol. 47, pp. 944-966.
- (4) Chi, S. W., 1976, "Heat Pipe Theory and Practice" McGRAW-HILL BOOK COMPANY, pp. 51~59.