〈일반논문〉
Journal of the Korean Society of Visualization, Vol. 17, No. 1 (10~18), 2019
(Manuscript received : 2019.01.21/Revised : 2019.02.01./Accepted : 2019.02.06)
DOI:http://dx.doi.org/10.5407/jksv.2019.17.1.010

ISSN 1598-8430 Print
ISSN 2093-808X Online

증발부 내경 변화에 따른 진동형 히트파이프의 온도 거동에 관한 연구

김지훈* · 박철우* · Syed Abdullah Shah* · 김대중*†

A Study on temperature behavior of pulsating heat pipe with different diameter in evaporator

Jihoon Kim*, Chulwoo Park, Syed Abdullah Shah* and Daejoong Kim*†

Abstract In this study, the temperature behavior of Pulsating Heat Pipe (PHP) according to the diameter change were studied by limiting the diameter change to only the evaporator. To investigate operation of PHP in various heat input, heat input power was increased from 10 to 120 W. The results show operation can be divided into 3 regimes by temperature behavior. Thermal resistance was increased before start-up and decreased with increasing heat input. At 110 W heat input, thermal conductivity of 2 mm PHP was 8 .times higher compare to thermal conductivity of copper. Further, to investigate details of temperature behavior in higher heat input, FFT analysis was conducted. Based on the results, when the deviation of peak frequency in each section is lowest, the thermal resistance has lowest value.

Key Words : Diameter(직경), Evaporator(증발부), Pulsating heat pipe(진동형 히트파이프), Temperature behavior(온도 거동), Thermal resistance(열저항)

기호설명

Q_{in} : 입열량 [W]
V : 전압 [V]
I : 전류 [A]
T_e : 증발부 온도 [℃]
T_c : 응축부 온도 [℃]
R : 열저항 [℃/W]
k_{eff} : 유효열전도도 [W/m · K]
$T_{avg,e}$: 증발부 평균온도 [℃]
$T_{avg,c}$: 응축부 평균온도 [℃]
L_{eff} : PHP의 유효길이 [m]
A_c : PHP의 유효단면적 [m^2]
L_e : 증발부의 길이 [m]
L_c : 응축부의 길이 [m]
L_a : 단열부의 길이 [m]
n : 평행한 채널의 개수 [-]
d_{out} : 관의 외경 [m]

† Department of Mechanical Engineering, Sogang Universtiy
E-mail: daejoong@sogang.ac.kr
* Department of Mechanical Engineering, Sogang University

1. 서 론

전자기기는 기술의 발전에 따라 점점 소형화, 고기능을 추구하고 있다. 그 결과 전자기기의 발열량 증가를 유발하고 있다. 이에 대응하여 현재까지 상변화를 이용한 열전달장치인 히트파이프가 일반적으로 사용되고 있다. 그러나 히트파이프는 윅 구조(wick structure)로 인한 capillary limit, boiling limit, sonic limit 등 기술적 한계점을 지니고 있다.[1] 이러한 한계를 극복하기 위해 히트파이프에서 파생된 다양한 종류의 상변화를 이용한 열전달장치가 연구되고 있다.

1990년 Akachi[2]에 의해 발명된 Pulsating Heat Pipe (PHP)는 기존의 히트파이프에 비해 윅 구조가 없어 디자인이 자유롭고 소형화가 용이하며, 상변화를 이용하여 높은 열전달성능을 지니고 있어 많은 관심을 받고 있다.[3-7]

일반적인 PHP의 형상은 Fig. 1과 같이 작은 직경의 관 혹은 채널이 증발부와 응축부를 교대로 지나가고 양 끝단을 연결하여 폐루프를 형성한 모습을 지니고 있다. PHP는 내부를 진공 상태로 만든 후 일정량의 작동유체를 주입하여 만들어진다. PHP 내부에서 작동유체는 liquid slug와 vapor plug 상태가 교대로 분포하고 있다. 중력이 작용하는 환경에서 PHP 내부의 작동유체가 교대로 liquid slug와 vapor plug 상태로 분포하기 위한 최대 직경이 존재한다. 이는 중력과 표면장력의 비인 Bond number (*Bo*)를 통해 결정되며, 일반적으로 PHP의 내부 직경은 *Bo*=2 일 때 해당하는 직경보다 작아야 한다.

PHP의 간략한 작동원리는 다음과 같다. 증발부에서 열을 받은 작동유체는 압력이 증가하는 반면 응축부에서는 열을 잃게 되어 작동유체의 압력이 낮아진다. 이렇게 발생한 두 부분의 압력 차이가 PHP 내부 작동유체(liquid slug/vapor plug)의 oscillation motion을 발생시키고 이 oscillation motion에 의해 증발부에서 응축부로 열이 전달된다.

PHP의 성능에 영향을 끼치는 대표적인 요소로는 작동유체의 종류, 충진율, 각 부분의 길이, 내부 직경 등이 있다.[8-12] 그 중 내부 직경은

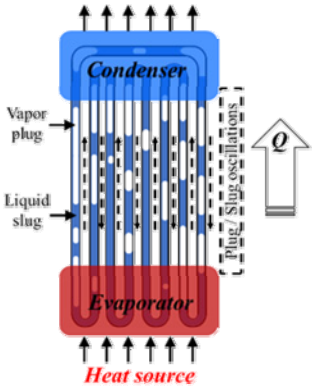

Fig. 1. Schematic of a closed loop pulsating heat pipe

PHP 제작과 성능에 직접적으로 관계되어 있는 만큼 PHP 내부 직경 변화에 따른 PHP 특성에 관한 다양한 연구가 수행 되었다. P. Charoensawan et al.[9]는 PHP의 내부 직경 크기를 변화시켜 직경이 커질수록 성능이 증가하는 것을 확인하였다. 권기환, 김성진[13]은 직경이 다른 두 채널이 교대로 배치된 MEMS 기반의 마이크로 사이즈 PHP를 제작하였다. 그들은 내부 직경이 다른 PHP가 일정한 PHP보다 성능이 증가한 것을 확인하였으며, 또한 PHP 기울기 변화에 따른 성능 변화가 줄어들었다고 발표하였다.

기존 연구들은 직경의 변화가 PHP의 세 부분, 증발부, 단열부, 응축부 전반에 걸친 것들이 대부분이다. 그러나 각 부분에서 일어나는 물리 현상은 다르기 때문에 PHP의 특성을 분석하는데 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 직경 변화를 증발부만으로 한정하여 직경 변화에 따른 PHP의 특성을 살펴보았다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 4개의 턴 수를 가진 관형 PHP를 제작하였다. 증발부와 응축부는 효과적인 열의 출입을 위해 열전도도가 높은 구리를 사용하였으며, 단열부는 Perfluoroalkoxy (PFA)를 사용하였다. 증발부만의 직경 변화를 위해 증발부 내경을 2, 2.5, 3 mm 세 종류로 설정하고 단열부 및

응축부의 내경은 2.5 mm로 고정하였다. 외경은 모두 4 mm로 고정하였으며 각 부분은 tube fitting을 이용해 연결하였다.

작동유체 주입을 위해 PHP 내부 진공도가 약 50 mTorr에 도달한 후 작동유체인 물을 주입하였다. PHP 내부 전체 부피 중 액체 상태의 작동유체가 차지하는 부피의 비율인 충진율은 세 종류 PHP 모두 56%로 설정하였다.

Fig. 2은 본 연구에 사용된 실험 장치의 모식도를 나타낸 것이다.

증발부는 aluminum block과 cartridge heater를 사용하였으며, cartridge heater는 DC power supply에 연결하였다. 증발부는 많은 열이 발생하기 때문에 대기로의 열손실을 막기 위해 단열테이프와 세라믹울(ceramic wool)로 구성된 단열박스 내에 위치 시켰다. 응축부는 aluminum block과 water block을 사용하였으며, water block을 항온순환조에 연결하여 20 ℃의 물이 water block 내부를 순환할 수 있도록 하였다.

총 8개의 thermocouple (Type K)를 증발부 4곳, 단열부 1곳, 응축부 3곳에 부착하였으며 (Fig. 2), 0.1 초마다 온도를 측정하였다. 증발부 온도는 4곳, 응축부 온도는 3곳의 평균값을 사용하였다.

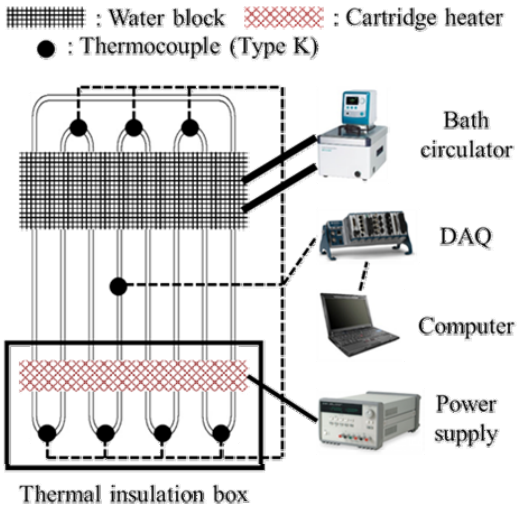

Fig. 2. Experimental set-up: water block, cartridge heater, thermal insulation box, bath circulator, power supply, DAQ, etc.

PHP와 지면이 이루는 각도가 작동에 영향을 미치는 점을 고려하여 모든 실험은 PHP와 지면 사이의 각도가 90°이며, 증발부가 응축부 아래에 위치한 bottom heating mode로 수행하였다.

Power supply에 연결된 cartridge heater를 통해 공급된 입열량(Q_{in})은 전압(V)과 전류(I)의 곱으로 식 (1)과 같이 계산된다.

$$Q_{in} = V \times I \tag{1}$$

세 종류의 PHP에 대하여 입열량을 10 W부터 10 W씩 점진적으로 증가시키며 120 W까지의 온도 변화를 관찰하였다. 각 입열량을 가하는 시간은 900 초로 제한하였다.

3. 결 과

3. 1 전체 입열량에 대한 온도 거동

각 케이스에 대하여 전체 시간 동안 증발부 및 응축부의 온도 거동이 Fig. 3~5에 나타나 있다. 그래프를 살펴보면 증발부와 응축부 모두 2700~3600 초 사이에 온도가 진동하는 거동을 보이기 시작하는 것을 확인할 수 있다. 또한 전반적으로 입열량이 증가할수록 증발부와 응축부 모두 온도는 증가하지만 그 차이가 줄어드는 것을 관찰할 수 있다. 증발부 온도는 2 mm PHP의 경우 약 80 ℃부터 작동하여 100 ℃까지 증가한다. 2.5, 3 mm PHP는 각각 약 95 ℃에서 115 ℃, 105 ℃에서 125 ℃까지 증가한다.

증발부 온도 증가율은 모든 케이스에서 비슷하지만, 내경이 감소할수록 작동 시작온도가 낮아지는 것을 알 수 있다. 2.5 mm PHP는 증발부 온도가 급격히 상승하는 stop-over 현상이 더 많이 관찰되며, 3 mm PHP는 다른 두 케이스에 비해 증발부 온도의 진폭이 큰 것을 확인할 수 있다. 응축부 온도의 경우 모두 약 20 ℃부터 60 ℃까지 증가하고 있으며, 증발부 온도보다 복잡한 거동을 보이고 있다.

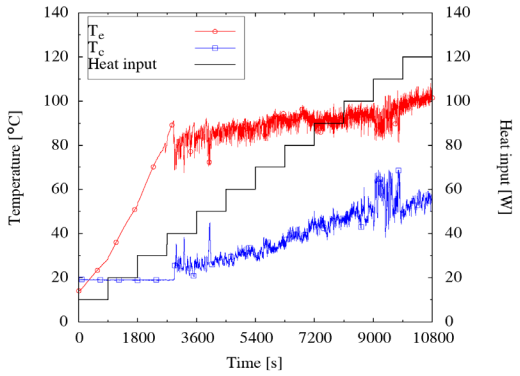

Fig. 3. Evaporator and condenser section temperature variation of 2 mm PHP with time in 10~120 W heat input

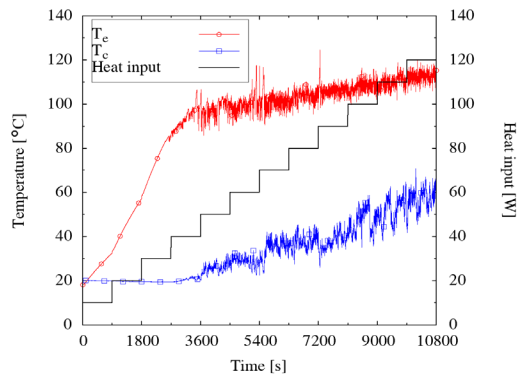

Fig. 4. Evaporator and condenser section temperature variation of 2.5 mm PHP with time in 10~120 W heat input

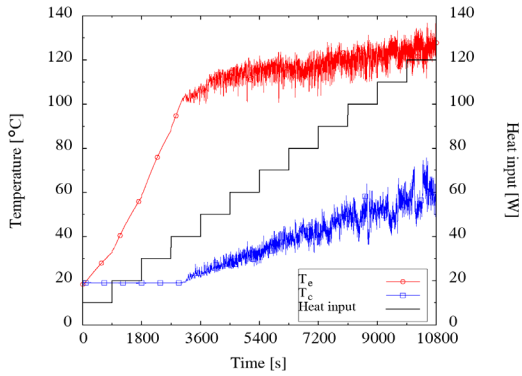

Fig. 5. Evaporator and condenser section temperature variation of 3 mm PHP with time in 10~120 W heat input

3. 2 각 입열량별 온도 거동

모든 종류의 PHP에 대하여 입열량별 온도 거동은 크게 3 구역으로 나눌 수 있다. 구역 1은 10~30 W, 구역 2는 40~50 W, 구역 3은 60 W이상이다. Fig. 6 는 2 mm PHP에 대하여 입열량이 10~30 W (구역 1)일 때 증발부 및 응축부의 온도 거동이다. 모든 케이스에서 입열량이 10~30 W일 때 Fig. 6와 같이 응축부의 온도는 일정한 반면 증발부의 온도는 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 7~9은 각각 구역 2 (입열량 40~50W)에서의 2, 2.5, 3 mm PHP의 증발부 및 응축부의 온도 거동이다. 공통적으로 증발부의 온도는 구역 1과 비교 했을 때 선형적인 상승이 아닌 진동하는 거동이 나타나고 있으며, 응축부 온도 또한 일정하지 않고 진동하는 거동이 나타나고 있다.

증발부, 응축부 두 부분 온도가 모두 진동하는 시점을 PHP의 작동 시작 지점이라 판단하였을 때, 작동 시점과 경향은 차이를 보이고 있다. 작동 시작 시점을 살펴보면, 2 mm PHP는 입열량이 40 W일 때 200 초 후 작동을 시작하였다.

2.5 mm PHP는 40 W 일 때 약 850 초 후부터 작동을 시작하였으며, 3mm PHP의 경우 40 W일 때 약 500 초 후 작동을 시작하였다.

작동을 시작하는 경향에서도 차이가 나타났다. 2 mm PHP는 증발부 온도가 선형적으로 증가하다가 특정 시점에서 하강한 후 진동을 시작하는 모습을 보이고 있다. 그러나 2.5, 3 mm PHP의 경우 증발부의 온도 증가율의 감소와 더불어 작은 진폭의 진동을 보인 후 작동을 시작하였다.

일반적으로 2 mm PHP가 보인 작동 시작 특성을 sudden start-up, 2.5 mm와 3 mm PHP가 보인 작동 시작 특성을 gradual start-up이라고 하는데 이는 작동 시작 전 초기에 PHP내부 liquid slug 및 vapor plug의 분포 형태에 의한 것으로 알려져 있다.

이와 관련하여 S. Khandekar는 같은 실험 조건에서도 sudden start-up과 gradual start-up 두 종류 작동 시작 특성이 내부 liquid slug와 vapor

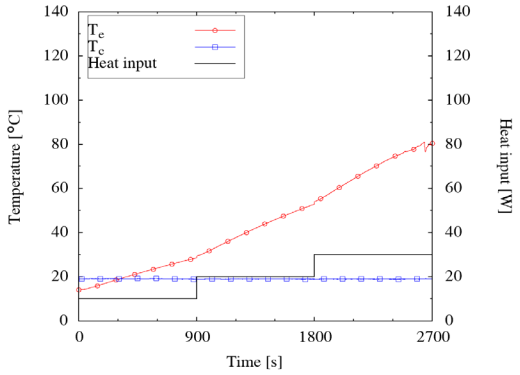

Fig. 6. Evaporator and condenser section temperature variation of 2 mm PHP with time in 10~30 W heat input (regime 1)

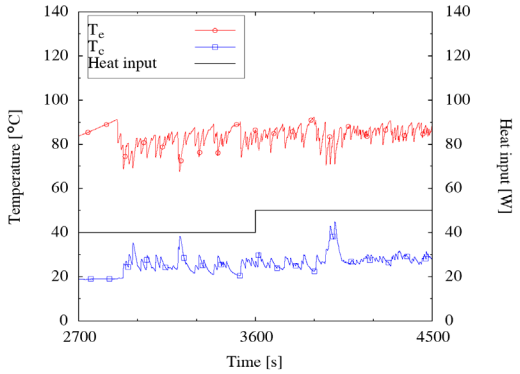

Fig. 7. Evaporator and condenser section temperature variation of 2 mm PHP with time in 40~50 W heat input (regime 2)

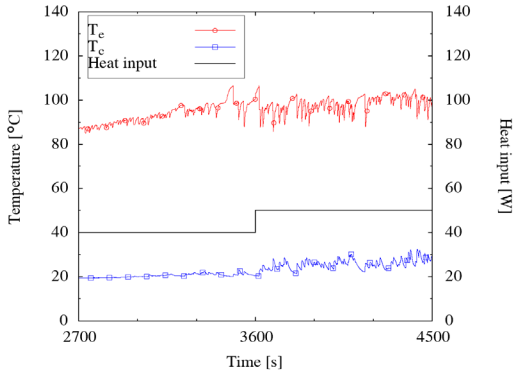

Fig. 8. Evaporator and condenser section temperature variation of 2.5 mm PHP with time in 40~50 W heat input (regime 2)

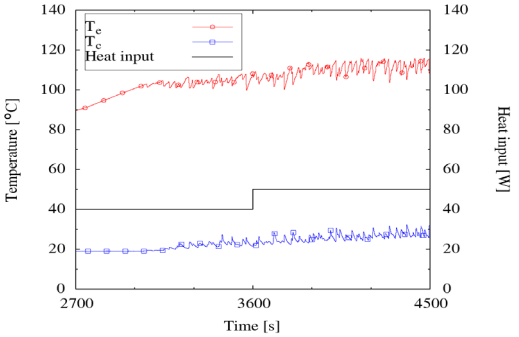

Fig. 9. Evaporator and condenser section temperature variation of 3 mm PHP with time in 40~50 W heat input (regime 2)

plug 초기 분포 형태에 따라 다르게 관측된다 발표하였고,[14] Xiaoyu Cui et al.[15]은 초기 분포는 무작위적으로 형성된다고 발표하였다.

입열량이 60 W이상 (구역 3)에서 증발부, 응축부의 온도 거동은 낮은 입열량인 구역 2에 비해 주기가 짧게 진동하는 모습을 보이고 있다. 예를 들어 2.5 mm PHP를 살펴보면, Fig. 8(구역 2)에서 3800~4100 초 동안 증발부 온도의 피크 수는 총 17개이며 Fig. 10(구역 3)에서 6600~6900 초 동안의 피크 수는 총 34개이다. 같은 시간 동안 구역 3의 피크 수가 더 많기 때문에 주기가 짧아진 것을 확인할 수 있다. 또한 측정 지점별 온도 거동을 살펴보았을 때 더 복잡한 양상을 띄고 있다. 구역 3의 대표적인 온도 거동을 Fig. 10에 나타내었다.

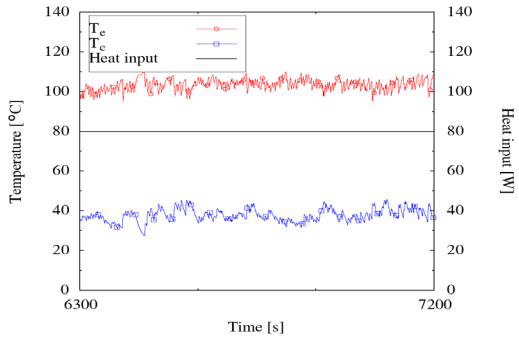

Fig. 10. Evaporator and condenser section temperature variation of 2.5 mm PHP at 80 W heat input (regime 3)

4. 분 석

4. 1 열저항 및 열전도도를 통한 PHP 성능 평가

PHP의 성능을 평가하는 대표적인 기준은 열저항(thermal resistance)이다. 열저항(R)은 증발부의 평균온도와 응축부의 평균온도 차이를 입열량을 나눈 값으로 아래 식 (2)과 같이 정의하며 열저항이 낮을수록 열전달성능이 뛰어나다고 판단할 수 있다.

$$R = \frac{T_{avg,e} - T_{avg,c}}{Q_{in}} \qquad (2)$$

$T_{avg,e}$는 증발부, $T_{avg,c}$는 응축부의 평균온도이며 Q_{in}은 입열량이다. 열저항 값을 계산하기 위해 증발부와 응축부의 평균온도는 각 입열량이 가해지는 900 초 중 마지막 180 초의 평균값을 사용하였다. 세 종류의 PHP에 대해 입열량별 열저항을 Fig. 11에 나타내었다.

2 mm PHP의 열저항이 가장 작을 때는 입열량 110 W일 때로 나타났고 이때 열저항의 값은 0.37 ℃/W이다. 2.5, 3 mm PHP 모두 입열량이 120 W일 때 열저항이 최소값을 가지는 것으로 나타났으며 각각 0.46 ℃/W, 0.56 ℃/W 값을 가진다.

세 종류의 PHP 모두 입열량 30 W를 기준으로 열저항이 증가하다 감소하는 것을 확인할 수

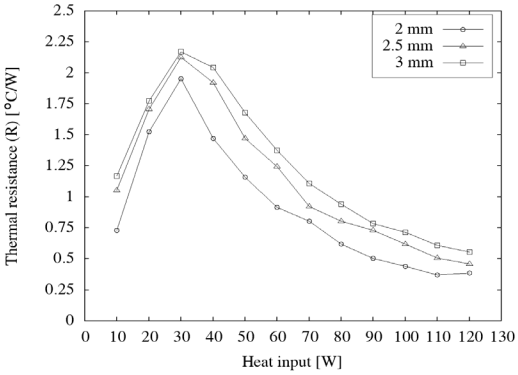

Fig. 11. Thermal resistance of 3 different PHPs with 10~120 W heat input

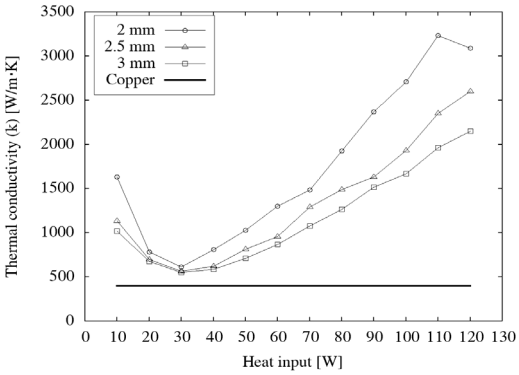

Fig. 12. Thermal conductivity of 3 different PHPs and copper with 10~120 W heat input

있다. 입열량 10~30 W에서는 Fig. 6에서 살펴보았듯이 시간에 따라 증발부의 온도는 증가하는 반면 응축부의 온도는 일정하기 때문에 열저항이 증가하는 것임을 알 수 있다.

이는 PHP가 작동하기 전이라고 판단할 수 있으며, 작동하기 전까지 내부의 liquid slug와 vapor plug는 움직임을 보이지 않는다. 따라서 증발부에 가해진 열은 전도 혹은 자연 대류에 의해서만 전달이 된다.

입열량이 40 W 이상일 때 입열량이 증가할수록 열저항이 낮아지는 경향은 기존의 연구결과와 일치한다.[16] 낮은 입열량(40~50 W)에서 보인 상대적으로 긴 시간 동안 증발부 온도가 상승하다가 급격히 하강하는 온도 거동은 stop-over 현상이라 판단할 수 있다. Stop-over 현상은 PHP 내부의 liquid slug와 vapor plug가 일시적으로 움직임을 멈추는 현상인데 이 현상이 발생하면 효과적으로 열이 전달되지 못한다. 하지만 입열량이 높아질수록 stop-over 현상이 줄어들고 PHP 내부의 liquid slug와 vapor plug의 oscillation motion이 더욱 커지게 되어 더 많은 열을 증발부에서 응축부로 전달할 수 있게 된다.[17]

어떤 물질의 열전달성능을 나타내는 대표적인 물성치로는 열전도도(thermal conductivity)가 있다.

따라서 PHP의 열전달성능을 다른 물질 혹은 장치와 효과적으로 비교하기 위해 입열량에 따른 유효열전도도를 Fig. 12에 나타내었다. PHP 유효열전도도(k_{eff})는 식 (3)와 같이 같이 정의된다.[18]

$$k = \frac{Q_{in}}{T_{avg,e} - T_{avg,c}}\left(\frac{L_{eff}}{A_c}\right) \quad (3)$$

L_{eff}와 A_c는 PHP의 유효길이와 단면적을 의미한다. PHP의 유효길이는 식 (4)과 같이 계산할 수 있다.

$$L_{eff} = \frac{L_e + L_c}{2} + L_a \quad (4)$$

L_e, L_c, L_a는 각각 증발부, 응축부, 단열부의 길이이며, 증발부와 응축부의 길이는 aluminum block의 높이 40 mm, 단열부는 PFA tube의 길이 80 mm로 계산하였다.[16]

유효단면적은 식 (5)와 같이 계산할 수 있다.

$$A_c = n \cdot \pi \cdot d_{out}^2/4 \quad (5)$$

n은 평행한 채널의 개수이며, d_{out}은 관의 외경이다.

Fig. 12에서 나타나듯, 2 mm PHP에서 입열량이 110 W일 때 3232.55 W/m·K으로 모든 경우 중 가장 높은 유효열전도도를 보여주고 있다. 유효열전도도가 제일 낮을 때는 549.84 W/m·K로 3 mm PHP에서 입열량이 30 W일 때 나타났다. 세 종류의 PHP 모두 구리의 열전도도 값 400 W/m·K과 비교하여 매우 높은 열전도도를 가지는 것을 알 수 있다.

4. 2 Fast Fourier Transform (FFT) 분석

PHP 내부의 liquid slug와 vapor plug의 oscillation motion은 관 외벽에서의 온도의 상승/하강을 야기한다. 따라서 여러 측정 지점에서 얻은 시간에 따른 온도 데이터의 Fast Fourier Transform (FFT) 결과 공통된 피크 주파수가 관찰된다면 PHP 내부의 liquid slug와 vapor plug는 균일한 비율로 분포되어 있다는 것을 의미한다.[19]

세 종류 PHP의 특성을 알아보기 위해 각 온도 데이터에서 FFT 계산을 수행하였다. 모든 측정 지점에서 구해진 피크 주파수를 증발부, 단열부, 응축부로 구분하고 각 부분의 평균값을 대표값으로 산정하였다.

Fig. 13~15는 세 종류의 직경을 가지는 PHP에 대하여, 입열량이 60~120 W일 때 각 부분별 피크 주파수와 열저항을 나타내었다. 60 W 미만의 입열량의 경우, liquid slug와 vapor plug의 oscillation motion이 작아 증발부에 가해진 열이 응축부로 충분히 전달되지 않았다고 판단하여 피크 주파수를 추출하는 대상에서 제외하였다.

공통적으로 세 종류의 PHP 모두 입열량 중 상대적으로 높은 입열량에서 피크 주파수 간 차이가 가장 작은 것을 확인할 수 있다.

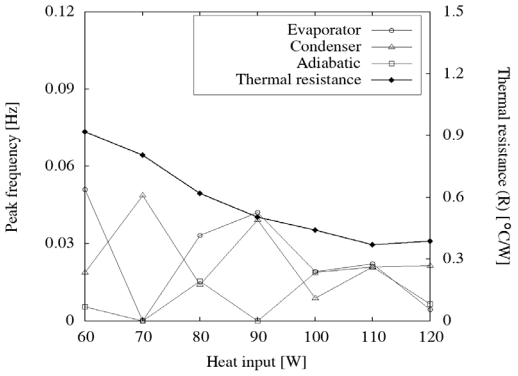

Fig. 13. Section peak frequency and thermal resistance of 2 mm PHP with 60~120 W heat input

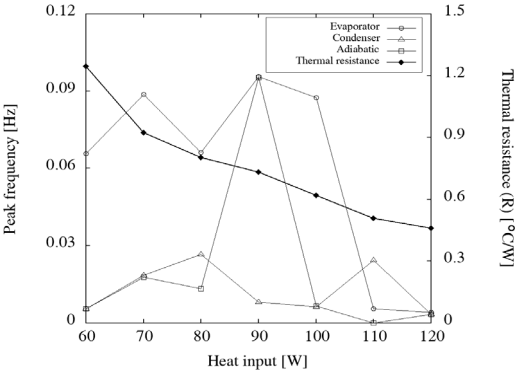

Fig. 14. Section peak frequency and thermal resistance of 2.5 mm PHP with 60~120 W heat input

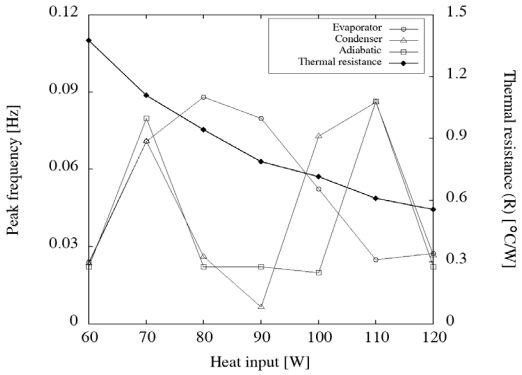

Fig. 15. Section peak frequency and thermal resistance of 3 mm PHP with 60~120 W heat input

이는 두 입열량 중 높은 입열량에서 공통된 피크 주파수가 나타났다고 발표한 J. L. Xu와 X. M. Zhang[19]의 결과와 일치한다. 한편 각 케이스별 피크 주파수 간 차이가 가장 작은 입열량에서의 다른 지표를 살펴보면, 모두 열저항 값이 가장 낮은 값을 가지는 것을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 직경 변화를 증발부만으로 한정하여 세 종류의 PHP를 제작하였다. 그리고 입열량이 점진적으로 증가하는 조건에서 각 PHP의 성능을 확인하고 온도 거동 특성을 관찰하였다.

열저항을 통해 성능을 평가한 결과 2 mm PHP가 입열량 110 W일 때 가장 낮은 열저항 값 0.37 K/W를 나타내었다. 2.5, 3 mm PHP의 경우 가장 낮은 열저항 값은 입열량이 120 W일 때 각각 0.46 K/W, 0.56 K/W로 나타났다. 또한 다른 물질과의 효과적인 비교를 위해 열전도도를 계산한 결과 2 mm PHP가 입열량 110 W일 때 3232.55 W/m·K으로 구리의 열전도도보다 매우 높은 값을 나타냈다.

상대적으로 복잡한 거동을 보이는 높은 입열량에서의 온도 거동을 분석하기 위해 FFT 분석을 시행한 결과, 세 종류의 PHP 모두 높은 특정 입열량에서 각 부분의 피크 주파수 간의 차이가 제일 작았다. 또한 피크 주파수 간의 차이가 가장 작을 때의 입열량에서 각 PHP별 열저항 값이 가장 낮은 것을 확인할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2017R1A2A2A05001329)

REFERENCE

1) G. P. Peterson, “An introduction to heat pipes: modeling, testing, and applications,” Wiley, 1994.
2) H. Akachi, US Patent, Patent Number 4921041, 1990.
3) Yury F. Maydanik, Valery I. Dmitrin and Vladimir G. Pastukhov, “Compact cooler for electronics on the basis of a pulsating heat pipe,” Applied Thermal Engineering, Vol. 29, 2009, pp. 3511-3517.
4) Jian Qu, Hui-Ying Wu and Qian Wang, “Experimental investigation of silicon-based micro-pulsating heat pipe for cooling electronics,” Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering, Vol. 16, 2012.
5) S. Khandekar, “Pulsating heat pipe based heat exchangers,” The 21st International Symposium on Transport Phenomena, Kaohsiung City, Taiwan, 2010.
6) Honghai Yang, Sameer Khandekar and Manfred Groll, “Performance characteristics of pulsating heat pipes as integral thermal spreaders,” International Journal of Thermal Sciences, Vol. 48, 2009, pp. 815-824.
7) D. Zabek, J. Taylor, V. Ayel, Y. Bertin, C. Romestant and C. R. Bowen, “A novel pyoelectric generator utilising naturally driven temperature fluctuations from OHP for waste heat recovery and thermal energy harvesting,” Journal of Applied Physics, Vol. 120, 2016.
8) X. M. Zhang, J. L. Xu and Z. Q. Zhou, “Experimental study of a pulsating heat pipe using

FC-72, ehtanol, water as working fluids," Experimental Heat Transfer, Vol. 17, 2004, pp. 47-67.

9) Piyanun Charoensawan, Sameer Khandekar, Manfred Groll and Pradit Terdtoon, "Closed loop pulsating heat pipes Part A; parametric experimental investigations," Applied Thermal Engineering, Vol. 23, 2003, pp. 2009-2020.

10) D. Yin, H. Rajab and H. B. Ma, "Theoretical analysis of maximum filling ratio in an oscillating heat pipe," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 74, 2014, pp. 353-357.

11) Honghai Yang, S. Khandekar and M. Groll, "Operational limit of closed loop pulsating heat pipes," Applied Thermal Engineering, Vol. 28, 2008, pp. 49-59.

12) Jiansheng Wang, He Ma and Qiang Zhu, "Effects of the evaporator and condenser length on the performance of pulsating heat pipes," Applied Thermal Engineering, Vol. 91, 2015, pp. 1018-1025.

13) Gi Hwan Kwon and Sung Jin Kim, "Experimental investigation on the thermal performance of a micro pulsating heat pipe with a dual-diameter channel," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 89, 2015, pp. 817-828.

14) Sameer Khandekar, Anant Prasad Gautam and Pavan K. Sharma, Multiple quasi-steady states in a closed loop pulsating heat pipe, International Journal of Thermal Sciences, Vol. 48, 2009, pp. 535-546

15) Xiaoyu Cui, Yue Zhu, Zhihua Li and Shende Shun, Combination study of operation characteristics and heat transfer mechanism for pulsating heat pipe, Applied Thermal Engineering, Vol. 65, 2014, pp. 394-402

16) S. Khandekar, N. Dollinger and M. Groll, "Understanding operational regimes of closed loop pulsating heat pipes: an experimental study," Applied Thermal Engineering, Vol. 23, 2003, pp. 707-71915) S. Khandekar and M. Groll, "An insight into thermo-hydrodynamic coupling in closed loop pulsating heat pipes," International Journal of Thermal Sciences, Vol. 43, 2004, pp. 13-20

18) Dong Xu, Laifeng Li and Huiming Liu, "Experimental investigation on the thermal performance of helium based cryogenic pulsating heat pipe," Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 70, 2016, pp. 61-68

19) J. L. Xu and X. M. Zhang, "Start-up and steady thermal oscillation of a pulsating heat pipe," Heat Mass Transfer, Vol. 41, 2005, pp. 685-694