

알루미늄 박판형 Closed End Pulsating Heat Pipe의 열성능에 관한 실험적 연구

권용하 · 김종수[†]부경대학교(학생) · [†]부경대학교(교수)

An Experimental Study on the Thermal Performance of Aluminium Thin Plate Closed End Pulsating Heat Pipe

Yong-Ha KWON · Jong-Soo KIM[†]Pukyong National University(student) · [†]Pukyong National University(professor)

Abstract

We fabricated experimental closed end type PHP that improved productivity and economy using aluminium thin plate multi channel thermosyphon with excellent thermal performance and responsiveness to heat loads. This study have been conducted to evaluate the thermal performance and characteristics of the closed end PHP using HFE-7100 under various filling ratios, heat transfer rates and inclination angles, and to suggest thermal performance data easy to use. We proposed a correlation within 10% of mean error using graphical analysis for dimensionless number(Bo and Ku) according to heat transfer rate.

Key words : Closed end pulsating heat pipe, Thin plate multi channel, Correlation

I. 서론

LED가 고출력 산업용 조명 외에도 휴대폰, TV 등의 고성능 디스플레이 기기로부터 사용 범위가 확대되고 산업 전반에서 고용량 배터리에 대한 수요가 급증함은 물론 기존의 가전 및 산업용 전자 기기뿐만 아니라 생활 수준 향상에 대응해 상품화된 새로운 편의 기기들이 개발과 동시에 빠르게 고성능, 소형화되면서 방열, 냉각에 대한 수요와 고성능화 요구 또한 증가되고 있다(Jeong et al., 2019). 별도의 동력을 필요로 하지 않으면서도 높은 열전달 성능을 갖는 히트파이프는 이에 대한 합리적인 해결책으로써 수요는 물론 새로운 연구들도 증가하고 있다(Chi et al., 2018). 마이크로 채널을 가진 박판형 다채널 히트파이프는 비

교적 단순한 공정으로 제작이 가능해 생산비를 절감할 수 있고 외형이 판형이기 때문에 전자 제품 기관 등 고집적화 된 기기들의 평면 형태 발열부에 대한 접촉 저항 개선 측면에서도 유리하다. 또한 열부하나 발열부 형상에 대응하여 시스템의 크기나 내부 채널 수를 조절할 수도 있다. 이러한 장점 때문에 박판형 다채널 히트파이프의 개발 및 수요는 계속 증가하고 있다(G. Wang et al., 2019). Pulsating Heat Pipe(이하 PHP)는 Wick(wick)이 없는 간단한 구조지만 유로를 사행(serpentine)으로 제작해야 하기 때문에 직선 유로들로만 구성된 다른 형태의 히트파이프들에 비해서는 상대적으로 제조공정이 단순하지 않아 박판형 다채널 히트파이프로는 잘 사용되지 않고 관련 자료도 찾기 힘들다. 또 박판형 다채널 히트파이프는 대

[†] Corresponding author : 051-629-6176, jskim@pknu.ac.kr

부분 사각형의 유로를 갖는데 10 턴 이상인 사각형 마이크로 채널 PHP에 관한 자료도 찾기 어려운 상황이다(Lee and Kim, 2017). 그러나 PHP는 턴(turn) 수가 증가하면 경사각의 영향이 적거나 아예 없어(Y. Zhang, and A. Faghri, 2008) 설치 조건의 제약이 적다는 장점을 갖기 때문에 모바일 등의 다양한 수요에 대응하기 위해서는 턴 수가 많은 박판형 PHP에 대한 열성능 자료가 필요하다. 본 연구에서는 홈(groove), 워 등이 없이 단순한 형태를 갖는 써모사이폰 구조의 박판형 다채널 히트파이프(내부 채널 수 56)를 제작 단계에서 별도 가공하여 상대적으로 생산성, 경제성 측면에서 유리한 closed end type의 박판형 PHP(턴 수 28)로 제작하고 이를 실제 사용 조건을 고려한 다양한 충전율, 입열량, 경사각 조건에서 열성능 및 특성을 평가하고 사용이 용이한 열적 성능 자료를 제시하였다.

II. 실험장치 및 방법

1. 실험장치

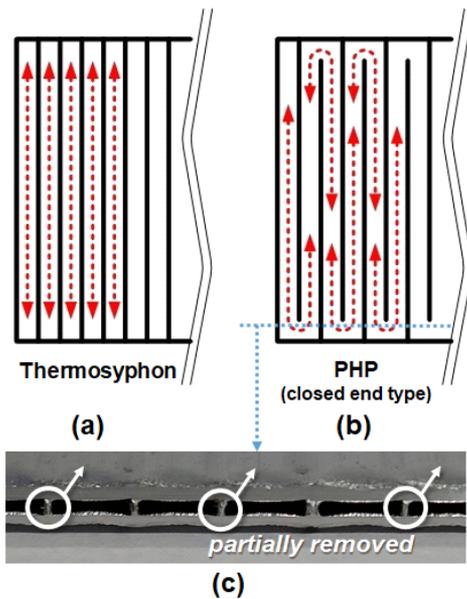
본 연구에서 사용된 PHP는 알루미늄 압출관을 이용한 56개의 작은 직사각형 모세관(wickless)으로 구성되는 박판형 다채널 써모사이폰을 기본 구조로 한다. 제작 단계에서 다채널 써모사이폰의 유로를 형성하는 내부 격벽들의 일부를 [Fig. 1]과 같이 제거하여 closed end type의 사행 유로로 개조하고 이후 개방된 부분을 압착 마감하여 PHP로 완성하였다. 상세한 제원은 <Table 1>에 나타내었다. 작동유체로는 표면장력 및 점성이 작아 마이크로 채널에서 사용하기 적합하고 오존 파괴지수(ODP)도 '0'인 HFE-7100(Novec-7100, 3M Co.)을 사용하였다. PHP 내부 채널의 수력직경(d_h)은 0.975mm로 식 (1)과 같은 표면장력이 중력을 극복하는 모세관 임계직경($d_{cr} \leq 1.75\text{mm}$, @60°C) 조건을 만족한다(D. Bastakoti et al., 2018).

$$d_h \leq d_{cr} = 2 \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} \dots\dots\dots (1)$$

- σ : surface tension [N/m]
- g : gravitational acceleration [m/s²]
- ρ_l : liquid density [kg/m³]
- ρ_v : vapour density [kg/m³]

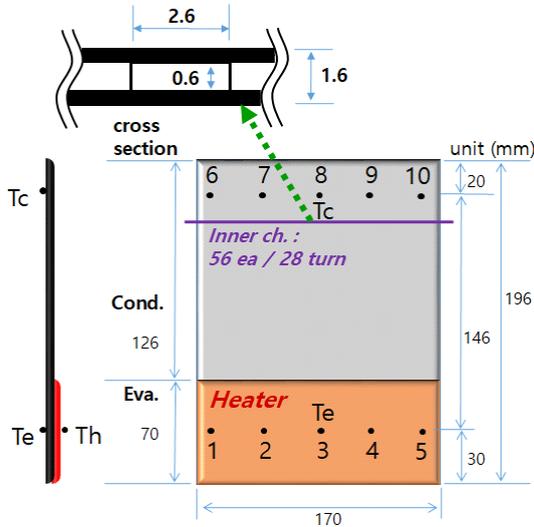
<Table 1> Specification

Material	Aluminium	
Total size (W×L×T) [mm]	170×196×1.6	
Working fluid	Novec-7100	
Filling ratio [% vol.]	20, 40, 50, 60	
Inner channel	ea. / turn	56 / 28
	Size [mm]	2.6×0.6



[Fig. 1] Comparison of internal flow path between thermosyphon and PHP.

[Fig. 2]는 PHP 시험부(test section) 개략도 및 온도 측정점을 나타낸 것이다. 가열원인 히터(170×70mm)는 그림과 같이 증발부에 부착하고 히터, 증발부 모두 단열처리 하였다.

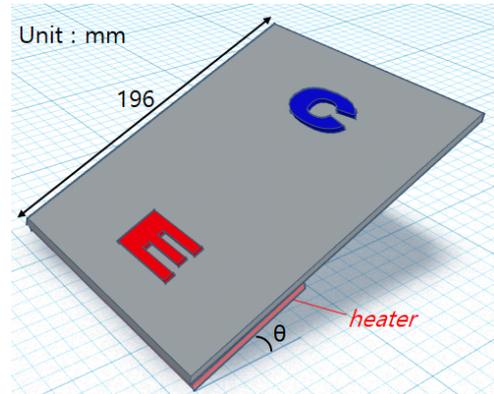


[Fig. 2] Schematic diagram of PHP.

2. 실험방법

작동유체 충전율은 20, 40, 50, 60% vol., 4가지 조건을 사용하였다. 히터 입열량은 TV 등 가전제품의 기관에서 발열면의 온도 유지 조건인 50℃ 부터 이상 과열 조건으로 가정된 120℃ 정도까지를 고려하여 해당 온도 범위에 대응하는 5~30W (열유속 : 420~2,520W/m²) 까지 5W 단위로 총 6개의 조건을 사용하였다.

[Fig. 3]은 경사각 실험장치의 개략도이다. 증발부(E)가 하단에 위치하는 하부 가열 모드로 가열원인 히터는 증발부 아랫면에 부착하였다. 선행 연구를 바탕으로 0°(수평), 5°, 10°, 30°, 60°, 90°(수직) 총 6개 경사각 조건을 사용하였다(Kim et al., 2019). 응축부(C)는 실제 사용 환경을 고려하여 20~25℃인 실내에서 자연대류 방식으로 방열되도록 하였다. 각 지점의 온도는 히터 가열 후 정상상태가 된 이후 10분간의 데이터를 평균하여 사용하였다. 열성능은 식 (2)의 유효열전도율(k_{eff})과 식 (3)의 열저항(R)을 사용하여 평가하였다(Kim and Lee, 2018).



[Fig. 3] Inclination angle(θ).

$$k_{eff} = \frac{Q \cdot L}{A_c \cdot \Delta T} \quad [W/m \cdot K] \dots\dots\dots (2)$$

Q : input heat transfer rate [W]

L : length between sensing points(eva.-cond.) [m]

A_c : cross section area(heat flow direction) [m²]

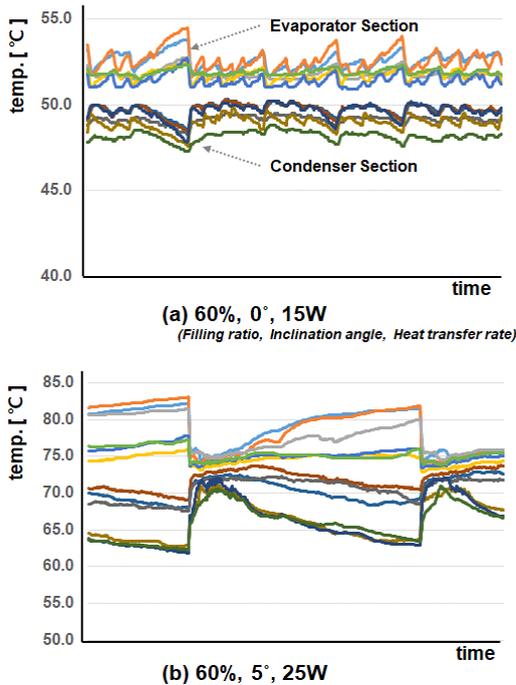
ΔT : mean temperature difference(eva.-cond.) [K]

$$R = \frac{\Delta T}{Q} \quad [K/W] \dots\dots\dots (3)$$

Ⅲ. 연구 결과

[Fig. 4]는 PHP 온도 변화 중 대표적인 것들을 나타낸 것이다. 일반적인 가열 과정에서 정상상태가 되면 온도가 거의 일정하게 유지되는데 본 연구에서 사용된 PHP에서는 주로 충전율이 크고 경사각이 작은 경우 중 일부에 한해, 충분히 가열되더라도 증발부와 응축부의 온도가 어느 정도 일정한 형태로 계속 진동하듯 변하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 온도 진동은 모든 실험 조건에서 나타나지는 않으며 충전율이 크고 경사각이 작더라도 얼마간의 진동 후 온도가 거의 일정하게 유지되는 일반적인 정상상태의 온도 변화 형태를 보이기도 한다. 온도 진동의 형태는 [Fig. 4-(a)]처럼 짧은 주기로 온도변화가 크지 않은 경

우도 있고 [Fig. 4-(b)]처럼 상대적으로 주기가 길며 온도변화도 큰 경우도 있는데 온도변화의 정도(진폭)는 입열량에 비례하여 커진다. 이때 증발부(고온)와 응축부(저온) 온도는 거의 시차(time lag) 없이 특정 온도를 기준으로 대칭되는 형태로 진동하며 진폭 및 주기가 일정하지는 않다.

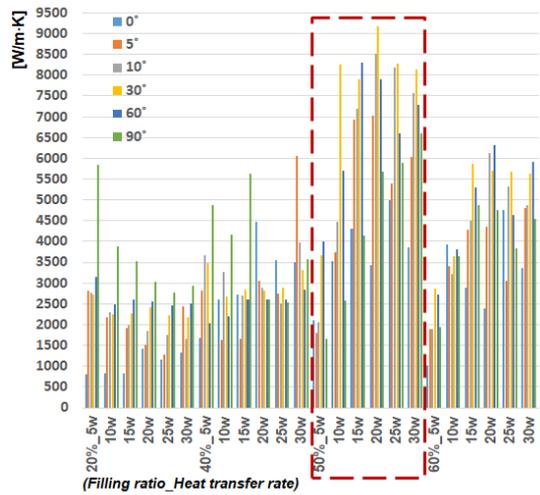


[Fig. 4] Temperature characteristics of PHP.

대칭형 진동의 윗부분(상대적 고온인 증발부 온도)을 보면 온도가 증가할 때의 기울기보다 감소할 때의 기울기 절댓값이 큰 것을 확인할 수 있는데 이것은 마이크로 채널의 PHP에서 충전율과 입열량이 크고 경사각이 크지 않을 경우, 급격한 압력상승과 강하가 발생하는 압력 진동 특성이 나타나는데(Lee, 2000) 본 실험에서도 이러한 이유로 급격한 압력변화 시점에서 순간적으로 작동유체의 액 슬러그(slug flow)가 증발부로 유입되고(증발부 온도가 급감하였다가 가열되면서 천천히 증가) 연쇄적으로 증발부의 증기 플러그(plug flow)가 빠른 속도로 응축부로 밀려나게 되

면서(응축부 온도가 급증하였다가 방열되면서 천천히 감소) [Fig. 4]와 같은 온도변화가 나타나는 것으로 사료된다.

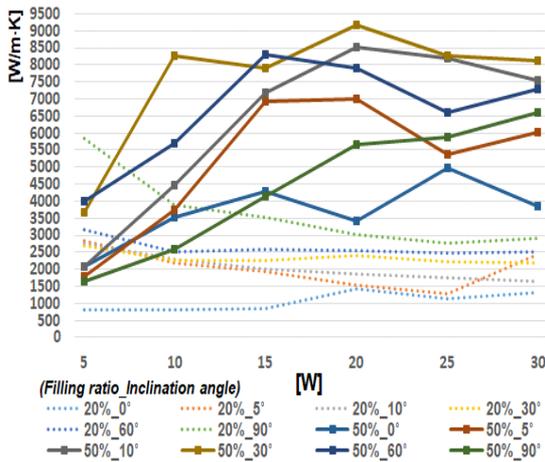
본 연구에서 사용된 PHP의 유효열전도율은 각 실험 조건들에 대해 확실한 비례 관계를 발견하기 어려울 정도로 변동이 크다. 하지만 [Fig. 5]와 같이 충전율 50%의 경우가 다른 3가지 충전율보다 전반적으로 그 값이 커서 최적 충전율은 50%임을 알 수 있다.



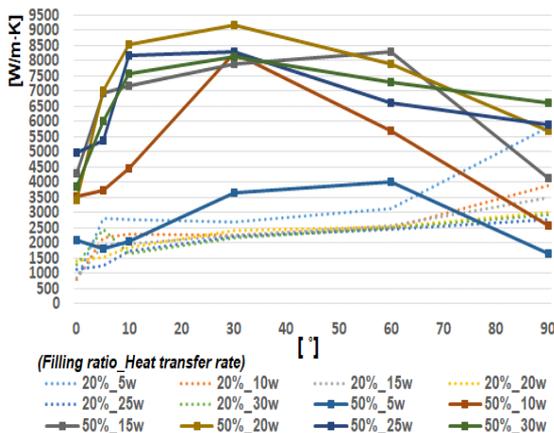
[Fig. 5] Effective thermal conductivities according to filling ratio.

[Fig. 6]은 입열량에 따른 유효열전도율 변화에 대해 대표적으로 충전율 20%와 50%의 경우를 그래프로 나타낸 것이다. 최적 충전율을 기준으로 충전율이 그 이상일 경우 입열량과 유효열전도율은 대체로 비례하지만 이하일 경우는 뚜렷한 비례 관계가 발견되지 않는다. [Fig. 7]은 경사각에 따른 유효열전도율 변화에 대해 충전율 20%와 50%의 경우를 그래프로 나타낸 것이다. 유로가 closed loop 형태가 아닌 closed end 형태라도 튜브 수가 증가하면 경사각에 영향 없이 잘 작동한다고 보고되는 것과 같이(Jun and Kim, 2016) 본 실험에서도 전반적으로 수평을 포함해 작은 경사

각에서도 유효열전도율 값이 작지 않은 특성을 보였다(충진율 50%, 입열량 5, 10W의 경우는 수평의 유효열전도율 값이 수직일 때 보다 큼). 충진율이 최적 충진율 이상일 경우 유효열전도율은 10~60°일 때가 수직일 때 보다 크고 최적 충진율 이하의 경우에는 대체적으로 수직일 때의 유효열전도율 값이 가장 큰 특징을 보인다.



[Fig. 6] Effective thermal conductivity profiles according to input heat transfer rate.

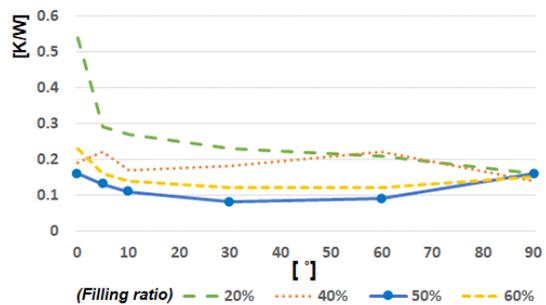


[Fig. 7] Effective thermal conductivity profiles according to inclination angle.

[Fig. 8]은 경사각에 따른 평균 열저항 변화를 충진율별로 나타낸 것으로 최적 충진율인 50%의 경우가 열저항이 가장 작다. 충진율이 작은 20%의 경우, 경사각에 따른 열저항의 변화 정도가 큰 편이고 특히 수평일 때의 열저항 값이 월등히 큰, 써모사이폰의 열저항 변화와 유사한 특징을 보인다(A. B. Solomon et al, 2015).

[Fig. 5~8]을 살펴보면 다른 PHP 관련 연구 결과들과는 달리 충진율, 입열량, 경사각에 따른 뚜렷한 경향은 찾아보기 어렵다(Lee et al., 2018).

상변화를 동반하고 복잡한 조건들이 적용되는 PHP의 성능을 평가하기 위해서는 관련된 무차원 수들을 사용한 상관식을 이용하는 것이 편리하다. PHP와 관련된 무차원수 중에서 본 실험에 적합한 것으로는 작동유체 상변화 동안 현열에 대한 잠열의 비를 나타내는 Jacob 수(Ja), 표면장력에 대한 부력의 비를 나타내고 모세관 한계 등을 설명하는데 사용되는 Bond 수(Bo), 임계열유속에 대한 열유속의 비를 나타내는 Kutateladze 수(Ku)를 꼽을 수 있고 다음 수식들과 같이 정리할 수 있다(S. Rittidech et. al., 2003). 무차원수 계산에 사용된 물성치는 증발부와 응축부의 중간온도를 기준으로 계산하였다(M. H. Rausch et al. 2015).



[Fig. 8] Mean thermal resistance profiles according to inclination angle.

$$Ja = \frac{h_{lv}}{c_{p,l}\Delta T} \dots\dots\dots (3)$$

$c_{p,l}$: specific heat of liquid [J/kg·K]

$$Bo = \frac{g(\rho_l - \rho_v)d_h^2}{\sigma} \dots\dots\dots (4)$$

d_h : hydraulic diameter [m]

$$Ku = \frac{q}{h_{lv}\rho_v^{0.5}[\sigma g(\rho_l - \rho_v)]^{0.25}} \dots\dots\dots (5)$$

q : heat flux [W/m²]

h_{lv} : heat of evaporation [J/kg]

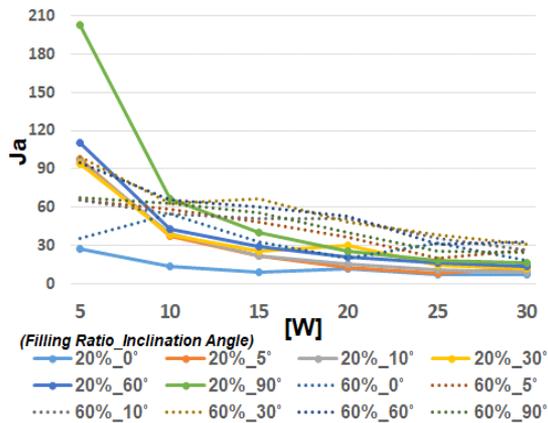
σ : surface tension [N/m]

g : gravitational acceleration [m/s²]

ρ_l : liquid density [kg/m³]

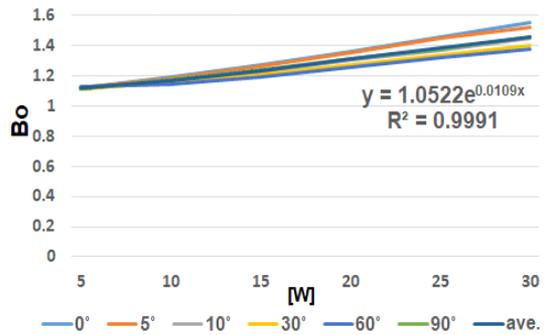
ρ_v : vapour density [kg/m³]

먼저 작동유체의 비등과 관련된 Ja 수에 대해 살펴보면 다음과 같다. [Fig. 9]는 대표적으로 충전율 20%, 60%의 경우, 입열량에 따른 Ja 수의 변화를 나타낸 것이다. 입열량 증가에 따라 ΔT 도 증가하기 때문에 Ja 수는 점점 감소하는 형태를 나타낸다. 그러나 본 연구에서는 Ja 수도 유효 열전도율, 열저항의 경우처럼 충전율, 입열량, 경사각 변화에 대해 공통적으로 수식화할 수 있을 정도로 뚜렷한 패턴을 보이지 않기 때문에 상관식과 같이 정량적인 열성능 평가에 이용하기 곤란하다.



[Fig. 9] Ja no. according to input heat transfer rate.

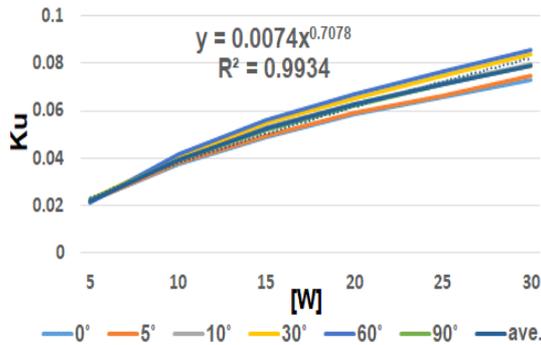
Bo 수는 작동유체의 표면장력과 비등으로 발생한 기포의 부력 사이의 관계를 설명하는 무차원수로 본 연구의 PHP와 같은 모세관 구조에서는 더욱 중요한 의미를 갖는다. [Fig. 10]은 충전율 50%에 대해 입열량에 따른 Bo 수의 변화를 나타낸 것으로 그래프의 형태는 모든 충전율에서 동일하게 나타난다. Bo 수는 입열량에 대해 거의 선형적으로 비례하고 경사각에 따른 변화도 작기 때문에 각 경사각에 따른 값들을 평균하여도 그 편차가 작다. 이 평균값은 그래프와 같이 높은 결정계수(R²) 값을 갖는 자연상수의 지수(입열량에 비례)형태로 표현할 수 있다. 이러한 지수식의 상수와 지수 값은 충전율에 따라 조금씩 차이가 나지만 모두 R²=0.99 이상인 형태로 표현된다.



[Fig. 10] Bo no. according to input heat transfer rate.

열유속과 선형관계인 Ku 수는 다른 무차원수나 무차원화 된 PHP 형상 관련 값들의 함수 형태인 열유속 예측 상관식을 만드는 방식으로 이용되는 중요한 무차원수이다(T. Katpradit et al., 2005). [Fig. 11]은 최적 충전율인 50%에 대해 입열량에 따른 Ku 수의 변화를 나타낸 것으로 그래프 경향은 Bo 수의 경우처럼 모든 충전율에서 거의 동일하게 나타난다. Ku 수는 입열량에 대해 지수 형태로 비례하고 경사각에 따른 변화도 Bo 수의 경우와 마찬가지로 작기 때문에 각 경사각에 따른 값들을 평균하여도 그 편차가 작다. 이 평균값은 그래프와 같이 높은 결정 계수 값을 갖

는 지수형태로 표현할 수 있다. 지수식의 상수와 지수 값은 Bo 수의 경우처럼 충전율에 따라 다르지만 모두 R²=0.99 이상인 형태로 표현된다.



[Fig. 11] Ku no. according to input heat transfer rate.

이상의 입열량과 Bo, Ku 수에 대한 그래프 분석 방법을 통해 Ku 수는 다음과 같이 간단히 Bo 수의 함수로 정리할 수 있다.

$$Ku = 0.023 \left(\frac{\ln Bo - C_1}{C_2} \right)^{0.7} \dots\dots\dots (7)$$

C₁, C₂는 충전율에 따른 상수 값으로 <Table 2>와 같이 정리할 수 있다.

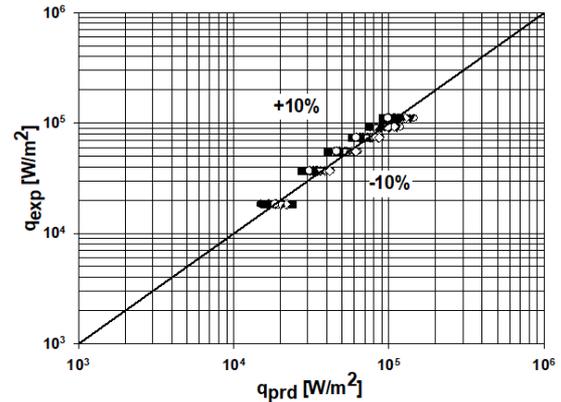
이 상관식과 Ku 수의 정의를 이용하여 예상 열유속(q_{prd}) 상관식은 식 (8)과 같이 정리할 수 있다.

$$q_{prd} = 0.023 \times h_{lv} \rho_v^{0.5} [\sigma g (\rho_l - \rho_v)]^{0.25} \dots\dots\dots (8) \\ \times \left(\frac{\ln Bo - C_1}{C_2} \right)^{0.7}$$

계산된 예측 값(q_{prd}) 값과 실제 입열량의 열유속(q_{exp})을 비교해보면 오차는 [Fig. 12]와 같이 평균 10% 이내, 최대 30% 이내로 일치하였다.

<Table 2> Constants according to Filling ratio

F.R.	20	40	50	60
C ₁	0.05012	0.05231	0.05088	0.04516
C ₂	0.0620	0.0535	0.0545	0.0545



[Fig. 12] Comparison of experimental heat flux and predicted heat flux.

IV. 결론

박판형 closed end PHP에 관한 열성능 실험에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 최적 충전율은 50% vol.으로 다른 충전율에 비해 유효열전도율, 열저항 성능이 우수하였다.
2. 충전율이 크고 경사각이 작은 경우들 중 일부에서 충분히 가열되더라도 증발부와 응축부 온도가 특정 온도를 기준으로 대칭되는 형태로 시차 없이 진동하는 온도 진동이 나타났다.
3. 열성능 지표인 유효열전도율과 열저항은 입열량, 충전율, 경사각에 따른 뚜렷한 경향성은 보이지 않았으나 작은 경사각(0°, 5°)에서도 작동하는 특성을 확인할 수 있었다.
4. 입열량에 따른 Bo, Ku 수 그래프 분석을 통해 열유속 예측 상관식을 제안하였으며 예측 값과 실제 입력 열유속 값은 오차 평균 10% 이내로 일치하였다.

References

- AB Solomon, R Roshan, W Vincent, VK Karthikeyan and LG Asirvatham(2015). Heat Transfer Performance of an Anodized Two-Phase Closed Thermosyphon with Refrigerant as Working Fluid, *International J. Heat and Mass Transfer.* 82, 521~529
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.11.034>
- Chi RG, Chung WS and Rhi SH(2018). Thermal Characteristics of an Oscillating Heat Pipe Cooling System for Electric Vehicle Li-Ion Batteries, *Energies* 2018, 11, issue. 3, 655
<https://doi.org/10.3390/en11030655>
- D Bastakoti, H Zhang, D Li, W Cai and F Li(2018). An overview on the developing trend of pulsating heat pipe and its performance, *Applied Thermal Engineering.* 141, 305~332
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.05.121>
- G Wang, Z Quan, Y Zhao, H Wang(2019). Performance of a Flat-Plate Micro Heat Pipe at Different Filling Ratios and Working Fluids, *Applied Thermal Engineering.* 146, 459~468
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.014>
- Jeong KT, Kum JS and Kim DG(2019). A Study on the Application of Heat Pipe to Improve the Dehumidification Performance of the Cooling Dehumidifier, *JFMSE.* 31(2), 524~530
<https://doi.org/10.13000/JFMSE.2019.4.31.2.524>
- Jun SH and Kim SJ(2016). Comparison of the thermal performances and flow characteristics between closed-loop and closed-end micro pulsating heat pipes, *International J. Heat and Mass Transfer.* 95, 890~901
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.12.064>
- Kim JS and Lee JY(2018). Thermal Performance and Pressure Oscillation of Foldable Bubble Jet Loop Heat Pipe according to Folding Angle, *JFMSE.* 30(1), 199~205
<https://doi.org/10.13000/JFMSE.2018.02.30.1.199>
- Kim MS, Kwon YH and Kim JS(2019). An Experimental Study on the Thermal Performance of Partially Inclined Multi-Channel Flat Plate Thermosyphon, 2019 SAREK Summer Annual Conference, 438~441
- Lee JS, Joo YH and Kim SJ(2018). Effects of the number of turns and the inclination angle on the operating limit of micro pulsating heat pipes, *International J. Heat and Mass Transfer.* 124, 1172~1180
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.054>
- Lee JS and Kim SJ(2017). Effect of channel geometry on the operating limit of micro pulsating heat pipes, *International J. Heat and Mass Transfer.* 107, 204~212
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.036>
- Lee WH(2000). Study on heat transfer and flow characteristics of oscillating capillary tube heat pipe, Unpublished doctoral dissertation, Pukyong National Univ., 81~85
- MH Rausch, L Kretschmer, S Will, A Leipertz and AP Froba(2015). Density, Surface Tension, and Kinematic Viscosity of Hydrofluoroethers HFE-7000, HFE-7100, HFE-7200, HFE-7300, and HFE-7500, *J. Chemical & Engineering. Data,* 3759~3765
<https://doi.org/10.1021/acs.jced.5b00691>
- S Rittidech, P Terdtoon, M Murakami, P Kamonpet and W Jompakdee(2003). Correlation to predict heat transfer characteristics of a closed-end oscillating heat pipe at normal operating condition, *Applied Thermal Engineering* 23, Issue 4, 497~510
[https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00215-6](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00215-6)
- T Katpradit, T Wongratanaphisan, P Terdtoon, P Kamonpet, A Polchai and A Akbarzadeh(2005). Correlation to predict heat transfer characteristics of a closed end oscillating heat pipe at critical state, *Applied Thermal Engineering.* 25, 2138~2151
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.01.009>
- Y Zhang and A Faghri(2008). Advances and Unsolved Issue in Pulsating Heat Pipes, *Heat Transfer Engineering,* 29, Issue 1, 20~44
<https://doi.org/10.1080/01457630701677114>

-
- Received : 14 January, 2020
 - Revised : 23 January, 2020
 - Accepted : 03 February, 2020