

다양한 작동유체로 충전된 폐쇄 루프 맥동 히트파이프 내부 유동패턴 비교

강석구*, 김성근*, 히발 아흐메드*, 정성용†

A comparative study on the flow patterns in closed loop pulsating heat pipe charged with various working fluids

Seok Gu Kang*, Seong Keun Kim*, Hibal Ahmad* and Sung Yong Jung†

Abstract Thermal performance and flow patterns inside the closed loop pulsating heat pipe (CLPHP) were experimentally investigated. For investigating the effect of working fluids, CLPHP was filled with various working fluids including methanol, acetone and ethanol. The thermal resistance was calculated by temperatures in evaporator and condenser and flow patterns were visualized by a digital camera. The thermal resistances for all fluids were decreased as the heat increases. Flow patterns change from static slug to elongated slug flows, bulk circulation and annular flows as the heat increases. Dry-out occurs after annular flows. For reasonable comparison of thermal performances, normalized CHF, Kutateladze number (K_u), was compared. Even though ethanol has smallest CHF, K_u of ethanol is similar with that of methanol. In addition, acetone has the highest K_u that means CLPHP with acetone provides the higher thermal performance compared with CLPHP with other fluids.

Key Words : Pulsating heat pipe (맥동 히트파이프), Flow pattern (유동패턴), Working fluid (작동유체), Critical heat flux (임계열유속)

1. 서론

다양한 분야에서 시스템의 소형화와 동시에 성능 및 신뢰성 향상의 요구가 높아짐에 따라서 새로운 열 관리 기술을 필요로 한다. Akachi et al. 등에 의해 1990 년에 도입된 맥동 히트파이프

(pulsating heat pipe, PHP) 장치는 이러한 열 문제에 대한 효과적인 해결책으로 큰 관심을 받고 있다^[1]. PHP에는 폐순환 PHP (CLPHP), 개순환 PHP 및 추가 밸브를 적용한 개순환 PHP 등이 있다. 기존의 히트 파이프와 비교할 때 CLPHP는 wick이 없는 구조로 이상 유동을 이용하는 수동 열전달 장치로 그 성능이 우수하다고 알려져 있다^[2-5]. CLPHP는 전자 장치, 우주 기술 및 열 교환기 등과 같은 광범위한 분야에서 응용되고 있다^[6-9]. 장치 크기, 경사각 및 충전율과 같은 다양한 인자들이 CLPHP의 열 성능에 미

† Department of Mechanical Engineering,
Chosun University
E-mail: syjung@chosun.ac.kr

* Department of Mechanical Engineering,
Chosun University

치는 영향에 대한 연구가 다양하게 이루어 지고 있지만 [10-12], CLPHP의 최적화를 위해서는 아직 까지 더 많은 연구가 필요하다.

최근에는 CLPHP에 대한 이해를 높이기 위하여 CLPHP 내부 유동 특성에 대한 연구가 수행되고 있다[13-18]. CLPHP의 내부 유동 패턴은 초기에 주입된 작동유체의 표면장력에 의하여 기체 플러그 (vapor plug, VP)와 액체 슬러그 (liquid slug, LS)가 분포하며 일정 이상의 열을 가하면 증발부와 응축부에서 발생하는 압력차이로 인하여 내부 유동이 발생하고, 입력 열이 더욱 증가하면 유동은 환상류(annular flow)로 바뀐다. 이러한 내부 유동 패턴은 증발기 부분에서 응축기 부분으로의 열 전달 속도와 함께 전체 열 전달 성능을 변화시키는 실질적인 요인으로, CLPHP의 유동 패턴은 실험 조건과 다양한 변수에 직접적으로 영향을 받는다. 최근 다양한 연구들이 CLPHP의 열전달 성능과 유동 패턴의 연관성을 이해하기 위하여 수행되고 있다[19-21]. 하지만 CLPHP의 상용화를 위해서는 CLPHP에 대한 이해와 연구가 충분하지 않다.

CLPHP의 열전달 성능 및 내부 유동은 채널 크기, 채널 수, 냉각 장치 등 다양한 요인에 영향을 받으며, 특히 사용되는 작동유체의 종류와 밀접한 관련이 있다. 따라서 CLPHP를 이용한 열전달 성능을 높이기 위해서는 작동유체에 따른 열전달 성능 및 유동 변화를 이해하여야 한다.

본 연구에서는 CLPHP 내부 작동유체로 에탄올, 메탄올, 아세톤을 사용하고, 작동유체 변화에 따른 열저항 및 유동 패턴의 변화를 실험적으로 확인하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험 장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 실험 장치 구성도를 나타낸다. 봉산염 유리를 이용하여 두 개의 관으로 구성된 CLPHP를 제작하였다. 진공 펌프를 사용하여(Rocker-300, AC110V, 60Hz) CLPHP내부를 진공 상태로 만든 후 작동유체를 CLPHP

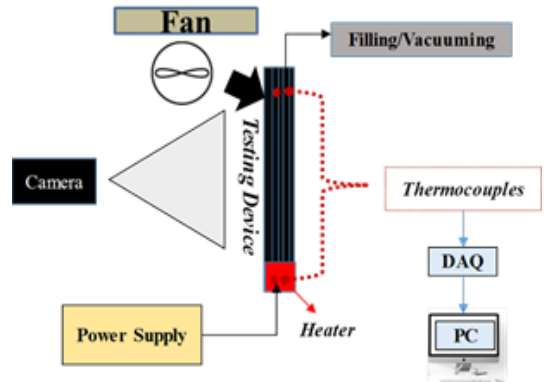


Fig. 1. Experimental set-up

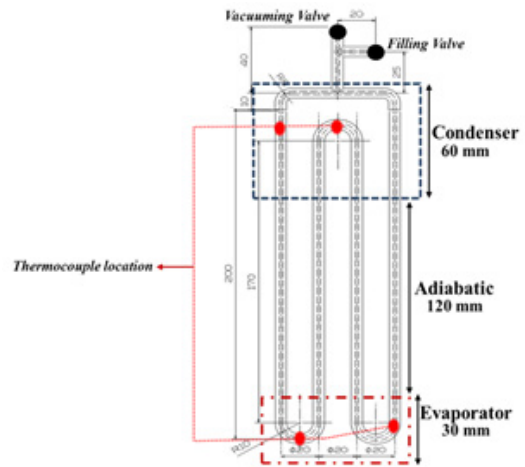


Fig. 2. Dimension of CLPHP tested in this study

로 주입하였으며, 작동유체로는 에탄올, 메탄올, 아세톤을 사용하여 실험을 진행하였다. 작동유체가 들어있는 CLPHP에 열을 가하기 위해 증발기 부분에 30 mm길이의 니크롬 와이어를 감아 주고 전원공급기 (Toyotech TDP-3020B, 30V-20A)를 사용해 니크롬 와이어에 전원을 연결하여 증발기에 열을 공급하고 전원공급기의 전압을 변화시켜 공급되는 열을 제어하였다. K형 열전대 (정확도 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5\%$)를 이용하여 증발부와 응축부의 온도를 측정하고 DAQ(NI-cDAQ-9171)와 컴퓨터를 연결하여 측정된 온도를 LABVIEW를 통해 데이터로 산출하였다. 각 실험 조건에서의 특징적인 유동패턴 변화는 디지털 카메라를 이용하여 관찰하였다.

Fig. 2는 본 연구에서 사용된 유리관으로 제작된 CLPHP의 개략도를 보여주고 있다. CLPHP는 증발부가 하단, 응축부가 상단에 위치한 수직상태로 설치되어 있다. 전체 길이는 210mm 이고 증발기 부분의 길이는 30mm 이고, 응축부 길이는 60 mm 이다. CLPHP에서 튜브의 내경은 아래 식(1)의 bond number를 이용하여 선정하였다.

$$B_o = \frac{g(\rho_l - \rho_g)}{\sigma} D_i^2 \quad (1)$$

여기서 σ 는 작동 유체의 표면장력, g 는 중력 가속도, ρ_l 와 ρ_g 는 각각 액체와 기체의 밀도를 나타낸다. 유체 주입 시 LS와 VP가 분리되어 분포할 수 있는 bond number가 2보다 작은 조건을 만족하는 2 mm로 내경을 선정하였다. 외경은 유리관의 파손 등을 고려하여 6 mm로 제작하였다.

2.2 실험 과정

장치들을 연결하고 진공 펌프를 사용하여 CLPHP 내부를 5 kpa의 진공 상태로 만들어 준 후 CLPHP 내부 전체 부피의 50% 양의 작동 유체를 주입한다. 전원 공급기를 작동시켜 전원을 공급하고 전원 공급기에 표시되는 전압 값(V)과 전류 값(I)으로부터 아래 식(2)을 이용하여 공급되는 열의 양(Q_m)을 계산한다.

$$Q_{in} = V \times I \quad (2)$$

열전달 성능 측정을 위하여 Q_m 이 설정한 값과 같도록 전원 공급기를 조절한 후 증발기와 응축기의 온도 데이터를 측정한다. 측정된 온도 데이터와 Q_m 으로부터 아래 식(3)을 이용하여 열적 저항(R_{th})을 계산한다.

$$R_{th} = \frac{T_{evap} - T_{cond}}{Q_{in}} \quad (3)$$

여기서 T_{evap} 와 T_{cond} 는 각각 증발기와 응축기 온도이다. Q_m 을 10에서 50 W까지 변화시키며 R_{th} 를 측정하고 CLPHP 내부의 유동 특성은 디지털 카메라를 이용하여 가시화 한다. 작동 유체를 변경하여 이 과정을 반복한다.

3. 실험 결과

CLPHP로 가해지는 Q_m 에 따라 CLPHP의 내부 유동과 R_{th} 및 증발기와 응축기의 온도가 변화한다. Fig. 3은 시간에 따른 증발기와 응축기 온도를 나타내고 있다. 낮은 Q_m 에서는 두 온도는 모두 Q_m 이 일정하게 공급될 때 일정한 값을 유지하며 Q_m 이 증가하면 증발기 온도가 상승하는

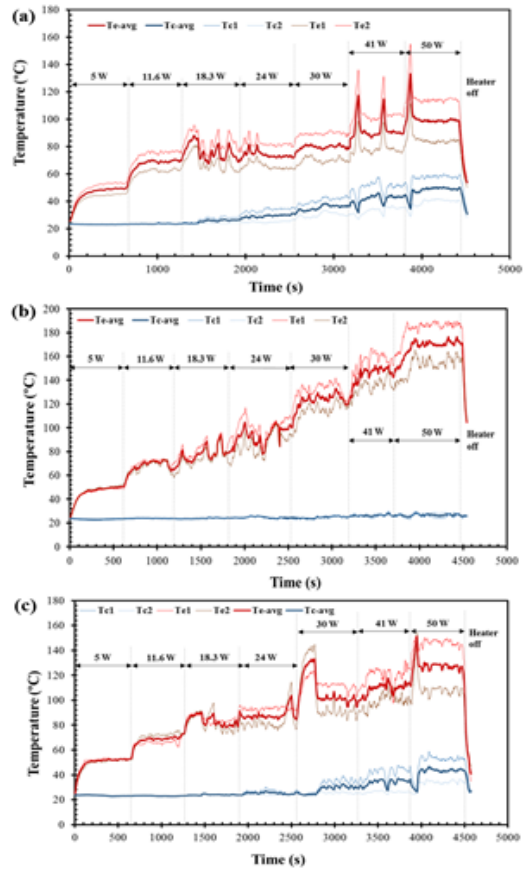


Fig. 3. Variations of temperatures in evaporator and condenser sections for (a) acetone, (b) ethanol and (c) methanol

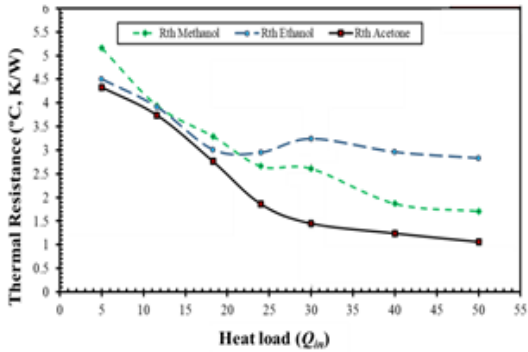


Fig. 4. Comparison of the thermal resistance

것을 볼 수 있다. 낮은 Q_m 조건에서 일부 기포의 크기 변화가 관찰이 되지만 유동이 발생하지 않기 때문에 온도의 진동이 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. Q_m 을 증가시키면 CLPHP 내부에서 LS와 VP의 움직임의 발생이 관찰되며 이와 함께 증발기 온도 데이터의 진동을 확인할 수 있다. 30 W이상의 Q_m 조건에서는 CLPHP 내부에서 bulk circulation과 환상류가 발생하면서 증발기 온도 뿐만 아니라 응축기 온도도 같이 상승하고 온도 데이터의 진동이 발생한다. 다만 에탄올의 경우 다른 작동유체와 달리 bulk circulation에서 환상류로의 변화가 보다 낮은 Q_m 조건에서 발생하고 Q_m 이 41 W에서 dry-out 현상이 발생하는 임계열유속(critical heat flux, CHF)에 도달하여 응축기의 온도 증가는 없이 증발기 온도가 상대적으로 급격하게 상승한다.

측정된 온도 값으로부터 식(3)을 이용하여 계산한 R_{th} 를 Fig. 4에 나타내었다. 에탄올은 30 W에서 소폭 증가하는 경향을 보이지만, 전체적으로 세 가지 작동유체 모두 Q_m 이 증가하면 R_{th} 가 낮아지는 전형적인 CLPHP에서 나타나는 열 저항 곡선을 보인다. 아세톤이 다른 작동유체에 비하여 측정된 Q_m 조건에서 가장 낮은 R_{th} 를 보인다.

Fig. 5-7은 Q_m 증가에 의한 CLPHP 내부에서 발생하는 유동 패턴 변화를 나타낸다. 5 W Q_m 조건에서는 특별한 유동은 발생하지 않고 LS와 VP가 분리되어 분포된 패턴을 유지하면서 미세한 기포 크기의 변화가 발생한다. 정지된 유동 형태에 기인하여 Fig. 3에서와 같이 증발기 온도

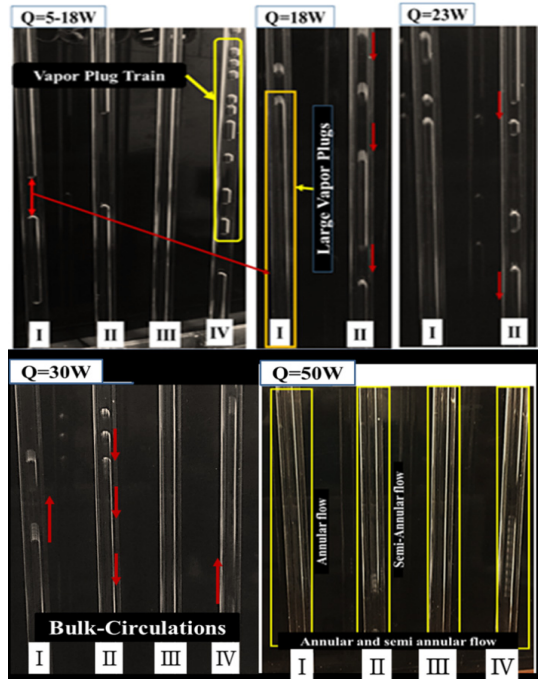


Fig. 5. Flow patterns for acetone at various Q_{in}

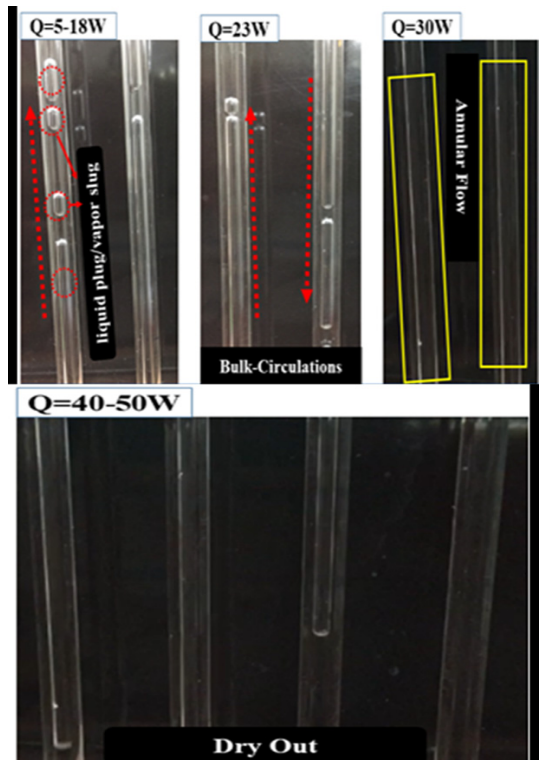


Fig. 6. Flow patterns for ethanol at various Q_{in}

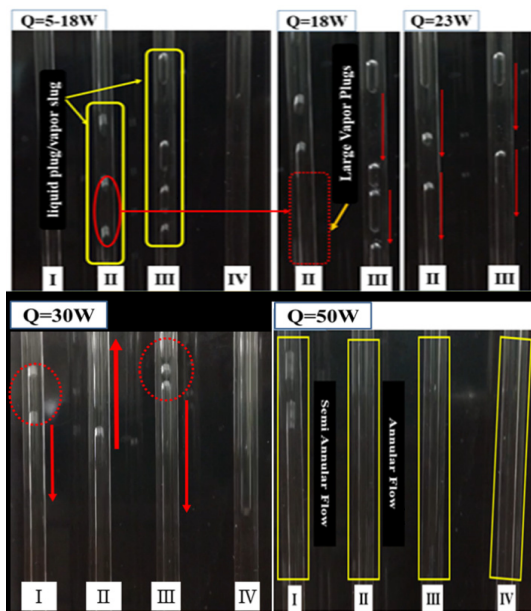


Fig. 7. Flow patterns for methanol at various Q_m

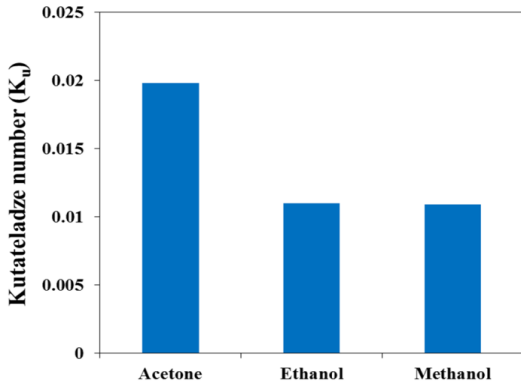


Fig. 8. Comparison of Kutateladze number (K_u)

는 증가하는 동안 응축기 온도는 유지되는 현상이 관찰된다. 일정양 이상의 Q_m 에서는 버블 크기가 증가하면서 유동을 유발하는 압력차가 발생하여 기포의 진동과 함께 내부 유동 흐름이 시작하여 채널 내에 슬러그 유동이 관찰된다. Q_m 을 더욱 증가시키면 액체상에서 VP로의 물질 전달 및 기포와 VP의 응집 등을 통하여 큰 슬러그 유동 형태가 발생한다. 아세톤과 메탄올에서는 슬러그 유동이 23 W까지 발생하고 30 W에서 bulk circulation이 관찰된다. 40 W이상의 Q_m 에서는 환상류가 발생하며 Q_m 증가에 따라 액

체 필름의 두께가 점차 줄어드는 것을 볼 수 있다. 50 W이상의 Q_m 은 CHF를 초과하여 증발기에서 dry-out현상이 발생하여 CLPHP가 정상 작동하지 않는다. 반면 Fig. 6에서와 같이 에탄올은 18 W까지 슬러그류가 유지되고 23 W에서 bulk circulation이 발생한다. 30 W에서 환상류가 형성되고 그 보다 높은 입력 열에서는 증발기에서 dry out현상이 관찰되며 Fig. 6에 보이는 바와 같이 유체의 흐름은 정지된다. Dry-out 현상으로 인하여 Fig. 3에서 보이는 바와 같이 40 W이상에서 증발기 온도가 급격하게 상승하게 된다.

Fig. 4에서 확인할 수 있는 바와 같이 CLPHP는 증발기에서 dry-out이 발생하는 Q_m 에서 최대 열 성능을 나타내며, 높은 CHF는 CLPHP의 열교환 성능이 더 뛰어나다고 할 수 있다. 그러나 다양한 변수의 영향을 받는 CLPHP에서 단순히 CHF를 비교하는 것은 바람직하지 않다. 따라서 일반적으로 서로 다른 유체나 다른 운전 조건에서 작동되는 CLPHP의 성능을 비교할 때 증발기 부에서 발생하는 CHF를 무차원화 한 식(4)로 표현되는 Kutateladze number (K_u)를 이용한다.

$$K_u = \frac{Q_c}{h_{fg}\rho_v^{0.5}[\sigma g(\rho_l - \rho_v)]^{0.25}} \quad (4)$$

여기서 Q_c 는 CHF, h_{fg} 는 잠열을 나타낸다. 유동 가시화 및 온도 측정 결과로부터 CHF를 비교하면 아세톤과 메탄올은 비슷한 CHF 값을 나타내지만 에탄올은 다른 두 유체에 비하여 낮은 CHF 값을 가진다. 하지만 CHF를 무차원화 한 K_u 값은 에탄올과 메탄올이 같은 값을 가지고 아세톤은 다른 두 유체에 비하여 180 %이상 높은 값을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 따라서 메탄올과 에탄올을 작동유체로 사용하면 CLPHP의 최대 성능이 비슷하지만 아세톤을 작동유체로 사용하면 다른 두 유체에 비하여 높은 최대 열교환 성능을 가질 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 아세톤, 메탄올, 에탄올로 충전

된 CLPHP의 열 저항 및 내부 유동을 비교하였다. Q_m 을 변화시키며 증발기와 응축기의 온도를 측정하고 R_{th} 를 계산하여 열전달 성능을 확인하였다. 세 가지 작동 유체 모두 Q_m 이 증가할 때 R_{th} 가 감소하는 경향을 나타내었으며, 아세톤, 메탄올, 에탄올 순서로 실험한 입력 열 범위에서 낮은 R_{th} 를 갖는 것을 확인하였다. Q_m 이 증가함에 따라서 유동은 슬러그류에서 bulk circulation, 환상류로 변화하고 CHF 이상의 열유속에서는 증발기에서 dry-out현상이 발생하여 유동 정지가 발생하고 증발기의 온도가 급격히 상승하는 것을 볼 수 있다. 에탄올은 CHF가 다른 두 유체에 비하여 상대적으로 낮게 나타났지만, CHF를 무차원화한 Ku 값으로부터 에탄올과 메탄올을 작동유체로 사용하는 CLPHP는 비슷한 수준의 최대 열교환 성능을 보이며 아세톤은 세가지 유체 중에서 가장 높은 열교환 성능을 나타내는 것을 확인하였다.

REFERENCE

1) Akachi, F. P. H. & Stulc, P., 1996, "Pulsating heat pipes," *Proceedings of the 5th International Heat Pipe Symposium*, pp. 208-217.

2) Groll, S. K. M., 2002, "Pulsating heat pipes: a challenge and still unsolved problem in heat pipe science," *Archives of Thermodynamics*, Vol. 23, pp. 17-28.

3) Pastukhov, V. G., Maidanik, Y. F. & Vershinin, C. V., 2003, "Miniature loop heat pipes for electronics cooling," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 23, pp. 1125-1135.

4) Saha, P., Ishii, M. & Zuber, N., 1976, "An experimental investigation of the thermally induced flow oscillations in two-phase systems," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 98, pp. 616-622.

5) Zuo, Z. J., North, M. T. & Wert, K. L., 2001, "High heat flux heat pipe mechanism for cooling of electronics," *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, Vol.

24, pp. 220-225.

6) Burbán, G., Ayel, V. & Alexandre, A., 2013, "Experimental investigation of a pulsating heat pipe for hybrid vehicle applications," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 50, pp.

7) Kargar, S. A. H., Ghiasi, M. & Jahangiri, M. S., 2013, "A novel integrated solar desalination system with a pulsating heat pipe," *Desalination*, Vol. 311, pp. 206-210.

8) Mangini, D., Mamei, M. & Georgoulas, A., 2015, "A pulsating heat pipe for space applications: Ground and microgravity experiments," *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 95, pp. 53-63.

9) Yang, H., Khandekar, S. & Groll, M., 2009, "Performance characteristics of pulsating heat pipes as integral thermal spreaders," *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 48, pp. 815-824.

10) Goshayeshi, H. R., Goodarzi, M. & Safaei, M. R., 2016, "Experimental study on the effect of inclination angle on heat transfer enhancement of a ferrofluid in a closed loop oscillating heat pipe under magnetic field," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 74, pp. 265-270.

11) Xue, Z. & Qu, W., 2014, "Experimental study on effect of inclination angles to ammonia pulsating heat pipe," *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 27, pp. 1122-1127.

12) Yang, H., Khandekar, S. & Groll, M., 2008, "Operational limit of closed loop pulsating heat pipes," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, pp. 49-59.

13) Khandekar, S., Gautam, A. P. & Sharma, P. K., 2009, "Multiple quasi-steady states in a closed loop pulsating heat pipe," *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 48, pp. 535-546.

14) Lips, S., Bensalem, A. & Bertin, Y., 2010, "Experimental evidences of distinct heat transfer

- regimes in pulsating heat pipes (PHP),” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 30, pp. 900-907.
- 15) Mamei, M., Marengo, M. & Khandekar, S., 2014, “Local heat transfer measurement and thermo-fluid characterization of a pulsating heat pipe,” *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 75, pp. 140-152.
- 16) Tong, B. Y., Wong, T. N. & Ooi, K. T., 2001, “Closed-loop pulsating heat pipe,” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 21, pp. 1845-1862.
- 17) Xu, J. L., Li, Y. X. & Wong, T. N., 2005, “High speed flow visualization of a closed loop pulsating heat pipe,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 3338-3351.
- 18) Kim, Y. B., Song, H. W. & J. Sung, 2018, “Flow Behavior of Rapid Thermal Oscillation Inside an Asymmetric Micro Pulsating Heat Exchanger,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 120, pp. 923-929.
- 19) Yang, K.S., Cheng, Y.C. & Liu, M.C., 2015, “Micro pulsating heat pipes with alternate microchannel widths,” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 83, pp. 131-138.
- 20) Yoon, A. & Kim, S. J., 2017, “Characteristics of oscillating flow in a micro pulsating heat pipe: Fundamental-mode oscillation,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 109, pp. 242-253.
- 21) Yoon, A. & Kim, S. J., 2019 “Experimental and theoretical studies on oscillation frequencies of liquid slugs in micro pulsating heat pipes,” *Energy Conversion and Management*, Vol. 181, pp. 48-58.