

알루미늄 박판형 다채널 써모사이폰과 Pulsating Heat Pipe의 열성능 비교 연구

A Comparative Study on the Thermal Performance between Aluminium Thin Plate Multi Channel Thermosyphon and Pulsating Heat Pipe

권용하* · 김종수* · 김정훈***

Yong-Ha Kwon*, Jong-Soo Kim* and Jeong-Hun Kim***

(Received 02 February 2020, Revision received 17 March 2020, Accepted 18 March 2020)

Abstract : Thin plate multi channel heat pipes with low production cost and good thermal performance have been widely used in the industry field recently, but the relevant data are not enough. In this study, we fabricated thin plate multi channel thermosyphons for home appliances and communication equipment. We modified the internal flow path of thermosyphon to pulsating heat pipe for comparison of its thermal performance. Experiments were conducted to evaluate the thermal performance and characteristics of the thermosyphon and the modified pulsating heat pipe under various filling ratios, heat transfer rates and inclination angles, assuming real condition of use, and to suggest how easy to use thermal performance data. As the results, we suggested a correlation to predict heat flux available for both thermosyphon and pulsating heat pipe with the same appearance but different internal flow path using graphical analysis for dimensionless numbers(Bo and Ku). This correlation showed mean error within 14% in thermosyphon and 10% in pulsating heat pipe.

Key Words : Thin plate multi channel, Thermosyphon, Pulsating heat pipe, Correlation

— 기 호 설 명 —

A_c : (전달 방향)단면적 [m^2]
 Bo : Bond 수($= g(\rho_l - \rho_v)d^2/\sigma$)
 c_p : 정압비열 [$J/kg \cdot K$]
 d_{cr} : 모세관 임계직경 [m]

d_h : 채널 수력직경 [m]
 h_{lv} : 증발잠열 [J/kg]
 Ja : Jacob 수($= h_{lv}/(c_{p,l}\Delta T)$)
 k_{eff} : 유효열전도율 [$W/m \cdot K$]
 Ku : Kutateladze 수
($= q_{cr}/\{h_{lv}\rho_v^{0.5}[\sigma g(\rho_l - \rho_v)^{0.25}]\}$)

*** 김정훈(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-9929-1458) : CEO, 유메니언
E-mail : kimjh109ok@daum.net , Tel : ██████████
*권용하(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-3388-9753) : 대학원 연구생, 부경대학교 냉동공조공학과
*김종수(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-7969-5081) : 교수, 부경대학교 냉동공조공학과

*** Jeong-Hun Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-9929-1458) : CEO, UMENION.
E-mail : kimjh109ok@daum.net , Tel : ██████████
*Yong-Ha Kwon(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-3388-9753) : Research student, Department of Refrigeration and Air-conditioning Engineering, Pukyong National University.
*Jong-Soo Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-7969-5081) : Professor, Department of Refrigeration and Air-conditioning Engineering, Pukyong National University.

- L : 온도 측정점 간 거리 [m]
- q_{cr} : 임계 열유속 [W/m^2]
- Q : 입열량 [W]
- R : 열저항 [K/W]
- T : 온도 [K]

그리스 문자

- ρ : 밀도 [kg/m^3]
- Θ : 경사각 [$^\circ$]
- σ : 표면장력 [N/m]

하첨자

- l : 액체
- v : 증기

1. 서 론

LED가 휴대폰, TV 등의 디스플레이 기기로부터 사용 범위가 확대되고, 모바일 기기부터 전기자동차까지 산업 전반에서 고용량 배터리에 대한 수요가 급증함에 따라 소형, 고성능 방열 시스템에 대한 수요 역시 증가하고 있다. 별도의 동력이 필요하지 않으면서도 소형화, 높은 열전달 성능 등의 특성을 갖는 히트파이프는 그 적절한 해결책으로써 다양한 방식들이 사용되고 있다.

최근의 산업 현장, 특히 가전, 통신, 배터리 등 고성능, 소형화가 요구되는 분야에서는 얇은 평판형 용기의 내부가 다수의 유로들로 분리되는 박판형 다채널 구조의 히트파이프가 많이 사용되고 있는데 이러한 제품들과 관련 연구 자료의 대부분은 유로 내부에 별도의 홈(groove), 워(wick)를 가공, 삽입한 히트파이프에 관한 것들이다.¹⁾ 이에 반해 홈, 워 없이 단순 사각형 내부 유로들로 구성된 제조 공정 단순화를 통한 제작의 용이성 확보, 생산비 절감이 가능한 써모사이폰 형태의 박판형 다채널 구조의 제품들도 많이 생산되고 있지만 이러한 써모사이폰에 대한 연구들 대부분은 1개의 긴 원형관 형태에 대한 것이거나 복수의 원

형관을 연결한 loop 형태에 관한 것으로²⁾ 각각의 채널이 분리된 박판형 다채널 써모사이폰에 대한 참고 자료는 찾기 어려운 상황이다.

써모사이폰과 같이 워(wick)이 없는 간단한 구조에 높은 열전달 성능을 갖는 Pulsating Heat Pipe (이하 PHP)는 모세관을 이용한 소형 시스템에서 많이 연구, 이용되고 있다. 그러나 사행(serpentine) 유로의 제작 공정이 단순하지 않아 결국 생산성, 경제성 측면에서 상대적으로 불리해 실제 중소형 가전 등의 방열 시스템은 제작이 용이한 다른 종류의 히트파이프로 많이 생산되고 있다. 하지만 PHP는 턴(turn) 수가 증가하면 경사각의 영향이 적거나 아예 없어³⁾ 설치 조건의 제약이 적다는 장점을 갖기 때문에 모바일 기기 등 다양한 수요에 대응하기 위해서는 소형이면서 턴 수가 많은 박판형 PHP에 대한 열성능 자료가 필요하다.

본 연구에서는 가전, 통신 기기 등에서의 사용을 고려한 박판형 다채널 써모사이폰을 제작하고 이를 제작 단계에서 별도 가공해 외형은 같고 내부 유로 형태만 다른 PHP를 제작하였다. 그리고 실제 가전제품에서의 사용을 가정된 다양한 충전율, 입열량, 경사각 조건의 실험을 통해 두 가지 히트파이프의 열적 성능 및 특성에 관한 비교 자료와 사용이 용이한 열성능 상관식을 제시하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

Fig. 1은 다채널 써모사이폰과 PHP의 내부 유로 구성을 간략히 비교하여 나타낸 것이다. 실험에 사용된 박판형 다채널 써모사이폰은 얇은 알루미늄 압출관의 외형에 내부는 56개의 작은 직사각형 모세관으로 구성되는 구조이다. 이 써모사이폰을 제작 단계에서 유로를 형성하는 내부 격벽들의 일부를 Fig. 1의 (b), (c)와 같이 제거하여 유로의 양끝이 연결되지 않는 ‘closed end type’의 사행 유로가 형성되도록 개조하고 작동유체를 주입하면서 개방된 부분을 압착 마감하여 PHP로 완성하였다. 상세한 제원은 Table 1에 나타내었다.

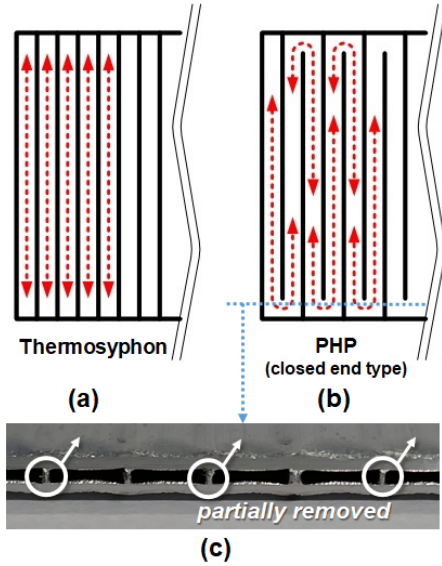


Fig. 1 Comparison of internal flow path between thermosyphon and PHP

Table 1 Specification

| | | |
|----------------------------------|------------|----------------|
| Material | | Aluminium |
| Total size(W×L×T) [mm] | | 170×196×1.6 |
| Condensation section length [mm] | | 126 |
| Working fluid | | HFE-7100 |
| Filling ratio [% vol.] | | 20, 40, 50, 60 |
| Inner channel | ea. / turn | 56 / 28 |
| | Size [mm] | 2.6×0.6 |

작동 유체로는 오존파괴지수(OPD)가 0이고 지구온난화지수(GWP)도 320으로 높지 않으며, 특히 표면장력 및 점성이 작아 마이크로 채널에서 사용하기 적합한 HFE-7100(Novec-7100, 3M Co.)을 사용하였다. 내부 채널의 수력직경은 0.975 mm로 PHP가 원활하게 작동하도록 작동유체의 표면장력이 중력을 극복하는, 식 (1)과 같은 모세관 임계직경(d_{cr}) 조건(1.75 mm 이하, @60℃)을 만족한다.^{4,5)}

Fig. 2는 사용된 써모사이폰과 PHP의 개략도 및 온도 측정점들을 나타낸 것으로 열성능 평가

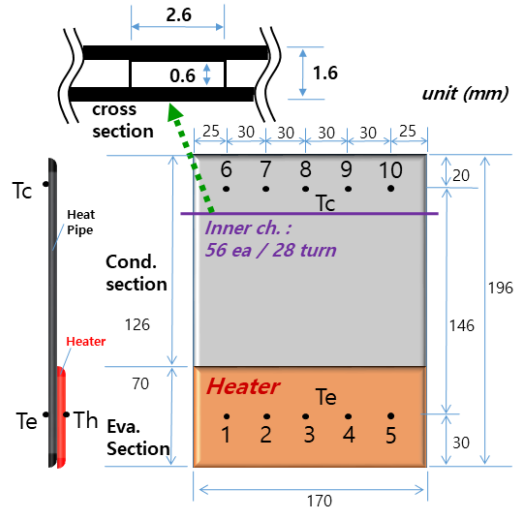


Fig. 2 Schematic diagram of test section

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

에 필요한 증발부 온도(T_e)와 응축부 온도(T_c)는 그림과 같이 각 5지점씩을 측정, 평균하여 사용하였다. 가열원인 판형 히터(170×70 mm)는 그림과 같이 증발부 해당 위치에 부착하고 이후 히터, 증발부 모두 단열 처리하였다.

2.2 실험 방법

작동유체 충전율은 20, 40, 50, 60% vol., 4가지 조건을 사용하였다. 히터 입열량은 TV 등 가전제품의 기관 발열면 온도 유지 조건인 50℃부터 이상 과열 조건으로 가정한 약 120℃ 까지를 고려하여 그에 상응하는 5~30 W(열유속 : 420~2,520 W/m²)까지 5 W 단위로 총 6개의 조건을 사용하였다. 본 연구에서 사용된 써모사이폰과 작동유체에 대해 비산 한계에 따른 한계 입열량이나⁶⁾ 풀비 등에서의 임계열유속을 구하는 고전적인 방법 등을 적용할 경우⁷⁾ 120 W(열유속 : 11,000 W/m²) 이상이 한계 입열량으로 계산되지만 개발 목적 및 제작 특성상 입열량 80~90 W 이상, 히터(=발열면) 온도 200℃ 이상에서는 내압 한계로 압착 마감된 부분이 Fig. 3과 같이 파열되기 때문에 개발 목적



Fig. 3 Ruptured thermosiphon(@90 W)

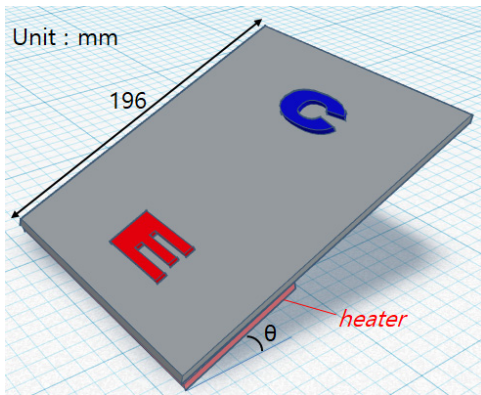


Fig. 4 Inclination angle(θ)

이상의 무리한 실험 조건을 설정하지 않았다.

Fig. 4는 경사각 실험의 개략도이다. 증발부(E)가 하단에 위치하는 하부 가열 형태로 가열원인 히터는 증발부 아래면에 부착하였다. 선행 연구를 바탕으로⁸⁾ 0, 5, 10, 30, 60, 90° 총 6개 경사각(θ) 조건을 사용하였다. 응축부(C)는 실제 사용 환경을 고려하여 20~25°C인 실내에서 자연대류 방식으로 방열되도록 하였다. 두 가지 히트파이프의 열성능은 식 (2)의 유효열전도율(k_{eff})과⁹⁾ 식 (3)의 열저항(R)¹⁰⁾을 사용하여 평가하였다. 이때 각 지점의 온도는 가열 후 히트파이프가 정상상태가 된 이후 10분간의 데이터를 평균하여 사용하였다.

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

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

이상과 같이 정량 계산 가능한 열성능 외에도 열화상 카메라(Testo 882)를 이용하여 써모사이폰과 PHP의 동작 특성을 가지적으로 비교하였다.

3. 결과

3.1 온도 특성

3.1.1 온도 변화 특성

일반적인 가열 과정의 정상상태는 온도가 거의 일정하게 유지되는 반면 본 연구에서 사용된 PHP에 관한 실험 중 일부 조건에서는 충분히 가열되더라도 증발부와 응축부의 온도가 어느 정도 일정한 형태로 계속 진동하듯 변하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 온도 진동은 충전율이 크고 경사각이 작은 경우 중에서도 일부에서만 나타나며 그 외의 경우에는 얼마간의 진동 후 온도가 거의 일정하게 유지되는 일반적인 정상상태의 온도 변화 형태를 보였다. Fig. 5는 충전율이 60%로 크고 경사각은 0°, 5°로 작은 실험 조건들 중에서 온도 진동이 나타나는 경우에 대한 그래프이다. 온도 진동의 형태는 Fig. 5-(a) 처럼 짧은 주기로 온도변화가 크지 않은 경우도 있고 (b) 처럼 상대적으로 긴 주기에 온도 변화도 큰 경우가 있다. 온도 변화의 정도(진폭)는 입열량에 비례하여 커지며 이때 증발부(고온)와 응축부(저온) 온도는 거의 시차(time lag) 없이 특정 온도를 기준으로 대칭되는 형태로 진동하는데 대략적인 패턴은 있어도 진폭, 주기가 일정하지는 않다. 상대적으로 고온인 증발부(대칭형 진동의 윗부분)를 보면 온도가 서서히 증가하다가 어느 순간 급감하고 응축부는 그 반대인 것을 확인할 수 있다. 마이크로 채널의 PHP에서 충전율과 열유속(≈입열량)이 크고 경사각이 크지 않을 경우, 급격한 압력상승과 강하가 발생하는 압력 진동 특성이 나타나는데¹¹⁾ 본 실험에서도 이러한 이유로 급격한 압력변화 시점에서 순간적으로 작동유체 액 슬러그가 응축부(저온)에서 증발부로 유입되고(증발부 온도가 급감하였다가

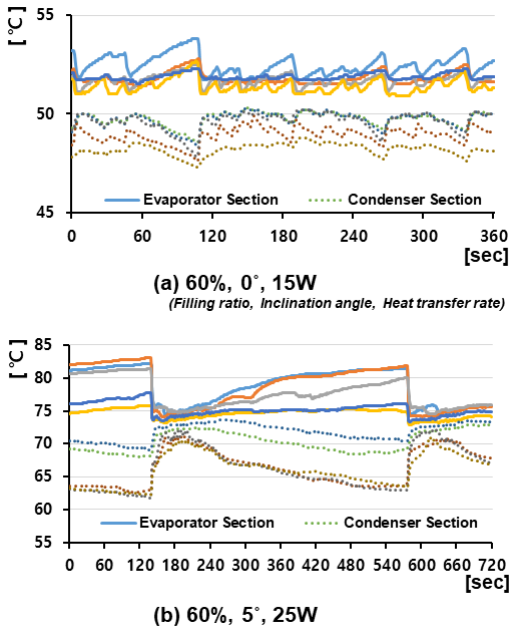


Fig. 5 Temperature characteristics of PHP

가열되면서 천천히 증가) 연속적으로 증발부(고온)의 증기 플러그가 빠른 속도로 응축부로 밀려나게 되면서(응축부 온도가 급증하였다가 방열되면서 천천히 감소) Fig. 5와 같은 온도 변화가 나타나는 것으로 사료된다.

써모사이폰에서는 Fig. 5와 같은 진동 형태의 온도 변화가 발생하지 않았다.

3.1.2 온도 분포 특성

중력은 히트파이프 작동에 있어 중요한 요소이기 때문에 결국 히트파이프의 성능은 경사각의 영향을 받는다. 수평, 즉 경사각 0°에서는 증발부로 중력에 의한 액 귀환이 되지 않아 히트파이프가 작동하지 않고 일정 경사각 이상에서 액 귀환이 어느 정도 이뤄져야 증발-응축부 사이의 기-액 순환으로 열저항이 급감하며 제대로 작동된다.

Fig. 6은 써모사이폰과 PHP의 정상상태 온도 분포들을 같은 온도 스케일로 열화상 촬영하여 비교한 것이다. (a), (b)는 충전율 20%인 써모사이폰(TS)에 관한 것이고, (c), (d)는 충전율 50%인 PHP에 관한 것이다. (a), (c)는 경사각 0°, (b), (d)

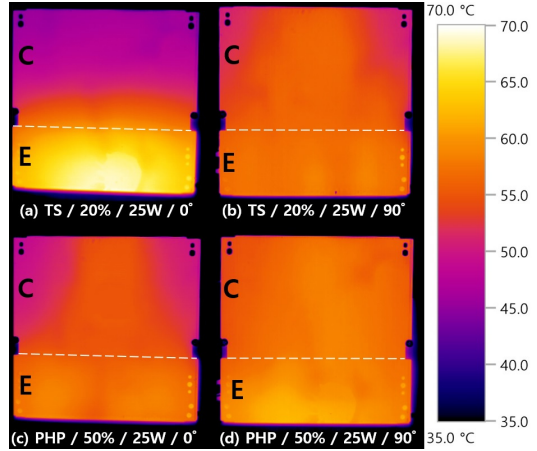


Fig. 6 Comparison of thermal images (Temperature contour maps)

는 경사각 90°이며, (a)~(d) 모두 히터 입력량은 25 W이다. 경사각 90°인 (b), (d)를 보면 증발부와 응축부 온도차가 크지 않게 고른 온도 분포를 보이고 있다. 즉 증발부에서 응축부로 열이 잘 전달돼 그 온도차가 크지 않은 것이다. 반면 경사각 0°인 경우를 보면 (c)의 PHP는 90°만큼은 아니라도 대체로 증발부(E)와 응축부(C) 온도차가 크지 않은 편인데 비해 (a)의 써모사이폰은 증발부와 응축부의 온도차가 극명하게 크다. 수평이라도 본 실험에서 사용된 PHP는 경사각의 영향을 적게 받아 응축부로 비교적 열이 잘 전달되고 써모사이폰은 열저항이 커서 응축부로 열이 잘 전달되지 않는 것을 가시적으로 보여 준다.

3.2 열성능 비교

3.2.1 유효열전도율

Fig. 7은 충전율에 따른 써모사이폰의 유효열전도율 변화를 나타낸 것이다. 충전율 20%의 경우가 다른 3가지 충전율보다 월등히 그 값이 커서 본 연구의 실험 조건에서 써모사이폰의 최적 충전율이 20%임을 확인할 수 있다. 전반적으로 입력열량이 증가할수록 유효열전도율도 증가한다. Fig. 8은 충전율에 따른 PHP의 유효열전도율 변화를 나타낸 것이다. 충전율 50%의 경우가 다른 3가지 충전율보다 대체로 그 값이 커서 본 연구에

서 사용된 PHP의 최적 충진율은 50%임을 알 수 있다. 써모사이폰과 달리 입열량과 유효열전도율 간의 일관된 비례 관계를 발견하기 어렵지만, 최적 충진율을 기준으로 충진율이 그 이상일 경우 입열량과 유효열전도율은 대체로 비례하고 그 이하일 경우는 뚜렷한 비례 관계가 발견되지 않는다. 써모사이폰의 경우 최적 충진율과 다른 충진율의 성능 차이가 큰 반면, PHP의 경우는 그 차

이가 크지 않은 편이다. 최적 충진율의 경우만을 비교하자면 써모사이폰의 유효열전도율 값이 PHP보다 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 기본적으로 슬러그류 유동 형태를 갖는 PHP의 열성능은 대류에 의한 열전달이 지배적이기 때문에 상변화 열전달이 기본인 써모사이폰보다 열성능이 좋을 수 없다는 연구 내용⁴⁾에 부합하지만, 본 연구에서 사용된 사각형 모세관의 다채널 히트파이프들의 경우에 적용시키기 위해서는 가시화 등을 통한 유동 분석이 필요할 것으로 사료된다.

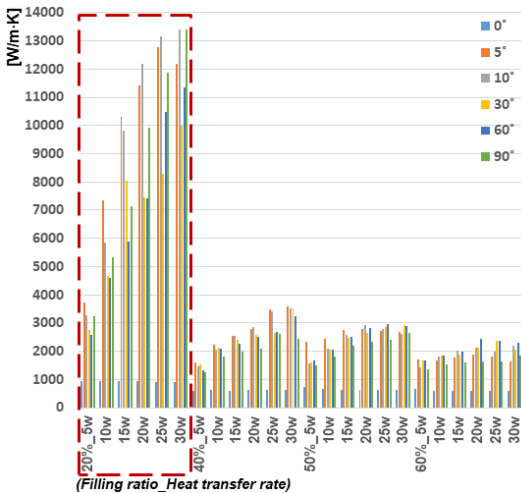


Fig. 7 Effective thermal conductivities according to filling ratio (Thermosyphon)

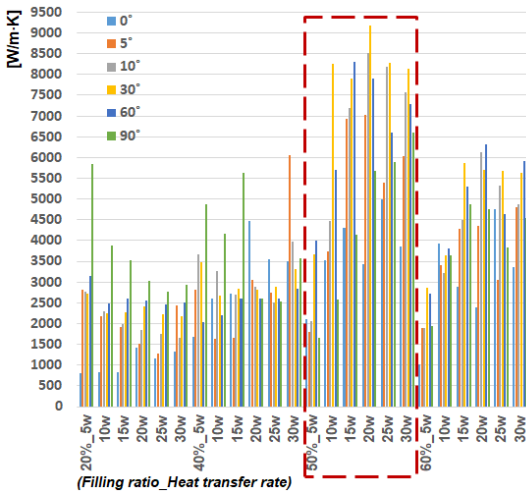


Fig. 8 Effective thermal conductivities according to filling ratio (PHP)

3.2.2 열저항

Fig. 9는 써모사이폰에서 대표적으로 충진율 20, 60%인 경우, 경사각에 따른 열저항 변화를 나타낸 것이다. 수평에서 경사각이 조금만 커져도 급격하게 열저항이 감소하고 써모사이폰이 작동하는데 이후에는 열저항의 변화가 크지 않다. 일반적으로 써모사이폰은 수직인 경우보다 그 이하의 경사각 중 일정 범위에서 열저항이 더 작은 것으로 알려져 있지만, 이러한 연구들에서 사용된 써모사이폰들은 대부분 관경 10 mm 이상인 하나의 원형관을 사용하여 충진율 50~100% 정도로 제작된 것이기 때문에¹²⁾ 본 연구에서 사용된 사각형 모세관의 다채널 써모사이폰과 직접 비교하기는 곤란하다. 그러나 Fig. 9에서 충진율이 큰 60%의 경우, 작동 이후의 변화를 보면 30~60° 정도에서 열저항이 최솟값을 갖는, 아주 완만하게 아래로 볼록한 포물선 형태를 보이고 있는 점은 기존 연구 결과들과 유사한 경향을 보인다.¹³⁾

이러한 변화는 수평에서 경사각이 증가할수록 중력에 의해 응축부로부터의 액 귀환이 원활해져 열저항이 감소하다가 경사각이 일정 각도 이상 커지면 증발부가 액이 너무 많은 flooding condition이 되어 작동유체의 pool에서 층상화(stratified)된 기액의 대류가 핵비등으로 발생한 버블의 성장과 응축부로의 이동을 방해하여 결과적으로 증발부 온도가 상승하고 열저항도 증가하기 때문이라 볼 수 있다.^{14,15)} 그러나 충진율이 작은 20%의 경우는 반대로, 작동 이후 아주 완만하게 위로 볼록한 포물선 형태로 열저항이 커졌다가 90°

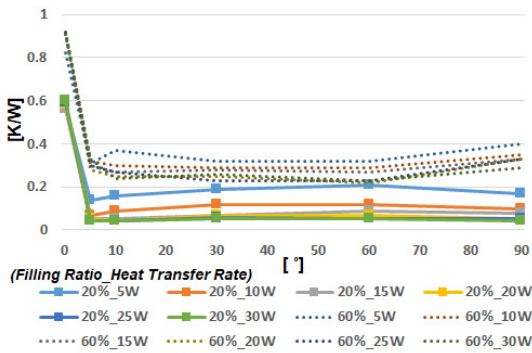


Fig. 9 Thermal resistances according to inclination angle (Thermosyphon)

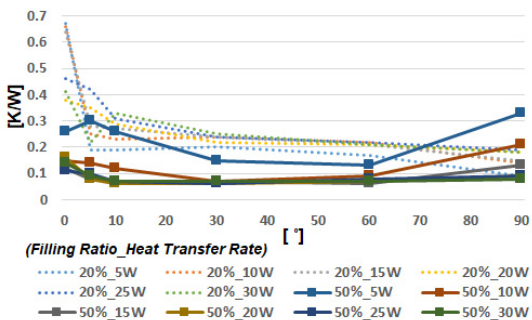


Fig. 10 Thermal resistances according to inclination angle (PHP)

부근에서 감소하는 변화를 보이고 있어 충진율이 큰 경우와 차이를 보인다. 이는 충진율이 작은 경우, 작동 이후 낮은 경사각에서는 액 귀환이 원활하지 않아 열저항이 증가하다가 일정 경사각 이상이 되면 중력에 의한 액 귀환이 충분해지고 증발부가 flooding condition이 될 여유 없이 발생한 버블이 응축부로 원활하게 상승, 이동하여 열저항이 감소하는 것으로 볼 수 있다.

Fig. 10은 PHP에서 대표적으로 충진율 20, 50%인 경우, 경사각에 따른 열저항 변화를 나타낸 것이다. 최적 충진율인 50%의 열저항이 20%의 열저항 보다 대체로 작지만 경사각이 큰 구간에서는 20%의 열저항이 더 작은 경우도 있다. 충진율이 작은 20%의 경우, 수평에서 열저항이 월등히 크고 경사각이 조금만 커져도 급격하게 감소하는 써모사이폰과 유사한 특징을 보인다. 최적 충진율

인 50%의 경우 20%와는 다르게 수평에서도 열저항이 다른 경사각들의 열저항과 확연하게 큰 차이를 보이진 않는다. PHP에서 턴 수가 많으면 시스템의 자유도(degrees of freedom)도 증가하여 유로를 따라 작동 유체의 공진(resonance)이 빈번히 발생하는데 본 연구의 PHP(turn : 28)에서도 이러한 공진에 의해 경사각에 관계없이 액 슬러그가 크게 진동하면서 증발부로 충분히 공급되므로 수평에서도 작동되는 것이다.¹⁶⁾ 그리고 대체로 수평, 수직에서 열저항이 큰, 아래로 볼록한 포물선 형태의 변화를 보이고 있어 전술한 충진율이 큰 써모사이폰의 작동 이후 열저항 변화와 유사한 형태를 나타낸다. 충진율이 작은 20%의 경우는 써모사이폰과 같이 수직에서 열저항이 감소하는 변화를 나타내어 상대적으로 액 슬러그의 진동보다 중력의 영향을 크게 받는 것으로 사료된다.

3.3 무차원수 분석

3.3.1 상관관계 분석

상변화를 동반하고 복잡한 조건들이 적용되는 히트파이프의 성능을 평가하기 위해서는 관련된 무차원수들을 이용할 필요가 있다. 특히 Fig. 7~10을 살펴보면 본 연구에서 사용된 박판형 다채널 써모사이폰과 PHP는 기존 관련 연구들과 달리 충진율, 입열량, 경사각에 따른 직관적이고 뚜렷한 경향을 찾아보기 어렵기 때문에 무차원수들의 상관관계를 통해 열유속 등을 예측하는 열성능 상관식을 구하는 것이 필요하다. 관련 무차원수들 중에서 본 연구에 적합한 것으로는 작동유체의 상변화 동안 현열에 대한 잠열의 비율을 나타내는 Jacob 수(Ja), 작동유체 표면장력과 기포 부력의 비를 나타내는 Bond 수(Bo), 입계열유속에 대한 열유속의 비를 나타내는 Kutateladze 수(Ku)를 꼽을 수 있다.¹⁷⁾ 무차원수들은 증발부와 응축부의 산술 평균온도를 기준으로 하는 물성치를 사용하여 계산하였다.¹⁸⁾

Fig. 11은 써모사이폰 실험중 대표적으로 충진율 20, 60%를 택하여 입열량에 따른 Ja 수의 변화를 나타낸 것이고 Fig. 12는 PHP에 대해 충진율 20, 60%인 경우의 입열량에 따른 Ja 수 변화를 나

타낸 것이다. Ja 수는 입열량 증가에 따라 증발-응축부 온도차도 증가하기 때문에 점점 감소하는 형태를 나타낸다. 써모사이폰의 경우, 충진율 20%의 열성능이 훨씬 우수하기 때문에 60%의 변화율과는 확실히 구분되는데 반해 PHP의 경우, 충진율에 따른 열성능 차이가 써모사이폰 만큼 크지 않기 때문에 충진율에 따른 Ja 수의 차이도 크지 않다. 단 써모사이폰은 수평에서 제대로 작동하지 않기 때문에 충진율 20%라도 수평인 경우의 Ja 수는 같은 충진율의 다른 경사각들의 Ja 수보다 훨씬 작은 값을 나타낸다.(= 온도차가 크다.) 이상의 Ja 수 변화들을 살펴보면 유효열전도율, 열저

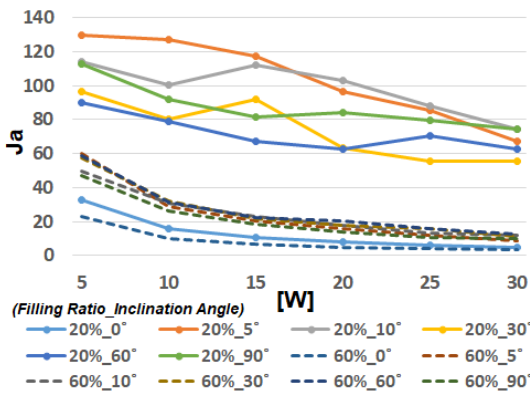


Fig. 11 Ja no. according to input heat transfer rate(Thermosyphon)

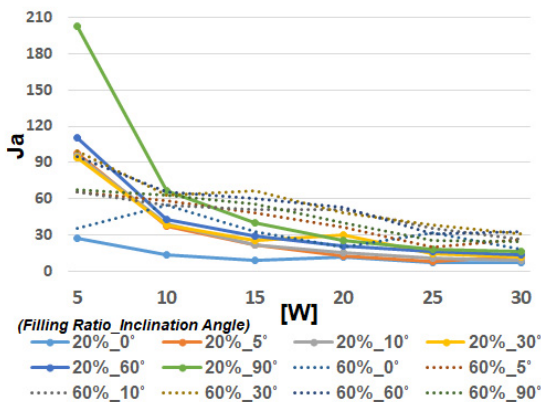


Fig. 12 Ja no. according to input heat transfer rate(PHP)

항의 경우처럼 충진율, 입열량, 경사각 변화에 대해 공통적으로 수식화할 수 있을 정도의 뚜렷한 패턴이 보이지 않기 때문에 본 연구에서는 Ja 수를 상관식과 같이 정량적인 열성능 평가에 이용하기가 곤란하다고 판단된다.

Bo 수는 모세관 구조에서 중요한 의미를 갖는데 본 연구에서 사용된 모든 실험 조건에서 PHP의 모세관 한계인 $Bo < 4$ 를 만족한다. Fig. 13은 써모사이폰에서 최적 충진율 20%의 경우에 대해 입열량에 따른 Bo 수의 변화를 나타낸 것으로 다른 충진율에서도 거의 동일한 형태로 나타난다. Bo 수는 입열량에 대해 거의 선형적으로 비례하고 경사각에 따른 차이도 매우 작기 때문에 각 경사각에 따른 값들을 평균하여도 그 편차가 거의 없다. 이 평균값은 그래프와 같이 입열량에 대해 높은 결정계수(R^2) 값을 갖는 자연 상수의 지수(입열량에 비례) 형태로 표현할 수 있다. Fig. 14는 PHP에서 최적 충진율 50%의 경우에 대해 입열량에 따른 Bo 수의 변화를 나타낸 것으로 써모사이폰의 경우와 마찬가지로 다른 충진율에서도 거의 동일한 형태로 나타난다. PHP의 경우도 Bo 수는 입열량에 대해 거의 선형적으로 비례하고 각 경사각에 따른 차이도 크지 않기 때문에 그 평균값은 그래프와 같이 높은 결정계수 값을 갖는 자연 상수의 지수식으로 표현할 수 있다.

기본적으로 열유속과 선형관계인 Ku 수는 다른 무차원수나 무차원화 된 형상관련 값들의 함수형태인 열유속 예측 상관식을 만드는데 자주 이용되는 중요한 무차원수이다.¹⁹⁾ Fig. 15는 써모사이폰의

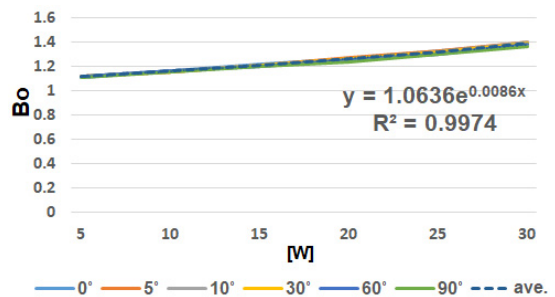


Fig. 13 Bo no. according to input heat transfer rate(Thermosyphon / 20% vol.)

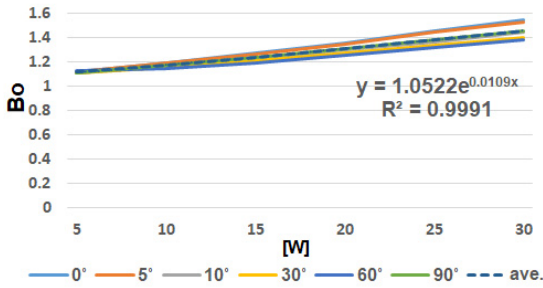


Fig. 14 Bo no. according to input heat transfer rate(PHP / 50% vol.)

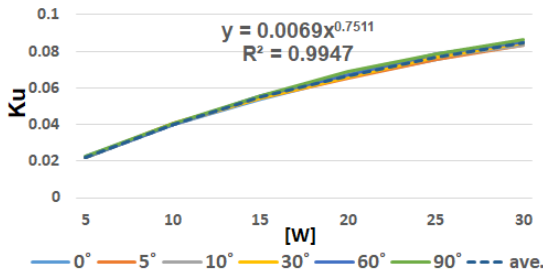


Fig. 15 Ku no. according to input heat transfer rate(Thermosyphon / 20% vol.)

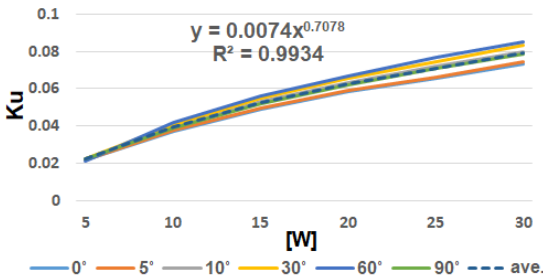


Fig. 16 Ku no. according to input heat transfer rate(PHP / 50% vol.)

최적 충전율 20%에 대해 입열량에 따른 Ku 수의 변화를 나타낸 것이다. Bo 수의 경우와 마찬가지로 모든 충전율에서 그래프의 형태가 거의 동일하게 나타난다. Fig. 16은 PHP에서 최적충진율 50%의 경우에 대해 입열량에 따른 Ku 수의 변화를 나타낸 것으로 이것 역시 모든 충전율에서 거의 동일한 형태로 나타난다. 써모사이폰과 PHP 모두 Ku 수는 입열량에 대해 지수 형태로 비례하

고 경사각에 따른 차이도 Bo 수의 경우처럼 작아 평균하여도 그 편차가 크지 않다. 이 평균값들 역시 높은 결정계수 값을 갖는 지수식으로 표현할 수 있다.

3.3.2 열유속 예측 상관식

이상과 같이 본 실험에서 사용된 써모사이폰과 PHP는 입열량에 대한 Bo, Ku 수의 비례 관계를 각각 지수식으로 표현할 수 있고, 공통된 입열량과의 관계를 통해 Ku 수는 식 (4)와 같은 Bo 수의 함수로 간단히 정리할 수 있다.

$$Ku = 0.023 \left(\frac{\ln Bo - C_1}{C_2} \right)^{0.7} \quad (4)$$

C_1 , C_2 는 충전율에 따른 상수 값으로 최적 충전율일 때의 값들을 정리하면 Table 2와 같다.

식 (4)와 Ku 수의 정의를 이용하면 써모사이폰과 PHP 모두에서 사용할 수 있는 열유속 예측 상관식을 식 (5)와 같이 정리할 수 있다.

Table 2 Constants at optimum filling ratio

| | C_1 | C_2 |
|-------------------------|---------|--------|
| Thermosyphon (20% vol.) | 0.06166 | 0.0430 |
| PHP (50% vol.) | 0.05088 | 0.0545 |

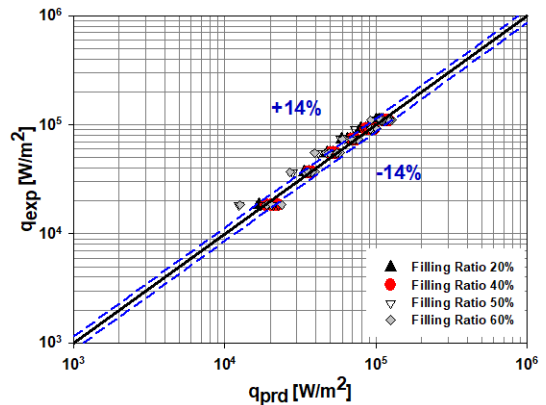


Fig. 17 Comparison of experimental heat flux and predicted heat flux(Thermosyphon)

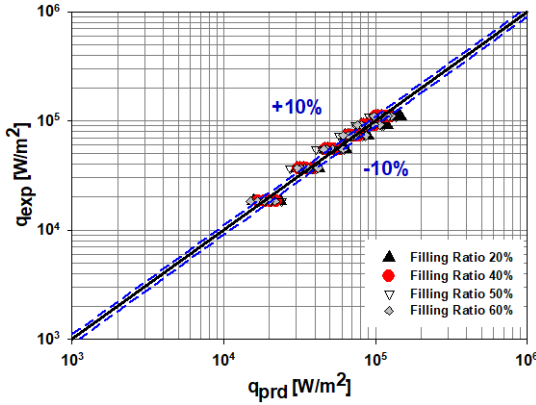


Fig. 18 Comparison of experimental heat flux and predicted heat flux(PHP)

$$q_{prd} = 0.023 \times h_{lv} \rho_v^{0.5} [\sigma g (\rho_l - \rho_v)]^{0.25} \times \left(\frac{\ln Bo - C_1}{C_2} \right)^{0.7} \quad (5)$$

이렇게 계산된 예측 값(q_{prd})과 실제 실험에서 입력한 열유속(q_{exp})을 비교하면 써모사이폰의 경우는 Fig. 17과 같이 평균 오차 14% 이내(최대 30% 이내), PHP의 경우는 Fig. 18과 같이 평균 오차 10% 이내(최대 30% 이내)로 일치하였다.

4. 결 론

박판형 다채널 써모사이폰과 PHP에 관한 열성능 비교 실험에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 박판형 PHP의 경우, 증진율이 크고 경사각이 작은 실험 조건들 중 일부에서 충분히 가열되더라도 증발부와 응축부 온도가 대칭되는 형태로 시차 없이 진동하는 온도 진동이 나타났다.

2) 써모사이폰의 최적 증진율은 20%, PHP의 최적 증진율은 50%였으며, 최적 증진율에서의 열성능(유효열전도율, 열저항)은 써모사이폰이 좀 더 우수하였다. 단 PHP의 경우, 써모사이폰과는 달리 수평에서도 열저항이 낮아 경사각의 영향을 크게 받지 않고 작동하였다.

3) 써모사이폰과 PHP 모두 입열량에 따른 무차원수(Bo, Ku)의 비례 관계가 거의 동일한 형태로 나타나 모두에게 적용 가능한 열유속 예측 상관

식을 제안하였으며, 예측 값과 실제 입력 값의 평균 오차는 써모사이폰의 경우 14%, PHP의 경우 10% 이내로 일치하였다.

Author contributions

Y. H. Kwon; Investigation, Formal analysis, Writing-original draft. J. S. Kim; Conceptualization, Project administration, Resources, Writing-review & editing. J. H. Kim; Supervision.

References

1. S. H. Moon and Y. W. Park, 2016, "Development of the Structure for Enhancing Capillary Force of the Thin Flat Heat Pipe base on Extrusion Fabrication", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineering-B, Vol. 40, No. 11, pp. 755-759. (<https://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2016.40.11.755>)
2. M. Mameli, D. Mangini, G. F. T. Vanoli, L. Araneo, S. Filipeschi and M. Marengo, 2016, "Advanced Multi-Evaporator Loop Thermosyphon", Energy, Vol. 112, pp. 562-573. (<https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.074>)
3. Y. Zhang and A. Faghri, 2008, "Advances and Unsolved Issue in Pulsating Heat Pipes", Heat Transfer Engineering, Vol. 29, Issue 1, pp. 20-44. (<https://doi.org/10.1080/01457630701677114>)
4. 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, Vol. 141, pp. 305-332. (<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.05.121>)
5. H. M. Jeong, H. S. Chung, K. S. Lee, Md. R. Tanshen, T. J. Lee and S. I. Lee, 2013, "Experimental Investigations on the Temperature Characteristics of Oscillating Heat Pipe with Various Filling Ratio", J. KSPSE, Vol. 17, No. 6, pp. 47-53.

- (<https://doi.org/10.9726/kspse.2013.17.6.047>)
6. B. H. Kim and G. P. Peterson, 1995, "Analysis of the Critical Weber number at the Onset of Liquid Entrainment in Capillary-driven Heat Pipes", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, No. 8, pp. 1427-1442.
([https://doi.org/10.1016/0017-9310\(94\)00249-u](https://doi.org/10.1016/0017-9310(94)00249-u))
 7. M. Misale, G. Guglielmini and A. Priarone, 2009, "HFE-7100 Pool Boiling Heat Transfer and Critical Heat Flux in Inclined Narrow Space", *Int. J. Refrigeration*, Vol. 32, Issue 2, pp. 235-245.
(<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2008.06.003>)
 8. M. S. Kim, Y. H. Kwon and J. S. Kim, 2019, "An Experimental Study on the Thermal Performance of Partially Inclined Muti-Channel Flat Plate Thermosyphon", 2019 SAREK Summer Annual Conference, pp. 438-441.
 9. J. S. Kim, Y. H. Kwon and J. W. Kim, 2014, "Development of High Performance Bubble Jet Loop Heat Pipe for Hot Water Floor Heating System", *J. KSPSE*, Vol. 18, No. 4, pp. 23-28.
(<http://dx.doi.org/10.9726/kspse.2014.18.4.023>)
 10. A. Faghri, 1995, "Heat Pipe Science and Technology", Taylor & Francis Ltd., Washington DC, pp. 341-400.
 11. W. H. Lee, 2000, "Study on Heat Transfer and Flow Characteristics of Oscillating Capillary Tube Heat Pipes", Ph.D Thesis, Pukyong National Univ., Busan, Korea, pp. 81-85.
 12. T. Payakaruk, P. Terdtoon and S. Rittidech, 2000, "Correlations to Predict Heat Transfer Characteristics of an Inclined Closed Two Phase Thermosyphon at Normal Operating Conditions", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 20, Issue 9, pp. 781-790.
([https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(99\)00047-2](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(99)00047-2))
 13. Japan Association for Heat Pipe, 2001, "Practical Heat Pipe", Nikkan Kogyo Shimbun, Ltd., Tokyo, Japan, pp. 29-30, 38-39.
 14. A. B. Solomon, R. Roshan, W. Vincent, V. K. Karthikeyan and L. G. Asirvatham, 2015, "Heat transfer performance of an anodized two-phase closed thermosyphon with refrigerant as working fluid", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 82, pp. 521-529.
(<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.11.034>)
 15. Y. Wu, Z. Zhang, W. Li and D. Xu, 2019, "Effect of the Inclination Angle on the Steady-State Heat Transfer Performance of a Thermosyphon", *Applied Sciences*, Vol. 9, Issue 16, 3324.
(<https://doi.org/10.3390/app9163324>)
 16. S. H. Jun and S. J. Kim, 2016, "Comparison of the Thermal Performance and Flow Characteristics between Closed-Loop and Closed-End Micro Pulsating Heat Pipes", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 95, pp. 890-901.
(<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.12.064>)
 17. 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*, Vol. 24, Issue 4, pp. 497-510.
([https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00215-6](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00215-6))
 18. M. H. Rausch, L. Kretschmer, S. Will, A. Leipertz and A. P. 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*, pp. 3759-3765.
(<https://doi.org/10.1021/acs.jced.5b00691>)
 19. 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*, Vol. 25, pp. 2138-2151.
(<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.01.009>)