

알루미늄 박판형 다채널 써모사이폰의 열성능에 관한 실험적 연구

권용하 · 김종수[†]

부경대학교(학생) · [†]부경대학교(교수)

An Experimental Study on the Thermal Performance of Aluminium Thin Plate Multi Channel Thermosyphon

Yong-Ha KWON · Jong-Soo KIM[†]

Pukyong National University(student) · [†]Pukyong National University(professor)

Abstract

Conventional researches on thermosyphons have been difficult to use in industrial fields because most of them are lab level studies under limited conditions and poor economics and practicality. This study have been conducted to evaluate the thermal performance and characteristics of aluminium thin plate multi channel thermosyphon which is widely used in real products for their excellent thermal performance and stability. This thermosyphon was tested at various charging ratios, heat transfer rates, and inclination angles to provide easy to use thermal performance data. We proposed a correlation within 14% of mean error using graphical analysis for dimensionless numbers(Bo and Ku) according to heat transfer rate.

Key words : Thermosyphon, Thin plate multi channel, Correlation

I. 서론

간단한 구조, 저렴한 생산비, 소형화, 높은 열 전달 성능 등의 특성을 갖는 히트파이프는 다양한 분야에서 사용되고 있으며, 그중 써모사이폰은 가전 및 각종 전자 부품의 방열과 기타 다양한 분야의 냉각 장치로 산업 전반에 이용되고 있다(Cho, 2014). 하지만 써모사이폰에 대한 대부분의 연구는 원론적인 부분에 대한 것이거나 제한적인 한계 상황에서 수행되는 경우가 많아 이를 산업적으로 이용하기에는 여러 가지 어려움이 있다. 이러한 기존 연구들의 대부분은 1개의 원형관 형태인 써모사이폰의 성능에 관한 것이거나

복수의 원형관을 연결한 loop 형태에 관한 것이다(M. Mameli et al., 2015). 그러나 최근의 산업 현장, 특히 가전, 통신, 배터리 등 고성능 소형화가 요구되는 분야에서는 비(非)원형의 용기(container) 내부가 다수의 유로들로 분리되는 다채널 히트파이프가 많이 사용되고 있다(SEKI HI-TECH, 2019). 하지만 이러한 제품들과 관련한 연구 자료들의 대부분은 내부에 별도의 홈(groove)이나 워(wick)를 가공, 삽입한 히트파이프에 관한 것이다(Moon and Park, 2016). 이런 히트파이프 외에 단순 사각형 내부 유로를 가진 다채널 써모사이폰 제품들도 많이 생산되고 있지만 이와 관련한 연구 자료는 상대적으로 부족한 상

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

* 이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2019년)에 의해 연구되었음.

황이다.

이에 본 연구에서는 집적도가 높은 가전, 통신 장비 등에서의 사용을 고려하여 얇은 평판형 알루미늄 압출관에 내부가 수십 개의 얇은 벽에 의해 흠 없이 단순한 사각형의 유로들로 분리되는 다채널 써모사이폰을 제작하였다. 이러한 박판형 다채널 써모사이폰은 내부에 흠, 워킹 등이 없어 제조 공정 단순화를 통해 생산비를 절감할 수 있고 구조적으로도 더 안정적이다(G. Wang et al., 2019). 평판 형태의 외형을 가지므로 발열부와 접촉 저항을 감소시켜 열성능을 증가시킬 수 있으며 모든 채널이 독립적으로 분리되었기 때문에 사용 중 일부 채널이 파손되더라도 전체적인 열성능의 저하에 미치는 영향이 적은 장점을 갖는다. 본 연구는 이렇게 성능이 우수하고 안정적으로 사용할 수 있는 박판형 다채널 써모사이폰을 실제 사용 조건을 가정한 다양한 충전율, 입열량, 경사각 조건에서 열성능 및 특성을 평가하고 사용이 용이한 열적 성능 자료를 제시하고자 하는 것이 목적이다.

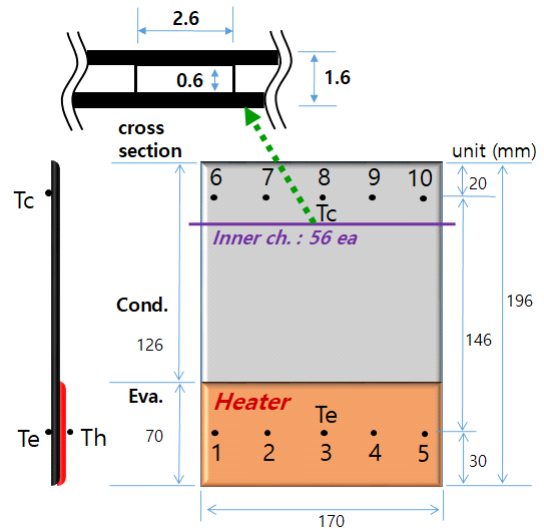
II. 실험장치 및 방법

1. 실험장치

본 연구에서 사용된 박판형 다채널 써모사이폰은 알루미늄 압출관을 이용해 만들어진 56개의 작은 사각형 모세관(wickless)들로 구성되며 상세한 채원은 <Table 1>에 나타내었다. 작동유체는 오존층파괴지수(ODP)가 '0'이고 지구온난화지수(GWP)도 '320'으로 크지 않으며 점도와 표면장력이 작아 소형 히트파이프 등의 마이크로 채널에 사용하기 적합한 HFE-7100(Novec-7100, 3M Co.)을 사용하였다. [Fig. 1]은 본 실험의 써모사이폰 시험부(test section) 개략도 및 온도 측정점을 나타낸 것이다. 실제 TV 기관의 발열부를 가정하여 만들어진 히터(170×70mm)는 그림과 같이 증발부에 부착하고 히터, 증발부 모두 단열처리 하였다.

<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	Number	56
	Size [mm]	2.6×0.6

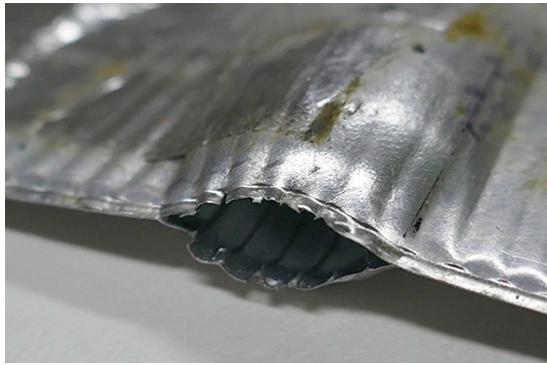


[Fig. 1] Schematic diagram of thermosyphon.

2. 실험방법

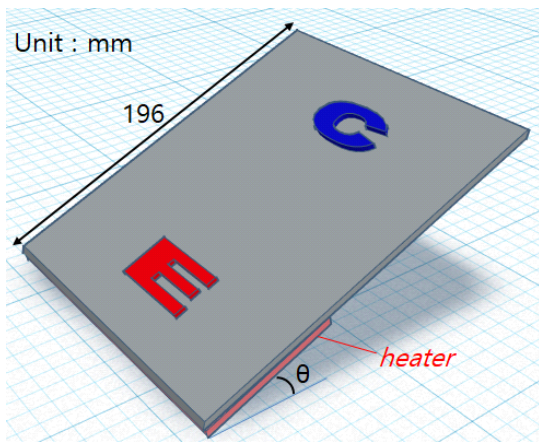
작동유체 충전율은 20, 40, 50, 60% vol., 4가지 조건을 사용하였다. 히터 입열량은 TV 등 가전 제품의 기관에서 발열면의 온도 유지 조건인 50℃부터 이상 과열 조건으로 가정한 약 120℃까지를 고려하여 5~30W(열유속 : 420~2,520W/m²)까지 5W 단위로 총 6개의 조건을 사용하였다. 본 연구에서 사용된 써모사이폰과 작동유체에 대해 비산 한계에 따른 한계 입열량이나(Kim and Peterson, 1995) 풀비등에서의 임계열유속을 구하는 고전적인 방법 등을 적용할 경우(Misale et al., 2009) 최소 120W 이상이 한계 입열량으로 계산되지만 제작 특성상 히터 입열량 80~90W 이상, 히터(=발열부) 온도 200℃ 이상에서는 내압 한계

로 압착 마감된 부분이 [Fig. 2]와 같이 파열되기 때문에 개발 목적 이상의 무리한 실험 조건을 설정하지 않았다.



[Fig. 2] Ruptured thermosyphon.

[Fig. 3]은 경사각 실험을 도시화한 것으로 선행 연구를 바탕으로 0°(수평), 5°, 10°, 30°, 60°, 90°(수직) 총 6개의 경사각 조건을 사용하였다 (Kim et al., 2019). 써모사이폰 응축부는 실제 사용 환경을 고려하여 20~25℃ 실내 자연대류 조건에서 방열되도록 하였다. 각 지점의 온도는 히터 가열 후 정상 상태가 된 이후 10분간의 데이터를 평균하여 사용하였다. 열성능은 식 (1)의 유효열전도율(k_{eff})과 식 (2)의 열저항(R)을 사용하여 평가하였다(Kim and Lee, 2018).



[Fig. 3] Inclination angle (θ).

$$k_{eff} = \frac{Q \cdot L}{A_c \cdot \Delta T} \quad [W/m \cdot K] \quad \dots\dots\dots (1)$$

Q : input heat transfer rate [W]

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

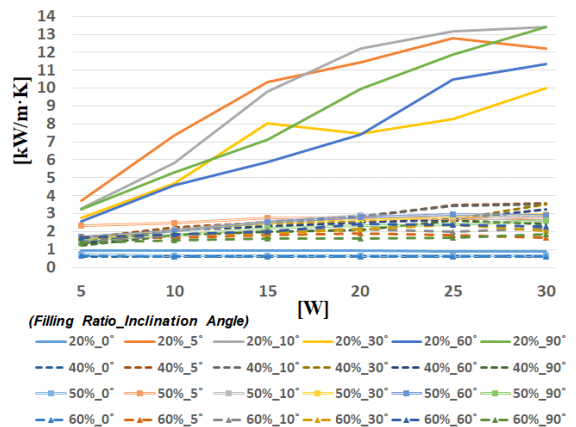
A_c : cross section area(heat flow direction) [m²]

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

$$R = \frac{\Delta T}{Q} \quad [K/W] \quad \dots\dots\dots (2)$$

Ⅲ. 연구 결과

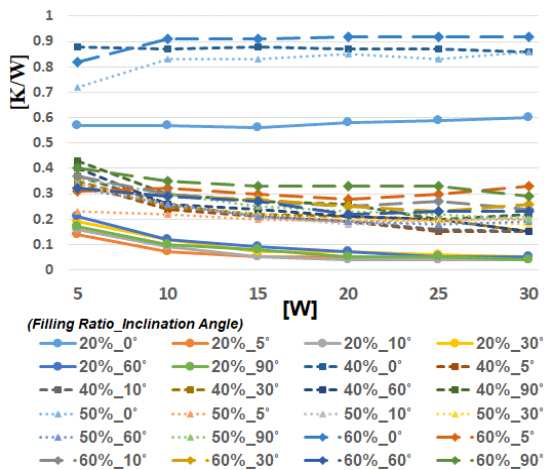
[Fig. 4]는 입열량에 따른 유효열전도율 변화를 나타낸 것이다. 실험 범위의 입열량 조건에서 총진율 20%의 경우가 총진율 40~60%의 경우보다 매우 큰 유효열전도율을 나타내어 본 연구에서 사용된 써모사이폰의 최적 총진율이 20%임을 확인할 수 있다. 대체로 입열량이 증가할수록 유효열전도율이 상승하는 것을 확인할 수 있다.



[Fig. 4] Effective thermal conductivity profiles according to input heat transfer rate.

[Fig. 5]는 입열량에 따른 열저항 변화를 나타낸 것이다. 수평(0°)인 경우, 모든 총진율에서 다른 경사각들 보다 열저항이 명백한 차이를 보일 정도로 크고 입열량에 따른 변화도 거의 없어 수

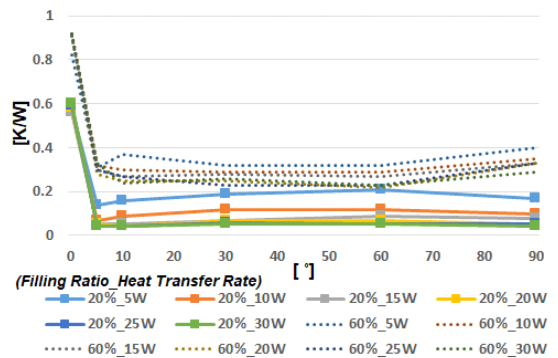
평에서는 본 연구에서 사용한 써모사이폰이 제대로 작동하지 않는 것을 확인할 수 있다.(물론 수평이라도 열성능이 가장 떨어지는 충진율 60%의 유효열전도율도 580W/m·K 이상으로 순수 알루미늄의 열전도율 237W/m·K 보다 2배 이상 크다.) 별도의 가공 없이 단순한(plain) 사각형 채널은 모세관 크기라도(수력 직경: 0.975mm / 60℃ 기준 Bond 수: 1.3) 수평 조건에서는 실험 결과와 같이 열성능이 저하되는 것을 피할 수 없기 때문에 특히 고정된 설치 조건이 아닌 다양한 공간 방향(orientation) 조건에서 이용될 경우가 많은 전자 제품 등에서 사용한다면 이 수평 조건의 문제에 주의해야 할 필요가 있다. 다른 경사각들의 경우는 대체로 입열량이 증가하면 열저항이 감소하는 편이다. 최적 충진율인 20%의 경우 모든 경사각에서 다른 충진율의 동일한 경사각들보다 열저항 값이 작다.



[Fig. 5] Thermal resistance profiles according to input heat transfer rate.

[Fig. 6]은 대표적으로 충진율 20%, 60%의 경우, 경사각에 따른 열저항 변화를 나타낸 것이다. 수평에서 경사각이 조금만 커져도 급격하게 열저항이 감소하고 써모사이폰이 정상 작동하는데 이후에는 열저항의 변화가 크지 않은 것을 확인할

수 있다. 일반적으로 써모사이폰은 수직(90°)인 경우보다 그 이하의 경사각 중 일정 범위에서 열저항이 더 작은 것으로 알려져 있다. 하지만 이러한 연구들에서 사용된 써모사이폰은 대부분 직경 10mm 이상인 하나의 원형관을 사용하여 충진율 50~100% 정도로 제작된 것이기 때문에 (Payakaruk et al. 2000) 본 연구에서 사용된 사각형 모세관 다채널 써모사이폰과 직접 비교하기는 곤란하다. 그러나 Fig. 6에서 충진율이 큰 60%의 경우, 정상 작동 이후(경사각 5° 이상)의 변화를 보면 30~60° 정도에서 열저항이 최소값을 갖는, 아주 완만하게 아래로 볼록한 포물선 형태를 보이고 있는 점은 기존 연구 결과들과 유사한 경향을 보인다(Japan Association for Heat Pipe, 2001). 그러나 최적 충진율인 20%의 경우에는 반대로, 작동 이후 아주 완만하게 위로 볼록한 포물선 형태로 열저항이 커졌다 감소하는 변화를 보이고 있어 충진율이 큰 경우와 차이를 보인다.



[Fig. 6] Thermal resistance profiles according to inclination angle.

[Fig. 4~6]을 살펴보면 입열량에 따른 대체적인 경향은 살펴볼 수 있으나 충진율, 경사각 변화에 따른 공통된 비례 관계는 찾아보기 어렵다.

상변화를 동반하고 복잡한 조건들이 적용되는 써모사이폰의 성능을 평가하기 위해서는 관련된 무차원수들을 사용한 상관식을 이용하는 것이 편리하다. 써모사이폰과 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(D.A. Reay and P.A. Kew, 2006). 무차원수 계산에 사용된 물성치는 증발부와 응축부의 산술평균온도를 기준으로 계산하였다(M.H. Rausch. et al. 2015).

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

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

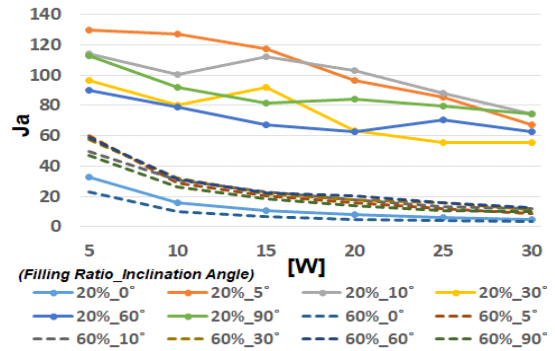
$$Bo = \frac{g(\rho_l - \rho_v)d_h^2}{\sigma} \dots\dots\dots (4)$$

d_h : hydraulic diameter [m]

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

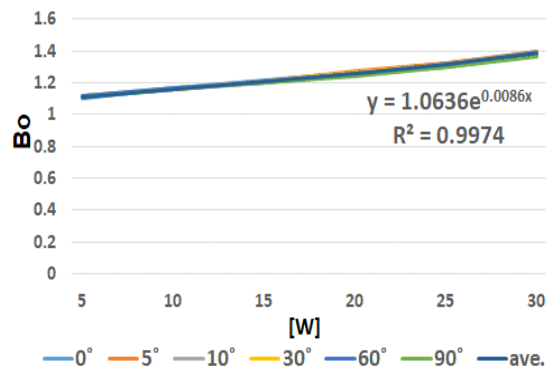
q : heat flux [W/m²]
 h_{lv} : heat of evaporation [J/kg]
 σ : surface tension [N/m]
 g : gravitational acceleration [m/s²]
 ρ_l : liquid density [kg/m³]
 ρ_v : vapour density [kg/m³]

[Fig. 7]은 대표적으로 충전율 20%, 60%의 경우, 입열량에 따른 Ja 수의 변화를 나타낸 것이다. 입열량 증가에 따라 ΔT도 증가하기 때문에 Ja 수는 점점 감소하는 형태를 나타낸다. 그러나 본 연구에서는 Ja 수도 유효열전도율이나 열저항의 경우처럼 충전율, 입열량, 경사각에 대해 공통적으로 수식화할 수 있을 정도로 뚜렷한 패턴을 보이지 않기 때문에 상관식과 같이 정량적인 열 성능 평가에 이용하기 곤란하다.



[Fig. 7] Ja no. according to input heat transfer rate.

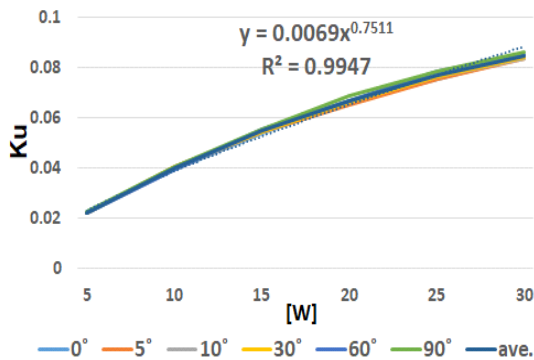
Bo 수는 본 연구에서 사용된 써모사이폰과 같은 모세관 구조에서는 더욱 중요한 의미를 갖는다. [Fig. 8]은 최적 충전율 20%의 경우에 대해 입열량에 따른 Bo 수의 변화를 나타낸 것이지만 모든 충전율에서 거의 동일한 형태로 나타난다. Bo 수는 입열량에 거의 선형적으로 비례하고 경사각에 따른 변화도 매우 작기 때문에 각 경사각에 따른 값들을 평균하여도 그 편차가 거의 없었다. 이 평균값은 그래프와 같이 입열량에 대해 1에 가까운 큰 결정 계수(R²) 값을 갖는 자연 상수의 지수(입열량에 비례)형태로 표현할 수 있고 이 지수식의 상수와 지수 값은 충전율에 따라 다르다.



[Fig. 8] Bo no. according to input heat transfer rate.

기본적으로 열유속과 선형관계인 Ku 수는 다른 무차원수나 무차원화 된 히트파이프 형상 관

런 값들의 함수 형태인 열유속 예측 상관식을 만드는 방식으로 이용되는 중요한 무차원수이다 (Katpradit et al., 2005). [Fig. 9]는 최적 충진율 20%의 경우에 대해 입열량에 따른 Ku 수의 변화를 나타낸 것이다. Bo 수의 경우와 마찬가지로 모든 충진율에서 그래프의 형태가 거의 동일하게 나타난다. Ku 수는 입열량에 대해 지수 형태로 비례하고 경사각에 따른 변화도 Bo 수의 경우처럼 매우 작기 때문에 각 경사각에 따른 값들을 평균하여도 그 편차가 크지 않다. 이 평균값은 그래프와 같이 높은 결정 계수 값을 갖는 지수형태로 표현할 수 있고 이 지수식의 상수와 지수 값은 Bo 수의 경우처럼 충진율에 따라 다르다.



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

이상과 같은 입열량과 Bo, Ku 수의 관계에 대해 그래픽 분석 방법을 이용하여 Ku 수는 다음과 같이 Bo 수의 함수로 간단히 정리할 수 있다.

$$Ku = 0.023 \left(\frac{\ln Bo - C_1}{C_2} \right)^{0.7} \dots\dots\dots (6)$$

여기서 C_1 , C_2 는 충진율에 따른 상수 값으로 <Table 2>와 같이 정리할 수 있다.

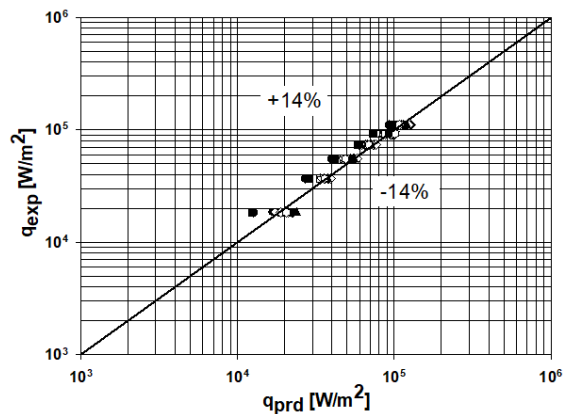
식 (6)과 Ku 수의 정의를 이용하면 예상 열유속(q_{prd}) 상관식은 식 (7)과 같이 정리할 수 있다.

$$q_{prd} = 0.023 \times h_{lv} \rho_v^{0.5} [\sigma g (\rho_l - \rho_v)]^{0.25} \dots\dots\dots (7) \times \left(\frac{\ln Bo - C_1}{C_2} \right)^{0.7}$$

식 (7)을 이용한 예측 값(q_{prd})과 실측의 열유속 (q_{exp})을 비교하면 오차는 [Fig. 10]과 같이 평균 14% 이내, 최대 30% 이내로 일치하였다.

<Table 2> Constants according to Filling ratio

F.R.	20	40	50	60
C_1	0.06166	0.05987	0.04440	0.03941
C_2	0.0430	0.0525	0.0520	0.0580



[Fig. 10] Comparison experimental heat flux versus predicted heat flux.

IV. 결론

박판형 다채널 써모사이폰에 관한 열성능 실험에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 최적 충진율은 20% vol.으로 다른 충진율에 비해 모든 입열량 조건에서 열성능 지표인 유효 열전도율, 열저항 성능이 우수하였다.
2. 박판형 다채널 써모사이폰도 수평에서는 작동하지 않고 아주 작은 특정 경사각 보다 큰 각도에서 정상 작동하였다. 작동 이후 유효열전도율은 대체로 입열량에 비례하여 증가하였다.

3. 박관형 다채널 써모사이폰은 정상 작동 이후, 경사각에 따른 열저항의 변화가 크지 않았다. 최적 충전율에서는 기존 써모사이폰 연구 결과들과 반대로 정상 작동 이후, 경사각 증가에 따라 열저항이 증가하다가 일정 각도 이후 다시 감소하는 변화를 보였다.

4. 입열량에 따른 Bo, Ku 수 그래프 분석을 통해 열유속 예측 상관식을 제안하였으며 예측 값과 실측 열유속 값은 오차 평균 14% 이내로 일치하였다.

References

- Cho DH(2014). A Study on the Characteristics of Boiling Heat Transfer of Two-Phase Loop Thermosyphons, *JFMSE*. 26(3), 639~646
<http://dx.doi.org/10.13000/JFMSE.2014.26.3.639>
- DA Reay and PA Kew(2006). Heat Pipes(5th edition) Theory, Design and Applications, Elsevier, UK(Oxford), 94~101
- 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>
- Japan Association for Heat Pipe(2001). Practical Heat Pipe(2nd), Nikkan Kogyo Shimibun. Ltd., Japan (Tokyo), 29~30, 38~39
- Kim BH and Peterson G.P.(1995). Analysis of the critical Weber number at the onset of liquid entrainment in capillary-driven heat pipes, *International J. Heat Mass Transfer*. 38(8), 1427~1442
[https://doi.org/10.1016/0017-9310\(94\)00249-u](https://doi.org/10.1016/0017-9310(94)00249-u)
- 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
- 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 and Engineering. Data*, 3759~3765. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.5b00691>
- M Mameli, D Mangini, GF Vanoli, L Araneo, S Filippeschi and M Marengo(2015). Multi-evaporator closed loop thermosyphon, 7th European-Japanese Two-Phase Flow Group Meeting
- M Misale, G Guglielmini and A Priarone(2009). HFE-7100 pool boiling heat transfer and critical heat flux in inclined narrow spaces, *International J. Refrigeration*. Vol. 32, Issue 2, 235~245
<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2008.06.003>
- Moon SH and Park YW(2016). Development of the Structure for Enhancing Capillary Force of the Thin Flat Heat Pipe based on Extrusion Fabrication, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineering-B*. 40(11), 755~759
<http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2016.40.11.755>
- SEKI HI-TECH(2019). Catalog of Heat Pipe products. Retrieved from http://www.sekihitech.co.kr/bbs/board.php?bo_table=product_2 on January 21.
- 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>
- T Payakaruk, P Terdtoon and S Ritthidech(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, 781~790
[https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(99\)00047-2](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(99)00047-2)

-
- Received : 14 January, 2020
 - Revised : 23 January, 2020
 - Accepted : 31 January, 2020