

넓은 증발부 면적을 가지는 Flat-Plate Heat Pipe 의 최대 열전달량

Maximum Heat Transfer Rate of a Flat-Plate Heat Pipe with a Wide Evaporator Area

강민규* · 장석필***†
Min Gyu Kang* · Seok Pil Jang***†

* 한국항공대학교 스마트항공모빌리티학과
** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과
(uni96kan2014@kau.kr)

Abstract

In this study, we theoretically calculated the pressure distribution and the maximum heat transfer rate of a flat-plate heat pipe with a wider evaporator area than a condenser applicable to cooling electronic devices using the integral method for vapor pressure and the Darcy model for liquid pressure. Based on the results, we investigated the effect of the ratio of evaporator to condenser area on the maximum heat transfer rate of flat-plate heat pipe under the capillary limit condition. Moreover, an optimal ratio of evaporator to condenser area for maximizing the maximum heat transfer rate was presented.

Key words: Flat-Plate Heat Pipe, Wide Evaporator Area, Pressure Distribution, Maximum Heat Transfer Rate

1. 서론

최근 모빌리티용 전자 장치의 고효율 집적화로 인해 고성능의 냉각을 요구하는 사례가 증가하고 있다. 이에 별도의 외부 동력원 없이 많은 열을 전달할 수 있는 평판형 히트파이프가 새로운 대안으로 제시되고 있다. 이때 기존 연구자들^[1-4]은 다양한 형상의 히트파이프의 최대 열전달량에 관한 이론적인 연구를 진행하였으나 응축부 면적이 증발부보다 크다는 조건에 한정되어 있다. 따라서 본 연구에서는 넓은 증발부 면적을 가지는 평판형 히트파이프의 이론적 성능 모델을 수립하기 위해, Vafai et al.^[1]의 모델을 기반으로 경계조건을 수정하여 기체, 액체 영역의 압력 분포를 이론적으로 구하였다. 또한 증발부와 응축부의 면적비에 따른 최대 열전달량을 예측하였고, 이를 바탕으로 최대 열전달량을 최적화할 수 있는 증발부와 응축부의 최적 면적비를 제시하였다.

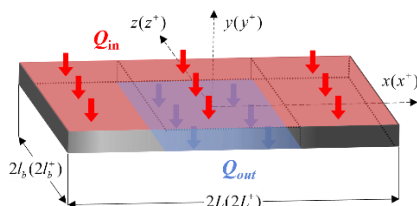


Fig. 1. 넓은 증발부 면적을 가지는 평판형 히트파이프 개략도

2. 이론적 모델

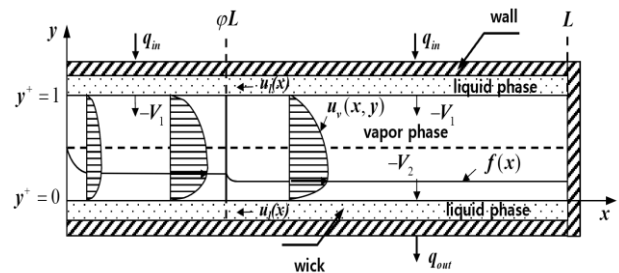


Fig. 2. x-y 평면에서 기체 및 액체의 속도 개략도

평판형 히트파이프의 이론적 모델을 수립하기 위해 연속방정식과 운동량 방정식을 무차원화 하여 정리하면 식 (1), (2)와 같다.

$$\frac{\partial u_v^+}{\partial x^+} + \frac{\partial V_v^+}{\partial y^+} = 0 \tag{1}$$

$$u_v^+ \frac{\partial u_v^+}{\partial x^+} + V_v^+ \frac{\partial u_v^+}{\partial y^+} = -\frac{\partial P_v^+}{\partial x^+} + \frac{\partial^2 u_v^+}{\partial (y^+)^2} + \frac{1}{h_b^2} \frac{\partial^2 u_v^+}{\partial (z^+)^2} \tag{2}$$

이때 Fig. 2에 제시된 평판형 히트파이프의 수정된 경계조건은 Table 1과 같다.

Table 1. 평판형 히트파이프의 수정된 경계조건

	$0 \leq x^+ \leq \phi L^+$	$\phi L^+ \leq x^+ \leq L^+$
Upper Part $f^+(x^+) \leq y^+ \leq 1$	Evaporator $u_v^+(x^+, 0) = 0$ $V_v^+(y^+ = 1) = -V_1^+$	Evaporator $u_v^+(x^+, 1) = 0$ $V_v^+(y^+ = 1) = -V_1^+$
Lower Part $0 \leq y^+ \leq f^+(x^+)$	Adiabatic $u_v^+(x^+, 0) = 0$ $V_v^+(y^+ = 0) = 0$	Condenser $u_v^+(x^+, 1) = 0$ $V_v^+(y^+ = 1) = -V_2^+$

2.1 기체, 액체 압력장 해석

평판형 히트파이프 내부에서의 기체 압력 분포는 연속방정식인 식 (1)과 운동량 방정식인 식 (2)를 평판형 히트파이프 영역에 대한 적분 형태로 바꾸고 Table 1의 경계조건들을 대입하여 무차원화 된 기체 압력 분포식을 도출하였다. 이때 $f^+(x^+)$ 과 $P_v^+(x^+)$ 는 서로 Couple되어 있기 때문에 Runge-Kutta 방법으로 iteration을 통해 구하며, $y = f^+(x^+)$ 일 때 Bernoulli's equation을 활용하여 초기 값을 지정하였다.

2.2 액체 압력장 해석

작동유체는 모세관력에 의하여 증발부까지 이동하게 된다. 이때 워 내 액체의 압력 강하는 다공성 매질에서의 유체의 압력과 속도 관계식인 Darcy model로부터 유도하였으며, 이는 식 (5)와 같다. 위 식에 Table 1의 경계조건을 대입하고 워 영역에 대해 적분하여 워 내에서 무차원화된 액체의 압력 분포를 이론적으로 도출하였다.

$$\frac{\partial P_l^+}{\partial x^+} = \frac{u_l^+}{K^+} \tag{5}$$

본 연구에서 사용된 평판형 히트파이프는 Sintered wick을 가졌으며, Fig. 3에 Re_h 에 따른 평판형 히트파이프 내부의 기체, 액체 압력 분포도를 도시하였다. 이때 Re_h 가 증가할수록 기체, 액체의 압력강하가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

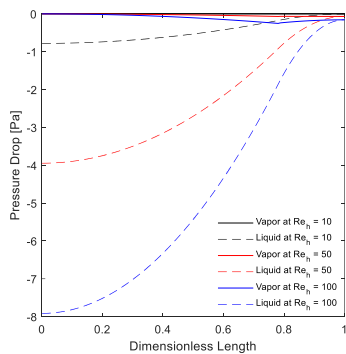


Fig. 3. 평판형 히트파이프 기체, 액체 압력 분포도

2.3 최대 열전달량

최대 열전달량은 기체 및 액체 압력 강하와 모세관 압력의 관계를 나타내는 Capillary limitation로부터 구할 수 있다. 이를 통해 작동 유체의 특성을 제외한 최대 열전달량에 영향을 미치는 형상 변수는 워의 유효공극반경, 투과율, 워의 길이, 워의 두께, 그리고 증발부와 응축부의 면적비로 선정되었다. 이때 본 연구에서는 증발부와 응축부의 면적비가 평판형 히트파이프의 최대 열전달량에 미치는 영향에 대해 분석하였다.

$$\Delta P_{total} = \Delta P_v + \Delta P_l = P_v(0) - P_l(0)$$

$$\Delta P_v + \Delta P_l \leq \Delta P_{cap,max} = \frac{2\sigma_l}{r_{eff}}$$

여기서 r_{eff} , ΔP_v , ΔP_l , ΔP_{cap} , σ_l 은 각각 워의 유효 공극 반지름, 기체의 압력강하, 액체의 압력강하, 워의 모세관력, 액체의 표면장력을 나타낸다.

3. 결론

본 연구에서는 넓은 증발부 면적을 가지는 평판형 히트파이프의 이론적 성능 예측을 위해 Vafai et al.^[1]의 모델을 기반으로 경계조건을 수정하여 이론적 성능 예측 모델을 수립하였다. 이를 바탕으로 증발부와 응축부의 면적비가 평판형 히트파이프의 최대 열전달량에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 분석 결과를 토대로 최대 열전달량을 최적화할 수 있는 증발부와 응축부의 최적 면적비를 제시하였다.

References

[1] K. Vafai and W. Wang Jung, "Analysis of flow and heat transfer characteristics of an asymmetrical flat plate heat pipe," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 35, No. 9, pp. 2087-2099, 1992.

[2] B. Xiao and A. Faghri, "A Three-dimensional thermal-fluid analysis of flat heat pipe", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 51, No. 11-12, pp. 3113-3126, 2008.

[3] M. Aghvami and A. Faghri, "Analysis of flat heat pipes with various heating and cooling configurations", Applied Thermal Engineering, Vol. 31, No. 14-15, pp. 2645-2655, 2011.

[4] S. B. Kim, K. H. Kim, M. A. Kedzierski and S. P. Jang, "Thermal characteristics of silicon wafer-based TVCs(thin vapor chambers) with disk-shape using DI water", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 127, pp. 526-534, 2018.