〈일반논문〉
Journal of the Korean Society of Visualization, Vol. 21, No. 3 (57~64), 2023
(Manuscript received : 2023.11.02./Revised : 2023.11.20./Accepted : 2023.11.20.)
DOI:http://dx.doi.org/10.5407/jksv.2023.21.3.057

ISSN 1598-8430 Print
ISSN 2093-808X Online

개방형 구조의 진동형 히트파이프의 응축부 길이에 따른 추력 및 유동 가시화

손민재* · 최종욱†

Thrust and Flow Visualization according to Length of Condenser Section of Open Pulsating Heat Pipe

Minjae Son* and Jongwook Choi†

Abstract An open pulsating heat pipe operates continuously by inflow and outflow fluids through an open-type condenser. The open pulsating heat pipe is a device capable of obtaining the thrust due to the variation of internal pressure during phase change. Therefore, the open pulsating heat pipe is a suitable device to move fluids if the heat source such as waste heat exists. Many numerical studies have not been sufficiently conducted on the open pulsating heat pipe. In this study, the numerical analysis of the open pulsating heat pipe is performed according to the length of the condenser section. The OpenFOAM software is used to obtain the thrust and the flow visualization for the open pulsating heat pipe.

Key Words : Open Pulsating Heat Pipe(개방형 구조의 진동형 히트파이프), Phase Change(상변화), Thrust(추력), Flow Visualization(유동 가시화), OpenFOAM(오픈폼)

1. 서 론

진동형 히트파이프는 구조적 형상에 따라 밀폐형과 개방형 구조로 나누어진다. 밀폐형과 개방형 구조는 열원을 통한 작동원리는 같지만, 작동유체가 새롭게 교환된다는 점에서 차이가 있다. 개방형 구조의 진동형 히트파이프는 증발부에서 증기 플러그와 액체 슬러그가 개방부를 통하여 저온의 액체가 가득 찬 외부로 이동하고, 외부의 새로운 액체가 유입되는 방식으로 작동한다.

개방형 구조의 진동형 히트파이프는 파이프의 끝에서 추력을 발생시킨다. 수중에서 물의 유입 및 유출을 통하여 움직이는 소형 스팀 보트(Steam-powered boat)가 여기에 해당된다. 이와 관련하여, 1차원 수치해석으로 추력을 구하는 연구[1]가 수행되었으며, 수치해석 모델의 추력은 실험 결과와 유사한 경향을 보였다.

개방형 구조의 진동형 히트파이프에 대한 증발부의 위치와 중력의 영향에 관한 이론적, 실험적 연구[2]도 수행되었다. 작동유체의 표면장

† School of Mechanical and Aerospace Engineering / Center for Aerospace Engineering Research, Sunchon National University, Professor
E-mail: choijw99@scnu.ac.kr
* Department of Aerospace Engineering, Graduate School, Sunchon National University, Graduate

력은 액체 슬러그 및 증기 플러그 생성에 중요한 역할을 하는 것으로 확인되었다. 반면, 작동유체의 이동에 관해서는 압력, 마찰력, 중력이 지배적인 역할을 하는 것으로 나타났다.

가이저(Geyser)[3]는 자연에서 지열에 의한 개방형 구조의 진동형 히트파이프의 대표적인 예이다. 좁은 바위틈 사이에 고인 액체가 지열의 영향으로 증발하여, 증기 플러그로 생성된다. 생성된 증기 플러그는 내부 압력 차이에 의해 고인 액체를 이동시켜 틈을 통해 분출시킨다.

개방형 구조의 진동형 히트파이프는 물 펌프(Open oscillatory heat pipe water pump)[4]에도 이용되며, 농작물의 수분 공급을 위한 목적으로 사용된다. 저온 액체의 유입로가 별도로 있으며, 개방형 구조의 진동형 히트파이프에서 증기 플러그와 액체 슬러그를 고점에서 분출시키는 원리이다.

한편, 단일 출구를 갖는 개방형 구조의 진동형 히트파이프에서 상변화에 따른 내부 작동유체의 위상 변화 및 진동 주기에 관한 수치 및 실험 연구가 수행되었다[5,6]. 증발부와 응축부의 온도 차이가 클수록 내부 작동유체의 위상 변화가 더 커지고, 진동 주기의 불안정성이 초래되었다.

개방형 구조의 진동형 히트파이프를 이용한 물 펌프에서 열원에 따른 성능에 관한 수치 및 실험 연구가 수행되었다[7]. T-섹션(Section)과 체크밸브가 포함된 장치에서 증발부의 열원 증가는 출구의 질량 유량의 증가로 나타났으나, 번아웃(Burn out) 현상으로 인한 열원의 임계값이 있다는 것을 확인하였다. 응축부의 온도는 출구의 질량 유량에 큰 영향을 미치지 못하였다.

위에서 언급된 것과 같이, 개방형 구조의 진동형 히트파이프에 대한 증발부의 길이와 열원은 작동 성능에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한, 응축부의 온도는 작동의 불안정성을 유발하고, 질량 유량을 감소시키는 것으로 확인되었다. 하지만, 응축부 길이의 영향에 대해서는 아직까지 연구가 이루어지지 않고 있다.

이 연구에서는 개방형 구조의 진동형 히트파이프에 대하여 응축부 길이에 따른 작동유체의 내부 압력변화와 개방부에서의 속도 및 추력을 전산 열유동해석을 통하여 구한다. 또한, 작동유체의 상변화 과정과 작동유체의 거동에 대한 유동 가시화를 수행한다.

2. 전산열유동해석

2.1 형상 및 격자 생성

개방형 구조의 진동형 히트파이프의 형상은 Fig. 1과 같이 2차원 수평형 구조의 U자형 관으로, 증발부(Evaporator section), 단열부(Adiabatic section), 응축부(Condenser section)로 구성된다. 형상에 대한 구체적인 치수는 Table 1과 같으며, 직경(D)은 0.004 m, 전체 너비(W)는 0.024 m, 전체 길이(L)는 0.15 m이다. 증발부의 길이(L_e)가 0.06 m일 때, 증발부에 대한 응축부 길이의 비(L_c/L_e)가 0, 0.5, 1.0, 1.5가 되도록, 응축부의 길이(L_c)를 0 m, 0.03 m, 0.06 m, 0.09 m로 설정하였으며, 전체 길이를 유지하기 위하여 단열부의

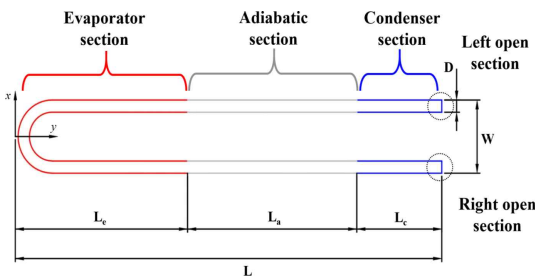
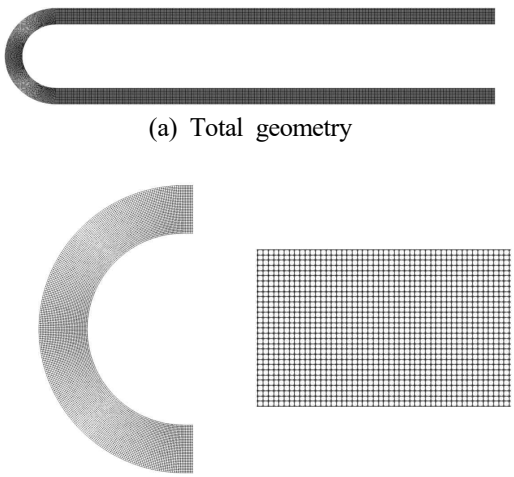


Fig. 1. Geometry of open pulsating heat pipe

Table 1. Dimensions of open pulsating heat pipe

	Value [m]			
Diameter (D)	0.004			
Total width (W)	0.024			
Total length (L)	0.15			
Length of evaporator section (L_e)	0.06			
Length of condenser section (L_c)	0	0.03	0.06	0.09
Length of adiabatic section (L_a)	0.09	0.06	0.03	0
Ratio of length of condenser section to length of evaporator section (L_c / L_e)	0	0.5	1.0	1.5



(a) Total geometry

(b) Return bend section (c) Longitudinal section

Fig. 2. Grid generation for open pulsating heat pipe

길이(L_a)를 0.09 m, 0.06 m, 0.03 m, 0 m로 설계하였다. 참고로, 이 연구는 개방형 구조의 진동형 히트파이프의 열전달 특성에 관한 것이 아니라, 상변화에 의한 작동유체의 유동 가시화 및 추력에 초점을 맞춘 관계로, 형상설계시 파이프에 대한 고체영역을 포함시키지 않았다.

전산열유동해석을 위한 격자 생성에 Salome (Version 9.11.0)[8] 소프트웨어를 사용하였다. 액체상과 기체상의 경계를 뚜렷하게 가시화하기 위하여, Fig. 2와 같이 정방형 격자로 생성하였다. 여기서, 곡관과 직관에 대한 확대된 격자형상은 Fig. 2(b)-(c)에 나타내었다.

2.2 지배 방정식

VOF(Volume of fluid) 방법을 이용한 상변화 방정식은 식(1)과 같다.

$$\frac{\partial \alpha_l}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_l \vec{U_l}) + \nabla \cdot (\alpha_l \alpha_v \vec{U_r}) = \frac{\dot{m}}{\rho_l} \quad (1)$$

여기서, α_l, α_v는 액체상과 기체상의 체적분율, t는 시간, $\vec{U_l}$은 액체상의 속도, $\vec{U_r}$는 2상(Two phase) 유체의 상대속도를 의미하며, $\dot{m}$은 응축 과정에서의 생성되는 질량 전달량($\dot{m_c}$)과 증발 과정에서 생성되는 질량 전달량($\dot{m_e}$)의 차, ρ_l는 액체상의 밀도를 나타낸다. 상변화 방정식에서 $\alpha_l + \alpha_v = 1$이므로, 1개의 상에 대해서만 계산한다. 상변화 방정식의 좌측항은 시간항, 대류항, 압축항으로 구성되며, 우측항은 상변화량을 나타낸다. 압축항은 2상의 상대속도를 고려한 표면 압축(Interface compression)을 의미한다.

속도와 압력을 구하기 위한 운동량 방정식은 식(2)와 같다.

$$\frac{\partial \rho \vec{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}\vec{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_{eff}(\nabla \vec{U} + \nabla \vec{U^T})] + \sigma \kappa \nabla \alpha + S \quad (2)$$

여기서, ρ는 $\rho = \alpha_l \rho_l + \alpha_v \rho_v$, p는 압력, μ_{eff}는 $\mu_{eff} = \alpha_l \mu_l + \alpha_v \mu_v + \mu_T$로 유효 점성계수이다. μ_T는 난류 점성계수, σ는 표면장력, κ는 표면곡률, S는 상변화 과정에서 생성되는 소스항이다. 운동량 방정식의 좌측항은 시간항과 대류항으로 이루어져 있으며, 우측항은 압력항, 점성항, 표면장력항, 상변화항으로 이루어져 있다. 이 연구에서는 수평형 구조의 형상이므로, 중력은 고려되지 않았다.

운동량 방정식에서 점성항의 난류모델을 계산하기 위하여, K-Epsilon 모델을 사용하였으며, 난류 점성계수는 식(3)을 만족한다.

$$\mu_T = \rho c_\mu \frac{K^2}{\epsilon} \quad (3)$$

여기서, c_μ는 난류 무차원 상수, K는 평균 유동의 운동에너지, ϵ은 점성 소산율을 의미한다.

상변화 해석을 위한 에너지 방정식은 식(4)와 같다.

$$\frac{\partial (\rho C_p T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho C_p T \vec{U}) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{m} H \quad (4)$$

여기서, C_p는 정압비열, T는 온도, k는 열전도

도, H는 증발 잠열을 나타낸다. 또한, 정압비열과 열전도율은 각각 $C_p = \alpha_l C_{pl} + \alpha_v C_{pv}$, $k = \alpha_l k_l + \alpha_v k_v$로 구한다.

상변화량의 경우, 작동유체 온도와 포화온도와의 차이에 의해서 결정되는 Lee 모델[9]을 이용하여 계산하였다. 응축 과정에서 생성되는 질량 전달량과 증발 과정에서 생성되는 질량 전달량은 식(5)와 식(6)으로부터 각각 구한다.

$$\dot{m}_c = \beta_c \alpha_v \rho_v \left| \frac{T - T_{sat}}{T_{sat}} \right| \quad (T < T_{sat}) \qquad (5)$$

$$\dot{m}_e = \beta_e \alpha_l \rho_l \left| \frac{T - T_{sat}}{T_{sat}} \right| \quad (T \geq T_{sat}) \qquad (6)$$

여기서, β_c와 β_e는 액체상과 기체상의 밀도 차이를 고려한 질량 전달 매개변수[10]로, 이 연구에서는 각각 200과 0.1로 설정하였다. 또한, T_{sat}는 포화온도를 의미하며, 작동유체가 물인 관계로, 373.15 K(100 ℃)으로 설정하였다.

2.3 계산 조건

개방형 구조의 진동형 히트파이프 내 작동유체는 물(수증기)로, 물성치는 Table 2와 같다. 초기 내부 형상에 액체상이 가득 찬 조건으로 설정한 후, 양측 개방부에서 작동유체의 출입이 가능하도록 하였으며, 유입은 액체상만 가능하게 하였다. 또한, 파이프 벽면을 석영(Quartz)으로 가정하였고, 물의 모세관 현상을 고려하기 위하여, 벽면에 대한 액체상의 접촉 각도(Contact angle)를 24°[11]로 설정하였다. 초기 물의 온도는 계산상 증발 시간을 단축하기 위하여, 포화온도보다 1 K 낮은 372.15 K로 설정하였다.

Table 2. Properties of working fluids

	Water	Vapor
Density [kg/m^3]	998	0.5542
Specific heat [J/kg·K]	4,182	2,014
Dynamic viscosity [kg/m·s]	1.002×10^{-3}	1.340×10^{-5}
Thermal conductivity [W/m·K]	0.6770	0.02457
Latent heat [J/kg]	$2{,}455\times10^3$	
Surface tension [N/m]	0.072	

경계조건으로는 증발부에 45 W의 열유속으로 설정하였으며, 응축부에 초기 물의 온도와 동일한 372.15 K로 설정하였다. 벽면 속도 조건으로 점착조건(No-slip condition)을 부여하였으며, 개방부의 압력은 대기압으로 설정하였다.

전산열유동해석은 OpenFOAM(v2212)[12] 소프트웨어를 이용하였으며, 비압축성 유동에서 포화온도에 따른 상변화 현상을 구현할 수 있는 interCondensatingEvaporatingFoam 솔버를 사용하였다. 또한, 비정상상태 해석을 수행하기 위하여 PIMPEL 알고리즘을 사용하였다.

3. 계산 결과

3.1 격자 독립성 검사

개방형 구조의 진동형 히트파이프에 대한 수치해석 결과의 정확도를 높이기 위하여, 격자 독립성 검사를 수행하였다. 먼저, 격자를 11,086, 23,996, 41,716, 64,594, 92,248개로 각각 생성한 후, 0.3초 동안 양측 개방부에서의 평균 속도를 구하였다. 그 결과를 Fig. 3에 나타내었으며, 41,716개 이상의 격자수부터 속도 값이 수렴되었다. 따라서, 수치해석의 정확도와 계산 시간을 고려하여, 64,594개의 격자수로 전산 열유동해석을 수행하였다.

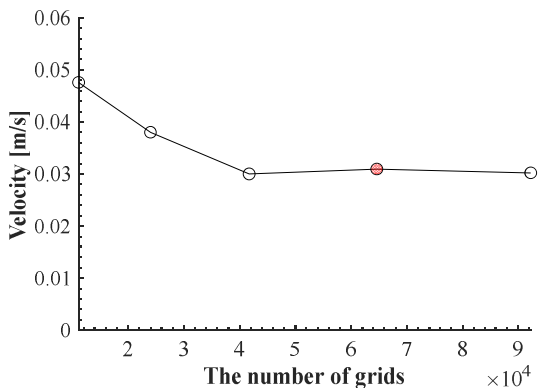


Fig. 3. Velocity variation at open section with the number of grids (L_c / L_e = 0.5)

3.2 유동 가시화

개방형 구조의 진동형 히트파이프 내 작동유체의 상변화에 의한 유동 가시화를 수행하기 위하여, $L_c / L_e = 0.5$에서 시간에 따른 체적분율의 분포를 Fig. 4에 나타내었다. 여기서, 체적분율 1.0은 액체상인 물을 의미하고, 0.0은 기체상인 증기를 의미한다.

Fig. 4(a)-(b)를 보면, 초기에 증발부 열원과 대류열전달에 의하여, 증기 기포가 파이프의 벽면과 중심부에 생성되었다. 이후 Fig. 4(c)-(d)와 같이 기포가 성장 및 병합되었고, 모세관 현상에 의하여 타원형의 증기 플러그 형태로 나타났으며, 액체 슬러그와 함께 개방부로 이동하였다. Fig. 4(e)에서는 형상 내부가 증기 플러그로 가득차게 되고, 양쪽 개방부로 분출되었다. Fig. 4(f)-(h)에서는 양쪽 개방부의 균형이 붕괴되면서, 한쪽 개방부에서 증기가 유출되었고, 반대쪽 개방부에서 물이 지속적으로 유입되었다.

이러한 결과는 선행연구에서 보여준 밀폐형 진동형 히트파이프[13]와 마이크로 채널[14]내에서 형성되는 기포 유동(Bubble flow), 슬러그 유동(Slug flow), 환형 유동(Annular flow)의 형상과 유사하게 나타났다.

3.3 압력 및 속도

개방형 구조의 진동형 히트파이프 내 작동유체의 상변화 과정에서의 내부 압력 분포를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)를 살펴보면, 초기 증발에 의해 발생된 기포의 압력이 개방부의 압력보다 상대적으로 높게 나타났다. Fig. 5(b)에서는 양쪽 개방부의 균형 붕괴로 인하여, 한쪽 개방부의 압력이 낮아져 작동유체가 유입되었으며, 다시 증발 과정을 거쳐, 반대쪽 개방부로 유출되었다.

상변화에 의한 작동유체의 순환 과정에서 속도 변화를 확인하기 위하여, 속도 분포와 속도 벡터를 Fig. 6에 나타내었다. 작동유체가 유입되는 개방부에서의 속도는 상대적으로 낮았으며, 작동유체가 유출되는 개방부에서는 상대적으로 높은 속도와 와류를 동반한 흐름이 발생하였다.

3.4 개방부의 속도 및 추력 비교

왼쪽과 오른쪽 개방부(위치 Fig. 1 참조)에 대하여, 면적 평균 속도 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 양의 속도 값은 유출을 의미하며, 음의 속도 값은 유입을 의미한다. 짧은 시간 동안 상변화

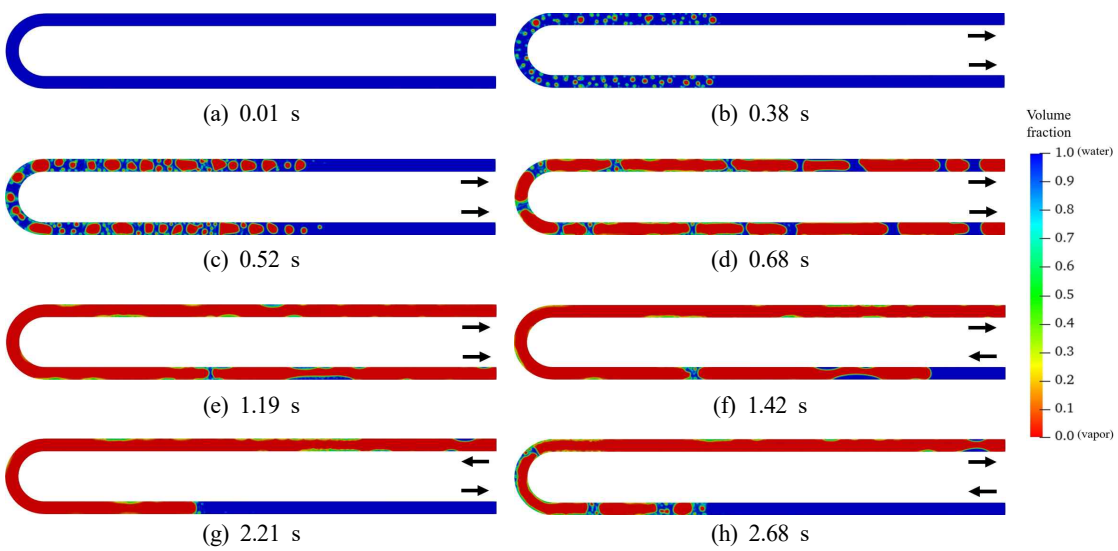


Fig. 4. Distributions of volume fraction with time ($L_c / L_e = 0.5$)

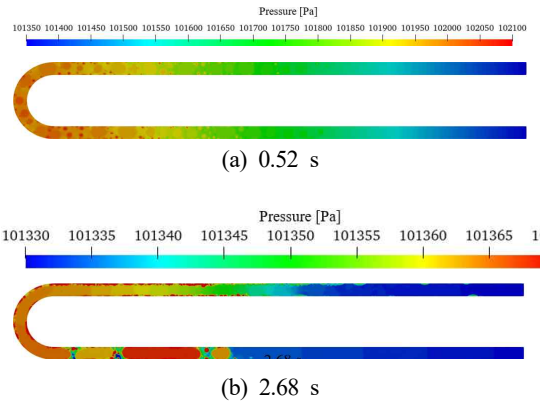


Fig. 5. Pressure distributions in open pulsating heat pipe ($L_c / L_e = 0.5$)

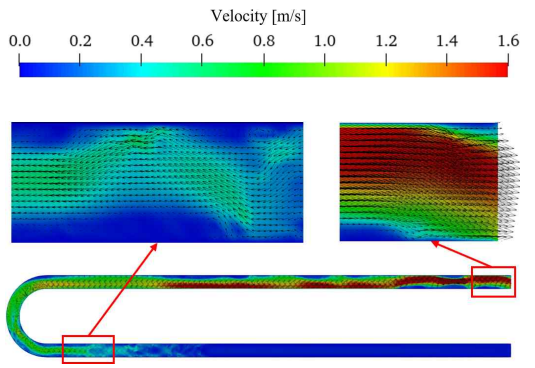


Fig. 6. Velocity distributions and velocity vectors in open pulsating heat pipe ($L_c / L_e = 0.5$, t = 2.68 s)

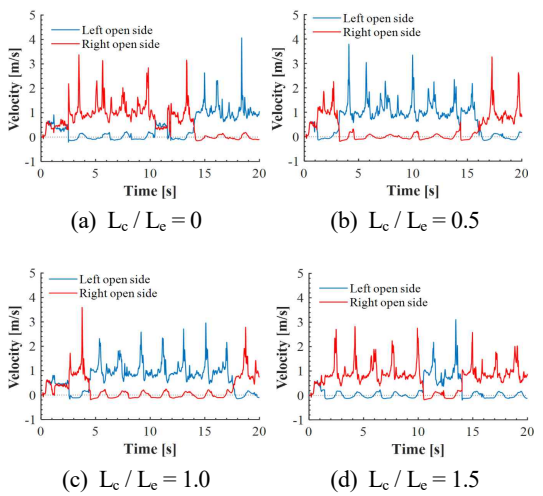


Fig. 7. Velocity variations at left open section and right open section with time

과정이 일어나기 때문에, 작동유체가 유출되는 개방부의 속도는 주기적으로 진동하며, 섭동(Fluctuation) 현상이 발생하였다.

시간에 따른 속도 변화를 살펴보면, 약 1초까지는 초기 작동유체의 증발에 의한 분출 과정으로, 양측 개방부에서 동일한 속도 변화가 나타났다. 그 이후에는 유출과 유입의 순환 과정에 의한 속도 값이 다르게 나타났으며, 양측 개방부에서의 속도 크기를 비교하면 약 20~40배의 차이가 발생하였다. 증발부에 대한 응축부의 길이 비에 따른 그래프를 보면, 모든 결과에서 좌측과 우측 개방부에서 속도 방향이 서로 바뀌는 현상이 나타났다.

길이 비에 따른 최대 속도를 살펴보면, $L_c / L_e = 0$의 경우 좌측 개방부에서 최대 4.07 m/s, $L_c / L_e = 0.5$의 경우 좌측 개방부에서 최대 3.79 m/s, $L_c / L_e = 1.0$의 경우 우측 개방부에서 최대 3.59 m/s, $L_c / L_e = 1.5$의 경우 좌측 개방부에서 최대 3.11 m/s의 속도가 각각 나타났다. 이러한 결과로부터, 증발부에 대한 응축부 길이 비가 증가할수록, 개방부에서 작동유체의 최대 속도가 감소한다는 것을 알 수 있었다. 그러나, 개방부의 평균 속도 값은 비슷하게 나타났다.

개방형 구조의 진동형 히트파이프에서 증발부에 대한 응축부의 길이 비에 따른 개방부의 추력 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 추력은 식(7)을 통해 계산되었다.

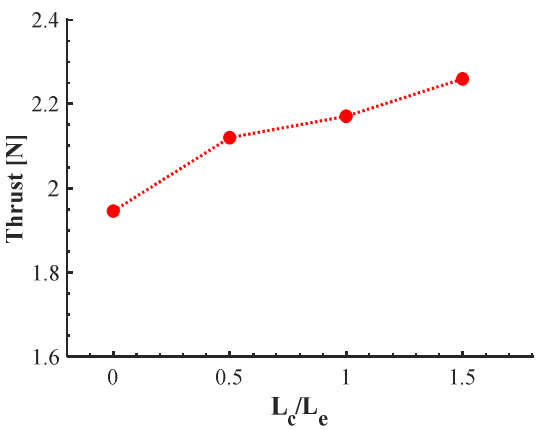


Fig. 8. Thrust variations with ratio of length of condenser section to length of evaporator section

$$F = \sum_{t=0\,s}^{20\,s} (\rho \times A \times \overrightarrow{U_y}) \times \overrightarrow{U_y} \qquad (7)$$

여기서, F는 추력, A는 개방부의 단면적, $\overrightarrow{U_y}$는 유출 속도를 각각 의미한다. 정량적인 비교를 위하여, 20초까지 순수하게 유출되는 작동유체의 유량만을 고려하여 추력을 구하였다. 참고로, Fig. 7에 나타난 것과 같이 유입 속도는 유출 속도에 비하여, 상대적으로 매우 낮은 값을 갖는다.

결과를 살펴보면, 증발부에 대한 응축부의 길이 비가 증가할수록 추력 값은 증가하였다. 응축부의 길이가 존재하지 않는 L_c/L_e=0에서 1.95 N의 가장 낮은 추력이 발생하였으며, 단열부의 길이가 존재하지 않는 L_c/L_e=1.5에서 2.26 N의 가장 높은 추력이 발생하였다.

4. 결 론

이 연구에서는 전산 열유동해석을 통하여, 개방형 구조의 진동형 히트파이프 내 상변화 과정에 대한 유동 가시화를 수행하였으며, 증발부에 대한 응축부의 길이 비에 따른 추력을 계산하였다. 그 결과, 유동 가시화에서는 상변화 과정에서 발생하는 증기 플러그와 액체 슬러그의 발생을 관찰할 수 있었으며, 균형 붕괴로 인한 작동유체의 순환 과정을 확인할 수 있었다. 추력의 경우 증발부에 대한 응축부의 길이 비가 증가할수록 추력이 증가하였다. 향후, 개방형 구조의 진동형 히트파이프의 추력 향상을 위하여, 응축부 온도에 따른 응축부 길이의 영향에 관한 연구를 수행할 계획이다.

Note

This paper is a revised version of a paper presented at the SCNU graduate student competition, January 2023.

REFERENCE

1) Dobson, R. T., 2003, "An Open Oscillatory Heat Pipe Steam-Powered Boat," International Journal of Mechanical Engineering Education, Vol.31(4), pp.339-358.
2) Dobson, R. T., 2004, "Theoretical and Experimental Modelling of an Open Oscillatory Heat Pipe Including Gravity," International Journal of Thermal Sciences, Vol.43, pp.113-119.
3) White, D. E., 1967, "Some Principles of Geyser Activity, mainly from Steamboat Springs, Nevada," American Journal of Science, Vol.265, pp.641-684.
4) Dobson, R. T., 2005, "An Open Oscillatory Heat Pipe Water Pump," Applied Thermal Engineering, Vol.25, pp.603-621.
5) Rao, M., Lefevre, F., Khandekar, S. and Bonjour, J., 2013, "Understanding Transport Mechanism of a Self-Sustained Thermally Driven Oscillating Two-Phase System in a Capillary Tube," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.65, pp.451-459.
6) Rao, M., Lefevre, F., Khandekar, S. and Bonjour, J., 2015, "Heat and Mass Transfer Mechanisms of a Self-Sustained Thermally Driven Oscillating Liquid-Vapour Meniscus," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.86, pp.519-530.
7) Zwier, M. P., Gerner, H. J. V. and Wits, W. W., 2017, "Modelling and Experimental Investigation of a Thermally Driven Self-Oscillating Pump," Applied Thermal Engineering, Vol.126, pp.1126-1133
8) Salome (Version 9.11.0), http://www.salome-platform.org/
9) Lee, W. H., 1980, "Pressure Iteration Scheme for Two-Phase Flow Modelling," Multiphase Transport: Fundamentals, Reactor Safety, Applications, pp.407-432.
10) Kim, Y. C., Choi, J. W., Kim, S. C. and Zhang, Y., 2015, "Effects of Mass Transfer Time Relaxation Parameters on Condensation in

a Thermosyphon," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol.29, No.12, pp.5497-5505.
11) Janczuk, B. and Zdziennicak, A., 1994, "A Study on the Components of Surface Free Energy of Quartz from Contact Angle Measurements," Journal of Materials Science, Vol.29, pp.3559-3564.
12) OpenFOAM(Version 2212) User Guide, http://www.openfoam.com/
13) Liu, X., Sun, Q. and Wu, L., 2016, "High-Speed Visual Analysis of Fluid Flow and Heat Transfer in Oscillating Heat Pipes with Different Diameters," Applied Science, Vol.6, No.11, pp.321.
14) Ganapathy, H., Shooshtari, A., Choo, K., Dessiatoun, S., Alshehhi, M. M. M. O. and Ohadi, M., 2013, "Volume of Fluid-Based Numerical Modeling of Condensation Heat Transfer and Fluid Flow Characteristics in Microchannels," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.65, pp.62-72.