

단순 열전달 모델을 이용한 히트파이프의 열전달 성능 특성에 관한 연구

서재형¹, 방유마¹, 서이수¹, 이무연^{*}
¹동아대학교 기계공학과

Heat transfer characteristics of the heat pipe using simplified heat transfer model

Jae-Hyeong Seo¹, Yu-Ma Bang¹, Lee-Soo Seo¹ and Moo-Yeon Lee^{1*}

¹School of Mechanical Engineering, Dong-A University

요약 본 연구의 목적은 전기동력 자동차의 전기-전자 장비들을 효과적으로 냉각시키면서 자체적으로 에너지 소비를 최소화 시킬 수 있는 노력의 일환으로, 단순 열전달 모델을 이용하여 워이 있는 히트파이프의 열전달 및 유동 특성을 고찰하는 것이다. 이를 위하여 히트파이프는 COMSOL 프로그램을 이용하여 해석하였고, 작동유체로 물을 이용하였다. 또한, 히트파이프의 속도 및 온도 특성을 히트파이프 길이에 따라 해석하였고, 국소 및 평균 Nu수를 계산하였다. 결과적으로, 히트파이프의 관성력은 가열면과 냉각면의 온도차에 의하여 발생하였다. 히트파이프내 열전달은 가열면에서 냉각면으로 발생하고 히트파이프 중앙으로 갈수록 증가하였다. 더불어, 가열면의 Nu수는 최대 4.47로 나타났으며, 평균 Nu수는 1.88이고, 냉각면의 Nu수는 최대 0.7로 나타났으며, 평균 Nu수는 0.1이다.

Abstract The objective of this study was to examine numerically the heat transfer and flow characteristics of the heat pipe with a wick using the simplified heat transfer model to enhance the cooling effects of high heat flux devices and minimizing the energy consumption for electric vehicles. The heat pipe with a wick was analyzed using commercial software with COMSOL and water was used as the working fluid. The velocity and temperature characteristics of the heat pipe were simulated numerically along the heat pipe and the local and average Nusselt numbers were calculated. As a result, the driving force occurred because of the temperature difference between the hot side and the cold side. The heat transfer of the heat pipe occurred from the hot side to the cold side and increased toward the center position. In addition, the average Nusselt numbers were 1.88 for the hot side and 0.1 for the cold side, and the maximum Nusselt number was 4.47 for the hot side and 0.7 for the cold side.

Key Words : Driving force, Heat pipe, Heat transfer, Nusselt number, Wick

1. 서론

전기 동력 자동차는 기존의 내연기관을 대체하는 미래형 자동차 중 많은 관심을 받고 있다. 특히 내연기관과 배터리를 번갈아 가면서 사용하는 하이브리드 전기자동차를 통하여 고전압 배터리를 동력으로 모터를 구동하는

방식에 대한 가능성도 입증되어 가고 있다. 더불어 하이브리드 전기자동차의 발전 방향은 내연기관의 사용을 최소화 하고 배터리의 사용을 증가시키는 방향으로 기술 개발이 되고 있으며, 이러한 노력들은 전기 동력 자동차의 상용화를 가속화 시킬 것으로 기대된다. 전기 동력 자동차는 하이브리드 전기자동차에 비하여 고열량의 전기

본 논문(작품)은 동아대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

*Corresponding Author : Moo-Yeon Lee(Dong-A Univ.)

Tel: +82-10-5440-8421 email: mylee@dau.ac.kr

Received September 23, 2014 Revised November 6, 2014 Accepted January 8, 2015

- 전자장비들을 포함하고 있으며 이러한 전기-전자장비들이 작동시 발생하는 발열을 효과적으로 냉각하는 기술들이 필요하게 되었다. 왜냐하면, 고발열 전기/전자 장비들의 작동효율을 향상시키면 자동차에서 배터리의 사용량을 줄일 수 있어 궁극적으로 전기동력 자동차의 큰 문제 중 하나인 주행거리를 향상시킬 수 있기 때문이다. 그러나 이러한 전기-전자 장비들을 냉각시키기 위해 사용되는 수랭식 또는 공랭식 냉각시스템들은 전기-전자 장비의 발열을 해결하기도 하지만 냉동시스템을 구동하기 위한 동력이 필요한 단점이 있다. 따라서 펌프 또는 압축기 등의 구동을 위한 전력의 소모가 없는 무동력 냉동 및 냉각시스템에 대한 관심이 증가하고 있으며, 히트파이프에 대한 관심이 증가하고 있다. 이러한 히트파이프는 오랜 기간 동안 다양한 연구자들에 의하여 기초 및 응용 연구가 수행되었으며, Park et al. (1998) 2개의 다른 열원을 가지는 히트파이프의 작동 특성에 대하여 고찰하였고, Yin and Lee (1999)는 회전형 히트파이프 개발을 위한 기초 연구를 수행하였다 [1, 2]. Boo and Park (2005)는 환형 히트파이프의 열적 특성에 관하여 실험적으로 연구하였고, Park et al. (2007)은 PCM을 히트파이프에 적용하여 성능특성을 고찰하였다 [3, 4]. 이와 같이 다양한 형상의 히트파이프에 대한 연구가 최근까지 이루어지고 있으며, 이러한 노력의 일환으로 소형 전기/전자 장비에도 활용할 수 있는 중·소형 히트파이프에 대한 연구가 지속적으로 연구되어야 할 필요성이 있다 [5~7]. 따라서 본 연구에서는 전기동력 자동차의 전기-전자 장비들을 효과적으로 냉각시키면서 자체적으로 에너지 소비를 최소화 시킬 수 있는 노력의 일환으로 히트파이프에 대하여 단순모델링을 이용하여 열전달 성능 특성을 수치적으로 고찰하고자 한다.

2. 지배방정식 및 해석 모델

2.1 지배 방정식

본 연구에서는 워(Wick)를 가지는 히트파이프의 열전달 성능을 수치적으로 고찰하기 위하여 상용프로그램인 COMSOL 프로그램을 이용하여 해석하였다. 히트파이프 내부의 열전달 현상을 고찰하기 위하여 방정식 (1)에서 (4)를 이용하였다. 물은 압축성 유체로 가정하였다.

Darcy 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p) + \nabla(\rho \mathbf{u}) = Q_m, \mathbf{u} = -\frac{k}{\mu} \nabla p \quad (1)$$

연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2)$$

에너지 방정식

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \mathbf{u} \nabla T = \nabla(k \nabla T) + Q \quad (3)$$

운동량 방정식

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} =$$

$$\nabla \cdot [-p \mathbf{I} + \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} \mu(\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I}] + \mathbf{F}$$

작동유체가 히트파이프내 워의 다공성 매질을 통과할 때 질량유량을 계산하기 위하여 유체의 밀도, 점성, 매질의 투과성 및 공극률을 고려하여 계산하였고, 중력의 영향은 무시하였다. 또한 히트파이프의 열전달 성능을 계산하기 위하여 방정식 (5)에서 (7)을 이용하였다. 가열면(Hot side)과 냉각면(Cold side)의 Nu수 및 평균 Nusselt number를 계산하였다.

가열면 Nu수

$$Nu_{h,w} = \frac{T - T_{h,w}}{\Delta T} \frac{L}{\Delta y_{h,w}} \quad (5)$$

냉각면 Nu수

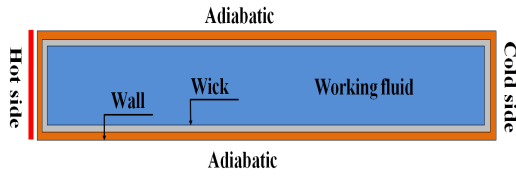
$$Nu_{c,w} = \frac{T - T_{c,w}}{\Delta T} \frac{L}{\Delta y_{c,w}} \quad (6)$$

평균 Nu수

$$\overline{Nu} = \frac{\int_0^L Nu_{h,w} dx}{n + 1} \quad (7)$$

2.2 해석 모델

본 연구에서는 작동유체로 물을 이용하였고, 히트파이프를 모델링하기 위하여 Fig. 1과 같이 단순화 하였으며, 바깥쪽은 외벽, 중간은 워(wick) 및 안쪽은 작동유체인 물을 나타낸다.



[Fig. 1] Simplified model of the heat pipe.

[Table 1] Specifications of the heat pipe

Properties	Specifications
Length of heat pipe (mm)	100
Width of heat pipe (mm)	2.4
Material of wall	Copper (UNS C11000)
Material of wick	Inconel 22 (Hastelloy C-22) (UNS N06022)
Thickness of wick (mm)	0.1
Working fluid	Water / Steam

[Table 2] Simulation conditions

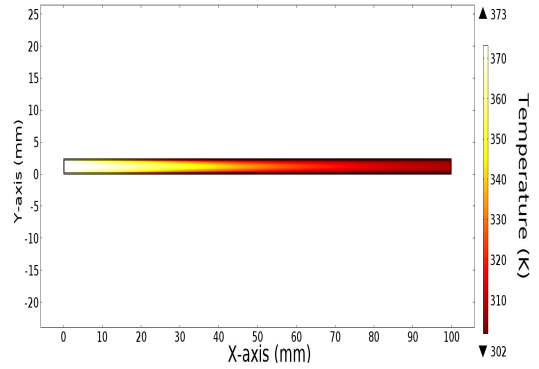
Properties	Conditions
Velocity of working fluid (m/s)	0.5
Input temperature (K)	373.15
Outdoor temperature (K)	293.15
Porosity of wick	0.45

외부 벽의 열전달, 다공성 막으로 이루어진 워에서 작동 유체의 이동 및 물(수증기)의 유동속도에 대한 일차원적인 설계 및 해석을 진행하였고, 본 연구에서 사용된 히트파이프의 사양은 Table 1과 같다. 본 연구에서 사용한 수치해석 조건은 Table 2과 같다. 작동유체의 속도는 0.5 m/s이고 워(Wick)의 다공성 (Porosity)은 0.45이다. 가열면(Hot side) 온도는 373.15K이고 냉각면(Cold side) 온도는 293.15K로 하였다.

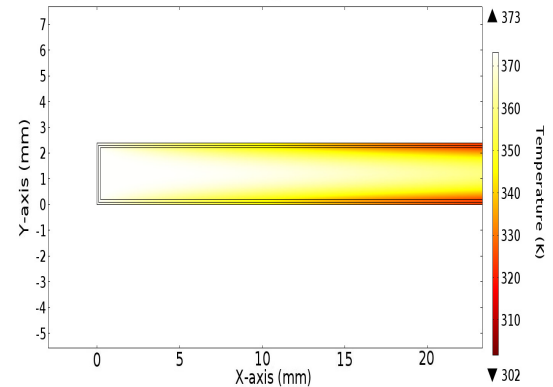
3. 수치해석 결과 및 고찰

3.1 열-유동 특성

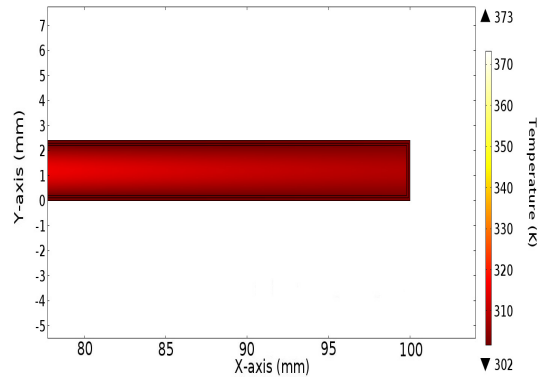
본 연구에서는 워를 가지는 히트파이프의 열전달 성능을 수치적으로 고찰하기 위하여 단순화 된 열전달 모델링을 진행하여 작동유체의 속도 및 온도 분포와 열전달 성능을 고찰하였다.



(a) Heat distribution of the heat pipe



(b) Heat distribution of the hot side

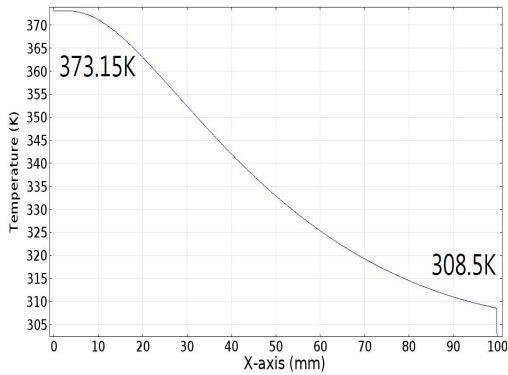


(c) Heat distribution of the cold side

[Fig. 2] Heat distributions of the working fluid in the heat pipe

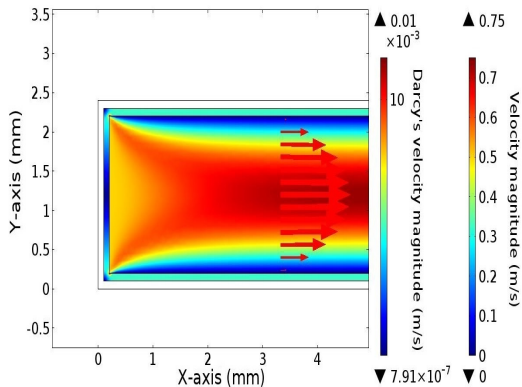
Fig. 2는 히트파이프의 열전달 분포를 길이에 따라 나타내었다. 가열면에서 냉각면으로 열전달이 발생하였으며, Fig. 2 (b)와 (c)에서 알 수 있듯이 가열면에서 냉각면으로 작동 유체가 이동시 외부에서 중앙으로 열전달이 발

생하는 것을 확인할 수 있으며 이러한 열전달은 히트파이프 내부의 작동유체의 구동력으로 작용하였다 [8]. 또한, Fig. 3은 히트파이프의 중심에서 온도 분포를 나타내고 있다. 히트파이프내 작동유체가 가열면에서 냉각면으로 이동시 중심부의 온도는 373.15K에서 308.5K로 감소함을 알 수 있으며, 이는 작동유체가 이동하면서 외부로 열전달이 이루어졌기 때문이다. 또한, 히트파이프의 가열면의 온도가 373.15K이고 외기 온도가 293.15K이었을 경우 냉각면의 최저 온도가 301.62K이다.



[Fig. 3] Temperature distribution of the of the working fluid at the centerline of the heat pipe

Fig. 4은 히트파이프 내부의 작동유체인 물의 속도 분포를 나타낸다. 히트파이프 내부 작동유체의 온도는 히트파이프 중앙부로 갈수록 증가하는 것을 확인할 수 있었고, 좌측면과 우측면에 온도 차에 관성력이 발생함을 알 수 있다 [9].

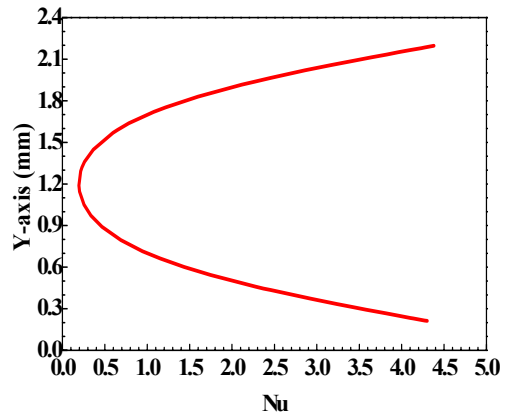


[Fig. 4] Velocity distribution of the working fluid in the heat pipe

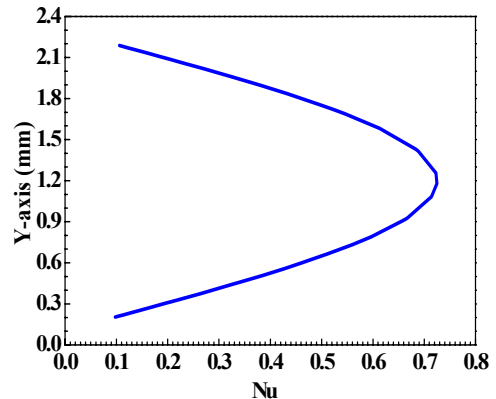
또한, 히트파이프 내부의 최대 유동 속도는 0.75m/s 이고 워 내부의 최대 속도는 0.011m/s 이다.

3.2 Nusselt numbers

Fig. 5은 히트파이프의 가열면과 냉각면에서의 Nu수를 나타낸다. 가열면 근처 2 mm에서 최대 Nu은 4.47이고 최소 Nu은 0.3이며, 평균 Nu는 1.88이다. 즉, 가열면에서는 전도보다는 대류에 의한 열전달이 우세하게 나타남을 알 수 있으며, 중앙의 경우 유체의 열흐름이 바깥쪽보다 빠르므로 가열면과의 온도 차가 감소하여 바깥쪽보다 Nu수가 작게 나타난다. 냉각면 근처 98mm에서 최대 Nu은 0.7이고 최소 Nu은 0.1이며, 평균 Nu는 0.4로 나타났으며, 주된 열전달은 전도임을 알 수 있다. 그러나 중앙의 경우 유속의 영향으로 인하여 작동 유체의 온도가 주위보다 높아져 Nu수가 상대적으로 증가하였다.



(a) Nu for hot side



(b) Nu for cold side

[Fig. 5] Nusselt numbers of the heat pipe

4. 결론

본 연구는 히트파이프의 열전달 성능 특성을 파악하기 위하여 단순 열전달 모델링을 이용하여 바깥쪽은 외벽, 중간은 워(wick) 및 안쪽은 작동유체인 물로 모델링하고, 외부 벽의 열전달, 다공성 막으로 이루어진 워와 히트파이프 내부에서 작동유체에 대한 일차원적인 해석을 진행하였고, 히트파이프 길이에 따른 온도, 속도 및 Nu를 수치적으로 해석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 히트파이프 내 작동유체가 가열면에서 냉각면으로 이동시 외부에서 증상으로 열전달이 발생하였다.
- 2) 작동유체는 워의 경우 다공성 막을 통과하기 때문에 낮은 열전달 속도를 보이고, 최소 열전달 속도는 양끝 및 모서리 부분에서 나타났다.
- 3) 가열면의 Nu수는 최대 4.47로 나타났으며, 평균 Nu수는 1.88이다.
- 4) 냉각면의 Nu수는 최대 0.7로 나타났으며, 평균 Nu수는 0.1이다.

References

[1] Jong Heung Park, Hong-Koo Noh and Jae-Heon Lee, 1998, "Operating Characteristics of a Heat Pipe with Two Heat Sources", KSME int. J. (B), Vol. 22, No.3, PP. 303-315

[2] Kwang Bin Yim and Jin Sung Lee, 1999, "A Fundamental Study on Development of a Rotating Horizontal Heat pipe", Energy Engg. J., Vol. 8, No. 2, pp. 325-332

[3] Joon Hong Boo and Soo Yong Park, 2005, "An Experimental Study on the Thermal Performance of a Concentric Annular Heat Pipe", KSME Int. J. Vol. 19, No. 4 pp. 1036-1043

[4] Young Hark Park, Eui Guk Jung and Joon Hong Boo, 2007, "A Study on the Performance Characteristics of a Heat Pipe Combined with PCM", KSME int. J., Vol pp. 1460-1464.

[5] Sang-Hyun Noh and Dong-Ryul Lee, 2006, "Cooling Method of the Actuating Motor Using Heat Pipe", Tran. SAREK, pp. 1168-1173

[6] H. Y. Jun and J. H. Kim, 2006, "Thermal Analysis of Surface Heat Pipe Installed Panel of Geostationary Satellite" KSCFE, Vol. 11, No. 3, pp. 8-13

[7] Dong-Ryul Lee, 2006, "Investigation of Cooling Performance of the Driving Motor Utilizing Heat Pipe", KSPSE, Vol. 10, No.4, pp. 11-16

[8] Hiroaki Ishikawa, Takehide Nomura, Tetsuro Ogushi, Hiroyuki Noda, Haruo Kawasaki and Takahiro Yabe, 2009, "Study on Heat Transfer Characteristics of Reservoir Embedded Loop Heat Pipe (Influence of Condenser Cooling Method on Heat Transfer Characteristics)", Heat Transfer- Asian Research 38 (2), pp. 118-133
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/htj.20229>

[9] L. Rosso, N. Koneva and V. Ferricola, 2009, "Development of a Heat-Pipe-Based Hot Plate for Surface-Temperature Measurements", Int. J. Thermophys, 30:257-264
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10765-008-0495-9>

서재형(Jae-Hyeong Seo)

[정회원]



- 2008년 2월 : 동아대학교 기계공학과 (공학사)
- 2011년 2월 : 동아대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 (공학박사과정)

<관심분야>

친환경 자동차 열관리, 열/물질 전달, 나노유체

방유마(Yu-Ma Bang)

[준회원]



- 2008년 3월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 (공학사과정)

<관심분야>

열/물질전달, 나노유체, 히트 파이프

서 이 수(Lee-Soo Seo)

[정회원]



- 1991년 8월 : 고려대학교 기계공학부 (공학박사)
- 1981년 3월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

유체공학, 터보기계, 유압공학, 나노유체

이 무 연(Moo-Yeon Lee)

[정회원]



- 2010년 2월 : 고려대학교 기계공학부 (공학박사)
- 2011년 2월 ~ 2012년 8월 : 자동차부품 연구원 선임연구원
- 2012년 9월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

친환경 자동차 열관리, 열/물질전달, 연료전지, 나노유체