

유효열이송거리가 고온 태양열기기용 액체금속 히트파이프의 열전달 특성에 미치는 영향

박철민*, 부준홍**, 김진수***, 강용혁***

*한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과(cmpark@kau.ac.kr),

**한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부(jhboo@kau.ac.kr),

***한국에너지 기술연구원 신재생에너지 연구본부

Influence of the Effective Thermal Transport Length on the Heat Transfer Characteristics of a Liquid-Metal Heat Pipe for High-temperature Solar Thermal Devices

Park, Cheol-Min*, Boo, Joon-Hong**, Kim, Jin-Soo***, Kang, Yong-Heack***

*Dept. of Aerospace & Mechanical Engineering, Graduate School, Korea Aerospace University(cmpark@kau.ac.kr),

**School of Aerospace & Mechanical Engineering, Korea Aerospace University(jhboo@kau.ac.kr),

***New and Renewable Energy Research Division, Korea Institute of Energy Research

Abstract

Cylindrical stainless-steel/sodium heat pipe for a high-temperature solar thermal application was manufactured and tested for transient and steady-state operations. Two layers of stainless-steel screen mesh wick was inserted as a capillary structure. The outer diameter of the heat pipe was 12.7 mm and the total length was 250 mm. The effective heat transport length, the thermal load, and the operating temperature were varied as thermal transport conditions of the heat pipe. The thermal load was supplied by an electric furnace up to 1 kW and the cooling was performed by forced convection of air. The effective thermal conductivity and the thermal resistance were investigated as a function of heat flux, heat transport length, and vapor temperature. Typical range of the total effective thermal conductivity was as low as 43,500 W/m · K for heat flux of 176.4 kW/m² and operating temperature of 1000 K

Keywords : 고온 히트파이프(High-temperature heat pipe), 열이송 조건(Thermal transport conditions), 유효열전도율(Effective thermal conductivity), 열저항(Thermal resistance)

접수일자 : 2008년 10월 31일, 심사완료일자: 2008년 11월 14일

교신저자 : 부준홍(jhboo@kau.ac.kr)

기 호 설 명

A	: 히트파이프의 단면적 (m^2)
k_{eff}	: 유효열전도율 ($W/m \cdot K$)
L_{adia}	: 단열부 길이 (m)
L_{cond}	: 응축부 길이 (m)
L_{eff}	: 열효열이송 길이 (m)
L_{evp}	: 증발부 길이 (m)
Q	: 열부하 (W)
R_{th}	: 열저항 (K/W)
T_{cond}	: 응축부 온도 (K)
T_{evp}	: 증발부 온도 (K)

1. 서 론

히트파이프는 작동유체의 상변화 에너지를 이용하므로 작은 온도차에서 큰 열을 이송할 수 있는 우수한 열전달 특성과 별도의 부가 동력을 필요로 하지 않는 특징을 가지고 있다. 고온 히트파이프는 작동온도 477°C 이상으로 구분하고 세슘(cesium), 나트륨(sodium) 그리고 칼륨(potassium) 등의 액체 금속을 작동유체로 사용한다. 고온용 히트파이프의 작동원리는 저온용 히트파이프와 동일하나 작동까지 일정기간을 필요하는 시동 특성을 가진다.¹⁾

Buffone et al.²⁾은 로켓 노즐의 외벽의 냉각을 위한 액체금속 히트파이프를 수치해석으로 외벽의 최대 온도 경향을 분석하였고, Boman et al.³⁾은 극초음속 리딩엣지 부분에 사용될 액체금속 히트파이프의 실험을 통해 표면온도를 측정하는 실험적 연구를 진행하였다. Cao et al.⁴⁾은 불응축 가스 효과를 포

함한 소형 고온 히트파이프의 회전에 대한 해석을 통해 불응축 가스가 미치는 영향을 분석했으며 Zhao et al.⁵⁾은 나트륨 히트파이프의 작동 기울기 영향에 대한 해석을 수행하였다.

Ko et al.⁶⁾은 나트륨 히트파이프의 제작과 실험을 통해 히트파이프의 성능, 작동특성 등을 확인하는 연구를 수행하였으며, Park et al.⁷⁾은 원관형 나트륨 히트파이프의 장기 수명시험을 통해 수명 보장 및 신뢰성 획득을 위한 연구를 수행하였으나, 이들의 실험은 증발부, 응축부 그리고 유효열이송거리를 고정된 상태에서 실험하여 각 영역의 길이 변화에 대한 영향을 나타내지 않았다.

본 연구에서는 고온 태양열 반응로 등에 적용할 나트륨 히트파이프의 기초 성능자료를 얻는 목적으로 직경 12.7 mm, 전체 길이 250 mm의 고온 나트륨 히트파이프에서 다양한 열이송 조건의 변화를 통해 열적특성을 파악하는 실험적 연구를 수행하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

고온 나트륨 히트파이프의 설계, 제작 및 실험을 수행하였다. 주요변수로 유효열이송 거리를 선택하였으며, 자세한 실험장비 및 방법은 다음과 같다.

2.1 히트파이프의 제작

본 연구에서 제작한 히트파이프의 개략구조와 열전대 위치를 그림 1에 나타내었으며,

Rotating Miniature High-Temperature Heat Pipes Including Non-Condensable Gas Effects," *International Journal Heat Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 3661-3671, 2000

1) Faghri, A. *Heat Pipe Science and Technology*, Taylor & Francis, pp.19-24, 1995

2) Buffone, C., Bruno, C. and Sefiane, K., *Liquid Metal Heat Pipes for Cooling Rocket Nozzle Walls*, 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2003

3) Boman, B. and Elias, T., *Tests on a Sodium/Hastelloy X Wing Leading Edge Heat Pipe for Hypersonic Vehicles*, AIAA/ASME 5th Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference, 1990

4) Cao, Y. and Ling, J., "Closed-Form Analytical Solutions for Radially

5) Zhao, W., Zhuang, J. and Zhang, H., "Influence of the inclination angle on the operational performance of a miniature high-temperature sodium heat pipe," *The 7th international heat pipe symposium*, 2003

6) 고영기, 김경천, 이영, 이승홍, 윤순현, 고온용 나트륨 히트파이프의 제작 및 성능시험에 관한 연구, 대한설비공학회 동계학술발표회 논문집, pp. 269 ~ 274, 1998

7) 박수용, 정의국, 부준홍, 강환국, 유정현, 박상훈, 스테인리스 스틸 나트륨 히트파이프의 장기 수명 시험, 대한기계학회 추계학술대회논문집, pp. 1058 ~ 1062, 2004

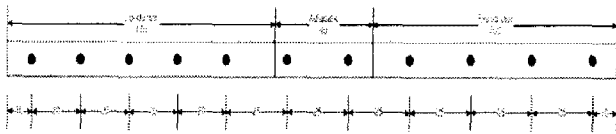


그림 1. 히트파이프와 열전대 위치 개략도

상세한 히트파이프의 제원을 표 1에 나타내었다. 히트파이프의 전체 길이는 250 mm로 제작하였으며, 유효열이송거리의 변화를 위해 증발부 100 mm, 단열부 20 ~ 85 mm, 응축부 65 ~ 130 mm의 범위에서 변화를 주었다. 작동유체 귀환의 용이성을 위해 스크린메쉬(표 1 참조)를 모세 구조물로 사용하였고 작동유체는 나트륨을 사용하였다.

2.2 작동유체

작동유체의 충전률은 이전에 실험을 통해 최적 충전률 범위를 정했으며, 작동유체로 사용한 나트륨은 순도 99.3%의 상용제품으로 아르곤을 가득 채운 진공 챔버 안에서 주입하였다. 또한, 이를 더 정제하기 위하여 리플렉스(reflux) 방법을 수행하여 불순물을 제거한 후에 무게를 측정하여 워 구조물 기준 공급률 기준으로 122%의 주입량을 산정하였다.

2.3 실험장비 구성

히트파이프의 온도를 측정하기 위해 고온에서 견딜수 있는 silica 피복으로 쌓인 k-type 열전대 11개를 부착하였다. 증발부와 단열부에 25 mm 간격으로 7개의 열전대를 부착하였으며, 특히 불응축성 기체의 응집 가능성과 고온 히트파이프의 시동특성을 간

접적으로 파악할 수 있도록 응축부에 20 mm 간격으로 4개의 열전대를 조밀하게 부착하였다. 증발부에 전기저항식 세라믹 복사가열로를 설치하고, 전압조절기를 통해 일정한 열부하를 공급할 수 있도록 하였다. 응축부에는 직육면체 형태의 알루미늄 케이스를 제작하여 케이스 안에 응축부가 삽입되도록 하였다. 또한, 냉각팬을 통해 강제대류 냉각이 될 수 있도록 실험 장치를 구성하였고 입·출구의 공기 온도와 질량유량을 측정하여 열손실을 측정하였으며 복사에 의한 열손실률은 입력 열부하의 20 ~ 30%로 파악되었다. 아래에 제시되는 열부하를 히트파이프의 증발부 표면적을 기준한 열유속과 축방향 단면적을 기준한 열유속으로 나타내면 아래 표 2와 같다.

3. 실험결과 및 분석

본 연구에서 모든 경우에 대해 히트파이프의 기울기는 수평으로 유지하였다. 또한, 상대적 비교의 공통조건을 만들기 위해 증발부 길이를 100 mm로 고정한 상태로 유효열이송거리에 변화를 주기 위해 단열부의 길이를 조절하였다.

유효열이송거리는 식(1)로 계산하였으며 135 mm, 140 mm, 145 mm, 150 mm, 157.5 mm 그리고 167.5 mm로 변화시켜 500 W의 입력 열부하로 실험을 시작하였고 정상상태에 도달하는 것을 확인한 후에 100 W 간격으로 열부하를 증가시키되 가열로의 최대 성

표 1. 히트파이프의 제원

Pipe O. D.(mm)	12.7
Pipe I.D.(mm)	10.7
Pipe length(mm)	250
Pipe material	stainless steel 316
Mesh material	stainless steel 316, mesh No.60, 2 layers
Working fluid	sodium

표 2. 열부하에 따른 열유속

입력 열부하 (W)	유효 열부하 (W)	증발부표면 열유속 (kW/m ²)	축방향 열유속 (kW/m ²)
500	403	107.1	4308.6
600	458	114.8	4892.0
700	504	126.3	5381.8
800	568	142.4	6064.6
900	640	160.5	6840.0
1000	706	176.9	7537.9

능범위를 고려하여 1 kW의 입력 열부하까지 실험을 수행하였다. 히트파이프의 외벽의 고온부식을 방지하기 위하여 외벽의 온도가 800°C를 초과하지 않도록 하였다.

$$L_{eff} = L_{adia} + \frac{L_{exp} + L_{cond}}{2} \quad (1)$$

고온 나트륨 히트파이프의 유효열이송거리에 대한 열성능을 비교하여 열이송 특성 및 유효열전도율 성능 특성에 미치는 영향을 살펴보고, 각 내용은 다음과 같다.

3.1 유효열이송거리 변화에 따른 축방향 온도 변화

그림 2는 유효열이송거리가 135 mm인 히트파이프의 입력 열부하에 대한 축방향 온도 변화를 나타낸 자료로 600 W 이하의 입력 열부하에서 전 구간에 걸쳐 작동을 하지 않았으며 응축부와 증발부의 온도차가 약 300 ~ 400°C 였으나 700 W 이후 온도차가 감소하는 경향을 보였으며, 1 kW의 입력 열부하 그림 3은 유효열이송거리가 150 mm인 히트파이프의 입력 열부하에 대한 축방향 온도변화를 나타낸 자료이다. 500 W의 입력 열부하에서 응축부와 증발부의 온도차가 약 100°C 였으나, 700 W 이후 온도차가 약 30 ~ 50°C로 감소하는 경향을 보였다.

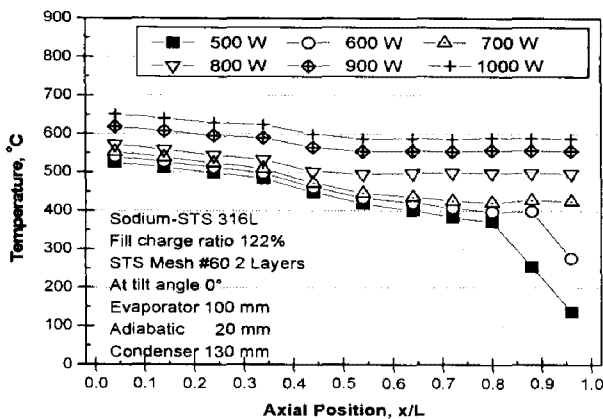


그림 2. 유효열이송거리가 135 mm인 히트파이프의 축방향 온도 변화

그림 4은 유효열이송거리가 167.5 mm인 히트파이프의 입력 열부하에 대한 축방향 온도를 나타낸 자료로 600 W 이하의 입력 열부하에서 응축부와 증발부의 온도차가 약 30 ~ 40°C 였으나 900 W에서 온도차가 약 50°C로 증가하는 경향을 보였다. 입력 열부하의 증가에 따라 히트파이프의 온도가 전체적으로 50 ~ 80°C 상승하였으며, 증발부 외벽의 온도가 800°C를 넘어 실험을 중단하였다.

유효열이송거리의 증가로 인해 히트파이프가 전 구간에 걸쳐 작동하는데 요구되는 열 유속이 감소하여 600 W 이하의 입력 열부하에서는 유효열이송거리가 길수록 응축부와

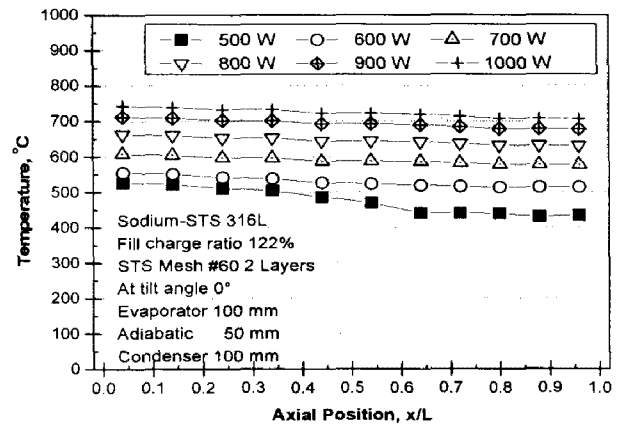


그림 3. 유효열이송거리가 150 mm인 히트파이프의 축방향 온도 변화

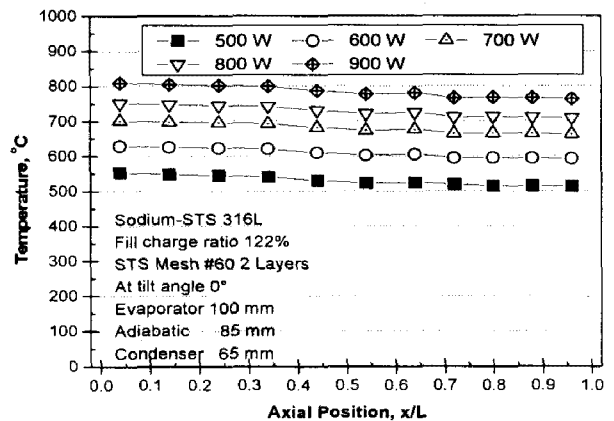


그림 4. 유효열이송거리가 167.5 mm인 히트파이프의 축방향 온도 변화

증발부의 온도차가 낮게 나타났다. 하지만, 700 W 이후의 입력 열부하에서는 유효열이송거리의 길이가 140 ~ 150 mm 히트파이프에서 온도차가 낮게 측정되었다.

3.2 유효열이송거리 변화에 따른 열전달 특성 분석

(1) 작동온도

그림 5는 유효열이송거리 변화에 대한 히트파이프의 작동온도를 비교한 자료로 열유속의 증가에 따라 히트파이프의 작동온도가 25 ~ 80°C 상승하는 경향을 보였다. 또한, 유효열이송거리의 증가에 따라 작동온도가 증가하는 경향이 나타났으며, 그 원인을 유효열이송거리의 증가로 인해 상대적으로 응축부의 길이가 감소하여 히트파이프 내부 온도가 상승한 것으로 판단하였다.

(2) 열저항

그림 6은 유효열이송거리의 변화에 대한 히트파이프의 열저항을 비교하였고 열저항은 식(2)로 계산하였다.

$$R_{th} = \frac{T_{evp} - T_{cond}}{Q} \quad (2)$$

유효열이송거리가 135 ~ 145 mm인 히트파이프에서 유효열이송거리의 증가에 따라 열저항이 감소하는 경향을 보이며, 유효열이송거리가 145 mm인 히트파이프에 입력 열

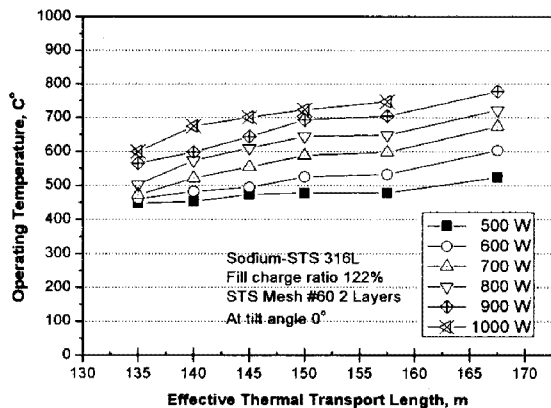


그림 5. 유효열이송거리의 변화에 대한 작동온도

입력 열부하에서는 유효열이송거리가 길수록 유효열전도율이 증가하는 경향을 보였으나 700 W 이상의 입력 열부하에서 유효열이 부하가 900 W인 경우, 열저항이 0.035 °C/W로 가장 낮게 나타났다. 한편, 유효열이송거리가 150 ~ 167.5 mm인 히트파이프에서는 열저항이 다시 증가하는 경향을 보였다.

(3) 유효열전도율

그림 7은 유효열이송거리의 변화에 대한 유효열전도율을 나타내었고 유효열전도율은 식(3)으로 계산하였다.

$$k_{eff} = \frac{Q \times L_{eff}}{A(T_{evp} - T_{cond})} \quad (3)$$

열유속의 증가에 따라 유효열전도율이 점차 증가하는 경향을 보였다. 600 W 이하의 송거리가 145 mm, 150 mm인 히트파이프의

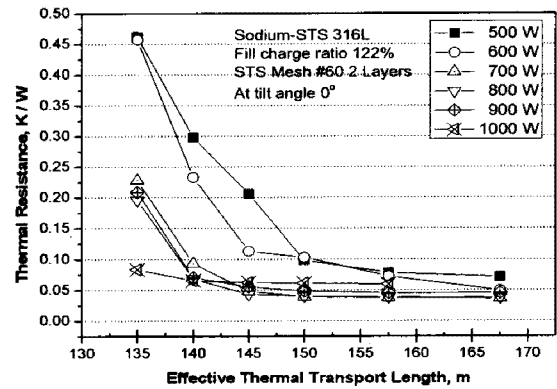


그림 6. 유효열이송거리의 변화에 대한 열저항

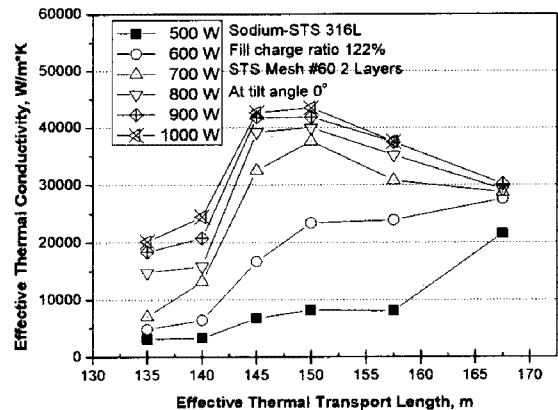


그림 7. 유효열이송거리의 변화에 대한 유효열전도율

유효열전도율 값이 42,600 ~ 43,500 W/m·K으로 측정되어 유효열이송거리가 157.5 mm, 167.5 mm인 히트파이프의 유효열전도율 범위보다 6,000 ~ 13,000 W/m·K 정도 높게 나타났다.

또한, 논문에서의 본 실험자료는 히트파이프의 경사각이 0°(수평)인 상태에서의 값이므로, 증발부가 응축부보다 아래에 위치하는 경사각이 이루어지는 경우에는 보다 높은 열전달 성능이 가능할 것으로 예상할 수 있다.

유효열이송거리가 더 길게 설계된 히트파이프에 비해 증발부와 응축부의 비율이 1:1에 가까운 히트파이프의 성능이 우수하게 나타난 것을 통해 일정한 증발부 길이에서 유효열이송거리가 증가할수록 응축부 길이가 짧아진 것이 원인으로 추측된다.

4. 결론

고온 태양열기기에 사용할 목적으로 제작한 나트륨 히트파이프에서 열전달 특성에 대한 자료를 얻기 목적으로 유효열이송거리의 변화에 따른 실험을 수행한 결론은 다음과 같다.

- (1) 증발부의 길이가 일정한 경우에 유효열이송거리의 증가는 응축부 길이의 감소로 인한 히트파이프 내부 온도의 상승에 영향을 주었다.
- (2) 유효열이송거리가 더 길게 설계된 히트파이프에 비해 증발부와 응축부의 비율이 1:1에 가까운 히트파이프의 성능이 우수하게 나타났다.
- (3) 유효열이송거리의 증가가 반드시 히트파이프의 성능 향상에 관련된 것이 아니며 히트파이프가 최적 조건에서 작동하기 위해서 증발부와 응축부에 대한 고려도 매우 중요하다고 판단된다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원의 지원

으로 수행되었으며, 이에 감사한다.

참 고 문 헌

1. Faghri. A, Heat Pipe Science and Technology, Taylor & Francis, pp.19-24, 1995
2. Buffone. C., Bruno. C. and Sefiane. K., Liquid Metal Heat Pipes for Cooling Rocket Nozzle Walls, 39th AIAA/ASME /SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2003
3. Boman. B. and Elias. T., Tests on a Sodium/Hastelloy X Wing Leading Edge Heat Pipe for Hypersonic Vehicles, AIAA/ASME 5th Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference, 1990
4. Cao. Y. and Ling. J., Closed-Form Analytical Solutions for Radially Rotating Miniature High-Temperature Heat Pipes Including Non-Condensable Gas Effects, International Journal Heat Mass Transfer, Vol. 43, pp. 3661~3671, 2000
5. Zhao. W., Zhuang. J. and Zhang. H., Influence of the Inclination Angle on the Operational Performance of a Miniature High-temperature Sodium Heat Pipe, The 7th International Heat Pipe Symposium, 2003
6. 고영기, 김경천, 이영, 이승홍, 윤순현, 고온용 나트륨 히트파이프의 제작 및 성능시험에 관한 연구, 대한설비공학회 동계학술발표회 논문집, pp. 269 ~274, 1998. 11
7. 박수용, 정의국, 부준홍, 강환국, 유정현, 박상훈, 스테인리스 스틸 나트륨 히트파이프의 장기 수명 시험, 대한기계학회 추계 학술대회논문집, pp. 1058 ~1062, 2004. 11