

태양열 반응로용 나트륨 히트파이프의 열이송 특성에 관한 실험적 연구

*부 준홍¹⁾, 박 철민²⁾, **김 진수³⁾, 강 용혁⁴⁾

An Experimental Study on the Heat Transport Characteristics of a Sodium Heat Pipe for a Solar Furnace

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

Key words : High Temperature(고온), Fill Charge Ratio(충전율), Thermal Resistance(열저항), Sodium(나트륨), Heat Pipe(히트파이프), Effective Thermal Conductivity(유효열전도율)

Abstract : Cylindrical stainless-steel/sodium heat pipe for a high-temperature application was manufactured and tested for transient and steady-state operations. The container material was made of stainless-steel 316, and the working fluid was sodium. Stainless-steel 316 mesh screen was inserted as a capillary structure. The working fluid fill charge ratio was approximately 64 ~ 181% based on the pore space of the wick. The outer diameter of the heat pipe was 12.7 mm and the total length was 250 mm. The evaporator part was 150 mm and the condenser 80 mm. The performance test of the heat pipe has been conducted in the furnace with up to 800 W. The variation of the average heat transfer coefficient was investigated as a function of heat flux and vapor temperature. As input thermal load increased, it was showed that difference of temperatures in evaporator and condenser decreased and that operating section and heat transfer characteristics at the heat pipe increased.

Nomenclature

k_{eff} : effective thermal conductivity, W/m °C
Q : thermal load, W
 R_{th} : thermal resistance, °C/W
T : temperature, °C

subscript

adia : adiabatic
avg : average
cond : condenser
eff : effective
evp : evaporator

해 고온 범위에서도 산업설비와 고온 열교환기, 그리고 고온 화학 반응로 등에 다양하게 적용 및 연구가 이루어지고 있다⁽¹⁾.

국내의 경우 고온용 히트파이프의 작동유체로 사용되는 알칼리 금속들이 취급에 어려운 점이 있어 저온용 히트파이프에 비하여 관련 연구가 상대적으로 부족하다고 판단된다. 나트륨 히트파이프의 제작과 실험을 통해 성능, 작동특성 등을 확인⁽²⁾하거나, 원관형 나트륨 히트파이프의 장기수명시험을 통해 수명 보장 및 신뢰성 획득하기 위한 연구⁽³⁾들이 있었다. 한편, 고온 배기열 폐열 회수용 열교환기에 적용할 히트파이프에 대한 등의 연구⁽⁴⁾가 진행되었다.

본 연구에서는 고온, 태양열 반응로 등에 적용할 기초 성능자료를 얻을 목적으로 직경 12.7 mm,

1. 서론

히트파이프는 작동유체의 상변화(phase change)에너지를 이용하므로 작은 온도차에서도 큰 열을 이송할 수 있는 우수한 열전달 특성과 별도의 부가동력을 필요로 하지 않는 장점으로 인

-
- 1) 한국항공대학교 공과대학 항공우주 및 기계공학부
E-mail : jhboo@kau.ac.kr
Tel : (02)300-0107 Fax : (02)3158-2191
 - 2) 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 대학원
 - 3) 한국에너지기술연구원
 - 4) 한국에너지기술연구원

총길이 250 mm의 소형 고온 히트파이프를 대상으로 하였다. 이는 기존의 많은 연구가 직경 25.4 mm, 길이 1 m의 히트파이프를 사용한 것에 비해 상대적으로 작은 크기이다. 이러한 소형 히트파이프에 대해 입력 열부하와 충전율에 대한 실험 결과를 비교하여 열이송 특성에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 연구에서 제작한 나트륨 히트파이프의 개략구조와 열전대 위치를 Fig. 1에 나타내었으며 상세한 히트파이프의 제원을 Table. 1에 나타내었다. 히트파이프의 총길이는 250 mm로 증발부 150 mm, 단열부 20 mm, 응축부 80 mm의 길이로 제작하였으며 작동유체 귀환의 용이성을 위해 스크린 메쉬(Table. 1 참조)를 모세관 구조물로 사용하였고 작동유체는 Sodium을 사용하였다.

히트파이프의 온도를 측정하기 위해 고온용 세라믹 섬유 피복의 열전대(AWG 24, K-type)를 9개를 부착하였다. 증발부에 45 mm 간격으로 4개를 부착하였으며 단열부에 1개를 부착하였다. 특히, 불응축성 기체의 응집 가능성과 고온형 히트파이프의 시동특성을 간접적으로 파악할 수 있도록 응축부에 20 mm 간격으로 4개를 조밀하게 배치하였다. 증발부에 전기 저항식 세라믹물드 히터 2개를 상하로 부착하여 전압조절기를 통한 일정한 열부하를 공급할 수 있도록 하였다. 응축부는 공기 중에서 자연대류와 복사를 통해 냉각될 수 있도록 실험 장치를 구성하였고 실험장치의 개략구조를 Fig. 2에 나타내었다.

제작한 고온용 히트파이프의 작동유체로 사용한 나트륨은 알칼리 금속계열이므로 공기 중에 노출되었을 때 급속히 산화되고 할로젠, 산소, 물 등과 격렬하게 반응하므로 아르곤으로 가득 채워진 진공 챔버 안에서 나트륨을 충전하였다. 주입한 나트륨은 순도 99.3%의 상용제품을 사용

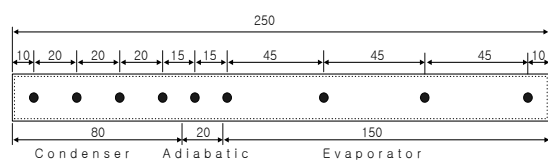


Fig. 1 Schematic of the sodium heat pipe in this study and the thermocouple locations

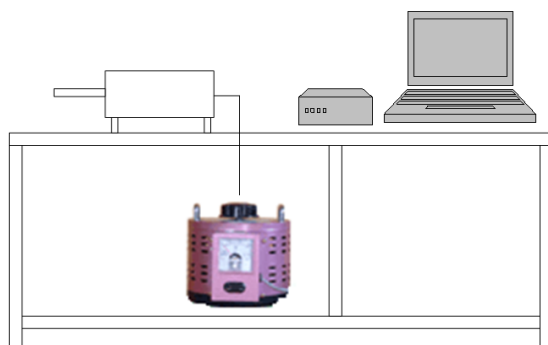


Fig. 2 Schematic of the experimental setup

Table 1 Dimensions/materials of heat pipe

Pipe O. D.(mm)	12.7
Pipe I. D.(mm)	10.7
Pipe length(mm)	250
Pipe material	Stainless Steel 316
Capillary structure	Stainless Steel 316, screen 60 mesh, 1 layer
Working fluid	Sodium

하였으며 이를 더 정제하기 위하여 리플럭스(reflux) 방법을 통해 증기를 토출한 후 무게를 측정하였고 워 구조물을 기준으로 각각 0.5 g(충전율 64%), 0.7 g(충전율 88%), 1.17 g(충전율 150%) 그리고 1.41 g(충전율 181%)의 충전량을 산정하였다.

태양열 반응로용 나트륨 히트파이프의 열이송 특성자료를 얻을 목적으로 동일한 절차와 실험조건에서 나트륨 충전율과 입력 열부하를 변수로 실험을 진행하였다. 입력 열부하는 200 W부터 50 W 단위로 증가시켜가며 실험을 실시하였으며 안전을 위해 증발부 외벽 최고온도가 1000℃를 초과하는 경우 실험을 종료하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 충전율 변화에 따른 작동특성

Fig. 3은 나트륨 충전율 64%인 히트파이프의 축 방향에 대한 온도변화를 나타내며 열부하의 증가에 따라 응축부의 작동구간이 증가하는 경향을 보인다. 400 W의 입력 열부하에 전 구간이 걸쳐 작동되는 경향을 보였으나, 직후 응축부와 증발부가 큰 온도 차를 보이며 작동이 중단되어 실험을 중단하였다.

Fig. 4는 나트륨 충전율 88%인 히트파이프의 축 방향에 대한 온도변화를 나타내며 열부하의 증가에 따라 응축부의 작동구간이 증가하는 경향을 보인다. 350 W의 입력 열부하에서 전 구간이 걸쳐 작동되는 경향을 보였으나, 450 W의 열부하에서 응축부와 증발부의 큰 온도차를 보이며 작동이 중단되어 실험을 중단하였다.

Fig. 5는 나트륨 충전율 150%인 히트파이프의 축 방향에 대한 온도변화를 나타내며 550 W의 입력 열부하에서 전 구간이 걸쳐 정상작동을 시작하였으나, 800 W의 열부하에서 히트파이프의 작동이 저하되면서 증발부 끝(Evp. 4)에 온도가 상승하는 경향을 보이며 응축부 끝(Cond. 1)의 온도는 소폭 하락하는 경향을 보였으며 증발부의 온도가 1000℃를 넘어가서 안전을 위해 실험을 중단하였다.

Fig. 6은 나트륨 충전율 181%인 히트파이프의 축 방향에 대한 온도변화를 나타내며 600 W의 입력 열부하에서 전 구간이 걸쳐 정상작동을 시작하였으나, 700 W 증반 이후 증발부 끝(Evp. 4)에

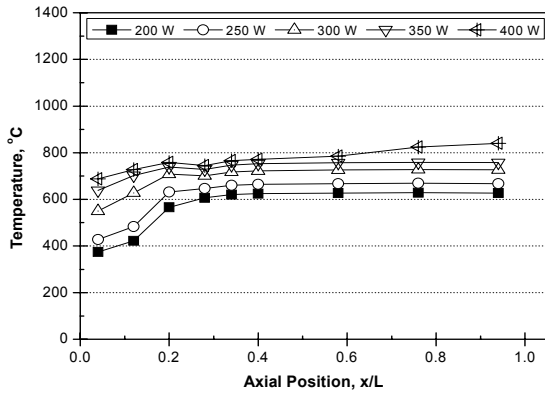


Fig. 3 Axial temperature distribution of sodium heat pipe as a function of thermal load (fill charge ratio 64%)

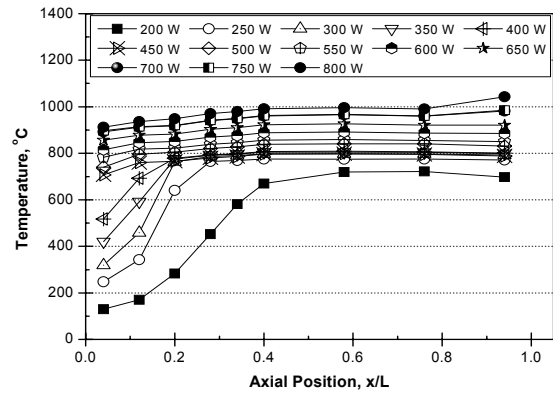


Fig. 5 Axial temperature distribution of sodium heat pipe as a function of thermal load (fill charge ratio 151%)

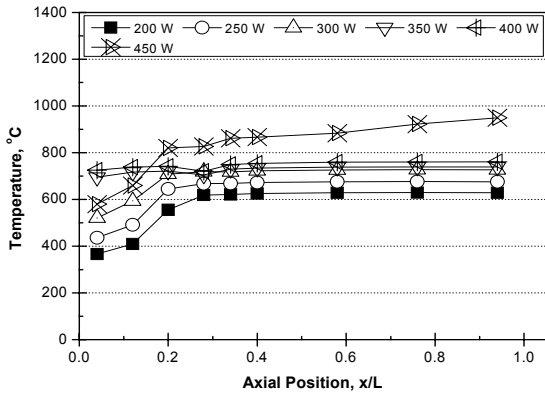


Fig. 4 Axial temperature distribution of sodium heat pipe as a function of thermal load (fill charge ratio 88%)

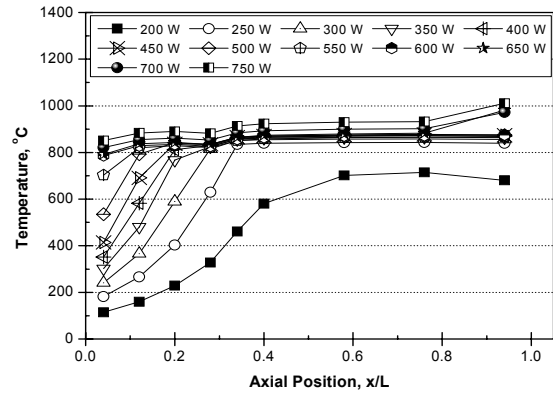


Fig. 6 Axial temperature distribution of sodium heat pipe as a function of thermal load (fill charge ratio 180%)

온도가 상승하는 경향을 보이며 응축부 끝(Cond. 1)의 온도는 소폭 감소하는 경향을 보였으며 증발부의 온도가 1000°C를 넘어가서 안전을 위해 실험을 중단하였다.

히트파이프의 충전율에 무관하게 입력 열부하의 증가에 따라 증발부와 응축부의 온도 차가 점차 감소하고 히트파이프의 작동구간이 증가하는 일반적인 경향을 보였다.

3.2 열저항과 유효열전도율

Fig. 7에서는 소형 고온 히트파이프의 입력 열부하에 대한 열저항을 비교하였다. 열저항의 계산은 다음 식(1)을 사용하였다.

$$R_{th} = \frac{\overline{T_{evp}} - \overline{T_{cond}}}{Q} \quad [^{\circ}\text{C}/\text{W}] \quad (1)$$

여기에서 Q 은 입력 열부하, $\overline{T_{evp}}$ 은 증발부 외벽의 평균온도, $\overline{T_{cond}}$ 은 응축부 외벽의 평균온도를 각각 나타낸다.

입력 열부하가 증가함에 따라 열저항 값이 점차 감소하는 경향을 보이고 전 구간에서 걸쳐 정상 작동하는 열부하에서 가장 작게 나타났으나, 작

동이 저하되는 경우 증가하는 경향을 보였다.

Fig. 8는 입력 열부하에 대한 유효열전도율의 변화를 나타내었다. 히트파이프의 유효열전도율은 다음 식(2)로 계산하였다.

$$k_{eff} = \frac{Q \times L_{eff}}{A(\overline{T_{evp}} - \overline{T_{cond}})} \quad [\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}] \quad (2)$$

여기에서 L_{eff} 은 히트파이프의 유효 열이송 길이, 그리고 A 는 히트파이프의 단면적이다.

입력 열부하의 증가에 따라 유효열전도율이 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 전 구간에 걸쳐 정상 작동하는 열부하에서 가장 크게 나타났으나, 작동이 저하되는 경우 감소하는 경향을 보였다.

3.3 시동특성

일반적으로 저온 범위용 히트파이프의 경우 상온에서 액체로 존재하는 물(water), 아세톤(acetone) 등의 작동유체를 사용하나, 고온 범위용 히트파이프는 세슘(cesium), 나트륨(sodium) 그리고 칼륨(potassium) 등의 액체 금속을 작동유체로 사용하며 고온용 히트파이프의 작동원리는 저온용 히트파이프와 동일하나 작동까지 일정

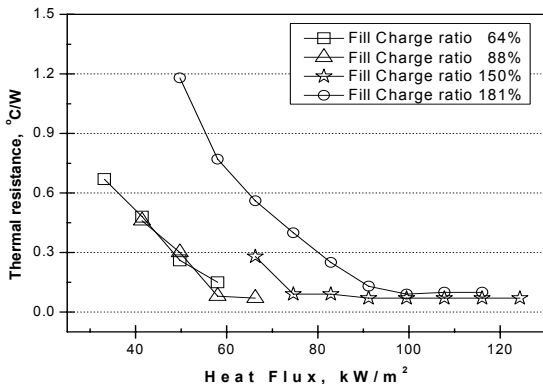


Fig. 7 Comparison of thermal resistances of sodium heat pipe

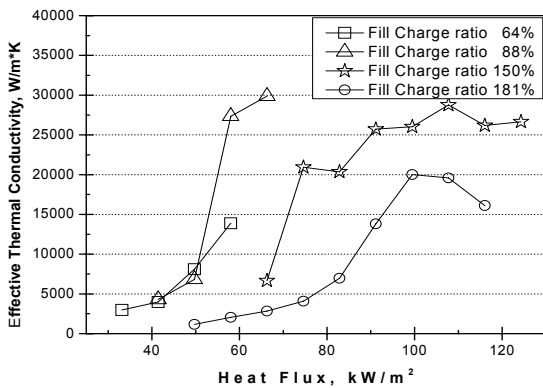


Fig. 8 Variation of effective thermal conductivity of sodium heat pipe as a function of heat flux

기간을 필요로 하는 시동특성을 가진다.

Fig.9은 나트륨 충전율 150%인 히트파이프에 550 W의 열부하에 대한 정상 시동특성을 나타내었고 며 1시간 정도 경과한 후에 히트파이프 전 구간에 걸쳐 작동을 하였고 이때 히트파이프의 축 방향에 걸친 온도차는 약 42°C가 되었다.

4. 결론

태양열 반응로용 나트륨 히트파이프의 열이송

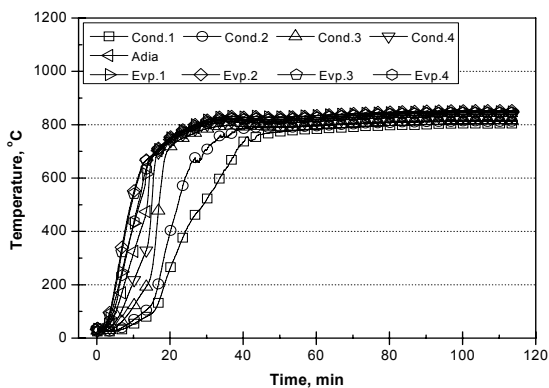


Fig. 9 Sodium heat pipe start-up

특성자료를 얻을 목적으로 입력 열부하와 충전율의 변화에 따른 성능실험을 수행하여 다음의 결론을 얻었다.

(1) 입력 열부하와 충전율 변화에 대한 히트파이프의 성능을 비교해본 실험결과 충전율 150%일 때 열적 성능 및 유효열전도율이 가장 우수한 결과를 얻었다.

(2) 입력 열부하의 증가에 따라 증발부와 응축부의 온도 차가 점차 감소하고 히트파이프의 작동 구간과 열이송 특성이 증가하는 경향이 나타났다.

References

- [1] Faghri, A., 1995, Heat Pipe Science and Technology, Taylor & Francis, pp.19-24
- [2] Ko, Y. K., Kim, K. C., Lee, Y., Lee, S. H. and Yoon, S. H., 1998, "A Study on Performance Test and Fabrication of High-Temperature Sodium Heat Pipe," Proceedings of SAREK 1998 Winter Annual Conference, pp. 269-274
- [3] Park, S. Y., Jung, E. G., Boo, J. H., Kang, H. K., Yoo, J. H. and Park, S. H., 2004, "Long-Term Life Test of A Stainless Steel-Sodium Heat Pipe," Proceedings of KSME 2004 Fall Annual Conference, pp. 1058-1062
- [4] Yoo, J. H., Kang, H. K., Lee, D. C., Park, S. W. and Song, J. H., 2005, "Long-Term Life Test of A Stainless Steel-Sodium Heat Pipe," Proceedings of KSME 2004 Winter Annual Conference, pp. 311-316