

나트륨 히트파이프의 작동 특성 및 성능에 관한 실험적 연구

유 정 현[†], 강 환 국, 이 동 찬, 박 상 운, 송 지 혁

(주)대흥기업 기술연구소

An Experimental Study on the Operational Characteristics and Performance of the Sodium Heat Pipe

Jung-Hyun Yoo[†], Hawn-Kook Kang, Dong-Chan Lee, Sang-Woon Park, Jee-Hyuk Song

ABSTRACT: The experimental study for an operational characteristics and performance of the sodium heat pipe were carried out. For an experiment, the heat pipe which is 1000mm length and 25.4mm diameter of stainless steel container with 50 mesh of screen wick using sodium as a working fluid is manufactured and tested as functions of heat flow rate, inclined angle and operating temperature. The test results are as follows. During the start-up, frontal start up was observed because of the vapor density increasing as increased the hot zone. Also, the heat pipe showed uniform temperature over than 420°C of the operating temperature. The average heat transfer coefficient increased as the heat flux and the vapor temperature increase, and the range of the total thermal resistance was 0.075-0.04°C/W at the 12-53.55 kW/m² of heat flux and 500-750°C of operating temperature. The maximum heat flow rate was 750W at the 10 degree of top heating mode.

Key words: Sodium heat pipe(나트륨 히트파이프), Start up(시동), Heat transfer coefficient(열전달계수), Thermal resistance(열저항), The maximum heat flow rate(최대 열전달율)

1. 서 론

히트파이프는 밀폐용기 내부 작동유체의 상변화를 이용한 열전달 장치로써 국내외 많은 산업 분야에서 전열소자로 사용되고 있으며 점차 그 적용분야도 확대되고 있다. 일반적으로 히트파이프는 작동유체에 따라 작동온도 범위가 구분되며 대체적으로 저온범위(-73-277°C), 중온범위(277-477°C), 고온범위(477°C 이상)⁽¹⁾로 구분하기도 한다. 국내의 주요 적용분야인 전력반도체, CPU, 증폭기 등 전자장비의냉각, 열교환기, 태양열 집열기 등에 적용되는 히트파이프는 작동유체로 물을 사용하는 저온 범위의 히트파이프가 주종을 이루고 있다. 한편 고온범위의 히트파이프용 작동유체는 상온에서 액체 상태로 존재하는 물질을 사용하는 저온용과 다르게 칼슘, 나트륨, 세슘,

리튬 등 알칼리 금속을 작동유체로서 사용하며 이들 물질은 상온상태에서는 고체 상태로 존재한다. 이중 고온범위용 작동유체로 주로 사용되는 나트륨은 녹는점이 약 98°C이며 1 atm에서의 포화온도가 883°C인 물질로 공기에 노출되면 즉시 산화하고 할로젠, 산소, 물 등과 격렬하게 반응한다. 이러한 이유로 고온범위 히트파이프를 제작하고자 하는 경우 산화 방지를 위한 공기와의 차단, 상온에서 고체 상태인 나트륨의 정제 및 히트파이프용 용기내부부의 주입과 밀폐 등의 엄밀한 작업이 이루어져야 한다. 나트륨 히트파이프 등 고온범위 히트파이프에 대한 관련연구로써 70년대 초반부터 용기 및 작동 유체 사이의 적합성, 시동 특성, 안정적 시동의 개선 및 열전달 특성 등에 관한 연구들⁽²⁾이 미, 일, 러시아 등에서 수행되었으며 제철소, 플랜트, 유리 공장 등 산업 설비와 더불어 원자력 발전, 연료 전지 및 스텔링 엔진, 고온 등온로, 고온 화학 반응기 등에 적용되고 있는 것으로 알려져 있다. 한편 국내에서

[†] Corresponding author

Tel.: +82-31-434-4133; fax: +82-31-434-4134
E-mail address: jhy@heatpipe.co.kr

는 90년대 후반에 대학에서 나트륨 히트파이프의 열전달 특성 및 성능에 관한 기초적인 연구⁽³⁾가 수행되었고 최근에 유리 성형 공정에 적용하기 위한 연구⁽⁴⁾와 산업적 적용을 위해 나트륨 히트파이프를 이용한 열교환기를 제작하고 성능시험⁽⁵⁾이 수행되었으며 직광형 고온 태양열 집열기용 집열부, 고온로 및 반도체 제조 공정용 등온가열장치 등으로 적용하고자 하는 연구가 수행되고 있으나 저온용 히트파이프에 비하여 관련 기초연구가 상대적으로 부족하고 산업적 적용의 예도 매우 적은 것으로 파악된다.

본 연구에서는 고온 배기열 회수용 열교환기에 적용할 나트륨 히트파이프를 개발하고자 스크린 메쉬를 워드로 사용하는 스테인레스 용기의 히트파이프를 제작하였고 열부하와 경사각, 작동온도 등을 관련변수로 실험을 수행하여 시동과정에서의 작동특성과 열전달 한계 및 열저항 등 히트파이프의 작동특성과 성능에 관련한 기초적인 자료를 확보하고자 하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1 실험 장치

외경 25.4mm, 총길이 1000mm의 스크린 메쉬를 워드로 사용하는 스테인레스 용기의 나트륨 히트파이프를 제작하였다. 히트파이프의 상세한 제원은 Table 1과 같다. 온도 계측을 위하여 Sheath형 K-type 열전대를 히트파이프의 증발부와 응축부 외벽에 각각 3개지점, 단열부에 한 지

Table 1 Specifications of the Heat pipe.

Component	Specification
Dimension	φ25.4 mm(OD), 22.1 mm (ID) × 1000 mm(L)
Material	STS 316L
Working fluid	Sodium, 40 g
Wick	No. 50 mesh ; 2 layer STS 316
Evaporator	455 mm
Adiabatic	100 mm
Condenser	460 mm

점등 총 7부분에 일정한 간격으로 히트파이프 벽

면에 용접하여 부착하였으며 그 위치는 Fig. 1에 도시하였다. 증발부의 열원으로써 증발부 외벽에 니크롬선과 마그네시아(MgO) 절연층으로 구성된 MI 히터(Mineral Insulator heater)를 사용하여 히트파이프 증발부 표면에 밀착시켜 부착하였으며 이때 최대 공급 열부하는 2 kW이다. 단열을 위하여 먼저 동일한 길이의 증발부와 응축부에 공기 단열층이 형성되도록 적당한 직경의 파이프를 히트파이프 외벽에 이중관 형태로 설치하였다. 또한 증발부의 공기 단열층 외벽, 즉 이중관 외벽에는 세라크 울을 추가로 단열함으로써 열의 손실을 최소화 하고자 하였다. 한편 외벽 단열벽을 통한 열손실량을 계측하고자 외벽과 단열재 반경방향의 온도 분포를 계측하고 단열재의 열전도도로부터 손실열을 계측하였으며 그 결과 손실열은 작동온도에 따라 약 100-130W 정도로 파악되었고 이 값을 보정하여 히트파이프의 순수 열부하로 사용하였다. 이송된 열은 응축부 외벽에 설치된 단열 이중관의 외벽에서 제거되며 작동온도를 제어하고자 응축부 이중관 외벽에 덕트와 팬을 설치하였다. 증발부의 공급 열부하는 슬라이더로 입력 전압을 제어하고 Power meter (Yokogawa, WT210)로 전력량을 계측하였으며 응축부에 설치된 팬의 전압을 조절하여 풍량을 제어함으로써 작동온도를 제어하도록 하였다. 히트파이프의 온도 계측은 데이터로거(Yokogawa,

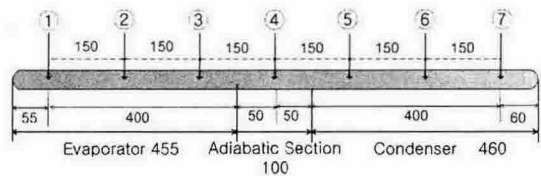


Fig. 1 Position of thermocouple.

(Unit : mm)

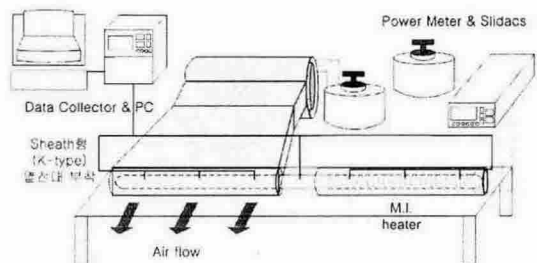


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus.

DR230)와 PC를 이용하여 기록, 저장하였다. 여기서 Fig. 2는 본 연구에서 사용된 실험 장치 개략도이다.

2.2 실험 방법

실험방법은 아래와 같다. 먼저 나트륨 히트파이프가 시동과정에서 발생하는 작동 특성을 파악하고자 상온상태에서 갑자기 일정한 열부하를 가하여 시동과정에서의 각부의 온도를 측정하였다. 이 경우 응축부 외부의 냉각공기량을 제어하여 전구간이 작동하는 최소 증기온도라고 판단되는 420℃ 근처에 이르도록 제어하였다. 한편 히트파이프 성능 파악을 위하여 일정한 열부하를 가한 상태에서 각부의 온도가 정상상태에 도달하면 온도를 기록하였으며 단계적으로 열부하를 증가시켰다. 이때 단열부의 온도를 증기온도로 파악하고 일정한 온도가 유지되도록 응축부 냉각공기의 유량을 제어하였다. 하나의 증기온도에 대한 실험이 완료되면 증기온도를 변화하며 동일한 방법으로 실험을 수행하였다. 작동 온도는 단열부의 증기 온도를 기준으로 500℃-800℃까지 50℃ 간격으로 일정하게 유지하였고, 공급 열부하는 700 W(19.56 kW/m²)부터 최대 2 kW (53.55 kW/m²)의 범위였다. 한편 실험에 사용된 고온용 히트파이프의 최대 수송 열부하를 확인하고자 증기온도를 약 750℃로 유지한 상태에서 열부하를 단계적으로 증가시키며 실험을 수행하였다. 중력장의 도움을 받는 경우, 본 실험장치의 최대 공급열부하인 2 kW에서도 열전달 한계는 발생하지 않았으며 이에 따라 경사각을 상부 가열 조건(top heating mode)으로 조절하여 0, -5, -8, -10°에서

열부하를 상승시키며 실험을 수행하였다. Table 2는 이러한 실험 조건을 보여주고 있다.

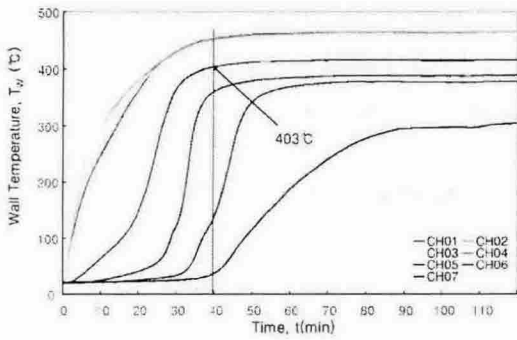
3. 실험 결과 및 고찰

3.1 나트륨 히트파이프의 시동 특성

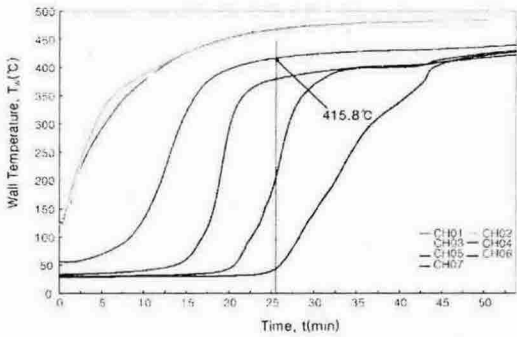
상온상태로 냉각된 상태에서 갑자기 열부하를 가했을 때 나타나는 시동특성을 Fig. 3에 도시하였다. 먼저 (a)는 300 W의 열부하가 주어졌 경우에 대한 결과를 보여준다. 그림에서 증발부 및 단열부 온도의 상승에 따라 응축부 온도는 단열부에 근접한 위치로부터 시간에 따라 단계적으로 상승하며 이러한 결과는 응축부로의 증기의 도달 위치가 시간에 따라 응축부 입구에서 후단으로 점차 확대되고 있음을 나타내고 있다. 그런데 그림에서 응축부 끝단 측정점의 온도는 300℃에서 더 이상 증가하지 못하고 403℃의 단열부 및 다른 응축부 온도와 약 100℃ 이상의 온도차를 보이고 있다. 한편 동일한 방법으로 열부하를 400 W로 증가시킨 결과인 (b)의 경우 전반적인 시동 특성은 유사하나 응축부 전 측정점의 온도가 비교적 등온을 유지함으로써 전 영역이 작동하고 있음을 확인할 수 있다. 그리고 이때의 단열부 온도는 415℃로 앞의 경우보다 약 12℃ 상승한 상태에서 작동하고 있다. 한편 이러한 증기온도와 열부하와의 관계를 파악하고자 450 W의 열부하로서 (b)의 경우보다 크나 응축부 냉각공기 유속을 증가시켜 작동온도를 낮춘 경우의 결과를 그림 (c)에 도시하였다. 그림에서 450 W에서 증기온도가 (a)의 경우와 유사하게 403℃로 유지되는 경우에는 전영역이 활성화된 (b)의 경우보다 열부하가 증가되었음에도 (a)와 유사하게 응축부 끝단은 단열부 및 응축부와 100℃ 이상 온도차를 나타내고 있다. 이러한 결과를 종합할 때 고온범위 히트파이프는 일정 증기온도 이하에서 작동하는 경우 활성구간이 감소함으로써 열전달 성능에 많은 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다. 이러한 작동특성에 대하여 관련문헌에 의하면 낮은 작동 온도 즉, 낮은 증기압에서는 분자의 평균 자유경로가 길어지기 때문이며 이러한 평균 자유경로와 증기 채널과의 비로부터 몇 가지 작동영역으로 구분하여 설명하고 있다⁽⁶⁾. 일반적으로 나트륨 히트파이프의 경우에는 400-450℃ 이상에서 정

Table 2 Test conditions for the heat pipe.

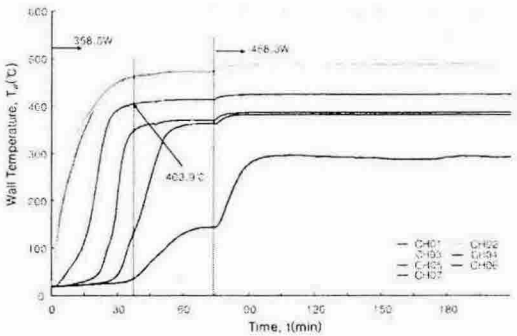
	Heat Load (W)	Vapor Temp. (°C)	Inclined Angle (°)
Start up	300-400 (350-600)	-	10
Operation	500-2000	500-800 (50)	10
Limitation	2000 (700)	-	10, 0, -5, -8, -10



(a) 300W



(b) 400W



(c) 450W

Fig. 3 Start up characteristics of the sodium heat pipe.

상적인 작동을 하는 것으로 알려져 있으며 이와 유사한 결과가 증온용 범위인 다우섬이나 나프탈렌을 작동유체로 사용하는 히트파이프에서도 나타나는 것으로 보여진다.⁽⁷⁾ 이러한 작동특성에 따라 고온 히트파이프를 열교환기 등에 적용하는 경우, 작동온도 이하의 구간에서는 일부 구간만이 열전달에 참여하여 성능에 많은 영향을 미치

는 것으로 보고되고 있으며⁽⁵⁾ 따라서 최소 작동 온도 및 작동영역과 성능에 미치는 영향에 대한 체계적인 연구가 수행되어야 할 것으로 생각된다.

3.2 나트륨 히트파이프의 작동 특성

Fig. 4는 응축부 전 영역이 정상적으로 작동하는 조건에서 각 증기 온도에 따른 고온용 히트파이프의 온도 분포를 보여주고 있다. 증기 온도는 3.1절에서 보는 것과 같이 최저 작동온도를 고려하여 500°C에서 800°C까지 50°C 간격으로 고정된 상태에서 계측된 결과로써, 이에 따른 제어 조건은 열부하나 풍속 등에서 다소 차이가 있다. 그림에서 증발부 및 응축부의 온도는 상변화 열전달의 특성인 등온성을 확인할 수 있다. 또한 히트파이프 전구간에서 증발부와 응축부의 온도차는 대략 60~80°C로 비교적 균일하게 나타나고 있으며, 불응축 가스가 포함될 경우에 나타나는 응축부의 온도강하와 같은 특성은 보이지 않아 정상적으로 작동하고 있음을 확인할 수 있다.

이러한 결과를 이용하여 Fig. 5에 증발부와 응축부 각각의 열유속에 따른 열전달계수를 도식하였다. 이때 그림에는 또한 각 증기온도에 따른 실험결과를 동시에 표시하였다. 먼저 증발부와 응축부 열전달 계수는 약 400~750 W/m²K과 1700 W/m²K~2800 W/m²K의 범위이며 응축부의 열전달 계수가 증발부에 비하여 약 3~4배 정도의 높은 값을 보이고 있다. 한편 증기온도와 열부하의 증가에 따라 증발부 열전달 계수는 미소하게 증가하나 응축부 열전달 계수는 열부하 및 증기 온도의 증가에 따른 열전달계수 증가의 변화율도

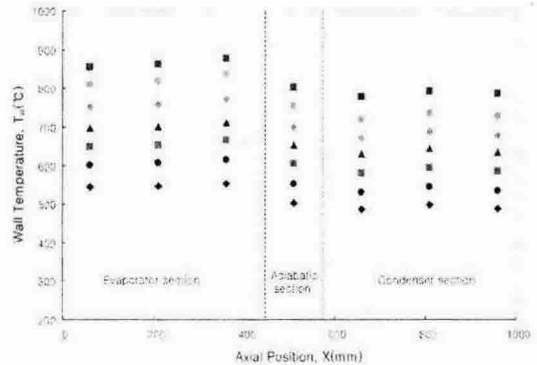


Fig. 4 Wall temperature distribution along the vapor temperature.

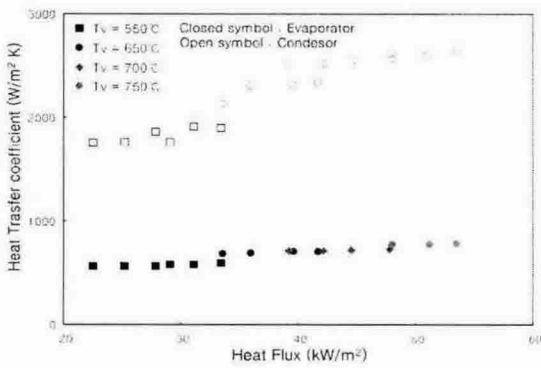


Fig.5 Heat transfer coefficients versus heat flux.

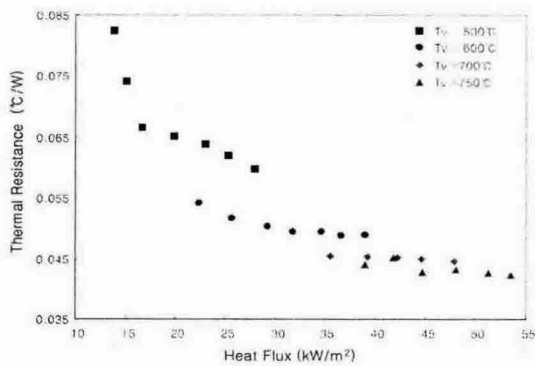


Fig. 6 Thermal resistances versus heat flux at the various vapor temperature.

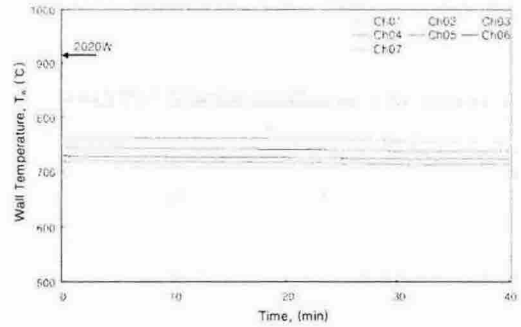
상대적으로 높게 나타나고 있다.

Fig. 6은 열유속 크기에 대한 히트파이프의 총 열저항을 작동 온도에 따라 구분하여 도시하였다. 먼저 모든 증기온도에서 열유속 증가에 따라, 증발부와 응축부 모두 열전달 계수가 증가함에 따라 열저항은 감소하는 경향을 보이고 있다. 한편 증기온도가 낮아질수록 열저항의 감소율은 증가하여, 유사한 열유속 범위에서도 750°C의 작동온도에서는 0.044에서 0.041°C/W로 미소하게 감소한 반면 증기온도 500°C인 경우 0.082°C/W에서 0.058°C/W로 상대적으로 크게 감소하고 있다.

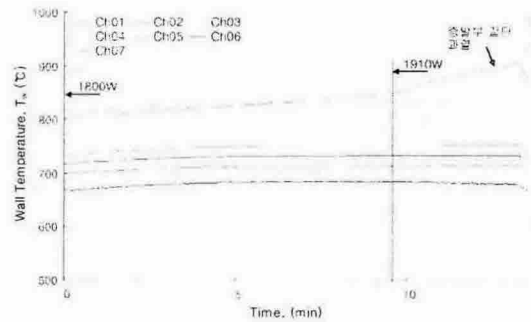
3.3 나트륨 히트파이프의 한계 특성

Fig. 7은 몇가지 경사각에서 열부하를 공급하고 시간에 대한 온도 변화를 나타낸 그림이다. 먼저 (a)는 경사각이 -5°(top heating mode)인 경우로써 본 실험장치의 최대 가능 열부하인 2 kW

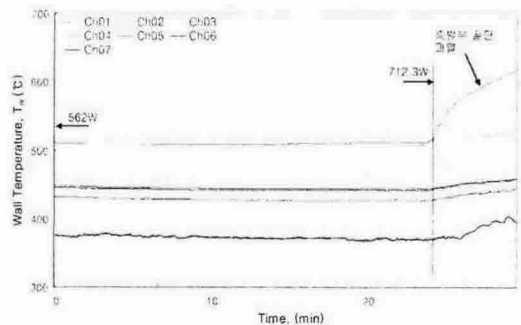
를 가한 경우에도 큰 변화 없이 시간에 대한 온도는 균일하게 나타남으로써 열전달 한계와 같은 형상은 나타나지 않고 있으며 이 이상의 경사각에서는 동일한 실험결과가 나타났다. 그러나 경사각 -8과 -10°인 경우, 열부하를 증가시키면 그림 (b)와 (c)에서 보는 것과 같이 시간이 경과함에 따라 급격히 증발부 끝단 온도가 증가함으로써 열전달 한계가 보이고 있다. 먼저 (b)의 경



(a) Inclined angle -5°



(b) Inclined angle -8°



(c) Inclined angle -10°

Fig. 7 Wall temperature variation with time at various inclined angle.

우 1800 W의 열부하에서 히트파이프의 끝단 온도가 서서히 상승하는 한계의 전형적인 형태를 보여주고 있다. 경사각 -10° 에서 550 W의 열부하가 주어진 (c)의 경우, 증기온도가 낮아 앞에서 설명한 것과 같이 응축부 끝단 구간이 작동이 이루어지지 않고 있으나 증발부의 과열과 같은 현상은 보이지 않았다. 한편 700W로 열부하를 상승시켰을 때 (b)에서와 같이 증발부 끝단의 과열 형태를 보임으로써 한계에 이르고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 열전달 한계는 일반적으로 증기온도와 경사각등의 함수로 알려져 있으나 본 실험장치의 한계로 인하여 이에 대한 엄밀한 실험과 해석은 수행되지 못하였다. 다만 본 실험에서 얻어진 열전달 한계의 결과는 잘 알려진 Chi의 상관식⁽⁸⁾의 계산결과와 비교하였으나 그 값의 차가 컸다. 따라서 앞에서 검토한 작동온도에 따른 영향과 함께 열전달 한계를 예측하는 상관관계에 대한 기초적이고 체계적인 연구가 필요한 것으로 생각된다.

4. 결론

고온범위용 작동유체로 나트륨을 이용하는 스크린 메쉬가 내벽에 삽입된 스테인레스 용기의 히트파이프를 제작하고 작동온도, 열부하, 경사각등을 관련변수로 시동특성과 열전달 계수 및 열전달 한계에 대한 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 나트륨을 작동 유체로 하는 고온 범위 히트파이프는 낮은 증기온도에서는 일부 구간만이 작동하며 이에 따라 열부하의 크기와는 관계없이 증기온도가 420°C 이상의 작동온도에서만 전영역에서 작동이 이루어짐을 확인할 수 있었다.

(2) 본 연구에서 실험한 히트파이프는 증발부와 응축부의 열전달 계수는 약 $400\text{--}750\text{ W/m}^2\text{K}$ 과 $1700\text{ W/m}^2\text{K}\text{--}2800\text{ W/m}^2\text{K}$ 의 범위였으며 응축부의 열전달 계수가 증발부에 비하여 약 3-4배 정도의 높은 값을 나타내었다. 열유속과 증기온도에 따라 각 열전달 계수는 미소하게 증가하는 경향을 보였으며 히트파이프의 총 열저항 감소는 증기온도가 낮을수록 커졌고, 열유속 증가에 따른 감소율이 상대적으로 높게 나타났다.

(3) 본 연구에 사용된 나트륨 히트파이프의 열전달 한계는 수평과 -5° 의 경사각에서도 최대 2

kW까지 작동이 이루어지는 것으로 확인되었고, -8° 이하의 경사각에서는 한계를 확인하였으나 알려진 상관식의 결과와는 차가 컸다. 따라서 고온 범위 히트파이프의 엄밀한 설계를 위해서는 작동온도에 따른 특성과 함께 열전달 한계의 예측에 대한 연구도 필요할 것으로 생각된다.

후기

본 연구는 에너지 관리공단의 에너지·자원기술 개발사업으로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. A. Faghri., 1995, Heat Pipe Science and Technology, 1st ed., Taylor & Francis, pp. 19-24.
2. R. Ponnappan., and W. S. Chang., 1994, Start-up performance of a liquid-metal heat pipe in near-vacuum and gas-loaded modes, J. Thermophysics and Heat Transfer, Vol.8, No. 1, pp. 164-171.
3. K. Y. Ko et al., 2000, Proceedings of the 4th JSME-KSME Thermal Eng. Conference, Vol. 1, pp. 567-572.
4. S. Y. Park., and J. H. Boo., 2004, Isothermal characteristic of a rectangular parallel sodium heat pipes, 13th International Heat Pipe Conference, Vol. 1, pp. 143-149.
5. J. H. Yoo et al., 2004, An Experimental Study on the Operation and Performance of Sodium Heat Pipes Heat Exchanger, Proceedings of the SAREK 2004 Winter Annual Conference, pp. 132.
6. M. N. Ivanovskii et al., 1982, The Physical Principles of Heat Pipes, Oxford.
7. Y. S. Lee et al., 2005, Study on the Working Fluid Characteristics of Medium Temperature Heat Pipe, Proceedings of the SAREK 2005 Summer Annual Conference, pp. 687-692.
8. S. W. Chi., 1976, Heat Pipe Theory and Practice, Mcgraw-Hill, New York.