

VCHP에서 불응축 가스량이 열전달 성능에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

박기호*†·이기우*·이욱현*·이계중*·서정세**

An Experimental Study on the affect of Non-condensable Gas Quantity on the Heat Transfer Performances in a Variable Conductance Heat Pipe

K. H. Park, K. W. Lee, W. H. Lee, K. J. Lee and J-S. Suh

Key Words: Variable Conductance Heat Pipes(가변전열 히트파이프), Noncondensable Gas(불응축가스), Thermal resistance(열저항), Working fluid quantity(작동유체량)

Abstract

This paper is to research the heat transfer characteristic in copper-water variable conductance heat pipes(VCHP) with a non-condensable gas and gas reservoir. The heat transfer characteristics in the VCHP have not yet been studied much researches. VCHP are used in many applications. These applications range from thermal control of components and systems on satellites, to precise temperature calibration duties, conventional electronics temperature control and thermal diodes. The practical use of VCHP is a simple way to control the temperature of satellites. As the quantity of NCG was increased, there was an increase in the saturation vapor temperatures. As the input heat has loaded from 90 W to 110 W, the difference of the evaporator surface is lower than 10°C.

1. 서론

히트파이프는 내부의 밀폐된 공간에서 연속적으로 액체-증기-액체의 상변화를 수행하면서 잠열을 이용하여 가열부의 열을 응축부로 이동시키고 모세관 구조물을 이용하여 응축된 작동유체를 가열부로 이송시켜 열전달을 수행하므로 열전달 성능이 매우 뛰어나 차세대 공냉을 대체할 액체

냉각의 한 분야로 대두되고 있다. 히트파이프는 증발부와 응축부로 구성되어 외부 표면에 환을 부착하여 전열면적의 확대가 용이하여 각종 냉각 기술 및 열회수 기술의 고성능화가 가능하므로 첨단 전자 부품 및 반도체 냉각장치에 매우 중요한 기술로 응용되고 있다. 일반적인 히트파이프는 유입되는 열량에 따라 가열부 및 응축부의 온도 및 작동 증기온도의 변화가 심하다. 열환경의 변화가 심한 경우 일반적인 히트파이프는 작동온도를 일정하게 유지하기 어렵다. 인공 위성 등 열유입량의 변화가 심한 곳에서 냉각이 필요한 부분에 적용된 것이 VCHP(Variable Conductance Heat Pipe)이다. 또 냉각 및 온도 제어가 요구되는 거의 모든 반도체 및 통신장비에 활용할

† *한국에너지기술연구원 미활용에너지연구센터

E-mail : ghpark@kier.re.kr

Tel.: 042-860-3311; Fax.: 042-860-3133

**경상대학교 기계항공공학부

수 있다. 특히 이동중계기 합체는 기후 계절에 따라 내부의 온도가 상당히 변화하는데 비해 일반 히트파이프를 적용하여 냉각하기 때문에 이 중계기 합체에 VCHP를 적용하면 온도 제어 등에 있어서 유리한 점이 많다. VCHP는 작동유체, 소량의 NCG(Noncondensable Gas)와 밀폐된 콘테이너로 구성되어있다. VCHP는 일반적인 히트파이프와 같이 두 개의 열전달 영역, 증발부와 냉각부를 가지고 있다. 열은 증발부에서 비등, 증기 흐름, 응축부에서 응축 그리고 응축액 귀환의 과정으로 전달된다. 열이 전달되는 과정에서 외부 동력이 필요하지 않다. VCHP는 열전달 현상에서 일반적인 히트파이프보다 좀 더 복잡한 설계를 요한다. VCHP의 매우 중요한 특징은 NCG 압력과 작동유체의 상의 조합이 뜨거운 매체의 온도조절을 할 수 있게 한다는 것이다. 유입열량의 증가는 증기온도의 증가와 작동압력의 증가를 야기하고 활성응축부의 길이가 증가한다. 최적설계로 된 VCHP는 유입열량이 변화하더라도 같은 변화율로 열을 제거할 수 있고 일정한 온도로 가열부를 유지할 수 있다. 본 논문에서는 Chi가 제안한 이론을 토대로 VCHP의 설계를 하였고 NCG의 양에 따른 열전달 특성을 살펴보고 비교하여 기본설계에 반영하고자 하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

본 연구에서 사용한 VCHP는 지표면과 수직 한 상태로 설치하여 써모싸이폰방식으로 하였고 스크린 메쉬 워를 삽입한 직경 6 mm 동 재질의 히트파이프를 제작하여 실험을 하였다. VCHP의 총길이(L_t)는 400 mm이고 가열부 길이(L_e)를 80 mm, 단열부 길이(L_a)를 60 mm, 응축부 길이(L_c)를 260 mm로 하였고 작동유체로는 증류수를 사용하였는데 물은 저비용, 무독성, 높은 증발잠열을 가지고 동과는 적합한 것으로 알려져 있다. VCHP 내부는 10^{-4} torr 로 진공시킨 후 작동유체와 NCG를 주입하였다. 불응축 가스로는 질소를 사용하였고 작동유체의 양은 내부 증발부 체적과 내부 삽입 메쉬 워의 부피를 고려하여 증발부 체적의 40%~50%를 주입하였다.

Fig. 1은 VCHP 요소의 성능실험을 위한 실험 장치의 전체 구성도이며 본 연구에서 사용된 실

Table 1 Parameters of VCHP

parameters	specification
Container material	copper
pipe diameter	6 mm(O.D)
total length	400 mm
length of evaporator zone	80 mm
length of adiabatic zone	60 mm
length of condenser zone	260 mm
reservoir volume	$3.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3$
Working fluid	distilled water
Inclination angle	90°
Cooling water temperature	15°C

험장치는 크게 VCHP, 자료획득장치, 항온수조의 세 가지로 나누어진다. 실험장치는 가변전압조절기를 이용하여 전기가 공급되면 히트파이프의 가열부 주변에 감겨진 니크롬 선($4.5 \text{ } \Omega/\text{m}$)에서 발열이 되어 열량이 공급된다. 이것을 세라크 울(cerak wool)($k=0.075 \text{ W/m}^\circ\text{C}$)로써 1차 단열을 한 후 우레탄을 이용하여 2차 단열함으로써 외부 대기로의 방열손실을 최소화하였다. 열선 주위의 온도와 단열재 외부표면의 온도를 측정하여 방열손실을 계산할 수 있도록 구성하였다. 단열부는 일차적으로 단열테이프를 감은 후 우레탄 단열재를 감싸는 방식으로 단열하였다. 응축부의 냉각을 위해 항온수조(가열용량:750 W, 냉각용량:250

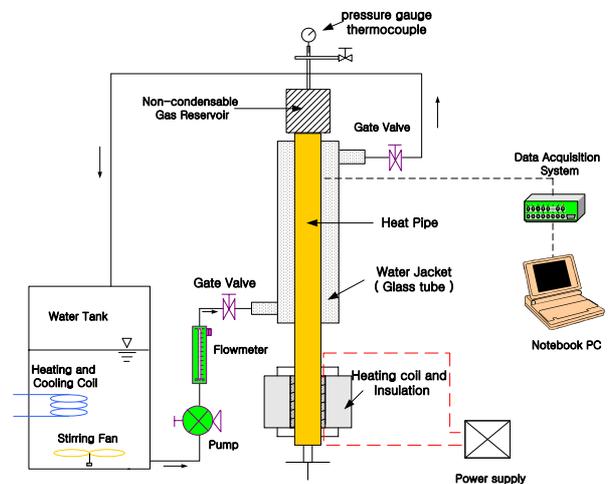


Fig. 1 Experimental Apparatus.

W)에서 일정온도로 맞춰진 물을 응축부에 공급이 되게하여 가열부에 공급된 열량이 응축부에서 충분히 냉각되도록 하였다. 응축부의 수냉각을 위해 응축부 위에 길이 260 mm, 내부 직경 15 mm의 파이렉스 유리관을 워터자켓을 설치하고 유리관의 외부표면을 10 mm 두께의 우레탄으로 단열을 하였다. 히트파이프 요소에 대한 성능을 구하기 위해서는 가열량, 각 부위에서의 표면온도, 내부의 포화 온도 및 압력을 측정하여야 하는데 본 연구에서는 온도를 측정하기 위하여 열전대를 증발부에는 20 mm 간격으로 3개를 설치하였고, 단열부에는 20 mm 간격으로 2개, 응축부에는 20~30 mm 간격으로 10개를 설치하여 온도를 측정하였고 VCHP의 내부에 압력 트랜스미터를 설치하여 내부 증기의 압력을 측정하였다. 이렇게 설치된 열전대와 압력계로부터 온도와 압력을 측정하여 데이터취득장치(Yokogawa Hybrid Recorder DR230, 60 channel)를 통해 PC로 온도와 압력 데이터가 저장되도록 하였다.

2.2 실험방법

VCHP에 대해서 경사각은 90°로 하고 하부가 열모드로 하였다. Fig. 2는 파이프 벽면에 부착된 온도계의 부착 위치를 나타내고 있는데 20~30mm 간격으로 모두 15개소를 설치하여 각 부의 온도를 측정하고 응축부 활성 영역의 변화를 살펴보았다. 내부에는 단열부와 응축부의 경계지점에 증기의 온도를 측정하여 포화 증기온도의 변화를 살펴보았다. 내부의 증기 압력을 압력 변환기로 측정하여 압력의 변화를 알 수 있게 하였다. 하부의 전열선의 가열량을 10 W의 열량에서 시작하여 10W 정도씩 단계적으로 열량을 증가시켜 증발부와 응축부의 온도 분포를 비교 관찰하였다. 실험은 가열부 온도가 급격히 상승하여 드라이아웃 상태이거나 급격히 상승하지 않더라도 110°C가 넘을 경우에 종료하였다.

3. 결과 및 고찰

VCHP 내부 증기의 압력은 불응축가스량이 증가하면서 내부 불응축가스의 압력보다도 커져야만 작동이 가능하다. 불응축가스량이 많아질수록 작동온도의 분포가 높아지고 불응축 가스의 주입량이 많아지면 그만큼 응축부를 차지하는 공

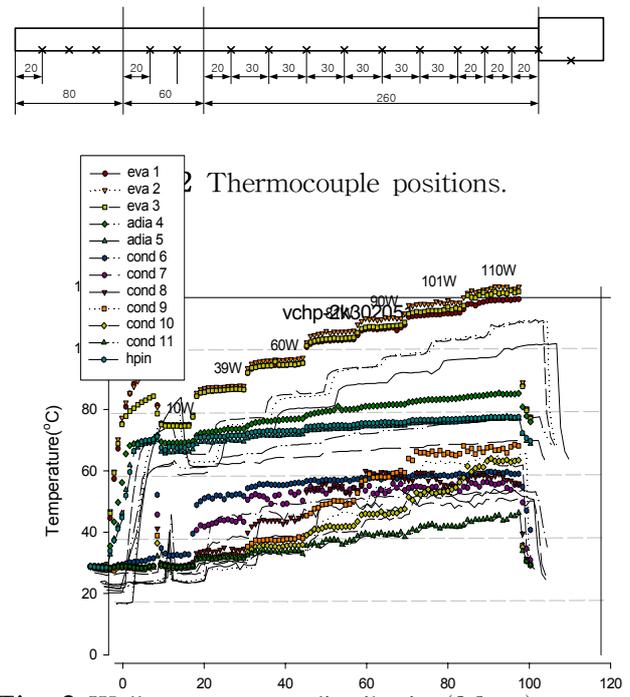


Fig. 3 Wall temperature distribution (2.8 cc).

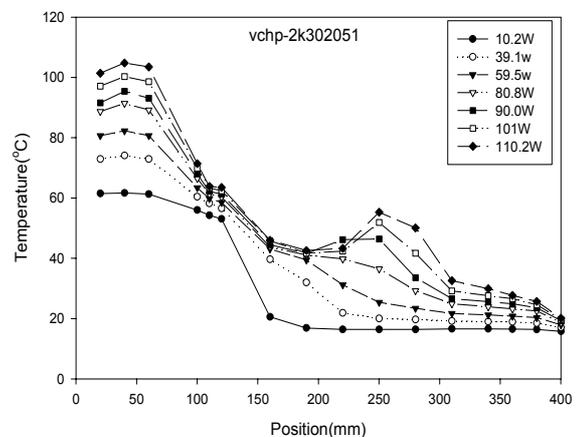


Fig. 4 Wall temperature distribution.
($mg=1.7 \times 10^{-6}$ kg)

간이 많아지게 된다. 따라서 실제 열전달이 일어나는 활성영역이 줄어들고 그에 따라 작동 온도의 분포가 높아지게 됨을 알 수 있다. Fig. 3과 Fig. 4는 NCG 1.7×10^{-6} kg, 작동유체 2.8 cc를 주입한 VCHP의 증발부 및 단열부, 응축부의 벽면 온도를 나타내고 있는데 열의 유입량이 90 W일 때 증발부 벽면의 온도가 약 95.7°C, 단열부내 증기의 온도가 62.2°C, 유입열량이 110 W일 때 증발부 벽면의 온도가 105.4°C, 내부 증기의 온도가 63.9°C로, 증발부 벽면의 온도가 약 10°C의 차

이, 내부 증기의 온도가 약 1.7°C의 차이를 보여 주고 있다. 투입열량이 90 W에서 110 W로 20 W 변할 때 증발부 벽면의 온도와 내부 증기의 온도변화가 상당히 낮아진 것으로 열량이 커지면서 활성영역이 가스 저장소 쪽으로 늘어나 응축부의 면적이 확장되어 응축부에서의 열교환량이 커져 증기의 온도가 높아지지 않은 것으로 사료된다. 100 W±10 W에서 ΔT가 ±5°C 전후로 증발부 벽면의 온도 상승 변화율이 높지 않은 것을 알 수 있었고 유입열량이 110 W일 때에도 dry-out의 징후가 보이지 않고 열전달 한계열량이 상당히 높다는 것을 알 수 있었고 응축부 표면의 온도분포를 살펴보면 비활성 영역의 경계가 보이고 있다. 유입열량이 증가하면서 응축부 7번의 온도를 보면 40 W 일 때 약 30°C이고 60 W 일 때 응축부의 온도가 약 40°C이고 그 다음의 입열량에서는 40°C~45°C의 온도분포를 보이고 있다. 응축부 9번의 경우를 비교해 보면 입열량 30 W까지는 온도가 상승하지 않다가 60 W일 때 25°C, 80.8 W일 때 37.3°C, 90 W일 때 46.2°C를 나타내 입열량이 증가하면서 작동증기압의 상승과 활성영역이 늘어나 응축부의 유효 면적이 커짐을 알 수 있었다. 작동증기의 포화압력이 상승하면서 비활성 영역을 가스 저장소 쪽으로 밀어낸 결과 응축부의 길이가 늘어나 그 부위의 온도가 상승한 것이라 볼 수 있다. Fig. 5는 NCG 1.9*10⁻⁶ kg, 작동유체 2.8cc를 주입한 VCHP의 증발부 및 단열부, 응축부의 벽면 온도를 나타내고 있는데 열의 유입량이 90 W 일 때 증발부 벽면의 온도가 94.8°C, 내부 증기온도가 62.7°C를 나타내었고 유입열량이 110 W 일 때 증발부 벽면의 온도가 105.6°C, 내부 증기의 온도가 63.9°C 이었는데도 증발부의 아래 쪽의 온도가 상승하지 않은 것으로 보아 dry-out 상태에 도달하지 않은 것으로 알 수 있고 작동유체의 양은 적지 않은 것을 알 수 있었다. Fig. 4의 경우와 큰 차이는 없지만 유입열량이 10 W 일 때 증발부 벽면의 온도 및 내부 증기의 온도가 1~2°C 정도 높은 것을 알 수 있고 이것은 앞에서 예측한 바와 같이 불응축 가스량이 증가하면서 초기 작동증기압이 높아져 불응축 가스와 활성영역의 경계면이 단열부 쪽에 있다가 응축부로 밀려 올라가야만 작동이 된다는 것을 보여 준다고 할 수 있다. Fig. 6은 NCG 1.5*10⁻⁶ kg, 작동유체 2.8cc를 주

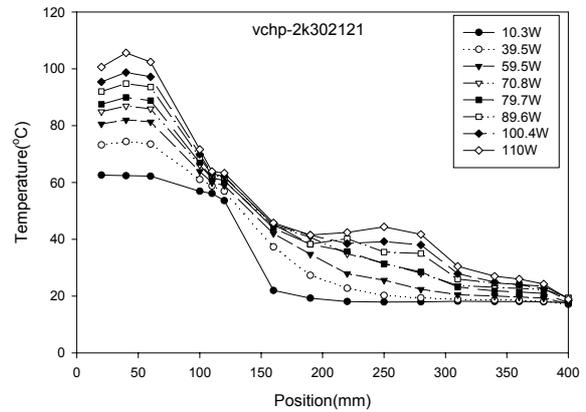


Fig. 5 Wall temperature distribution. (mg=1.9*10⁻⁶ kg)

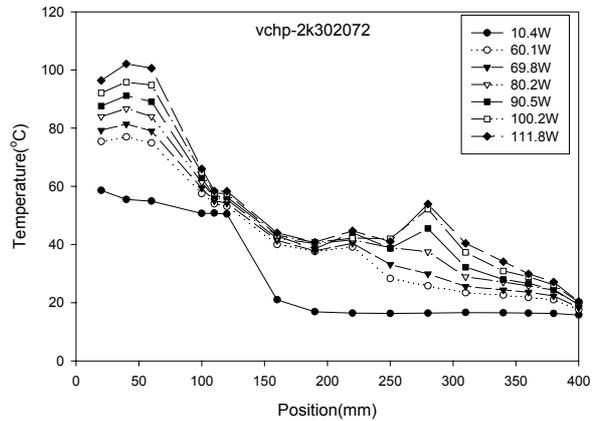


Fig. 6 Wall temperature distribution. (mg=1.5*10⁻⁶ kg)

입한 VCHP의 증발부 및 단열부, 응축부의 벽면 온도를 나타내고 있는데 열의 유입량이 90 W 일 때 증발부 벽면의 온도가 91.2°C, 내부 증기의 온도가 56.7°C를 나타내었고 유입열량이 100 W일 때 증발부 벽면의 온도가 100.2°C, 투입열량이 111 W 일 때 증발부 벽면의 온도가 118.8°C로 상승하였고 또 Fig. 4, Fig. 5와 비교하여 유입열량이 10 W일때의 증발부와 내부증기의 온도를 비교하면 Fig. 4의 경우보다는 증발부의 온도가 3°C 정도 낮아졌고 증기의 온도가 약 3.5 °C 낮아진 것을 볼 수 있었고 Fig. 5의 경우와 비교하면 증발부의 온도가 약 4°C 정도 낮아지고 증기의 온도가 약 5.3°C 낮아진 것을 볼 수 있었고 이로부터 불응축가스의 양에 따라 VCHP의 작동 온도 및 응축부 비활성영역의 움직임을 약간이나마 관찰할 수 있었다. Fig. 7은 NCG 1.2*10⁻⁶ kg, 작동유체 4.0cc를 주입한 VCHP 벽면의 온도분포

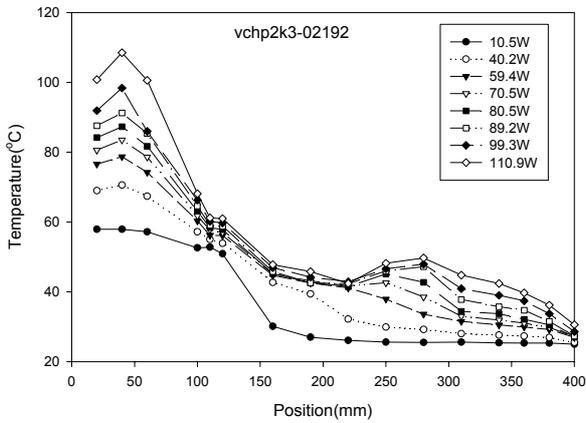


Fig. 7 Wall temperature distribution.
($mg=1.2 \times 10^{-6}$ kg)

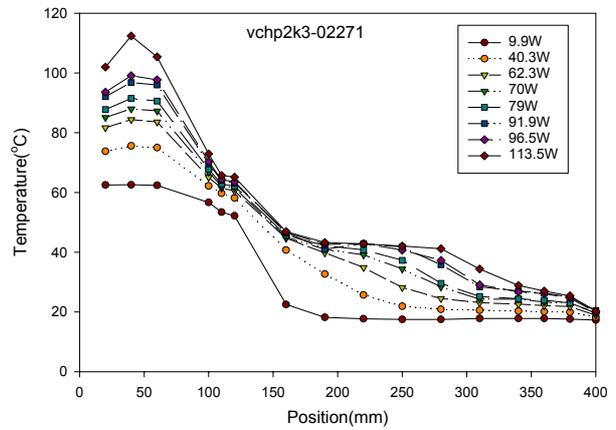
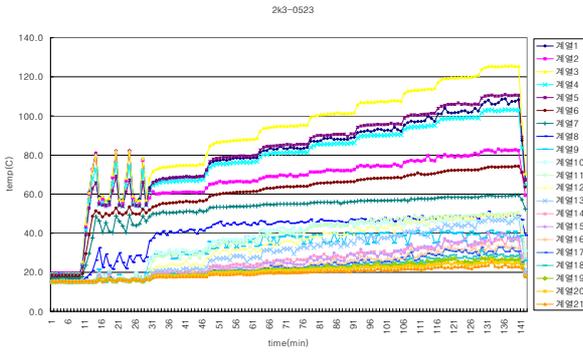


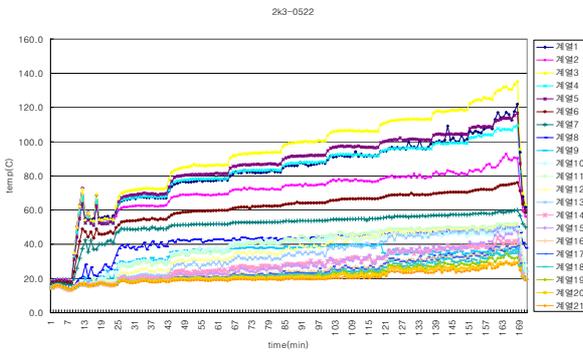
Fig. 8 Wall temperature distribution(3.0 cc).

를 나타내었는데 유입열량이 80 W일 때 증발부 벽면의 온도가 약 87.3°C, 99.3 W일 때 증발부 벽면의 온도가 98.4°C로 약 11°C의 차이가 나 앞의 결과와 큰 차이가 없다는 것을 알 수 있지만 100 W 이상에서는 앞의 경우와는 달리 증발부 벽면의 온도 분포가 균일하지않고 상당히 많이 변하는 경향을 보이는 것으로 보아 불응축 가스량이 적은 관계로 응축부의 활성영역이 불응축 가스 탱크 쪽으로 밀려 올라가 응축된 작동유체의 증발부 귀환이 늦어져 생기는 결과로 사료된다. Fig. 3에서 Fig. 7까지를 비교해보면 불응축 가스량이 적어질수록 응축부쪽의 활성영역의 경계점이 불응축 가스탱크부분으로 밀려나는 것을 응축부 표면온도 분포를 통하여 확연히 알 수 있다. Fig. 8은 NCG 1.7×10^{-6} kg, 작동유체 3.0 cc를 주입한 VCHP에서 가열량에 따른 증발부 및 단열부, 응축부의 벽면 온도를 나타내고 있는데 열의 유입량이 79 W일 때 증발부 벽면의 온도가 91.0°C, 내부 증기의 온도가 62.8°C를 나타내었고 유입열량이 96.5 W일 때 증발부 벽면의 온도가 96.5°C, 증기의 온도가 64.1°C, 그 후 유입열량이 113.5 W일 때 증발부 온도가 102 ~ 112°C로 온도차가 나기 시작하고 온도가 110°C를 넘어 실험을 종료하였다. 이것으로 보아 120 W이상에서는 dry-out 상태로 된다는 추측이 가능할 것이다. 또 응축부 표면의 온도 분포를 살펴 보면 응축부 활성 영역의 확장이 확연하게 보이고 있다. 유입열량이 증가하면서 응축부 220 mm 위치의 온도를 보면 40.3 W 일 때 약 25.7°C이고 62.3 W 일 때 온도가 약 35.7°C이고 그 이후 입열량에서는

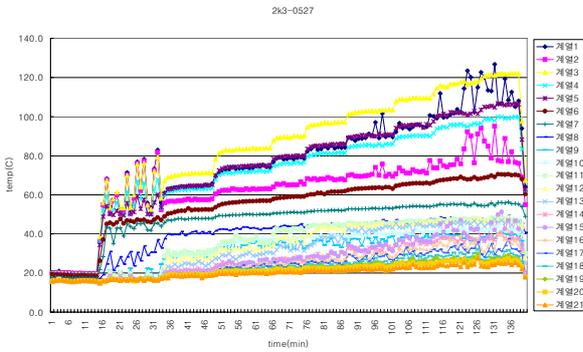
39.1°C ~ 42.9°C의 온도분포를 보이고 있다. 응축부 250 mm 위치의 온도를 비교해 보면 입열량 40 W일 때 21.9°C로 낮다가 62.3 W일때 28.2°C, 70 W일 때 33°C, 91.9 W일 때 41.7°C를 나타내 입열량이 증가하면서 작동증기압의상승과 함께 응축부의 온도가 증가하는 것을 보아 응축부의 유효 면적이 늘어남을 알 수 있었다. 작동증기의 포화압력이 상승하면서 비활성 영역을 가스 저장소쪽으로 밀어낸 결과를 온도 분포를 통해 확인할 수 있었다. Fig. 9는 스크린 메쉬 워를 사용하지 않은 길이 470 mm의 써모싸이폰식 VCHP에서 불응축 가스량을 달리 하였을 때 온도 분포를 나타내고 있는데 (a)는 NCG 1.9×10^{-6} kg, 작동유체 2.3 cc를 주입한 VCHP인데 입열량 110 W까지는 증발부의 표면온도가 안정된 값을 보이고 있는데 120 W에서는 증발부의 제일 아래부분의 온도가 불안정한 값을 보이는 것을 볼 수 있고 (b)는 NCG 1.7×10^{-6} kg를 주입한 경우인데 입열량 90 W까지는 증발부 표면 온도가 안정된 값을 보이다가 100 W부터는 증발부 아래부분의 온도가 불안정한 값을 보여주고 있는 것을 알 수 있다. (c)는 1.5×10^{-6} kg을 주입한 경우인데 입열량이 80 W까지는 증발부의 표면온도가 안정된 값을 보이다가 입열량이 80 W 이상에서는 증발부 아래부분과 그 다음의 온도가 불안정한 값을 나타내는 것으로 보아 응축부 활성영역이 가스저장소 쪽으로 밀려올라가 작동유체의 증발부로의 귀환이 늦어져 작동액 부족으로 인하여 불안정한 값을 나타내는 것으로 사료된다. (d)에서는 (c)의 경우보다 더 불안정한 온도분포를 나타내는 것으로 보아 불응축 가스량이 적게 주입이 된 결과라



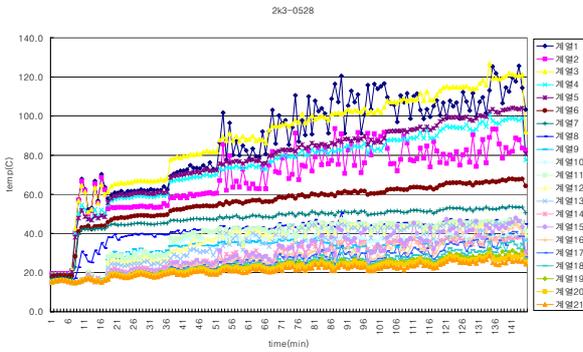
(a) NCG 1.9×10^{-6} kg, 작동유체 2.3 cc



(b) NCG 1.7×10^{-6} kg, 작동유체 2.3 cc



(c) NCG 1.5×10^{-6} kg, 작동유체 2.3 cc



(d) NCG 1.3×10^{-6} kg, 작동유체 2.3 cc

Fig. 9 Wall temperature distribution(2.3 cc).

생각된다. Fig. 9에서 불응축 가스량의 차이에 따른 증발부 온도 분포를 확연히 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 스크린 메쉬 워를 사용한 동-물 가변전열 히트파이프를 평면 선단 모델을 적용하여 설계하여 제작하고 가변전열 히트파이프의 불응축가스량의 변화에 따른 작동온도의 변화를 비교하고 열전달 성능을 실험하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 불응축 가스량의 증가시 초기작동온도가 상승하였고 전반적으로 VCHP의 벽면의 온도가 약간씩 높아졌다.
- (2) 유입열량을 $100 \text{ W} \pm 10 \text{ W}$ 로 하였을 시 증발부의 벽면의 온도를 $\pm 5^\circ\text{C}$ 정도로 변화율을 적게 할 수 있었고 작동 증기온도의 변화도 2°C 정도로 나타났다.
- (3) 유입열량의 증가와 함께 응축부 활성영역의 확장을 확인할 수 있었고 VCHP 설계의 기초자료로 활용이 가능할 것이다.

참고문헌

1. Ioan Sauciu, Aliakbar Akbarzadeh and Peter Johnson, 1996, Temperature Control Using Variable Conductance Closed Two-Phase Heat Pipe, Heat Mass Transfer, Vol. 23, No. 3, pp. 427-433.
2. Byung Kyu Park, Geun Oh Kim, Moo Geun Kim, 2000, Transient Analysis of the Thermal Performance Characteristics of a Gas-Loaded Heat Pipe, Proceedings of the SAREK 2000 Winter Annual Conference, pp. 327-333.
3. Chi, S. W., 1976, Heat Pipe Theory and Practice: A Source Book, Hemisphere Publishing Corporation. pp. 121-123.
4. K.H. Park, K.W. Lee, W.H. Lee, S.Y. Noh, J-S. Suh, 2003, Study on the Heat Transfer Performances of Non-condensable Gas and Working Fluid Quantity in a Copper-Water Variable Conductance Heat Pipe, SAREK 2003 Summer Proceedings, pp. 317-323.