

# 소결된 특성이 히트파이프의 열수송 한계에 미치는 영향

## Effects of the Sintered Wick Characteristics on the Heat Transport Limitations of the Heat Pipes

김근배\*      김 유\*\*  
Kim, Keun-Bae      Kim, Yoo

### ABSTRACT

Experimental studies of the cylindrical sintered-copper wick heat pipes were carried out to investigate the capillary heat transfer characteristics. Six models of the sintered-copper wick heat pipes were manufactured and tested to evaluate the heat transport limitations and the thermal characteristics. Also the performance of the heat pipes was analyzed theoretically and compared with the test results. The heat pipe models are divided into two sintered-wick groups and the nominal particle sizes are  $180\mu\text{m}$  (wick #1) and  $200\mu\text{m}$ (wick #2) respectively. The experimental results showed that, the porosity of wick #1 was higher than that of wick #2, and also the wick #1 was generally superior than the wick #2 for the heat transport capability. The maximum heat transport rates were increased as the wick thicknesses and the vapor temperatures were increased.

주요기술용어(주제어) : Sintered-copper Wick(동-소결된), Heat Pipe(히트파이프), Capillary Radius(모세관반경), Porosity(기공률), Permeability(투과율), Capillary Limitation(모세관 한계)

### 1. 머리말

히트파이프는 내부에 장착된 Wick의 모세관압력과 작동유체의 증발 잠열을 이용하여 열을 전달하는 장치로서, 특히 Wick의 형태와 특성에 따라서 열수송 한계가 달라진다. 최근에는 금속분말을 소결시킨 형태의 소결된 Wick 사용이 점차 확산되고 있으며, 이는

기존의 그루브된 또는 스크린 메쉬된 것에 비해 상대적으로 높은 모세관압력을 발생시키고 작동성능도 우수한 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 구리 분말을 소결시켜 제작한 소결된 히트파이프를 대상으로 Wick의 구조적 관점에서 특성 요인의 변화가 히트파이프의 성능에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였다. 소결된 히트파이프는 금속 분말의 특성이 매우 중요한 요소로 작용하며, 입자의 밀도와 열전도율, 크기 분포와 더불어 소결조건이 부합되어야 한다. 여기서는 소형 전자장비 냉각용으로 활용될 수 있는 동-소결된(Sintered-copper Wick) 원통형 히트파이프를 대상으로, 두 가지 다른 특성의 구리 분말을 사용하여 Wick

† 2005년 12월 1일 접수~2006년 3월 28일 게재승인

\* 한국항공우주연구원(KARI)

\*\* 충남대학교(CNU)

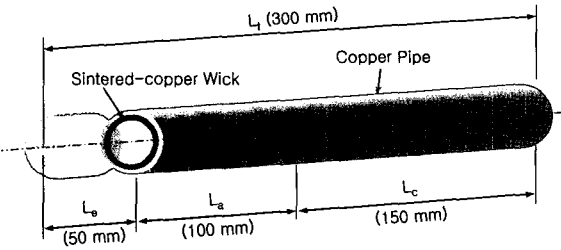
주저자 이메일 : kbkim@kari.re.kr

구조를 형성하고 워 두께를 달리한 히트파이프 샘플을 제작하였으며 온도변화 특성과 열수송 한계 비교 실험을 수행하였다. 또한 실험결과와 비교하기 위해서 실험에 사용된 소결워 히트파이프의 특성을 이론적으로 분석하였다. 소결워 제작에 사용된 두 가지 구리 분말은 입자의 크기와 조성이 다른 것으로 선택하여 입자의 크기 및 소결구조에 따른 워의 다양한 특성을 파악할 수 있도록 하였다. 히트파이프 실험은 작동온도 및 경사각에 따른 다양한 조건에서 수행되었으며 이론적인 예측 결과와 심층적으로 비교 분석되었다.

2. 소결워 히트파이프 형식

가. 히트파이프 형식

본 연구에 적용된 히트파이프는 직경 9.52mm, 길이 300mm의 원통형 동-소결워(Sintered-copper wick) 히트파이프이다. 본 히트파이프의 형상과 상세한 제원을 각각 그림 1과 표 1에 나타냈다.



[그림 1] Schematic of the heat pipe

[표 1] Specification of the heat pipe

Pipe material	Copper
Pipe diameter(thickness)	9.52mm(0.7mm)
Total length	300mm
Length of evaporator zone	50mm
Length of adiabatic zone	100mm
Length of condenser zone	150mm
Wick material	Copper powder
Working fluid	Distilled water

나. 열수송 한계 해석

히트파이프의 이론에서<sup>[1,2]</sup>, 최대 모세관압력(\$P\_{cm}\$)은 히트파이프 내부의 액체-증기 계면에서 워 구조의 특성 및 액체의 표면장력의 관계로 식 (1)과 같이 표현된다.

$$P_{cm} = \frac{2\sigma}{r_c} \tag{1}$$

여기서 유효 모세관 반경 \$r\_c\$는 소결 입자의 형태와 크기, 집적 방식에 따라 결정되는 인자로서, 이론적으로 균일하게 배열된 구형 입자 모델을 가정하여 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$r_c = 0.41r_s \tag{2}$$

\$r\_s\$는 입자들의 평균 반경이며, 입자들의 크기가 작을수록 모세관압력은 증가한다. 모세관의 실제 펌핑 압력(\$P\_{pm}\$)은 히트파이프의 증발부가 상부에 있는 경우 파이프의 전체길이(\$L\_t\$)에 대해 경사각(\$\theta\$)에 해당하는 높이의 압력손실과, 파이프 내부 증기유동부의 직경(\$d\_v\$)에 대해 경사각에 따른 압력손실을 반영하여 식 (3)으로 표시된다.

$$P_{pm} = P_{cm} - \rho_l g d_v \cos\theta - \rho_l g L_t \sin\theta \tag{3}$$

워의 투과성과 단면적이 커질수록 액체의 유동저항은 작아지게 되며 소결워 내부의 액체유동저항과 관련된 마찰계수는 식 (4)와 같이 정의된다.

$$F_l = \frac{\mu_l}{K A_w \rho_l \lambda} \tag{4}$$

여기서, \$A\_w\$는 워의 단면적으로 \$\pi(d\_i^2 - d\_o^2)/4\$이며, 소결워의 투과율 \$K\$는 식 (5)와 같이 근사적으로 구할 수 있다.

$$K = \frac{r_s^2 \epsilon^3}{37.5(1 - \epsilon)^2} \tag{5}$$

한편, 소결워이 두꺼워지면 관내의 증기유동 직경이 감소하므로 증기유동 통로의 증기마찰계수가 증가하며, 이는 곧 열전달 한계를 제한하는 요인으로 작용한다. 증기마찰계수는 식 (6)과 같이 정의된다.

$$F_v = \frac{(f_v Re_v) \mu_v}{2A_v r_{h,v}^2 \rho_v \lambda} \quad (6)$$

여기서,  $A_v$ 는 증기통로의 단면적  $\pi d_v^2/4$ 이며,  $(f_v Re_v)$ 는 증기의 Reynolds 수의 함수로써 일반적으로 히트파이프의 내부 유동은 비압축성의 층류로 간주할 수 있으므로 원형 증기유동 통로에 대해 주어진  $(f_v Re_v)=16$ 을 적용한다. 히트파이프의 모세관 열수송인자  $(QL)_{c,max}$ 는 모세관 펌핑압력과 소결워 내부의 액체유동 마찰계수 및 증기유동 마찰계수를 이용해 식 (7)과 같이 계산된다.

$$(QL)_{c,max} = \frac{P_{pm}}{F_l + F_v} \quad (7)$$

히트파이프의 실제 열수송 능력을 나타내는 최대 모세관 열수송 한계는 히트파이프의 유효길이( $L_{eff}$ )에 의해 식 (8)과 같이 결정된다.

$$Q_{c,max} = \frac{(QL)_{c,max}}{L_{eff}} \quad (8)$$

### 3. 실험장치 및 방법

#### 가. 실험모델 설계 및 제작

앞의 표 1에 주어진 히트파이프 형식을 토대로 제작된 실험모델의 제원을 표 2에 요약하였다.

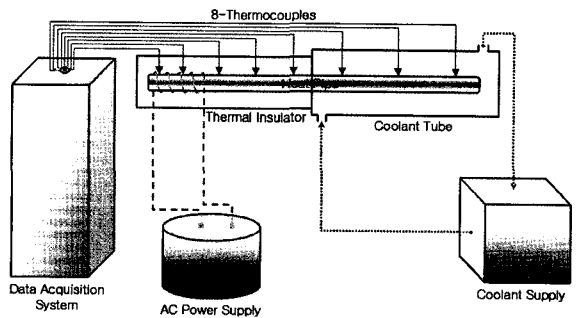
히트파이프는 직경 9.52mm 표준 규격 동-파이프를 사용했으며, 구리 분말은 두 가지 종류의 입자 규격을 적용하여 입자 크기와 워 두께 변화에 따른 6종류의 모델을 제작하였다.

[표 2] Experimental heat pipe models

Pipe spec.	Copper, $\varnothing$ 9.52mm $\times$ L 300mm ( $t_p = 0.7$ mm)
Wick spec.	Copper powder Wick #1(nominal particle size 180 $\mu$ m) Wick #2(nominal particle size 200 $\mu$ m)
Working Fluid	Distilled water
Model-1	Wick #1 & $t_{w1} = 0.45$ mm(water 3.0g)
Model-2	Wick #1 & $t_{w2} = 0.75$ mm(water 4.5g)
Model-3	Wick #1 & $t_{w3} = 1.00$ mm(water 6.0g)
Model-4	Wick #2 & $t_{w1} = 0.45$ mm(water 3.0g)
Model-5	Wick #2 & $t_{w2} = 0.75$ mm(water 4.5g)
Model-6	Wick #2 & $t_{w3} = 1.00$ mm(water 6.0g)

#### 나. 실험장치의 구성

실험장치는 히트파이프 증발부의 열 부하 공급장치, 응축부의 냉각장치, 그리고 주요 지점의 온도 측정 센서 및 데이터 획득 장치로 구성되었다. 그림 2는 실험 장치를 개략적으로 표현한 것이다. 히트파이프의 증발부와 단열부는 단열재로 둘러싸여 있고 응축부 둘레에는 냉각수 공급장치와 연결된 냉각관을 설치하였다.

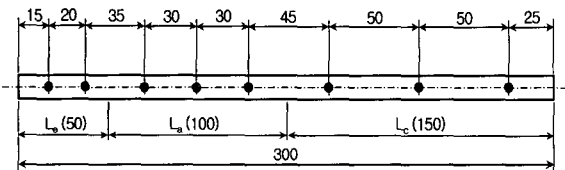


[그림 2] Schematic diagram of the experimental apparatus

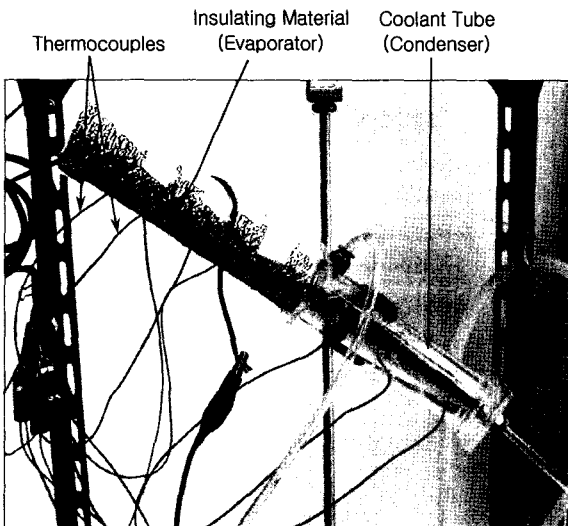
#### 다. 실험조건 및 방법

본 연구에서 실험조건은 히트파이프의 작동온도와

경사각을 대상으로 했으며, 작동온도는 40℃, 60℃, 80℃로, 그리고 경사각은 0°, 30°, 60°로 설정하였다. 기본적으로 증발부의 열 부하가 증가함에 따라서 히트파이프 길이방향으로 온도가 점증적으로 상승하며, 작동온도가 일정하게 안정되면 전체적으로 온도분포가 균일하게 형성된다. 증발부의 가열 량을 계속 높일 경우 어느 순간 증발부 온도가 급격하게 상승하는 순간이 나타나는데 이때를 히트파이프의 열수송 한계로 판단할 수 있다. 증발부의 열 부하는 파이프 둘레에 5mm 간격으로 감은 니크롬선에 공급되는 전력(W)으로 표시되고, 작동온도( $T_w$ )는 단열부 온도를 기준으로 응축부의 냉각수 온도를 조절하여 유지된다. 경사각( $\theta$ )은 증발부가 위로 향할 때의 경사각을 (+)로 설정하였다. 온도 분포는 그림 3에서와 같이 히트파이프 길이를 따라 설치된 8개의 Thermocouple (type T)에서 실시간으로 온도를 측정하고 데이터



[그림 3] Locations of thermocouples on the outside surface of the pipe



[그림 4] Heat pipe sample installation

획득 장치에 기록되었다. 온도센서의 오차는 200℃ + 0.1℃ 수준이다. 증발부의 열 부하는 10W에서 시작하여 Dry-out이 시작되는 시점까지 단계적으로 증가되었으며, 이를 통해서 열 부하의 증가에 따른 히트파이프 길이방향 온도분포와 열수송 한계를 실험적으로 관찰하였다. 그림 4는 실험장치에 실제 히트파이프 모델을 장착한 모습을 보여준다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 가. 소결워의 물리적 특성

###### 1) 소결워 구조

제작된 히트파이프 샘플의 워 구조를 분석하기 위해서 실험에 사용된 두 가지 워 구조(Wick #1 & Wick #2)를 갖는 시편을 제작하였다. 일반적으로 소결입자가 고르게 분포해야 구조적으로 우수한 특성을 발휘할 수 있으나, 실제로는 재료 및 소결공정의 여러 가지 요인으로 인해 균일하지 못한 결과가 초래된다. 본 연구에 사용된 두 가지 분말은 입자의 크기 분포가 다르기 때문에 각각의 소결 특성도 다를 것으로 예상되었지만, 본 실험에서는 두 가지 분말을 대상으로 동일한 소결공정을 적용하였다. SEM을 이용한 워 구조 분석 결과로부터, Wick #1의 입자 분포는 대략 70μm에서 230μm 사이에 넓게 퍼져있으며, Wick #2의 입자 크기는 60~300μm 범위에 걸쳐 폭 넓게 분포하는 것으로 나타났다. 이는 분말 제작과정에서 불가피한 현상으로 사료되며 소결워의 작동특성에 일부 영향을 미칠 수 있는 요인으로 판단된다.

###### 2) 기공률 분포

워의 기공률을 측정하는 방법에는 여러 가지가 있으나, 여기서는 대표적인 두 가지 방법으로 측정하였다. 먼저, 흡수법(Imbibition)은 아르키메데스의 원리를 이용하는 방법으로, 제작된 시편의 건조상태 무게와 액체를 적신 후의(여기서는 증류수 사용) 포화 무게를 각각 측정하여 다음과 같이 계산하였다.

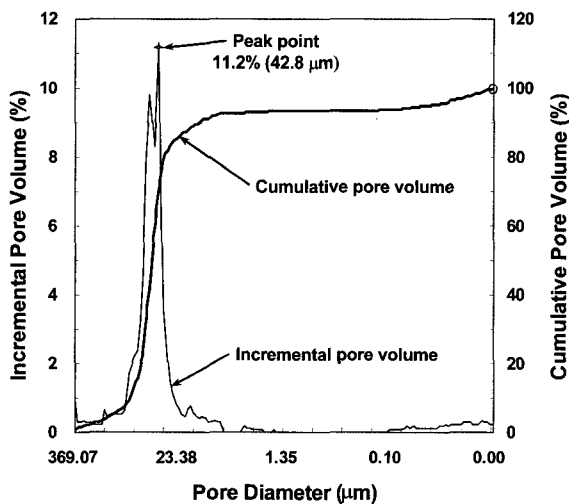
$$\epsilon = \frac{\rho_m(m_w - m_m)}{\rho_l m_m + \rho_m(m_w - m_m)} \quad (9)$$

여기서,  $\rho_l$ 은 액체(Water)의 밀도이고  $\rho_m$ 은 시편 재료(Copper)의 밀도이다. 그리고  $m_m$ 은 건조상태의 시편 질량이며,  $m_w$ 는 액체 포화된 시편의 질량을 나타낸다.

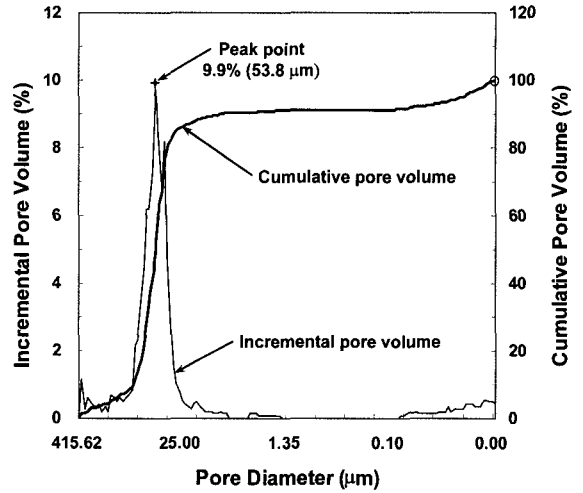
두 번째로, 수은을 이용한 Porosimeter를 사용하여 시편의 기공률 측정과 더불어 워 구조 내부의 기공 크기 및 분포를 정밀하게 측정하였다. 수은은 최대 60,000psi의 높은 압력으로 시편에 주입되어 최소  $0.004\mu_m$ 의 아주 미세한 기공까지 침투하여 채워진다. 흡수법과 수은 주입에 의한 기공률 측정 결과는 대략 유사하게 나타났으며, 두 가지 워 시편의 기공률 측정 및 투과율 계산 결과를 표 3에 나타냈다. 그림 5

[표 3] Porosity measurements and permeability results

Descriptions		Wick #1	Wick #2
Porosity ( $\epsilon$ )	Imbibition	55~56%	52~53%
	Porosimeter	58.8%	57.6%
Permeability ( $K$ )	Imbibition	$6.63 \times 10^{-11}$	$7.97 \times 10^{-11}$
	Porosimeter	$9.66 \times 10^{-11}$	$1.39 \times 10^{-10}$



[그림 5] Pore size and volume distributions of the wick #1

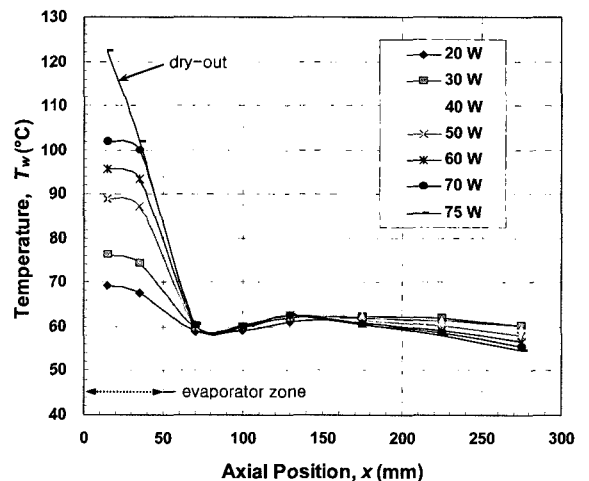


[그림 6] Pore size and volume distributions of the wick #2

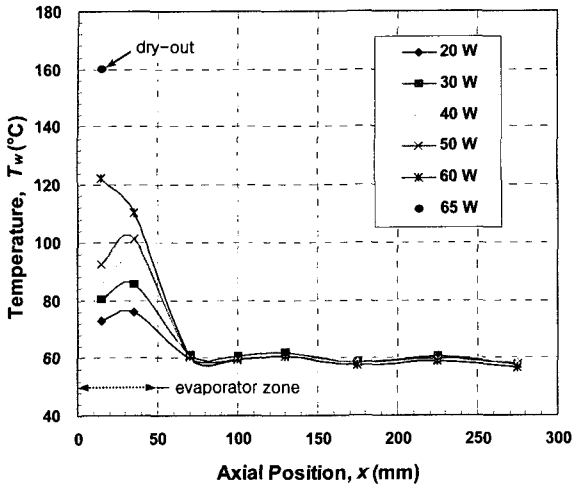
와 6은 Porosimeter 측정에서 얻어진 두 가지 워의 기공크기와 분포도를 보여주고 있다.

#### 나. 히트파이프 온도 특성

먼저, 두 가지 워 구조 Wick #1과 Wick #2를 각각 적용한 Model-2와 Model-5를 대상으로, 작동 온도  $60^\circ\text{C}$  그리고 경사각  $30^\circ$ 에서 측정된 표면온도 분포를 그림 7과 그림 8에 나타냈다.



[그림 7] Axial wall temperature distributions of the model-2 heat pipe, at  $T_v=60^\circ\text{C}$ ,  $\theta=30^\circ$

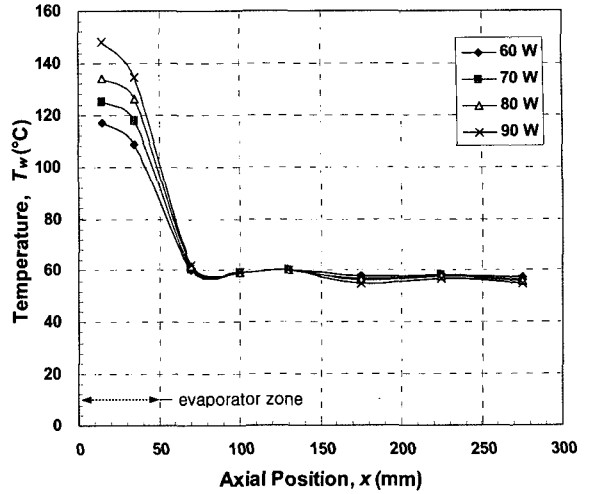


[그림 8] Axial wall temperature distributions of the model-5 heat pipe, at  $T_v=60^\circ\text{C}$ ,  $\theta=30^\circ$

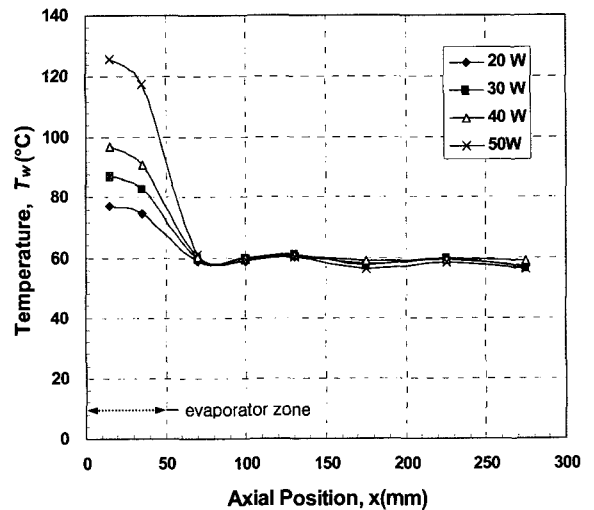
상이한 워 구조를 갖는 Model-2와 Model-5의 온도 분포는 증발부에서 차이를 보이기 시작해서 열 부하가 60W 이상 상승하면 Model-5의 증발부 온도가 훨씬 높게 상승하는 경향을 나타냈다. 이러한 온도상승 차이는 워의 입자구조와 기공률 등의 차이에 기인하는 것으로 판단되며, 히트파이프의 Dry-out 한계에 영향을 미칠 수 있는 요인으로 작용하였다.

히트파이프의 경사각은 열전달 성능에 큰 영향을 미치는 요소로써, 일반적으로 증발부가 위로 향할수록 열수송 한계가 감소하기 때문에 경사각에 따라서 히트파이프의 표면온도 분포가 변화될 수 있다. 그림 9와 그림 10은 Model-5를 대상으로 추가적으로 경사각이 0°일 때와 60°일 때의 표면온도 분포를 나타낸 것이다.

앞의 그림 8에 제시된 30° 경사각 조건과 비교해볼 때 경사각이 증가하면서 열 부하가 감소하고 표면온도도 떨어지는 것을 나타내고 있다. 히트파이프 표면 온도 측정을 통해서, 증기 온도가 일정할 때 열 부하가 증가할수록 증발부의 온도가 상승하면서 단열부 및 응축부와 온도 차이가 커지는 것을 알 수 있다. 이는 증발부의 열전달 성능과 워의 모세관 특성에 기인하는 것으로, 특히 본 실험에서 사용한 모델은 증발부의 길이를 전체 길이의 1/6로 아주 짧게 하였기 때문에 좁은 증발부에 열 부하가 집중되면서 증발부



[그림 9] Axial wall temperature distributions of the model-5 heat pipe, at  $T_v=60^\circ\text{C}$ ,  $\theta=0^\circ$

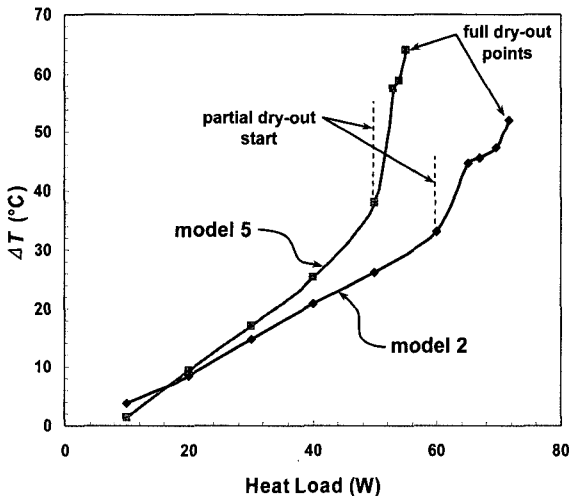


[그림 10] Axial wall temperature distributions of the model-5 heat pipe, at  $T_v=60^\circ\text{C}$ ,  $\theta=60^\circ$

온도가 급격히 상승하는 경향을 나타냈고 단열부와 응축부의 온도 기울기는 상대적으로 작게 나타나고 있다. 열 부하를 계속 증가시켜 히트파이프의 모세관 한계에 도달하면 Dry-out이 시작되면서 온도가 급상승하게 된다. 히트파이프의 (+)경사각이 증가하면 상대적으로 감당할 수 있는 열 부하 용량이 감소하며, 결과적으로 낮은 표면온도에서 조기에 Dry-out이 발

생한다고 볼 수 있다.

히트파이프의 최대 열수송 한계는 일반적으로 증발부의 온도가 급격히 상승하는 Dry-out 발생 시점으로 간주할 수 있다. 본 실험에서는 온도측정 결과를 토대로 증발부의 평균 온도( $T_v$ )와 단열부의 온도( $T_c$ ) 관계로 Dry-out 특성을 조사하였다. 그림 11은 Model-2와 Model-5를 대상으로 증발부 온도와 단열부 온도의 차이( $\Delta T$ )를 열 부하( $Q$ ) 변화에 따라 나타낸 것이다. 증기온도와 경사각이 동일한 조건에서, Model-2가 Model-5보다 작은 온도기울기를 나타내고 있으며, Model-2가 상대적으로 높은 열 부하를 감당할 수 있음을 알 수 있다. 이는 앞에서 살펴본 바와 같이, 위의 구조적 측면에서 Wick #1이 Wick #2보다 우수한 특성을 보인 점에 비추어 볼 때 타당한 결과로 사료된다. 그림 11에서 히트파이프 증발부에 공급되는 열 부하의 증가에 따라 증발부와 단열부의 온도 차가 변화하는 추이를 관찰할 수 있다. 열 부하가 어느 한도에 도달하면 열 부하가 조금만 증가해도  $\Delta T$ 가 큰 폭으로 증가하기 시작하는데 이때를 Dry-out 시작으로 볼 수 있다. 부분적으로 Dry-out이 진행되다가 어느 한계에 도달하면 증발부의 온도가 급격히 상승하면서 완전한 Dry-out 상태로 진입하게 되는데, 이는 Dry-out 단계에서 열 부



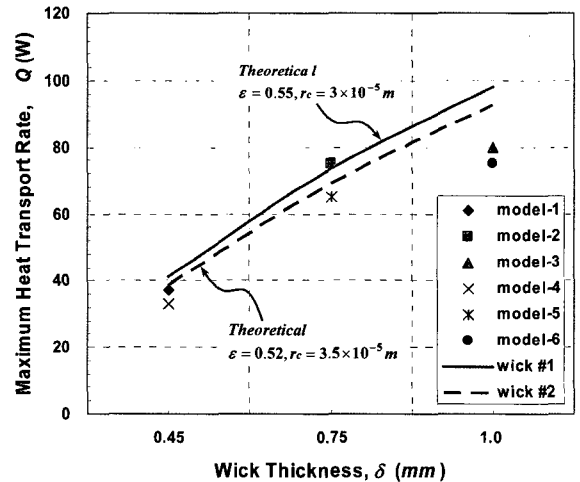
[그림 11] Dry-out limits of the model-2 and the model-5 heat pipes, at  $T_v=60^\circ\text{C}$ ,  $\theta=30^\circ$

하의 증가에 따른 워 내부의 작동유체 거동 및 증발 열전달 특성에 기인한다. 히트파이프 Model-2 샘플의 경우 60W의 열 부하에서 부분적인 Dry-out이 시작되어 70W 수준에서 완전히 발산하였으며, Model-5 샘플은 50 W에서 Dry-out이 시작되어 최대 60W 수준에서 발산하는 것을 보여주고 있다.

#### 다. 워 두께와 열수송 한계 분포

여섯 가지 히트파이프 모델을 대상으로 증기 온도 및 경사각이 일정한 조건에서( $60^\circ\text{C}$ ,  $30^\circ$ ), 세 가지 워 두께에(0.45mm, 0.75mm, 1.0mm) 따른 히트파이프의 최대 열수송 한계를 측정하고 이론적인 예측 값과 비교하였다. 그림 12에 Model-1부터 Model-6까지 히트파이프 샘플을 대상으로 실험을 통해 측정된 열수송 한계와 이론적인 예측 결과를 비교해서 나타냈다. 여기서, Model-1, -2, -3은 Wick #1의 물성 데이터를 적용하였고, Model-4, -5, -6에는 Wick #2의 물성 데이터를 적용하여 두 가지 입자구조의 특성을 비교 분석하였다.

전반적으로 워 두께가 증가함에 따라서 히트파이프의 열수송 한계도 증가하는 것을 보여주고 있으나, 실제 열수송 한계는 이론적인 한계보다 대체로 낮게 나타나고 있다. 특히 워이 두꺼운 Model-3과 Model-6에서 큰 차이가 나타나고 있으며, 이론적인



[그림 12] Wick thickness vs maximum heat transport rate, at  $T_v=60^\circ\text{C}$ ,  $\theta=30^\circ$

예측보다 약 20% 낮게 조사되었다. 이는 샘플 제작 시의 오차와 더불어 위의 이론적 특성과 실제 물성 데이터의 차이에 기인하는 것으로 판단되며, 소결재료의 품질 향상과 제작 공정의 개선을 통해서 손실요인을 줄여나가는 노력이 필요할 것으로 사료된다.

라. 증기 온도와 열수송 한계 분포

경사각 30°, 워 두께 0.75mm 조건에서, 두 가지 히트파이프 Model-2와 Model-5를 대상으로 증기온도가 각각 40°C, 60°C, 80°C일 때의 최대 열수송 한계를 측정하였다. 그림 13에 두 가지 모델의 증기온도에 따른 열수송 한계 측정결과와 이론적인 추정치를 비교해서 나타냈다. 대체로 증기온도가 증가함에 따라서 열수송 한계도 증가하는 경향을 알 수 있으나, 증기온도가 높아질수록 Model-2와 Model-5의 열수송 한계가 벌어지는 현상이 나타났다. 실제로 40°C에서 두 가지 모델의 한계 차이는 8% 수준이었으나 80°C로 올라가면 약 17% 수준으로 크게 증가하였다. 이는 이론적인 추세와 비교할 때 상대적으로 Model-5의 열전달 성능이 떨어지는 것으로 이해할 수 있으며, Wick #2의 분말 특성 및 구조적 물성과 관련지어 평가할 필요가 있다. 입자구조 측면에서 Model-5에 사용된 분말이 Model-2에 사용된 분말보

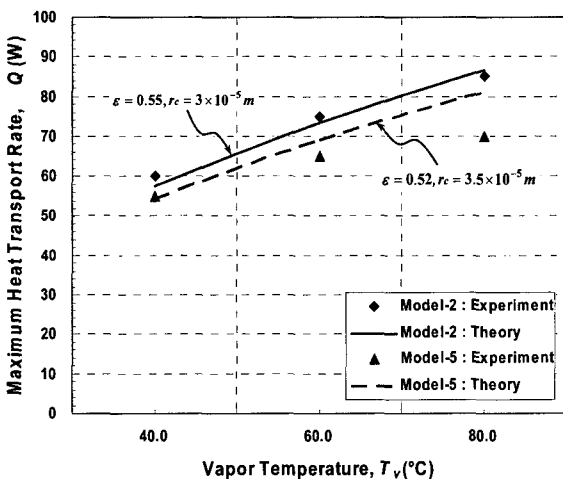
다 평균직경은 약간 크나 기공률에서는 Model-2가 Model-5보다 3% 높은 편이다. 열수송 한계의 관점에서 입자의 크기와 기공률은 모두 큰 영향을 미치는 요소들로서 이론해석 결과에 복합적인 영향을 미칠 수 있으나 결과적으로 여러 가지 증기온도 조건에서 Wick #1의 구조적 특성이 더 우수하다고 볼 수 있다. 실험과 이론해석 결과를 종합해서 평가해보면 전반적으로 Wick #1(Model-2)이 Wick #2(Model-5)보다 모세관 열수송 능력이 우수한 것으로 판단된다.

5. 맺음말

본 연구에서는 입자의 크기와 특성이 다른 두 가지 워 구조(Wick #1 & Wick #2)와 세 가지 워 두께로 조합된 히트파이프 모델들을 제작하여 열전달 특성을 실험하였으며, 아울러 이론적인 해석을 수행하여 실험결과와 비교 분석하였다. 대체로 Wick #1 모델이 Wick #2 모델보다 기공률과 소결구조 관점에서 우수했으며, 결과적으로 Wick #1을 적용한 히트파이프가 Wick #2를 적용한 히트파이프에 비해 전반적으로 열수송 한계가 높은 것으로 밝혀졌다. 두 가지 워의 특성 차이에 의해서, 워 두께가 증가할수록, 경사각이 작을수록, 그리고 증기온도가 높아질수록 히트파이프의 최대 열수송 한계가 증가하였다. 향후 고품질의 재료 사용과 입자의 균일성 확보, 그리고 소결공정 개선을 통해서 히트파이프의 성능을 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] Chi, S. W., "Heat Pipe Theory & Practice", Hemisphere, McGraw-Hill, 1976.  
 [2] Dunn, P. D. and Reay, D. A., "Heat Pipes", 4th Edn. Pergamon Press, 1994.  
 [3] Pruzan, D. A., Klingensmith, L. K., Torrance, K. E. and Avedisian, C. T., "Design of high-performance sintered-wick heat pipes", Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 34, No. 6, 1991, pp.



[그림 13] Vapor temperature vs maximum heat transport rate for model-2, model-5 at  $\theta = 30^\circ$ ,  $\delta = 0.75\text{mm}$



- 1417~1427.
- [4] Peterson, G. P. and Fletcher, L. S., "Effective Thermal Conductivity of Sintered Heat Pipe Wicks", American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1986.
- [5] Cao, X. L., Cheng, P., Zhao, T. S., "Experimental Study of Evaporative Heat Transfer in Sintered Copper Bidispersed Wick Structures", Journal of Thermophysics and Heat Transfer Vol. 16, No. 4, 2002, pp.547~552.
- [6] 윤호경, 문석환, 고상춘, 황건, 최태구, "소결워 히트파이프의 제작 및 작동성능", 대한기계학회논문집 B권 제26권 제9호, 2002, pp.1260~1266.
- [7] 김성대, 성병호, 강환국, 김철주, "소형 소결워 히트파이프의 제조 기술개발에 관한 연구", 한국에너지공학회 2003추계학술발표회 논문집, 2003, pp.291~297.
- [8] 홍성은, 조광철, 강환국, 김상식, "열원의 위치에 따른 소결 워 히트파이프의 열전달 한계에 대한 연구", 대한설비공학회 2004하계학술발표대회 논문집, 2004, pp.858~863.
- [9] 김근배, 김유, "소결워 히트파이프의 열수송 한계에 관한 이론적 해석", 한국추진공학회지 제8권 제4호, 2004, pp.16~25.