

소결워 히트파이프의 열수송 한계에 관한 이론적 해석

김근배* · 김유**

Theoretical Analysis on the Heat Transport Limitation of a Sintered Metal Wick Heat Pipe

Keun-Bae Kim* · Yoo Kim**

ABSTRACT

Theoretical analysis for predicting the heat transport limitation of a copper powder sintered wick heat pipe was performed. The heat pipe diameter was 8mm and water was used for working fluid. The particle diameter was classified by 5 different meshes, and each capillary pressures and heat transport limitations, thermal resistances were analyzed according to the operating temperatures, wick thicknesses and inclination angles, based on the effective capillary radius(r_c), porosity(ϵ), permeability (K). The wick capillary limitation was increased according as the particle diameter and the wick thickness and the operating temperature were increased. As the porosity and the capillary radius were larger, then the heat transport limitation was higher. The thermal resistance was greatly increased according as the wick thickness was increased.

초 록

구리분말 소결워 히트파이프의 열수송 한계를 예측하는 이론적 해석을 수행하였다. 히트파이프의 직경은 8 mm이고 물을 작동유체로 사용하였다. 입자의 직경을 대표적인 5 가지로 분류하여 각각의 유효 모세관 반경(r_c), 기공률(ϵ), 투과율(K)을 토대로 작동온도와 워 두께 그리고 경사각에 따른 모세관압력과 열수송 한계, 열저항을 분석하였다. 소결워의 모세관한계는 입자 직경이 크고 워 두께가 증가하며 작동온도가 높을수록 증가했다. 기공률과 모세관 반경이 증가할수록 열수송 한계가 높아졌으며, 워 두께가 증가함에 따라 열저항이 크게 상승하였다.

Key Words: Sintered Metal Wick Heat Pipe(소결워 히트파이프), Capillary Radius(모세관반경), Porosity(기공률), Permeability(투과율), Capillary Limitation(모세관한계), Sonic Limitation(음속한계), Entrainment Limitation(비산한계), Boiling Limitation(비등한계), Thermal Resistance(열저항)

1. 서 론

† 2004년 8월 23일 접수 ~ 2004년 10월 5일 심사완료

* 정회원, 한국항공우주연구원 체계종합그룹

** 중신회원, 충남대학교 기계공학과

연락처, E-mail: kbkim@kari.re.kr

히트파이프는 가장 효율적인 열전달 장치의 하나로서 1944년에 미국의 Gaugler에 의해 처음

발명된 후 미국 NASA에서 본격적으로 응용연구가 시작되었다. 히트파이프는 초기에 인공위성 등의 항공우주분야에서 적용되기 시작해 점차 활용분야가 넓어져왔으며 근래에는 소형 전자부품 냉각을 비롯해서 가정용과 산업용에 광범위하게 쓰이고 있다. 히트파이프는 모세관력을 이용하여 열을 전달하는 특성 때문에 무중력 상태에서 사용이 가능하며, 특히 인공위성과 같이 미소중력이 작용하는 영역에서 매우 효과적으로 열을 제어할 수 있다[1,2,3]. 최근에는 개인용 노트북 컴퓨터의 소형 고성능화에 따라서 히트파이프 방식의 히트싱크가 많이 활용되고 있다. 이러한 소형 전자부품 냉각에 사용되는 히트파이프는 직경 10 mm 미만의 가는 관이 많이 사용되며, 일반적으로 증발부의 길이는 짧은 반면 단열부와 응축부는 상대적으로 길다. 작은 직경의 히트파이프에서 열을 효율적으로 수송하기 위해서는 무엇보다도 Wick의 특성이 중요하다. 일반적으로 Wick의 메쉬수가 크면 모세관력이 증가하지만 유체의 유동저항도 커지게 되며, Wick의 두께가 증가하면 증기유로 면적이 감소하여 증기유동저항이 커지게 되므로 열수송 한계가 줄어들게 된다. Wick은 형식에 따라서 여러 가지로 분류될 수 있다. 일반적으로 제작이 용이한 그루브형과 스크린 메쉬와 방식을 많이 사용하며, 특히 스크린 메쉬와의 특성에 대해서는 국내에서도 많은 연구가 이루어졌다[4,5]. 최근에는 분말 금속을 파이프 내부에 소결시켜 제작하는 방식의 소결Wick이 널리 활용되고 있다. 소결Wick은 제작이 다소 까다로운 반면 아주 미세한 금속 분말을 사용하기 때문에 모세관 압력이 매우 높고 열전달 특성이 우수한 장점을 갖고 있다. 해외에서는 이미 오래전부터 소결Wick 히트파이프를 사용해오면서 기술 축적이 상당히 이루어졌으며, 고성능 소결Wick을 개발하기 위한 연구가 계속되고 있다[6,7]. 국내의 경우 이제 초보적인 단계에 접어들고 있으며 최근에 소결Wick 분야에 관한 기초적인 연구가 수행되고 있으나[8,9,10], 기술개발의 범위가 좁아 폭넓은 활용성을 갖고 있지 못한 실정이다.

본 논문에서는 소결Wick을 적용한 전자냉각용 소형 히트파이프를 대상으로 모세관 특성 및 열수송 한계에 관한 이론적 해석을 수행하였다. 소결Wick 히트파이프의 열전달 특성을 파악하기 위해서 Wick에 사용되는 구리 분말의 메쉬수와 모세관 반경, Wick 두께, 경사각, 증기온도, 기공률을 변수로 모세관 압력과 열수송 한계, 열저항 등을 종합적으로 분석하였다.

2. 소결된 히트파이프 해석 이론

2.1 히트파이프 형식

본 연구에 적용된 히트파이프는 직경 8 mm, 길이 300 mm 크기로서 내부에 구리 분말을 소결시켜 Wick을 형성한 방식의 소형 소결Wick 히트파이프이다. 본 히트파이프의 형상과 상세한 제원을 각각 Fig. 1과 Table 1에 나타냈다.

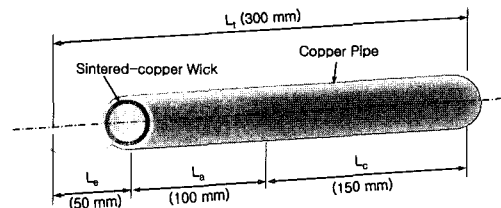


Fig. 1 Schematic of the heat pipe

Table 1. Specification of the heat pipe

Sintered metal wick heat pipes	
Pipe material	Copper
Pipe diameter(thickness)	8 mm (0.7 mm)
Total length	300 mm
Length of evaporator zone	50 mm
Length of adiabatic zone	100 mm
Length of condenser zone	150 mm
Wick material	Copper powder
Working fluid	Distilled water

일반적으로 소결방식은 파이프 내부에 적당한

직경의 심을 끼우고 심과 파이프 사이에 금속 분말을 충전한 후에 소결로에서 성형시킨다. 제작과정에서 입자 크기의 편차 및 성형 밀도 분포의 불균일성이 생길 수 있으며 이는 히트파이프의 특성을 떨어뜨리는 요인으로 작용한다. 소결위는 이론적으로 사용된 분말 입자의 크기와 워의 두께에 따라 다양한 열전달 특성을 나타낼 수 있기 때문에, 용도에 적합한 특성을 갖도록 설계되어야 한다. Table 1에 주어진 히트파이프는 전형적인 형식으로 기초적인 이론 해석의 모델로 적당하다고 판단되었다.

2.2 해석 이론

히트파이프는 기본적으로 워의 모세관압력을 이용하는 장치이므로 모세관압력은 최대가 되고 열저항은 최소화되도록 설계한다. 소결워의 경우, 사용된 금속 분말 입자의 크기(평균직경)에 따라서 유효 모세관 반경(r_c)이 산출되며 결과적으로 히트파이프의 열전달 특성을 결정하는 모세관 한계가 정해진다. 또한 소결 입자의 집적도를 나타내는 기공률(ϵ)에 의해서 워 구조의 특성이 영향을 받으며 이는 곧 투과율(K)과 함께 워의 열전달 한계를 결정하는 요소로 작용한다. 다른 한편으로 워의 두께에 따라 작동유체의 유동저항과 증기유동저항이 영향 받게 되며 파이프의 직경이 작은 경우에는 소결입자의 크기와 워의 두께에 따라 작동이 불가능한 영역이 발생할 수 있으므로 설계에 영향을 미치는 인자에 대한 분석이 필요하다.

히트파이프의 이론에서[1,2], 먼저 최대 모세관압력(P_{cm})은 히트파이프 내부의 액체-증기 계면에서 워 구조의 특성 및 액체의 표면장력의 관계로 식(1)과 같이 표현된다.

$$P_{cm} = \frac{2\sigma}{r_c} \quad (1)$$

여기서, 유효 모세관 반경 r_c 는 소결 입자의 크기와 집적 방식 그리고 입자들 간의 융합 정도에 따라 결정되는 인자로서, 이론적인 구형 입자 모델을 토대로 식(2)와 같이 구할 수 있다.

$$r_c = 0.41r_s \quad (2)$$

여기서, r_s 는 입자들의 평균 반경이다. 즉, 입자들의 평균직경이 작을수록 모세관압력은 증가한다. 모세관의 실제적인 펌핑압력(P_{pm})은 히트파이프의 증발부가 상부에 있는 경우 파이프의 전체길이(L_t)에 대해 경사각(θ)에 해당하는 높이의 압력손실과, 파이프 내부 증기유동부의 직경(d_v)에 대해 경사각에 따른 압력손실을 고려하여 식(3)으로 표시된다.

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

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

$$F_l = \frac{\mu_l}{K A_w \rho_l \lambda} \quad (4)$$

여기서, A_w 는 워의 단면적으로 $\pi(d_i^2 - d_o^2)/4$ 이 되며, 소결워의 투과율 K 는 Blake-Kozeny equation를 이용하여 식(5)와 같이 근사적으로 구할 수 있다.

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

소결워의 기공률(ϵ)은 입자 크기 및 밀도 분포의 불균일성 때문에 실제로 계산하기가 매우 어렵지만, 이론적으로 입자들이 균일하다는 이상적인 가정 하에 식(6)과 같이 입자들의 평균반경 및 모세관 반경과의 관계가 성립된다.

$$\epsilon = \frac{\pi}{6 \left[1 - \left(\frac{r_c}{r_s} \right)^2 \right]^{2/3}} \left\{ 1 - \left(\frac{r_c}{r_s} \right)^2 \left[2 - \sqrt{1 - \left(\frac{r_c}{r_s} \right)^2} \right] \right\} \quad (6)$$

한편, 소결워가 두꺼워지면 관내의 증기유동 직경이 감소하므로 증기유동 통로의 증기마찰계수가 증가하며, 이는 곧 열전달 한계를 제한하는 요인으로 작용한다. 증기마찰계수는 식 (7)

과 같이 정의된다.

$$F_v = \frac{(f_v Re_v) \mu_v}{2A_v r_{h,v}^2 \rho_v \lambda} \quad (7)$$

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 여기서도 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(8)와 같이 계산된다.

$$(QL)_{c,max} = \frac{P_{pm}}{F_l + F_v} \quad (8)$$

히트파이프의 실제 열수송 능력을 나타내는 최대 모세관 열수송 한계는 히트파이프의 유효 길이(L_{eff})에 의해 식(9)와 같이 결정된다.

$$Q_{c,max} = \frac{(QL)_{c,max}}{L_{eff}} \quad (9)$$

결과적으로 히트파이프의 모세관한계에 영향을 미치는 주요 인자는 워의 입자크기와 기공률, 투과율 그리고 두께이며, 모세관한계를 높이기 위해서는 그러한 구조적 특성들을 적절히 조화시킬 필요가 있다. 모세관한계는 일반적으로 히트파이프의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 요소로 볼 수 있으며, 그 외 증기의 속도가 음속 한계를 넘지 않아야 하는 음속한계와 증기 속도가 액체를 비산시킬 수 있는 비산한계 그리고 워에서 증기 방울이 형성되는 비등한계 등이 히트파이프의 작동에 영향을 미치는 요소들이다. 음속한계와 비산한계, 비등한계는 각각 식(10), 식(11) 및 식(12)로 표시된다.

$$Q_{s,max} = A_v \rho_v \lambda \frac{\gamma_v R_v T_v}{2(\gamma_v + 1)}^{1/2} \quad (10)$$

$$Q_{e,max} = A_v \lambda \left(\frac{\sigma \rho_v}{2r_{h,s}} \right)^{1/2} \quad (11)$$

$$Q_{b,max} = \frac{2\pi L_e k_e T_v}{\lambda \rho_v \ln(r_i/r_v)} \left(\frac{2\sigma}{r_n} - P_c \right) \quad (12)$$

식(12)에서, k_e 는 워 내부에 작동유체가 차있는 상태에서 워와 작동유체의 혼합 열전도율이며 소결 입자의 크기가 비교적 작고 균일하다는 전제하에 식(13)을 이용하여 구할 수 있다.

$$k_e = \frac{k_l [(2k_l + k_w) - 2(1 - \epsilon)(k_l - k_w)]}{[(2k_l + k_w) + (1 - \epsilon)(k_l - k_w)]} \quad (13)$$

여기서, k_l 과 k_w 는 각각 작동유체와 워의 열전도율이다. 히트파이프의 열전달 한계에 영향을 미치는 또 하나의 주요 요인이 열저항이다. 열저항이 크면 결과적으로 열수송량이 감소하기 때문에, 모세관한계는 높이면서 열저항은 최소화되도록 설계하는 것이 중요하다. 히트파이프의 열저항은 증발부에서 응축부에 이르기까지 기본적인 열전달 관계식을 통해 구할 수 있으며, 전체 열저항 R_t 는 식(14)와 같이 계산된다.

$$R_t = R_{pe} + R_{we} + R_{vap} + R_{wc} + R_{pc} \quad (14)$$

여기서, R_{pe} , R_{we} , R_{vap} , R_{wc} , R_{pc} 는 각각 증발부의 파이프 벽과 포화 워, 증기유동 통로, 응축부의 포화 워와 파이프 벽에서의 열저항을 의미하며 식(15)로 표현된다.

$$\begin{aligned} R_{pe} &= \frac{r_o t_p}{2L_e k_p} \\ R_{we} &= \frac{r_o^2 t_w}{2L_e r_i k_{ec}} \\ R_{vap} &= \frac{\pi r_o^3 T_v F_v \left(\frac{L_c}{6} + L_a + \frac{L_c}{6} \right)}{\rho_v \lambda J} \\ R_{wc} &= \frac{r_o^2 t_w}{2L_e r_i k_{ec}} \\ R_{pc} &= \frac{r_o t_p}{2L_e k_p} \end{aligned} \quad (15)$$

여기서, 유효 열전도율 k_{ee} 는 k_{ec} 와 같다고 가정한다.

3. 해석 결과 및 분석

3.1 모세관압력 및 펌핑압력

소결된 히트파이프의 모세관압력은 주로 금속 분말로 집적된 워의 구조적 특성에 의해 결정되기 때문에 워의 특성을 결정하는 인자들이 이론 해석과정에서 매우 중요하다. 본 연구에서는 대표적인 5종류의 분말 입자 크기를 대상으로 균일하게 밀착된 이상적인 소결구조를 가정하였으며, Table 2에 주요 파라미터들의 이론적인 특성을 나타냈다.

Table 2. Wick structure parameters for analysis.

Mesh, capillary radius, Porosity, Permeability	Effective		
	r_c (m)	ϵ (%)	K (m ²)
100	5.207×10^{-5}	58	4.911×10^{-10}
150	3.471×10^{-5}	58	2.183×10^{-10}
200	2.604×10^{-5}	58	1.228×10^{-10}
250	2.083×10^{-5}	58	7.858×10^{-11}
300	1.736×10^{-5}	58	5.457×10^{-11}

Figure 2는 작동온도에 따른 모세관압력의 분포를 나타낸다.

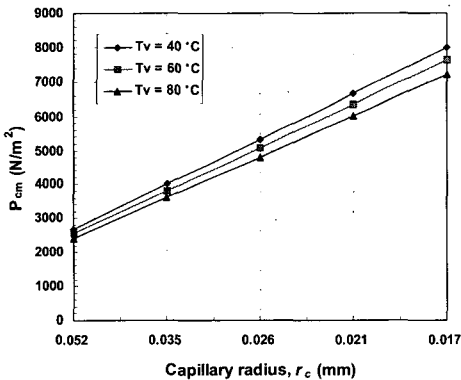


Fig. 2 Capillary pressure vs capillary radius, for three operating temperatures

모세관압력은 워의 모세관 반경과 더불어 작동유체의 표면장력의 함수이기 때문에 작동온도

에 따라 변화된다. 여기서는 물을 작동유체로 사용하기 때문에 Fig. 2와 같이 포화온도가 증가할수록 표면장력이 감소하고 모세관압력이 떨어지는 것을 알 수 있다. 또한, 모세관 반경이 작아질수록 모세관압력이 증가하는 경향을 보여주며, 작동온도 60°C에서 입자 크기가 300 mesh 일 때 최대 7600 N/m²에 이르고 있다. Fig. 3과 Fig. 4는 히트파이프의 모세관 펌핑압력을 나타내며, 이는 각각 경사각과 워의 두께에 따른 모세관압력의 변화를 보여준다.

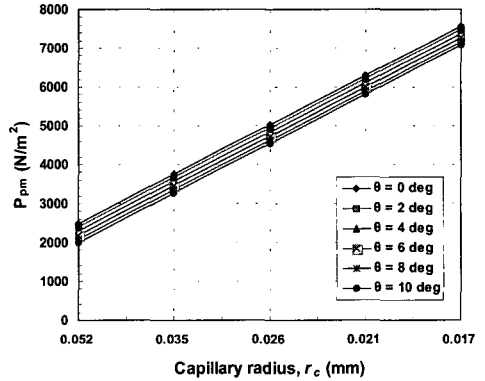


Fig. 3 Capillary pumping pressure vs capillary radius, for six inclination angles at $T_v=60^\circ\text{C}$, $\delta=0.96\text{mm}$

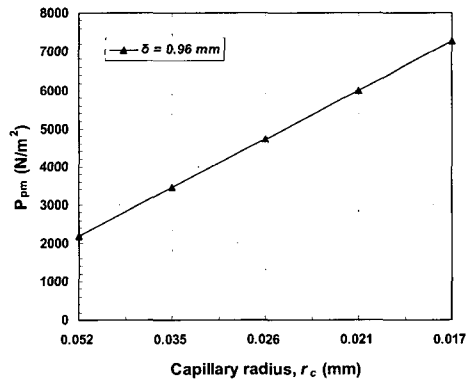


Fig. 4 Capillary pumping pressure vs capillary radius at $T_v=60^\circ\text{C}$, $\theta=6^\circ$

Figure 3에서, 경사각이 증가함에 따라 펌핑압력이 감소하는 것을 알 수 있으며, 대체로 경사각이 2도 증가할 때 펌핑압력이 약 100 N/m^2 정도 감소하고 있다. 두께 변화에 따른 모세관압력의 변화는 거의 나타나지 않았으며, Fig. 4는 대표적으로 $\delta=0.96 \text{ mm}$ 일때, 모세관 반경에 따른 펌핑압력의 변화를 나타낸다.

3.2 액체 및 증기 마찰계수

외 내부의 액체유동 마찰계수와 증기유동 통로에서의 증기유동 마찰계수는 서로 상반된 특성을 지니기 때문에 외의 두께와 작동온도에 따라서 최대 열수송 한계에 미치는 영향이 달라진다. Fig. 5는 증기 포화온도 60°C 에서 외의 두께에 따른 액체마찰계수의 변화를 보여준다.

모세관 반경이 작을수록 마찰계수는 증가하며, 특히 두께가 얇아질수록 기하급수적으로 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 6은 외 두께와 작동온도에 따른 증기마찰계수 분포를 보여준다.

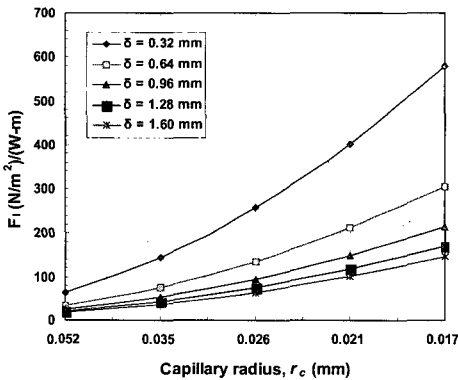


Fig. 5 Liquid friction coefficient vs capillary radius, for five wick thicknesses at $T_v=60^\circ\text{C}$

앞의 액체마찰계수와 반대로 외 두께가 증가할수록 마찰계수는 증가하며, 특히 온도가 낮을수록 큰 폭으로 증가하는 경향을 보여주고 있다. 외 두께가 1.6 mm일 때, F_l 이 최소 $145 \text{ (N/m}^2\text{)/(W-m)}$ 를 나타내는 반면 F_v 는 작동온도 60°C 조건에서 최대 $10 \text{ (N/m}^2\text{)/(W-m)}$ 정도를 나타내고 있다.

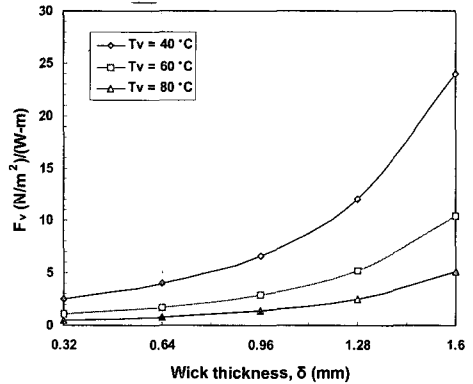


Fig. 6 Vapor friction coefficient vs wick thickness at $\theta=6^\circ$

입자 직경이 크고 외 두께가 얇아질수록 액체 유동저항은 감소하지만 반대로 증기 유동저항은 증가하게 된다. 결과적으로 외의 두께에 따른 액체마찰계수가 상대적으로 성능에 큰 요인으로 작용하며, 입자 크기와 함께 외의 두께를 종합적으로 분석해야 한다.

3.3 모세관 열수송 한계

소결된 모세관 열수송 한계는 앞에서 계산된 모세관압력 특성과 더불어 히트파이프의 설치 경사각에 의해서 정해진다.

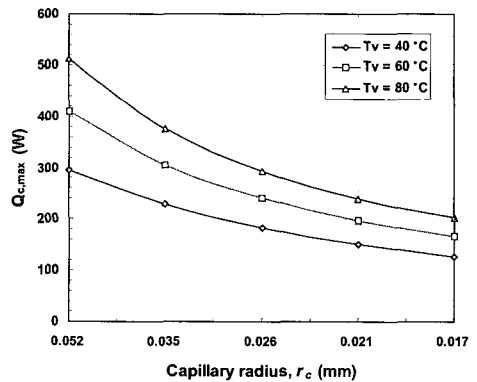


Fig. 7 Capillary limitation vs capillary radius, for three operating temperatures at $\delta=0.96\text{mm}$ $\theta=6^\circ$

Figure 7은 워 두께와 경사각이 일정한 상태에서 모세관 반경과 작동온도에 따른 최대 열수송 한계를 나타낸다. 워의 모세관 반경이 작을수록, 그리고 포화온도가 낮을수록 열수송량이 감소하는 것을 보여준다. 300 mesh 워에서 작동온도를 20°C 높일 경우 모세관한계는 35~40 W 증가한다. 이는 특히 물을 작동유체로 사용하는 경우에 작동온도가 낮을수록 상대적으로 점성계수가 커지면서 유동저항이 증가하기 때문에 생기는 현상으로 모세관압력과 상충되는 특성을 지닌다.

Figure 8은 포화온도와 워 두께가 일정한 상태에서 경사각에 따른 모세관한계를 나타낸다. 경사각이 증가할수록 펌핑압력이 감소하여 열수송량이 일정한 비율로 떨어지며, 입자크기가 클수록 하락폭이 더욱 커져서 100 mesh의 경우 경사각 10도에서 최대 93 W 정도 감소하였다.

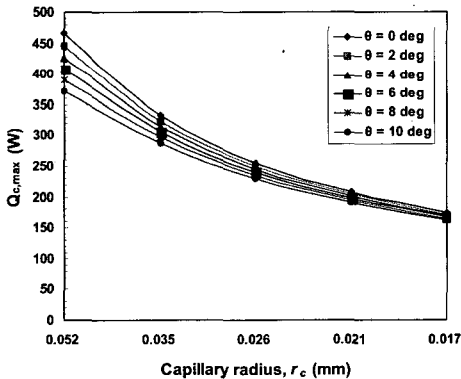


Fig. 8 Capillary limitation vs capillary radius, for six inclination angles at $T_v=60^\circ\text{C}$, $\delta=0.96\text{mm}$

Figure 9는 워 두께에 따른 모세관한계의 변화를 보여준다. 대체로 입자가 크고 두께가 증가할수록 열수송 한계가 증가하고 있으나 특정 조건에 접근할수록 모세관한계에 특이한 변화가 나타나고 있다. 두께가 일정비율로 증가함에 따라서 열수송 한계의 증가율은 감소하며, 워 두께가 1.6 mm일 때 모세관반경이 0.035 mm 이상이 되면 오히려 그보다 얇은 두께일 때의 열

수송량보다 떨어지는 현상을 보이고 있다. 이는 워의 구조적인 특성에 기인하는 것으로 액체 마찰계수가 감소하는 비율보다 증기마찰계수의 증가 비율이 상대적으로 더 크기 때문에 발생하는 것으로 해석된다.

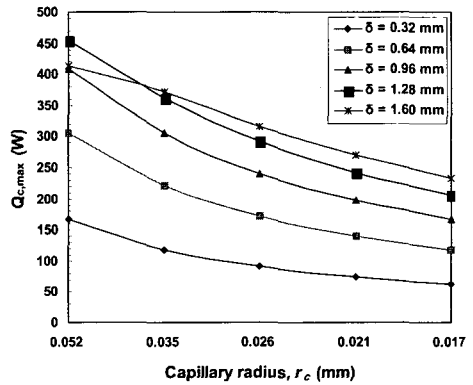


Fig. 9 Capillary limitation vs capillary radius, for five wick thicknesses at $T_v=60^\circ\text{C}$, $\theta=6^\circ$

3.4 음속한계, 비산한계 및 비등한계 열수송량

Figure 10, Fig. 11, Fig. 12는 각각 음속한계와 비산한계 그리고 비등한계를 포화온도와 워 두께에 따라 나타낸 것이다.

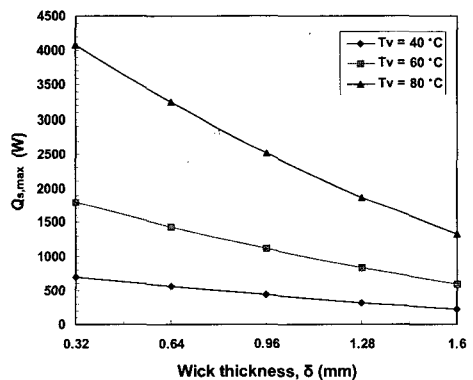


Fig. 10 Sonic limitation vs wick thickness, for three saturation temperatures

Figure 10에서, 워이 두꺼울수록 음속한계가 떨어지고 있으나 모세관한계에 비해 높은 수준

을 보여주고 있으며, 특히 작동온도가 열수송 한계에 매우 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 비산한계는 Fig. 11과 같이, 입자크기가 작고 두께가 얇을수록 커지는 경향을 보이는 특성이 있다. 그러나 상대적으로 모세관한계에 비해서 크기 때문에 모세관한계가 크게 저하되지 않은 범위에서 입자크기와 워 두께를 설계할 필요가 있다.

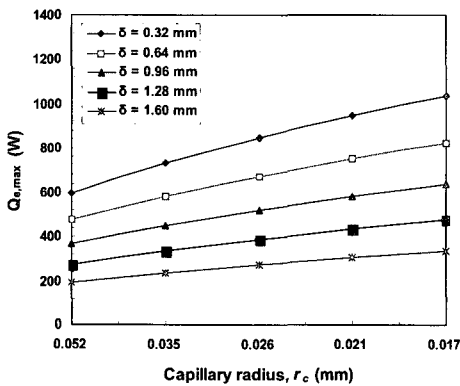


Fig. 11 Entrainment limitation vs capillary radius, for five wick thicknesses at $T_v=60^\circ\text{C}$

Figure 12에 나타난 비등한계는 포화온도와 워 두께에 따른 분포를 보여주고 있다.

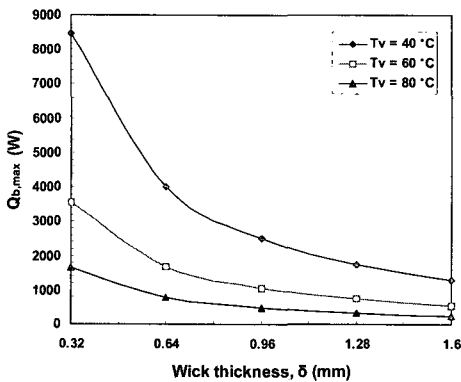


Fig. 12 Boiling limitation vs wick thickness, for three saturation temperatures

음속한계 및 비산한계와 마찬가지로 워이 얇

을수록 비등한계는 상승하며, 특히 워 두께가 0.64 mm 이하로 내려가면 급격하게 올라가는 경향을 보여준다. 포화온도와 관련해서, 온도가 높으면 반대로 비등한계가 낮아지는 현상이 나타났다으며, 이는 증기 특성과 워의 유효 열전도를 변화에 기인하기 때문으로 분석된다. 비등한계도 모세관한계에 비해 매우 높은 수준이기 때문에 히트파이프의 성능은 주로 소결벽의 모세관한계에 의해 결정되는 것을 알 수 있다.

3.5 기공률 영향

기공률(ϵ)은 소결벽의 특성을 결정하는 중요한 요소로서 히트파이프의 모세관한계에 큰 영향을 미치고 있다. Fig. 13은 대표적으로 작동온도 60°C , 워 두께 1.6 mm, 경사각 10도일 때, 기공률과 모세관 반경에 따른 모세관한계의 분포를 예측한 것이다. 기공률의 증가에 따라 열수송량도 증가하고 있으며, 유효 모세관 반경이 클수록 더욱 증가하는 경향을 보여주고 있다. 기공률이 50%일 때와 60%일 때의 열수송량을 비교해보면 평균 200 W 정도 상승하는 것으로 나타났다. 따라서 기공률을 적정하게 제어하는 과정이 매우 중요하며, 현재 소결벽의 성능을 향상시키기 위해서 동시에 두 가지 기공률을 갖도록 워를 설계하는 연구도 수행되고 있다[11].

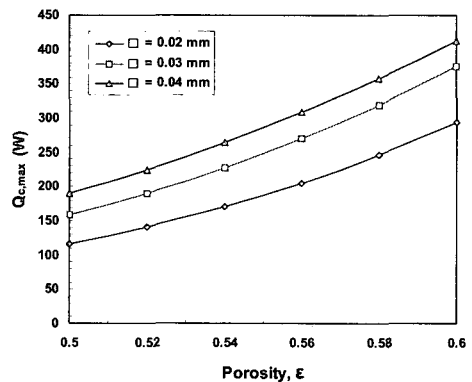


Fig. 13 Capillary limitation vs Porosity, for three capillary radii at $T_v=60^\circ\text{C}$, $\delta=1.6\text{mm}$, $\theta=10^\circ$

3.6 열저항 특성

Figure 14에 워 두께와 포화온도에 따른 히트파이프의 열저항을 예측하여 나타냈다. 히트파이프의 열저항이 작을수록 작동유체의 증발 잠열이 효율적으로 전달될 수 있기 때문에 이는 히트파이프의 설계시 중요한 고려 요소가 된다. 열저항은 워이 두꺼울수록 비례적으로 증가하여 최대 0.8°C/W의 차이가 났으며, 상대적으로 온도차에 따른 영향은 미미한 것으로 나타났다. 결과적으로 워이 두꺼워지면 모세관한계가 증가함과 동시에 열저항도 증가하는 효과가 나타나므로 두 가지 요소를 심층적으로 검토해야 한다.

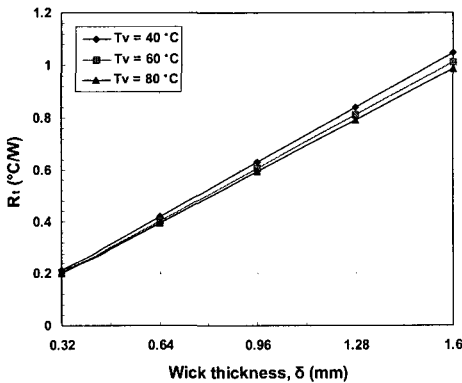


Fig. 14 Thermal resistance vs wick thicknesses, for three saturation temperatures.

4. 결 론

본 논문에서는 직경 8 mm, 길이 300 mm의 소형 구리분말 소결워 히트파이프의 열수송 한계에 관한 해석을 수행하였다. 여기서 도출된 결론은 실험을 거치지 않은 순수한 이론적인 해석의 결과로서 소결워 히트파이프의 특성을 나타낸다. 작동유체는 물을 사용하였으며, 소결워의 구조적 특성에 관한 해석을 위해서 입자의 직경을 대표적인 5 가지로 분류하고 각각의 유효 모세관 반경(r_c), 기공률(ϵ), 투과율(K)를 토대로 작동온도와 워 두께 그리고 경사각에 따

른 모세관압력과 열수송 한계, 열저항을 분석하였다. 소결워의 모세관압력은 기본적으로 모세관 반경이 감소할수록 증가하는 반면, 모세관의 열수송 한계는 입자 직경이 크고 워 두께가 증가하며 작동온도가 높을수록 증가하는 경향을 나타냈다. 음속한계와 비산한계 그리고 비등한계는 모두 워이 얇을수록 커지는 경향을 보였으나, 상대적으로 모세관한계보다 높게 나타나 성능에 미치는 영향은 크지 않았다. 기공률이 커지고 모세관 반경이 증가할수록 열수송 한계가 높아졌으며, 워 두께가 증가함에 따라 열저항이 크게 상승하는 경향을 나타냈다.

[기호 설명]

- d_i, d_o : 파이프 내경 및 외경 [m]
- d_v : 증기 코어 직경 [m]
- k_e : 워/작동액의 혼합열전도율 [W/m-K]
- k_p, k_l, k_w : 파이프, 액체, 워의 열전도율 [W/m-K]
- L_a : 단열부 길이 [m]
- L_c : 응축부 길이 [m]
- L_e : 증발부 길이 [m]
- $Q_{c, max}$: 모세관한계 열전달량 [W]
- $Q_{b, max}$: 비등한계 열전달량 [W]
- $Q_{e, max}$: 비산한계 열전달량 [W]
- $Q_{s, max}$: 음속한계 열전달량 [W]
- r_c : 유효 모세관 반경 [m]
- $r_{h, v}$: 증기 유동 수력 반경 [m]
- r_i : 파이프 내경 [m]
- r_n : 비등 핵형성 반경 [m]
- r_o : 파이프 외경 [m]
- r_v : 증기 코어 반경 [m]
- R_v : 증기 상수 [J/kg-K]
- t_p : 파이프 벽 두께 [m]
- t_w : 워 두께 [m]
- T_v : 증기 포화온도 [°C]

γ_v	: 증기 비열비
ϵ	: 워의 기공률
δ	: 워의 두께 [m]
θ	: 히트파이프 경사각 [deg]
λ	: 작동액의 증발잠열 [kJ/kg]
μ_l, μ_v	: 작동액 및 증기의 점도 [kg/m-sec]
ρ_l, ρ_v	: 작동액 및 증기의 밀도 [kg/m ³]
σ	: 작동액의 표면장력 [N/m]

참 고 문 헌

- Chi, S. W., "Heat Pipe Theory & Practice," Hemisphere, McGraw-Hill, 1976
- Dunn, P. D. and Reay, D. A., "Heat Pipes," 4th Edn, Pergamon Press, 1994
- Faghri Amir, "Heat Pipe Science & Technology," Taylor & Francis, 1995
- 이기우, 노승용, 박기호, "스크린 메쉬워 히트파이프의 열전달한계에 영향을 미치는 인자의 이론적 해석," 설비공학논문집 제14권 제 11호, 2002, pp.880-889
- Ki-Woo Lee, Ki-Ho Park, Wook-Hyun Lee, Seok-Ho Rhi, "Theoretical Analysis of Heat Transport Limitation in Screen Mesh Wick Heat Pipe," International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Vol. 12 No. 1, 2004, pp.1-9
- 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.1417-1427
- Peterson, G. P. and Fletcher, L. S., "Effective Thermal Conductivity of Sintered Heat Pipe Wicks," American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1986
- 윤호경, 문석환, 고상춘, 황건, 최태구, "소결된 히트파이프의 제작 및 작동성능," 대한기계학회논문집 B권 제26권 제9호, 2002, pp.1260-1266
- 김성대, 성병호, 강환국, 김철주, "소형 소결된 히트파이프의 제조 기술개발에 관한 연구," 한국에너지공학회 2003추계학술발표회 논문집, 2003, pp.291-297
- 강환국, 정환수, 김성대, 김철주, "Sintered Metal Wick형 히트파이프의 작동특성에 관한 연구," 대한설비공학회 2002동계학술발표대회 논문집, 2002, pp.121-127
- 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