

論文

소결위의 구조적 특성에 따른 히트파이프의 열수송 한계 분석

김근배\*, 김 유\*\*

Analysis of Heat Transport Limitations of the Heat Pipe for Structural Characteristics of Sintered Metal Wick

Keun-Bae Kim\* and Yoo Kim\*\*

ABSTRACT

In this paper, effects on the heat transport limitation of heat pipe by the wick structural factors were theoretically analyzed for the sintered-copper wick heat pipe. Uniformity of particle size and sintering process were acted as dominant factors on the pore distribution and wick porosity, and small deviations of the wick thickness and the pore size greatly affected the heat transport limitations of the heat pipe. Especially, slight variations of the wick thickness, mean particle radius and capillary radius along the vapor temperatures and inclination angles remarkably changed the capillary limitation of the heat pipe.

초 록

본 연구에서는 소형 동-소결위 히트파이프를 대상으로 소결위의 구조적 인자들이 히트파이프의 열수송 한계에 미치는 영향을 이론적으로 분석하였다. 소결위의 입자 크기의 균일성과 소결 조건이 전체적인 기공분포와 기공률을 포함한 물리적 특성에 지배적인 요소로 작용했으며, 위 두께 및 기공의 작은 편차가 히트파이프의 열수송 한계에 대체로 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히, 증기온도와 경사각에 따라서 위 두께와 평균 입자반경, 그리고 모세관반경의 미세한 변화가 히트파이프의 모세관한계를 현저하게 변화시켰다.

**Key Words** : Sintered-Copper Wick(동-소결위), Heat Pipe(히트파이프), Capillary Radius(모세관반경), Porosity(기공률), Permeability(투과율), Capillary Limitation(모세관한계)

기 호

$d_i, d_o$ : 파이프 내경 및 외경 [m]	$L_e$ : 증발부 길이 [m]
$d_v$ : 증기 코어 직경 [m]	$L_{eff}$ : 유효 길이 [m]
$L_a$ : 단열부 길이 [m]	$Q_{c,max}$ : 모세관한계 열전달량 [W]
$L_c$ : 응축부 길이 [m]	$r_c$ : 유효 모세관 반경 [m]
	$r_{h,v}$ : 증기 유동 수력 반경 [m]
	$r_s$ : 입자 반경 [m]
	$t_w, \delta$ : 위 두께 [m]
	$T_v$ : 증기 포화온도 [°C]

† 2005년 3월 21일 접수 ~ 2005년 8월 10일 심사완료

\* 정희원, 한국항공우주연구원  
연락처, E-mail : kbkim@kari.re.kr

대전시 유성구 어은동 45번지

\*\* 정희원, 충남대학교 기계공학과

$\epsilon$	: 워의 기공률	$\mu_l, \mu_v$	: 작동액 및 증기의 점도 [kg/m-sec]
$\theta$	: 히트파이프 경사각 [deg]	$\rho_l, \rho_v$	: 작동액 및 증기의 밀도 [kg/m <sup>3</sup> ]
$\lambda$	: 작동액의 증발잠열 [kJ/kg]	$\sigma$	: 작동액의 표면장력 [N/m]

## I. 서 론

히트파이프는 내부에 장착된 워(wick)의 모세관압력과 작동유체의 증발 잠열을 이용하여 열을 빠르게 전달하는 매우 효율적인 열전달 장치이다. 히트파이프는 초기에 인공위성 등의 항공우주분야에서 적용되기 시작해서 근래에는 소형 전자부품 냉각을 비롯하여 가정용과 산업용에 광범위하게 쓰이고 있다. 히트파이프는 모세관력을 이용하여 열을 전달하는 특성 때문에, 특히 인공위성과 같이 무중력 환경에서 매우 효과적으로 열을 수송할 수 있다. 전자부품의 소형화에 따라서 히트파이프도 점차 소형화되고 있으며, 작은 직경의 히트파이프에서 열을 효율적으로 수송하기 위해서는 무엇보다 워의 특성이 중요한 요인으로 부각되고 있다. 일반적으로 그루브워와 스크린 메쉬워는 저비용으로 제작이 용이하여 널리 사용되고 있으나 모세관력이 상대적으로 작고 열수송 능력이 떨어진다. 반면에, 소결워는 금속 분말을 파이프 내부에 소결시켜 일체형으로 제작하기 때문에 높은 모세관압력을 발생시키며 중력의 반대방향을 포함해서 어느 방향으로도 높은 효율로 동작할 수 있는 장점이 있다. 또한 높은 열유속을 수송할 수 있는 능력과 더불어 작동유체의 증발에 유리한 넓은 표면적을 보유한다.

본 논문에서는 소결워를 대상으로 워의 구조적 관점에서 특성 요인의 변화가 히트파이프의 성능에 미치는 영향을 이론적으로 분석하였다. 이를 위해 소형 동-소결워 히트파이프를 대상으로 워의 구조적 특성 인자들과 히트파이프의 모세관 특성 및 열수송 한계의 상관관계를 분석하고, 소결워의 두께 및 입자크기와 모세관반경 변화에 따른 히트파이프의 성능 변화를 고찰하였다.

## II. 소결워 히트파이프

### 2.1 히트파이프 형식

본 연구에 적용된 히트파이프는 직경 9.52 mm, 길이 300 mm 크기로서 내부에 구리 분말을 소결시켜 워를 형성한 방식의 소형 동-소결워(Sintered-copper wick) 히트파이프이다. 본 히트파이프의 형상과 상세한 제원을 각각 Fig. 1과 Table 1에 나타냈다.

Table 1. Specification of the heat pipe

Pipe material	Copper
Pipe diameter(thickness)	9.52 mm(0.7mm)
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

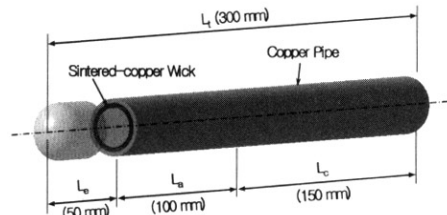


Fig. 1. Schematic of the heat pipe

일반적으로 소결방식은 파이프 내부에 적당한 직경의 심(mandrel)을 끼우고 심과 파이프 사이에 금속 분말을 충전한 후에 소결로에서 성형시킨다. 제작과정에서 입자 크기의 편차 및 성형 밀도분포의 불균일성이 생길 수 있으며 이는 히트파이프의 특성을 떨어뜨리는 요인으로 작용하게 된다. 소결워는 이론적으로 사용된 분말 입자의 크기와 워의 두께에 따라 다양한 열전달 특성을 나타낼 수 있기 때문에, 용도에 적합한 특성을 갖도록 설계되어야 한다. 본 연구에서는 공칭 직경 200  $\mu\text{m}$ 급의 구리 분말을 사용하여 소결 성형하였다.

### 2.2 모세관한계 해석

히트파이프는 기본적으로 워의 모세관압력을 이용하는 장치이므로 모세관압력은 최대가 되고 열저항은 최소화되도록 설계한다. 소결워에서는 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( $\epsilon$ )에 의해서 워 구조의 특성이 영향을 받으며 이는 곧 투과율( $K$ )과 함께 워의 열전

달 한계를 결정하는 요소로 작용한다.

히트파이프의 이론에서[1,2], 먼저 최대 모세관 압력( $P_{cm}$ )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( $\theta$ )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 유동 저항은 작아지게 되며 소결벽 내부의 액체유동 저항과 관련된 마찰계수는 식(4)와 같이 정의된다.

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

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

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

소결벽의 기공률( $\epsilon$ )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 관계로부터 유추할 수 있다.

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

한편, 소결벽이 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 소결벽 내부의 액체유동 마찰계수 및 증기유동 마찰계수를 이용해 식(8)과 같이 계산된다.

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

히트파이프의 실제 열수송 능력을 나타내는 최대 모세관 열수송 한계는 히트파이프의 유효길이( $L_{eff}$ )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 두께, 그리고 기공률과 투과율로 나타낼 수 있으며, 모세관 한계를 높이기 위해서는 그러한 구조적 특성들을 적절히 조화시킬 필요가 있다. 모세관한계는 일반적으로 히트파이프의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 특성이다.

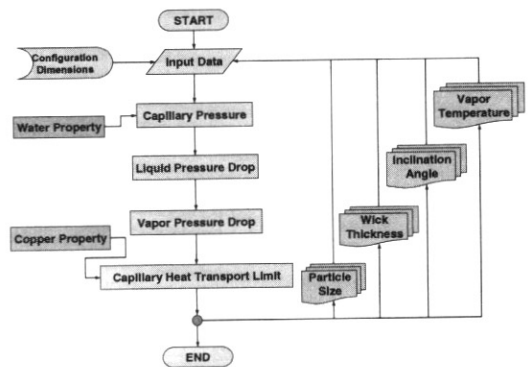


Fig. 2. Flow chart of the performance analysis

소결위의 구조적 특성 인자들과 히트파이프의 열수송 특성 간의 상관관계를 수치적 해석방법으로 분석하기 위해서 Matlab을 이용한 해석 프로그램을 작성하였으며, 대상 모델의 형상과 위의 특성 데이터를 이용하여 히트파이프의 모세관 열수송 특성을 해석하였다. Fig. 2는 해석 프로그램의 계산과정을 개략적으로 나타낸 것이다.

### III. 열수송 특성 분석

#### 3.1 소결위 구조

일반적으로 금속 분말을 소결할 때, 소결로 내부의 온도와 압력 및 성형시간이 매우 중요한 요소로 작용한다. 동일한 재료를 사용하더라도 소결 조건이 달라지면 소결위의 구조적 특성이 다르게 나타날 수 있다. 제작 측면에서 소결위는

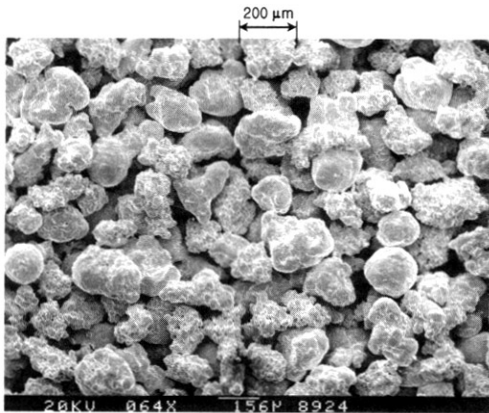


Fig. 3. Scanning electron microscope picture

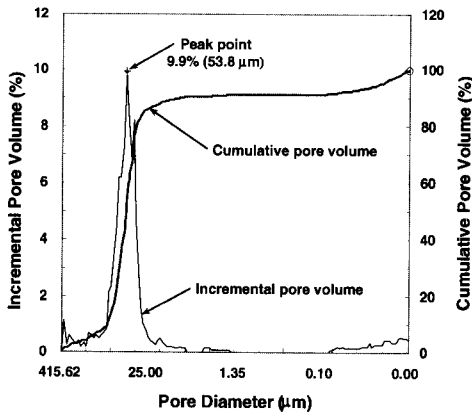


Fig. 4. Pore size and volume distributions of the wick

재료의 선택에서부터 소결 성형 과정에 이르기까지 수많은 변수들이 작용하며, 이러한 변수들의 작은 차이가 누적되면 결과적으로 히트파이프의 열전달 성능에 커다란 영향을 미칠 수 있다. 특히 사용 분말의 특성에 적합한 소결조건이 무엇보다 중요하며, 소결온도와 시간 그리고 분위기 가스의 압력 조건이 위의 기공크기와 분포, 기공률 형성에 중요한 변수로 작용할 수 있다. 따라서 히트파이프 개발단계에서는 다양한 조건에서 실험한 데이터를 토대로 분말 재료에 적합한 소결조건을 찾아내는 과정을 통해서 히트파이프의 성능을 최적화해야 한다.

Fig. 3은 시편으로 제작된 소결위를 대상으로 전자주사현미경(SEM)을 이용하여 확대 촬영한 사진이다.

여기서, 위의 입자 크기는 평균 200 μm 수준이지만 실제로는 60 ~ 300 μm 범위에 걸쳐 폭넓게 분포하는 것으로 나타났다. 일반적으로 소결입자가 고르게 분포해야 구조적으로 우수한 특성을 발휘할 수 있으나, 실제로는 재료 및 소결공정의 여러 가지 요인으로 인해 균일하지 못한 결과가 초래된다. 소결위 내부의 기공크기와 분포는 유효 모세관 반경과 관계되며, 모세관 압력에 영향을 미치게 된다. Fig. 4는 Porosimeter를 이용한 위의 기공 분포를 보여준다. 기공의 부피를 기준으로 평균 기공 직경이 62.0 μm, 그리고 표준편차는 97 μm로서 매우 넓은 범위에 걸쳐 분포하는 특성을 나타냈으며, 전체 기공부피의 75%가 30 - 95 μm 범위에 속해있는 것으로 밝혀졌다. 기공의 산도 범위가 클수록 위의 모세관 반경과 투과율이 균일하지 못할 가능성이 증대되며, 이는 결과적으로 위의 특성에 영향을 미치면서 히트파이프의 모세관 열수송 한계를 저하시킬 것으로 예측된다.

#### 3.2 Wick 두께 편차

Wick 제작과 관련된 또 하나의 주요 오차 요인은 길이방향 및 원주방향 Wick 두께의 편차를 들 수 있다. Wick 두께의 편차 특히 설계치보다 두께가 감소하면 히트파이프의 열수송 능력을 떨어뜨리는 요인으로 작용한다. Wick 두께의 편차는 기본적으로 원소재인 파이프와 소결과정에서 삽입하는 심(mandrel)의 위치가 정밀하게 제어되지 못하기 때문에 발생한다. 일례로 파이프의 직경이 작고 Wick 두께가 매우 얇은 히트파이프의 경우, 파이프 내부에 심의 장착이 균일하지 못하면 부분적으로 소결 불량이 발생할 수밖에 없으며 이는 곧 열수송 능력의 급격한 저하로 이어질 수 있으므로 매

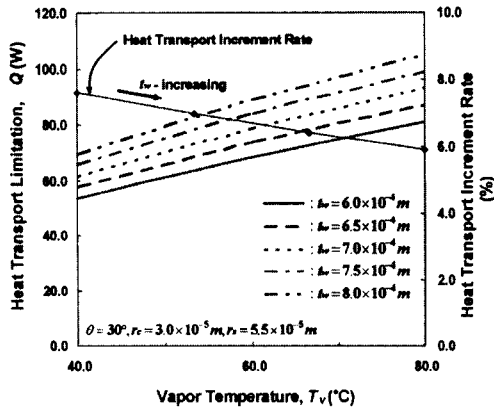


Fig. 5. Effect of the wick thickness on the heat transport limitation

우 정밀한 공정관리가 요구된다. 실제 히트파이프의 샘플 제작을 통해서, 워 두께의 편차가 최대 0.1~0.2 mm에 이르는 것을 감안할 때 원주방향의 열전달계수가 크게 차이날 것으로 예상되며, 이는 곧 히트파이프의 특성이 길이 방향뿐만 아니라 원주방향으로도 변화될 수 있는 요인이 되는 것을 의미한다. 워 두께의 편차는 제작 공정과 밀접하게 관계되는 문제로서 정밀한 공정관리와 더불어 지속적인 기술개발을 통해서 극복해야 할 과제이다.

Fig. 5는 워 두께의 편차에 따른 영향을 평가하기 위해서  $\delta=0.75$  mm 모델을 기준으로 두께의 오차범위를 설정하고, 수치적 방법으로 열수송 한계의 변화를 추정한 결과이다. 워 두께는 0.6 mm에서 0.8 mm까지 5단계로 구분하였으며, 증기온도에 따른 변화를 조사하였다. 대체로 워 두께가 0.05 mm 감소할 때마다 열수송 한계가 6~7% 씩 감소하였으며, 반대로 0.05 mm 증가하면 6% 정도 증가하는 것으로 나타났다.

### 3.3 기공 편차

소결에 사용되는 분말 입자는 기공의 효율을 최대한 높일 수 있도록 균일성을 확보하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서 사용한 분말은 앞의 Fig. 4에서 살펴보았듯이, 전반적으로 입자와 기공의 크기가 매우 넓은 범위에 걸쳐 산포되었으며 이는 소결위의 구조적 특성을 약화시키는 요인으로 작용하고 있다. 입자의 형태와 크기에 따라서 워의 유효 모세관 반경이 정해지며, 이는 소결위의 열전달 성능에 큰 영향을 미치는 중요한 요소이다. 모세관 반경은 이론적으로 입자의 평균 크기에 비례하여 결정할 수 있지만, 실제로는 분말 구성 및 워의 성형 구조에 따라서 미세

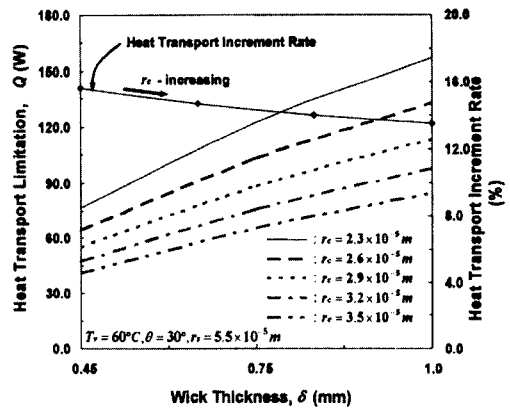


Fig. 6. Effect of the capillary radius on the heat transport limitation via the wick thickness

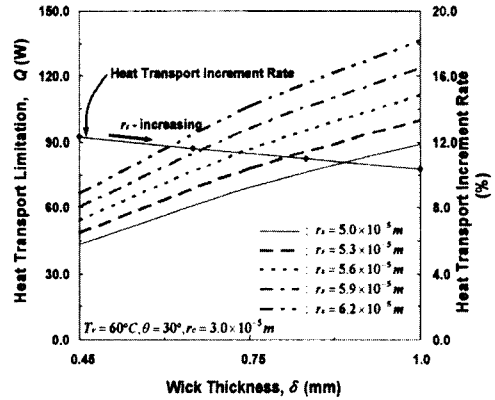


Fig. 7. Effect of the particle radius on the heat transport limitation via the wick thickness

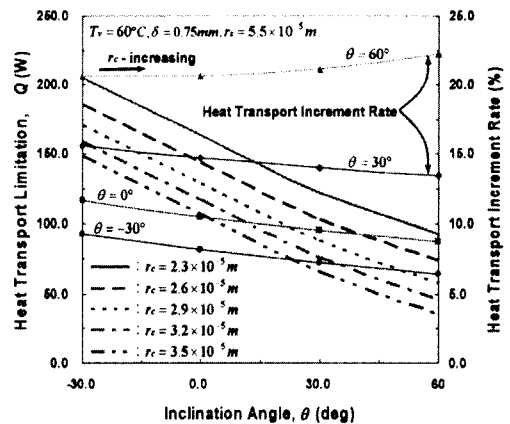


Fig. 8. Effect of the capillary radius on the heat transport limitation via the inclination angle

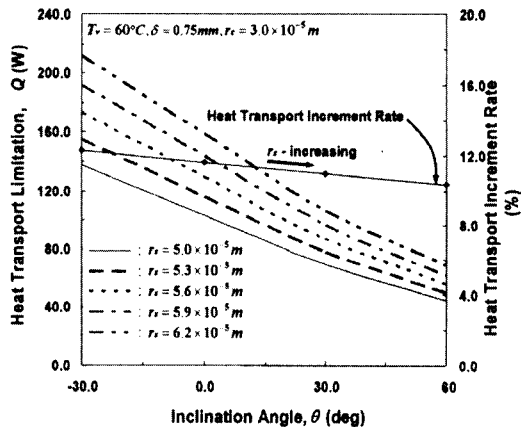


Fig. 9. Effect of the particle radius on the heat transport limitation via inclination angle

하게 변화될 수 있다.

Fig. 6과 Fig. 7은 워 구조의 특성을 결정하는 중요한 요소인 모세관 반경( $r_c$ )과 평균적인 입자 반경( $r_s$ )을 매개변수로 삼아서 실험모델의 워 두께와 열수송 한계의 관계를 수치적 방법으로 비교 추정한 것이다.

여기서 모세관 반경과 입자의 크기는 균일하다는 가정 하에 각각의 크기를 미세한 간격으로 변화시켰으며, 이로부터 본 해석모델에 사용된 워의 구조적 특성이 히트파이프의 성능에 미치는 효과를 분석하였다. 입자의 크기가 일정한 조건에서 모세관 반경이 단계별로  $0.3 \times 10^{-5}$  m 만큼 증가하면 열수송 한계는 워 두께에 따라서 13.5~15.5%의 큰 폭으로 감소하는 것으로 나타났다. 반면에 입자의 크기가 증가하면 열수송 한계도 증가하며 대략 입자의 반경이  $0.3 \times 10^{-5}$  m 만큼 커질 때마다 열수송 한계의 증가율은 10.5~12.5% 수준으로 추정되었다.

Fig. 8과 Fig. 9는 앞에서와 동일한 조건에서 히트파이프의 경사각과 열수송 한계의 관계를 수치적 방법으로 추정한 것이다.

여기서도 모세관 반경의 증가는 열수송 한계의 감소를 일으키지만 경사각에 따라서 감소 비율이 높은 차이를 보이고 있다. 경사각이  $-30^\circ$ 일 때는  $r_c$ 의 증가 단계별로 6.5~9.5% 감소하는 반면, 경사각이  $60^\circ$ 로 증가하면 단계별로 20~22%에 이르는 큰 폭의 감소 현상이 나타났다. 그러나 입자 크기 면에서는  $r_s$ 의 증가 단계별로 경사각에 상관없이 10~12% 수준의 증가율을 보여주었다.

## IV. 결 론

소형 동-소결워 히트파이프를 대상으로 소결워의 구조적 특성 변화가 히트파이프의 열전달 성능에 미치는 영향을 이론적으로 분석하였다. 특히 소결워 히트파이프는 워과 파이프가 일체형으로 제작되기 때문에 제작공정이 복잡하고 이 과정에서 워의 구조적 편차가 발생할 수 있다. 소결워 히트파이프 해석모델을 대상으로 워 두께 및 모세관 반경과 입자 크기를 미세하게 변화시킨 결과, 워 두께가 0.05 mm 줄어든 경우 최대 열수송 한계가 약 6% 감소하였으며, 모세관 반경과 입자 크기의 미세한 차이가 히트파이프의 열수송 한계에 큰 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다. 소결워의 특성은 입자의 크기와 순도, 기공률, 기공 분포에 의해 결정되기 때문에, 히트파이프의 성능을 향상시키기 위해서는 고품질의 균일한 분말의 사용과 더불어 워 두께의 편차를 최소화할 수 있도록 정밀한 소결공정을 개발하는 것이 중요하다고 판단된다. 본 연구의 결과는 향후 소결워 히트파이프의 열전달 성능 향상에 필요한 기초 데이터로 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

## 참고문헌

- 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) Faghri Amir, "Heat Pipe Science & Technology", Taylor & Francis, 1995.
- 4) Peterson, G. P. and Fletcher, L. S., "Effective Thermal Conductivity of Sintered Heat Pipe Wicks", American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1986.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 윤호경, 문석환, 고상춘, 황건, 최태구, "소결워 히트파이프의 제작 및 작동성능", 대한기계

학회논문집 B권 제26권 제9호, 2002, pp. 1260~1266.

8) 김성대, 성병호, 강환국, 김철주, "소형 소결워 히트파이프의 제조 기술개발에 관한 연구", 한국에너지공학회 2003추계학술발표회 논문집, 2003, pp. 291~297.

9) 강환국, 정환수, 김성대, 김철주, "Sintered Metal Wick형 히트파이프의 작동특성에 관한 연구", 대한설비공학회 2002동계학술발표대회 논문

집, 2002, pp. 121~127.

10) 김근배, 김유, "소결워 히트파이프의 열수송 한계에 관한 이론적 해석", 한국추진공학회지 제8권 제4호, 2004, pp. 16~25.

11) 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.