

소결된 히트파이프에 관한 연구 - 제작과 검증 -

김성대* · 강환국** · 성병호*** · 김철주****

A Study on a Sintered Metal Wick Heat Pipe - Manufacturing and Inspection -

Sung-Dae Kim, Hwan-Kook Kang, Byung-Ho Sung and Chul-Ju Kim

Key Words: Capillary limit(모세관 한계), Heat pipe(히트파이프), Sintered metal wick(소결된), Thermal resistance(열저항)

Abstract

For the present study, three heat pipes with different thickness of sintered metal wick were manufactured, and their operational performances, such as capillary limit and thermal resistance were tested and compared with theoretical predictions. Experimental results showed good agreement with those by the theoretical model, and that seemed to present that the sintering process we had developed in the present study was valid.

1. 서 론

모세구동 히트파이프(capillary driven heat pipe)는 작동유체의 상변화 과정을 이용하여 열을 전달하는 장치로써 열원과 열침사이의 작은 온도차에서도 많은 열을 전달할 수 있는 고효율 열이송 장치이다⁽¹⁾. 히트파이프는 개발 초기인 1960년대 이후 오늘에 이르기까지 항공우주 비행체의 핵심 열제어 기술로 이용되고 있으며⁽²⁾, 1980년대 이후 전력변환반도체⁽¹⁾, 데스크 탑·노트북 PC의 CPU⁽²⁾, 무선 통신용 중계기의 트랜지스터, 전기모터 등 전기, 통신, 컴퓨터의 전자반

도체 냉각장치의 냉각⁽¹⁰⁾에 히트파이프를 이용하는 기술에 관한 연구가 많이 수행되었다. 이러한 전기, 전자장비들은 그동안 급격히 발전한 반도체 기술의 결과로 크기는 축소되었지만 성능은 크게 향상되었고, 내부의 전자 반도체들이 발생하는 열을 제거하기 위해 보다 소형의 고효율 냉각장치에 대한 요구를 증대시키고 있다. 이러한 문제의 해결 방안으로써 직경 3~10 mm 범위의 금속소결된 히트파이프를 이용하는 열교환기, 히트싱크, 등이 개발되고 있다⁽¹⁻⁵⁾.

금속 소결된 히트파이프에 관한 제작, 설계기술은 세계적으로 1960년대 초에 확립되었다. 그러나 국내에서는 2000년 초에 이르기까지 국내 수요의 부족, 생산기반기술에 대한 투자 지연, 열사이폰과 같은 대체기술의 이용, 등 여러 가지 이유로 소결된 히트파이프 생산기술에 관한 연구가 충분히 이루어지지 못하였다.

지난 10년이래 컴퓨터, 이동통신 설비 등 국내 전자 반도체 관련 IT산업의 규모가 국제적으로 성장하면서 소결된 히트파이프의 수요 증대가 발생하고 있으며, 따라서 국내에서도 이 기술을 이

*† 성균관대학교 대학원 기계공학부

E-mail : sd4945@hanmail.net

TEL : (031)290-7474 FAX : (031)290-7474

** (주)대흥기업 기술연구소

*** 성균관대학교 대학원 기계공학부

**** 성균관대학교 기계공학부

용하는 냉각장치에 대한 개발과 설비 투자가 새로운 관심을 모으고 있다^(5,8).

소결된 제작은 일반적으로 용기의 내벽에 수백도의 고온과 압력을 가하여 구형의 미세 금속분말을 내벽에 다층 소결하기 때문에 철망, 그루브 등의 윗과 비교할 때 제조공정이 복잡하고 에너지 비용이 크다. 또한 소결공정의 제어가 나쁘면 소결체의 공극율, 투과율, 등의 설계인자들이 설계치와 다르게 되고 이 결과 히트파이프의 성능이 크게 훼손되는 문제가 발생한다. 이러한 소결된 히트파이프에 관해서는 작동원리, 설계에 관한 기술들에 대해 자세하고 많은 연구결과가 발표되어 있는데 반하여 윗의 제조에 관해서는 대부분의 제작업체들이 기술노출을 꺼려하고 있으며 이 결과 공개된 자료들을 구하기 어렵다.

따라서 본 연구에서는 금속분말 소결기반 기술을 이용하여 소결된을 관 내벽에 성형하고, 공극율, 투과율 등 윗의 물성을 측정하여 적절한 소결공정을 검토하였고, 이 결과를 이용하여 외경 12.7 mm, 길이 300 mm인 동관을 이용하여 상온에서 약 30 W의 모세관관계를 갖도록 구리분말을 이용한 소결된 히트파이프를 설계, 제작하였고 경사각, 열부하, 윗 두께를 변화하여 작동특성을 실험하고 각 실험조건에서 열전달 한계와 열저항을 측정하였다. 이들 실험결과와 그동안 많은 연구자들에 의해서 확립된 해석적 결과와 비교함으로써 제작공정의 유용성을 검증하고자 하였다.

2. 관련이론

2.1 모세압 열전달 한계

일반적으로 히트파이프는 내부 작동유체의 유동 및 상변화 특성에 따라 더 이상의 열전달을 이룰 수 없는 최대의 이송 열전달율이 존재하며 이것을 열전달 한계라고 한다. 요인에 따라 모세관, 비등, 음속, 비산한계, 등으로 구분하며 주어진 히트파이프에서는 작동온도에 따라 지배적인 한계요인이 결정된다. 보통 상온에서 사용하는 윗 히트파이프는 예상 작동온도 범위에서 모세관 한계가 지배적 인자가 되도록 설계함으로써 보다 높은 열전달 한계값과 작동안정성을 확보할 수가 있다. Fig. 1은 히트파이프의 형상과 물리적 조건을 나타내고 있다.

이 히트파이프의 모세관에 의한 최대 펌핑압력 P_{pm} 은 다음과 같다.

$$P_{pm} = P_{cm} - \rho_l g L_t \sin \phi \quad (1)$$

여기서 모세압력 P_{cm} 은

$$P_{cm} = \frac{2\sigma}{r_c}, \quad r_c = 0.21D \quad (2-a,b)$$

여기서 r_c 는 증발부윗의 기공에서 기-액계면의 매니스커스 윗호 반경이고, D 는 분말 입자의 직경이다.

최대 열수송 인자 $(QL)_{c,max}$ 는

$$(QL)_{c,max} = \frac{P_{pm}}{F_l + F_v} \quad (3)$$

로 표시되며, F_l , F_v 는 각각 액체 및 증기통로에서 유동 마찰 저항계수 값으로 아래와 같이 표시한다.

$$F_l = \frac{\mu_l}{K A_w \rho_l h_{fg}},$$

$$F_v = \frac{(f_v Re_v) \mu_v}{2\gamma_{h,v}^2 A_v \rho_v h_{fg}} \quad (4-a,b)$$

여기서 K 는 투과율(permeability)이다. 금속 입자 소결체의 투과율에 대해서 이 연구에서는 아래의 Blake-Kozeny 상관식⁽¹⁾을 적용하였다.

$$K = \frac{D^2 \phi^3}{150 (1-\phi)^2} \quad (5)$$

여기서 ϕ 는 소결체 윗의 공극율(porosity)이다. 그리고 열부가 전열면에서 균일할 때 모세관 한계에 의한 최대 열수송율은 다음과 같다.

$$Q_{c,max} = \frac{(QL)_{c,max}}{0.5 L_c + L_a + 0.5 L_e} \quad (6)$$

2.2 열저항

히트파이프가 열전달 한계 이하의 열부하에서 작동하며 정상상태에서의 히트파이프의 열전달 성능은 다음과 같이 열전달 계수 U_{HP} 로 표시할 수 있다. 아래 식들에 대한 자세한 내용은 참고 문헌⁽¹⁻⁵⁾에 기술되어있다.

$$Q = AU_{HP}(T_{b,e} - T_{b,c}) \quad (7)$$

이로부터 열저항은 다음과 같이 정의할 수 있다. 여기서 총괄열전달 계수는 증발부 벽으로부터 응축부벽에 이르는 열전달 경로를 따라 각 요소의

열저항 값으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_{HP} = \frac{1}{R_{p,e} + R_{w,e} + R_v + R_{w,c} + R_{p,c}} \quad (8)$$

이 식에서 $R_{p,e}$, $R_{w,e}$, R_v , $R_{w,c}$, $R_{p,c}$ 는 각각 증발부 벽면, 증발부 워, 증발부에서 응축부로의 증기유동, 응축부 워 및 응축부 벽에서의 열저항을 나타내며 이들은 각각 다음과 같이 표시된다.

$$R_{p,e} = \frac{r_{otp}}{CL_e k_p}, \quad R_{w,e} = \frac{r_{otp}^2}{CL_e r k_e}$$

$$R_v = \frac{\pi r_o^2 F_v (\frac{1}{6} L_e + L_a + \frac{1}{6} L_c) T_v}{h_{fg} O_v}$$

$$R_{w,c} = \frac{r_{otw}^2}{CL_c r k_e}, \quad R_{p,c} = \frac{r_{otp}}{CL_c k_p} \quad (9-a,b,c,d,e)$$

여기서 상수 C 는 참고문헌에서는 2의 값을 썼지만 우리가 계산한 결과 대략 0.8 정도의 값이 나왔으며 1로 계산하였다.

이 식에서 k_e 는 각각 워의 상당 열전도율이며 아래와 같다.

$$k_e = \frac{k_l [(2k_l + k_w) - 2(1-\epsilon)(k_l - k_w)]}{[2k_l + k_w + (1-\epsilon)(k_l - k_w)]} \quad (10)$$

3. 실험장치 및 방법

3.1 소결공정과 시료

초기온도의 시료를 제1차 예열온도 T_s 까지 가열한 후 일정시간 t_1 동안 유지한다. 이 예열 과정에서는 시료세척에 사용한 유기용매 등 휘발성 물질을 제거한다. 이후 반응온도 T_i 까지 가열하고 일정시간 t_2 로 온도를 유지한다. 그리고 반응온도에서 시료의 표면에 산화가 발생하지 않도록 질소 또는 아르곤 가스, 등 불활성 기체 분위기를 사용한다. 소결반응이 완료되면 이후 상온까지 냉각하며 전체 공정이 완료될 때까지 불활성 기체 분위기⁽⁶⁾를 유지한다.

소결워 제작은 아래와 같이 진행하였다.

- 1) 소결워를 히트파이프 구리관 중심부에 금속체 봉을 설치한다.
- 2) 관의 내부와 금속체 사이의 환형공간에 소결분말을 주입한다. 이때 봉과 관이 동심을 이루도

록 지그를 제작하여 사용한다.

- 3) 전기로에 시료를 넣고 공정에 따라 소결시킨다.

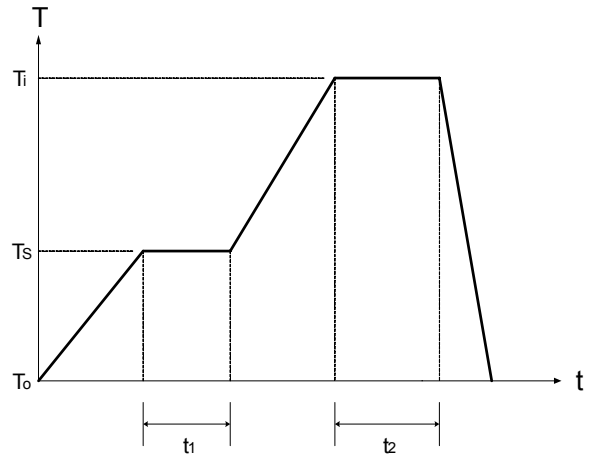
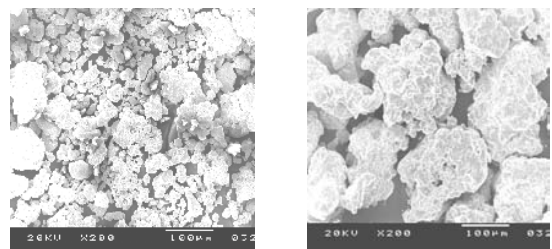


Fig. 1 Sintering process.

히트파이프용 소결워 제작에는 열전도성이 큰 구리분말을 많이 사용한다. 구리 분말 소결체는 워의 열저항이 작고 공업용으로 많이 사용하기 때문에 재료를 구하기가 어렵지 않다. 본 연구에서는 공업용으로 많이 사용되는 저가의 구리분말 입자를 워 재료로 선정하였으며, 호칭 직경이 각각 $100\mu m$ 와 $180\mu m$ 인 두 가지 시료를 이용하였다. Fig. 2는 두 가지 분말의 입도 분포를 파악하기 위해 SEM 촬영을 한 결과이며, 시료들은 두 가지 모두 입자의 크기와 형상이 균일하지 않았으며 특히 $100\mu m$ 의 경우 입자들이 $20\sim 100\mu m$ 까지 입자의 분산도가 매우 컸고, $180\mu m$ 의 경우 $150\sim 180\mu m$ 의 입자들이 90%이상으로 비교적 균일한 분포를 가지고 있었다.



a) $100\mu m$ Powder b) $180\mu m$ Powder

Fig. 2 Microscopic structures of the powder specimens.

3.2 히트파이프의 제작과 성능시험

Table 1은 히트파이프의 제원을 기록하였으며 Fig. 3은 열이송 성능시험을 위하여 히트파이프에 설치한 온도측정점, 전기 가열장치, 수냉각 장치의 구성개요를 보여주고 있다. 가열장치는 히트파이프 용기 외벽에 얇은 내열피복(Nitto tape, Japan)을 입히고 외표면에 전기저항선을 균일하게 감은 뒤 직류전류를 공급할 수 있도록 제작하였다. 그림에서 히트파이프 중심축과 수평면이 이루는 경사각 ψ 는 증발부가 응축부 보다 높게될 때 양의 값으로 정하였다.

Table 1 Specifications of the sintered metal wick heat pipe.

Powder material	Copper
Average powder diameter [μm]	100, 180
Wick layer thickness [μm]	700, 800, 900
Container pipe	
Outer diameter [mm]	12.7
Inner diameter [mm]	11.1
Length of evaporator [mm]	130
Length of adiabatic zone[mm]	40
Length of condenser [mm]	130
Container material	Copper
Working fluid	Water
Mass of charged fluid [cc]	6.0

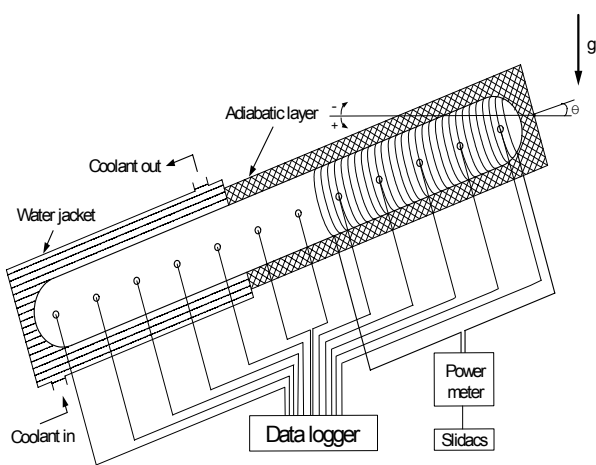


Fig. 3 Schematic diagram of the heat pipe for the performance test.

Fig. 4는 경사각 ψ 를 10~90°까지 변화시키면서 각각 다른 각도에서 촬영한 사진이다.

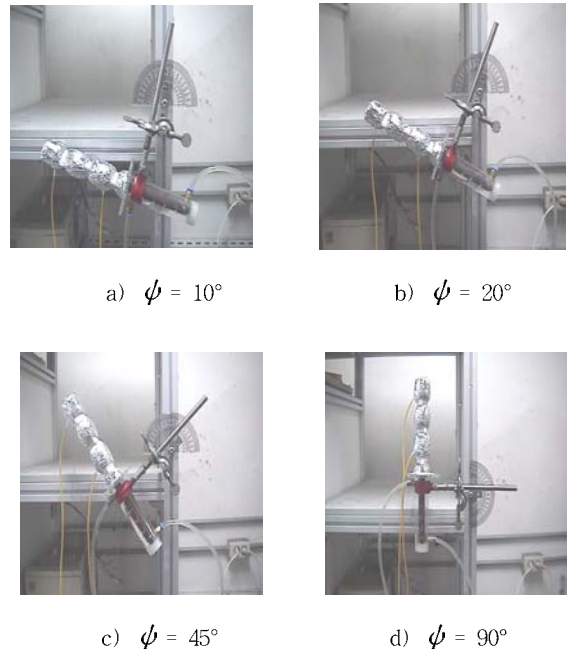


Fig. 4 A view showing the heat pipe positioned at different tilt angles.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 금속분말 시료의 분포

3.1에서 설명한 금속입자 시료의 사진으로부터 입자들의 크기와 분포도를 측정하고 분포도를 고려한 입자 평균 직경값을 얻어내었다. 그 결과 호칭직경 100 μm 시료의 경우 평균 입자직경이 50.3 μm 이었고, 180 μm 시료의 경우 165.5 μm 값을 얻었다. 그리고 이들 입자 평균 직경값과 Blake-Kozeny 상관식을 이용해서 계산한 투과율 값과 위의 투과율 측정 결과를 비교한 것이 Fig. 5이다.

시료의 측정값이 Blake-Kozeny 상관식을 이용한 예측값보다 약 2배정도 큰 값을 나타내었지만 시편이 불균일한 입자들로 제작된 점을 고려하면 매우 근접된 결과로 볼 수 있다.

4.2 열전달 한계

실험구간에서는 작동온도 T_b 를 40°C에 유지하였고, 실험결과와 이 온도값에서 상관식을 이용하여 히트파이프 모세관 열전달 한계를 계산하

고 입자 시료별로 결과를 비교한 것을 Fig. 6과 Fig. 7에 도시하였다. 측정값과 예측값 사이에는 비교적 근접한 관계를 보였다.

이러한 결과는 모세관 압력 한계를 결정하는데

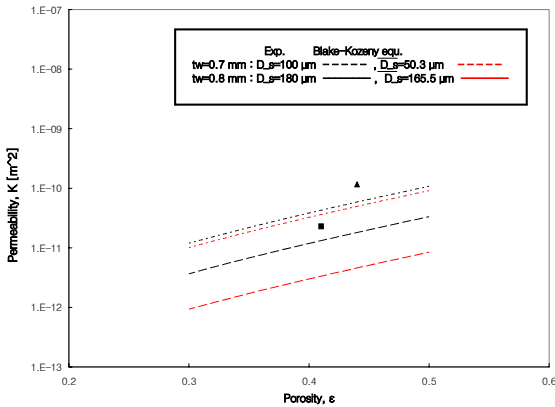


Fig. 5 Comparison between measurements and Blake-Kozeny relation for permeability.

중요한 인자들인 투과율과 함께 공극율이 0.4~0.5으로 측정값과 예측값이 접근된 관계를 보이고 있기 때문이다. 이 결과는 본 연구에서 적용한 소결공정이 소결위의 물성값들에 대한 설계치에 충분히 근접시킬 수 있을 만큼 유용성이 있는 것으로 평가할 수 있다.

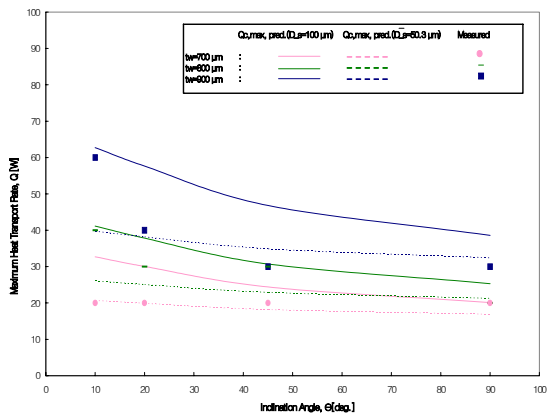


Fig. 6 Maximum heat transport rate versus inclination angle for different values of wick thickness. (100 μm)

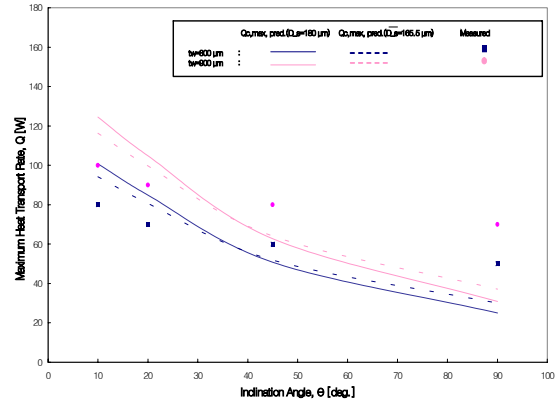


Fig. 7 Maximum heat transport rate versus inclination angle for different values of wick thickness. (180 μm)

4.3 총괄 열전달 계수

Fig. 8과 Fig. 9는 총괄 열전달 계수를 히트파이프의 성능실험과 상관식으로부터 구한 결과를 비교한 것이다.

히트파이프의 열저항은 여러 인자들의 함수로 구성되어 있으나 본 실험 장치의 경우 위의 열저항이 지배적인 인자이고 열전달율의 크기에는 큰 영향을 받지 않는다. 실험결과 Q=10 W이상의 구간에서 이러한 경향을 보인다. 단지 10 W이하의 경우 히트파이프의 양단 온도차가 2~3℃로 작기 때문에 열부하가 작을수록 상대적으로 온도계측에 따른 오차가 증대하기 때문이다. 그리고 실험치와 해석결과는 크기값이 약 15%의 차이가 발생한 반면 경향은 일치하였다.

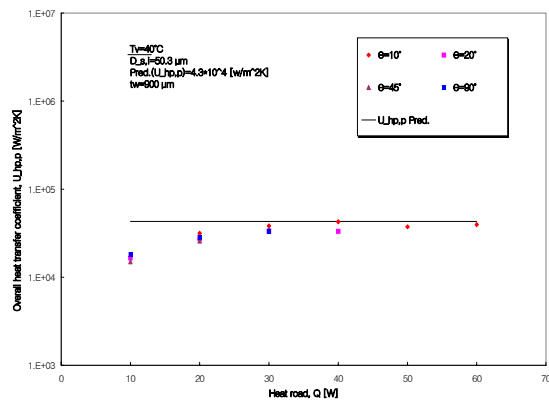


Fig. 8 Overall heat transfer coefficient $U_{HP,B}$ (100 μm)

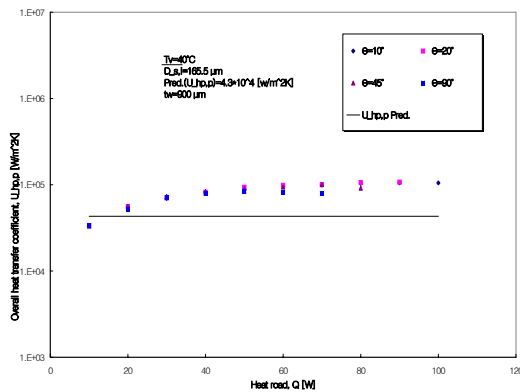


Fig. 9 Overall heat transfer coefficient $U_{HP,p}$ (180 μm)

5. 결 론

호칭 입자 직경이 각각 100 μm , 180 μm 인 구리 분말을 이용하여 내경 11.1 mm, 두께 0.8 mm인 구리관에 물을 소결하였고 이를 사용하여 히트파이프를 제작하여 성능실험을 수행하였다. 모세관 한계에 대한 예측 결과와 최대 열전달 실험 결과를 비교함으로써 소결된 히트파이프 설계 및 제작에 관한 기술의 유용성을 판단하고자 하였다. 주요한 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

[1] 제작한 소결체의 공극율, 투과율, 등 중요한 물성값의 측정값이 설계 예측값과 큰 차이를 내지 않았으며, 이 결과 총합 열전달 계수와 모세관 한계값이 약 10~15% 범위에서 접근하였다. 따라서 우리가 수행한 소결공정은 유효성을 갖는 것으로 생각한다. 다만 제작된 소결체의 기계적 강도(굽힘 및 인장)와 변형율을 고려한 검토가 향후 이루어져야 할 것으로 생각한다.

[2] 일반적으로 사용하는 공업용 소결분말은 입자의 형상과 크기가 일정하지 않으며, 호칭치수보다 작은 입자들로 구성되어 있다. 따라서 이러한 입자들로 제작한 소결체의 물성을 예측하기 위해서는 유효입자반경에 대한 정의가 필요하다. 본 연구에서 적용한 입자크기와 분포도를 고려한 평균입자반경 해석법도 유용한 수단이 될 수 있을 것으로 생각한다.

[3] 총합 열전달계수 $U_{HP,p}$ 를 측정할 때 열부하가 작을수록 온도 측정오차가 증대한다.

따라서 최소한 열전달 한계값의 1/2이상의 열부하에서 측정한 결과를 이용하는 것이 필요하다.

참고문헌

- (1) Chi, S. W., *Heat pipe theory and practice*, McGRAW-HILL Co., 1976.
- (2) Amir Faghri, *Heat pipe science and technology*, Taylor & Francis, 1995.
- (3) Peterson, G. P., *An introduction to heat pipe*, Wiley & Sons, 1994.
- (4) Dunn, P. D., and Redy, D. A., *Heat pipes*, Pergamon Press, 1982.
- (5) Ivanovskii, M. N., Sorokin, V. P., and Yagodkin, I. V., *The physical principles of heat pipes*, Clarendon Press, 1982.
- (6) Randall M. German, *Sintering theory and practice*, Wiley & Sons, 1996.
- (7) Mills, A. F., *Basic heat & mass transfer*, Prentice Hall, 1999.
- (8) Whalley, P. B., *Boiling, condensation, and gas-liquid flow*, Clarendon Press, 1987.
- (9) Kaviany, M., *Principles of heat transfer in porous media*, Springer-Verlag, 1991.
- (10) Ferrell, J. K., Davis, R., and Winston, H., Vaporization heat transfer in heat pipe wick materials, *Int. Heat Pipe Conf.*, Stuttgart, pp. 6-4, 1973.