

## 히트파이프용 소결웁의 제작과정 및 특성

\*윤호경, \*문석환, \*황건, \*\*최태구

### Manufacturing Procedure and Characteristic of Sintered Wick for Heat Pipe

\*Ho Gyeong Yun, Seok Hwan Moon, Gunn Hwang, Tae Goo Choy

**Key Words :** Heat Pipe(히트파이프), Sintered Wick(소결웁), Porosity(기공율), Permeability(투과율), Heat Transfer Limit(열전달 한계)

#### Abstract

There are various wick types for heat pipe. In the present study, the manufacturing technology of a sintered wick among various wick types is discussed. The sintering technology using metal has been applied broadly in the field of electronic-telecommunication as well as heat pipes. A study of manufacturing procedure and characteristic of sintered wick for heat pipe have been performed. Copper powder was used as wick material and stainless steel as a mandrel. A manufacturing technology of the mandrel for arranging vapor core in heat pipe, a sintering technology by first or second times and operating temperature for sintering, the measurements of a porosity, pore size, and pore distribution of sintered wick were considered. In the meantime, a heat pipe with sintered wick has been manufactured and a performance test of the heat pipe has been performed in order to review cooling performance. The performance test results for the 4mm diameter heat pipe with the sintered wick shows the stability since the temperature difference between a evaporator and a condenser of the heat pipe is less than 4.4°C, and thermal resistance is less than 0.7°C/W.

#### 1. 서론

오늘날 휴대용 전자기기들의 고성능화 및 소형/경량화 추세에 따라 시스템의 소모전력 및 구성 전자부품의 단위면적 당 발열량이 크게 증가하고 있다. 이로 인해 칩 및 시스템 차원에서 열소산의 문제가 전자기기들의 지속적인 집적화에 커다란 걸림돌로 작용하고 있어 이 문제의 해결에 초점이 모아지고 있다. 지금까지 전자기기의 열소산 문제를 해결하기 위한 수단으로써 냉각팬에 의한 자연 공냉, 냉각핀+팬에 의한 강제공냉 등이 주로 이용되어져왔고, 고 열부하에는 액침냉각 방식이 이용되어왔다. 그러나 열부하의 증가 및 소음 그리고

신뢰성 등의 문제와 관련하여 히트파이프를 이용한 냉각기술이 근래들어 또 하나의 대안으로써 대두되고 있다. 써모사이폰을 제외하고 히트파이프는 일반적으로 응축된 작동유체를 발열부측으로 귀환시키는 데 웁(wick)으로부터 발생하는 모세관력을 이용하므로 웁은 모세관력을 잘 발생시킬 수 있는 구조와 함께 작동유체의 원활한 유동을 위해 높은 permeability를 가지는 것이 중요하다. 종래의 웁으로는 그루브웁(groove wick), 세선웁(fine fiber wick) 또는 스크린웁(screen wick) 등이 주로 이용되어 왔으며, 각각의 웁들은 나름대로 pore size 및 permeability 측면에서 장·단점을 가지며, 모세관력을 향상시키는 방향으로 지속적인 발전을 거듭해왔다. 상기 웁들과 함께 또한 소결웁(sintered wick)이 이용되어져 왔으며, 소결웁은 다른 웁들에 비해 제작공정에 다소 어려움이 뒤따르나, 다양한 형태, 기공율(porosity) 및 다양한 기공크기(pore size)를 가지는 웁의 제작이 가능하고, 모세관력이 우수한 장점을 갖는다. 본 연구에서는 전자 통신

\* yunhg@etri.re.kr Tel: (042)860-5017

한국전자통신연구원 실장기술팀

\*\* 한국전자통신연구원 부품기술개발부

분야에서 소자냉각 및 열분산 등의 응용대상으로써 그 활용폭이 매우 클 것으로 보이는 소결벽 제작기술의 개발 필요성에 따라 국내차원의 독자적인 기술확보를 위한 개발 연구를 수행하고자 하였다.

중래의 소결벽 제조 방법으로써 금속분말이 포함된 슬러리를 제조한 후 이를 히트파이프의 내부에 충전하고, 고속으로 회전시키면서 건조하여 히트파이프의 내벽에 접착시킨 후 소결을 통해 벽을 완성하는 방법이 있지만, 이러한 방법으로 소결벽을 제조하는 경우, 균일한 벽 구조를 얻을 수는 있으나 제조공정이 복잡하여 응용분야가 제한되는 문제점을 안고 있다. 따라서 본 연구에서는 히트파이프의 내부에 심(mandrel)을 삽입한 상태에서 금속분말을 히트파이프 내부에 충전시킨 후 이를 소결하여 벽을 제작하고 이후 심을 제거하는 제작 방법을 이용하였다. 다만, 소결 후 파이프로부터 심(mandrel)을 원활히 제거하기 위한 방안이 요구된다. 본 연구에서는 소결벽의 제작공정 확립 및 소결벽의 특성을 파악하였으며, 소결벽 히트파이프를 제작하여 얻어진 소결벽의 전열성능 등을 파악 하였다.

## 2. 소결벽의 제작

분위기 조절이 가능한 전기로에서의 소결공정(sintering process)을 통하여 다공질의 히트파이프용 소결벽을 제작하였으며, 제작과정 및 공정은 아래와 같다. 우선 소결용 금속분말은 가격 및 열전도도(thermal conductivity, Table 1) 그리고 작동유체와의 호환성(compatibility)을 고려하여 Cu분말(+325 ~ -100mesh)을 사용하였다.

Table 1 Thermal Conductivity of Various Material<sup>(1)</sup>  
(At Room Temperature Unless Noted Otherwise)

Material	Thermal Conductivity (κ) W/cm <sup>2</sup> K	Material	Thermal Conductivity (κ) W/cm <sup>2</sup> K
<b>Merials</b>		<b>Insulator</b>	
Silver	4.3	Diamond	20.0
Copper	4.0	Alumina	0.20
Aluminum	2.3	Glass Ceramic	0.05
Nickel	0.92	Thermal Grease	0.011
<b>Semiconductors</b>		<b>Liquid</b>	
Silicon	1.5	Water	0.006
Gallium Arsenide	0.5	Liquid Nitrogen	0.001
<b>Gases</b>		(at 77°K)	
Air	0.0002		
Oxygen	0.0002		

한편, Cu분말만을 소결하여서는 높은 기공율(porosity)과 적절한 기공의 크기(pore size)를 확보하기 어려워 Cu분말에 기공형성제(pore former)를 첨가하였다.<sup>(2)</sup> 이후 히트파이프 내부 증기유동 통로의 확보를 위하여 mandrel을 삽입한 채 Cu분말과 기공형성제(20 ~ 40wt.%)가 혼합된 분말을 Cu튜브안에 채워넣는다.

제조공정에서 증기유동 통로의 확보를 위해 사용되는 심(mandrel)은 차후 소결공정이 끝난 후에 원활하게 제거될 수 있어야 한다. 심(mandrel)의 재료로서 일반적으로 고려되는 stainless-steel의 경우 표면에 아무런 처리 없이 사용할 경우, 전기로에서의 소결공정이 끝났을 때 Cu분말간의 소결뿐만이 아니고, Cu분말과 stainless-steel봉과의 소결에 의한 접착이 발생하게 되어 소결 후의 심(mandrel)의 제거가 어렵게 된다.<sup>(3)</sup> 따라서 소결벽히트파이프의 제작을 위한 적절한 심(mandrel)의 재료 선택 및 심(mandrel)의 표면처리가 요구된다. 본 연구에서는 소결공정 후에 원활히 제거될 수 있는 심(mandrel)을 제작하기 위해 stainless-steel봉에 세라믹 분말을 Dip-Coating하는 방법을 이용하였다.<sup>(4)</sup> Fig. 1은 세라믹 분말이 표면에 코팅된 심(mandrel)을 제작하기 위한 공정의 개략도를 나타낸 것이다. Dip-coating방법을 간단히 설명하면 다음과 같다. 유기물질이 첨가된 용매에 세라믹 분말을 혼합하여 슬러리를 제조하고 제조된 슬러리에 stainless-steel봉을 함침시킨 후 일축방향을 유지하면서 stainless-steel봉을 슬러리 용기로부터 분리시켜 세라믹 분말이 균일하게 코팅된 stainless-steel봉을 얻는다. 이를 전기오븐(JeioTech., Model:FO450M)에서 건조하여 심(mandrel)의 제작을 완성한다.

완성된 심(mandrel)을 히트파이프용 튜브의 중앙 부분에 삽입 및 위치시킨 상태에서 Cu와 기공형성제(pore former)의 혼합분말을 튜브와 심(mandrel)의 사이에 충전한 후 튜브형 전기로에서 소결하였고, 소결시에는 첨가되는 기공형성제(pore

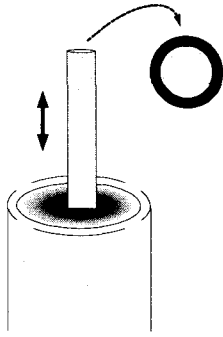


Fig. 1 Schematic diagram of ceramics coating on the stainless-steel rod

former)의 burn-out을 위하여 초기 300 ~ 500°C의 Air 분위기에서 소결을 실시한 후, 800 ~ 1000°C의 환원 분위기로 교체하여 소결을 실시하게 된다. 소결이 모두 끝난 후 튜브로부터 심(mandrel)을 제거하면 소결벽이 완성되며, 이후 작동유체를 충전하여 소결벽을 가지는 히트파이프의 제작을 완료한다. Fig. 2는 소결시의 온도와 분위기의 변화를 나타내고 있다.

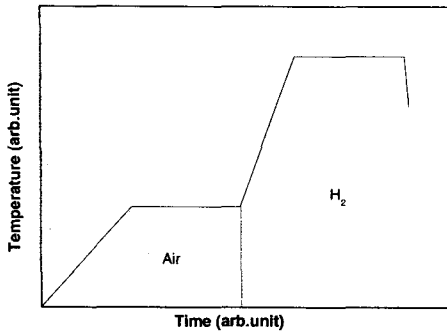


Fig. 2 Temperature profile and atmosphere change for sintering

### 3. 소결벽의 특징

소결벽의 기공율(porosity)과 기공의 크기(pore size) 및 분포(pore size distribution) 그리고 SEM을 통한 소결형태의 관찰을 통하여 제작된 소결벽의 특성을 평가하였다.

소결벽의 기공율은 증류수를 용매로 사용한 Archimedes법(ASTM, C373-72)으로 측정하였으며,

다음 식 (1)에 의해 기공율이 계산된다.

$$porosity(\%) = \frac{W_{wet} - W_{dry}}{W_{wet} - W_{solv}} \times 100 \quad (1)$$

위의 식에서  $W_{wet}$ 는 시편 내 기공(pore)을 증류수로 채운 후 측정된 무게,  $W_{dry}$ 는 건조된 상태에서의 시편의 무게,  $W_{solv}$ 는 증류수 내에서 측정된 시편의 무게를 나타낸다.

일정한 기공율을 가지는 시편들일지라도 크기나 모양 그리고 기공끼리의 연결상태에 따라 매우 많은 경우의 수가 있을 수 있다.<sup>(5)</sup> 이런 이유로 시편의 기공 크기 및 분포의 측정이 중요하며, 본 연구에서는 압력을 가해 수은을 다공성물질에 침투시키면서 기공의 크기 및 분포를 측정하는 Mercury Porosimeter(Micromeritics, Autopore4)를 이용하였다.<sup>(6)</sup> 참고로, 측정에 수은을 이용하게 되면 대부분의 물질과 wetting을 일으키지 않으면서 수은이 충분히 침투될 수가 있는 것으로 알려져 있다.<sup>(7)</sup>

Fig. 3은 제작된 소결벽의 기공율(porosity) 측정 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보면, 기공형성체를 첨가하지 않고 Cu분말만을 사용하여 소결시킨 경우, 벽으로서 사용이 곤란할 정도로 낮은 기공율이 형성됨을 알 수 있다. 그러나 기공형성체를 첨가한 Cu분말을 사용하여 소결한 경우, 기공형성체의 첨가량이 증가할수록 기공율이 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 특히 20wt.%까지는 기공율이 매우 가파르게 증가하였고, 20wt.% 이상이 되면 그 차이가 작게 나타났다. 20wt.% 이상 첨가되었을 때, 기공율의 상승폭이 작아지는 것은 일정량 이상의 기공형성체가 첨가된 분말을 소결할 시 첨가된 기공형성체의 burn-out에 의하여 발생하는 부피수축이 커짐에 따라 나타나는 현상으로 생각된다.<sup>(8)</sup>

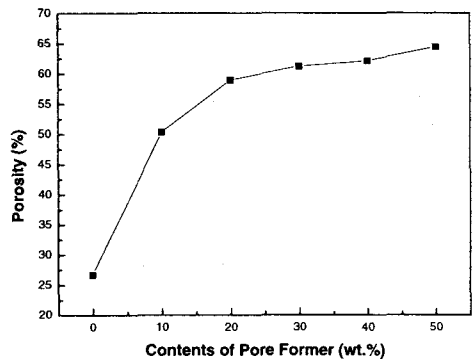


Fig. 3 Variation of porosity with pore-former Contents for sintered wick

Mercury Porosimeter를 이용한 기공 크기 및 분포의 측정 결과를 Fig. 4 ~ Fig. 6에 도시하였다. Fig. 4는 기공형성제가 첨가되지 않고 Cu분말만을 소결시켜 제작한 경우의 기공크기 및 분포를 측정한 결과이다. 그림에서 보면 대부분의 기공들이 15 $\mu$ m 근방의 크기를 가짐을 알 수 있으며, 따라서 Cu분말만을 소결시키는 경우에 워크로서 효과적인 기능을 발휘하기에는 기공들의 크기가 너무 작게 된다. 이와는 달리, 기공형성제를 첨가시켜 소결한 Cu시편의 경우 기공크기가 커지게 되며, 기공형성제를 20wt.% 첨가하고 소결한 Fig. 5의 경우, 기공의 크기가 대략 10 ~ 300 $\mu$ m 정도로 커졌으며, 기공형성제를 40wt.% 첨가하고 소결한 Fig. 6에서는 기공의 크기가 Fig. 5의 경우보다 조금 더 커진 결과를 보였다. 위의 결과들을 통해 볼 때, 기공형성제를 Cu분말과 함께 혼합하여 사용할 경우, 큰 기공율과 적절한 기공크기의 확보가 가능함을 알 수 있었으며, 적절한 기공형성제의 첨가비율은 대략 20wt.% 근처일 것으로 파악되며, 이에 대한 최적의 비율을 얻어내기 위해서는 향후 추가적인 연구가 뒤따라야 할 것으로 보인다.

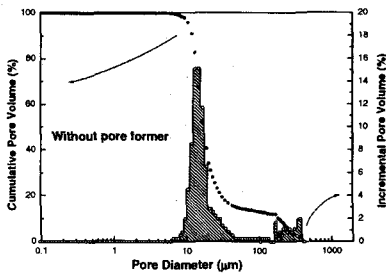


Fig. 4 Pore size and distribution of sintered wick without pore former

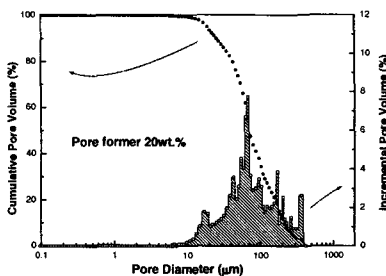


Fig. 5 Pore size and distribution of sintered wick with 20wt.% pore former

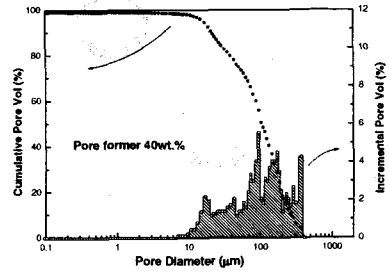


Fig. 6 Pore size and distribution of sintered wick with 40wt.% pore former

SEM(HITACHI, S800)을 이용하여 Fig. 7에서와 같이 제작된 소결워크의 파단면을 관찰하였으며, 소결 후 실제로 시편에 기공이 형성된 형태를 파악하고자 하였다. 기공형성제가 첨가되지 않은 Cu분말을 이용하여 소결한 경우에는 Fig. 7(a)에서 볼 수 있듯이 기공의 크기가 작고 기공율(porosity)도 적은 형태로 소결되어 있다. 반면, Fig. 7(b)에서 보는 바와 같이 기공형성제를 첨가한 Cu분말을 이용하여 소결한 경우에는 히트파이프용 워크로서 충분히 이용 가능한 기공 확보와 함께 기공의 크기가 커지게 된다. 이러한 결과는 앞서 기공율의 측정과 기공의 크기 및 분포의 측정에서 나타났던 결과와 잘 일치한다.

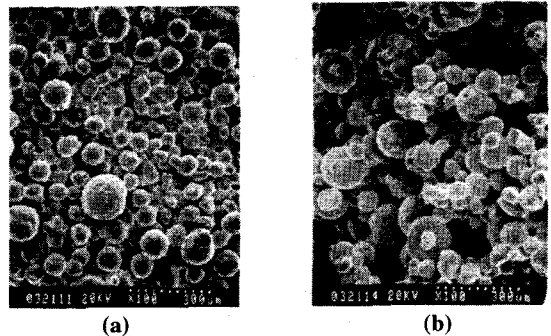


Fig. 7 SEM image of sintered wick.  
(a) Sintered with only Cu powder, (b) Sintered with Cu and 20wt.% pore former powder

#### 4. 히트파이프 성능시험

본 연구를 통해 얻어진 소결워크를 이용하여 히트파이프를 제작하였으며, Fig.8 ~ Fig.10에 이에 대한

성능시험 결과를 나타내었다. Fig. 8은 강제공냉 ( $V_{air}=1m/s$ )의 응축부 냉각 및 수평의 설치조건 하에서 직경 4mm 소결워 히트파이프에 대해 축방향 길이에 따른 벽면온도분포를 도시한 것이다. 증발부와 응축부의 온도차는 열부하가 증가함에 따라 커지며, 2W ~ 12W의 열부하범위에 대해 1.3°C ~ 4.4°C의 값을 보였다. 성능시험 결과는 제작된 소결워 히트파이프가 정상적으로 작동하고 있음을 말해주며, 등온성을 잘 보여주고 있다. Fig. 9는 Fig. 8과 동일한 소결워 히트파이프에 대한 성능시험 결과로써 열부하의 증가 및 냉각공기 속도 변화에 따른 히트파이프 열저항을 도시한 것이다. 각 냉각공기 속도에 대해 MHP의 열저항은 열부하가 커짐에 따라 감소하고 있으며, 전 열부하 범위에 대해 열저항이 약 0.7°C/W 미만으로써 비교적 우수한 히트파이프 특성을 나타내고 있다. Fig. 10은 소결워 히트파이프의 제작 시 소결되기 전 파이프내에 주입되는 소결입자(Cu)의 고분자 물질과의 결합에 따른 제작형태 별 전열성능을 비교한 것이다. 결과는  $-5^{\circ} \sim +5^{\circ}$ 의 경사각에 대하여 열전달한계를 나타낸 것으로 그림에서 보면, 코팅(coating)보다 분산(dispersion)방법에 의해 제작된

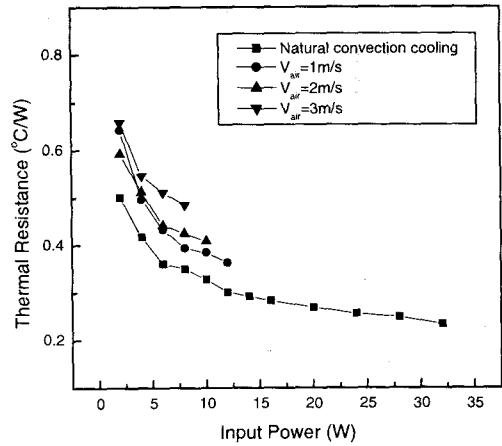


Fig. 9 Thermal resistance vs. input power in length of MHP

소결워를 사용한 히트파이프의 열전달한계가 높게 나타나고 있다. 이는 당초 porosity를 향상시키고자 시도한 코팅(coating)방법에 비해 분산(dispersion)방법으로 제작된 소결워의 모세관력이 우수하기 때문으로 생각된다. 그러나  $-5^{\circ} \sim +5^{\circ}$ 의 경사각 범위에서 분산방법으로 제작된 소결워의 열전달한계는 큰 폭으로 변화하고 있어 워으로써, 특히 소결워으로써 그다지 바람직스럽지는 못한 결과를 나타내고 있다. 반면 이와는 반대로 코팅방법으로 제작된 소결워는 열전달한계는 비록 작지만 경사각에 따른 변화폭이 크지 않은 결과를 보였다. 따라서 소결워의 제작방법으로 고려된 코팅(coating) 및 분산(dispersion)방법에 대한 보다 정확한 우수성 비교를 위해서는 향후 추가적인 연구가 필요하다.

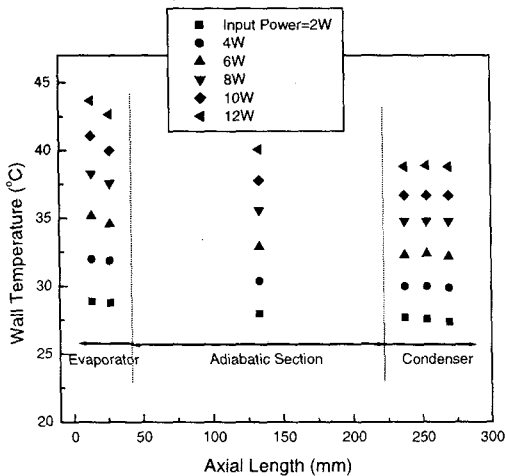


Fig. 8 Wall temperature distribution in input power

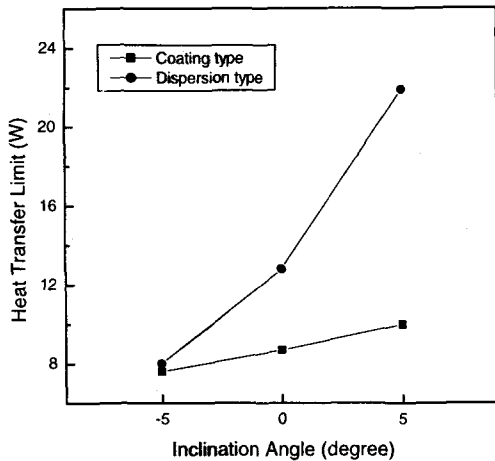


Fig. 10 Comparison of heat transfer limit in different manufacturing method of sintered wick

## 5. 결 론

히트파이프용 소결위의 제작은 크게 심(mandrel)의 제작, 높은 기공률과 적절한 기공크기 확보를 위한 기공형성제 혼합, 그리고 소결공정의 3부분으로 나누어 볼 수 있다. 심(mandrel)은 소결 후 파이프로부터 원활한 제거를 위해 표면처리가 필요하며, 본 연구에서는 세라믹분말 coating방법을 이용하여 이를 수행하였다. 단순히 Cu분말만을 소결하여서는 워으로써 필요한 기공률 및 기공크기의 확보가 어려우며, 따라서 기공형성제(pore former)를 혼합하였고, 측정결과 적절한 기공형성제 비율은 약 20wt.% 근처인 것으로 파악된다. 차후 최적의 기공형성제 비율을 얻기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다. 본 연구를 통해 얻은 소결 워으로써 제작한 히트파이프의 성능시험 결과 양단 온도차는 약 4.4°C미만, 열저항은 약 0.7°C/W를 기록하고 있어 히트파이프로써 원활한 작동특성을 나타내었다. 기공형성제의 Cu분말과의 혼합형태에 따른 히트파이프 냉각성능은 다소 차이를 보이고 있어 차후 이에 대한 추가 연구가 필요하다.

## 참고문헌

- (1) Rodamaps of Packaging Technology, 1997, Integrated Circuit Engineering Co. Ch 6-14
- (2) P. Dunn, D. A. Reay, 1982, Heat Pipes, 3<sup>rd</sup> edit., pp. 141~142
- (3) George Y., 1981, Sintered gorrved wicks, American patent, 4274479
- (4) Y. Yamada, K. Itoh, K. Wada, and K. Tachikawa, 1999, Structures and Superconducting Properties of Bi-2212 Oxide Cylinders Prepared by the Dip-Coating and Subsequent Diffusion Reaction, IEEE Tranaactions on Applied Superconductivity, June, Vol. 9, No. 2, pp. 1868 ~ 1871
- (5) Randall M . German, 1996, Sintering Theory and Practice, John Wiley & Sons, Inc. pp. 28
- (6) S. Lowell, Joan E. Shields, 1991, Powder Surface Area and Porosity, Champman & Hall, 3<sup>rd</sup> edit. pp. 217 ~ 226
- (7) E. Bazzo, E. G. Reimbrecht, and P. Fernandes, 1999, Manufacturing Procedure and Porous Structure Characterization of Tubular Wicks, 11<sup>th</sup> IHPC, Tokyo, Sep., pp. 12 ~ 16
- (8) Randall M . German, 1996, Sintering Theory and Practice, John Wiley & Sons, Inc. pp. 39 ~ 40
- (9) K. S. Kim, S. H. Moon, C. G. Choi, 1999, Cooling Characteristics of Miniature Heat Pipes with Woven-Wired Wick, 11th Int. Heat Pipe Conf., Japan, Sep. 12-16, A1-5.
- (10) S. H. Moon, G. Hwang, et al., 2000, Experimental Study on Performance of a Miniature Heat Pipe with Woven-Wired Wick, ITherm 2000, Vol. 2, pp. 129~133.