

소결워 히트파이프의 제작 및 작동성능

윤호경* · 문석환† · 고상춘* · 황 건* · 최태구*

(2002년 1월 28일 접수, 2002년 6월 14일 심사완료)

Manufacturing and Operating Performance of the Heat Pipe with Sintered Wick

Ho Gyeong Yun, Seok Hwan Moon, Sang Choon Ko, Gunn Hwang and Tae Goo Choy

Key Words : Heat Pipe(히트파이프), Sintered Wick(소결워), Porosity(기공률), Permeability(투과율), Heat Transfer Limit(열전달한계)

Abstract

In this study, to make an excellent heat pipe, the manufacturing technology of a sintered wick was investigated. Making a sintered wick is known to be very difficult but it has many advantages. For example, the porosity and pore size can be controlled and the capillary force is great. The mixture of copper and pore former powder was used as a wick material and ceramic-coated stainless steel was used as a mandrel which is necessary for vapor flow. To analyze the feature of the manufactured wick, not only porosity and pore size were measured but also the sintered structure was observed. A heat pipe with sintered wick was manufactured and the performance test of the heat pipe was 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. In the meantime, the composite wick that is composed with sintered and woven wire was also examined. The heat transfer limit of the heat pipe with composite wick was enhanced about 51% ~ 60% compare to the one with sintered wick.

1. 서론

휴대용 전자기기들의 시장이 급격히 팽창하고 있다. 전자부품을 냉각시켜야 함은 전자산업의 성장과 함께 지속적으로 대두되고 있는 명제임과 동시에 반드시 해결해야 할 문제이다. 근래의 전자산업에서의 급격한 발전은 전자부품의 냉각기술 또한 급격히 발전할 것을 요구하고 있다. 이런 상황에서 히트파이프를 이용한 냉각기술은 히트파이프가 가지는 우수한 열수송 능력으로 인해 전자부품의 냉각에 우수한 해법으로 대두되고 있다. 써모사이폰을 제외하고 히트파이프는 일반적으로 응축된 작동유체를 발열부측으로 귀환시키는 데

워(wick)으로부터 발생하는 모세관력을 이용하므로 워는 모세관력을 잘 발생시킬 수 있는 구조와 함께 작동유체의 원활한 유동을 위해 높은 permeability를 가지는 것이 중요하다. 종래의 워로는 그루브워(groove wick), 세션워(fine fiber wick) 또는 스크린워(screen wick) 등이 주로 이용되어 왔으며, 각각의 워들은 나름대로 pore size 및 permeability 측면에서 장·단점을 가지며, 모세관력을 향상시키는 방향으로 지속적인 발전을 거듭해 왔다. 상기 워들과 함께 또한 소결워(sintered wick)이 이용되어져 왔으며, 소결워는 그 제작에 있어 다른 워들에 비해 다소 어렵다고 할 수 있으나, 소결 방법에 의해 워를 제작하는 경우 기공률 및 기공크기를 조절할 수 있을 뿐 아니라, 모세관력이 우수한 워를 확보할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 전자 통신분야에서 소자냉각 및 열소산 등의 응용대상으로써 그 활용폭이 매우 클 것으로 보이는 소결워 제작기술의 개발 필요성

† 책임저자, 회원, 한국전자통신연구원

E-mail : shmoon@etri.re.kr

TEL : (042)860-6087 FAX : (042)860-6836

* 한국전자통신연구원

에 따라 국내차원의 독자적인 기술을 확보 하는데 그 목적이 있다.

종래의 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 심을 삽입한 상태에서 금속분말을 히트파이프 내부에 충전시킨 후 이를 소결하여 벽을 제작하고 이후 심을 제거하는 제작방법을 이용하였다. 다만, 소결 후 파이프로부터 심(mandrel)을 원활히 제거하기 위한 방안이 요구된다. 본 연구에서는 소결벽의 제작과정 확립 및 소결벽의 특성을 파악하였으며, 소결벽을 제작하여 얻어진 소결벽 히트파이프의 전열성능 등을 파악 하였다. 또한 소결벽을 가지는 히트파이프의 전열성능을 극대화시키기 위하여 소결벽과 편조벽이 결합된 복합벽 구조의 히트파이프도 제작하여 그 성능을 평가하였다.

2. 벽의 제작

금속 분말의 소결을 이용하여 히트파이프용 소결벽을 제작하기 위하여 분위기 조절이 가능한 전기로를 이용하였다. 그 제작과정은 다음과 같다. 먼저 히트파이프용 소결벽의 제작에 사용될 금속은 가격, 열전도도 그리고 작동유체와의 호환성을 고려하여 Cu 분말(+325 ~ -100mesh)을 사용하였다. 그러나 본 실험에서 확인한 바에 의하면 Cu 분말만을 소결하는 경우 기공률이 낮고 적절한 기공 크기를 확보할 수 없어 히트파이프용 벽으로 사용할 수가 없었다. 이런 이유로 본 실험에서는 Cu 분말에 기공형성제를 첨가한 혼합 분말을 제조하였다.⁽¹⁾ 이후 히트파이프 내부 증기유동 통로의 확보를 위하여 심을 삽입한 채 Cu 분말과 기공형성제(20 ~ 40wt.%)가 혼합된 분말을 Cu 튜브안에 채워넣는다.

제조공정에서 심의 역할은 단순히 증기유동 통로의 확보에 있다. 그러므로 소결공정이 끝난 후에 분말 소결체로부터 원활히 제거될 수 있어야 한다. 심의 재료로서는 일반적으로 stainless-steel을 생각할 수 있다. 그러나 아무런 표면처리 없이 stainless-steel을 심으로 사용할 경우, 소결공정이 끝났을 때 Cu 분말과 stainless-steel봉과의 소결에 의한 접착이 발생하게 되어 소결 후의 심의 제거가 어려워진다.⁽²⁾

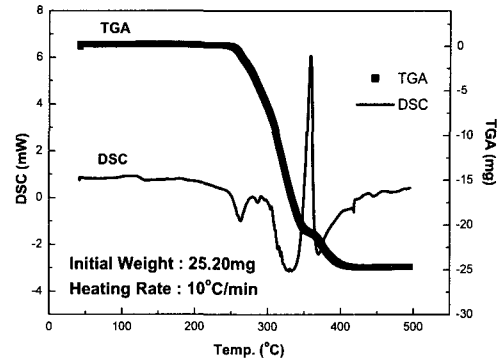


Fig. 1 Thermal analysis of pore former

따라서 소결벽 히트파이프의 제작을 위해서는 적절한 재료를 가지는 심의 선택과 선택된 심의 표면처리가 요구된다. 본 연구에서는 소결공정 후에 쉽게 제거될 수 있는 심을 제작하기 위해 stainless-steel봉에 세라믹 분말을 Dip-Coating하는 방법을 이용하였다.⁽³⁾ 즉, 세라믹 분말을 stainless-steel에 coating함으로써 금속인 Cu 분말과 stainless-steel이 접촉되는 경로를 차단하여 심의 제거가 어려워지는 것을 방지하도록 하였다.

제작된 심을 히트파이프용 튜브의 중앙 부분에 삽입 및 위치시킨 상태에서 Cu와 기공형성제(pore former)의 혼합분말을 튜브와 심의 사이에 충전한 후 튜브형 전기로에서 소결하였고, 소결시에는 첨가되는 기공형성제의 burn-out을 위하여 초기 300 ~ 500°C의 Air 분위기에서 소결을 실시한 후, 800 ~ 1000°C의 환원 분위기로 교체하여 소결을 실시하였다.

아래의 Fig. 1은 기공 확보를 위하여 기공형성제로 첨가한 물질을 TGA(Thermal Gravimetric Analysis)와 DSC (Differential Scanning Calorimetry)를 이용하여 열분석한 결과이다. 분석 결과 약 400°C에서 기공형성제로 첨가한 물질의 분해가 완료되는 것을 알 수 있었으며, 이를 바탕으로 초기 Air 분위기에서 기공형성제를 burn-out시키기 위한 온도를 설정할 수 있었다.

소결이 모두 끝난 후 튜브로부터 심을 제거하면 소결벽이 완성되며, 이후 작동유체를 충전하여 소결벽을 가지는 히트파이프의 제작을 완료하게 된다. 아래의 Fig. 2에 소결벽을 가지는 히트파이프의 제작 과정을 간략히 도시하였다.

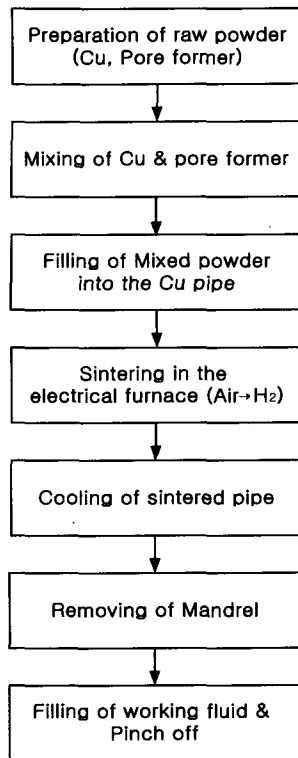


Fig. 2 Flowchart of the sintered heat pipe manufacturing

3. 위의 특징

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

3.1 기공률

본 실험에서 제작된 소결위의 기공률은 증류수를 용매로 하고 Archimedes법(ASTM, C373-72)에 의해 측정되었다. Archimedes법을 이용한 기공률의 측정에는 다음의 식 (1)이 사용된다.

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

위의 식에서 W_{wet} 는 시편 내 기공을 증류수로 채운 후 측정된 무게, W_{dry} 는 건조된 상태에서의 시편의 무게, W_{solv} 는 증류수 내에서 측정된 시편의 무게를 각각 나타낸다.

Fig. 3은 제작된 소결위의 기공률(porosity) 측정 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보면, 기공형성제

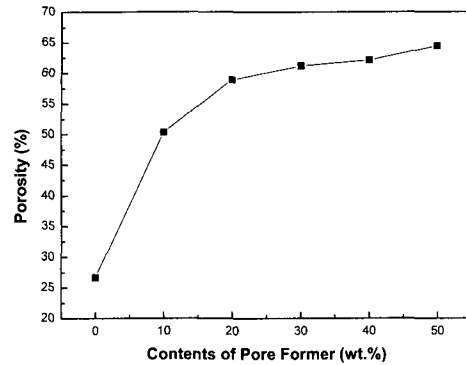


Fig. 3 Variation of porosity with pore-former Contents for sintered wick

를 첨가하지 않고 Cu분말만을 사용하여 소결시킨 경우, 위에서 사용이 곤란할 정도로 낮은 기공률이 형성되어 있는 것을 알 수 있다. 그러나 기공형성제와 Cu가 혼합된 분말을 이용하는 경우, 기공형성제의 첨가량이 증가할수록 기공률이 증가하였으며, 특히 20wt.%까지는 기공률이 매우 큰 폭으로 증가하였고, 20wt.% 이상이 첨가되면 그 증가폭이 작게 나타났다. 위와 같은 현상은 일정량 이상의 기공형성제가 첨가된 분말을 소결하는 경우에 첨가된 기공형성제의 burn-out으로 인해 부피 수축이 커지기 때문인 것으로 생각된다.⁽⁴⁾

3.2 기공 크기 및 분포

동일한 기공률을 가지는 시편들일지라도 크기나 모양 그리고 기공끼리의 연결 상태에 따라 매우 많은 경우의 수가 있을 수 있다.⁽⁵⁾ 이런 이유로 다공질 시편에서는 기공률 뿐 아니라 기공의 크기 및 분포의 측정이 중요하다. 본 연구에서는 압력을 가해 수은을 다공성 물질에 침투시키면서 기공의 크기 및 분포를 측정하는 Mercury Porosimeter (Micromeritics, Autopore4)를 이용하였다.⁽⁶⁾ 참고로, 기공의 크기 및 분포를 측정하기 위하여 다공질 물질에 침투시키는 물질로 수은을 이용하게 되면 대부분의 물질과 wetting을 일으키지 않으면서 다공질 물질 속으로 충분히 침투될 수 있는 것으로 알려져 있다.⁽⁷⁾

Mercury Porosimeter를 이용한 기공 크기 및 분포의 측정 결과를 Fig. 4~Fig. 6에 나타내었다.

Cu 분말만을 소결시킨 경우, 즉 기공형성제가 전혀 첨가되지 않은 시편의 기공 크기 및 분포를 측정된 결과가 Fig. 4에 도시되어 있다. 그림을 보면 대부분의 기공들이 15 μm 근방의 크기를 가짐을 알 수 있으며, 따라서 Cu 분말만을 소결시키는 경우에는 히트파이프용 위으로서 기능을 발휘하기에

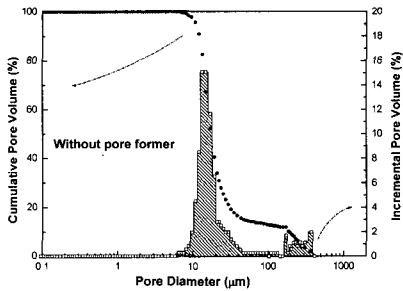
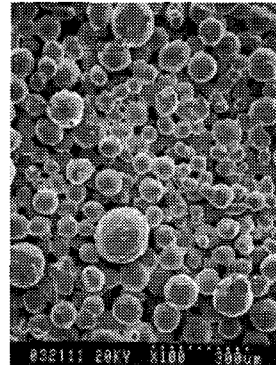


Fig. 4 Pore size and distribution of sintered wick without pore former



(a)

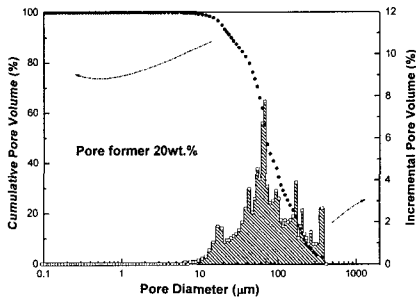
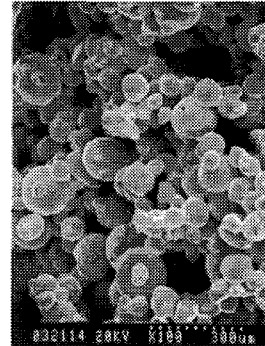


Fig. 5 Pore size and distribution of sintered wick with 20wt.% pore former



(b)

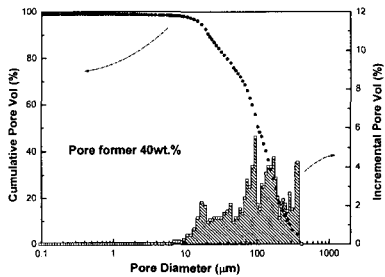
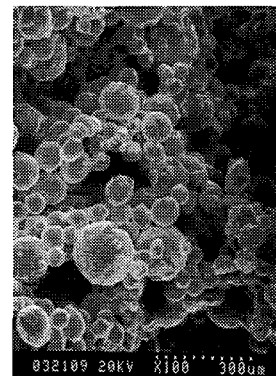


Fig. 6 Pore size and distribution of sintered wick with 40wt.% pore former



(c)

는 기공들의 크기가 너무 작게 된다. 이와는 달리, 기공형성제를 첨가시켜 소결한 Cu 시편의 경우 기공형성제를 첨가하지 않은 분말을 소결하는 경우에 비해 기공의 크기가 커지게 된다. 기공형성제를 20wt.% 첨가한 분말을 이용하여 소결한 Fig. 5의 경우, 기공의 크기가 대략 10 ~ 300 μ m 정도로 커졌으며, 기공형성제를 40wt.% 첨가한 분말을 이용하여 소결한 Fig. 6에서는 기공의 크기가 Fig. 5의 경우보다 미소하게 더 커진 결과를 보였다. 이는 Fig. 3의 기공률의 측정 결과에서 언급한 것처럼

Fig. 7 SEM image of sintered wick. (a) Sintered with only Cu powder, (b) Sintered with Cu and 20wt.% pore former powder, (c) Sintered with Cu and 40wt.% pore former powder

처럼 일정량 이상의 기공형성제가 첨가된 분말을 소결하면 첨가된 기공형성제의 burn-out에 의하여 발생하는 부피의 수축이 커짐에 따라 나타나는 현상 때문이며, Fig. 3의 기공률 측정 결과와 잘 일치하는 현상이다. 위의 결과들을 통해 볼 때, 기공형성

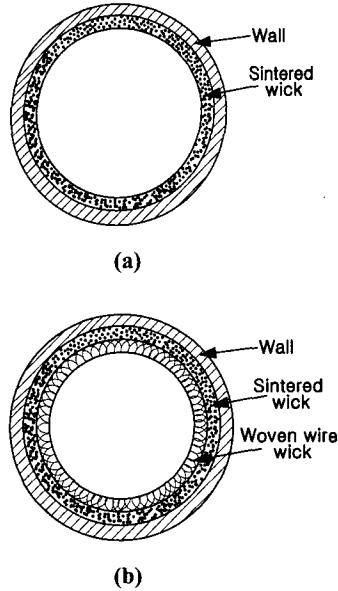


Fig. 8 Cross section. (a) Sintered wick, (b) Composite wick of sintered and woven wire wick

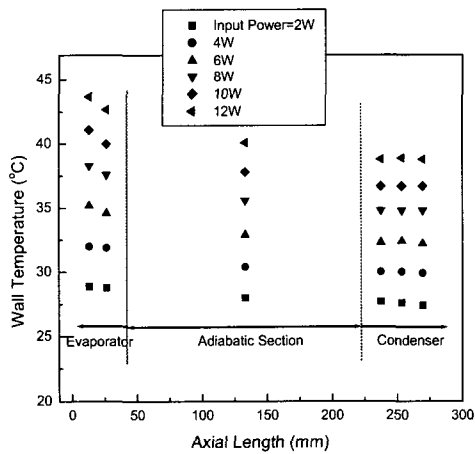


Fig. 9 Wall temperature distribution in input power

제를 Cu 분말과 함께 혼합하여 사용할 경우, 큰 기공률과 적절한 기공크기의 확보가 가능함을 알 수 있었으며, 적절한 기공형성제의 첨가비율은 대략 20wt.% 근처일 것으로 파악되며, 이에 대한 최적의 비율을 얻어내기 위해서는 향후 추가적인 연구가 뒤따라야할 것으로 보인다.

3.3 소결의 형태

소결에 의해 제작된 시편들이 앞서 기공률과

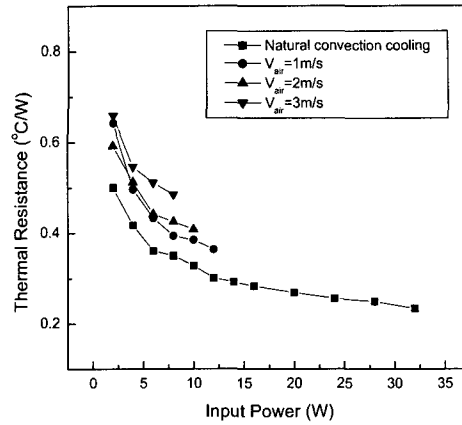


Fig. 10 Thermal resistance vs. input power in length of MHP

기공 크기 및 분포의 측정 결과에서 보았던 형태를 실제로 가지고 있는지의 여부를 파악하기 위하여 SEM(HITACHI, S800)을 이용하여 제작된 소결체의 파단면을 관찰하였다.

기공형성제가 첨가되지 않은 Cu 분말을 이용하여 소결한 경우에는 Fig. 7(a)에서 볼 수 있듯이 기공의 크기가 작고 기공률(porosity)도 적은 형태로 소결되어 있다. 반면, Fig. 7(b)에서 보는 바와 같이 기공형성제를 20wt.% 첨가하고 기공형성제의 burn-out을 거쳐 Cu 분말을 소결한 경우에는 히트파이프용 워드로써 충분히 이용 가능한 기공률이 확보됨과 함께 기공의 크기가 커지게 된다. 이러한 결과는 앞서 기공률의 측정과 기공의 크기 및 분포의 측정에서 나타났던 결과와 잘 일치한다. 한편 Fig. 7(c)를 보게 되면 기공의 크기나 분포가 Fig. 7(b)와 별 차이가 없는 것을 알 수 있는데 이는 앞서 살펴보았던 기공률, 기공 크기 및 분포의 측정결과와 동일하다.

3.4 소결 편조 복합체의 구조

Fig. 8(b)는 Fig. 7(b)의 소결체에 편조망을 결합한 복합체의 구조를 나타낸 것이다. Fig. 8(b)의 제작은 Fig. 2의 제작과정에 의해 만들어진 Fig. 7(b)의 소결체 내부에 편조망을 삽입하는 방식으로 이루어지며, 기타 작동유체 충전 등의 제작과정은 소결체 히트파이프의 그것과 동일하다. 편조망은 다수의 구리선재들이 그룹을 이루며 나선형으로 편조되어 있는 구조를 띤다.⁽⁸⁾ 편조망은 선행연구⁽⁹⁾를 통해 높은 모세관력 및 작동성능이 입증되었으며, 구조적으로도 파이프 내부에 설치가 매우 용이해

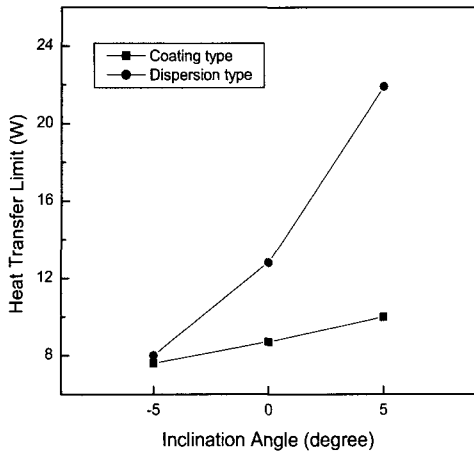


Fig. 11 Comparison of heat transfer limit in different manufacturing method of sintered wick

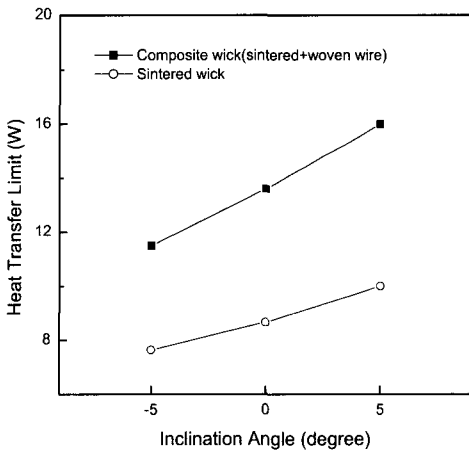


Fig. 12 Comparison of heat transfer limit between sintered wick and composite wick

생산성이 우수한 특징을 갖는다. 본 연구에서는 이러한 편조위의 구조적 장점을 이용해 소결된 내측에 편조위를 손쉽게 설치하고, 아울러 편조위의 모세관력까지 이용함으로써 히트파이프의 작동성능을 향상시키고자 하였다.

4. 히트파이프 성능시험

Fig. 9 ~ Fig. 11에 본 연구를 통해 얻어진 소결 히트파이프에 대한 성능시험 결과를 나타내었다. Fig. 9는 응축부의 강제공냉($V_{air}=1m/s$) 냉각조건 및 수평의 설치조건 하에서 직경 4mm 소결된 히트파이프에 대해 축방향 길이에 따른 벽면온도분포를 도시한 것이다. 증발부와 응축부의 온도차는

열부하의 증가에 따라 커지며, 2W ~ 12W의 열부하 범위에 대해 1.3°C ~ 4.4°C의 값을 나타내었다. 성능시험 결과는 제작된 소결된 히트파이프가 정상적으로 작동하고 있음을 말해주며, 등온성의 특성을 잘 보여주고 있다. Fig. 10은 Fig. 9와 동일한 소결된 히트파이프에 대한 성능시험 결과로서 열부하의 증가에 따른 열저항 및 냉각공기 속도 변화에 따른 전열성능을 도시한 것이다. 각 냉각공기 속도에 대해 히트파이프의 열저항은 열부하가 증가함에 따라 저 열부하에서는 크게 감소하다 점차 그 감소폭이 둔화되어 일정한 값으로 수렴하는 경향을 나타내고 있다. 전 열부하 범위에 대해 열저항이 약 0.70C/W 미만으로써 비교적 우수한 히트파이프 특성을 나타내었다. 한편, 냉각공기 속도가 증가함에 따라 전열성능은 감소하고 있으며, 이는 냉각공기 속도가 증가함에 따라 히트파이프 내부 작동온도가 감소되어 열전달한계가 저하되기 때문이다. Fig. 11은 소결하기 전 파이프내에 주입되는 소결입자(Cu)의 고분자 물질과의 결합 형태에 따른 전열성능을 비교한 것이다. 시험결과는 -5° ~ +5°의 경사각에 대하여 열전달한계를 나타낸 것으로 그림에서 보면, 코팅(coating)보다 분산(dispersion)방법에 의해 제작된 소결된을 사용한 히트파이프의 열전달한계가 높게 나타나고 있다. 이는 당초 porosity를 향상시키고자 시도한 코팅방법에 비해 분산 방법으로 제작된 소결된의 모세관력이 크기 때문으로 생각된다. 그러나 -5° ~ +5°의 경사각 범위에서 분산방법으로 제작된 소결된의 열전달한계는 큰 폭으로 변화하고 있다. 이는 분산방법으로 제작된 소결된의 permeability가 우수함에 따라 열전달한계에는 유리하나, 마치 permeability가 우수한 groove형 Wick에서 나타나는 특징과 같이 전열성능이 경사각 변화에 영향을 많이 받는 것으로 분석된다. 이와는 반대로 코팅방법으로 제작된 소결된의 열전달한계는 비록 작지만 경사각에 따른 변화폭이 크지 않은 결과를 보였다. 따라서 소결된의 제작방법으로 고려된 코팅 및 분산 방법에 대한 보다 정확한 우수성 비교를 위해서는 추가 연구가 필요하다. Fig. 12는 Fig. 8(a)의 소결된(coating type)과 Fig. 8(b)의 소결 편조 복합위의 성능시험 결과를 비교한 것이다. 그림에서 보면 소결 편조 복합위 히트파이프의 열전달한계가 소결된만 설치된 히트파이프보다 약 51 ~ 60% 가량 향상되었음을 알 수 있다. 소결된만 설치된 경우에 비해 복합위의 경우 내부 증기유동 단면적의 감소로 기액 계면에서의 마찰저항이 증가될 수 있으나, 성능시험 결과를 통해 알 수 있듯이 소결된 및 편조위를 통한 모세관력이 그러한 압력

강하를 충분히 극복하고 있는 것으로 판단된다. 한편 소결 편조 복합윅 히트파이프의 경우, $-5 \sim +5^\circ$ 의 경사각에 대해 열전달한계가 큰 변화폭 없이 매우 안정적인 작동성능을 나타내었다.

5. 결 론

히트파이프용 소결윅의 제작은 크게 심의 제작, 높은 기공률과 적절한 기공크기 확보를 위한 기공형성제 혼합, 그리고 소결공정의 3부분으로 나누어 볼 수 있다. 심은 소결 후 파이프로부터의 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 최적의 기공형성제 비율은 약 20wt.% 근처인 것으로 파악되었다. 본 연구를 통해 얻은 소결윅으로 제작된 히트파이프는 원활한 작동특성을 나타내었으며, 양단온도차는 약 4.4°C 미만, 열저항은 약 0.7°C/W 이다. 기공형성제를 Cu분말과 혼합할 때 같은 양의 기공형성제를 혼합하더라도 혼합방식에 따라 히트파이프 냉각성능은 차이를 나타내고 있다. 이는 같은 양의 기공형성제를 혼합하더라도 혼합하는 방법에 따라 기공률과 기공의 크기 그리고 기공의 균일성 등의 특성이 변화하여 히트파이프의 성능에 영향을 미쳐 나타나는 현상으로 소결에 의해 최적의 성능을 가지는 히트파이프를 제작하기 위해서는 혼합되는 기공형성제의 혼합방식에 대한 추가적인 연구가 요

구된다. 소결 편조 복합윅을 워으로써 사용한 경우 증가된 전열성능을 나타내었으며, 단순 소결 히트파이프에 비해 약 51~60%가량 향상되었다.

참고문헌

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