< 논문 >

내부에 그루브와 스크린 메쉬를 갖는 평판 스트립형 히트파이프의 열성능에 대한 실험적 연구

부 준 홍† · 박 수 용*

(2004년 12월 10일 접수, 2005년 6월 2일 심사완료)

An Experimental Study on the Thermal Performance of a Flat-Strip Heat Pipe with Inner Grooves and Screen Mesh Cover

Joon Hong Boo and Soo Yong Park

Key Words: Flat Strip(평판 스트립), Heat Pipe(히트파이프), Rectangular Groove(직육면체 그루브), Screen Mesh(스크린 메쉬), Thermal Performance(열성능)

Abstract

The thermal performance of a flat-strip heat pipe with inner grooves and the screen mesh cover was investigated experimentally. The heat pipes were made of 2024 aluminum alloy of which the dimensions were 30 (W) × 4 (T) × 150 (L) mm. The cross sectional dimensions of inner groove were 0.4×0.9 mm and the space between grooves was 0.6 mm. To enhance the capillary force, fine screen meshes were attached to cover the grooved inner surface. In the grooved heat pipes without screen mesh cover, the maximum thermal load of 180 W (12 W/cm^2) was achieved for operating temperature below 130℃ at horizontal position. The heat pipes with screen mesh cover showed the thermal resistances less than one third of those without screen mesh cover, and showed less fluctuation in the thermal resistance values. Furthermore, the thermal performance of the former exhibited less dependence on the tilt angle and the fill charge ratio.

기호설명

$A_{g,e}$: 증발부 그루브의 젖은 면적[m^2]
$A_{c,e}$: 응축부 그루브의 젖은 면적[m^2]
d_w : 스크린 메쉬 와이어 직경[mm]
h_{evp} : 증발부 평균 열전달계수[W/m^{2}K]
h_{con} : 응축부 평균 열전달계수[W/m^{2}K]
N_g : 그루브의 수
Q_{input} : 공급열부하[W]
Q_{out} : 회수열부하[W]
R_{HP} : 히트파이프의 열저항[℃/W]
$T_{e,eq}$: 증발부 그루브 바닥면 등가온도[℃]
$T_{c,eq}$: 응축부 그루브 바닥면 등가온도[℃]
$T_{evp,avg}$: 히트파이프 증발부 평균온도[℃]
$T_{con,avg}$: 히트파이프 응축부 평균온도[℃]
T_v : 히트파이프 증기온도[℃]
t_g : 그루브의 높이[mm]
t_w : 히트파이프 벽면의 두께[mm]
t_v : 내부 증기공간의 높이[mm]
V_g : 전체 그루브의 체적[cc]
w_g : 그루브의 폭 [mm]
w_s : 그루브 사이의 폭 [mm]

† 책임저자, 회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
E-mail : jhboo@hau.ac.kr
TEL : (02)300-0107 FAX : (02)3158-2191
* 회원, 한국항공대학교 대학원 항공공학과

1. 서 론

전자장비 및 부품의 고출력화와 함께 소형화, 그리고 고집적화에 따라 보다 고효율의 열전달 또는 열소산 장치의 개발이 모색되고 있다. 이중 히트파이프를 이용한 열전달장치는 작동유체의 상변화를 에너지 전달과정에 이용하기 때문에 현열을 이용하는 대부분의 다른 열전달장치에 비해 작은 온도차에서 상대적으로 큰 열전달을 이룰 수 있는 장점으로 인해 선호되고 있다.

전자부품, 즉 같은 칩(chip)이나 소형기판(board) 단위의 냉각에 이용되는 소형 히트파이프는 그 크기에 따라 통상 마이크로(micro) 히트파이프와 미니어쳐(miniature) 히트파이프로 분류된다.[1]

마이크로 히트파이프의 개념은 Cotter에 의해 도입되었으며,[2] 이후 Peterson 등에 의해 모세관 반경과 수력 반경의 비로 그 개념이 보다 명확하게 제시되었다.[3] 이들의 정의에 의하면, 마이크로 히트파이프는 10~1000 ㎛ 정도의 직경에 10~100 mm 내외의 길이를 갖는 히트파이프가 해당된다. 그러나 이러한 마이크로 히트파이프는 제작상 특별한 미세가공기법과 장치를 필요로 하기 때문에 아직은 제한적으로 사용되고 있다.[4]

한편, 미니어쳐 히트파이프는 단면 직경이 보통 수 mm이내로, 마이크로 히트파이프에 비해 상대적으로 크기 때문에 기존의 히트파이프와 특별히 구별되는 성능 인자나 지배관계식을 가지고 있지 않다고 할 수 있다.[1] 또한 그것은 마이크로 히트파이프보다 제작이 용이하여 아직까지 일반 전자부품의 냉각에 많이 적용되며, 그 성능의 증진을 위해 내부 모세관 구조물과 단면 형태, 그리고 제작 방법의 개선 등이 연구되고 있다.

Cao 등[5]은 구리-물 조합의 축방향 그루브를 갖는 평판 스트립(strip)형 미니어쳐 히트파이프(7 (W) × 2 (T) × 80 (L) mm)에 대한 실험과 해석을 수행하여 20 W/cm^{2}의 최대열유속을 얻었다. Khrustalev와 Faghri[6]도 구리-물 조합으로 크기 7 (W) × 2 (T) × 120 (L) mm인 미니어쳐 히트파이프의 그루브 끝면에 다공성 물질을 코팅하여 열유속을 증진시키는 연구를 수행하였다. 이러한 평판 스트립형 히트파이프에 대한 연구는 단순 그루브를 갖는 형태로부터 성능의 증진을 위해 별도의 모세관 구조물을 코팅하거나 부착하는 형태로 이루어지고 있는데, 보다 저렴하고 간편한 방법들이 선호되고 있다.

국내에서 미니어쳐 크기의 히트파이프에 대한 연구는 주로 외경 2~4 mm 내외의 원관형 모델을 중심으로 하여 열적 성능 향상을 목적으로 내부의 윅 구조물 개발과 개선이 수행되어 왔다.[7~10] 그러나 본 연구에서 다루는 평판 스트립형의 형태를 가진 히트파이프의 열이송 한계, 열저항 및 열전달계수 등 열적 성능 특성에 대한 연구는 이루어져 있지 않다.

본 연구에서는 사각면을 갖는 발열 칩들의 외형을 고려하여 이들의 표면과 접촉이 용이하도록 폭을 30 mm로 하고 두께가 얇은 스트립(strip) 형태를 가지는 히트파이프를 대상으로 열적 특성을 파악하고자 하였다. 그리고 성능 증진의 한 방법으로 그루브의 윗면에 조밀한 스크린 메쉬를 부착한 경우에 대한 열적 성능변화를 비교 평가하고자 하였다. 본 연구에서의 히트파이프는 구조상 단면의 폭은 넓지만 두께가 4 mm로서 전형적인 미니어쳐 히트파이프의 범위에 속한다고 할 수 있으며, 다중 칩 모듈의 냉각 등에 적용될 수 있을 것으로 생각된다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 히트파이프

본 연구에서 제작된 히트파이프의 크기는 30 (W) × 4 (T) × 150 (L) mm이며, 용기의 재질은 2024 알루미늄 합금이다. Fig. 1(a)는 가공한 히트파이프의 단면을 보이고 있으며, Fig. 1(b)는 가공한 그루브의 각부를 나타낸다. 그루브는 가로세로비 (w_g:w_s)가 1 : 2.25가 되도록 제작하였다. 그리고 추가적인 모세관력을 발생시킬 수 있도록 그루브보다 조밀한 스크린 메쉬를 그루브 윗면에 부착한 히트파이프를 제작하였다. 사용된 스크린 메쉬(스테인리스 스틸 304, 메쉬 번호 200과 400)는 그루브 윗면에 점용접 하였다. 이 스크린들의 유효모세관직경은 각각 0.069 mm와 0.0335 mm로서 그루브의 폭 w_g의 약 1/6과 1/12에 해당한다. Fig. 1(c)는 이러한 스크린 메쉬가 그루브 윗면에 부착된 상태를 보이고 있다.

일반적으로 그루브형 평판 스트립 히트파이프의 성능에 영향을 미치는 주요 인자로는 재료 및 작동유체의 종류, 용기 및 그루브의 형태와 사양

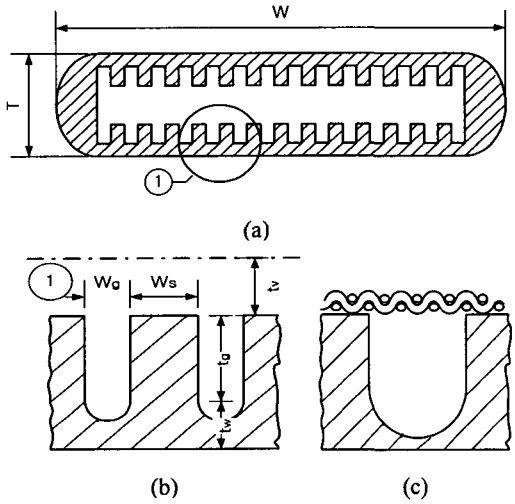


Fig. 1 Heat pipe cross section and grooves

Table 1 Specification of the heat pipes in the present study

	Values	
dimensions (mm)	150 (L) × 30 (W) × 4 (H)	
container material	Aluminum Alloy 2024	
number of grooves, N_g	48	
w_s (mm)	0.6	
w_g (mm)	0.4	
t_g (mm)	0.9	
t_w (mm)	0.5	
t_v (mm)	0.6	
working fluid	acetone (99.9%)	
V_g (m^3)	3.8×10^{-6}	
screen mesh No. (diameter of wire)	200	7,874 meshes/m (d_w= 0.058 mm)
	400	15,748 meshes/m (d_w= 0.030 mm)
screen material	Stainless steel 304	

등이며, 부가적으로 스크린을 사용하는 경우는 이의 사양도 고려해야 한다. 본 연구의 히트파이프에 대한 주요 사양은 Table 1에 요약되어 있다. 히트파이프의 그루브는 48개이며, 증기공간 높이는 1.2 mm이다. V_g는 가공한 그루브의 전체 내부 체적을 의미하며, 이 체적을 전부 채우는 작동유체량을 100%로 기준하여 충전량을 결정하였다.

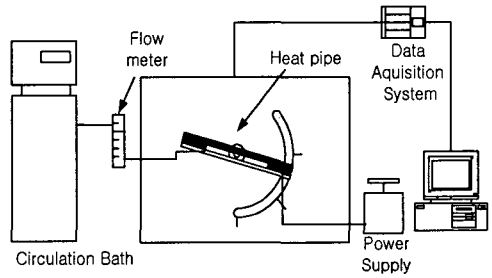


Fig. 2 Experimental setup

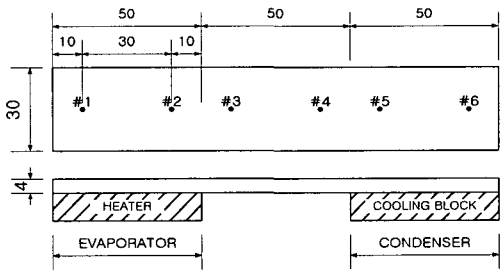


Fig. 3 Schematic of the heat pipe with thermocouple locations (units : mm)

작동유체로는 상온 작동영역에서 증기압이 낮아 구조물의 안전도 관점에서 장점이 있으며 취급이 용이한 아세톤을 사용하였다. 아세톤의 경우 물성이 변하지 않으면서 안정적으로 사용할 수 있는 작동온도의 한계가 130℃ 내외로 알려져 있기 때문에,[10] 이 온도를 본 연구에서 히트파이프의 한계작동온도로 설정하였다. 실제로 대부분의 전자제품에서 국부적인 발열부의 온도를 80~90℃ 이하로 유지해야므로 전자제품 냉각용 히트파이프의 경우 아세톤을 작동유체로 사용할 수 있을 것으로 생각된다.

2.2 실험장치

Fig. 2는 실험장치의 구성으로서, 히트파이프, 각도 조절 장치, 전원 공급 장치, 항온조로 이루어졌으며, 자료획득장치를 사용하여 모든 측정점의 온도를 10초 간격으로 받아 처리하였다.

Fig. 3은 히트파이프의 증발부 및 응축부 영역과 열전대를 부착한 위치를 나타내고 있다. 그루브가 가공된 용기의 벽두께는 매우 얇아 열전대를 삽입하기가 어려우므로 열전대는 히트파이프 용기 외벽에 부착하였으며, 용기의 열전도도와 벽두께를 고려하여 내벽의 온도를 계산하였다.

증발부 및 응축부에는 각각 실험을 위해 별도로 제작한 전기저항식 히터와 내부에 유로를 가공한 냉각 블럭(block)을 부착하였다. 냉각수의 온도는 하절기에 전자제품이 실내에서 사용되는 악조건을 모사하기 위해 항온조를 이용하여 30℃로 공급하였다. 한편, 냉각수량은 항온조의 최대 펌핑 용량을 고려하여 15 gph로 하였다.

열전대는 K-type(AWG 36 gauge)을 사용하였는데, 증발부, 단열부, 응축부에 각각 2개씩 부착하였으며, 냉각 블럭의 입구와 출구에도 열전대를 설치하여 히트파이프를 통해 실제로 이송되는 열량을 계산하였다. 실험에서 증발부의 공급 열량 대비 응축부의 방열량은 75~80% 정도로 측정되었으며, 이는 단열재 외벽 및 구조물을 통한 전도와 외기로의 대류 및 복사에 의한 열손실을 고려할 때 만족할 만한 수준이라고 볼 수 있다. 본 연구에서 온도의 측정오차는 ±1.0℃, 그리고 유량의 측정오차는 전체눈금의 2%(± 0.02 gph) 이내로 산정된다.

2.3 실험방법

정해진 한 형태의 히트파이프에 대해서 작동유체 충전율과 기울기를 변화시키며 실험을 수행하였다. 충전율은 그루브 내부의 전체 체적을 채울 수 있는 작동유체의 양을 기준으로 정의하였으며, 그 값을 90%에서부터 120%까지 변화시켰다. 스크린 윅을 추가로 부착한 경우에는 그루브와 윅의 중공체적을 기준으로 충전율을 정의하였다.

히트파이프의 기울기는 0°(수평 자세), 5°(증발부 하향, 정구배) 및 -5°(증발부 상향, 역구배)로 설정하였다. 각 경우에 대해서 최대 공급열부하와 온도를 측정하였고, 이를 이용하여 열저항과 평균 열전달계수를 계산하였다.

열저항은 히트파이프의 열성능을 나타내는 주요 지수로서 다음 식과 같다.

$$R_{HP}=\frac{T_{evp,avg}-T_{con,avg}}{Q_{input}} \tag{1}$$

여기서, Q_{input}은 공급열부하, $T_{evp,avg}$는 증발부 표면 평균온도, 그리고 $T_{con,avg}$는 응축부 표면 평균온도를 의미한다. 또한 편의를 위해 Q_{input}은 10 W 단위로 변화시키며 실험을 수행하였다.

히트파이프 증발부와 응축부에서의 평균 열전달계수 h_{evp} 및 h_{con}은 각각 다음 식 (2) 및 (3)으로 계산하였다.

$$h_{evp}=\frac{Q_{input}}{A_{g,e}(T_{e,eq}-T_v)} \tag{2}$$

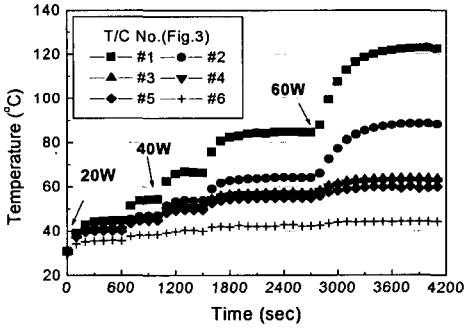
$$h_{con}=\frac{Q_{out}}{A_{g,c}(T_v-T_{c,eq})} \tag{3}$$

여기서, Q_{input}과 Q_{out}은 증발부와 응축부에서의 공급열부하와 회수열량을 의미하며, $A_{g,e}$와 $A_{g,c}$는 각각 증발부와 응축부에서 내부 그루브가 작동유체에 젖은 전체 면적을 나타낸다. $T_{e,eq}$와 $T_{c,eq}$는 각각 증발부 및 응축부의 외벽에서 측정한 평균온도에서 히트파이프 용기두께 t_w를 통한 전도열저항을 고려하여 계산한 내부 그루브 바닥면의 등가온도이다. 그리고 T_v는 히트파이프의 내부 증기 온도(즉, 작동온도)를 의미하는데, 증기 공간의 높이가 1.2 mm에 불과하여 열전대 삽입이 어려웠으므로, 문헌(1, 10)에서 제시되었듯이 단열부에서 외부로의 열전달이 없다고 가정하여 단열부 외벽의 평균온도를 대신 사용하였다.[1,10]

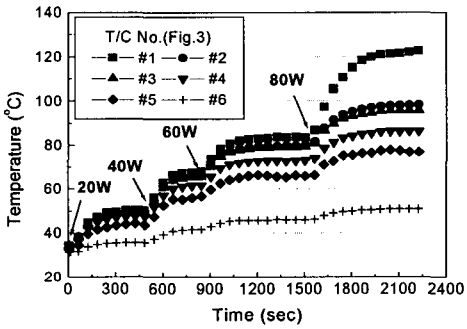
3. 실험 결과

3.1 온도 특성

히트파이프는 수평 자세에서보다는 증발부가 응축부보다 높게 위치한 역구배에서 상대적으로 저열한 성능을 나타내는데, Fig. 4는 대표적으로 충전율 110%와 기울기 -5°의 역구배 자세일 때 열부하 증가에 따른 온도변화를 보이고 있다. Fig. 4(a)는 내부에 그루브만 있는 경우로서, 위 2.1에서 언급한 바 아세톤이 작동유체임을 고려하여 본 연구에서 설정한 한계작동온도인 130℃ 이내에서 이송 가능한 열부하의 최대값이 60 W 임을 알 수 있다. 본 연구에서는 이러한 열부하를 '최대열부하'로 표현했으며, 이는 히트파이프에서 드라이아웃(dry out)과 연관된 '모세관한계(capillary limit)' 또는 '작동한계(operating limit)'를



(a) Without screen mesh(groove only)



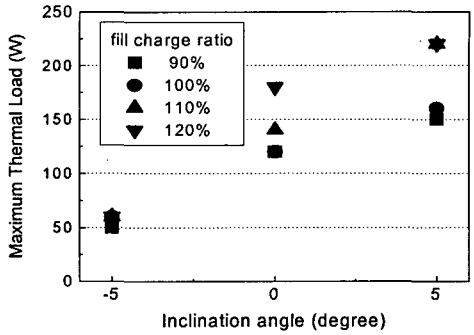
(b) With 200 mesh screen attached

Fig. 4 Temperature variations of heat pipes versus input heat load for an tilt angle of -5° and a fill charge ratio of 110%

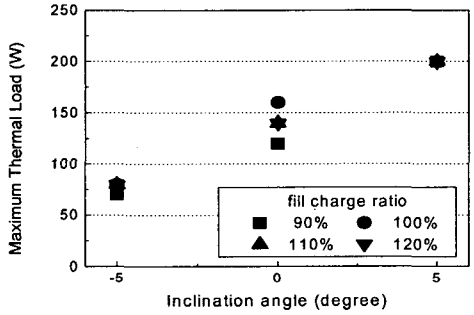
의미하는 것은 아니다.[1,10] Fig. 4(b)는 메쉬 번호 200인 스크린을 부착한 경우로서, 동일한 작동한계온도 범위에서 상대적으로 최대열부하가 80 W로 증가한 것을 볼 수 있다.

3.2 최대열부하

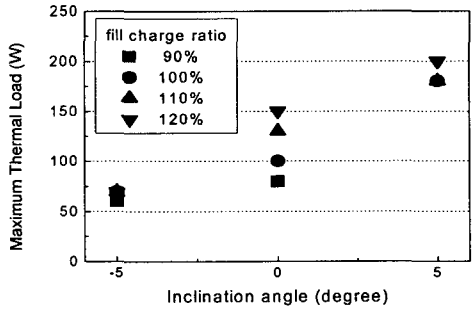
Fig. 5는 히트파이프의 기울기와 충전율에 따른 최대열부하를 나타낸 것이다. Fig. 5(a)는 내부에 스크린 메쉬를 부착하지 않는 경우로서, 히트파이프가 수평 자세일 때, 충전율이 증가하면 최대열부하도 대체로 증가했음을 알 수 있다. 최대열부하는 충전율 120%에서 180 W로서 이는 증발부 면적을 고려하면 12 W/cm^{2}의 열유속에 해당한다. +5°의 정구배 자세에서는 충전율 110%와 120%에서 최대열부하가 220 W(최대열유속은 14.7 W/cm^2)로 증가하였다. 충전율이 90%와 100%인 경우의 최대열부하는 각각 150 W와 160 W로서 120% 경우보다 60-70 W 정도 낮게 나타났는데, 이는 한



(a) Without screen mesh(groove only)



(b) With 200 mesh screen



(c) With 400 mesh screen

Fig. 5 Maximum thermal loads as a functions of inclination angles and fill charge ratios

계작동온도에 도달하기 전에 드라이아웃 현상이 나타났기 때문이다. 기울기 -5°의 역구배 자세에서는 드라이아웃 현상이 나타나기 전에 증발부 벽의 온도가 한계작동온도에 도달하였으며, 충전율 변화와 관계없이 50 W에서 60 W 사이의 최대열부하를 보여 수평 자세나 +5°의 정구배 자세와 비교하여 그 값이 크게 감소하였다.

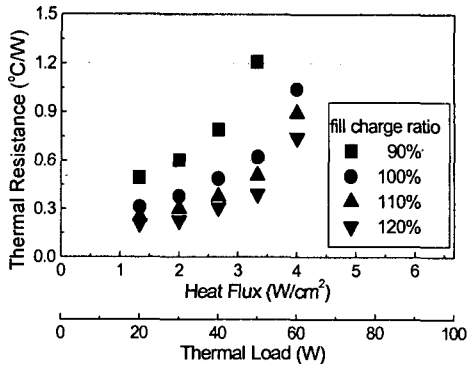
Fig. 5의 (b)와 (c)는 각각 메쉬 번호 200과 400의 스크린을 부착하여 실험한 결과를 보이고 있다. 그루브 폭보다 눈금이 조밀한 스크린을 부가적으로 사용하는 경우 모세관력의 증가 효과와 동시에 액체유동에 대한 저항의 증가 효과를 고려해야 한다. 전자는 성능 증진을 가져오지만 후자는 성능 저하를 유발할 수 있다.

메쉬 번호 200의 스크린을 부착한 경우, 역구배, 수평, 및 정구배 자세에서 최대열부하는 각각 80 W, 160 W 및 200 W로 나타났으며, 수평 자세 및 5° 정구배 자세에서 스크린 메쉬가 없는 경우와 비교하여 충전율에 따른 최대열부하의 변화가 크게 감소하였다. 히트파이프가 5°의 정구배 자세에서는 충전량이 적은 경우(90% 및 100%)에 최대열부하가 최대 50 W 정도 증가된 것을 볼 수 있는데, 이는 모세관력 증가에 의해 성능 증진이 나타난 것이며, 작동유체량이 충분한 경우(110% 및 120%)에는 오히려 스크린에 의한 유동 저항 증가로 인해 최대 20 W의 열부하 감소를 확인할 수 있다. 이는 더 조밀한 눈금의 메쉬 번호 400의 스크린을 부착한 경우가 메쉬 번호 200의 스크린을 사용한 경우보다 정구배와 수평상태에서 오히려 약간의 성능 저하를 가져오는 것에서도 확인할 수 있다. 수평 자세에서의 성능은 메쉬 번호 200의 스크린을 사용한 경우가 그루브만 사용한 경우보다 약간 저열하였고 충전율에 따른 변화폭도 약간 감소하였다.

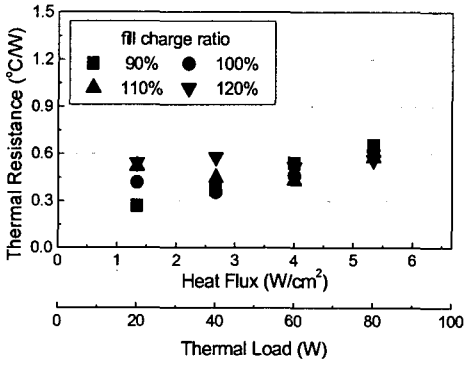
메쉬 번호 400의 스크린을 부착한 경우, 히트파이프의 최대 공급열부하는 90%의 충전율을 제외하고 메쉬 번호 200의 스크린을 부착한 경우와 유사한 경향을 보인다. 다만 수평 자세와 정구배 자세에서 최대 열부하가 감소함과 동시에 충전율에 따른 변화량도 증가된 것으로 나타났는데, 이것은 조밀한 스크린에 의한 액체 유동 손실이 메쉬 번호 200의 스크린을 사용한 경우보다 더욱 증가한 반면, 모세관력 증가에 의한 성능 증가 효과가 크지 않기 때문으로 사료된다.

3.3 열저항

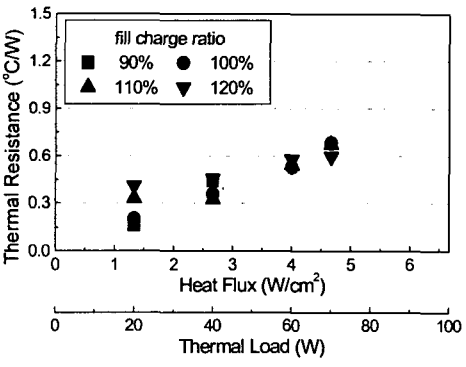
Fig. 6은 히트파이프의 성능이 가장 열등한 -5° 역구배 자세에서 충전율 변화에 따른 열저항 변화를 보이고 있다. 그루브 윅만을 가진 경우[Fig. 6(a)], 공급 열유속 증가와 충전율 감소에 따라 열저항이 상승하는 경향을 뚜렷이 확인할 수 있다. 히트파이프가 역구배 자세에서 작동할 때 중력이 증발부로의 작동유체 귀환을 방해하는데, 작동유체를 20% 범위에서 과충전하면 증발부로



(a) Without screen mesh(groove only)



(b) With 200 mesh screen



(c) With 400 mesh screen

Fig. 6 Thermal resistances as a functions of heat loads and fill charge ratios at tilt angle of -5°

의 작동유체 공급이 원활해져 증발부 온도를 낮추고, 열저항 감소를 가져오는 것으로 판단된다. 대표적으로 열부하 50 W(열유속 3.3 W/cm^2)에서는 충전율이 90%에서 120%까지 증가함에 따라 열저항은 1.210 ℃/W에서 0.393 ℃/W까지 감소하였다. 그러나 과다한 과충전은 히트파이프가 정구배 자세에서 작동할 때처럼 액막 두께를 증가시켜 열저항을 오히려 증가시킬 수 있다.

메쉬 번호 200의 스크린을 부착한 경우[Fig. 6(b)]에는 스크린 메쉬가 없는 경우와 비교해 볼 때, 열유속에 따른 열저항 변화가 크게 감소하여 대부분 0.6 ℃/W 이하의 값을 보이고 있다. 이는 그루브보다 조밀한 스크린 메쉬로 인해 작동유체 귀환에 사용되는 모세관력이 증가했기 때문인 것으로 사료된다. 특히 충전율이 90%인 경우에 성능 개선 효과가 두드러지게 나타났다.

메쉬 번호 400의 스크린을 부착한 경우[Fig. 6(c)]는 메쉬 번호 200의 스크린을 부착한 경우[Fig. 6(b)]와 유사한 열저항 분포를 보이는 것을 알 수 있다. 단, 낮은 열부하에서의 열저항값과 충전량에 따른 변화폭이 보다 감소하였다.

Fig. 7은 스크린 메쉬가 없이 그루브만 있는 경우 수평 상태에서 공급 열유속에 따른 열저항의 변화를 나타낸 것이다. 정구배에서 정상적 작동을 하는 히트파이프의 경우에는 그림에서 보이는 바와 같이 드라이아웃 경향이 생기기 전에는 통상적으로 열유속 증가에 따라 열저항이 감소하는 경향을 보인다. 그림에서 90% 및 100%의 충전율

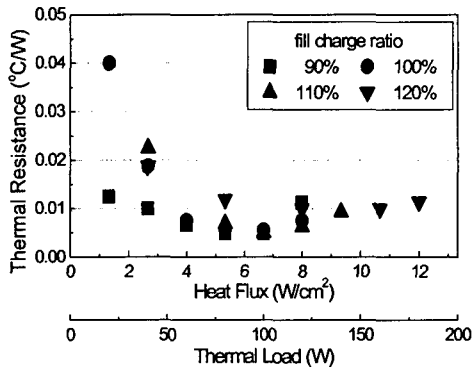


Fig. 7 Thermal resistances as a functions of heat loads and fill charge ratios at horizontal position (without screen mesh)

에서는 열유속 8 W/cm^2 (열부하 120 W) 부근에서 국부적 드라이아웃 경향을 보였으며 이보다 큰 열부하에서는 드라이아웃이 발생하였다. 충전율을 120%까지 증가시키면 드라이아웃이 지연되어 최대열부하가 180 W (12 W/cm^2)까지 증가하였다. 그러나 이 때 열저항은 0.005와 0.01 ℃/W 사이에서 증가하게 되는데, 이는 액막의 두께가 증가한 것에 기인한다고 생각된다. 그럼에도 불구하고 이 값들은 동일한 충전율에서 기울기 -5°의 역구배 자세인 경우와 비교하면 1/10 이하로 감소한 것임을 알 수 있다.

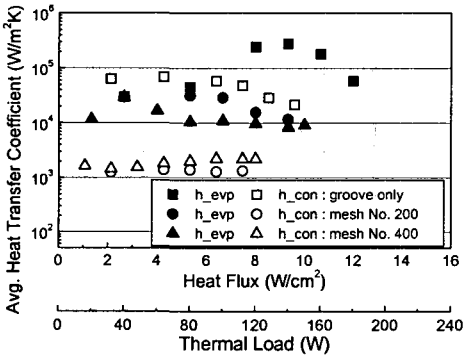
3.4 평균 열전달계수

Fig. 8은 대표적으로 충전율 120%인 경우에 대해 기울기에 따른 증발부와 응축부의 평균 열전달계수(각각 h_{evp}와 h_{con}으로 표기)를 보이고 있다. Fig. 8의 (a)는 수평자세의 히트파이프에 대한 열전달계수를 보이고 있다. 그림에서 보듯이 평균 열전달계수는 그루브만 있는 경우에 h_{evp}는 최대 2.7×10^5 W/m^{2}K를 보였으며, h_{con}는 열유속 변화에 따라 최대 6.8×10^4 W/m^{2}K를 보였다. 스크린 메쉬를 추가로 사용한 경우에는 그루브만 있는 경우에 비해 평균 열전달계수가 상대적으로 작게 나타났는데, h_{evp}의 경우 9 W/cm^2 열유속에서 최대 20배 이상의 열전달계수 차이를 보이기도 했다.

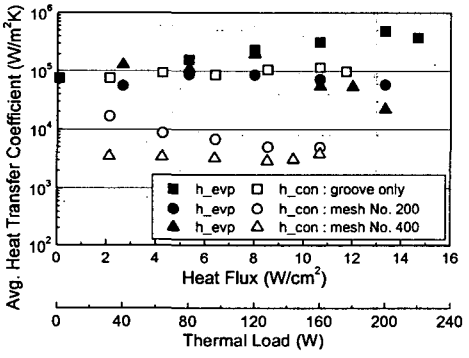
Fig. 8(b)는 기울기 5° 정구배의 경우 평균 열전달계수를 보이고 있다. 이 경우에도 내부에 스크린 메쉬가 부착된 경우가 그루브만 있는 경우에 비해 열전달계수 값이 작게 나타났다. 이를 수평자세에서와 비교할 때, 전반적으로 평균 열전달계수가 증발부(2×10^4~2×10^5 W/m^{2}K)와 응축부(3×10^3~10^5 W/m^{2}K)에서 모두 증가했으며 h_{evp}는 특히 열유속 변화에 따라 변화하는 폭이 상대적으로 줄어들었음을 볼 수 있다.

기울기 -5° 역구배의 경우[Fig. 8(c)] 전반적인 열전달계수 값은 수평이나 정구배의 경우보다 크게 감소하였다. 그루브만 있는 경우 h_{evp}는 열유속 증가에 따라 7×10^3 W/m^{2}K에서 0.7×10^3 W/m^{2}K로 감소하였으며, 메쉬번호 400의 스크린 메쉬를 추가로 부착한 경우는 6.8×10^3 W/m^{2}K에서 2.2×10^3 W/m^{2}K로 완만한 감소를 보였다. 한편 응축부의

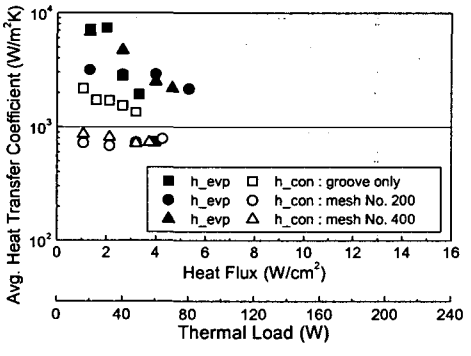
h_{con}은 그루브만 있는 경우에는 1.4~2.1×10^3 W/m^{2}K, 스크린을 추가한 경우에는 0.7~0.9×10^3 W/m^{2}K의 값을 보였다.



(a) Horizontal position (tilt angle of 0°)



(b) Tilt angle of 5°



(c) Tilt angle of -5°

Fig. 8 Average Heat Transfer coefficient as a function of tilt angel at fill charge ratio 120%

그루브 폭보다 미세한 스크린을 추가로 사용한 경우에는 기-액 경계면에서 모세관 압력의 유도 정도가 커서 기울기와 충전율에 대한 열저항의 의존성은 그루브만 사용한 경우보다 적게 나타났으나, 열전달 경로에 부가적인 스크린 구조물로 인해 열저항은 증가한 것으로 생각된다. 따라서 그루브 바닥면 온도에 근거한 열전달계수는 스크린을 덮지 않은 경우와 비교하여 작게 나타난 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서 평판 스트립형 히트파이프에 대한 실험결과를 분석한 결과 다음의 결론을 얻었다.

(1) 그루브의 폭보다 모세관 반경이 작은 스크린 메쉬를 그루브 위에 부착함으로써 작동유체 순환에 필요한 모세관력을 크게 유발한 결과 히트파이프가 역구배로 작동할 때 최대열부하로 나타나는 열적 성능이 향상되었다. 히트파이프가 정구배에서 작동할 경우에도 작동유체가 90% 및 100% 충전되었을 때에는 최대열부하가 20에서 30% 증진되어 충전율에 따른 최대열부하의 차이가 두드러지게 감소하였다. 한편, 중공크기가 과도하게 작은 스크린을 사용할 경우에는 액체유동 저항의 증가로 인해 이러한 성능 증진 효과는 감소하였다.

(2) 스크린 메쉬를 부가적으로 사용한 경우의 열저항은 히트파이프가 최저 성능을 발휘할 것으로 예상되는 역구배에서 작동하는 경우를 중심으로 분석한 결과 스크린이 없는 경우와 대비하여 특히 열부하가 클 경우에 열저항이 크게 감소하였으며, 기울기와 충전율에 대한 열저항의 의존성도 감소되었다. 한편, 히트파이프가 수평 상태에 놓인 경우 작동유체의 과충전은 열저항 증가를 가져온 반면, 최대열부하를 증가시키는 효과를 가져왔다.

(3) 증발부와 응축부의 평균 열전달계수는 충전율 120%의 경우를 중심으로 분석하였으며, 모든 경우에 증발부의 열전달계수가 응축부보다 더 크게 나타났다. 역구배에서의 열전달계수는 수평 및 정구배에서와 비교할 때 전반적으로 감소하여, 스크린이 없는 경우는 약 1/70, 스크린이 있는 경우는 약 1/50까지 감소하였다. 또한, 스크린

을 추가로 사용한 경우에는 그루브만 있는 경우보다 평균 열전달계수가 작게 나타났다.

참고문헌

(1) Faghri, A., 1995, *Heat Pipe Science and Technology*, Taylor & Francis, pp. 625~631.

(2) Cotter, T.P., 1984, "Principles and Prospects for Micro Heat Pipes," *Proceedings of The 5th International Heat Pipe Conference,* pp. 126~133.

(3) Babin, B.R., Peterson, G.P. and Wu, D., 1990, "Steady-State Modeling and Testing of a Micro Heat Pipe," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 112, No. 3, pp. 595~601.

(4) Mallik, A.K., Peterson, G.P. and Weichold, M.H., 1995, "Fabrication of Vapor-Deposited Micro Heat Pipe Arrays as an Integral Part of Semiconductor Devices," *Journal of MicroElectro-Mechanical System*, Vol. 4, No. 3, pp. 119~131.

(5) Cao, Y., Gao, M., Beam, J.E. and Donovan, B., 1996, "Experiments and Analyses of Flat Miniature Heat Pipes," *Proceedings of The 31th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, Vol. 2, pp. 1402~1409.

(6) Khrustalev, D. and Faghri, A., 1996, "Enhanced Flat Miniature Axially Grooved Heat Pipe," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 118, No. 1, pp. 261~264.

(7) Lee, Y.S., Lee, Y.P. and Lee, Y., 1992, "An Experimental Study on Micro Two-Phase Closed Thermosyphons with Inserts," *Proceedings of The 8th IHPC*, C-P1.

(8) Moon, S.H, Hwang, G. and Choy, T.G., 2001, "Application of Miniature Heat Pipe for Notebook PC Cooling," *Transactions of the KSME (B)*, Vol. 25, No. 6, pp. 799~803.

(9) Kim, K.S., Moon, S.H. and Choi, C.G., 1999, "Cooling Characteristics of Miniature Heat Pipes with Woven-Wired Wick," *Proceedings of The 11th International Heat Pipe Conference*, pp. 20~25.

(10) Peterson, G. P., 1994, *An Introduction to Heat Pipes*, Wiley Interscience Publication, pp. 4~7.