

내부 아터리가 있는 알루미늄 그루브 히트파이프와 써모사이펀의 작동특성에 관한 실험적 연구

홍진관, 김대성*, 정원복**

경원대학교 건축설비학과, 경원대학교 대학원*, 항공대학교 항공기계공학과 대학원**

Experimental Study on the Working Characteristic of Aluminum Grooved Heat Pipe and Thermosyphon with Inner Arterial Wick

Jin-Kwan Hong, Dae-Sung Kim*, Won-Boek Jung**

Department of Building Equipment & System Engineering, KyungWon University,
Sungnam City 461-701, Korea

Department of Aeronautical & Mechanical Engineering, graduate School of Hankuk Aviation University,
Koyang City 411-791, Korea

(Received May 12, 2000; revision received August 11, 2000)

ABSTRACT: The experimental study for performance improvement of aluminum/freon22 grooved heat pipe was carried out. Arterial wick was used for performance improvement of heat pipe. The experimental result was compared with screen covered grooved wick heat pipe. And also, performance test of grooved wick thermosyphon inserted straight wire in the center of grooved pipe was carried out. This result was compared with the performance test result of grooved wick thermosyphon. The operation limit of artery inserted grooved heat pipe was slightly extended, but thermal resistance of this heat pipe was twice as large as that of screen covered grooved heat pipe. In case of thermosyphon, the operation limit of grooved thermosyphon inserted straight wire in the center of grooved pipe was slightly extended, but thermal resistance was increased, comparing with that of the grooved thermosyphon.

Key words: Heat pipe(히트파이프), Thermosyphon(써모사이펀), Groove(그루브), Artery(아터리), Wire(와이어), Performance test(성능시험)

1. 서론

폐열회수용 공조시스템의 열교환기로 응용되는 히트파이프(heat pipe)는 용기(container), Wick(wick), 마감(end cap), 작동유체 주입관(filling tube), 그리고 작동유체(working fluid)로 구성되어 있다. 이 구성요소 중 열회수성능에 직접적인 영향을

주는 요소는 Wick과 작동유체라고 할 수 있다. 작동유체는 용기와 적합성(compatibility), 열수송 능력, 응용시의 작동온도 및 그에 따른 작동압력 등을 고려해야 한다. 또한, Wick 구조는 외벽과 액체상태의 작동유체 사이의 열저항을 적게 하고, 모세관력을 크게 하면서 작동유체의 축방향 유동저항이 적도록 해야 한다.⁽¹⁾

본 연구에서는 저온공조시스템의 열회수에 사용되는 열교환기에 쉽게 적용하기 위해서 구리에 비해 값싸고 가벼운 알루미늄합금(AL60계열)을 사용하여 역사다리꼴 형태의 그루브를 갖는 히트

† Corresponding author

Tel.: +82-31-750-5306; fax: +82-31-750-5314

E-mail address: jkhong@mail.kyungwon.ac.kr

파이프를 제작하였다. 히트파이프 내부에서 액체 유동에 대한 저항을 감소시켜 작동유체의 귀환을 원활히 함과 동시에 가능한 큰 모세관압력을 갖도록 하기 위해 유동단면적이 큰 축방향 그루브와 눈금이 미세한 스크린메쉬(screen mesh)를 동시에 사용하는 조합형 워크(combined wick)을 사용하였고 성능개선을 위한 방안으로 가공이 용이한 특수한 형태의 아터리(artery)를 삽입하였다. 또한 비교를 위해서 동일한 그루브관을 써모사이편 모드로 작동시켜 써모사이편 성능실험을 동시에 수행하였으며, 써모사이편의 성능개선을 위해 관중심에 축방향으로 와이어를 삽입하여 단순한 와이어의 삽입으로 인해 써모사이편의 성능이 개선될 수 있는지를 알아보고자 하였다. 작동유체로는 저온공조용으로 사용되는 R22를 사용하였고 진공도 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ torr 범위에서 아터리를 삽입한 히트파이프와 관중심에 와이어를 삽입한 써모사이편을 제작하였다. 또한, 제작된 히트파이프와 써모사이편의 작동한계를 측정할 실험장치를 구성하고 두 경우의 작동한계를 실험적으로 측정함으로써, 아터리와 와이어의 삽입에 따른 성능 변화 및 그 개선효과를 파악하여 저온용 히트파이프를 이용한 현열교환기의 제작에 필요한 성능 개선 자료로 활용하고자 하였다.

2. 장치구성 및 실험방법

2.1 히트파이프 제작

별도로 제작된 알루미늄 그루브 파이프를 이용하여 히트파이프를 제작하였다. 파이프의 재질은 AL6063-T5이고 Fig. 1(a)와 같이 축방향으로 그루브 14개가 파이프 내벽에 형성되어 있다. 그루브 사양은 그루브 수 14개, 깊이 1.0 mm, 모양은 역사다리꼴⁽²⁾이며, 파이프의 길이는 950 mm이고 외경 15.88 mm, 두께 1.0 mm이다. 같은 재질의 두께 2.0 mm의 엔드캡과 작동유체 주입관(O.D. 6.35 mm)을 세척한 후 TIG 용접으로 부착하였다. 실험의 편의를 위해서 작동유체 주입관 끝에는 1/4" 볼밸브와 압력계를 부착하였다. Fig. 1에 본 연구에서 적용된 파이프의 단면과 워구조를 나타내었다.

Fig. 1(a)는 알루미늄 그루브관을 나타낸 것이며 Fig. 1(b)는 그루브를 스크린메쉬(#350, STS

316) 2겹을 감싼 복합워크 형태이고, Fig. 1(c)는 스크린메쉬가 삽입된 복합워크에 아터리를 삽입한 것이다. 본 실험에서는 와이어와 아터리를 삽입한 성능변화 특성을 파악하기 위해 Fig. 1(a)의 그루브관 중심축을 따라 직경 1.5 mm의 와이어를 삽입한 Fig. 1(d) 형태의 써모사이편과 Fig. 1(c)처럼 스크린메쉬가 삽입된 복합워크에 아터리를 삽입한 히트파이프에 대한 성능실험을 수행하고 기존의 실험결과와⁽²⁾ 비교하여 성능개선을 위한 설계 자료로 활용하고자 하였다.

Fig. 1(c)에서와 같이 그루브관에서 증기영역에 삽입한 아터리는 알루미늄판에 그루브를 밀링 가공한 사각형 아터리가 사용된 바 있지만,^(3,4) 본 실험에서는 그와 유사한 개념이지만 가공의 편의성을 위해서 얇은 알루미늄판을 그림과 같이 반원모양으로 5개의 홈을 형성시킨 후 스크린 메쉬를 한겹감아 제작하였다. 그루브관에 삽입한 스크린 메쉬는 #350이고 재질은 STS316, 중공도 0.55를 갖고 있다.

파이프 내를 진공시키기 위하여 확산오일식 진공펌프(Diffusion oil vacuum pump)를 이용하였으며 진공펌프의 이온게이지에 표시된 압력이 $9 \times 10^{-6} \sim 1.2 \times 10^{-5}$ torr일 때 작동유체인 R22를 주입하였다. 주입된 작동유체량을 Table 1에 정

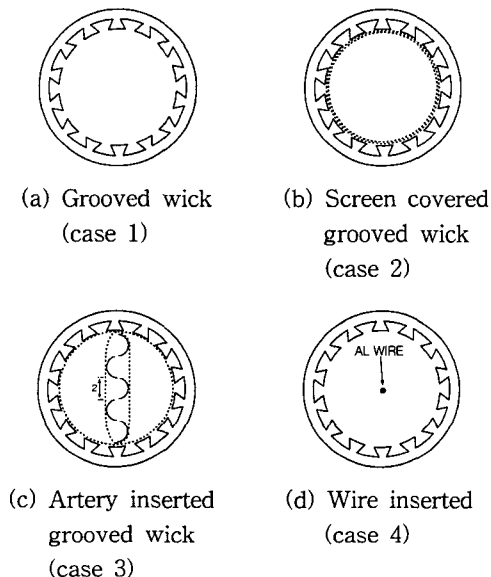


Fig. 1 Cross sections of the heat pipes fabricated by drawing (unit: mm).

Table 1 Fluid inventory of heat pipe and thermosyphon (unit: g)

Heat pipe mode			
Case1	31.5		
Case2	35.7		
Case3	43.8		
Thermosyphon mode			
	40%	30%	20%
Case1	29.2	23.4	17.6
Case4	28.8	23.0	17.3

리하였다. 히트파이프 모드인 경우 작동유체 증발 공간을 액체가 채우고 증기가 나머지 공간을 채우는 양을 무게로 환산하여 주입하였다.⁽¹⁾ 써모사이펀 모드에 주입한 작동유체량은 증발부 체적 중 액체상태의 작동유체가 차지하는 비율로 산출하였다.⁽¹⁾ 여기에서도 역시 증기공간에 대한 양을 감안하였고, 주입된 작동유체량은 이와 같이 계산된 양에 대하여 10%를 더 추가한 양을 주입하였다.

2.2 실험장치구성

아터리나 와이어가 삽입된 히트파이프 성능과 악을 위한 실험을 하기 위해서 Fig. 2와 같이 증발부($L_e=400$ mm)에 열선(유리섬유로 피복된 니켈합금, $\phi 0.65$ mm, $4 \Omega/m$)을 등간격으로 감아 균일한 열유속 조건을 형성할 수 있게 하였고, 응축부($L_c=500$ mm)에는 냉각재킷(알루미늄재질)을 설치하여 균일한 온도조건이 형성되도록 하였다. 또한 히트파이프 온도분포를 위해 파이프 외벽에 T-type 열전대($\phi 0.28$)를 12개를 증발부에 6

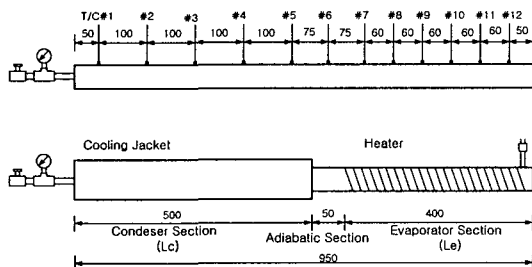


Fig. 2 Schematic of heat pipe and thermocouple locations (unit: mm).

개(T/C #7~T/C #12), 단열부에 1개(T/C #6), 응축부에 5개(T/C #1~T/C #5)를 열전도도가 우수한 접착제(Omega Bond 200)를 사용하여 각각 부착하였다.

Fig. 3에 열전대, 열선 및 냉각재킷을 이용한 실험장치 구성을 나타내었다. 증발부에 감긴 열선은 전압조절기를 이용하여 히트파이프에 입력되는 열부하를 조절할 수 있게 하였고 응축부 쪽의 냉각재킷은 항온조와 연결하여 냉각수가 일정한 유량과 온도로 공급될 수 있도록 하였다. 또한 온도측정을 위해 열전대는 PC로 실험 진행사항을 관측할 수 있게 구성된 자료획득장치에 부착하였다. 여기에 사용된 자료획득장치는 DT-Open Layers DT30003-PGL Data Acquisition System 및 HP VEE 4.0이 사용되었으며 모니터로 관측하면서 작동시간의 경과에 따른 실험자료를 파일로 받아 저장하고 이를 분석하였다.

실험은 히트파이프와 써모사이펀인 경우에 대하여 수행하였으며 경사각이 작은 히트파이프 모드인 경우는 경사각의 변화(본 논문에서는 수평기준으로 응축부가 증발부 위에 위치하도록 10 deg 기울인 경우 +10 deg 경사각이라 함)와 응축부의 냉각수 유입온도변화에 따른 성능실험을 진행하였다. 경사각 0, 3, 5, 10 deg에서 냉각수 유량은 0.8 lpm으로 고정하고, 응축부 유입 냉각수 온도는 20°C, 5°C인 두 경우에 대하여 실험을 진행하였다. 증발부의 입력 열부하는 30 W 간격으로 증가시키면서 실험을 수행하였다. 경사각이 큰 써모사이펀 모드의 경우 히트파이프와 같이 응축부가 증발부 위에 위치하도록 하여 수직으로

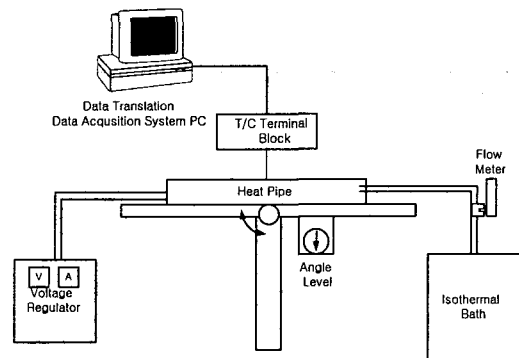


Fig. 3 Experimental setup for the performance test of heat pipe.

세운 경사각 90 deg와 75 deg, 60 deg인 경우에 대하여, 증발부에 열부하를 가하면서 작동유체량을 40%, 30%, 20%(Table 1)로 변화시킨 경우에 대하여 실험을 수행하였다.

Fig. 1(a)(case 1)에 관한 히트파이프에 대한 성능실험의 결과(작동한계 240 W)⁽²⁾와 Fig. 1(b)(case 2)의 히트파이프 성능실험 결과(작동한계 330 W)⁽²⁾를 기준으로 하여 Fig. 1(c)(case 3)의 아터리를 삽입한 히트파이프와 Fig. 1(d)(case 4)의 와이어를 삽입한 써모사이펀에서의 아터리와 와이어 삽입에 의한 성능변화 특성 및 그 개선효과를 관찰하였다. 실험은 작동한계에 도달할 때까지 진행하였으며, 히트파이프 내부의 작동유체 순환이 정상적으로 이루어지지 않아 온도가 급격히 상승하여 드라이아웃(dryout)이 발생하는 경우와 작동유체가 정상적인 작동온도 범위인 60 °C 이상이 되는 경우를 작동한계로 보았으며, 단열부온도를 작동유체 온도로 간주하였다.^(1,2)

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 히트파이프

Fig. 4는 Case 3 즉, 아터리가 삽입된 히트파이프에 대한 실험결과로서 경사각 10 deg, 냉각수 온도 20 °C, 유량 0.8 lpm인 경우의 시간경과에 따른 작동특성을 보여주고 있다.

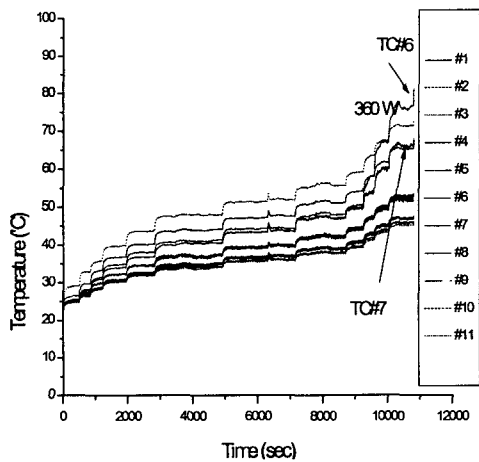


Fig. 4 Performance characteristics of artery inserted grooved wick heat pipe (case 3) at 10 degree tilt angle.

360 W까지 드라이아웃 발생 없이 정상적으로 작동하고 있지만, 단열부 외벽온도(열전대 7번, T/C #7)의 온도가 R22의 유효작동온도 범위로 알려진 60°C에 도달하였기 때문에 실험을 중단하였다.

그림에서 열전대 6번(T/C #6)이 330 W부터 이상이 발생하여 온도가 크게 증가하고 있는 것이 관찰되었다.

Fig. 5는 Case 3의 히트파이프 경사각에 따른 단열부에 부착된 열전대의 온도 변화이다.

응축부 냉각수온도가 20 °C인 경우 240 W까지, 5 °C인 경우 180 W까지 경사각에 따른 단열부 온도차가 거의 없다가 열부하가 계속 증가하는 경우 히트파이프의 기울기가 커질수록 열부하에 따른 단열부의 온도상승이 감소하고 있는데 이는 히트파이프의 기울기가 커지면서 증력으로 인해 그루브관 내부에서 작동유체의 귀환이 보다 원활해지면서 낮은 온도에서 히트파이프가 작동하고 있다는 것을 알 수 있다.

경사각이 0~3 deg 사이보다 5~10 deg 사이에서의 온도 변화폭이 더 작아짐을 알 수 있다.

응축부에서의 냉각수 온도 20 °C, 유량 0.8 lpm, 360 W 열부하에서 단열부 외벽의 온도는 수평, 3, 5, 10 deg 경사각에서 각각 60.2°C, 55.9°C, 54 °C, 53°C로 나타나고 있다.

Fig. 6은 열부하의 증가에 따른 히트파이프의 증발부 외벽온도의 평균값과 응축부 외벽온도의 평균값 차이를 나타낸 것이다. 열부하가 증가하면서 증발부와 응축부의 온도차가 커지고 있음을 알 수 있으며 경사각이 증가할수록 작동유체의 귀환이 원활해짐에 따라 열전달이 양호하여 외벽면 온도차가 감소하는 특성을 보여주고 있다. 수평인 경우에는 응축부의 냉각수온도 변화에 따라서 외벽면 온도차가 다소 변함을 알 수 있었으나 기울기가 증가하여 10 deg의 경사각에서는 냉각수 온도변화에 따른 외벽면 온도차가 거의 나타나지 않고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 증발부와 응축부의 평균온도차를 증발부에 가해진 열부하의 비로 정의한⁽¹⁻⁴⁾ 히트파이프 열저항의 변화특성을 파악하기 위해서 증발부에 가해진 열부하에 따른 히트파이프 열저항의 변화를 나타낸 것이다. 응축부의 냉각수온도가 20 °C인 경우 경사각에 따른 열저항은 경사각이 증가할수록 최대 40% 정도 감소함을 보여주고

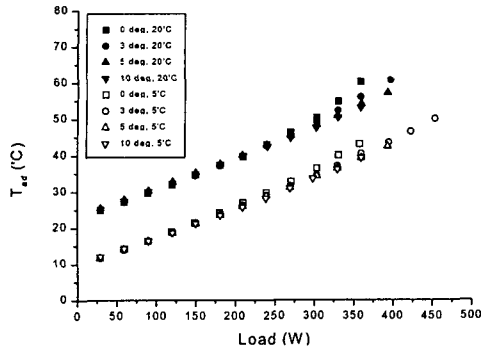


Fig. 5 Adiabatic surface temperature of artery inserted grooved wick heat pipe w.r.t. thermal load for values of tilt angle.

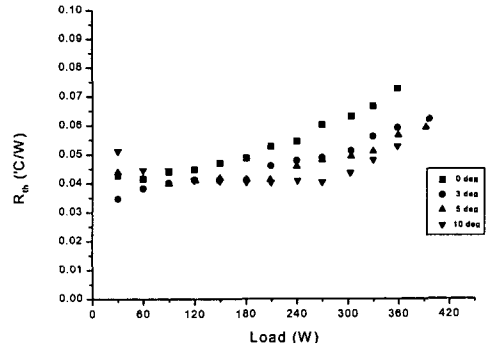


Fig. 7 Thermal resistance of artery inserted grooved wick heat pipe w.r.t. thermal load for values of tilt angle.

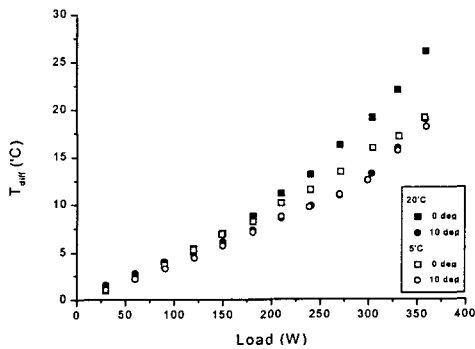


Fig. 6 Average wall temperature difference between evaporator and condenser w.r.t. thermal load for values of tilt angle.

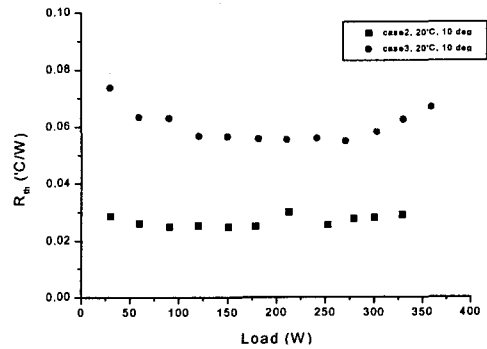


Fig. 8 Thermal resistance of artery inserted grooved wick heat pipe (case 3) and screen mesh covered heat pipe (case 2).

있으며 이와 같은 경향은 열부하가 증가할수록 더욱더 분명해짐을 알 수 있다.

Fig. 8은 아터리를 삽입한 그루브 히트파이프 (case 3)와 스크린 메쉬 2겹을 삽입한 그루브 히트파이프(case 2)를 동일조건(응축부 냉각수 온도 20°C, 경사각 10 deg, 유량 0.8 lpm)에 대하여 실험한 열저항을 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 case 3의 열저항이 case 2에 비하여 2배 이상 증가한 것을 알 수 있다.

그러나 작동한계는 case 2 비하여 50 W 이상 증가하고 있다. case 2인 경우 작동한계가 330 W로 이후에 드라이아웃이 발생하였고, case 3인 경우는 330 W 이후 단열부 외벽온도가 60°C가 될 때까지 드라이아웃이 발생하지 않았다. 성능향상을 목적으로 아터리를 삽입하여 작동한계는

50 W 이상 증가하여 그 증가폭이 15%를 상회하고 있지만 열저항은 2배 이상 증가하는 실험 결과를 얻을 수 있었다.

3.2 써모사이편

그루브 파이프를 이용하여 써모사이편 모드에 대한 실험을 수행하였으며, 써모사이편에 와이어를 삽입한 경우와(case 4) 와이어가 없는 경우(case 1)에 대한 성능변화를 관찰해 보았다.

Fig. 9는 응축부 냉각수 20°C, 유량 0.8 lpm에서 작동유체 주입량이 40%일 때 열부하에 따른 와이어를 삽입한 써모사이편의 단열부 외벽온도를 기울기 90, 75, 60 deg에 대하여 나타내었으며, 작동유체량 변화(40%, 30%, 20%)의 영향을 기울기

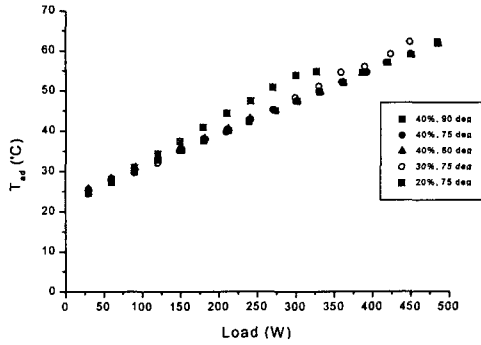


Fig. 9 Wall temperature of adiabatic section of thermosyphon with wire (case 4) w.r.t. thermal load for values of tilt angle and filling ratio.

75 deg에 대하여 표시하였다. 히트파이프와 달리 써모사이펀의 경우 단열부 외벽온도의 경사각(90, 75, 60 deg)에 따른 변화는 미미하였으며, 열부하에 따른 단열부 외벽의 온도가 선형적으로 증가하고 있다. 열부하 480 W까지 드라이아웃은 발생하지 않았다. 아터리를 삽입한 히트파이프에서는 최대작동한계는 390 W로 나타나고 있는데, 열부하 360 W에서의 단열부 외벽온도를 비교해 보면 써모사이펀(case 4, 40%, 75 deg 경사각)의 단열부 외벽온도가 히트파이프(case 3, 10 deg 경사각)보다 4°C 정도 낮음을 알 수 있었다.

단열부 외벽온도는 작동유체의 주입량에 따라서 변화가 컸다. Fig. 9의 경사각 75 deg인 경우를 보면 작동유체 주입량이 20%인 경우 330 W 이후에서 작동한계가 나타나고 있고, 외벽온도도 제일 높음을 알 수 있다. 주입량 40%에서 단열부 외벽온도가 가장 낮았고, 작동한계도 가장 커짐을 알 수 있다. 열부하 330 W에서 주입량 40%인 경우 단열부 외벽온도는 49.8°C, 20%인 경우 54.7°C로 나타나고 있다.

Fig. 10은 와이어가 삽입된 써모사이펀의 열부하에 따른 열저항을 작동유체 주입량과 경사각의 변화에 따라 나타내었다. 써모사이펀의 기울기가 75 deg일 때, 작동유체 주입량이 40%일 때 열저항이 가장 작아짐을 알 수 있다. 써모사이펀의 경우 작동온도와 마찬가지로 경사각의 변화에 따른 영향보다는 작동유체량 변화에 따른 열저항의 변화가 더 크다는 것을 알 수 있어 써모사이펀의 경우 최적 작동유체의 산정이 열성능 향상에 큰

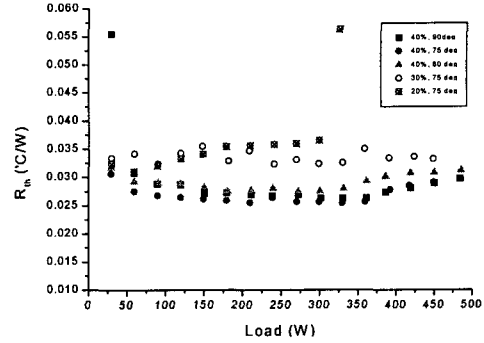


Fig. 10 Thermal resistance of thermosyphon with wire (case 4) w.r.t. thermal load for values of tilt angle and filling ratio.

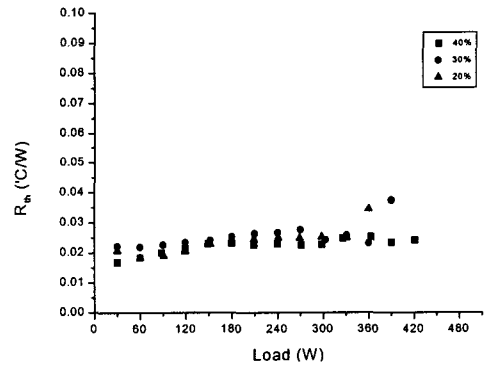


Fig. 11 Thermal resistance of thermosyphon without wire (case 1) w.r.t. thermal load for values of tilt angle and filling ratio.

영향을 줄을 확인할 수 있다.

Fig. 11은 와이어를 삽입하지 않은 써모사이펀의 경우(case 1)로 경사각 75 deg, 냉각수온도 20°C에서 작동유체량을 변화시키면서 실험한 결과이다. 동일조건에서 열부하량이 와이어를 삽입한 경우의 Fig. 10과 비교해 보면 80 W 정도 적은 상태에서 작동한계가 나타나고 있으며 와이어를 삽입할 경우 약 20% 정도 성능이 향상됨을 알 수 있다. 그러나 작동유체 주입량 40%를 기준으로 볼 때 열저항은 0.021°C/W에서 0.025°C/W로 약 20% 정도 증가하고 있음을 알 수 있다. 작동유체주입량에 따른 열저항 값은 작동유체 주입량이 40%일 때 열저항이 가장 적음을 알 수 있었

고, 와이어를 삽입하지 않은 경우를 와이어를 삽입한 Fig. 10의 경우와 비교하면 작동유체량의 변화에 따른 열저항의 변화는 상대적으로 그리 크지 않음을 알 수 있었다. 또 열부하 300 W 이후에서는 작동유체 주입량이 30%, 20%인 경우에 열저항 값이 다소 증가하고 있는 경향을 보여주고 있는데 이는 열부하가 증가할수록 작동유체의 귀환이 불안정해지기 때문으로 판단된다.

4. 결 론

(1) 와이어가 없는 알루미늄 그루브 파이프를 이용한 써모사이펀에서 작동유체의 주입량을 증발부 체적의 20%, 30%, 40%로 변화하여 성능을 실험한 결과 주입량이 40%인 경우 작동성능한계가 제일 양호함을 알 수 있었다.

(2) 알루미늄 그루브 파이프를 이용한 써모사이펀 경우 큰 열부하에서 와이어를 삽입한 경우의 작동한계가 약 20% 증가하고 있으나 열저항도 약 20% 정도 상승하고 있어 와이어 삽입에 따른 작동한계는 증가하나 열저항은 와이어가 없는 경우가 더 적음을 알 수 있다.

(3) 그루브 파이프에 성능향상을 위해 스크린 메쉬와 아터리를 삽입하여 작동한계를 실험한 결과 아터리를 삽입한 경우 작동한계는 약 15% 정도로 다소 증가하나 열저항은 상당히 증가함을 알 수 있었다. 이와 같은 결과로부터 내부 첨가

물인 아터리등을 삽입할 경우 적절한 아터리 설계와 제작, 그리고 삽입방법에 대한 세심한 검토가 성능개선에 대단히 중요함을 확인할 수 있다.

후 기

본 연구는 중소기업청의 지원에 의한 중소기업 기술혁신사업의 일환으로 수행되었으며 그 지원에 감사를 표합니다.

참고문헌

1. Chi, S. W., 1976, Heat pipe theory and practice: a sourcebook, Hemisphere, Washington, pp. 33-77.
2. Hong, J. K., Bu, J. H., Jung, W. B., 1999, Experimental Study on the Working Characteristic of a Heat Pipe with Combined Wick, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 11, No. 2, pp. 236-243.
3. Dunn, P. and Reay, D. A., 1994, Heat Pipes, 4th ed., Pergamon, Oxford, pp. 113-121.
4. Jung, W. B., 1998, Experimental Study on a Groove Artery Heat Pipe for Satellite Applications, M.S. thesis, Hankuk Aviation University.