

## 조합형 위를 사용한 히트파이프의 작동특성에 관한 실험적 연구

### Experimental study on the working characteristic of a heat pipe with combined wick

홍진관\*, 부준홍\*\*, 정원복\*  
J. K. Hong, J. H. Boo, W.B. Chung

**Key words** : Heat pipe(히트파이프), Combined wick(조합형 위), Groove(그루브), Screen mesh(스크린 메쉬), Performance test(성능시험), Operation limit(작동한계)

#### ABSTRACT

Aluminum/Freon-22 heat pipes were manufactured and tested which have a special wick geometry combining axial groove and screen mesh. There were 14 axial grooves in a cross-section and these were covered by two layers of 350 mesh screens to enhance the thermal performance. The performance test was conducted by varying the thermal load and tilt angle. Furthermore, the operation limits and overall heat transfer coefficient were investigated. The experimental results will be useful in a variety of applications, especially in design and manufacturing of a high-efficiency heat exchanger and energy recovery systems.

#### 1. 서론

최근 수십년 동안 화석연료의 가격상승과 사용으로 인한 온실효과(greenhouse effect)는 대체에너지의 개발과 관련된 연구의 수행을 촉진하여 오고있다. 그러나 보다 중요한 것은 에너지를 효율적으로 사용함으로써 사용하여야 할 에너지의 절감이라 할 수 있다. 이와 관련하여 열에너지의 회수는 에너지절약과 에너지의 효율적인 이용에 중요한 역할을 하게되며 이를 위해 여러가지 열교환장치들이 실제 적용되고 있다. 열사이폰(thermosyphon)이나 히트파이프(heat pipe)의 기

술은 열에너지회수용 열교환기의 광범위한 세계 시장형성과 열회수 기술영역을 확장시켜 이미 성공적으로 선진국의 산업체에 적용되어 오고 있다. 그러나 간단한 설계도구나 설계기술자료 및 경제성 평가의 미비등으로 국내에서는 아직 특수한 산업영역에서 부분적으로 채택되고 있는 실정에 있다고 볼수 있다.

일반적으로 히트파이프의 설계에 있어 히트파이프에 부과되는 열부하가 클 때에는 증발부에서 단위시간당 액체증발량이 많아지므로 지속적인 열전달을 보장하기 위해서는 응축부에서 증발부로 액체의 빠른 재순환을 보장해 주어야 한다. 즉, 히트파이프의 열전달성능은 열전도성능에 의해서가 아니라 내부에 있는 작동유체의 상변화와 유동에 의해 좌우된다는 것을 고려하여야 한다. 내부액체의 순환은 모세관현상에 의한 압력차

\* 정희원, 경원대학교

\*\* 정희원, 항공대학교

에 의해 이루어지므로, 구조적으로 유발되는 모세관압력이 액체유로 및 증기유로에서의 압력손실 그리고 액체-증기 계면에서의 손실 등을 보상하고도 충분할 정도로 커야한다. 한편, 중력장 내에서는 증발부와 응축부의 상대적 높이차에 의해서도 액체의 압력구배가 영향을 받는다. 가능한 큰 모세관압력을 유도하기 위해서는 워 세공의 크기(pore size)가 작을수록, 혹은 그루브(groove)의 폭이 작을수록 유리하나, 이때에는 액체유동에 대한 저항의 증가로 인해 액체유로내의 압력손실이 커지므로 적절한 설계가 필요하다. (1-3)

본 연구에서는 열회수용 열교환기에 적용하기 위해 구리에 비해 값싸고 가벼운 알루미늄합금(AL10계열)을 사용하여 특별한 형태의 그루브를 갖는 히트파이프를 설계, 제작하였다. 히트파이프 내부에서 액체유동에 대한 저항을 감소시켜 작동유체의 귀환을 원활히 함과 동시에 가능한 큰 모세관압력을 갖도록 하기 위해 유동단면적이 큰 축방향 그루브와 스크린메쉬(screen mesh)를 동시에 사용하는 조합형 워(combined wick)를 사용하였다. 작동유체로는 R22를 사용하여 진공도  $5 \times 10^6 \sim 8 \times 10^6$  torr에서 충전한 히트파이프를 제작하였으며 제작된 히트파이프의 작동한계를 측정할 실험장치를 구성하고 저온용 히트파이프에서 작동한계인 모세관한계와 히트파이프의 총괄열전달계수를 실험적으로 측정함으로써 열회수장치에 응용할 저온용 히트파이프의 개발에 필요한 설계자료를 얻고자 하였다.

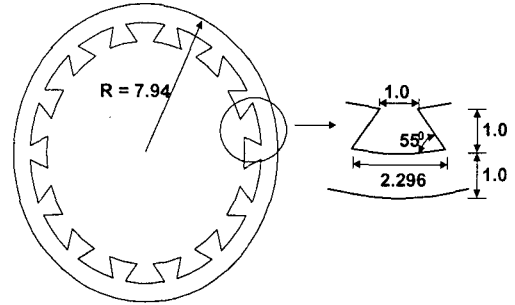


Fig. 1 Cross-section of a heat pipe fabricated by drawing (material: AL1050, 단위: mm).

Table 1 Typical specifications of the heat pipes manufactured in this study

CASE	Tube length (cm)	Wick type	Degree of vacuum ( $10^{-6}$ torr)	Charging quantity (g)
(A)	96	Inner groove (14 trapezoidal fins)	5.3	31.5
(B)	96	CASE (A)+ 2 layers screen mesh (#350)	5.9	35.7

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 히트파이프의 제작

히트파이프내 액체유로에서의 압력손실을 감소시키기 위해 알루미늄 합금 AL1050으로 특별한 형태의 그루브를 갖는 히트파이프를 고안 제작하였으며, 14개의 역사다리형의 워(trapezoidal fins)를 갖도록 가공된 그루브의 단면을 Fig.1에 나타내었다. Table 1에 본 연구에서 제작하여 성능실험을 수행한 히트파이프의 제원을 나타내었다. 히트파이프의 제작은 CASE (A)의 경우 Invert Pulse식 TIG 용접기를 사용하여 엔드캡(end cap)을 관의 한쪽에 우선 용

접하였고 관의 한쪽에 우선 용접하였고 관의 다른쪽 엔드캡에 부착된 냉매충전튜브(filling tube)는 엔드캡과 일체형으로 용접하여 연결하였다. 냉매충전용 튜브 끝부분의 연결은 튜브 말단부에는 삼방밸브(3-way valve)를 연결하여 한쪽에는 냉매충전시스템에 연결되도록 하였고, 다른 한쪽에는 압력계를 설치하여 히트파이프내의 압력변화를 관찰 할 수 있도록 하였다. 냉매의 충전량은 그루브를 채우는 액체량을 계산하고 그 외의 공간에 대한 증기량을 합산하여 그에 상당하는 양의 작동유체를 주입하였다.<sup>(4)</sup>

CASE (B)의 경우는 관 내벽에 모세관한계를 높이기 위해 SUS316 재질의 350메쉬 와이어스크린(wire screen, 와이어 직경

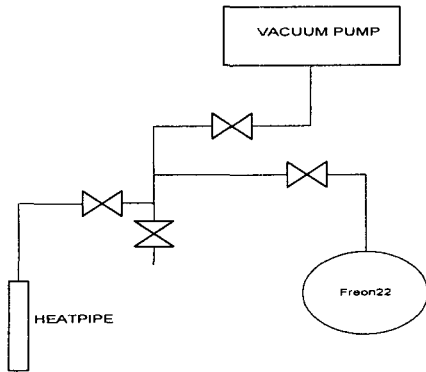


Fig. 2 Charging system of the working fluid (Refrigerant-22).

0.04 mm, 스크린 한점의 두께 0.08 mm)를 CASE (A)의 그루브위에 추가하여 설치한 경우이다. 이때 와이어 스크린이 파이프 내벽에 밀착 고정되도록 하기 위해서 0.5 mm 강성스테인레스 스틸 와이어를 용수철 형태로 말아 스크린 위 설치 후 삽입하였다. 엔드캡 연결과 충전튜브에 대한 연결은 앞의 경우와 동일하며, 냉매충전량은 CASE(A)의 그루브를 채우는 량에 스크린 위를 적시는 액체량을 추가하고 그에 대신하는 기체량을 제외하여 충전할 냉매량을 산정하고 그에 상당하는 양을 최종 주입하였다.<sup>(4)</sup> Fig. 2는 히트파이프에 작동유체를 충전하는 충전시스템의 개략도이다.

2.2 실험장치의 구성 및 실험방법

증발부에 열을 공급하기 위해서는 니켈 재질로 된 직경 0.5 mm, 저항치 5.6 Ω/m의 열선에 전기절연을 위해 내경 0.5 mm인 테프론 재질의 피복을 입혀 사용하였고, 일정한 열량을 조절하기 위해 교류 전압조절기를 이용하였다. 응축부에서의 냉각을 위해서는 별도로 냉각재킷(jacket)을 제작하여 벽의 외부에 부착하였다. 응축부와 냉각재킷의 접촉면에는 실리콘 방열 컴파운드를 칠해 접촉 열저항이 감소되도록 하였다. 응축부의 냉각에 사용되는 냉각수로는 에틸렌글리콜과 물의 혼합물을 사용하였으며 항온조를 이용하여 냉각재킷 입구의 냉각수나 온도가 가능한 일정하게 유지되도록 하였다. Fig. 3은 제작된 히트파이프

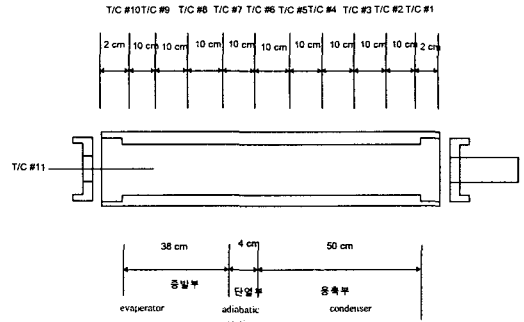


Fig. 3 Schematic of the heat pipe in this study.

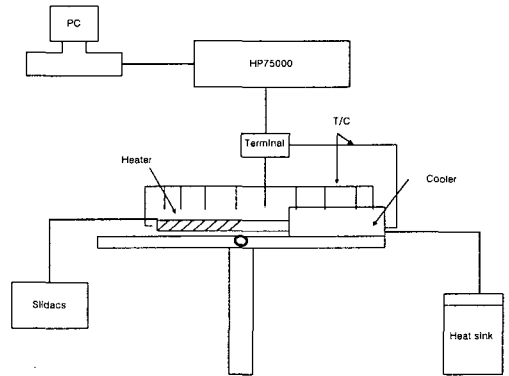


Fig. 4 Experimental setup for the performance test.

를 나타낸 것이고 온도측정을 위해 사용한 열전대는 T-type으로, 아르곤가스를 사용하는 아크식 열전대 용접기를 이용하여 제작한 후 0℃와 10 0℃ 사이에서 보정하였다. 열전대를 히트파이프 외벽에 고정하기 위해서 외벽 표면에 열전대 접점이 들어갈 수 있는 만큼의 홈을 낸 후 열전대의 접점이 외벽에 밀착되도록 한 후 고열전도도 접착제를 사용하여 고정하였다. Table 1에서 CASE (A)와 (B)의 히트파이프 모두 온도를 측정하기 위한 열전대의 위치는 Fig. 3에서와 같이 총 10개의 열전대를 10 cm 간격으로 증발부에 4 개(T/C #7~T/C #10) , 단열부에 1개(T/C #6)그리고 응축부에 5개(T/C #1 ~T/C #5)를 각각

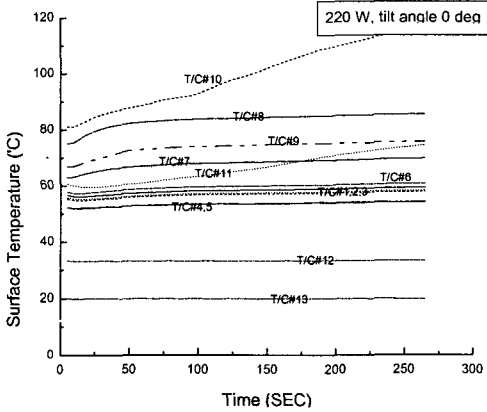


Fig. 5 Performance characteristics of a groove wick heat pipe at the horizontal position.

히트파이프 외벽에 부착하였다. 열전대 11번(T/C #11)은 프로브(probe)형으로 제작된 열전대로서 엔드캡을 통해 부착하여 내부의 증기온도를 측정하도록 하였다. Fig. 4는 성능실험을 수행하기 위해 구성된 실험장치의 개략도이다. 이 실험장치를 사용하여 히트파이프의 기울기를 변화시키면서 응축부의 조건변화와 증발부의 열부하의 변화에 따른 히트파이프의 작동한계 및 성능특성을 파악하기 위한 실험을 수행하였다. 실험자료는 컴퓨터에 연결된 자동자료 획득장치를 사용하고, 소프트웨어(LabTech Notebook)를 이용하여 모니터로 관측하면서 작동시간의 경과에 따른 실험자료를 파일로 받아 저장하고 이를 분석하였다.

### 3. 성능실험 결과 및 고찰

히트파이프의 기울기(축이 수평면과 이루는 각도), 응축부 입구 냉각수의 온도 및 유량, 그리고 증발부 발열량 등의 작동조건을 변화시켰을 때 히트파이프의 과도 동작특성과 모세관관계로 인해 드라이아웃(dryout)이 발생하는 성능특성을 파악하기 위한 실험을 수행하였다. Fig. 5는 Table 1에서 설명한

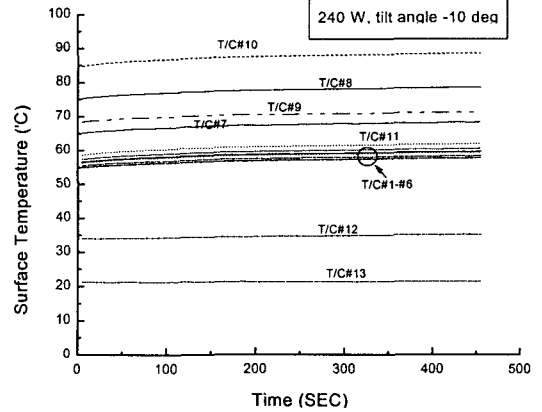


Fig. 6 Performance characteristics of a groove wick heat pipe at -10 degree tilt angle.

CASE(A)의 AL1050관을 사용한 경우 히트파이프를 수평으로 하고 냉각수의 온도를 20°C, 유량 5.25 cc/sec일 때 각부의 작동특성을 보여주고 있다. 그림에서 열부하를 220 W로 한 경우 시간이 100초 경과 후 증기온도(열전대 11)와 증발부 끝단 온도(열전대 10)가 급상승하고 있음을 볼 수 있는데, 이는 작동액체의 귀환량이 불충분하여 증발부 끝 쪽에서부터 드라이아웃이 시작되고 있음을 나타내는 것이다. 여기서 열전대 12(T/C#12)는 냉각수 출구온도이며 열전대 13(T/C#13)은 냉각수 입구온도를 나타낸다.

Fig. 6은 Fig. 5에서와 동일한 히트파이프를 증발부가 응축부보다 아래쪽에 위치하도록 10° 기울인 경우(본 논문에서는 이를 -10° 경사각이라 함)에 대한 작동특성을 보여주고 있다. 이 때는 중력보조 모드(gravity-assisted mode)로 작동되며, 중력에 의해 증발부 쪽으로의 액체귀환이 더 활발해지므로 열부하를 240 W로 할 경우에도 히트파이프의 작동이 정상적이며 드라이아웃이 일어나지 않음을 알 수 있다. Fig. 7은 Table 1에서 설명한 CASE(B)의 경우로 그루브를 갖는 AL1050관 내부에 350 메쉬의 와이어 스크린을 두겹 삽입한 경우 히트파이프를 수평으로 하고 냉각수의 온도를 20°C, 유량 5.25 cc/sec, 증발부

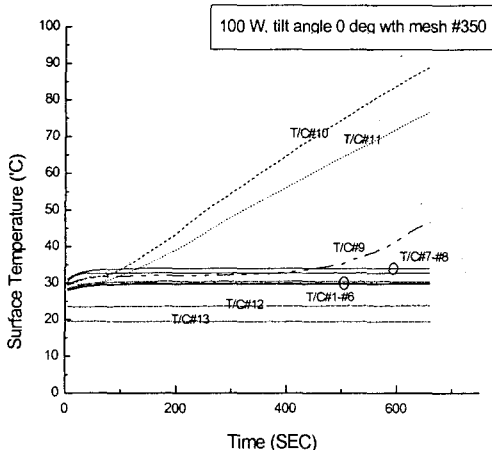


Fig. 7 Performance characteristics of a combined wick heat pipe at horizontal position.

열부하를 100 W로 했을 때의 동작특성을 보여주고 있다. 시간이 100초 정도 경과되면 증기온도(열전대 11)와 증발부 끝단 온도(열전대 10)가 상승하고 있는데, 이는 냉매귀환의 불충분으로 인한 드라이아웃의 시작이라고 할 수 있다. Fig. 8은 Fig. 7의 경우와 동일한 히트파이프를 증발부가 아래로 되도록 히트파이프 축의 각도를 경사각  $-10^\circ$  기울인 경우의 동작특성을 보여주고 있는데, 증발부의 열부하가 320 W 에서도 히트파이프가 정상적으로 작동되고 있다. 즉 단순 그루브식의 경우보다 작동한계가 연장되었음을 알 수 있다. Fig.9는 여러가지 조건에서 경사각의 영향을 알아보기 위해서 조합형 워를 사용하여 제작한 히트파이프의 실험결과로서 증발부의 열부하를 240 W로 설정하고 응축부 냉각수의 유량을 5.25 ~ 15.75 cc/sec로 변화시키고, 냉각수의 온도를 5 ~ 20°C로 한 경우 경사각에 따른 최대벽면온도의 변화를 나타내었다. 예상한 바와같이 수평상태에서 경사각이  $-5^\circ$ 인 경우 즉 증발부가 아래로 가도록  $5^\circ$  기울인 경우 냉매의 귀환이 원활하여 최대벽면온도는 약 15°C 정도 급격히 감소되어 히트파이프가 안정적으로 작동할 수 있음을 보여주고 있다. 그러나 그이상의

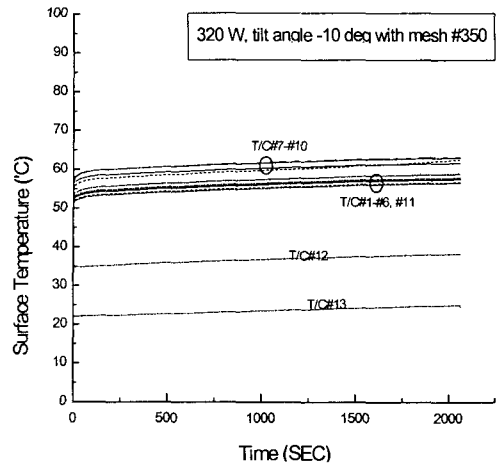


Fig. 8 Performance characteristics of a combined wick heat pipe at  $-10^\circ$  tilt angle.

경사도에서는 효과가 크지 않음을 보여주고 있다. Fig.10은 Table 1에서 CASE (A) 히트파이프의 경우 경사각, 응축부 입구 냉각수온도 및 유량, 그리고 증발부에서의 발열량 등의 작동조건을 변화시켰을 때 과도동작 특성을 보여주고 있다. 이 결과로부터 드라이아웃이 발생하는 순간의 히트파이프 외벽 최대온도

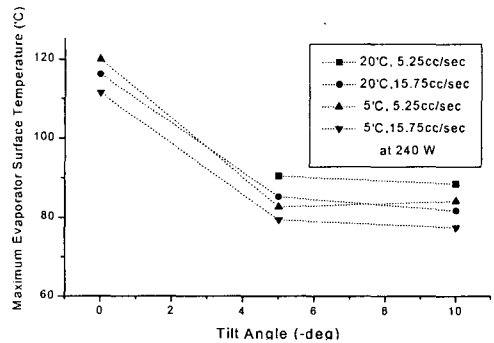


Fig. 9 Maximum evaporator surface temperature with respect to tilt angle when dryout occurs ( 240W ).

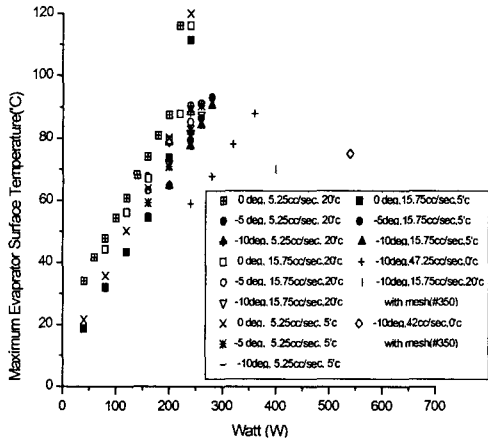


Fig. 10 Maximum surface temperature and maximum heat load of a groove heat pipe when dryout occurs.

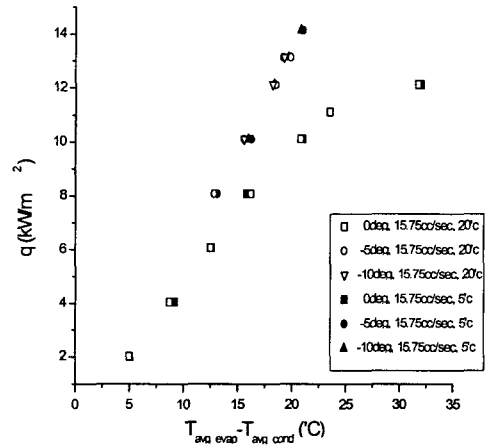


Fig. 11 Thermal performance with respect to surface temperature difference (Between evaporator and condenser).

와 증발부 열부하의 최대치를 나타낸 것으로 성능한계는 400 W 부근임을 알 수 있다. 실제로 350메쉬나400메쉬 스크린을 추가로 삽입하면 성능한계는 그루브 워만을 사용하는 경우에 비해 최소 10%에서 25%정도 증가하는 결과를 얻을 수 있었다.

Fig.11은 CASE (A) 히트파이프의 경우 경사각, 응축부 입구 냉각수온도 및 유량변화에 따라 증발부와 응축부의 평균온도차에 대한 히트파이프 단면적을 기준으로 산정한 열유속(heat flux)을<sup>(4)</sup> 보여주고 있는데 온도차가 증가할수록 경사각이 0° (그림에서 □, ■)인 경우에 열수송율은 완만히 증가하는 특성을 보이거나 경사각이 -5~-10° 인 경우 열수송율은 직선적으로 증가하는 특성을 보여주고 있어 본 실험에서 제작한 히트파이프의 경우도 열수송율에 미치는 중력의 영향이 상당함을 알 수 있다. 그러나 경사각이 -5°이나 -10°경우의 열수송율의 차이는 거의 없음을 알 수 있다.

Fig.12는 Table 1에서 CASE (A)의 경우와 스크린 메쉬를 조합한 CASE (B)의 경우 경사각, 응축부 입구 냉각수온도 및 유량변화에 따라

증발부와 응축부의 평균온도차에 대해서 히트파이프 단면적을 기준으로 산정한 총괄열전달계수<sup>(4)</sup>를 나타낸 것이다. 내면에 36개의 사다리꼴 그루브가 있는 외경(OD15.88 mm)

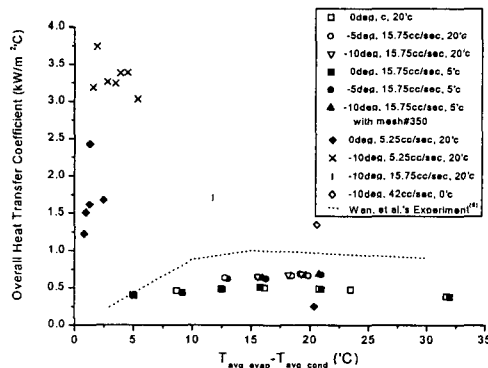


Fig. 12 Overall heat transfer coefficient with respect to surface temperature difference (Between evaporator and condenser)

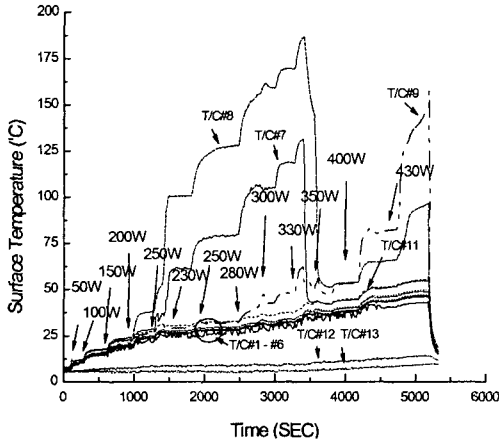


Fig. 13 Transient characteristics of combined wick heat pipe at  $-10$  degree tilt angle.

의 관에 R-22를 41g 정도 충전한 Wan et al.의 실험결과<sup>(5)</sup>와 비교해 볼 때 14개의 역사다리꼴의 그루브를 갖는 CASE (A)의 경우가 총괄열전달계수가 30~40% 정도 작은 값을 보이며 그 경향은 서로 잘 일치하고 있음을 보여 주고 있다. 그러나 14개의 역사다리꼴의 그루브가 있는 내벽에 스크린 메쉬를 조합사용한 CASE (B)의 경우 총괄열전달계수(◆, X, ◇, |)는 상당히 증가하며 응축부와 증발부의 온도차도 감소함을 알 수 있다. 이같은 결과로 볼 때 조합형 워를 사용할 경우 히트파이프의 열회수 성능이 증가되며, 벽면온도의 균일로 히트파이프의 작동이 안정적으로 이루어 질 것으로 예상할 수 있다. Fig. 13은 Table 1에서 설명한 CASE (B)의 히트파이프를 증발부가 아래에 위치하도록 경사각이  $-5^\circ$  인 경우, 냉각수의 온도를  $5^\circ\text{C}$ , 유량  $42\text{ cc/sec}$ 로 한 경우 증발부에 열부하를  $50\text{ W}$ 에서  $430\text{ W}$ 로 변화시킬 때의 작동특성을 보여주고 있다. 증기온도(열전대 11번)는  $400\text{ W}$ 까지 정상 작동의 특성을 보이며 드라이아웃은 발생되지 않았음을 알 수 있다. 그러나 특이하게 증발부에서 끝쪽의 온도보다 안쪽의 온도(열전대 7번 및 8번)가 상승되고 있는데, 그 이유는 이들 위치에

서 히트파이프내부의 스크린 워이 내벽면(그루브의 산)에 잘 부착되지 않아 국부적으로 과열된 결과로 판단된다. 이러한 결과로 미루어 볼 때 조합형 워를 사용한 히트파이프 제작시에는 그 성능보장을 위해서는 워이 히트파이프 내벽에 균일하게 잘 부착되도록 하는 것이 대단히 중요하다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

이상에서와 같이 특별한 형상의 그루브를 갖도록 가공된 알루미늄관(AL1050)에 스크린 메쉬를 삽입한 형태의 조합형 워를 사용한 저온용 히트파이프에 대한 성능실험을 수행한 결과 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 본 연구에서 고안한 특별한 형태의 내벽 그루브를 갖는 관(AL1050)을 히트파이프로 제작한 경우와 그루브 관 내부에 스크린 메쉬를 삽입한 경우 모두 히트파이프를 경사각을  $-5 \sim -10^\circ$  정도 기울이는 것이 수평인 경우에 비해 그 성능이 증가하고 있어 히트파이프 내부의 작동유체의 귀환에 미치는 중력의 효과가 상당함을 확인할 수 있다. 그러나 경사각이  $-5^\circ$  이상 더 증가시켜도 성능향상에 미치는 효과는 아주 미미함을 알 수 있다.

(2) 내벽 그루브워에 스크린 메쉬를 삽입한 조합형 워를 사용한 히트파이프의 경우 스크린 메쉬의 종류(350~400 메쉬)에 따라 다소 차이가 있으나 최대 성능한계가  $400\text{ W}\cdot\text{m}$  이상이 됨을 알 수 있다. 또한 그루브에 스크린 메쉬를 조합한 조합형 워를 사용하는 경우 히트파이프의 총괄열전달계수는 상당히 증가하며 히트파이프의 증발부와 응축부의 온도차가 감소되어 히트파이프 외벽면의 온도균일과 히트파이프의 정상적인 작동에 도움이 될 수 있다고 판단된다.

(3) 히트파이프 내부에 스크린 워를 삽입하는 경우 내벽면에 빈 공간 없이 잘 부착되도록 하는 것이 히트파이프의 성능보장을 위하여 대단히 중요하다는 것을 실험결과로 알 수 있었으며, 제작시 스크린 워를 삽입하고 부착하는 특별한 기술이 성능보장을 위해 필요함을 부차적으로 확인할

수 있었다.

### 후 기

본 연구는 산학연 기술개발과제의 일환으로 수행되었던 KYERS Heat Pipe(Kyungwon-Yupoong Energy Recovery System)개발과 관련된 연구결과 중 일부를 소개하였으며 본 연구가 이루어지기까지 지원해준 중기청, 경기도, (주)유평의 관계자에게 감사를 드립니다.

### 참 고 문 헌

1. Silverstein, C. C., 1992, Design and Technology of Heat Pipes for Cooling and Heat Exchange, Hemisphere Publishing Corporation, pp. 185-280.
2. Peterson, G. P., 1994, An Introduction to Heat Pipes Modeling, Testing and Applications, John Wiley, pp. 230-284.
3. Dunn, P. D. and Reay, D. A., 1982, Heat Pipes, 3rd ed., Pergamon Press, Oxford, UK, pp. 107-168.
4. Chi, S. W., 1976, Heat Pipe Theory and Practice, Hemisphere Publishing Corp., Washington, pp. 157-210.
5. Wan, X.Y., Jonhson, P. and Akabarzadeh, A., 1992, Experimental Investigation of Heat Pipes with Various Refrigerants, 8th, IHPC, Baijing, China.

1. Silverstein, C. C., 1992, Design and Technology of Heat Pipes for Cooling and Heat