

경사각에 따른 자러 진동 히트파이프의 열전달특성에 관한 연구

최재혁¹⁾ · 윤두호²⁾ · 윤석훈³⁾

A Study on the Heat Transfer Characteristics of Self-Oscillating Heat Pipe with Inclination angle

Jae-hyuk Choi¹⁾ · Dooh-ho Yoon²⁾ · Seok-hun Yoon³⁾

ABSTRACT

In this paper, heat transfer characteristics of a self-oscillating heat pipe were experimentally investigated for the effect of inclination angle and heat loads. This type of heat pipe consists of a heating section, a cooling section and an adiabatic section. The heat pipe used has a 0.002m internal diameter, a 0.34m length in one turn and consists of 19 turns. Each of the heating and cooling sections has a length of 70mm. Experiments were performed to measure the temperature distributions and the pressure variation of the heat pipe according to inclination angle. Based on the experimental results, the heat transfer ability of the self-oscillating heat pipe seems to improved with the increase of the inclination angle.

I. 서 론

현대의 전자·음향·전기 기기는 시대의 요청에 따라서 점점 소형·고출력화하고 있으며 이러한 기기의 소자로부터 발생하는 발열량은 계속적으로 증가하고 있는 실정이다.[1]~[2] 그러나 이러한 기기의 소형화 경향 때문에 해당 기기에서 발생하는 열량을 신속히 처리하기 위한 냉각장치를 기기의 발열소자 부근에 적절히 배치하는 것은 매우 어려우므로 발열소자로부터 적당한 거리에 설치된 방열부까지 이러한 열을 효과적으로 이송하는 것이 매우 중요한 문제이다. 특히 지구관측과 위성방송 및 통신망 등에 널리 사용되고 있는 인공위성에 탑재되는 전자기기의 효과적인 냉각, 점차 초소형·고속화 및 고성능화되고 있는 PC의 각 부품에서 발생하는 열량의 신속한 처리 등은 최근 매우 중대한 문제로 대두되고 있다. 또한 극한환경에서 작동하는 로봇과 여러 가지 전자·전기부품들의 방열문제 등을 효과적으로 해결하기 위해서는 기존의 히트파이프와 달리 보다 구조가 간단하고 신뢰성이 우수한 획기적인 고성능 열 이송장치가 필요하다. 지금까지 많이 사용되고 있는 열 이송장치로는 위크(wick)라고 부르는 다공성 물질을 내장한 용기에 작동유체를 충전하고, 이 위크의 모세관현상에 의하여 용축액을 환류시키는 히트파이프[3]~[5]가 있으며, 이러한 히트파이프는 짧은 역사에도 불구하고 다양한 용도로 널리 사용되고 있다. 그러나 이러한 히트파이프는 용축액의 환류를 위하여 복잡한 형상의 위크가 필요할 뿐만 아니라 불용축가스의 혼입에 의하여 성능이 크게 저하될 수 있을 뿐만 아니라 관의 직경이 매우 작은 초소형 히트파이프의 제작이 매우 곤란하며, 모세관 한계, 비산 한계 등의 각종 한계, 위크의 막힘 등으로 인한 성능 저하 등 여러 가지 단점을 지니고 있다. 따라서 이러한 히트파이프의 결점을 극복할 수 있는 새로운 열이송 장치로서 내부의 압력진동과 액체유동에 의해 열을 수송하는 본 연구의 대상인 자러진동 히트파이프가 서서히 관심의 대상이 되고 있다. 그러나 아직까지 본 히트파이프에 대한 연구는 다음과 같은 일부 연구자들에 의하여 기초연구가 진행되고 있을 뿐 아직까지 이에 관한 체계적인 연구자료가 매우 부족한 실정이다.

前澤^{[6]~[8]}은 루프형 세관 히트파이프의 온도 변화에 대한 해석을 행하여 히트파이프의 관 내부는 아주 불규칙하고 복잡한 카오스적 역학계에 의해 지배되고 있음을 밝혔다.

- 1) 한국해양대학교 대학원
- 2) 거창기능대학
- 3) 한국해양대학교 기관시스템공학부

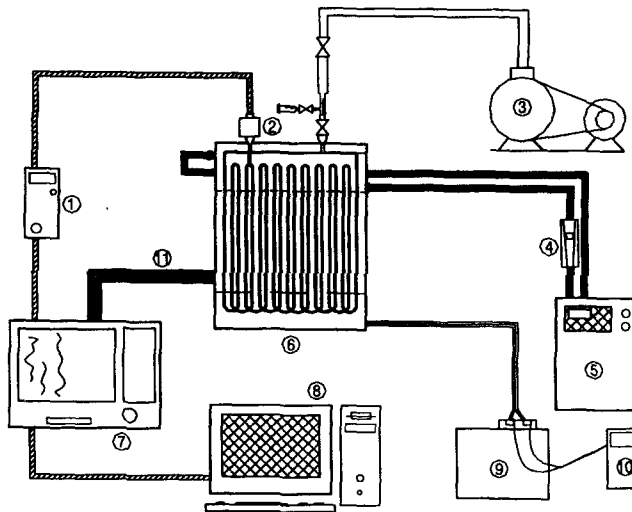
또한 宮崎 등^[9]은 R134a와 R142b를 이용하여 내경 2.0mm 동파이프 내부 압력파의 파동에 관한 연구를 수행하였으며, 鈴木^[10]는 비루프형 세관 히트파이프의 열수송 특성에 관한 연구를 수행하여 히트파이프 내부의 온도분포를 규명함과 동시에 관 내부의 온도변동의 주기성 등을 조사하였다. 그리고 細田^[11] 등은 관 내부의 가시화 실험을 통하여 기포의 생성과 소멸 등에 관한 현상을 구명하였다. 이와 같은 기초연구를 통하여 본 히트파이프의 열전달 성능의 우수성은 어느 정도 확인되고 있으나 거의 모든 연구가 하부가열방식의 수직형 히트파이프를 대상으로 하고 있다. 그러나 히트파이프는 사용목적이나 기기의 특성에 따라서 자유롭게 경사시킬 수 있는 구조이어야 하므로 히트파이프의 경사각에 따른 열전달특성이 매우 중요하다고 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 연구자료가 거의 전무한 실정인 자력전동 히트파이프의 경사각에 따른 열전달특성을 규명하기 위한 기초자료를 확보하고자 한다.

II. 실험장치 및 방법

1. 실험장치

Fig. 1은 본 실험장치의 개략도이다. 본 그림에서, ⑥은 실험장치의 본체(self-oscillating heat pipe, SOHP)이며, 경사각 조절장치에 의하여 90°, 60°, 30°, 0° 로 히트파이프의 경사각을 조절할 수 있도록 제작하였다. ⑧은 소선의 직경이 각각 50 μ m인 C-A 열전대(C-A thermocouple) ⑪과 SOHP의 내압을 측정하기 위한 압력변환기 ②로 측정된 데이터를 처리하기 위한 개인용 컴퓨터이다. 또한 ⑨는 히트파이프의 가열부에 공급되는 가열량을 조절하기 위한 전압조정기이며, ⑩은 가열량을 계산하기 위한 멀티미터이다. ⑤는 히트파이프의 냉각부에 공급되는 냉각수의 온도를 일정하게 유지시키기 위한 정밀 항온조이고, ④는 공급되는 냉각수의 유량을 측정하기 위한 유량계이며, ③은 히트파이프 내부의 불응축 가스, 즉 공기를 제거하여 고진공을 유지시키기 위한 진공펌프이다.

Fig. 2는 본 실험장치의 본체에 해당되는 SOHP의 상세도이며, 히트파이프의 작동액으로는 증류수를 사용하였다. 히트파이프는 외경 0.0032m, 내경 0.002m의 동파이프를 이용하여 제작하였으며, 가열부 10턴(10 turns)과 냉각부 9턴 등 총 19턴이 되도록 구성하였다. 본 그림의 ①은 가열부, ②는 단열부, ③은 냉각부이며, ④는 작동액 주입용 주입구, ⑤는 히트파이프 내부압력 측정을 위한 압력변환기이다.



- | | |
|----------------------|-----------------------|
| ① Signal conditioner | ② Pressure transducer |
| ③ Vacuum pump | ④ Flow meter |
| ⑤ Water bath | ⑥ Heat pipe body |
| ⑦ Pen recorder | ⑧ Personal computer |
| ⑨ Voltage regulator | ⑩ Multimeter |
| ⑪ C-A thermocouple | |

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

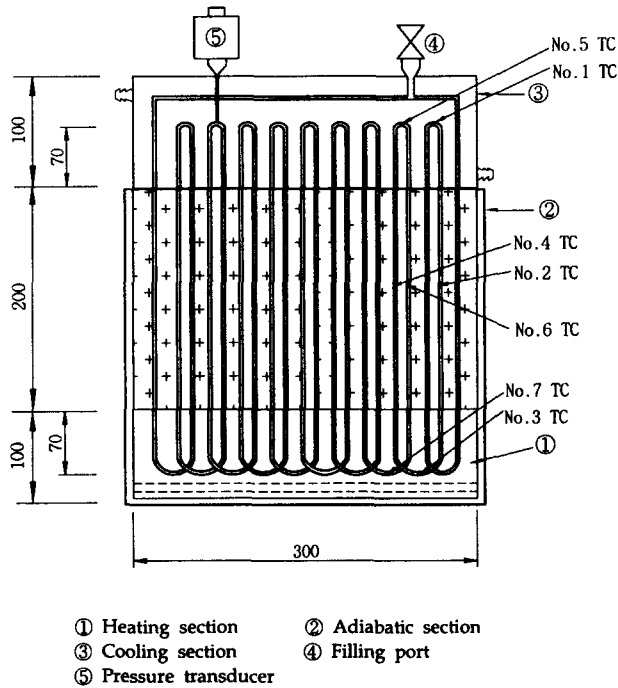


Fig. 2 A drawing of self oscillating heat pipe

본 히트파이프의 가열부는 동 블럭(copper block) 내부에 내장된 전기히터에 의하여 가열되도록 하였으며, 전압조정기에 의하여 가열량을 조절하였다. 또한 단열부는 히트파이프 내부에서의 열 이송 중에 열이 외부로 손실되는 것을 방지하기 위하여 성능이 우수한 단열재로 충분히 단열하였다. 또한 냉각부는 아크릴 판으로 제작하였으며, 정밀 항온조에서 일정온도로 조절된 냉각수에 의하여 냉각되도록 되어 있다.

본 히트 파이프 상부에는 불응축가스를 제거하고 작동액을 효과적으로 충전하기 위한 작동액 주입 장치와 히트파이프 내부의 압력을 측정하기 위한 압력변환기를 설치하기 위하여 각각의 연결부를 가공하였다. 또한 가열부 0.07m, 단열부 0.2m, 냉각부 0.07m로써, 본 히트 파이프의 총 높이는 0.34m이며, 이러한 히트 파이프를 제작하기 위하여 소요된 동파이프의 총 길이는 7.11m이다.

2. 실험방법

본 실험에서는 히트파이프 내부의 전 체적을 기준으로 하는 작동액의 충전율을 30%로 고정하였으며, 히트파이프 본체의 경사각을 수평을 기준으로 하여 90°, 60°, 30°, 0° 로 변경하며 실험을 수행하였다. 또한 가열부의 가열량은 $Q=100\sim 500W$ 까지 100W 씩 증가시켰으며, 실험 중 히트파이프의 각부 온도를 측정하기 위하여 Fig. 2와 같이 가열부에 2개, 단열부에 3개, 냉각부에 2개의 C-A 열전대를 설치하였다. 냉각수 입구온도는 정밀 항온조에서 30℃로 조절하여 4L/min.의 유량으로 히트파이프의 냉각부에 공급하였으며, 실험 중 냉각수 입·출구 온도차는 최대 2℃ 정도였다.

작동액의 원활한 주입을 위하여 작동액 충전장치를 별도로 제작하여 사용하였으며, 진공펌프에 의하여 0.5Torr의 진공을 유지한 상태에서 소형 주사기에 의하여 제량된 작동액을 이 충전장치에 의하여 히트파이프 내부로 주입하였다. 7개의 열전대와 압력변환기에 의하여 측정된 온도와 압력은 3, 9, 135Hz의 샘플링속도로 각각 1000, 4000, 8000개의 데이터를 취하여 컴퓨터에 저장되도록 하였으며, 본 연구의 모든 계산에서는 이렇게 측정된 데이터의 평균값을 이용하였다. 또한 실험의 신뢰성을 향상시키기 위하여 동일한 조건하에서 수 회의 실험을 수행하여 실험결과와의 일관성을 비교·검토하였다. 실험 데이터는 히트파이프를 작동시켜 정상상태가 이루어진 후 측정하였다.

불응축가스인 공기가 히트파이프의 내부에 존재하면 열전달특성에 큰 영향을 미치므로 작동액 충전 전에 공기의 완전 배제를 위하여 세심한 주의를 기울였으며, 작동액의 충전율에 해당하는 정확한 량의 물이 충전될 수 있도록 여러 번의 사전 실험을 반복하여 실험의 신뢰성이 확보될 수 있도록 최선을 다하였다.

III. 실험결과 및 고찰

1. 열저항

Fig. 3은 식 (1)을 이용하여 구한 열저항 R을 나타낸 그림이다.

$$R = \frac{T_H - T_C}{Q} \quad (1)$$

상기 식에서, R은 열저항이고, T_H 와 T_C 는 각각 가열부와 냉각부의 평균온도이며, Q는 가열량이다. 본 그림에 나타난 바와 같이 작동이 거의 불가능한 상태인 수평일 경우($\theta=0^\circ$)를 제외하고, Q가 증가할수록 열저항이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 특히 경사각 $\theta=90^\circ$ 인 경우 가장 낮은 열저항 값을 나타내며, 경사각이 작아짐에 따라 그 값은 증가하고 있으나 전체적으로 0.04~0.2K/W의 아주 낮은 값을 나타내고 있다.

Q=100W에서 다소 높은 열저항 값을 갖는 것은, 낮은 열부하에서는 관내 기포의 발생과 성장이 충분하지 못함으로 인하여 작동액과 기포의 유동이 활발하지 못하여 열이송이 제대로 이루어지지 못하기 때문이다. 특히 경사각이 0° 인 수평일 경우는 정상상태가 이루어지는데 상당한 시간이 소요되었으며, 히트파이프의 작동이 원활하게 이루어지지 못함으로 인하여 가열부 온도가 비정상적으로 높은 값을 갖는 등 정상적인 실험이 거의 불가능하였다.

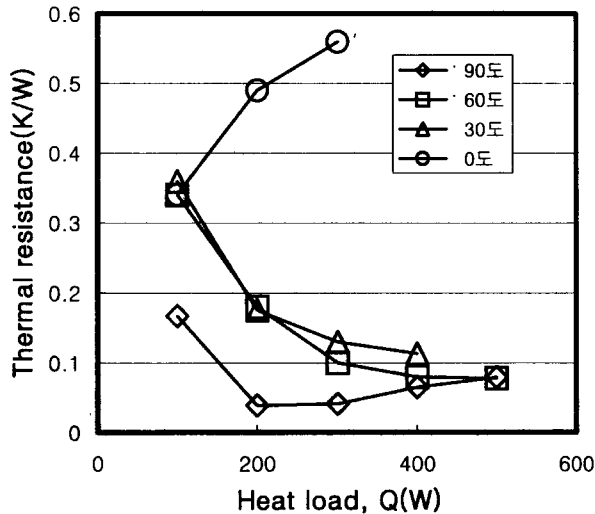


Fig. 3 Thermal resistance on heat loads

2. 경사각과 가열량에 따른 각 부 온도 분포

Fig. 4는 가열량 Q=300W인 경우 각 경사각에 따른 가열부의 실제온도변화를 나타낸 그림이다. 본 그림에서 알 수 있는 바와 같이 본 SOHP는 매우 불규칙한 파형으로 빠른온도 변화가 이루어지고 있다. 그리고 경사각이 90° , 60° 인 경우에는 다소 낮은 진폭의 일정한 흐름 형태를 하고 있는 반면, 30° 일 때는 높은 온도의 큰 진폭의 온도 변화를 나타내고 있다. 이것은 경사각 30° 인 경우, 가열부로의 작동액 유입이 순간적으로 늦어짐으로 인하여 가열부가 일시적으로 드라이 아웃 상태가 되어 일어나는 온도 상승에 의한 것이라 생각된다.

Fig. 5는 충전율 30%, 경사각 $\theta=90^\circ$ 일 때, 각 가열량에 대한 압력 변화를 나타낸 그림이다. 본 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 가열량이 증가할수록 관 내부 압력도 그에 비례하여 전반적으로 증가하고 있다. Q=100W일 경우에는 전체적인 압력이 매우 낮은 상태에서 그 변화 폭이 크고 매우 불규칙한데, 이러한 현상은 히트파이프의 용량에 비하여 가열량이 너무 적은 경우에는 기포의 발생과 성장이 충분하지 못하여 작동액과 기포의 유속이 느려져서 활발한 순환이 이루어지지 않기 때문이다. 일반적으로 SOHP는 압력의 진폭이 작을수록 열전달 성능이 우수한다^[12], 본 그림에서는 Q=200, 300W일 때 주기성 있는 정현파의 형태는 아니지만 진폭이 매우 작으며 빠른 변화를 보이고 있다.

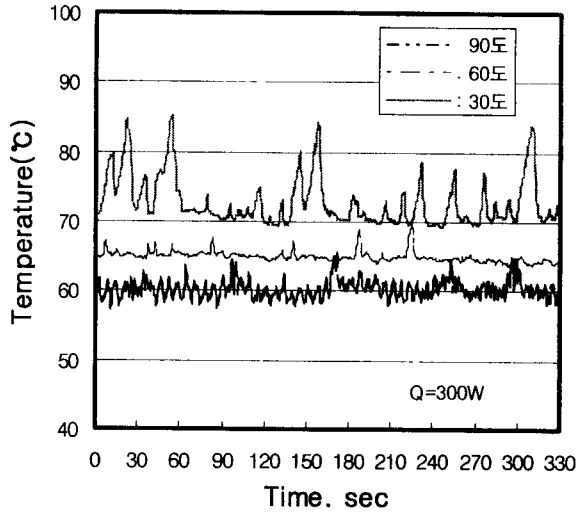


Fig. 4 A variation of temperatures

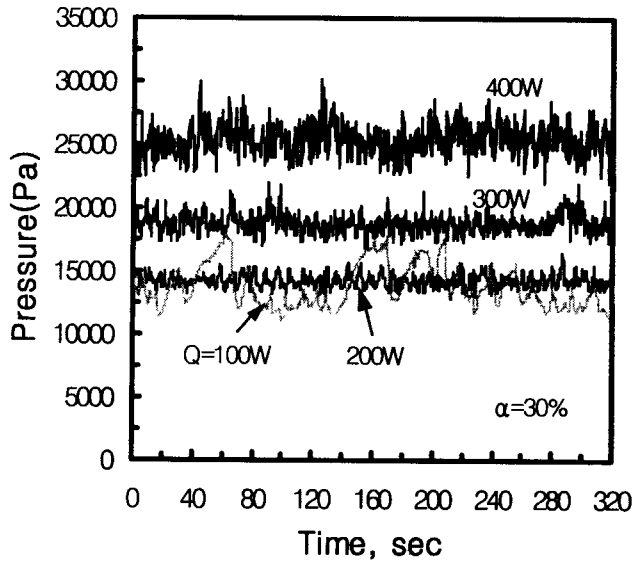


Fig. 5 A variation of pressures

Fig. 6과 Fig. 7은 히트파이프의 경사각에 따른 가열부와 냉각부의 평균온도를 나타낸 그림이다. 가열부 온도는 가열량이 매우 작아서 정상적인 작동이 이루어지지 않고 있는 $Q=100W$ 의 경우를 제외 하고는 경사각이 감소할수록 크게 증가하고 있으며, 냉각부 평균온도는 이와 반대로 경사각이 감소할 수록 낮아지고 있다. 이러한 경향은 경사각이 작아질수록 본 히트파이프의 열수송능력이 급격히 저하 하기 때문이다.

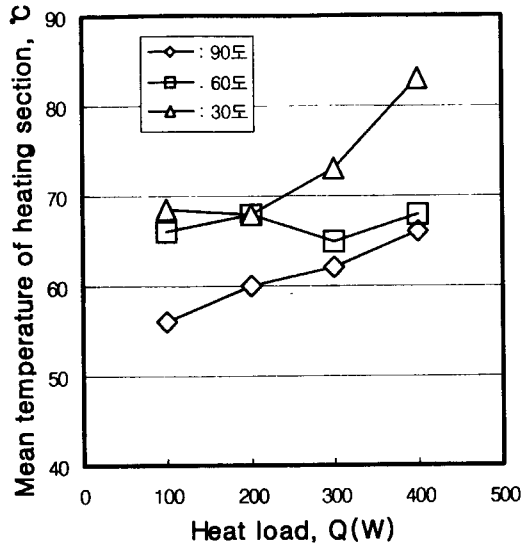


Fig. 6 Mean Temperature of heating section

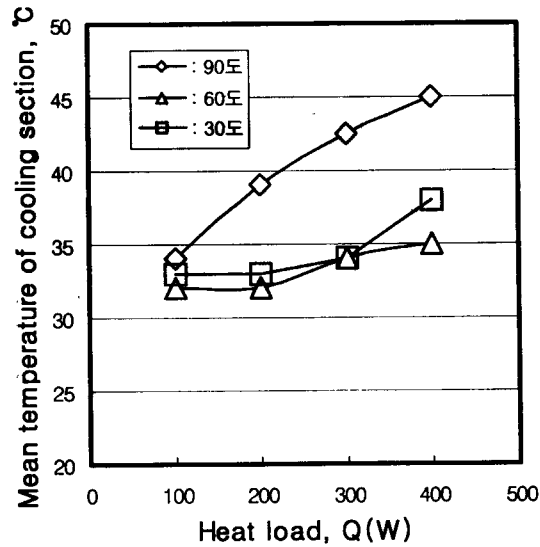


Fig. 7 Mean Temperature of cooling section

3. 자려 진동 히트파이프의 열전달 특성

Fig. 8은 가열량에 대한 유효열전도도의 변화를 나타낸 그림이다. 본 그림의 유효열전도도는 다음식에 의하여 계산하였으며, 가열부 평균온도 T_H 와 냉각부 평균온도 T_C 는 Fig. 2의 No. 3, No. 7 열전대 및 No. 1, No. 5 열전대로 측정한 1000개씩의 데이터를 각각 평균한 온도를 사용하였다.

$$Q = NAq = NAk_{eff} \frac{(T_H - T_C)}{L} \quad (2)$$

상기 식에서 Q 는 전체 가열량, q 는 열유속을 의미하며, L 은 SOHP의 길이, 즉 T_H 와 T_C 의 측정점 사이의 거리를 의미한다. 또한 N 은 본 히트파이프의 열 수를 의미하며, 본 실험 장치의 경우 총 20 열로 구성되어 있다. 그리고 A 는 히트파이프의 내부 유로 단면적이다.

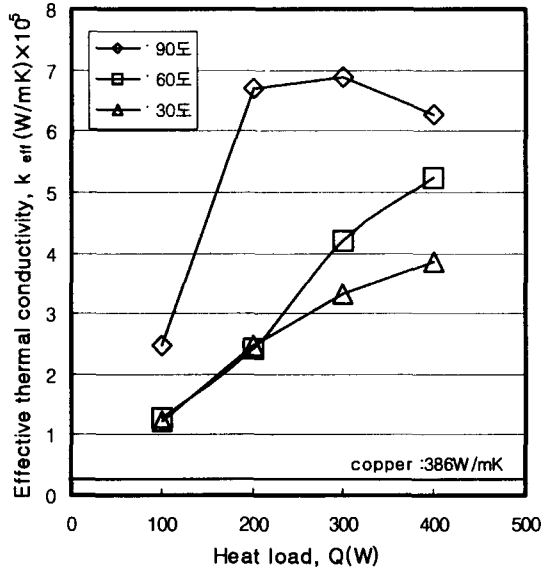


Fig. 8 Effective thermal conductivity

본 그림에서 알 수 있는 바와 같이 경사각이 커질수록 그리고 가열량이 증가할수록 유효열전도도가 증가하고 있는데, 이것은 경사각이 커질수록 중력에 의하여 작동액의 순환이 원활하여 지며, 열부하의 증가에 의하여 기포의 구동력이 커지기 때문이다. 다만 가열량이 너무 작아서 정상적인 작동이 이루어지고 있다고 볼 수 없는 $Q=100W$ 의 경우에는 이러한 경향이 미미하게 나타나고 있다. 본 히트파이프의 경사각에 따른 유효열전도도의 범위는 $2 \times 10^5 \sim 7 \times 10^5$ W/mK로, 경사각 $\theta=90^\circ$ 에서 가장 큰 값을 가지며 경사각이 작아짐에 따라 그 값도 작아지나, 그 값은 열전도도가 가장 우수한 금속중의 하나인 Cu의 수 백 배~수 천 배에 이른다.

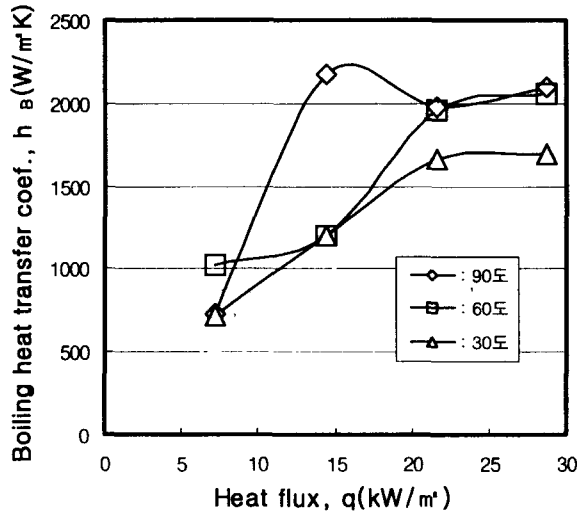


Fig. 9 Boiling heat transfer coefficients

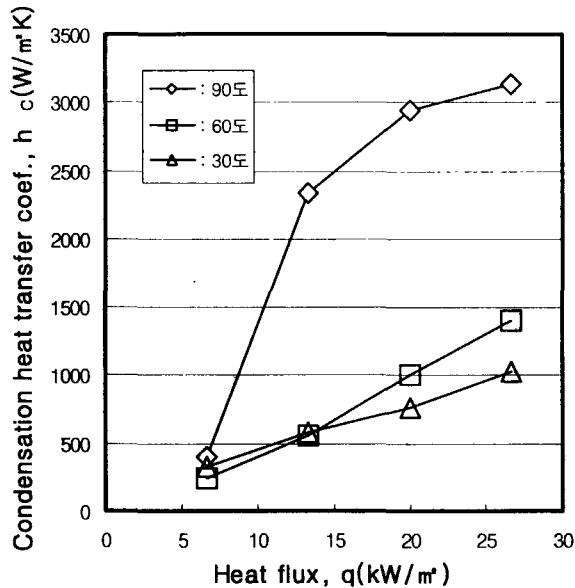


Fig. 10 Condensation heat transfer coefficients

Fig. 9와 Fig. 10은 열유속 q 와 경사각에 따른 평균비등열전달계수 h_b 와 평균응축열전달계수 h_c 를 나타낸 그림이다. 전체적으로 경사각이 증가할수록, 그리고 열유속이 증가할수록 비등열전달계수 및 응축열전달계수가 증가하고 있다. 이러한 현상이 발생하는 이유는 Fig. 8의 유효열전도계수의 경향에 대한 원인과 동일하다.

IV. 결론

직경이 매우 작은 관 내부에서 발생하는 기포의 구동력과 액체유동현상에 의하여 열전달이 이루어지는 SOHP에 대해 가열량과 경사각에 따른 연구들 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 히트파이프의 열저항은 0.04~0.2K/W 정도로 매우 낮은 값이며, 경사각이 커질수록 열저항이 감소한다.
- 2) 본 히트파이프의 경사각에 따른 유효열전도도는 $2 \times 10^5 \sim 7 \times 10^5$ W/mK 범위로, 경사각 $\theta = 90^\circ$ 가장 큰 값을 가지며 경사각이 작아짐에 따라 그 값도 작아지나, 그 값은 열전도도가 가장 우수한 금속중의 하나인 Cu의 수 백 배~수 천 배에 이른다.
- 3) 경사각이 0° 인 경우, 즉 히트파이프가 수평인 상태에서는 기포구동력의 부족으로 인한 작동액의 순환 불량으로 인하여 효과적인 성능을 발휘하기가 어려우므로 가능한 한 경사각을 크게 설치하는 것이 바람직하다.

참고문헌

- [1] Won Tae Kim, Kyu Sub Song and Young Lee, "Design of a Two-Phase Loop Thermosyphon for Telecommunications System (I)," *KSME International Journal*, Vol. 12, No. 5, pp. 928~941, 1998
- [2] Won Tae Kim, Kyu Sub Song and Young Lee, "Design of a Two-Phase Loop Thermosyphon for Telecommunications System (II)," *KSME International Journal*, Vol. 12, No. 5, pp. 942~955, 1998
- [3] Peterson G. P., "An Introduction to Heat Pipe," John Wiley & Sons, Inc., 1994
- [4] Amir Faghri, "Heat Pipe Science and Technology," Taylor & Francis, 1995
- [5] 부준홍, "히트파이프의 기본 원리와 설계 체계," 대한기계학회 '98년도 열공학부분 학술강연회 강

- 연집, pp. 3~18, 1998
- [6] 前澤三郎, 和泉智水, 赤地久輝, 魏啓陽, “ループ型振動ヒートパイプのカオス實驗,” 제35회 일본전열심포지엄 강연논문집, pp. 275~276, 1998
 - [7] 前澤三郎, 和泉智水, 中島亮輔, 魏啓陽, “振動型ヒートパイプのカオス特性,” 제34회 일본전열심포지엄 강연논문집, pp. 275~276, 1997
 - [8] 前澤三郎 외 3명, “ループ型振動ヒートパイプのカオス實驗,” 제37회 일본전열심포지엄 강연논문집, pp. 25~26, 2000
 - [9] 宮崎芳郎, 赤地久輝, 有川政之, “自動振動ヒートパイプの研究,” 제35회 일본전열심포지엄 강연논문집, pp. 531~532, 1998
 - [10] 鈴木 敦, 氣泡驅動形細管ヒートパイプの熱輸送特性,” 제37회 일본전열심포지엄 강연논문집, pp. 275~276, 2000
 - [11] 西尾茂文, 細田稔, 永田眞一, 渡辺慶太, “氣泡驅動型熱輸送管”, 제34회 일본전열심포지엄 강연논문집, pp. 267~268, 1997
 - [12] 윤석훈, 최재혁, “자러진동히트파이프의 압력 및 온도 파형해석”, 한국박용기관학회 추계학술대회 논문집, pp. 43~49, 2000