Journal of the Research Institute of Industrial Technology, Vol 19, 2002

자려 진동 히트파이프의 압력 및 온도 파형 해석

최재혁[1] · 윤두호[2] · 윤석훈[3]

Analysis on Pressure and Temperature Wave of Self-Oscillating Heat Pipe

Jae-hyuk Choi[1] · Doo-ho Yoon[2] · Seok-hun Yoon[3]

ABSTRACT

Heat transfer characteristics of self-oscillating heat pipe were experimentally investigated for the effect of fill charge ratios and heat loads. The heat pipe used for this study is made of copper capillary, has 0.002m internal diameter, a 0.34m length in one turn and consists of 19 turns. Heating and cooling section each have a length of 70mm. Water was used as working fluid inside the heat pipe. As the experimental results, the self oscillating heat pipe was operated by self-exited oscillation and circulation of working fluid and the oscillation within the self-oscillating heat pipe assumed chaotic behavior.

I. 서 론

히트파이프란 밀폐용기 내부의 작동유체가 연속적으로 기-액간의 상변화 과정을 통하여 용기 양단 사이에 열을 전달하는 장치로, 별도의 외부 동력 없이 잠열(latent heat)을 이용하여 열을 이동시킴으로써, 단일상(phase)의 작동유체를 이용하는 통상적인 열전달 기기에 비해 매우 큰 열전달 성능을 발휘한다. 이러한 우수한 열전달 성능으로 인하여 산업용 및 공조용 열교환기, 전기 · 전자장비의 열제어 수단, 위성체나 우주선의 냉각용 등, 아주 다양한 분야의 열이송장치로서 사용되고 있다. 히트파이프는 중력을 이용하는 써모사이폰과, 위크(wick)라는 다공성 물질의 모세관 현상에 의하여 응축액을 증발부로 환류시키는 전형적인 형태의 것이 많이 사용되고 있다. 그러나 이러한 히트파이프는 자세의 제한, 위크로 인한 초소형 히트파이프 제작의 곤란, 모세관 한계 등의 각종 한계, 위크의 막힘 현상으로 인한 성능 저하 등의 단점 때문에 작동에 많은 제한을 갖고 있다.

본 연구의 대상인 자려 진동 히트파이프(self-oscillating heat pipe, SOHP)는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 작동유체를 충전한 직경이 매우 작은 관이 가열부와 냉각부를 수회 이상 왕복하는 구조로 되어 있다. SOHP는 관 내의 가열부에서 발생하는 증기의 기포가 급격히 팽창한 후 단열부와 냉각부를 거치는 과정에서 축소되거나 파괴되고, 이러한 현상으로 인하여 작동유체에 압력파의 파동이 발생하여 작동액과 기포군이 관 내부를 순환하거나 축방향진동을 일으켜 열전달을 촉진시킨다.[1]~[3]

이러한 작동원리로 인하여 본 SOHP는 위크가 필요 없으므로 구조가 간단하여 기존의 히트파이프보다 소형으로 제작이 가능하고, 구조가 단순하므로 제작단가가 저렴하다. 그러므로 이러한 SOHP가 실용화 될 수 있다면 기존의 히트파이프가 가지고 있는 단점을 보완할 수 있는 획기적인 열이송 장치가 될 것이며, 특히 소형 · 경량화가 필요할 뿐만 아니라 작동의 내구성과 신뢰성이 요구되는 인공 위성 등의 위성체 열제어용으로 사용될 수 있을 것이다.

SOHP에 관한 연구는 약 10여 년 전 그 가능성이 발표된 이후, 일부 연구자들에 의해 기초연구가 진행되고 있다. 前澤 등[4]은 내경 2.0mm, 1.0mm 의 동(銅)파이프와 R142b를 작동액으로 한 SOHP를 이용하여 히트파이프 내부의 거동을 해석하였으며, 관 내경이 작을수록 관 내부의 거동은 더 복잡한 카오스 형태가 된다는 연구결과를 발표하였다.

1) 한국해양대학교 대학원
2) 거창기능대학
3) 한국해양대학교 기관시스템공학부

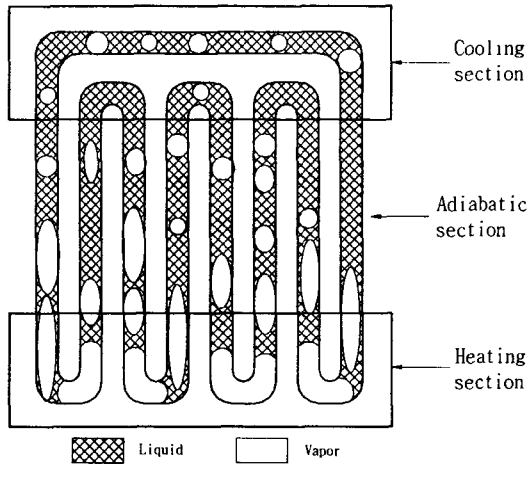


Fig. 1 Structure of self oscillating heat pipe

魏 등[5]은 내경 1~2mm의 동 파이프를 이용하여 유효열전도계수와 관 내부의 유동특성에 관한 연구를 수행하였다. 또한 細田 등[6]은 내경 2.4mm의 유리관으로 히트파이프를 제작하고, 물을 작동액으로 한 실험을 통하여 관 내부의 유동을 체계적으로 해석하였다. 이 연구를 통하여 관 내 작동액의 유동은 연속적인 기포의 생성과 감소 및 파괴작용에 의한 구동력에 의하여 이루어진다는 것을 밝혔다. 鈴木[7]은 전장 약 4000mm, 내경 2mm 의 동관으로 만든 비루프형 세관 히트파이프를 이용하여 그 열수송 특성을 실험적으로 평가해 온도분포를 명확히 함과 동시에 스펙트럼해석을 이용하여 온도변동의 주기성과 열수송 능력의 관계를 조사하였다. 그 결과 정상상태에 있어서의 히트파이프 열수송부 온도는 주기성 있는 진동이 이루어짐을 밝혔다.

이러한 소수의 연구자들에 의해 SOHP의 성능과 관내의 기본적인 유동특성 등에 대한 연구가 이루어졌다. 그러나 아직까지 관 내부에서의 기포의 성장 및 소멸, 기포 구동력, 열부하에 따른 열전달특성, 충전율의 영향 등에 대한 체계적인 연구결과는 매우 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는 열부하와 충전율에 따른 작동액의 온도 및 압력변동에 대한 해석을 통하여 본 히트파이프 유동 특성을 구명하고자 한다.

II. 실험 장치 및 방법

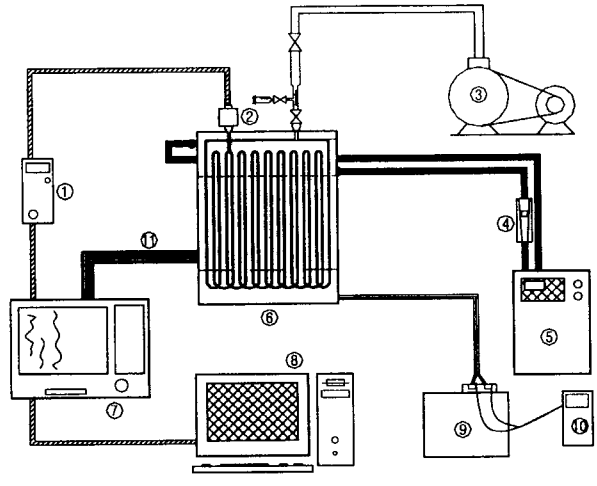
1. 실험장치

Fig. 1은 본 실험장치의 개략도이다. 본 그림에서, ⑥은 실험장치의 본체인 SOHP이며, ⑧은 소선의 직경이 각각 50μm인 C-A열전대(C-A thermocouple) ⑪과 SOHP의 내압을 측정하기 위한 압력변환기 ②로부터 전달된 측정데이터를 처리하기 위한 개인용 컴퓨터이다. 또한 ⑨는 히트파이프의 가열부에 공급되는 가열량을 조절하기 위한 전압조정기이며, ⑩은 가열량을 계산하기 위한 멀티메터이다. 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. 3은 본 실험장치의 본체에 해당되는 SOHP의 상세도이다. 본 히트파이프의 작동액으로는 증류수를 사용하였고, 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.

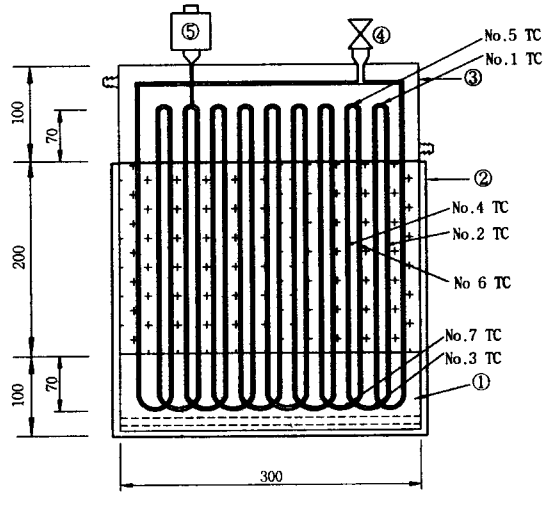
본 히트파이프의 가열부는 동 블럭(copper block) 내부에 내장된 전기히터에 의하여 가열되도록 하였으며, 전압조정기에 의하여 가열량을 조절하였다. 또한 단열부는 히트파이프 내부에서의 열 이송 중에 열이 외부로 손실되는 것을 방지하기 위하여 성능이 우수한 단열재로 충분히 단열하였다. 냉각부는 아크릴 판으로 제작하였으며, 정밀 항온조에서 일정온도로 조절된 냉각수에 의하여 냉각되도록 되어 있다. 본 히트파이프 상부에는 불응축가스를 제거하고 작동액을 효과적으로 충전하기 위한 작동액 주입장치와 히트파이프 내부의 압력을 측정하기 위한 압력변환기를 설치하기 위하여 각각의 연결

부를 가공하였다. 또한 가열부 0.07m, 단열부 0.2m, 냉각부 0.07m로써, 본 히트파이프의 총 높이는 0.34m이며, 이러한 히트파이프를 제작하기 위하여 소요된 동파이프의 총 길이는 7.11m이다.



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. 2 Schematic diagram of experimental Apparatus



① Heating section ② Adiabatic section
③ Cooling section ④ Filling port
⑤ Pressure transducer

Fig. 3 A drawing of self oscillating heat pipe

2. 실험방법

본 실험에서는 히트파이프 내부의 전 체적을 기준으로 하는 작동액의 충전율을 α=20~80% 범위 내에서 10% 간격으로 변경하였고, 가열부의 가열량은 Q=100~600W 까지 100W 씩 증가시키면서 실험을 수행하였다. 실험 중 히트파이프의 각부 온도를 측정하기 위하여 Fig. 3과 같이 가열부에 2개, 단열부에 3개, 냉각부에 2개의 C-A 열전대를 각각 설치하였다. 냉각수 입구온도는 정밀 항온조에서 30℃로 조절하여 2~4L/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 계량된 작동액을 이 충전장치에 의하여 히트파이프 내부로 주입하였다. 7개의 열전대와 압력변환기에 의하여 측정된 온도와 압력은 3, 9, 135Hz의 샘플링속도로 각각 1000, 1000, 4000개의 데이터를 취하여 컴퓨터에 저장되도록 하였으며, 본 연구의 모든 계산에서는 이렇게 측정된 데이터의 평균값을 이용하였다. 또한 실험의 신뢰성을 향상시키기 위하여 동일한 조건하에서 2회의 실험을 수행하여 실험결과의 일관성을 비교·검토하였다. 그리고 충전율을 변경할 때에는 히트파이프가 완전히 냉각된 후 작동액을 주입하였으며, 히트파이프를 작동시켜 충분한 시간이 경과한 후 정상상태가 이루어진 상태에서 데이터를 측정하였다. 불응축가스인 공기가 히트파이프의 내부에 존재하면 열전달특성에 큰 영향을 미치므로 작동액 충전 전에 공기의 완전 배제를 위하여 세심한 주의를 기울였으며, 작동액의 충전율에 해당하는 정확한 양의 물이 충전될 수 있도록 여러 번의 사전 실험을 반복하여 실험의 신뢰성이 확보될 수 있도록 하였다. 본 실험에서는 충전율을 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80%로 하였으며, 히트파이프 내부의 총 체적이 $2.234\times10^{-5}m^3$이므로 이를 기준으로 하여 충전할 작동액의 체적을 구하였다.

III. 실험결과 및 고찰

1. 열저항

Fig. 4는 식 (1)을 이용하여 구한 열저항 R을 나타낸 그림이다. 아래의 식에서, R은 열저항이고, T_H와 T_C는 각각 가열부 평균온도와 냉각부 평균온도이며, Q는 가열량이다.

$$R=\frac{T_H-T_C}{Q} \tag{1}$$

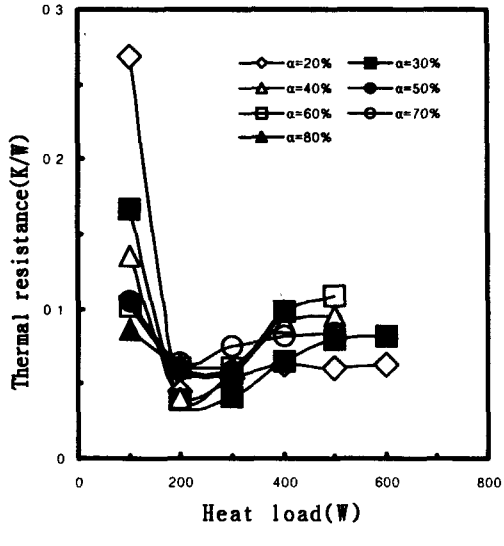
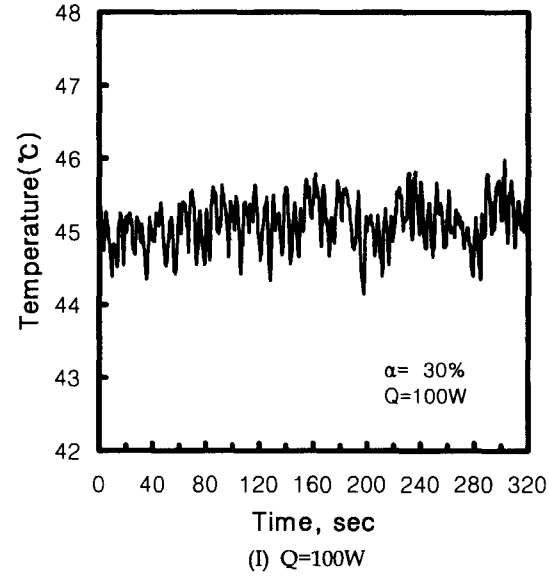


Fig. 4 Thermal resistance on heat loads

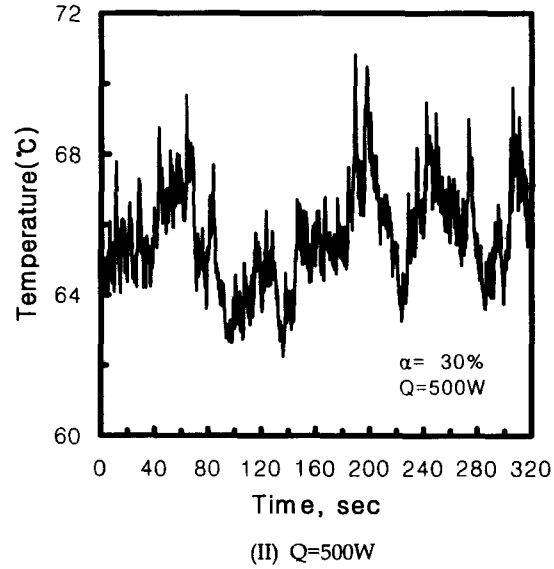
본 그림에서 알 수 있는 바와 같이 대부분의 충전율에서, 가열량 Q=100W일 때에는 매우 높은 열저항을 값을 나타내고 있으나 Q=200W부터 급격히 감소하여 Q=200W~400W에서는 0.04K/W 이하의 낮은 값을 나타내고 있다. 각 충전율에 대해 Q= 100W에서 높은 열저항 값을 갖는 것은 Q=100W에서는 관 내 기포의 발생과 성장이 충분하지 못하고, 압력파와 유체 진동을 전파하는 압력이 저하하여 작동액과 기포의 유동속도가 느려져서 활발히 순환하지 못하여 관내 열전달이 제대로 이루어지지 못하기 때문이다. 이러한 현상으로 미루어 볼 때 Q=100W는 본 히트파이프를 원활히 작동시키기에는 다소 부족한 열부하라고 할 수 있다.

2. 온도 파형 특성

Fig.5 (I), (II)는 충전율 30%일 경우, Q= 100W 및 500W일 때의 단열부의 온도 파형으로서, 두 그림 모두 특정 주기를 확인할 수 없는 불규칙한 변화를 보이고 있다.



(I) Q=100W



(II) Q=500W

Fig. 5 Temperature variations of adiabatic section

그리고 Q=100W일 경우에는, 온도의 진폭이 낮으며 어느 정도 일정한 형태의 온도 변화를 보이는 반면, Q=500W일 때는 온도의 진폭이 매우 크게 나타나고 있는데, 이러한 현상은 본 히트파이프가 일정 이상의 열부하에서 작동 한계에 도달하고 있음을 의미한다.

Fig. 6은 가열량에 따른 단열부의 평균온도로서, 충전율의 영향은 크지 않으나 가열량이 증가할수록 점차 단열부 평균온도가 증가하고 있다. 이렇게 일정량 이상의 열부하에서 단열부 온도가 급격히 상승하는 것은 열저항에 관한 Fig.4의 경향과 유사하며, 본 히트파이프의 열수송능력에 비하여 열부하가 너무 크기 때문이다.

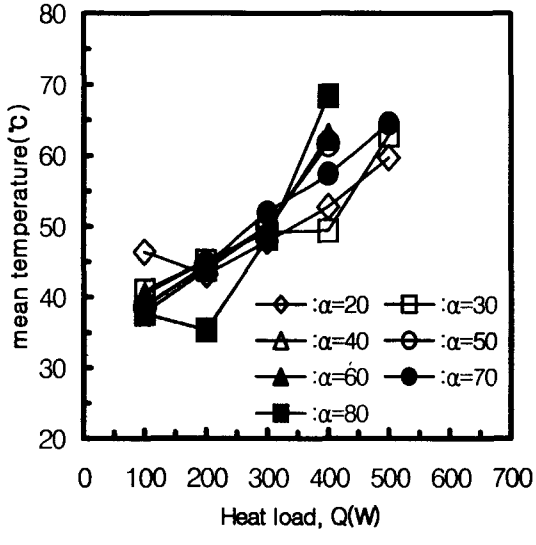


Fig. 6 Mean temperatures of adiabatic section

3. 압력 파형 특성

Fig. 7은 충전율 30%일 경우, 각 가열량에 대한 압력 변화를 나타낸 그림이다. 본 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 가열량이 증가할수록 관 내부 압력도 그에 비례하여 전반적으로 증가하고 있다.

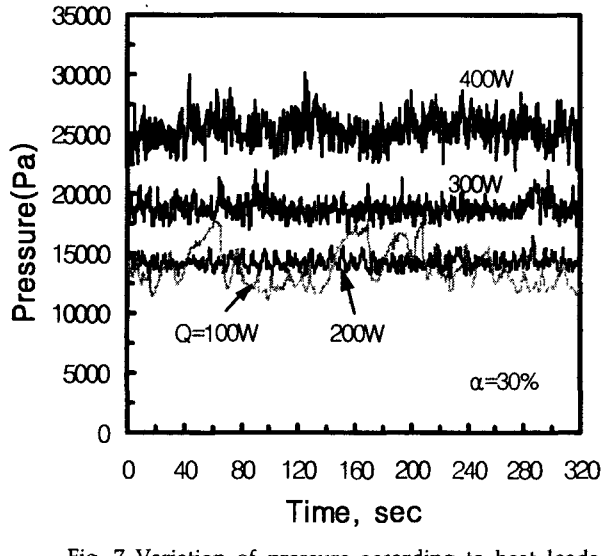


Fig. 7 Variation of pressure according to heat loads

특히 Q=100W일 경우에는, 전체적인 압력이 매우 낮은 상태에서 그 변화 폭이 크고 매우 불규칙한데, 이러한 현상은 히트파이프의 용량에 비하여 열부하가 너무 적은 경우에는 기포의 발생과 성장이 충분하지 못하고 작동액과 기포의 유속이 느려져서 활발한 순환이 이루어지지 않기 때문이다. 일반적으로 SOHP는 압력의 진폭이 작을수록 열전달 성능이 우수한데[9], 본 그림에서는 Q=200, 300W일 때 주기성 있는 정현파의 형태는 아니지만 진폭이 매우 작으며 빠른 변화를 보이고 있다. 이것은 이미 전보[8]에서 발표한 바와 같이 충전율 30%일 경우, Q=200, 300W 일 때 가장 우수한 유효열전도계수값을 가진다고 하는 것과 일치하는 현상이다.

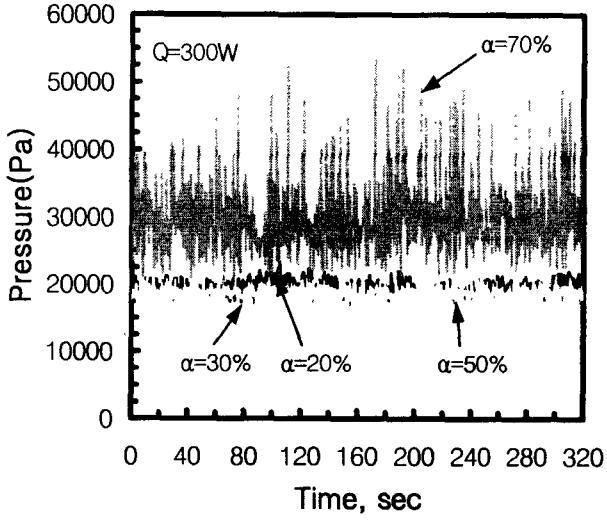


Fig. 8 Variation of pressure according to fill charge ratio

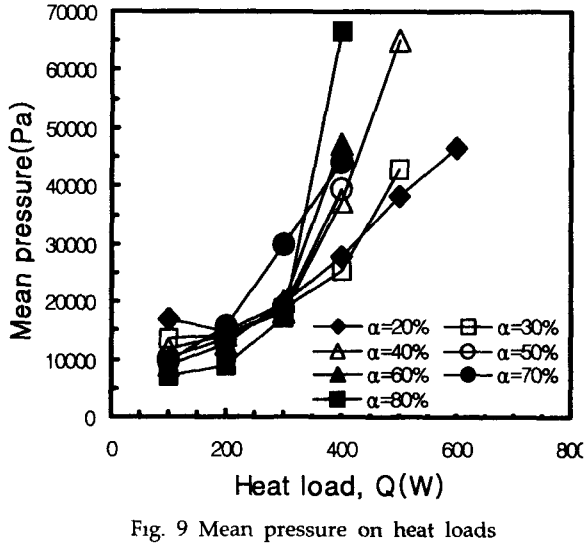


Fig. 9 Mean pressure on heat loads

Fig. 8은 Q=300W일 경우, 충전율에 따른 관 내부 압력변화이다. α=60% 이하에서는 충전율에 따른 압력 변화의 차이가 그다지 크지 않은 반면, α=70% 이상일 경우에는 압력의 진폭이 매우 크며, 매우 불규칙하게 변화하고 있다. 이러한 이유는 충전율이 일정치 이상이 되면 관 내부의 여유 공간이 감소하므로 기포가 발생하여 충분히 성장한 후 유동할 수 있는 공간이 부족하기 때문이다. 그리고 α=70%

에서 순간적으로 압력이 급상승한 후 즉시 다시 저하하는 시각들이 존재하고 있는데, 이는 특정 지점에서 기포가 발생한 후 매우 빠른 속도로 성장하는 과정에서 관 내부공간 부족으로 순간적으로 압력이 상승하기 때문이라고 생각된다.

Fig. 9는 가열량 Q에 대한 평균 압력 변화를 나타낸 그림이다. Q=200~300W 범위에서 관 내부의 평균압력이 가장 낮은 값을 보이고 있으며, 이보다 가열량이 증가할 경우에는 내부 평균압력이 급상승하고 있다. 이와 같이 가열량이 증가할수록 압력이 급상승하는 것은 열부하의 증가로 인하여 가열부에서의 기포 발생과 성장이 매우 활발해진 반면 작동액의 원활한 순환에 의한 응축현상이 활발하지 못함에 기인한다. 반면 충전율의 차이는 크게 나타나고 있지 않으나 전체적으로 충전율이 커질수록 평균압력이 증가하고 있다.

4. 표준편차

Fig. 10은 단열부 온도의 표준편차를 나타낸 그림으로서, 충전율에는 그다지 강한 의존성이 나타나지 않고 있다.

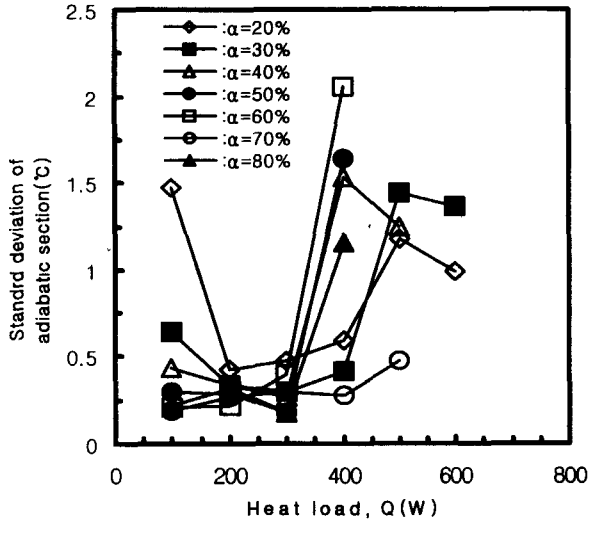


Fig. 10 Standard deviation of temperature

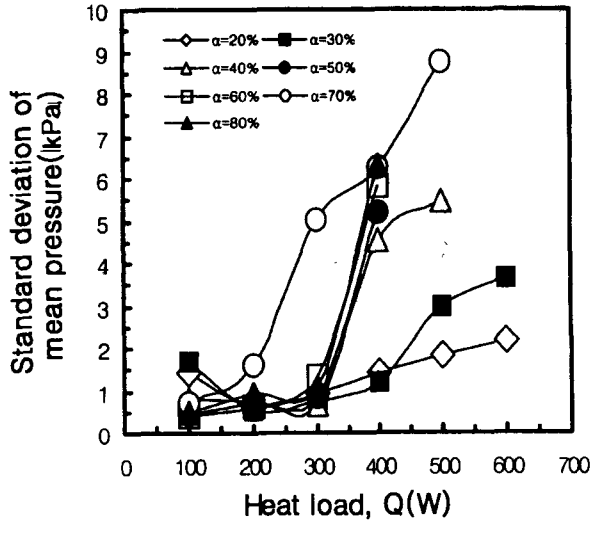


Fig. 11 Standard deviation of pressure

그러나 낮은 충전율에서 Q=100W일 때 다소 큰 값을 갖고 있는데 이것은 앞서 설명한 바와 같이 Q=100W는 본 히트파이프를 원활히 작동시키기에는 다소 부족한 가열량으로서 관내의 작동액 및 기포의 유동이 활발히 이루어지지 못하여 불규칙한 온도 변화가 일어나기 때문이다.

Fig. 11은 관 내부압력의 표준편차를 나타낸 그림으로, 가열량과 충전율이 커질수록 압력의 표준편차가 증가하는데, 이러한 현상은 가열량이 증가할수록 기포의 발생이 활발하여지며 충전율이 클수록 관 내부의 공간이 감소하기 때문이다.

IV. 결 론

자려 진동 히트파이프의 압력 및 온도 파형에 대한 해석을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 본 히트파이프가 정상 작동할 때의 열저항은 0.04K/W 정도의 매우 낮은 값으로, 열수송 능력이 매우 우수하다.
2) 온도 및 압력 파형에 대한 해석을 행한 결과, 전체적으로 Q=500W이상의 큰 열부하에서는 온도 및 압력이 급격히 상승하여 작동한계에 근접한 현상을 나타냈다
3) 본 히트파이프를 가장 이상적으로 작동시키기 위한 조건은 충전율 30%일 때, Q=200~400W 정도이다
4) 충전율에 따른 압력과 온도의 표준편차의 차이는 크지 않으나, 히트파이프의 성능에 큰 영향을 미치는 온도 및 압력 변화의 속도나 주기는 큰 차이를 보이고 있다.

참고문헌

[1] Hisateru Akachi, "Structure of a Heat Pipe," United States Patent, Patent no. 4921041, 1990
[2] 赤地久輝, "ループ型細管ヒートパイプ," 일본 공개특허공보(A), 昭63-318493, 1988
[3] 小泉尙夫, "冷却裝置および溫度制御裝置," 일본공개특허공보(A), 평4-20788, 1992
[4] 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
[5] 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
[6] 細田捻, 西尾茂文, 白樫了, "氣泡驅動型熱輸送管," 제34회 일본전열심포지엄 강연논문집, pp. 275~276, 1997
[7] 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
[8] 최재혁, 윤석훈, "루프형 세관 히트파이프의 열전달 특성에 관한 연구," 대한기계학회 논문집 B권 제24권 제3호, pp. 346~353, 2000
[9] Y. Miyazaki, H. Akachi, "Heat Transfer Characteristics of Looped Capillary Heat Pipe," Proceeding of the 5th Int. Heat pipe symposium, pp. 378~383, 1996