

〈論 文〉

2상 밀폐 열사이폰 루프의 전열특성 및 안정성에 관한 연구

이진호* · 김태열** · 설신수*** · 이병일****

(1990년 3월 16일 접수)

Study on the Heat Transport Characteristics and Stability of Two-Phase Closed Thermosyphon Loop

Jinho Lee, Taeyoul Kim, Sinsu Seol and Byungil Lee

Key Words : Thermosyphon Loop(열 사이 폰 루 프), Two-Phase(2상), Stability(안 정 성), Operational Characteristics(작동특성)

Abstract

An experiment is carried out to study the flow and thermal characteristics of two-phase closed rectangular thermosyphon loops for the constant heating rate and constant temperature cooling. The main objective is to identify the stable operation range for various loop inclination angles, filling rates of the working fluid, input power rates and the initial pressure of the loop. The flow stability is largely influenced by the filling rate, and the flow becomes stable at a wider range of inclination angle at about 40% of the filling rate. Higher power input destabilizes the system ; on the other hand, the higher initial pressure stabilizes the system, while leads to earlier dryout due to the higher working fluid temperature in the heating section.

———— 기 호 설 명 ————— θ : 루프 경사각도

- P : 압력
- P_c : 냉각부 냉각량
- P_w : 가열부 입력
- Q_c : 냉각수 유량
- R_f : 가열부 부피에 대한 충전작동 유체량의 비
- T : 온도
- T_s : 가열부 출구 표면온도
- t : 시간
- 1 : 가열부 입구
- 2 : 가열부 출구
- 3 : 냉각부 입구
- 4 : 냉각부 출구

1. 서 론

열사이폰(thermosyphon)은 중력장하에서 작동 유체의 밀도 변화에 의한 부력의 효과로 유체가 자연 순환(natural circulation)하면서 열을 신속히 전달시키는 장치로서 기본적으로 가열부, 단열부 및 냉각부로 구성되며, 광범위하게는 심지가 없는 열 파이프(wickless heat pipe)라고도 한다.

열사이폰은 원자로의 냉각, 열사이폰 재생보일러(thermosyphon rebolier), 태양열 이용장치, 지열 이용장치, 공작기계의 모터 냉각, 전기·전자부품의 냉각장치, 온수 발생 장치, 제빙, 변압기 냉각, 컴퓨터 냉각, 열교환기의 환, 터빈 블레이드(turbine blade) 및 자동차 엔진의 냉각 등 여러분야에 이용될 수 있다. 특히 원자로의 냉각은 열사

*정회원, 연세대학교 공과대학 기계공학과
 **정회원, 공군 군수사 81수리창
 ***정회원, 현대중공업 종합연구소
 ****정회원, 연세대학교 대학원

이론 사용이 필수적이거나 원자로의 안전사항에 관련된 것이기 때문에 열사이폰이 안정하게 작동하는 것은 매우 중요한 문제중의 하나이다⁽¹⁾.

일반적으로 열사이폰은 작동유체의 상(phase)에 따라 구분할 경우 단상으로 작동하여 현열을 전달시키는 단상(single-phase) 열사이폰과, 2상(two-phase)으로 작동하여 가열부에서의 증발, 냉각부에서의 응축 과정을 반복하면서 잠열(latent heat)을 전달시키는 2상 열사이폰으로 구분되며, 관의 개폐에 따라서는 상부관끝이 열려져 있는 개방 열사이폰(open thermosyphon)과 모두 막혀있는 밀폐 열사이폰(closed thermosyphon)으로, 관의 형태에 따라서는 직관(straight pipe) 열사이폰 및 루프(loop) 열사이폰 등으로 분류한다.

2상 밀폐 열사이폰 루프는 증발과 응축과정을 반복하면서 잠열을 전달시키므로 단상 열사이폰에 비해 높은 열유속을 가지며 장치의 낮은 작동온도, 가열부 및 냉각부 사이의 작은 온도차, 짧은 정상상태 도달시간 및 무게감소 등의 장점이 존재하지만 실험조건 변화에 따라 가열부에서의 드라이 아웃(dry-out) 발생, 전열성능의 증감, 안정작동 영역, 소음 및 진동 발생 등의 현상이 민감하게 변화한다.

2상 열사이폰에 대한 지금까지의 연구는 직관형태의 2상 열사이폰^(2~4)에 대해 주로 이루어졌다. 그러나 직관 형태의 2상 열사이폰은 작동 유체와 관내부와의 화학작용으로 인한 기체생성과 작동유체내에 잔존하고 있는 비응축성 기체(noncondensable gas)로 인하여 냉각부에서의 응축효과가 감소되어 전열성능이 크게 떨어질 우려가 있으므로 비응축성 기체 제거를 위해 세심한 주의가 필요하다.

이러한 직관형태의 열사이폰 보다 비응축 기체의 영향이 적고 작동유체의 순환 작용을 증대시켜 전열성능을 더욱 우수하게 하기 위해 최근 루프 형태의 열사이폰에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. 그러나 2상 열사이폰의 경우 증발부에서 작동유체의 비등현상이 불규칙한 핵 비등으로 인한 불안정성을 내포하고 있기 때문에 2상 열사이폰 루프의 이용을 위해 이 문제를 해결해야 한다. Wissler 등⁽⁵⁾은 곡관형태의 루프에 대하여 1차원 비정상상태시 1기압하에서 표면온도의 진동현상을 실험적으로 측정하였고 질량 유량(mass flow rate) 및 엔탈피 변화를 수치적으로 계산하였다. 또한 Ramos 등⁽⁶⁾ 및 Chen과 Chang⁽⁷⁾은 토로이달(toroidal) 및

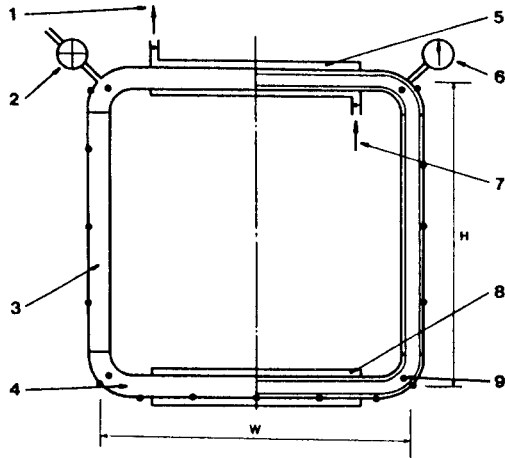
사각형 형태의 루프에 대하여 1차원 정상상태에서 이론적으로 내부압력 변화와 루프 내의 2상영역 길이에 따른 작동유체 흐름율 등을 구하였으며 Leidenfrost와 Modre⁽⁸⁾는 정사각형 루프에 대해 작동유체가 R-11이고 가열부 내부에 열원이 존재할 경우 루프 경사각도 변화($\theta = \pm 25^\circ$)에 따른 작동유체의 유동을 관찰하고 열전달률을 실험적으로 구하였다. 그러나 2상 열사이폰 루프에 대한 수치해석 및 이론해석은 2상 유동의 복잡성으로 인하여 1차원, 정상상태, 균질 모델(homogeneous model) 및 마찰계수 일정 등의 여러 가정을 도입하여 실시하고 있다. 또한 2상 밀폐 열사이폰 루프는 루프 경사각도, 작동유체량 및 종류, 루프 초기 내부 압력, 중횡비, 가열부 입력 및 냉각수 유량 등의 여러 조건에 따라 작동유체의 유동현상, 온도변동 특성 및 안정성이 민감하게 변화하지만 아직 이러한 각각의 변수에 따른 영향을 구체적으로 밝히지 못하고 있다.

본 연구에서는 실험적으로 2상 밀폐 직사각형 열사이폰 루프에 대하여 안정성에 주된 영향을 줄 수 있는 변수들, 즉 루프 경사각도, 작동유체량, 가열부 입력 및 루프 초기 내부 압력 등을 각각 변화시키면서 루프 내부 작동유체의 유동현상을 관찰하고 작동유체의 온도변동과 루프의 전열성능을 측정하여 열사이폰이 안정하게 작동하는 범위를 종합적으로 조사해 보았다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에서 사용된 밀폐 사각형 열사이폰 루프의 개략도는 Fig. 1과 같으며 기본적으로 가열부, 단열부 및 냉각부로 구성된다. Fig. 1에서 실험장치의 가열부는 외경 22.2mm, 두께 1.1mm, 길이 700mm 구리관으로 표면에 5개의 T형 열전대($\Phi 0.05\text{mm}$)를 부착하여 드라이 아웃(dry-out)이 발생하는 상태를 감지할 수 있도록 하였고 그 위에 두께 0.5mm의 운모판을 2회 감아 절연시킨 후 폭 5mm, 두께 0.2mm인 니크롬 리본을 감고 유리섬유(glass wool) 단열재로 10cm까지 두껍게 단열하여 열손실을 방지하였다.

단열부인 상승관 및 하강관은 외경 22.2mm, 길이 700mm의 구리관으로 표면온도를 측정하기 위하여 5개의 열전대를 부착한 후 두께 5cm의 유리섬유 단열재로 단열하였다. 특별히 작동유체의 유



- | | |
|--------------------------------|------------------|
| 1. Coolant outlet | 6. Vacuum gauge |
| 2. Valve | 7. Coolant inlet |
| 3. Quartz glass or copper tube | 8. Heater |
| 4. Copper tube | 9. Thermocouples |
| 5. Cooler | |

Fig. 1 Schematic diagram of the rectangular thermosyphon loop

동현상을 관찰하고 속도를 측정할 때는 상승관 및 하강관을 길이 700mm인 구리관과 동일 지름의 석영유리관을 사용하였으며 500mm의 출자를 부착하였다. 상승관 및 하강관이 구리관일 경우 단열부와 냉각부의 양단에 90°엘보우(elbow)를 사용하여 용접 연결하였고 석영유리관일 경우에는 구리 부분을 용접하고 유리부분은 고온용 접착제로 접착하여 기밀을 유지하였다. 냉각부는 2중관 형태(concentric tube)의 열교환기로서 길이 700mm이고 가열부와 동일 지름의 구리관 표면에 원활한 열전달을 위하여 환을 널링(knurling)가공(깊이 : 0.95mm, 폭 : 0.711mm)하고 그 주위에 다시 외경 25.4mm의 구리관을 용접하였다. 그리고 냉각수를 통과시키기 위해 직경 8mm의 구리관을 열교환장치 양단에 대칭이 되도록 용접하였으며 그 외부를 100mm두께의 유리섬유로 단열하였다. 4개의 엘보우 위에 루프 내부 작동유체의 온도(즉 가열부 및 냉각부 입·출구 내부온도)를 측정하기 위해 외경 2mm, 길이 50mm의 구리관을 용접한 후 열전대를 엘보우 중앙까지 통과시키고 고온용 접착제로 밀봉하였다. 또한 상부에 있는 엘보우 양단에는 진공 압력계와 작동유체 주입 및 루프 내부의 진공을 시키기 위한 직경 6mm의 구리관을 각각 용접 부착하였다. 본 실험에서 작동유체는 2차 증류수를 사용하였

Table 1 Experimental range

Parameter	Range	Remark
Filling rate (R_f)	20~200(%)	
Inclination angle (θ)	$0 \leq \theta \leq 90(^{\circ})$	Clockwise 5° interval
Power input rate (P_w)	100~200(W)	300W interval
Initial pressure (P)	30, 110, 160 (torr)	

다. 작동유체의 주입은 루프 내부를 진공펌프로 실험하고자 하는 압력까지 진공시키고 가열추출⁽⁹⁾을 위해 특별히 제작한 밸브시스템과 매스 실린더(mass cylinder)를 사용하여 실험 측정하고자 하는 작동유량보다 5cc만큼 더 주입한 후 밸브를 닫는다. 냉각수를 통과시키지 않고 승압기(slide regulator)를 이용하여 가열을 시작하면 내부의 증기압이 상승하여 0.2~0.3MPa가 되면 밸브를 적절히 열어 루프 내부와 작동유체내에 존재하고 있는 비응축성 기체를 제거시킨 후 밸브를 닫으면 하나의 2상 밀폐 열사이폰 루프가 형성된다. 이때 추출된 증기는 5cc가 될때까지 응축시켜 그 양을 측정하므로 열파이프내에 실제 존재하는 작동유체량을 알 수 있다. 작동유체량은 가열부 부피를 기준으로 하여 20~200%를 주입하고 각 작동유체량에 대하여 Table 1에서와 같이 루프 경사각도, 초기내부 압력, 가열부 입력을 각각 변화시키면서 실험을 실시하였다.

온도측정은 엘보우 중심부에 넣은 4개의 열전대를 이용하여 가열부 양단과 냉각부 양단에서 측정하며 그곳에서 나온 신호를 A/D변환기로서 5~50 Hz의 속도로 측정 컴퓨터에 연결하여 직접 온도진동 현상을 도식하였다. 냉각부에서의 냉각수 입·출구 온도는 온도기록계와 데이터 로거에 동시 연결하여 측정하였고, 냉각수 유량은 밸브로써 조절하여 60초 동안 흘러나온 물을 매스 실린더에 받아 그 양을 측정하여 열전달량의 계산에 사용하였다. 가열부 및 단열부 표면온도는 데이터 로거에 연결하여 1분 마다 자동 측정할 수 있도록 하였다.

루프는 임의의 각도로 경사지게 할 수 있는 받침대를 제작하여 수평계로 수평을 유지시킨 후 각도기를 부착하여 루프 경사각도를 수직상태($\theta =$

0°; 하부수평관은 가열부이고 상부수평관은 냉각부인 경우)로부터 시계방향으로 경사지게 하여 $\theta=90^\circ$ 까지 5°간격으로 변화시켰다. $\theta=90^\circ$ 가 될 경우는 상승관 자체가 가열부이고 하강관은 냉각부가 되며, $\theta=90^\circ$ 이상에서는 가열부가 냉각부보다 상부에 놓여지게 되므로 작동유체는 순환되지 않는다. 단열관인 상승관 및 하강관을 석영유리관으로 별도 제작한 열사이폰으로부터 일반적인 유동현상인 기포 유동(bubbly flow), 슬러그 유동(slug flow), 천 유동(churn flow), 홀러딩(flooding)현상, 슬러그 비등(slug boiling) 및 응축수의 흐름 등 루프 내부 작동유체의 유동현상을 관찰하고 사진기로 촬영하였다. 본 연구에서 온도의 측정은 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 이내에서, 유량의 측정은 $\pm 0.05\text{cc}$ 이내의 범위에서 이루어졌으며 초기 압력은 ± 1 torr의 범위에서 조정되었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 유동현상

2상 열사이폰 루프의 실험에서 루프 내부의 2상 유동 현상은 현재까지 여러 연구자^(10,11)들에 의하여 관찰된 전형적인 유동현상 즉 기포 유동, 슬러그 유동, 홀러딩, 천 유동, 슬러그 비등 및 홀래싱(flashing) 현상 등이 가열부 입력과 작동유체량의 변화에 따라 나타난다.

Fig. 2는 열입력 $P_w=1000\text{W}$, 루프 내부 초기압력 (P)=30torr, 냉각수 유량 (Q_c)=60cc/s로 일정할 때의 가열부 부피에 대한 충전작동 유체량의 비(R_f) 및 경사각도(θ)에 따라 나타나는 루프내의 2상 유동현상에 대한 사진이다. $R_f=120\%$, $\theta=0^\circ$ 에서 처음 가열을 시작하면 가열부내의 작동유체의 온도가 점차 상승하면서 아주 작은 기포들이 가열부 양단에서 발생하여 액상의 유체 표면 위로 올라오는 기포유동(Fig. 2(a))이 나타나고 이로 인하여 작동 유체는 미세한 변동(oscillation)을 하기 시작하며 액상의 높이도 증가한다. 온도가 점차 높아지면 가열부에서 큰 기포(약 30~40cm)가 발생하여 단열부의 관을 따라 상승하면서 없어지는 슬러그 유동(Fig. 2(b))이 나타나며 이때 작동유체의 변동은 매우 커진다. 시간이 갈수록 이와같은 변동이 반복되면서 기포가 더 많이 발생하여 큰 기포가 갈라지는 천 유동(Fig. 2(c))으로 변화하며 이후 기포에 의한 부력의 힘은 더욱 커지게 되고

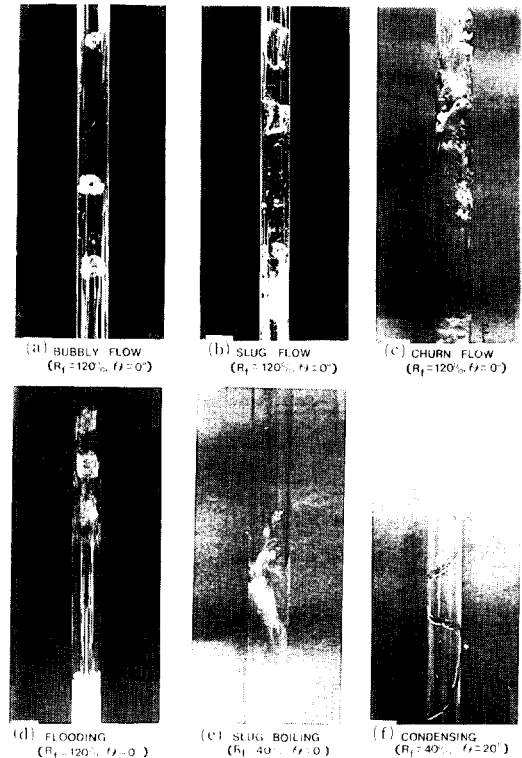


Fig. 2 Flow patterns in a adiabatic section of two-phase thermosyphon loops ($P_w=1000\text{W}$, $P=30\text{torr}$, $Q_c=60\text{cc/s}$)

결국에는 상승관을 통과하여 냉각부의 내부까지 작동유체를 밀어 올리게 되는 일종의 홀러딩(Fig. 2(d))현상이 주로 일어나게 된다. 그리고 이때 작동유체내부에 아주 작은 기포가 순간적으로 발생하였다가 사라지면서 심한 소음과 진동을 발생시키는 홀래싱 현상도 간헐적으로 나타난다. 일단 홀러딩 현상이 발생하면 냉각부에서 냉각된 작동유체가 홀러딩이 발생하지 않은 반대편관(하강관)으로 내려가기 때문에 하강관의 유체진동폭은 1/2정도로 급격히 감소하고 작동유체의 순환방향도 이때 결정된다. 그리고 작동유체가 상승관 내에서 진동이 계속 크게 나타나는 가운데 홀러딩에 의한 증기와 액상 유체가 냉각부로 들어가 냉각되어 하강관을 통과하여 다시 가열부로 들어가는 순환과정을 반복한다. 이러한 현상은 작동유체량이 가열부 부피의 80% 이상이고 루프 경사각도가 $\theta=0^\circ$ 인 경우 주로 발생하며 이보다 작을 경우에는 슬러그 비등 현상(Fig. 2(e))이 나타난다. 이것은 가열부에서의 불규칙한 핵비등으로 인하여 액상의 작동유체가 과열된 후

순간적으로 축적되어 있던 에너지를 발산할 때 액상 작동유체 일부를 갑자기 밀어 올리므로 소음과 장치의 진동을 유발시킨다. 홀러딩 또는 슬러그 비동이 발생하지 않고 증기만 가열부 출구에서 나올 경우에는 상승관에서 상승하여 냉각부에서 응축되고 응축액은 하강관의 관벽을 따라 내려오는 안정 작동 현상(Fig. 2(f))이 나타난다. 2상 열사이폰에서 홀래싱과 슬러그 비동이 반복적으로 발생하면서 심한 소음과 진동을 유발시키고 이로 인하여 관의 파손 및 장치 전체의 안전에 매우 큰 영향을 미치기 때문에 이 2가지 현상이 나타나지 않거나 될 수 있으면 적게 되도록 설계해야 한다.

3.2 루프 경사각도의 영향

일정 작동유체량에 대해 루프의 경사각도를 증가시키에 따라 상승관의 상대적 높이가 낮아지고 냉각부의 기울기가 커지게 되어 응축수는 루프를 경사시킨 방향으로 흘러 내려오므로 작동유체는 루프를 기울인 방향과 동일한 방향으로 순환한다. 그러나 경사각도가 어느 범위 이상이 되면 작동유체가 가열부를 충분히 채우지 못하여 가열부 출구 근처가 과열되므로 가열부내에 드라이 아웃이 발생한다.

Fig. 3은 $P_w=1000W$, $Q_c=60cc/s$, $P=30torr$, (R_f)=80%로 일정할 때 루프 경사각도 변화에 따른 온도 진동을 각각 나타낸다. Fig. 3(a)에서 $\theta=0^\circ$ 인 경우 가열부 입구의 온도진동(T_1)이 매우 크게 나타나고 있다. 이는 작동유체가 홀러딩에 의해 냉각부를 통과한 후 차가워진 액체와 가열부 입구에서 비동에 의해 뜨거워진 작동유체와의 혼합 또는 간헐적으로 발생하는 슬러그 유동(S점)의 기포가 사라지는 순간에 냉각된 액체의 유입 때문이다. Fig. 3(b) 및 (c)는 $\theta=30^\circ$ 와 $\theta=60^\circ$ 일 경우로서 루프 경사각도를 증가시키에 따라 가열부 출구로부터의 홀러딩되는 양이 줄어들기 때문에 온도진동은 점차 감소하며 유동은 안정화되어 간다. 그러나 간헐적인 슬러그 유동에 의한 진동은 계속되며 $\theta=60^\circ$ 에서는 가열부 출구의 온도는 약간 더 높게 나타난다. 이때 루프의 경사각도를 더욱 증가시키면 가열부내에 작동유체가 차지하는 부피가 작아져 결국 가열부 출구 근처의 작동유체가 직접 접촉하지 않는 부분에서는 액막(liquid film)의 증발로 드라이 아웃이 발생한다.

Fig. 4는 $R_f=80\%$, $P_w=700W$, $\theta=80^\circ$ 에서 드

라이 아웃이 발생할 때의 루프내의 각 지점에서의 온도 변화를 가열부 출구 표면온도(T_s)와 함께 나타나고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 실제 실험에서 가열부내에 드라이 아웃이 발생하면 가열부 출구에서의 표면온도는 급히 상승하게 된다. 이때 가열부 출구에서의 작동유체의 온도를 측정하기 위해 심어놓은 열전대는 높은 표면온도의 영향(열전대를 심은 동관을 통한 열전도 및 내부에서의 복

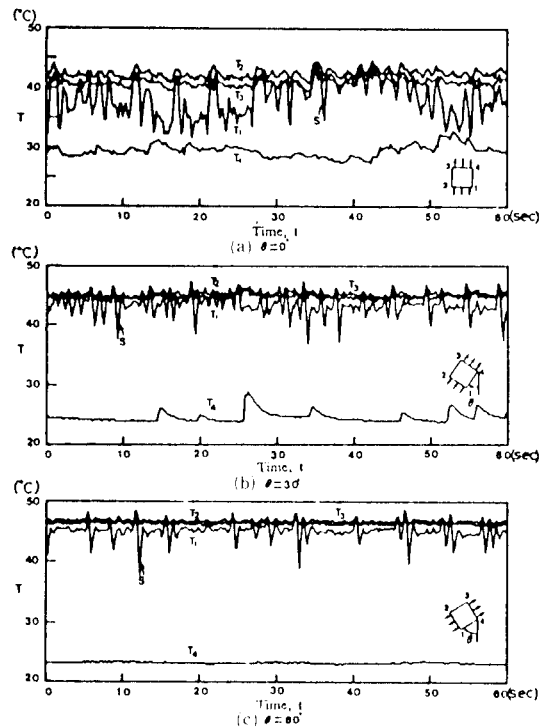


Fig. 3 Temperature fluctuation versus the loop inclination angle ($P_w=1000W$, $Q_c=60torr/s$, $P=30torr$, $R_f=80\%$); T_1 , T_2 : heating section inlet and outlet temperature, T_3 , T_4 : cooling section inlet and outlet temperature

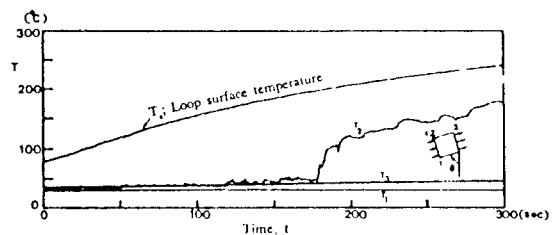


Fig. 4 Temperature rise by dry-out occurrence ($\theta=80^\circ$, $R_f=80\%$, $P_w=700W$, $Q_c=60cc/s$)

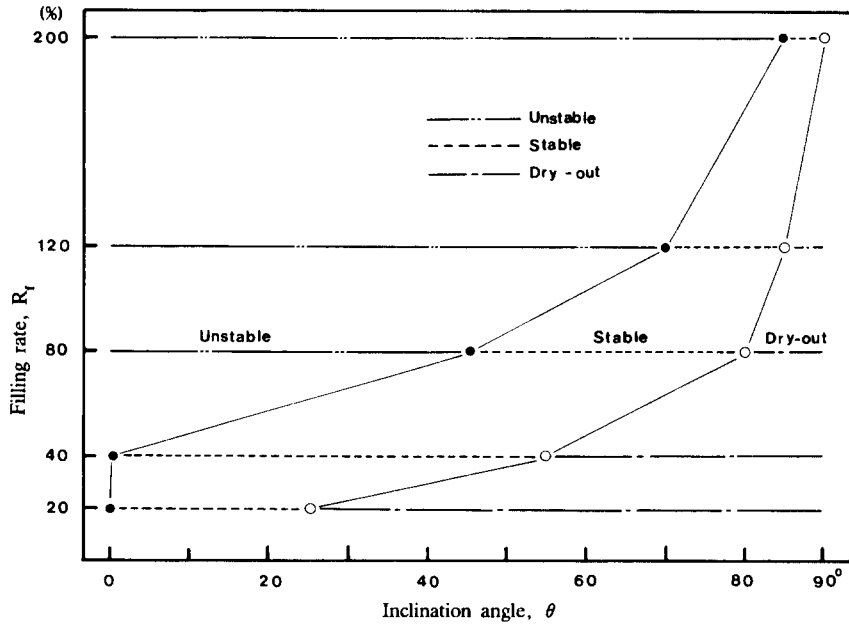


Fig. 5 Stable operation range of the loop with the inclination angle ($P_w=1000W$, $Q_c=60cc/s$, $P=30torr$)

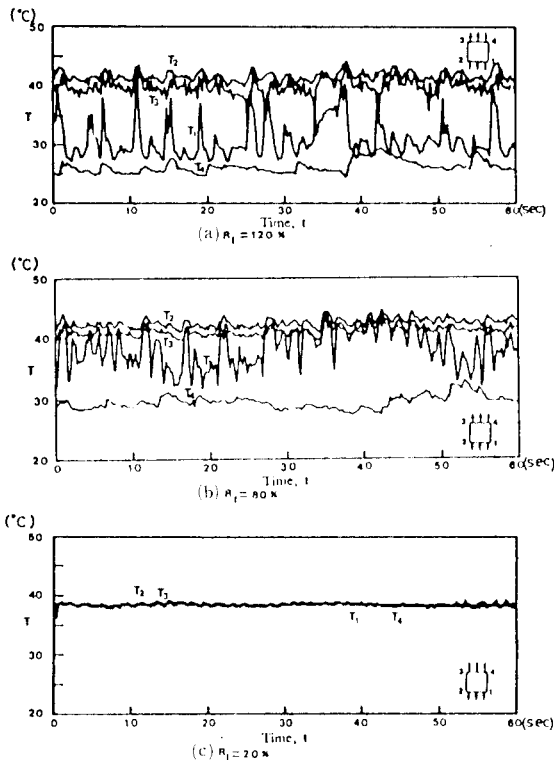


Fig. 6 Temperature fluctuations versus the filling rate ($\theta=0^\circ$, $P_w=1000W$, $Q_c=60cc/s$, $P=30torr$)

사)으로 약간의 시간이 경과하면 실제 작동유체의 온도에서 벗어나 점차 상승하며 결국에는 표면온도와 거의 같은 온도까지 상승한다. 가열부 출구의 온도 측정을 위해서 본 실험에서 여러가지 방법을 시도해 보았지만 별 성과가 없었으며 특별히 제작된 열전대를 사용하여야만 가능함을 깨달았다.

가열부내에 드라이 아웃이 발생하지 않은 경우에는 가열부 출구 표면 온도의 급격한 상승은 나타나지 않는다. 그리고 가열부 출구 작동유체의 온도 (T_2)는 정확하게 측정되며 냉각부 입구의 온도와 거의 동일하게 나타난다. 따라서 가열부 출구 표면 온도의 급격한 상승으로 가열부내에 드라이 아웃이 발생함을 알 수 있다.

Fig. 5는 $P_w=1000W$, $Q_c=60cc/s$, $P=30torr$ 인 경우 각각의 작동유체량에 대해 드라이 아웃이 발생하는 루프 경사각도를 나타낸다. 그림에서 경사각도가 증가함에 따라 루프는 불안정한 작동상태로부터 안정한 작동상태로 변화하거나 또는 안정한 작동상태로부터 드라이 아웃이 발생한다. 작동유체가 가열부 부피의 약 40%를 차지할 때 2상 열사이폰의 유동은 넓은 범위의 경사각도에서 안정함을 알 수 있다. 여기서 안정한 열사이폰은 Tong⁽¹⁰⁾의 2상 유동에 대한 불안정성을 기준으로 하여 본 실험의 2상 열사이폰에 적용하게 위해 다시 정의하였

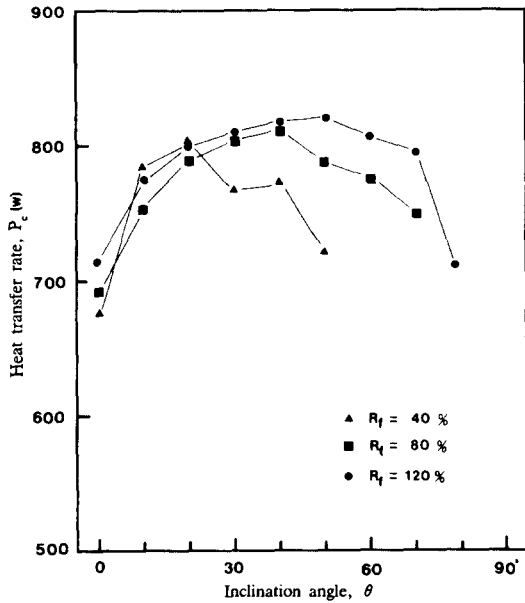


Fig. 7 Performance of 2-phase thermosyphon loop with the filling rate ($Q_c=10\text{cc/s}$, $P=30\text{torr}$)

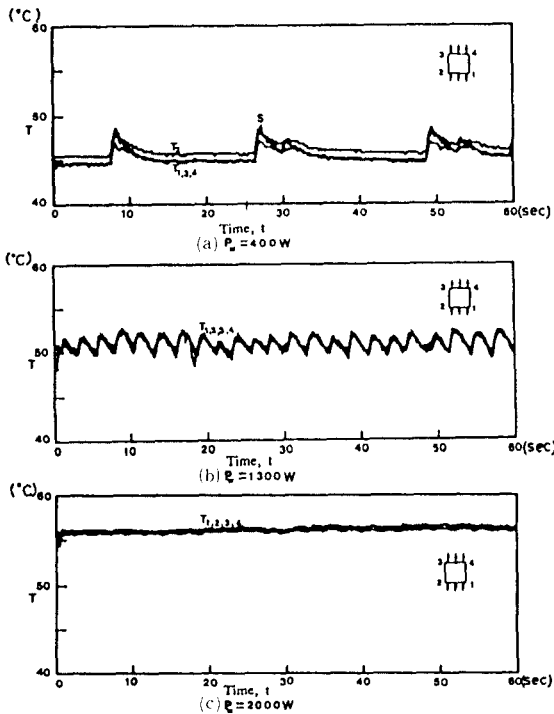


Fig. 8 Temperature fluctuations versus input power rate at $\theta=0^\circ$; loop is operating as the two straight-type thermosyphon ($Q_c=60\text{cc/s}$, $P=3000\text{torr}$, $R_f=40\%$)

다. 즉 작동유체의 불규칙한 유동이 발생하지 않고 증기만 냉각부로 들어가 냉각, 응축된 후 응축액이 하강관벽을 따라 흘러 내려오는 상태이며, 작동유체의 온도는 가열부 출구온도와 냉각부 입구온도, 냉각부의 출구온도와 냉각수의 온도가 각각 거의 동일하고 홀래싱과 슬러그 비동이 발생하지 않아 소음 및 진동이 없이 작동되는 상태로 정의하였다.

3.3 작동유체량의 영향

루프 내부의 작동유체량은 앞에서 언급한 바와 같이 많으면 홀러딩이 자주 발생하고 적으면 슬러그 비동 또는 드라이 아웃이 발생하기 때문에 온도 진동 및 장치의 안정성에 크게 영향을 준다.

Fig. 6은 $P_w=1000\text{W}$, $Q_c=60\text{cc/s}$, $P=30\text{torr}$ 일때 작동유체량이 $R_f=20, 80, 120\%$ 일 때의 온

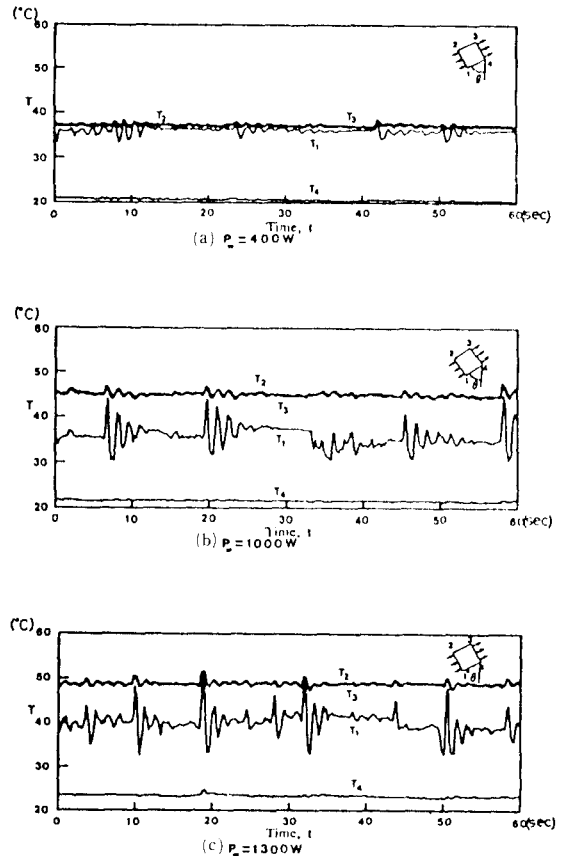


Fig. 9 Temperature fluctuations versus the heat input; stable operating ($\theta=75^\circ$, $Q_c=60\text{cc/s}$, $R_f=120\%$, $P=30\text{torr}$)

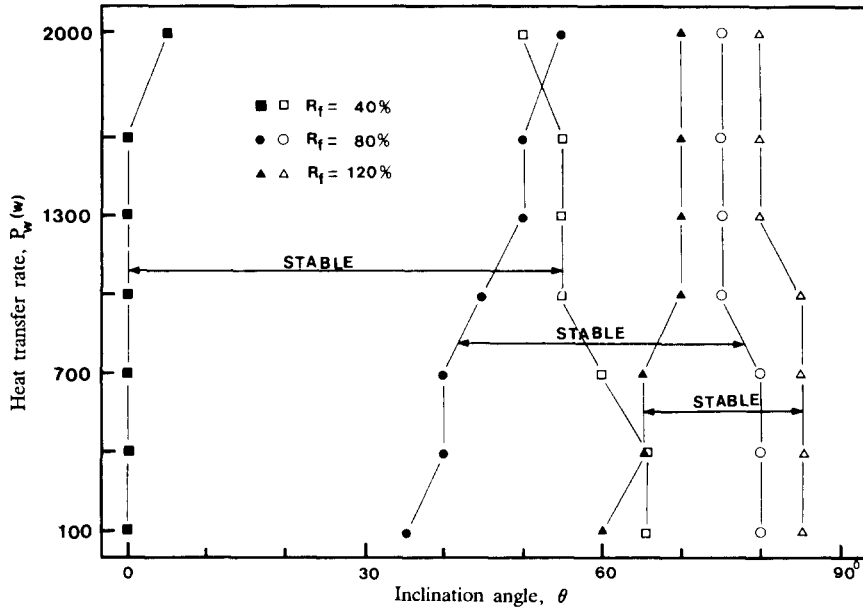


Fig. 10 Stable operating range of the loop filling rate, inclination angle and heat input ($Q_c=60\text{cc/s}$, $P=30\text{ torr}$)

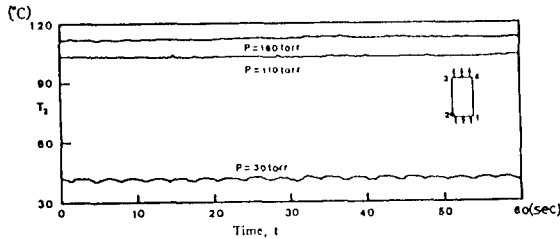


Fig. 11 Temperature fluctuations versus the initial pressure ($\theta=0^\circ$, $P_w=1000\text{W}$, $Q_c=60\text{cc/s}$, $R_f=80\%$)

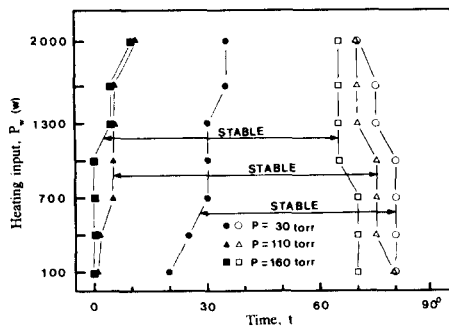


Fig. 12 Stable operation range of the loop with the initial pressure, inclination angle and input power rate ($\theta=0^\circ$, $Q_c=60\text{cc/s}$, $R_f=80\%$)

도진동을 각각 나타내고 있다. Fig. 6(a)는 작동유체량이 가열부 부피의 120%로 비교적 많을 경우이다. 이때는 슬러그 유동 및 홀러딩으로 인하여 가열부 입구의 온도(T_1)진동이 특히 심하며 1회의 홀러딩시 비교적 많은 액상의 작동유체가 냉각부를 통과하여 반대편 관으로 넘어가는 작동상태이다. 또한 액상의 작동유체 내부에서 홀래싱 현상이 간헐적으로 나타나 소음과 진동을 발생시킨다. Fig. 6(b)는 작동유체량이 가열부 부피의 80%일때이며 증기 및 미소량의 액상 작동유체가 냉각부를 통과하기 때문에 Fig. 6(a)보다는 가열부 입구에서의 온도진동이 감소된다. Fig. 6(c)는 홀러딩현상이 전혀 발생치 않고 증기만 가열부 양단에서 발생하기 때문에 온도진동이 거의 없고 가열부 입·출구 및 냉각부 입·출구의 온도가 모두 동일하다. 이것은 작동유체가 일정한 방향으로 흘러나와 순환하는 것이 아니라 2개의 직립형 열사이폰이 대칭되어 별도로 작동하는 것과 같은 형태이다.

Fig. 7은 $P=30\text{ torr}$, $Q_c=10\text{cc/s}$ 일때 $R_f=40, 80, 120\%$ 에 대해 루프 경사각도 변화에 따른 전열성능을 나타내고 있다. 여기서 전열성능이란 가열부 입력에 대한 냉각부에서의 냉각량을 말하며 보다 정확한 냉각량을 구하기 위해 냉각수량을 10cc/

s로 하였다. 그림에서 루프 경사각도가 $\theta=0^\circ$ 또는 드라이 아웃 발생 부근에서는 열전달률이 좋지 않으나 열사이폰이 안정하게 작동되는 경사각도 즉 $R_f=40\%$ 일 경우는 $\theta=20^\circ$, $R_f=80\%$ 일 경우는 $\theta=40^\circ$, $R_f=120\%$ 일 경우는 $\theta=50^\circ$ 에서 최대가 됨을 알 수 있다. 특히 드라이 아웃 발생 직전에서의 경사각도에서는 전열성능이 크게 감소한다.

3.4 가열부 입력 영향

작동 유체량과 루프 경사각도가 일정할 때 가열부 입력을 변화시키면 루프 내부의 유동 현상도 변화한다. 열사이폰이 작은 가열부 입력하에서 안정하게 작동할 때 가열부 입력을 점차 증가시키면 그 상태는 홀러딩이 일어나기 시작하여 불안정한 작동상태로 변화하는 경우와 계속 안정하게 작동하는 경우로 나뉘어 나타난다. Fig. 8은 $\theta=0^\circ$, $R_f=40\%$, $Q_c=60\text{cc/s}$, $P=30\text{torr}$ 인 경우 가열부 입력을 $P_w=400, 1300, 2000\text{W}$ 로 변화하였을 때의 온도진동 형태이다. 이 경우는 전술한 바와 같이 루프 내부 유동이 대칭되어 작동되는 상태이다. Fig. 8(a)는 $P_w=400\text{W}$ 일 때이며 슬러그 비등(S점)이 발생하여 비교적 큰 액상 작동유체를 밀어올릴 때의 온도진동으로 이때 약 4°C 의 온도 변화를 가져온다. Fig. 8(b)는 $P_w=1300\text{W}$ 로 증가시켰을 경우로 슬러그 비등이 아주 빨리 발생하지만 미소량의 액상 작동유체는 가열부 양단 부근에서 사라지면서 물방울이 양쪽 단열관 벽을 치며 작동되는 상태로 온도진동폭은 Fig. 8(a)보다 낮게 나타난다. Fig. 8(c)는 $P_w=2000\text{W}$ 로 가열부 입력이 매우 큰 상태로서 루프 내부에 슬러그 비등 현상이 발생하지 않고 가열부 양단에서 증기만 나와 냉각부에서 응축된 후 응축액이 상승했던 관을 따라 다시 하강하는 작동상태를 나타낸다. 이 경우 온도진동은 아주 작고 가열부 입·출구 및 냉각부 입·출구의 온도는 동일하게 나타난다. 한편 가열부 입력이 증가하면 냉각수 유량은 일정하기 때문에 상대적으로 작동유체의 온도는 상승한다.

Fig. 9는 $\theta=75^\circ$, $R_f=120\%$, $Q_c=60\text{cc/s}$, $P=30\text{torr}$ 에서 작은 가열부 입력하에서 안정하게 작동하고 있을 때 가열부 입력 변화에 대한 온도 진동의 또 다른 형태이다. 루프가 경사져 있기 때문에 가열부 입구(T_1)는 항상 액상의 작동 유체와 접하고 있어 가열부 출구에서만 증기가 발생하고 이 증기는 상승관을 따라 냉각부로 들어간 후 응축되어 하

강관벽을 따라 내려와 가열부 입구의 액상 작동유체와 미소한 진동으로 인하여 약간 진동함을 알 수 있다. Fig. 9(b) 및 (c)와 같이 가열부 입력을 증가시키면 가열부 내부에서의 비등이 증가하여 가열부 입구의 액상 작동유체 진동은 점차 증가하여 가열부 입구 온도는 마치 용수철과 같은 탄력적 진동을 하며 약 10~20초 주기로 발생하고 5초 이내에서 감소하여 안정하게 된다.

Fig. 10은 $P=30\text{torr}$, $Q_c=60\text{cc/s}$ 일 때 작동유체량, 루프 경사각도 및 가열부 입력의 변화에 따른 열사이폰의 안정작동 범위를 나타낸 그림이다. 그림에서 작동 유체량이 가열부 부피의 40, 80, 120%일 경우로 안정작동 범위의 왼쪽은 불안정 영역이고 오른쪽은 드라이 아웃의 발생 범위이며 가열부 입력을 증가시키면 안정한 작동상태의 영역이 감소함을 알 수 있다.

3.2절 루프 경사각도의 영향에서 언급한 바와 같이 일정작동 유체량 및 가열부 입력하에서 경사각도를 증가시키면 열사이폰은 불안정한 작동상태로부터 안정한 작동상태로, 혹은 안정한 작동상태로부터 드라이 아웃 발생상태로 변화한다. 경사각도에 대해 가열부 입력을 증가시키면 홀러딩 또는 드라이 아웃의 발생으로 인하여 안정작동범위가 점차 감소한다. 즉 일정한 초기 루프 내부 압력각수 유량에 대해 열사이폰의 안정작동은 가열부 입력, 작동 유체량 및 루프 경사각도의 상호관계에 의해 영향을 받으며 가열부 입력을 증가시키면 안정작동범위는 홀러딩 및 드라이 아웃의 발생으로 인하여 점차 감소한다.

3.5 루프 내부 초기압력의 영향

2상 열사이폰은 여러 조건에 따라 내부 압력이 민감하게 변화하기 때문에 여기서 초기압력이란 가열하지 않은 상태에서 작동유체 주입 후 진공 펌프로 압력 강하를 하였을 때로 하였다. 이 경우 초기압력의 영향을 보다 세밀히 관찰하기 위해서 특별히 단열부의 길이를 2배(1400mm)로 하였다.

Fig. 11은 $\theta=0^\circ$, $R_f=80\%$, $P_w=1000\text{W}$, $Q_c=60\text{cc/s}$ 에서 내부 압력을 $P=30, 110, 160\text{torr}$ 로 변화하였을 때의 가열부 출구 온도진동을 나타내고 있다. 그림에서 루프 초기 내부 압력이 증가함에 따라 슬러그 비등 및 홀러딩 현상이 거의 발생하지 않아 온도 진동과 소음이 없이 작동된다. 그러나 압력의 상승은 작동유체의 포화온도를 상승시키기

때문에 가열부의 온도는 높아지게 되며 이로 인하여 장치 전체의 온도가 높아지고 정상상태의 도달 시간도 길어지게 되는 단점이 있으나 온도 진동이 매우 작기 때문에 적용분야에 따라서는 루프 내부 압력을 증가시켜 이용하면 유리한 면도 있다.

Fig. 12는 같은 루프에서 초기 압력을 변화시켰을 때의 가열부 입력과 루프 경사 각도에 따른 안정작동 범위이다. 그림에서 초기압력이 증가하면 홀러딩, 슬러그 비동 및 홀래싱의 감소로 인하여 안정작동 범위가 넓어지지만 가열부에서의 온도가 높아지기 때문에 드라이 아웃은 먼저 발생함을 알 수 있다.

4. 결 론

2상 밀폐 직사각형 열사이폰 루프에서 냉각수 유량이 일정한 경우 루프 경사각도, 작동유체량, 가열부 입력 및 루프 초기 내부 압력의 변화에 따른 작동특성을 실험적으로 관찰한 결과 다음의 결론을 얻었다.

(1) 루프의 안정작동은 작동유체량이 가열부를 차지하는 부피에 따라 크게 영향을 받으며 작동유체량이 많으면 홀러딩이 발생하여 불안정한 작동상태가 되고 너무 작으면 낮은 경사각도에서도 드라이 아웃이 발생한다. 가열부 부피에 대한 충전 작동유체량의 비가 약 40%인 경우 넓은 범위의 경사각도에서 안정하게 작동한다.

(2) 루프의 경사각도를 증가시키면 열사이폰내의 온도진동은 현저히 감소하고 작동상태는 불안정한 상태에서 안정한 상태로 변하거나 안정한 상태에서 드라이 아웃 상태까지 도달한다. 드라이 아웃 직전에서는 전열성능이 크게 감소한다.

(3) 가열부 입력을 증가시키면 초기조건 상태에서 안정하게 작동할지라도 불안정한 작동상태로 변하거나 또는 드라이 아웃이 일어나기 전까지 계속 안정한 상태를 유지하게 된다.

(4) 초기 내부압력이 증가하면 열사이폰의 안정작동범위가 넓어지지만 가열부에서의 온도가 높아지기 때문에 드라이 아웃은 먼저 발생한다.

후 기

본 연구는 산학협동재단 1989년도 학술연구비 지원에 의해 이루어 졌으며 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Zvirin, Y., 1981, "A Review of Natural Circulation Loops in Pressurized Water Reactors and Other Systems", Nuclear Engineering and Design, Vol. 67, pp. 203~225.
- (2) Lee, Y. and Bedrossian, A., 1978, "The Characteristics of Heat Exchangers Using Heat Pipes or Thermosyphons", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 21, pp. 221~229.
- (3) Reay, D.A., 1981, "Advances in Heat Pipe Technology", Pergamon Press, pp. 95~173.
- (4) Casarosa, C., Latrofa, E. and Shelginski, A., 1983, "The Geyser Effects in a Two-Phase Thermosyphon", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 26, pp. 933~941.
- (5) Wissler, E. H., Isbin, H.S. and Amundson, N.R., 1956, "Oscillatory Behavior of a Two-Phase Natural-Circulation Loop", AIChE. J. Vol. 2, pp. 157~162.
- (6) Ramos, E., Sen, M. and Trevino, C., 1985, "A Steady-State Analysis for Variable Area One-and-Two Phase Thermosyphon Loops", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 28, pp. 1711~1719.
- (7) Chen, K.S. and Chang, Y. R., 1987, "Steady-State Analysis of Two-Phase Natural Circulation Loop", Natural Circulation, FED. Vol. 61, pp. 91~102.
- (8) Leidenfrost, W. and Modrei, P., 1987, "Flow Conditions and Heat Transfer in a Two-Phase Closed Loop Thermosyphon", Natural Circulation, FED. Vol. 61, pp. 185~192.
- (9) 이진호, 김성원, 1988, "가열추출법에 의한 열 파이프의 성능개선", 1988년도 하계학술발표회, 공기조화·냉동공학회, pp. 52~56.
- (10) Tong, L. S., 1965, "Boiling Heat Transfer and Two-Phase Flow". John Wiley & Sons, INC., New York.
- (11) Collier, J.G., 1972, "Convective Boiling and Condensation", 2nd Edition, McGRAW-Hill Co.