

〈論 文〉

## 단상 열사이폰 루프의 작동특성에 관한 연구

이진호\* · 김태열\*\* · 설신수\*\*\*

(1989년 12월 4일 접수)

### Study on the Operational Characteristics of Single-Phase Thermosyphon Loop

Jinho Lee, Taeyoul Kim and Sinsu Seol

**Key Words :** Thermosyphon Loop(열사이폰 루프), Single-Phase(단상), Stability(안정성), Temperature Fluctuation(온도변동), Inclination Angle(경사각)

#### Abstract

An experimental investigation is made to study the characteristics of flow and temperature fluctuations, performance of heat transport and operational stability of single-phase rectangular thermosyphon loop for the variation of loop inclination angle, aspect ratio, pipe deameter, input power, and the kind of working fluid. Results show that the temperature and velocity fluctuations depend markedly on the loop inclination angle and pipe diameter. The system tedns to stable for lower pipe diameter and the optimal inclination angle for system's stability and good performance is in the range of  $\theta=20^{\circ} \sim 40^{\circ}$ . The water shows better performance compared to the ethylalcohol.

#### 기 호 설 명

- $Ar$  : 종횡비
- $d_1$  : 관직경
- $H$  : 단열부 길이
- $P_w$  : 가열부 입력
- $Q_c$  : 냉각수 유량
- $T$  : 온도
- 1 : 가열부 입구
- 2 : 가열부 출구
- 3 : 냉각부 입구
- 4 : 냉각부 출구
- $t$  : 시간
- $W$  : 가열부 길이
- $\theta$  : 루프 경사각도

#### 1. 서 론

열사이폰(thermosyphon)은 중력장하에서 작동유체의 밀도 변화에 의한 부력의 효과로 유체가 자연순환(natural circulation)하면서 열을 신속히 전달시키는 장치로서 기본적으로 가열부, 단열부 및 냉각부로 구성되며, 광범위하게는 심지가 없는 열파이프(wickless heat pipe)라고도 한다.

열사이폰의 가열부는 원자로, 보일러, 자동차엔진 등과 같은 고온의 열원으로부터 작동유체가 열을 전달받는 부분이고, 단열부는 가열부에서 받은 열을 냉각부까지 이동시키기 위한 단열된 관시스템이며 냉각부는 열을 방출 또는 다른 용도를 위해 고압증기등을 발생시키는 일종의 열교환 장치이다.

열사이폰은 원자로의 냉각, 열사이폰 재생 보일러, 터빈 블레이드의 냉각, 태양열 및 지열 이용장치, 제빙, 공작기계, 내연기관, 변압기 및 전기·

\*정회원, 연세대학교 공과대학 기계공학과

\*\*정회원, 공군 군수사 81수리창

\*\*\*정회원, 현대중공업 종합연구소

전자 부품의 냉각등 광범위한 분야에 관련되어 많은 연구자들에 의해 연구가 이루어져 왔다.

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.

단상 열사이폰에 대한 기존의 연구는 주로 직관 형태(straight pipe)에 대하여 이루어졌으나<sup>(1-5)</sup> 가열부에서 열을 받아 상승하는 작동유체와 냉각부에서 냉각되어 하강하는 작동유체가 관중심 부근에서 서로 교차되기 때문에 가열부에서 받은 열을 원활하게 전달시키지 못한다. 이와 같은 단점을 없애고 전열성능을 향상시키기 위해 1955년 Alstad<sup>(6)</sup>가 루프 형태의 열사이폰에 대한 연구를 시작한 이후 주로 해석이 비교적 용이한 토로이달(toroidal) 형태의 열사이폰 루프에 대해 연구<sup>(7-15)</sup>되어 왔으며 이에 대한 결과는 Metro<sup>(16)</sup>등이 정리 하였다. 그러나 실제 사용면에 있어서 사각형 또는 임의의 형태로 된 열사이폰이 더 많이 존재하기 때문에 최근에 Chen<sup>(17)</sup>, Bau<sup>(18)</sup> 및 Huang<sup>(19)</sup> 등은 사각형 형태의 열사이폰 루프에 대하여 연구를 수행하였다. 사각형 형태의 루프에 대한 완전한 해석을 위해서는 토로이달 루프의 기본방정식<sup>(20)</sup>에 추가하여 루프 중점으로부터 관중심까지의 거리 변화를 고려해야 하므로 매우 복잡하여 현재까지는 1차원에 한정하여 해석하고 있다. 즉 Chen<sup>(17)</sup>은 1차원, 정상상태시 가열부 및 냉각부의 표면온도가 일정할 경우 중횡비에 따른 안정성 범위를 이론적으로 구하였으며, Bau<sup>(18)</sup>는 1차원 정상상태시 가열부 및 냉각부의 위치가 변화할 경우 압력일(pressure work)과 점성소산(viscous dissipation)의 영향을 근사해석의 방법으로 해석하였고, Haung<sup>(19)</sup>은 1차원 비정상상태시 상승관 일부를 균일 열유속으로 가열하고 하강관 일부를 일정표면 온도로 냉각할 경우 루프의 온도 분포 및 온도진동 현상을 실험과 수치적으로 구하였다. 그러나 이들 연구는 루프를 고정시킨 상태에서만 이루어졌으며 아직 경사각의 변화에 따

른 연구는 이루어지지 않고 있다. 그러나 직관 열사이폰의 경우 수직상태보다도 경사지게 하였을 경우가 열전달률이 더욱 크게 나타남을 미루어 볼 때<sup>(21)</sup> 루프 형태의 열사이폰도 중력방향에서 적당한 각도로 경사지게 설치하면 열전달률이 증가하고 안정하게 작동되리라는 것이 충분히 예상된다.

본 연구에서는 단상 밀폐 사각형 열사이폰 루프에서 가열부는 일정 열유속으로 가열되고 냉각부는 일정온도로 냉각될 경우에 대해 루프 경사각도, 중횡비, 작동유체 종류 및 관 직경변화에 대한 유동 및 온도변동 특성과 이에따른 전열성능 및 안정작동범위를 실험적으로 조사하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

본 실험에서 사용된 밀폐 사각형 열사이폰 루프의 개략도는 Fig. 1과 같으며 기본적으로 가열부, 단열부 및 냉각부로 구성되고 중횡비( $Ar = \text{단열부 길이}(H) / \text{가열부 길이}(W)$ )는 0.5, 1.0, 2.0이 되도록 가열부 길이를 일정하게 하고 단열부 길이만 변화시켰다. Fig. 1에서 실험장치의 가열부는 외경 22.2mm(내경  $d_i = 20\text{mm}$ ) 혹은 외경 42.8mm(내경  $d_i = 40\text{mm}$ ), 길이 700mm 구리관 표면에 5개의 열전대(0.05mm copper-constantan)를 부착하여 드라이아웃(dry-out)이 발생하는 상태를 감지할 수 있도록 하였고 그 위에 두께 0.5mm의 운모판을 2회 감아 절연시킨 후 폭 5mm, 두께 0.02mm인 니크로리본을 감고 유리섬유(glass wool) 단열재로 10cm까지 두껍게 단열하여 열손실을 방지하였다.

단열부인 상승관 및 하강관은 외경 22.2mm 혹은 42.8mm의 구리관을 중횡비 변화에 따라 길이 350mm, 700mm, 1400mm로 하였고 표면온도를 측정하기 위하여 5개의 열전대를 부착한 후 두께 5cm의 유리섬유 단열재로 단열하였다. 특별히 작동유체의 유동현상을 관찰하기 위해 중횡비가 1.0일 경우 상승관 및 하강관을 길이 700mm인 구리관과 동일 지름의 석영유리관으로 대체하고 작동유체내에 알루미늄 분말을 넣어 유체속도 및 유체형태를 측정, 관찰하였다. 상승관 및 하강관이 구리관일 경우 단열부와 냉각부의 양단에 90° 엘보우(elbow)를 사용하여 용접 연결하였고 석영유리관일 경우에는 구리 부분을 용접하였고 유리부분은 고온용 접착제로 접착하여 기밀을 유지하였다.

냉각부는 2중관 형태(concentric tube)의 열교환

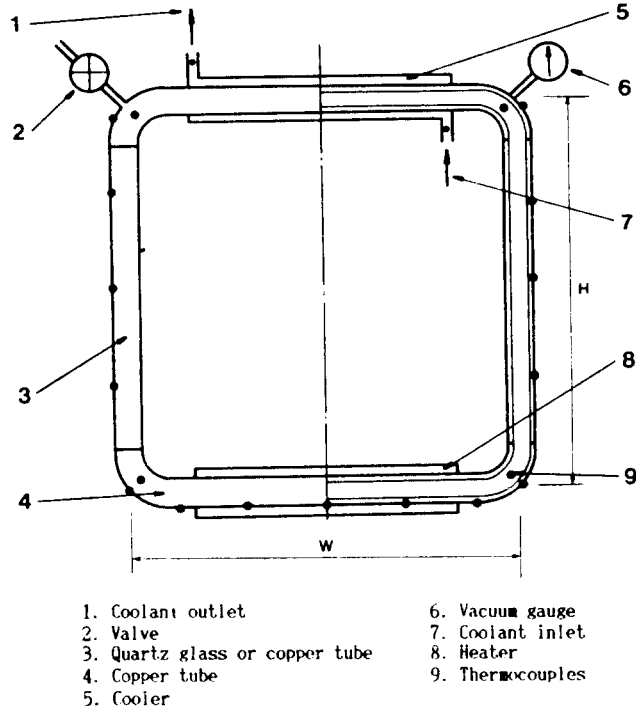


Fig. 1 Schematic diagram of the rectangular thermosyphon loop

기로서 길이 700mm이고 가열부와 동일 지름의 구리관 표면에 원활한 열전달을 위하여 원을 널링(knurling)가공(깊이 : 0.95mm, 폭 : 0.711mm)하고 그 주위에 다시 외경 25.4mm 혹은 외경 50mm의 구리관을 용접하였다. 그리고 냉각수를 통과시키기 위해 직경 8mm의 구리관을 열교환장치 양단에 대칭이 되도록 용접하였으며 그 외부를 100mm두께의 유리섬유로 단열하였다. 4개의 엘보우 위에 루우프 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 증류수와 99.99%의 에틸알콜을 사용하였다. 작동유체의 주입은 루프 내부를 먼저 진공펌프로 30torr까지 진공시킨뒤 특별히 제작한 밸브 시스템을 사용하여 작동유체를 루프 내부에 가득 채운다. 그러나 가열을 시작하면 관벽 및 작동유체내에 잔존하고 있는 비응축성 기

체와 작동유체의 열팽창으로 인하여 루프 내부의 압력이 급상승하기 때문에 실험하고자 하는 가열부 입력을 미리 조절한 후 밸브를 5~10회 열어 잔존하고 있는 기체와 열팽창되는 액상의 작동유체를 제거하여 압력상승과 기포발생으로 인한 2상유동이 되지 않도록 하였다. 작동유체가 물인 경우는 가열부 입력을 2000W 이내로 하였고 에틸알콜인 경우는 1000W 이내에서 300W 간격으로 실험하였다.

온도측정은 엘보우 중심부에 넣은 4개의 열전대를 이용하여 가열부 양단과 냉각부 양단에서 측정하며 그곳에서 나온 신호를 A/D 변환기로써 5~50Hz의 속도로 측정 컴퓨터에 연결하여 직접 온도진동 현상을 도식하였다. 그리고 냉각부에서 냉각수 입·출구 온도는 온도기록계와 데이터 로거에 동시에 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 각도

기를 부착하여 루프 경사각도를 수직상태( $\theta=0^\circ$ ; 하부수평관은 가열부이고 상부수평관은 냉각부인 경우)로부터 시계방향으로 경사지게 하여  $\theta=90^\circ$ 까지  $5^\circ$ 간격으로 변화시켰다.  $\theta=90^\circ$ 가 될 경우는 상승관 자체가 가열부이고 하강관은 냉각부가 되며,  $\theta=90^\circ$  이상에서는 가열부가 냉각부보다 상부에 놓여지게 되므로 작동유체는 순환하지 않는다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 유동현상

단상 열사이폰 루프의 유동현상은 가열부에서 열

을 받아 상승하는 작동유체와 냉각부에서 냉각된 후 하강하는 작동유체가 관중심 부근에서 서로 교차하는 직관 열사이폰의 유동형태<sup>(21)</sup>와는 달리 일정한 방향(시계방향 또는 반시계방향)으로 순환한다. 루프 경사각도( $\theta$ )가  $\theta=0^\circ$ 인 경우 Creveling<sup>(10)</sup>이 언급한 바와 같이 가열을 시작하면 하부 가열관 및 상부 냉각관 사이의 온도차가 점차 크게 되며 이로 인하여 밀도가 큰 작동유체가 상부에 놓여지게 되므로 작동유체는 불안정한 상태에 도달한다. 이러한 불안정한 작동유체는 작은 교란(disturbance)에 의해서 안정화 되는 방향으로 운동하기 시작하고 부력차가 크게되어 속도는 더욱 빨

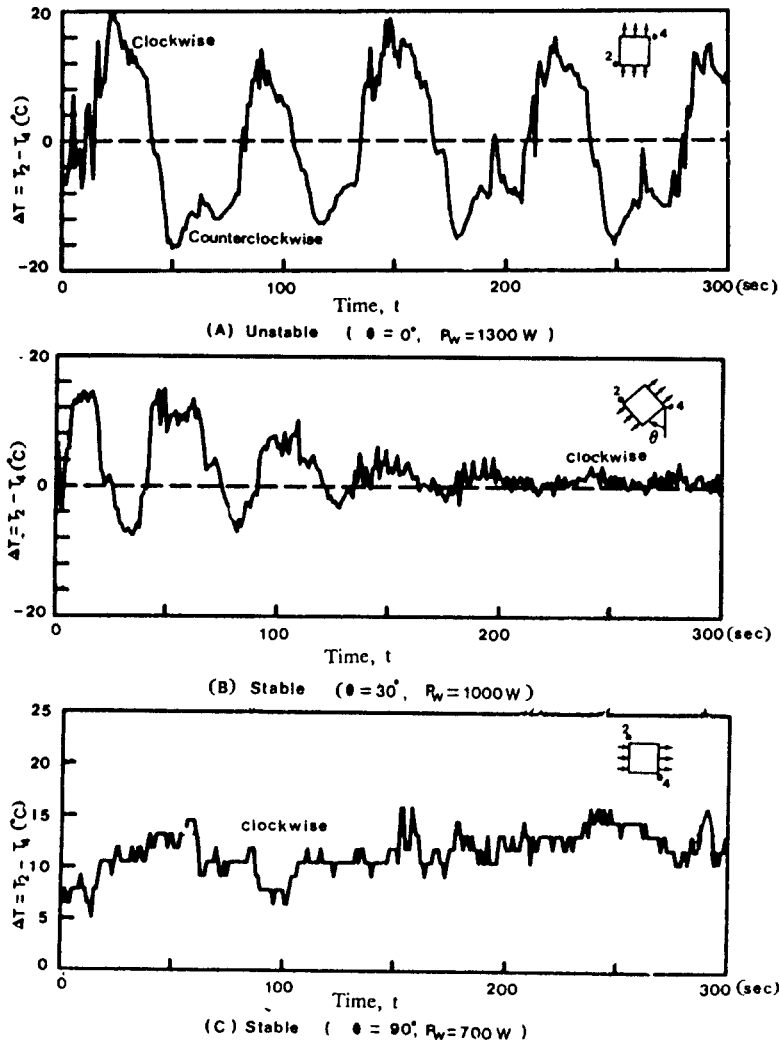


Fig. 2 Fluctuation of the temperature difference between 2 and 4

라진다. 그러나 작동유체가 빠른 속도로 가열부를 통과하면 가열되는 시간이 짧아 온도차가 적어지고 관마찰력이 증가하기 때문에 속도는 다시 감소된다. 이러한 현상은 루프 경사각도, 가열부 입력 ( $P_w$ ), 관직경( $d_i$ ), 종횡비( $Ar$ ), 냉각수 유량 등에 따라 달라질 수 있으며 작동유체의 온도변동이 안정 또는 불안정한 형태로 된다.

Fig. 2는 가열부 출구( $T_2$ ) 및 냉각부 출구( $T_4$ )의 온도차  $\Delta T = T_2 - T_4$ 를 경사각도 및 가열부 입력 변화에 따라 나타낸 그림이다. Fig. 2(a)는  $\theta = 0^\circ$ ,  $Ar = 1.0$ ,  $d_i = 0.04m$ ,  $P_w = 1300W$ , 냉각수 유량

( $Q_c$ ) = 60cc/s인 경우로 불안정한 온도변동 형태를 나타내고 있다. 그림에서  $\Delta T > 0$ 이면 작동유체는 시계방향으로,  $\Delta T < 0$ 이면 반시계방향으로 순환하는 것을 나타낸다. 즉 작동유체의 순환방향이 시계방향과 반시계방향으로 약 50~100초 주기로 변화하기 때문에 Fig. 3 (a)와 같은 온도변동형태는 불안정한 작동상태이다. Fig. 2 (b)는  $\theta = 30^\circ$ ,  $P_w = 1000W$ 인 경우이며 초기에 불안정한 작동상태에 있을지라도 시간이 지남에 따라 작동유체는 루프를 회전시킨 방향과 동일한 방향(시계방향:  $\Delta T > 0$ )으로 순환하는 것을 나타낸다. Fig. 2(c)는  $\theta = 90^\circ$ ,

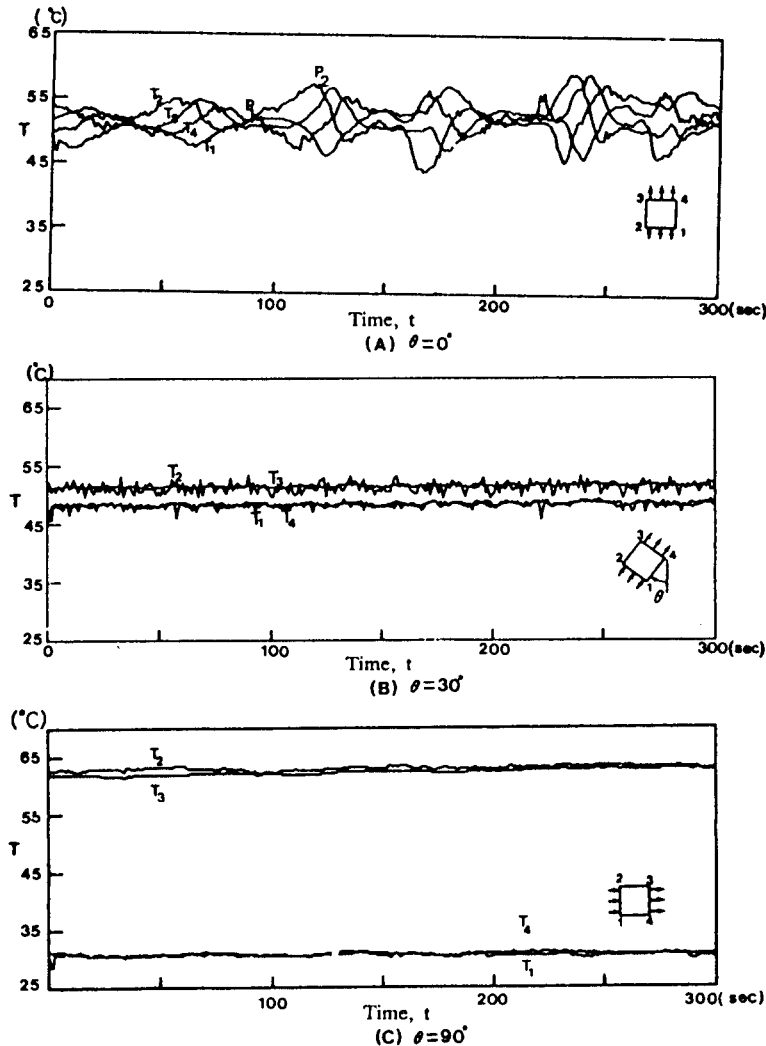


Fig. 3 Temperature fluctuation versus time for various loop inclination angles( $Ar = 1.0$ ,  $d_i = 0.04m$ ,  $P_w = 1000W$ ,  $Q_c = 60cc/s$ , water)

**Table 1** Velocity variations depending on the heat input and loop inclination angle( $Ar=1.0$ ,  $d_i=0.04m$ , water)

$P_w$	$\theta$	[cm/s]		
		$0^\circ$	$30^\circ$	$60^\circ$
400W		$\pm 7.2$	5.43-5.26	2.91-3.01
700W		$\pm 10.7$	6.58-6.85	3.93-4.54
1000W		$\pm 12.0$	7.58-8.77	4.81-5.26
1300W		$\pm 12.7$	7.73-8.33	5.00-5.43
1600W		$\pm 13.5$	8.62-9.80	5.38-5.56
2000W		$\pm 15.2$	9.80-10.63	5.43-6.41

$P_w=700W$ 인 경우로서 항상  $\Delta T > 0$  이므로 안정하게 작동하는 상태이고 작동유체의 속도가 매우 느리기 때문에 온도차가 크게 나타나고 있다. 이와 같은 경사각도 및 열입력에 따른 작동유체의 순환 특성은 유동의 가시화로부터 관찰, 확인되었다. Table 1은 유동의 가시화로부터 측정된  $Ar=1.0$ ,  $d_i=0.04m$ 이고 작동유체가 물인 경우 가열부 입력과 루프 경사각도 변화에 따른 속도변동을 나타내고 있으며 실험범위의 대부분이 난류유동에 속하고 있다.

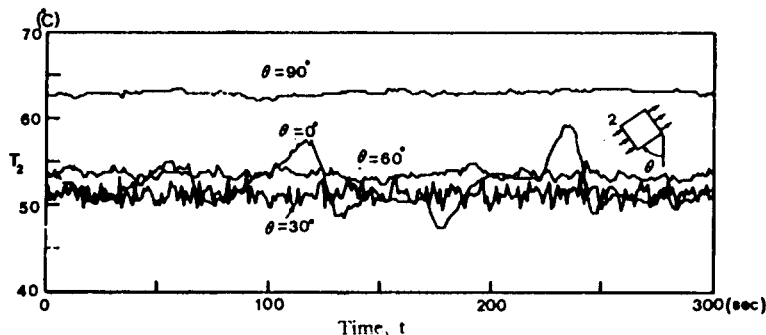
**3.2 루프 경사각도의 영향**

Fig. 3은 작동유체가 증류수일 경우  $Ar=1.0$ ,  $d_i=0.04m$ ,  $P_w=1000W$ ,  $Q_c=60cc/s$ 에 대해 안정작동상태에서 경사각도 변화에 따른 가열부 입, 출구( $T_1$ ,  $T_2$ ) 및 냉각부 입, 출구( $T_3$ ,  $T_4$ )의 작동유체 온도변동을 나타내고 있으며 Fig. 4는 그 중 가

열부 출구온도( $T_2$ )의 변동을 비교해서 나타내고 있다. Fig. 3(a)는  $\theta=0^\circ$ 일때로써 각 지점의 온도변동이 매우 크게 나타나고 작동유체의 속도는 빠른 상태( $P_1$ 점 : 최대 약 12cm/s)로부터 점차 감소하여 정지한 후( $P_2$ 점) 반대 방향으로 회전하기 시작하며 약 50초 주기로 계속 반복되는 불안정한 작동상태를 나타내고 있다. 그러나 이러한 변동은  $\theta=15^\circ$  이상부터는 모든 실험 범위내에서 나타나지 않으며 작동유체는 루프를 경사시킨 방향과 동일한 방향으로 순환하고 온도변동이 크게 감소한다. Fig. 3(b), (c)는  $\theta=30^\circ$  및  $90^\circ$ 일 경우로 온도변동은 루프의 경사각도가 증가함에 따라 점차 감소하여  $\theta=90^\circ$ 일 때 최소가 된다. 그러나 작동유체내에 부유물질(알루미늄 분말)을 넣어 속도 및 내부유동 현상을 관찰한 결과 Fig. 3(b)에서의 미소한 온도변동은 흐름이 약간의 난류성이 존재한 상태로 순환하기 때문에 발생하며 Fig. 3(c)와 같이  $\theta=90^\circ$ 일 경우에는 속도가 매우 느린(약 2cm/s) 거의 층류유동상태로 온도변동이 거의 없다.

Fig. 4에서 경사각에 따른 가열부 출구온도( $T_2$ )의 변화를 살펴보면  $\theta=0^\circ$ 일 때는 온도변동이 매우 크나  $\theta=30^\circ$ ,  $60^\circ$ 인 경우는 낮은 온도에서 변동도 비교적 적은 상태로 안정하게 작동함을 알 수 있다.  $\theta=90^\circ$ 일 때는 변동은 거의 없으나 출구온도가 높게 나타나고 있다. 이는  $\theta=90^\circ$ 일 때는 작동유체의 속도가 느리기 때문에 가열부를 통과하는 시간이 길어지고 이에 따라 상대적으로 많이 가열되어 작동유체의 온도는 상승한다.

Fig. 5는  $Ar=1.0$ ,  $d_i=0.04m$ ,  $P_w=1000W$ ,  $Q_c=10cc/s$ 이고 작동유체가 물인 경우의 루프 경사각도 변화에 따른 전열성능 및 냉각수 온도변동 형태를



**Fig. 4** Temperature fluctuation versus time for various loop inclination angles at the heating section outlet( $Ar=1.0$ ,  $d_i=0.04m$ ,  $P_w=1000W$ ,  $Q_c=60cc/s$ , water)

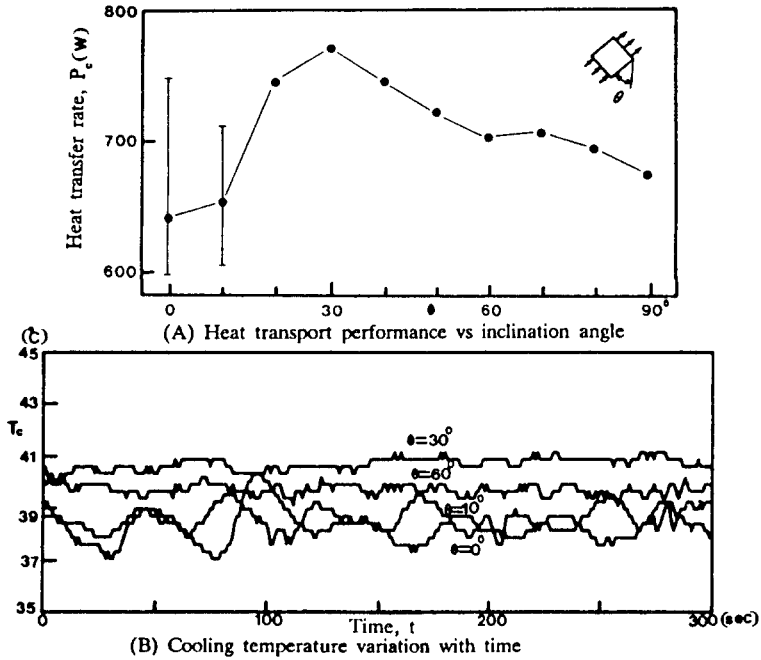


Fig. 5 Performance of single-phase thermosyphon loop( $Ar=1.0$ ,  $d_i=0.04m$ ,  $P_w=1000W$ ,  $Q_c=10cc/s$  water)

각각 나타내고 있다. 여기서 전열성능이란 가열부 입력에 대한 냉각부에서의 냉각량을 말하며 보다 정확한 냉각량을 구하기 위해 냉각수량을 10cc/sec로 하였다. Fig. 5(a)에서  $\theta=0^\circ\sim 10^\circ$  범위에서는 작동유체의 심한 온도변동으로 인하여 Fig. 5(b)와 같이 냉각수 출구의 온도변동이 크며 이로 인하여 전열성능도  $\theta=0^\circ\sim 10^\circ$  범위에서는 크게 변화하고  $\theta=20^\circ\sim 40^\circ$  범위에서 열사이폰의 전열성능은 다른 경사각도보다 높은 것을 알 수 있다. 이는 루우프가  $\theta=20^\circ\sim 40^\circ$  범위로 경사지면 작동유체의 속도가 빠르기 때문이며  $\theta=50^\circ$  이상이 되면 속도는 다시 느려지고 전열성능은 감소하기 시작한다. 이와 같은 경향은 모든 열입력에 대하여 거의 같은 경향으로 나타나므로 루우프의 적정경사각은 전열성능도 크고 온도변동도 비교적 작은  $\theta=20^\circ\sim 40^\circ$ 의 범위로 하는게 바람직하다. Fig. 5(b)에서  $\theta=30^\circ$  이상이 되면 냉각수 출구의 온도 변동폭이  $\pm 0.5^\circ C$  정도이므로 전열량 산출시 약  $\pm 3\%$ 의 오차가 발생한다.

### 3.3 작동유체의 영향

Fig. 6은  $Ar=1.0$ ,  $d_i=40mm$ ,  $P_w=400W$ ,  $Q_c=$

60cc/s로 일정하게 하였을 경우 물과 에칠알콜의 온도변동형태를 나타내고 있다. Fig. 6(a)는  $\theta=0^\circ$  일때 가열부 출구 온도( $T_2$ )변동으로 에칠알콜이 물보다 변동이 크고 작동유체의 온도도 높다. Fig. 6(b), (c)는  $\theta=30^\circ$  일때 가열부 입·출구 및 냉각부 입, 출구에서 물 및 에칠알콜의 온도변동으로서 두가지 작동유체의 온도변동형태는 유사하지만 에칠알콜이 물보다 높은 온도에서 작동하고 있다. 이는 에칠알콜이 물보다 밀도, 비열 및 열전도율이 작고 점성이 크기 때문에 일정 열유속하에서 보다 높은 온도로 작동하기 때문이다.

### 3.4 관직경 및 증형비의 영향

Fig. 7은  $Ar=1.0$ ,  $\theta=0^\circ$ ,  $P_w=1000W$ ,  $Q_c=60cc/s$ 로 일정하게 하고  $d_i=0.02m$ 와  $d_i=0.04m$ 로 변화하였을 경우의 온도변동을 각각 나타내고 있다. Fig. 7(A)는  $d_i=0.02m$ 일 경우의 가열부 입·출구와 냉각부 입·출구의 온도변동형태로써 각 지점의 온도변동이 적고 가열부 입구 및 출구 온도차 ( $T_1-T_2$ )와 냉각부 입구 및 출구의 온도차 ( $T_3-T_4$ )가 큰 것으로 보아 안정한 작동상태이고, Fig. 7(b)는  $d_i=0.04m$ 인 경우로 각 지점의 온도변

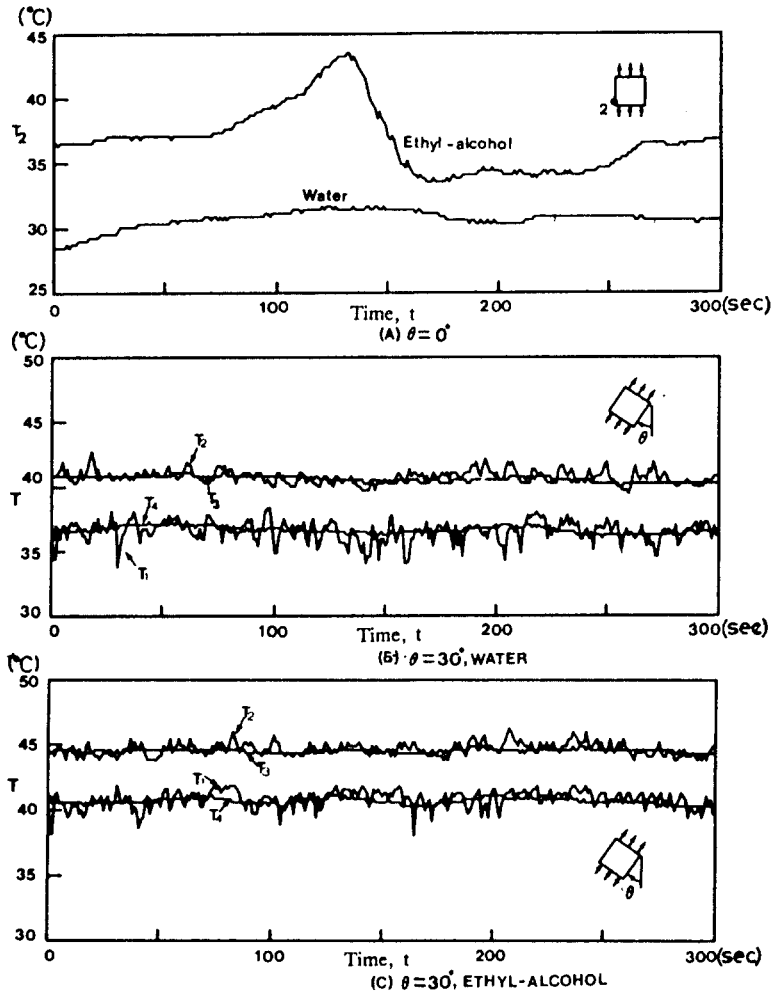


Fig. 6 Temperature fluctuation depending on the working fluid( $Ar=1.0$ ,  $d_i=0.04m$ ,  $P_w=400W$ ,  $Q_c=60cc/s$ , water)

동 형태로 보아 불안정한 작동상태가 나타나지 않으며 모든 실험범위에서 안정한 작동상태를 나타내었다. 이것은 일정 열입력하에서 관직경이 작아지면 전열면적의 감소로 인한 열유속(heat flux)이 증가되고 이로 인하여 작동유체의 속도가 빨라지게 되며  $Re$ 수가 증가하게 되어 유동은 난류로 된다. 즉 관직경의 변화는 열사이폰을 안정 또는 불안정하게 작동시키는 중요한 요소가 되며 동일한 조건하에서 직경이 작으면 흐름은 난류로 바뀌고 관마찰계수는 감소하며 유동은 더욱 안정하게 된다. 그러나 본 실험의 경우  $d_i=0.02m$  및  $d_i=0.04m$  모두 난류유동 상태에 속하고 있다. 이러한 것은

Creveling<sup>(10)</sup>이 언급한 것과 같이 층류유동과는 별도로 난류유동에 대한 안정 영역과 불안정 영역이 열유속의 변화에 따라 각각 존재한다. 그러므로 실험 범위내에서  $d_i=0.02m$ 는 난류유동의 안정영역에 속하고 있으며  $d_i=0.04m$ 의 경우는 불안정 영역에 속하고 있는 것으로 판단되며 난류유동에 대한 불안정 범위를 해석하는 것이 요구된다.

Fig. 8은  $\theta=0^\circ$ ,  $d_i=0.02m$ ,  $P_w=1000W$ ,  $Q_c=60cc/s$ 일 경우 중형비를  $Ar=0.5, 1.0, 2.0$ 으로 변화하였을 경우 가열부 출구온도( $T_2$ ) 변동을 나타내고 있다. 그림에서 중형비가 증가하면 온도변동이 약간 증가하지만 크게 달라지지는 않았다. 이것은  $d_i$



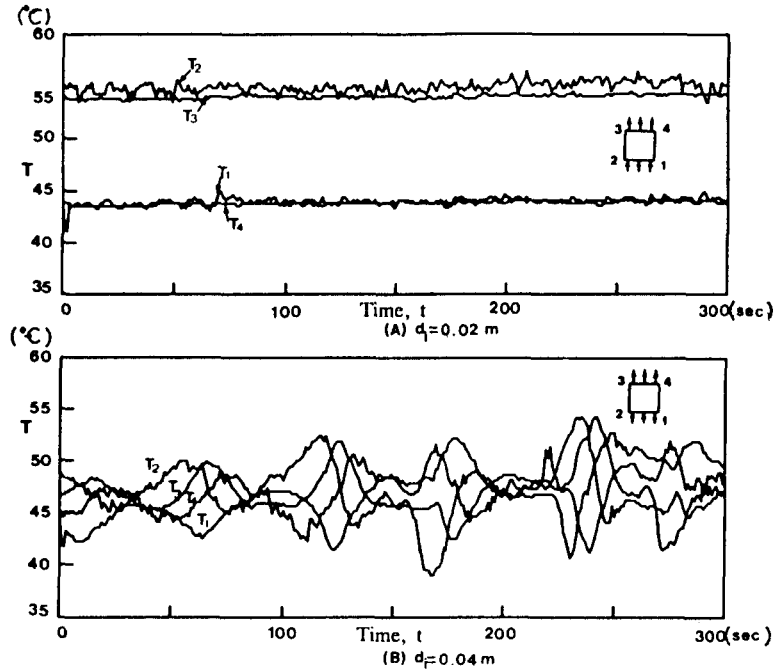


Fig. 7 Temperature fluctuation versus time for various loop diameters( $Ar=1.0$ ,  $\theta=0^\circ$ ,  $P_w=100W$ ,  $Q_c=60cc/s$ , water)

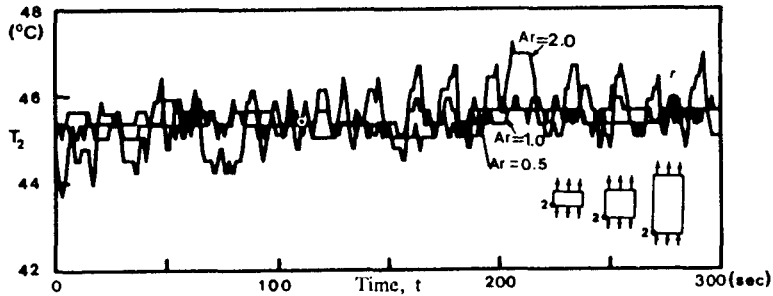


Fig. 8 Temperature fluctuation versus time for various loop aspect ratios ( $\theta=0^\circ$ ,  $d_1=0.04m$ ,  $P_w=1000w$ ,  $Q_c=60cc/s$ , water)

=0.02m인 경우 모든 실험범위에서 안정한 작동상태를 나타내고 있으며 가열부길이에 대한 단열부의 길이가 실험상 크지 않았기 때문이다.

### 3.5 가열부 입력의 영향

가열부 입력은 물일 경우 2000W, 에틸 알콜일 경우 1000W이하로 하여 2상유동이 발생하지 않는 범위에서 실험하였다.

Fig. 9(a)는  $\theta=0^\circ$ ,  $Ar=1.0$ ,  $d_1=0.04m$ ,  $Q_c=$

60cc/s이고 작동유체가 물인 경우 초기 가열부 입력이  $P_w=400W$ 에서 불안정하게 작동할때  $P_w=700, 1300, 1600W$ 로 증가 시킨것이다. 그림에서 가열부 입력이 증가하면 각 부분의 온도변동이 약간 크게 되며 불안정한 작동상태가 계속 유지되고 실험범위내에서 안정한 작동상태로 변화하지 않았다. Fig. 9(b)는  $d_1=0.02m$ ,  $\theta=30^\circ$ 일 경우로 적은 가열부 입력에서도 안정하게 작동할 때 가열부 입력을 증가시킨 것이다. 가열부 입력을 증가시키면 작

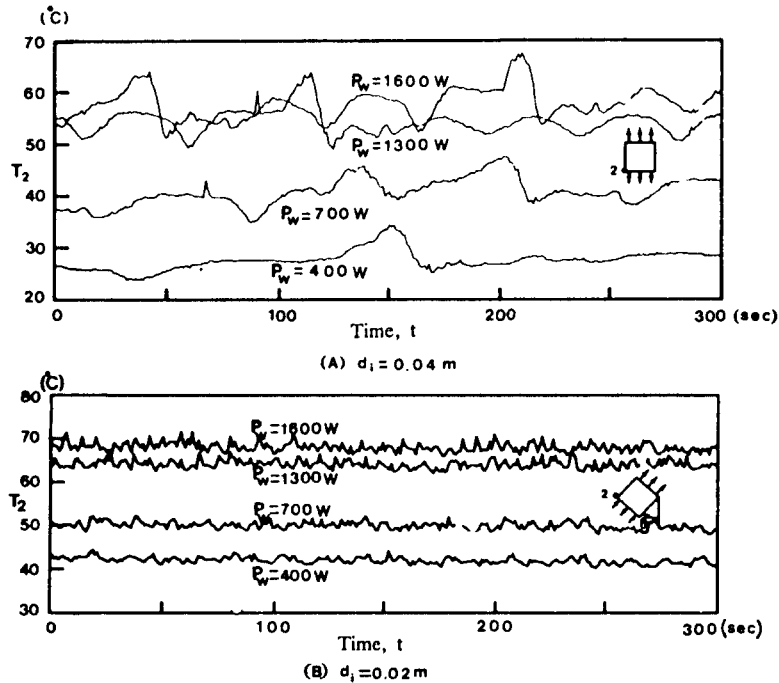


Fig. 9 Temperature fluctuations at the heating section outlet against the heat input ( $Ar=1.0$ ,  $\theta=0^\circ$ ,  $d_1=0.04\text{m}$ ,  $Q_c=60\text{cc/s}$ , water)

동유체의 온도 및 온도변동은 점차 상승하지만 안정한 작동상태를 계속 유지한다. 이것은 본 연구의 실험범위 대부분이 가열부 입력이 큰 난류유동 상태인 것을 의미하며 3.4절에서 설명한 것과 같이  $d_1=0.04\text{m}$ 인 경우는 불안정 부분,  $d_1=0.02\text{m}$ 의 경우는 항상 안정한 부분에 속하기 때문이다.

4. 결 론

단상 직사각형 밀폐 열사이폰 루프에 대하여 루프의 경사각도, 관직경 및 종횡비, 가열부 입력, 작동유체의 종류에 따른 루프내의 유동 및 온도변동 특성과 이에 따른 열사이폰의 전열성능 및 안정 작동범위를 실험적으로 조사한 결과 작동유체의 온도변동은 일정 열입력하에서 루프 경사각도와 관직경에 주된 영향을 받으며 작동유체의 종류 및 종횡비의 영향은 비교적 적게 나타났다. 즉 관직경이 작은 경우( $d_1=0.02\text{m}$ ) 모든 실험범위내에서 안정하게 작동하며 관직경이 큰 경우( $d_1=0.04\text{m}$ ) 경사각도가  $\theta=0^\circ$ 일 때 가장 불안정하고  $\theta=15^\circ$  이상부터는 경사각도의 증가에 따라 점차 안정하게 작동한

다. 그러나 루프의 경사각도를 증가시키면 온도변동은 감소하지만 가열부 출구의 온도가 상승하여 장치자체의 온도가 높아지므로 작동범위는 전열성능도 크고 온도변동도 비교적 작은  $\theta=20^\circ\sim 40^\circ$  범위가 가장 바람직하다. 작동유체의 영향은 물의 경우가 에틸알콜보다 훨씬 좋은 성능을 나타내었다.

후 기

본 연구는 1989년도 연세대학교 학술연구비에 의해 이루어졌으며 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Japikse, D., Jallouk, P. A. and Winter, E. R. F., 1971, "Single-Phase Transport Processes in the Closed Thermosyphon", Int. J. Heat mass Transfer, Vol. 14, pp. 869-887.
- (2) Japikse, D. and Winter, E. R. F., 1971, "Single-Phase Transport Processes in the Open Thermosyphon", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 14, pp. 427-441.

- (3) Bayley, F. J. and Lock, G. S. H., 1965, "Heat Transfer Characteristics of the Closed Thermosyphon", *J. Heat Transfer*, Vol. 8, pp. 30~40.
- (4) Martin, B. W. and Lockwood, F. C., 1963, "Entry Effects in the Open Thermosyphon", *J. Fluid Mech.*, Vol. 19, pp. 246~256.
- (5) 이진호, 최인규, 1976, "입구에 안내관이 있는 개방형 열사이폰에 관한 연구", 연세논총 제13집, 연세대학교 대학원, pp. 275~288.
- (6) Alstad, C. D., Isbin, H. S., Amundson, N. R. and Silvers, J. P., 1955, "Transient Behavior of Single-Phase Natural-Circulation Loop Systems", *A. I. Ch. E. J.* Vol. 1. No. 4, pp. 417~425.
- (7) Grief, R., Zvirin, Y. and Metrol, A., 1979, "The Transient and Stability Behavior of a Natural Convection Loop", *J. Heat Transfer Transactions of the ASME*, Vol. 101, pp. 644~688.
- (8) Keller, J. B., 1966, "Periodic Oscillations in a Model of Thermal Convection", *J. Fluid Mech.*, Vol. 26, Part 3, pp. 599~606.
- (9) Welander, P., 1967, "On the Oscillatory Instability of a Differentially Heated Fluid Loop", *J. Fluid Mech.*, Vol. 29, Part 1, pp. 17~30.
- (10) Crevering, H. F., De Paz, J. F., Baladi, J. Y. and Schoenhals, R. J., 1975, "Stability Characteristics of a Single-Phase Free Convection Loop", *J. Fluid Mech.*, Vol. 67, Part 1, pp. 65~84.
- (11) Metrol, A., Greif, R. and Zvirin, Y., 1981, "The Transient, Steady State and Stability Behavior of a Thermosyphon with Through Flow", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 24, pp. 612~633.
- (12) Zvirin, Y. and Greif, R., 1979, "Transient Behavior of Natural Circulation Loops: Two Vertical Branches with Point Heat Source and Sink", *Int. J. Heat mass Transfer*, Vol. 22, pp. 499~504.
- (13) Metrol, A., Greif, R. and Zvirin, Y., 1982, "Two-Dimensional Study of Heat Transfer and Fluid Flow in a Natural Convection Loop", *J. Heat Transfer Transactions of the ASME*, Vol. 104, pp. 508~514.
- (14) Lavine, A. S., Greif, R. and Humphrey, J. A. C., 1987, "A Three-Dimensional Analysis of Natural Convection in a Toroidal Loop the Effect of Grashof Number", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 30, pp. 251~262.
- (15) Ronen, A. and Zvirin, Y., 1985, "The Behavior of a Toroidal Thermosyphon at High Graetz (and Grashof) Numbers", *J. of Heat Transfer Transactions of the ASME*, Vol. 107, pp. 254~258.
- (16) Metrol, A. and Greif, R., 1985, "A Review of Natural Circulation Loops", *Natural Convection: Fundamental and Application* Edited by Kaka, s., Aung, W., Viskata, R., Hemisphere Pub. Corp. pp. 1033~1071.
- (17) Chen, K., 1985, "On the Oscillatory Instability of Closed-Loop Thermo-Syphons", *J. Heat Transfer Transactions of the ASME*, Vol. 107, pp. 926~832.
- (18) Bau, H. H. and Torrance, K. E., 1983, "On the Effects of Viscous Dissipation and Pressure Work in Free Convection Loops", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 26, pp. 727~734.
- (19) Hung, B.J., and Zalaya, R., 1988, "Heat Transfer Behavior of a Rectangular Thermosyphon Loop", *J. Heat Transfer Transactions of the ASME*, Vol. 110, pp. 487~493.
- (20) Ward-Simth, A.J., 1980, "Internal Fluid Flow: The Fluid Dynamics of Flow in Pipe and Ducts", Clarendon Press, Oxford, pp. 248~306.
- (21) Japikse, D., 1973, "Advances in Thermosyphon Technology", *Advances in Heat Transfer*, Vol. 9, pp. 1~111, Academic Press, New York.