

## 2성분 혼합물을 사용한 2상 밀폐 열사이폰의 작동특성에 관한 연구

곽희열 · 김종보\*

한국에너지기술연구소, \*인하대학교 기계공학과

### A Study on Operating Characteristics of the Two-Phase Closed Thermosyphon with a Binary Mixture

Hee Youl Kwak and Chong Bo Kim\*

Korea Institute of Energy Research, \*Department of Mechanical Engineering, Inha University

#### 요 약

작동유체로서 비등점이 서로 다른 2종류, 즉 2성분 혼합물을 사용한 2상 밀폐 열사이폰은 단일성분의 열사이폰 보다 공학적으로 우수한 성능을 갖는다. 따라서 상 분리 현상이 나타나지 않은 안정적인 혼합물인 물/에탄올의 혼합물을 작동유체로 사용한 열사이폰의 작동특성이 실험적으로 수행되었다. 실험에서는 시동성, 정상상태 작동, 경사시 작동특성 및 열전달 한계(Dry-out) 등에 관한 2성분 열사이폰의 작동특성에 관해서 고찰되었다.

**Abstract**—The two-phase closed thermosyphon with a binary mixture, ethanol and water whose boiling points are different from each other, may show a superior engineering quality over that of single fluid. Operating characteristics of thermosyphon with a stable water/ethanol mixture, which has not shown any mixing gap, was experimentally investigated. Experiments on the thermosyphon with a binary mixture has been carried out for operating characteristics of start-up, steady state, inclination, and heat transfer limitation.

#### 1. 서 론

##### 1-1. 열사이폰의 개요

지난 수십년 동안 열 파이프(Heat pipe) 그리고 단상(Single), 2상 밀폐 혹은 개방형(2-phase closed & open) 열사이폰과 같은 재순환을 기초로 한 열전달 장치에 많은 연구들이 집중되었다. 이들 중에서 2상 밀폐 열사이폰은 원심력(Centrifugal)이나 중력장(Gravitational fields)내에서 작동되었을 때 다른 것에 비해 뚜렷한 장점이 있으며, 열 파이프의 대체로서 2상 밀폐 열사이폰이 응용사례가 발표되고 개발되어 왔다<sup>1,3,5)</sup>.

열 파이프와 열사이폰은 증발과 응축의 잠열(Latent heat)을 이용하는 작동원리는 비슷하지만, 작동유체가 응축되어 증발부로 귀환하는 방법에서 커다란 차이가 있다.

열사이폰은 밀폐용기에 소량의 작동유체를 포함하는

단순 튜브이다. 열이 튜브의 하단부에 적용되었을 때 액체의 일부는 증발하여 상단부로 상승하여 응축되고, 응축된 액체는 중력 때문에 튜브표면을 따라 흘러내린다. 따라서 열사이폰은 구동력(Driving force)이 중력과 원심력에 의존하는 Wickless Heat Pipe라고 불린다. 반면 열 파이프는 튜브 내부 벽을 따라 다공성 Wick 구조를 갖는다. 열 파이프의 경우 응축된 액체를 귀환시키는 구동력은 Wick에 의한 모세관력(Capillary Force)이다.

두 시스템의 가장 두드러진 특징은 작동유체가 밀폐된 용기 내에서 증발과 응축의 상변화를 자력으로 반복하면서 증발부와 응축부 사이를 자연순환하기 때문에 외부힘(External force)의 공급이 필요 없다. 이러한 우수한 특성 때문에 열사이폰은 많은 분야에서 사용되고 있으며, Gas Turbine Blade의 냉각, 열교환기, 전자장비의 냉각, 원자로의 냉각, 동파방지, 태양열 집열기 등의

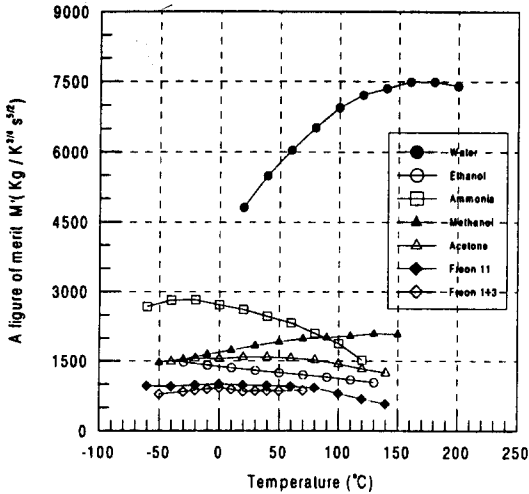


Fig. 1. Merit number of selected working fluids for thermosyphon.

많은 산업분야에서 응용되고 있다<sup>4)</sup>.

1-2. 작동유체

2상 밀폐 열싸이폰의 열전달 특성에 영향을 주는 많은 변수들이 있다. 작동유체의 적절한 선정을 위하여 용기와의 호환성(Compatibilty) 뿐만 아니라 다음 사항을 고려하여야 한다.

- 1) 작동 온도 및 압력 범위
- 2) 중발부에서 최대 열 유속
- 3) 열역학적 물성(비등과 용융점, 증발잠열, 표면 장력, 열전도도, 점성, 밀도, 등)
- 4) 독성 및 폭발성
- 5) 사용하지 않을 때의 작동특성(액체의 결빙 가능성, 시동성, 돌발적인 사고, 등)

또한 작동유체의 선정에 있어서 최대 수송능력(Capillary pumping)을 위해서 소위 Figure of Merit (M, M')를 고려할 경우 다음과 같으며, Fig.1에 열싸이폰의 경우에 대한 작동유체의 M'값을 나타내었다<sup>4)</sup>

i) 열 파이프의 경우  $M = \frac{\rho_l \sigma \mu L}{\mu}$

ii) 열싸이폰의 경우  $M' = \left[ \frac{L(k_i)^3(\rho_l)^2}{\mu} \right]^{1/4}$

이론적으로, 모든 종류의 유체는 작동온도 및 압력에 따라 열싸이폰의 작동유체로서 사용될 수 있다. 작동유체로서 물은 이상의 변수들을 고려해 볼 때 가장 적절하다는 것을 알 수 있다. 또한 물은 값싸고, 쉽게 얻을

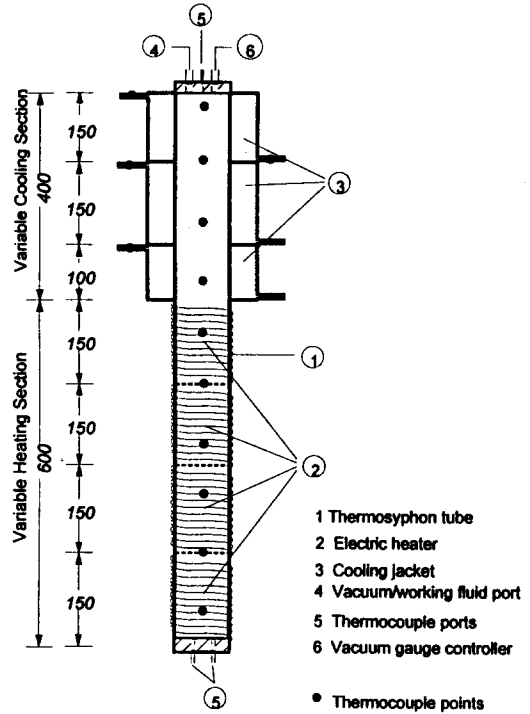


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental apparatus.

수 있고, 화재로부터 안전하다. 반면 물은 높은 melting (freezing)온도, 몇 가지 물질에 대하여 반응하기 쉬운 (alkali metals, 등) 단점도 있다. 또한 ethanol, esters, freon 등도 낮은 온도에서 작동유체로서 사용될 수 있다. 또한 어떤 유체들은 인간에게 해로운 영향 때문에 그 들을 취급할 때는 조심해야 한다. 그러므로 작동유체로서 둘 또는 다중 성분 혼합물의 사용을 고려하고 있다. 2상 밀폐 열싸이폰에서 2성분 혼합물의 열전달은 거의 조사되어 있지 않았다. 어떤 응용분야에서는, 2성분 혼합물 열싸이폰은 단일성분 유체보다 공학적으로 우수한 성능을 보일 수 있다. 예를 들면, 물/ 에탄올 혹은 물/ 에틸렌글리콜의 열싸이폰은 추운 지방의 응용에 적합하며, 다중성분 유체의 사용은 작동온도의 범위를 넓힐 수 있다<sup>7)</sup>.

따라서, 본 연구에서는 2성분 2상 밀폐 열싸이폰에서 정상적인 작동을 저해하는 불안정한 요인들을 고찰하였고, 작동유체로 물을 사용한 열싸이폰과의 특성비교를 위해서 충전량, 몰 분률(Mole fraction), 열 입력과 경사각에 따라서 액체풀에서의 과열과 경사시 나타나는 액마름(Dry-out)현상과 같은 불안정한 현상<sup>2)</sup> 규명에 중점을 두었다.

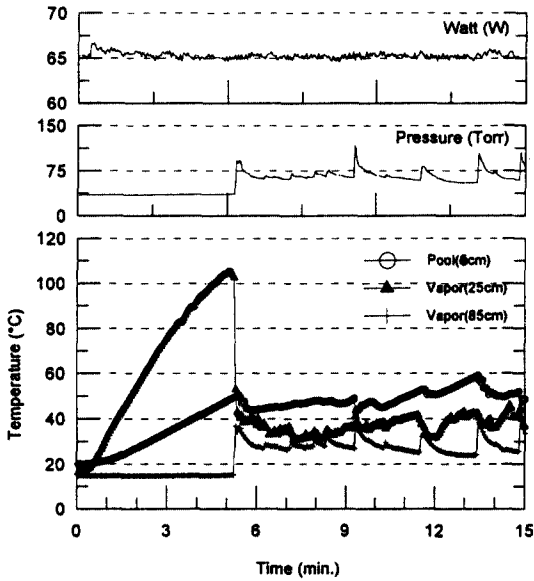


Fig. 3. Unsteady operating characteristics of vertical thermosyphon (Power=65 watt,  $T_c=15^\circ\text{C}$ , Fill=20%  $<x=0.2$  ethanol>,  $L_e/L_a/L_c=45/25/30$ , Flowrate = 100 cc/min.).

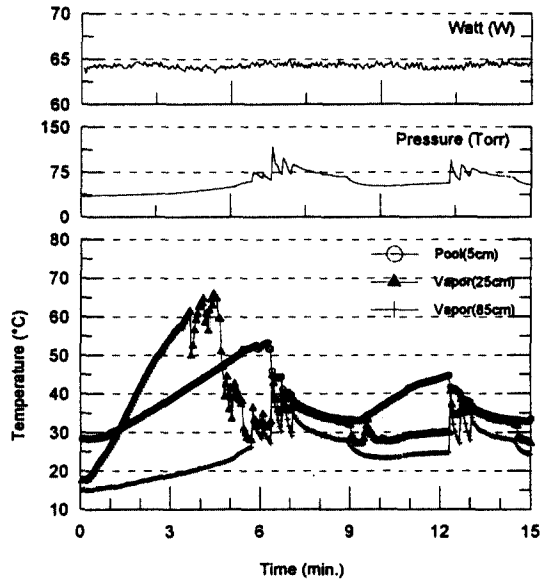


Fig. 5. Unsteady operating characteristics of inclination thermosyphon ( $45^\circ$ ) (Power=65 watt,  $T_c=15^\circ\text{C}$ , Fill=20%  $<x=0.2$  ethanol>,  $L_e/L_a/L_c=60/10/30$ , Flowrate=100 cc/min.).

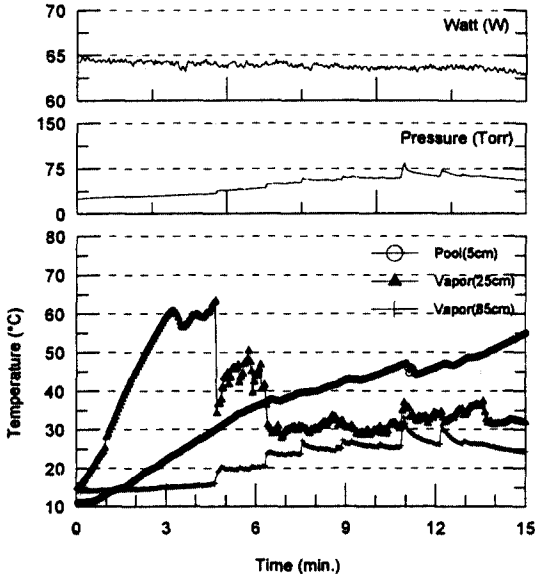


Fig. 4. Unsteady operating characteristics of vertical thermosyphon (Power=65 watt,  $T_c=15^\circ\text{C}$ , Fill=20%  $<x=0.2$  ethanol>,  $L_e/L_a/L_c=60/10/30$ , Flowrate = 100 cc/min.).

## 2. 실험 장치 및 방법

Fig. 2에 실험에 사용한 열싸이폰을 나타내었고, 본 실험에 사용한 주요한 장치로서는 진공 및 작동유체 주입장치, 제작된 실험용 열싸이폰, 열 입력장치(Power supply), 냉각장치 및 시스템(Cooling jacket & Refrigeration circulator), 데이터 수집 및 분석장치 등으로 구성되어 있다<sup>11,12</sup>. 진공 및 작동유체 주입장치는 고진공을 측정할 수 있는 측정 장치(Penning vacuum gauge,  $10^{-6}$  Torr)가 부착된 Oil diffusion pump와 Oil rotary pump ( $10^{-3}$  Torr)가 직렬로 연결되어 있고, 실험 열싸이폰은 외경 19 mm, 두께 1 mm, 길이 1,000 mm로 된 용접이 음매 없는(Seamless) SUS 316 튜브를 사용하였다.

실험용 열싸이폰의 제작은 기계적 가공→세척→조립→진공 및 작동유체 주입 순으로, 제작과정중 특히 주의해야 할 사항은 불응축가스(Noncondensable gas)의 발생인자를 제거하는 것이다.

가열부 및 냉각부 길이의 비( $L_e/L_c$ )의 범위를 넓히기 위해서 단열(Intermediate inactive)길이를 전체 작동 길이와 냉각 Jacket는 각각 가변중발부, 가변응축부를 사용하였다.

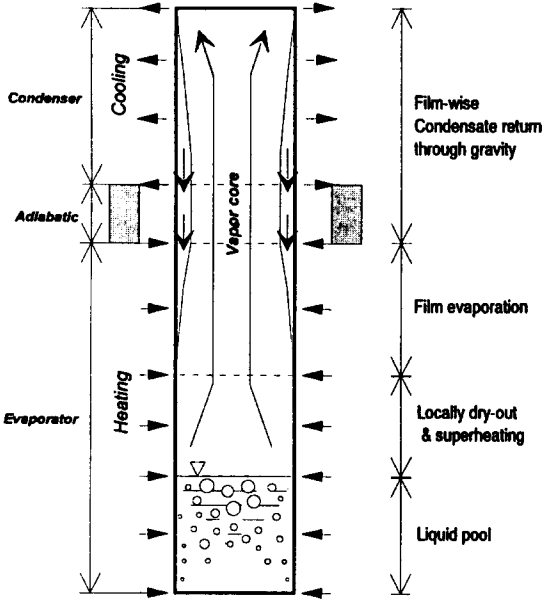


Fig. 6. Schematic representation of vertical thermosyphon.

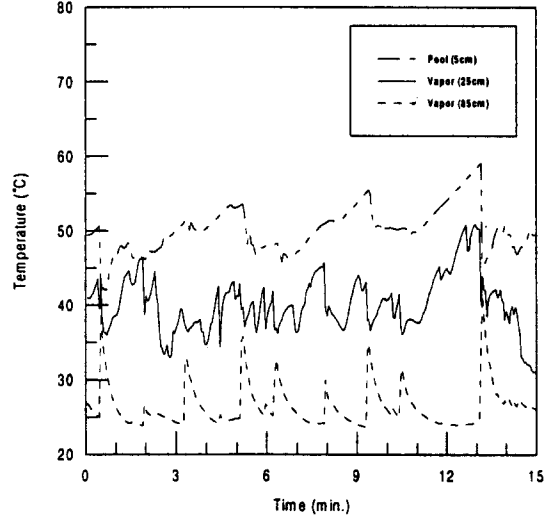


Fig. 8. Steady operating characteristics of vertical thermosyphon (Power=65 watt,  $T_c=15^\circ\text{C}$ , Fill=20% $\langle x=0.2 \text{ ethanol} \rangle$ ,  $L_e/L_a/L_c=60/10/30$ , Flowrate=100 cc/min.).

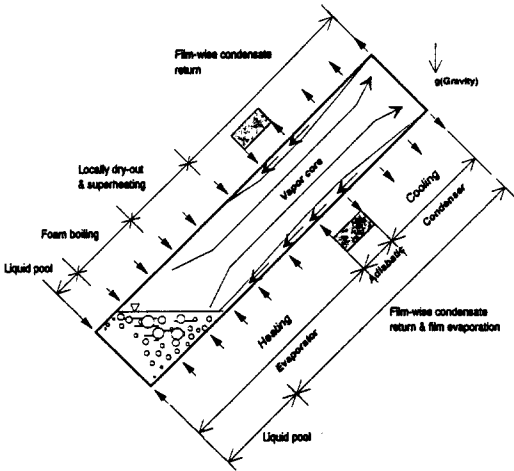


Fig. 7. Schematic representation of inclined thermosyphon.

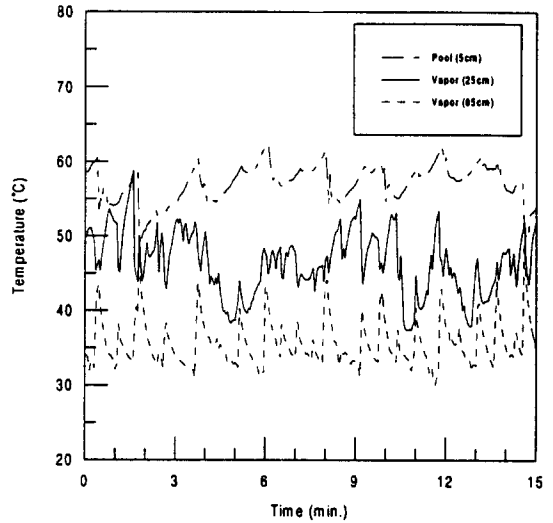


Fig. 9. Steady operating characteristics of vertical thermosyphon (Power=120 watt,  $T_c=15^\circ\text{C}$ , Fill=20% $\langle x=0.2 \text{ ethanol} \rangle$ ,  $L_e/L_a/L_c=60/10/30$ , Flowrate=100 cc/min.).

증발부는 일정 열 유속을 주기 위해 피복열선( $\Phi 1.5$  mm)을 사용한 후 유리섬유(20 mm)로 단열 하였고, 응축부의 냉각 Jacket는 각각 서로 다른 길이 15 cm, 10 cm로 제작되어 밀봉한 후 단열되었다.

실험 장치의 설계는 가열 및 냉각 길이 비가 0.25~4.0, 그리고 단열부 길이는 10 cm, 25 cm, 40 cm로 가열장치 및 냉각장치를 해체하지 않고 실험할 수 있게 하였다.

경사진 열싸이폰을 실험할 때 존재하는 축 대칭성 때문에 열전대(Thermocouple,  $\Phi 0.32$  mm, K-type)는 반대편과 쌍(Upper&Lower edge)을 이루면서 일정 간격으로 설치하였다. 본 연구에서는 응축액체 귀환시

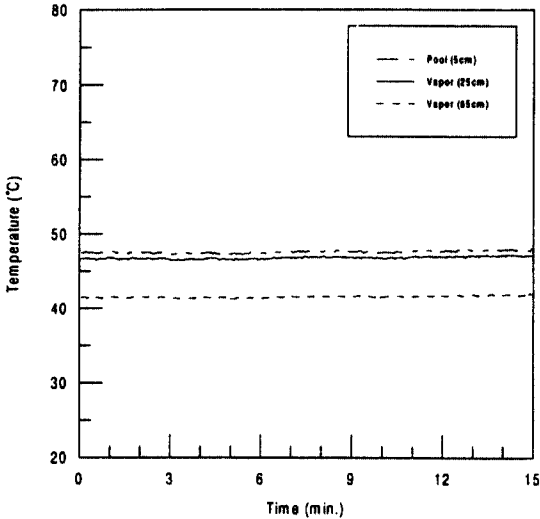


Fig. 10. Steady operating characteristics of vertical thermosyphon (Power=160 watt,  $T_c=15^\circ\text{C}$ , Fill=20%  $<x=0.2$  ethanol>,  $L_e/L_a/L_c=60/10/30$ , Flowrate=100 cc/min.).

중력에 의한 성층류(Annular flow)에서 액막의 두께가 가장 얇은 상단부분을 "Upper edge", 액막의 두께가 가장 두꺼운 하단부분을 "Lower edge"라고 지칭한다. 열전대는 튜브 벽과의 접촉저항을 줄이기 위해서 열전대 접착 용접기(Thermocouple attachment welder)를 사용하여 부착하였다. 또한 열사이폰 내부의 액체물과 증기온도 변화를 측정하기 위하여 장치의 바닥으로부터 5 cm, 25 cm, 85 cm 지점에 열전대 probe를 제작하여 설치하였다.

### 3. 결과 및 고찰

작동유체로서 비등점이 서로 다른 2종류 유체의 혼합물 즉 2성분 혼합물(에탄올+물)을 사용한 2상 밀폐 열사이폰의 작동특성은 단일성분 순수유체의 작동특성과 현저히 다르다<sup>10)</sup>는 것을 발견하였다. 이는 2성분 혼합유체를 사용하는 경우 관 축방향의 벽을 따라 저비점 성분(에탄올)의 온도에 따른 농도분포가 생기기 때문에 혼합물의 열역학적 물성치(표면장력, 밀도, 점성계수 등)에 크게 좌우된다.

본 연구에서는 열입력, 충전량(특히 Mole fraction), 그리고 설치경사각에 따른 관 벽온도와 열사이폰의 내부 온도 변화에 따라서 작동특성을 고찰하였다.

#### 3-1. 시동성

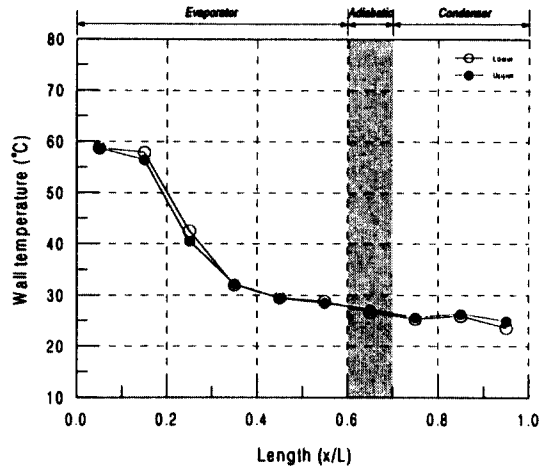


Fig. 11. Axial wall temperature distributions of Lower and Upper edge for vertical thermosyphon (Power=60 watt,  $T_c=15^\circ\text{C}$ , Fill=20%  $<x=0.2$  ethanol>, Flowrate=100 cc/min.).

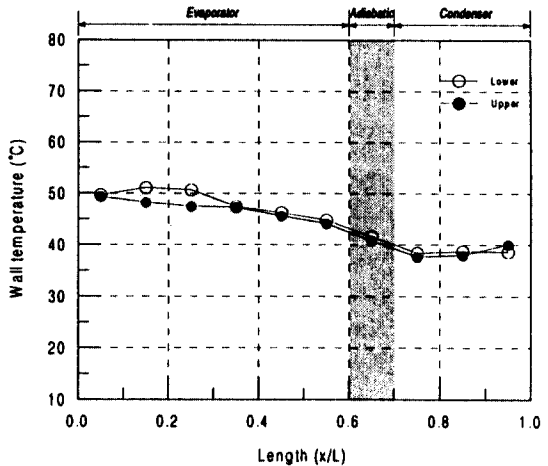


Fig. 12. Axial wall temperature distributions of Lower and Upper edge for vertical thermosyphon (Power=160 watt,  $T_c=15^\circ\text{C}$ , Fill=20%  $<x=0.2$  ethanol>, Flowrate=100 cc/min.).

열사이폰의 초기 시동은 용기 벽에 다공성 워에 작동유체가 충분히 적셔있는 열 파이프에 비해서 상당히 느리다<sup>12)</sup>. 이것은 열사이폰의 증발부는 정적 액체물 구간과 액마름(Dry-out) 구간이 존재 함으로서 초기 시동시 증발부에서 액마름 구간, 액체물의 과열(Overheating) 현상, 그리고 기계음을 동반한 Geysers비동에 의한 액마름 구간의 Re-wetting으로 불안정한 작동주기의 반복에 따른 시간지연으로 나타났다. Fig. 3-4는 열입력

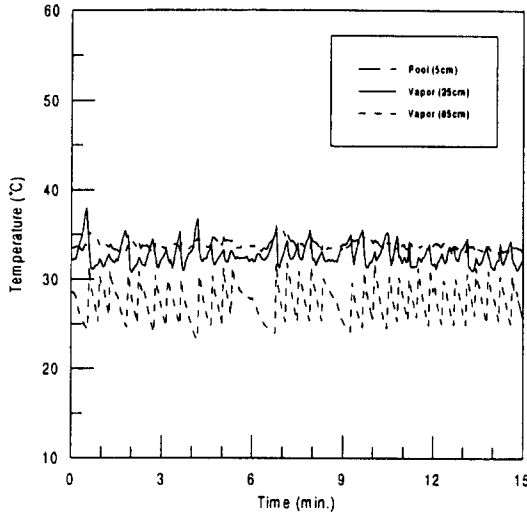


Fig. 13. Steady operating characteristics of inclined thermosyphon (Power=65 watt,  $T_c=15^\circ\text{C}$ , Fill=20%  $\langle x=0.2 \text{ ethanol} \rangle$ ,  $Le/La/Lc=60/10/30$ , Flowrate=100 cc/min.,  $Anlge=75^\circ$ ).

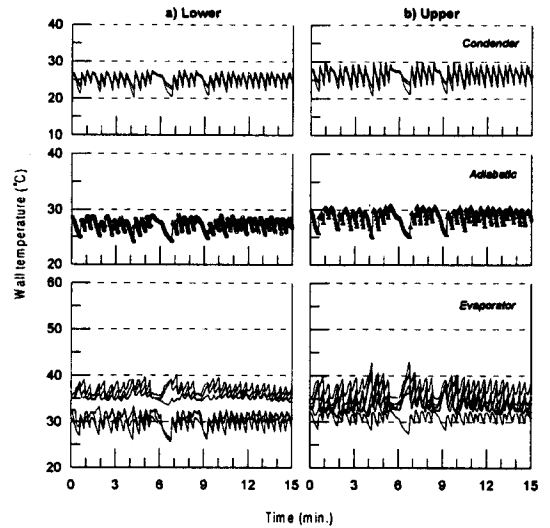


Fig. 14. Steady operating characteristics of wall temperature distribution for inclined thermosyphon (Power=65 watt,  $T_c=15^\circ\text{C}$ , Fill=20%  $\langle x=0.2 \text{ ethanol} \rangle$ ,  $Le/La/Lc=60/10/30$ , Flowrate=100 cc/min.,  $Anlge=75^\circ$ ).

이 65 Watt이고, 증발부 길이비가 서로 다른 수직 열싸이폰의 초기 시동특성을 나타낸 것으로 증발부길이가 60 cm인 경우가 45 cm인 경우에 비해 증발부 중간부에서 부분적인 액마름과 과열현상 때문에 시동특성이 상당히 지연되는 불안정한 작동이 두드러지게 나타나고 있었다. 열싸이폰의 초기 시동의 불안정한 특성은 폭발적인 Geyser비등에 의해서 증발부 용기 벽에서의 국부적인 액마름 현상과 과열현상이 귀환하는 응축된 액체의 의해서 액마름 지역이 Re-wetting되면서 정상적인 작동을 시작하였다.

또한 Fig. 5는 같은 열입력하에서 경사각이  $45^\circ$ 인 경우의 2성분 혼합물을 사용한 열싸이폰의 시동특성으로 Fig. 4에 비해서 액체몰 비등 저항의 감소와 액체몰의 표면근처에서 저비점성분의 활발한 비등에 의해 상당히 시동이 빨라졌음을 알 수 있었고, 2성분 혼합물에서 저비점 성분이 먼저 증발-응축되면서 자유표면 부근의 비등주기와 액체몰에서의 비등주기는 서로 다르게 나타났다.

단일성분(물) 열싸이폰의 작동특성은 Vapor(25 cm)와 Vapor(85 cm)지점의 온도변화가 같이 거동하면서 응축부로의 열수송은 전적으로 Geyser비등에 의존하였다. 반면, 2성분 혼합액을 사용할 경우는 Vapor(25 cm)의 액체몰 표면과 Pool(5 cm)의 액체몰에서의 비등으로 인해 응축부로의 열수송도 증가하는 결과로 나타났다.

열싸이폰의 대표적인 초기의 불안정한 작동특성은

Fig. 6-7에 나타난 바와같이 수직과 경사진 경우에 대해서 자유표면의 증발과 액체몰 비등→증발부 중간에서의 액마름 현상에 따른 과열 현상→Geyser 비등→국부적인 액마름의 Re-wetting에 의한 정상작동의 순으로 열싸이폰의 초기 시동주기가 나타났다는 것을 알 수 있었다.

본 연구에서 Geyser비등이란 2상 유동에서 불안정한 유동변동 현상으로 하단부가 가열되는 밀폐 수직 칼럼에서 볼 수 있으며, 액체몰이 정수압(Hydrostatic head)에 의해 위축된 증기가 Slug형태로 폭발하는 현상을 의미한다<sup>3)</sup>.

### 3-2. 열입력

단일성분 열싸이폰의 작동특성은 열입력의 증가에 따라 Geyser 비등 주기는 짧아졌고, 정상상태에서 Vapor(25 cm)와 Vapor(85 cm)의 온도변화 일치하면서 주기적인 변동이 나타났으며, 응축부로의 열수송은 거의 Geyser비등에 의존한다는 것을 알 수 있었다<sup>3,6,12)</sup>.

Fig. 8-9는 열입력의 증가에 따른 2성분 혼합물을 사용한 열싸이폰의 정상상태의 작동특성을 나타낸 것으로, 열입력의 증가에 따라서 Pool(5 cm), Vapor(25 cm)와 Vapor(85 cm)지점의 온도 변화는 서로 다른 주기를 나타냈으며, 이것은 2성분 혼합물을 사용한 열싸이폰의 특성으로 나타났다. 그 결과 액체몰에서의 과열현상이 다소 줄어들었고 서로 다른 주기에 의해 열수송도 증

가하였다. 또한 Fig. 10은 열입력이 160 Watt의 경우, 액체풀이 없어지면서 Geyser 비등과 액체풀에서의 과열현상도 사라지고, 작동유체가 용기벽에 일정한 응축액막(Condensate film)을 형성하면서 증발과 응축에서의 기-액 평형상태를 유지하면서 작동하는 매우 안정적인 작동특성을 나타냈다.

열입력의 증가에 대한 열싸이폰의 길이방향의 벽면 온도구배에 따른 등온특성은 Fig. 11-12와 같고, 본 실험에서는 정상상태에서 15분 동안의 평균한 벽 온도를 나타낸 것으로 열입력이 160 Watt 이하에서는 액체풀의 과열현상에 따라 커다란 온도구배를 가지면서 불안정한 작동을 하지만, 열입력이 160 Watt에서는 축방향에 대한 온도차가 10°C 정도로 탁월한 등온성을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

### 3-3. 경사각

열싸이폰을 산업분야에 적용할 경우 경사각에 대한 작동 특성은 무엇보다도 중요한 변수이다<sup>9)</sup>. 수직 열싸이폰은 작동유체의 종류(단일성분, 2성분)에 따라 작동 특성은 크게 변화하지 않고 액체풀의 Geyser비등 크기와 주기에 따라서 작동한다는 것을 알 수 있다<sup>12)</sup>. 단일성분(물) 열싸이폰에서는 액체풀의 과열상태가 일정하게 유지되면서 비등주기가 짧아지는 반면, Fig. 13은 열입력이 65 Watt에서 정상상태의 열싸이폰의 특성을 경사각이 75°인 경우를 나타낸 것으로 단일성분 열싸이폰에서 나타난 액체풀에서의 과열특성은 없어졌고, 비등주기가 짧아져서 결국 열수송이 증대함을 알 수 있다.

또한 단일성분인 경우 모든 경사각에서 열싸이폰의 불안정한 작동특성으로써 증발부 상부의 Upper edge에서의 국부적인 액마름현상이 작동 및 열수송 성능에 증대한 열전달 한계로서 나타났다. Fig. 14는 경사각이 75°인 경우 증발부, 단열부 및 응축부의 관 벽온도를 토대로 Upper와 Lower edge에서의 온도분포를 나타낸 것으로 2성분 혼합물의 경우 증발부 상단부에서 경사시 나타났던 국부적인 액마름현상은 거의 나타나지 않았다. 이것은 저비점 성분인 에탄올의 표면장력 때문으로 Wetting접촉각이 0에 가까워( $0 < \theta < 90$ ), 관 벽에 더욱 친화력이 있기 때문에 관 벽의 원주방향으로 균일하지는 않지만 응축액막(Condensate film)을 형성하기 때문에 증발에 대한 액마름 현상이 나타나지 않는 것으로 사료된다.

## 4. 결 론

2성분 혼합물(에탄올+물)을 사용한 2상 밀폐 열싸

이폰에서의 작동특성을 실험적으로 고찰해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 2성분 혼합물을 사용한 열싸이폰의 작동특성은 저비점 성분(에탄올) 비등과 액체풀 비등이 서로 다른 주기로 나타났으며, 그 결과 액체풀에서의 과열현상이 줄어들었다.

2) 혼합유체에서는 단일성분 유체에서의 불안정한 작동특성인 기계음을 동반한 Geyser비등의 강도가 현저히 줄어들었으며, 서로 다른 비등 주기로 인하여 액체풀에서의 과열현상도 없어졌다. 특히 열입력이 160 Watt에서는 Geyser비등과 액체풀의 과열현상도 사라지고, 응축액막에 의한 증발과 응축의 기-액 평형상태를 유지하면서 작동하는 매우 안정적인 작동특성이 나타났다.

3) 정상상태에서 경사각에 따라서 단일성분 유체(물)의 경우 증발부 상단의 Upper edge에서의 국부적인 액마름현상과 액체풀에서 과열현상이 모든 경사에서 나타났으나, 2성분 혼합물을 사용한 열싸이폰에서는 액체풀의 과열특성은 없어졌고, 비등주기도 짧아져서, 열수송 능력이 증대하였고, 증발부 상단의 Upper edge에서의 국부적인 액마름현상도 나타나지 않았다. 이것은 열싸이폰의 축방향에 따른 저비점 성분(에탄올)의 온도에 따른 농도 분포에 따른 표면장력과 접촉각(Wetting angle)에 기인한 것으로 사료되며, 몰 분율(Mole fraction)에 따른 국부적인 열전달한계에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

## 참고문헌

1. Andros, F.E. and Florschuetz, L.W. : "The two-phase closed thermosyphon: An experimental study with flow visualization", In T.N. Veziroglu & S. Kakac (Eds.), Two-phase transport and reactor safety. Washington: Hemisphere Publishing (1978).
2. Boure, J.A., Bergles, A.E. and Tong, L.S. : "Review of two-phase flow instability", ASME-AIChE heat transfer conference (1971).
3. Casarosa, C. and Latrofa, E. : "The geyser effect in a two-phase thermosyphon", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 26, No. 6, pp. 933-941 (1983).
4. Dunn, P.D. and Reay, D.A. : "Heat Pipes", 3rd edition, Pergammon Press (1982).
5. Gross, U. and Hahne, E. : "Instability and unproportional pressure variations near the thermodynamic critical point in a closed thermosyphon", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 28, No. 8, pp. 1551-

- 1561 (1985).
6. Liu, J.F. and Wang, J.C.Y. : "On the pulse boiling frequency in thermosyphons", J. of Heat Transfer, 114, pp. 290-292 (1992).
  7. Whalley, P.B. : Boiling, Condensation, and Gas-Liquid Flow", Clarendon Press, Oxford (1987).
  8. Zvirin, Y. : "The instability associated with the onset of motion in a thermosyphon", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 28, No. 11, pp. 2105-2111 (1985).
  9. 白石 正夫, P. Terdtoon : 村上 正秀, "熱サイフォン形ヒートパイプ内の流動におよぼす傾射角の効果", 第29回 日本傳熱 シンポジウム講演論文集 (1992).
  10. 深野 徹, 角口 勝彦 : "二成分ヒートパイプの非正常現象と作動限界に関する研究", 第28回日本傳熱シンポジウム講演論文集 (1991).
  11. 한국에너지기술연구소 : "상변화와 고효율 전열소자를 이용한 태양열 온수급탕 시스템 개발 (II)", 911 A203-112DG1 (1991).
  12. 곽희열, 김종보 : "SUS-물을 사용한 2상 밀폐 열싸이폰의 작동특성에 관한 연구", 태양에너지, Vol. 14, No. 3, pp. 75-85 (1994).