

## 소형 밀폐형 이상 열싸이펀에서 삽입 세선이 기포상승에 미치는 영향

### Effect of a Thin Wire Insert on the Bubble Rise in a Miniature Two-Phase Closed Thermosyphon

김 원 태\*, 이 윤 표\*\*

W. T. Kim, Y. P. Lee

**Key words :** Miniature Two-Phase Closed Thermosyphon(MTPCT : 초소형이상열싸이펀), Bubble Rising(기포상승), Capillary Force(모세관힘), Thin Wire(세선), Surface Tension(표면장력)

#### Abstract

Experimental investigations are carried out for the characteristics of bubble rise in the Miniature Two-Phase closed Thermosyphon(MTPCT) with a thin wire insert. The working fluids applied as experimental media are of three kinds: water, methanol, and ethanol. The effects of combination of the inclination with diametric ratio  $\alpha(=d_0/D_i)$  on rising velocity of a large bubble in the thermosyphon are explicitly analyzed. The realm of a movable bubble and the critical value of  $\alpha$  are iteratively pursued to interpret the region Figures-of-Break, rooted in the governing physics relations, according to the application of working fluid. Experimental results are compared with those of analysis and critical ranges for  $\alpha$  and  $D_i$  were ascertained from comparisons.

#### 기 호 설 명

g : 중력가속도 (m/s<sup>2</sup>)  
 J<sub>1</sub> : 1차 Bessel 함수  
 H : 액체-기체의 경계면  
 MTPCT : 소형 밀폐형 열싸이펀  
 P : 압력 (kg/m<sup>2</sup>)

t : 시간(s)  
 u : z방향 속도 (m/s)  
 U : 기포의 상승 속도 (m/s)  
 v : r방향 속도 (m/s)  
 V : 속도의 스칼라량  
 Y<sub>1</sub> : 2차 Bessel 함수

#### 그리스 문자

$\alpha$  : 계수 ( $= \frac{d_0}{D_i}$ )

\* 정회원, 한국전자통신연구소 실장기술연구실

\*\* 정회원, 한국과학기술연구원 공조 환경제어연구팀

$\beta$	: 유동 통과 면적비 ( $=1-\alpha^2$ )
$\delta$	: 고유값(eigenvalue)
$\lambda$	: 시험편 길이(cm)
$\psi$	: 유동함수
$\rho$	: 밀도
$\sigma$	: 표면장력

#### 하첨자

p	: 기포 표면의 임의점
s	: 기포의 정점
o	: 열싸이폰의 벽면
i	: 삽입되는 와이어의 벽면

## 1. 서 론

최근들어 21세기 고도 정보사회에서 정보 통신망의 기본이 되는 초고속 정보 통신 기반 구축과 관련한 디지털 및 광통신 기술등 정보 산업의 혁신적인 발전으로 반도체 기술 또한 고속화, 소형화되어 가고 있다. 시스템에서의 발열밀도도 급격히 증가하여 초고속 정보통신망의 일환인 비동기식 다중 모드(ATM: Asynchronous Transfer Model) 차세대 교환기에서는 약 3.5kW의 열을, B-ISDN용 BDCS 및 10Gbps 광전송시스템은 약 4kW의 열을 시스템으로 부터 발산하고 있다<sup>(1)</sup>. 따라서 기존의 자연대류나 강제대류에 의한 냉각으로는 냉각성능에 한계가 있다. 상변화에 의하여 열이 전달되는 히트파이프는 고성능화, 소형화가 함께 추진되는 정보통신기기의 효과적인 냉각용 소자로 주목되고 있다. Heat Pipe는 1960년대 부터 개발되어 우주선의 냉각에 사용되어 왔으며 1980년대 오일파동 이후에는 폐열회수에도 적용되고 있다. 그러나 최근 전자기기가 소형화됨에 따라 이에 적용할 Heat Pipe도 소형화가 요구되고 있다. Heat Pipe가 소형화되어 직경이 5mm 이하의 영역에 들어오면 기존의 Heat Pipe와는 다른 현상들이 발생하므로 이에 대한 특별한 고려가 있어야 한다.

1984년 Cotter<sup>(2)</sup>는 기존의 히트파이프와 다른 개념의 초소형 히트파이프를 제안하였다. 이 히트파이프는 사각형의 각 모서리가 위크의 기능을 하

도록 제작한 것으로 사각형의 한 변은 1mm 이었다. Babin<sup>(3)</sup> 등은 이와 같은 초소형 히트파이프의 성능에 관한 이론식을 제시하고 이 결과를 실험과 비교하였다. 그러나 이와 같은 초소형 히트파이프는 가공에 있어서 간단치 않다.

Two-Phase Closed Thermosyphon은 증력에 의해 작동유체의 복원력이 이루어 진다는 점에서 모세관력에 의해서 액체의 복원이 이루어지는 히트파이프와 구별된다. 이영수<sup>(4)</sup> 등은 Two-Phase Closed Thermosyphon을 계속 작게 만들어 내경이 수 mm에 이르면 기포가 더 이상 상승하지 않게 됨을 관찰하였다고 보고하였다. 이와 같이 기포의 상승이 중지되면 작동유체의 순환이 이루어 지지 않게 되어 더 이상의 작동은 이루어 지지 않게 된다. 이영수<sup>(4)</sup> 등은 이와 같이 기포의 상승이 이루어 지지 않는 미세한 Two-Phase Closed Thermosyphon에 가는 와이어를 삽입하면 기포의 상승이 재개됨을 발견하였다. 이윤표등<sup>(5)</sup>은 가는 와이어를 삽입한 초소형 밀폐형 이상 열싸이폰에서 기포의 상승과 관련한 이론적 해석을 수행하였다. 이 이론적 해석에서는 Nickens<sup>(6)</sup> 등이 포텐셜 방정식으로 부터 유도된 튜브내 기포의 거동 관련식을 이중원관에 대하여 수정하여 사용하였다. 이론적인 해석은 와이어의 삽입이 기포의 움직임 재개할 수 있음을 보여주고 있다. 그러나 이윤표 등이 도출한 이론적인 결과를 검증하기 위해서는 좀더 다양한 작동유체에 대하여 기포의 상승속도 등과 관련한 충분한 실험적인 자료가 필요하다.

본 논문에서는 소형 유리관에 가는 와이어를 삽입한 초소형 밀폐형 이상 열싸이폰(MTPCT; Miniature Two-Phase Closed Thermosyphon)의 기포 상승에 관한 모델을 정립하기 위한 실험자료를 도출함을 목적으로 하였다. 구체적인 내용으로는 밀폐형 이상 열싸이폰의 경사각, 작동유체의 종류, 삽입 와이어의 지름에 따른 기포 상승속도 등을 측정하여 이론적인 결과와 비교 하였다.

## 2. 실험장치 구성 및 방법

Fig.1은 가는 와이어가 삽입된 MTPCT의 수직 단면도이다.

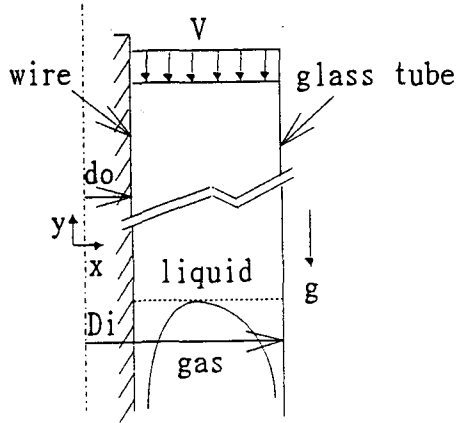


Fig.1 Coordinate for air slug rising in the MTPCT

기포의 형상은 좌표축으로부터 가는 와이어의 지름을  $d_o$ 라하고 유리관의 내부 직경을  $D_i$ 라 하여 나타내었다. 가는 와이어가 삽입된 MTPCT를 유리로 제작하여 한쪽 부위를 가열하면 이 부위가 증발부위가 되고 MTPCT 내부에 기포가 생성되어 상승하는 것을 관찰할 수 있다. MTPCT가 작동하기 위해선 증발부에 존재한 작동유체의 내부로부터 기포의 발생이 있어야 하며 발생한 기포가 상승하여 응축부로 이동하여야 한다. MTPCT에서 기포의 생성은 가열에 의하여 발생하지만 기포의 상승은 기포와 주변 액체와의 역학관계에 의해 이루어진다. 본 연구의 주안점은 MTPCT의 작동이 가능하기 위하여서는 일단 생성된 기포가 증발부로부터 응축부로 이동하여야 하는데 이 기포의 이동이 가능한 한계는 어떤 조건이며 이동하고 있는 기포의 상승속도는 어떤 값을 가지는가이다. 앞서 인용된 이영수 등<sup>(4)</sup>의 논문에 의하면 MTPCT가 dry out 되는 기포의 발생이 멈추기 때문이 아니라 기포의 상승이 멈추기 때문이라고 보고하고 있다. 따라서 본 논문에서는 기포의 발생영향은 가급적 줄이고 단지 기포상승과 관계된 변수만을 도출하여 하였고 때문에 가열에 의하지 않고 단순히 위치 변화로 내부 기포의 상승을 관찰하였다. MTPCT는 작동유체를 주입한 유리관의 내부에 stainless steel 재질의 가는 와이어를 삽입하여 teflon 마개로 밀봉

Table 1 Characters of Working Fluids in MTPCT

Media	Water	Ethylalcohol	Methanol
Character	H <sub>2</sub> O	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	CH <sub>3</sub> OH
Mole			
purity(%)	99.99	99.9	99.8
density(kg/m <sup>3</sup> )	998.2(L) 0.0173(G) 1.205(Air)	789(L)	791.5(L)
Surface tension (N/m)	73.1E-3	22.8E-3	22.6E-3
Dynamic viscosity (Ns/m <sup>2</sup> )	100.3E-5	120.1E-5	58.4E-5

시켜 만들었다. 또한 기포의 상승을 진공후 작동유체를 주입하여 제작하는 일반 Two-Phase Closed Thermosyphon과 달리 MTPCT 전체에 대하여 관찰하기 위하여 유리관의 전체를 작동유체로 채우고 상단부에 약간의 공기를 남긴후 유리관을 역전시킴으로써 기포의 상승하는 현상을 관찰하였다.

용기내 공기 기포의 거동을 관찰한 이유는 단지 기포의 상승여부와 그 속도를 측정하기 위함이 본 연구의 주목적이고 공기는 실제의 MTPCT내의 작동유체에 의한 증기 기포의 표면장력, 밀도등이 거의 일치하기 때문이다. 실험대상으로 채택된 작동유체를 Table 1에 나타내었다.

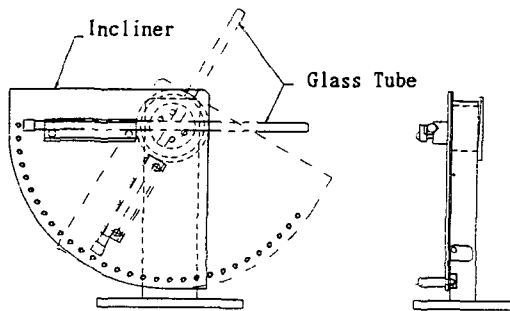
본 연구로 부터 채택된 유리관 및 가는 와이어의 조합을 비교 matrix 구조로 Table 2에 나타내었다. Fig.2는 MTPCT의 경사계를 도시한 것으로 MTPCT의 경사에 따른 기포의 상승속도를 측정하기 위하여 제작하였다. Table2로부터 채택된 각 경우에 대하여 MTPCT의 가는 유리관을 경사계에 고정시켜 각도를 30°, 45°, 60°, 90° 등으로 변화시켜 실험을 수행하였다.

기포의 움직임은 MTPCT를 180° 역전하기 전부터 움직이기 시작한다. 따라서 기포가 움직이기 시작하여 일정속도에 도달하기에는 일정 거리가 있어야 한다. 실험에서는 이와 같은 오차를 가급적 줄이고 일정속도에 도달한 기포의 속도를 측정하기

Table 2 Tabulated Dimensions of  $D_i$  and  $d_o$  in a Minature Two-Phase Closed Thermosyphon

(Unit : mm)

$D_i$	1.76	3.3	4.52	5.71	7.82	10.42	Case
$d_o$	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	1
	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	2
	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	3
	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	4
	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	5
	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	6
	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	7
	—	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	8
	—	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	9
	—	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	10
	—	—	3.22	3.22	3.22	3.22	11
	—	—	3.52	3.52	3.52	3.52	12
	—	—	4.01	4.01	4.01	4.01	13
	—	—	—	5.0	5.0	5.0	14
	—	—	—	—	6.0	6.0	15
	—	—	—	—	6.5	6.5	16
	—	—	—	—	—	7.5	17

Fig.2 Incliner for glass tube in the MTPCT :  
(a) front view, (b) side view

위하여 MTPCT 전체 길이를 300mm로 하였다. 또한 측정부위는 MTPCT의 중간을 기준으로 일정거리 하얀 띠를 관의 좌우에 각각 접착시켰는데 하얀 띠 사이의 거리는 100mm로 하였다. 유리관내 형성된 상승하는 기포가 이 하얀 띠 사이를 통과하는 시간을 측정하여 하얀 띠 사이의 거리로 부터 속도

를 산출하였다. 측정은 Fig.2와 같은 경사계를 사용하였고 기포의 상승시간은 초시계(Casio, HS-20, sensitivity :  $10^{-2}$ sec)로 측정하여 다음식으로 부터 상승속도  $U$ 를 구하였다.

$$U = \frac{\lambda}{t} \quad (1)$$

여기에서  $\lambda$ 는 유리관에 부착된 흰띠 사이의 거리이며  $t$ 는 기포가 이 사이를 통과한 시간(sec)을 나타낸다. 하나의 경우에 대하여 반복적으로 10번을 측정하여 그 평균값을 속도로 판정하였으며 측정에서의 오차범위는 5%를 유지하였다.

### 3. 실험결과 및 분석

Fig.3은 작동유체가 물인 경우에 대하여 Table 2에 나타난 것처럼 MTPCT의 유리관 직경( $D_i$ )을 1.76, 3.3, 4.52, 5.71, 7.82, 10.42mm 변화시켰을 경우에 대하여 MTPCT 내의 기포(22°C)의 상승

속도  $U$ 를 측정된 것이다.

그림에서 보이는 것처럼  $D_i$ 가 10.42mm인 경우를 제외하고는 MTPCT의  $\alpha$ 가 증가함에 따라 상승속도가 비례적으로 증가하다가  $\alpha$ 값이 0.6 가까이에서 최대가 됨을 알 수 있다.  $D_i$ 가 10.42mm에서는  $\alpha$ 에 따라 처음에는 상승속도가 약간 증가하다가 곧 거의 일정한 값을 유지하였다.  $D_i$ 가 1.76mm에서는  $\alpha$ 값이 0.3까지에서는 기포가 움직이지 않았고  $\alpha$ 값이 0.3보다 큰 세선을 삽입하면 기포는 상승한다. 상승속도의 최대는  $\alpha=0.55$ 에서 0.005m/s 정도였다. 그러나  $\alpha$ 값이 0.8이상에서는 기포는 상승하지 않았다.  $\alpha$ 값이 0.8이상에서 기포의 움직임이 정지하는 이유는 삽입세선과 유리관의 벽과의 간격이 매우 적으므로 점성에 의하여 움직임이 불가능하게 되기 때문으로 판단된다. 또한 내경 3.3mm에서는  $\alpha=0.1$ 보다 작으면 기포가 상승하지 않았고 그보다 큰  $\alpha$ 에서는 기포의 속도가 빠르게 증가하였다. 또한 기포상승속도의 최대값은  $\alpha=0.6$ 에서 나타났다. 그러나  $D_i=4.52$ mm부터는 삽입세선이 없어도 기포 상승이 가능하였다. 이와 같이 직경 3.3mm이하에서는  $\alpha=0$  즉 삽입세선이 없을 때는 기포상승이 이루어지지 않았고 세선을 삽입하면 기포의 상승이 재개되는 현상은 이영수등<sup>(4)</sup>의 결과와 일치하였다.

Fig.4와 Fig.5는 각각 작동유체가 에탄올 및 메탄올에 대해 기포의 상승속도를 측정된 것이다. 그림에서 보이는 것처럼 전체적으로 작동유체가 물이었을 때 비해 상승속도가 약간 증가한다. 직경 1.76mm에서 와이어를 삽입하여야 기포의 상승이 가능한 한계는 에탄올인 경우  $\alpha=0.27$ , 메탄올일 경우  $\alpha=0.25$ 로 작동유체가 물인 경우  $\alpha=0.3$ 보다 약간 낮았다. 또한 에탄올 및 메탄올 인 경우는 직경 1.76mm에서  $\alpha=0.8$  이상에서도 기포의 상승이 가능하였다. 에탄올 및 메탄올에서 직경( $D_i$ )이 10.42mm인 경우는 세선을 삽입하지 않아도 기포의 상승이 가능하였으므로 삽입세선의 크기 변화 즉  $\alpha$ 에 대해서는 다양한 실험은 생략하였다.

Fig.6 (a), (b), (c)는 유리관의 크기와 삽입세선을 고정하고 작동유체를 바꿔가면서 기포의 상승속도  $U$ 를 비교한 것이다. 유리관의 직경  $D_i$ 가 1.76mm인 경우를 보면 작동유체가 물인 경우보다 메탄올인 경우가 기포의 상승속도가 크다. 또한  $D_i$ 가

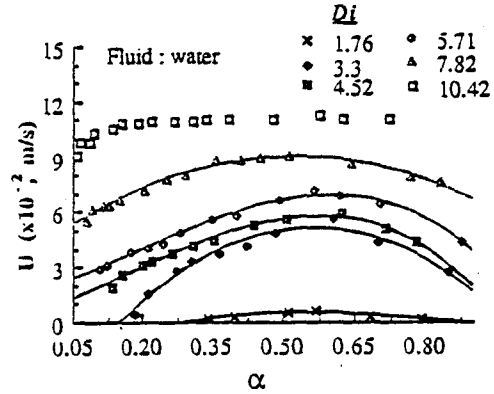


Fig.3 Bubble rising velocity for water as working fluid

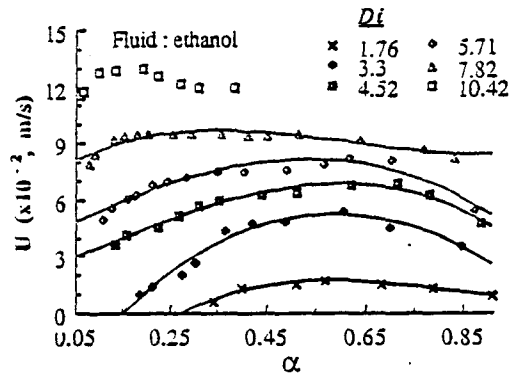


Fig.4 Bubble rising velocity for ethanol as working fluid

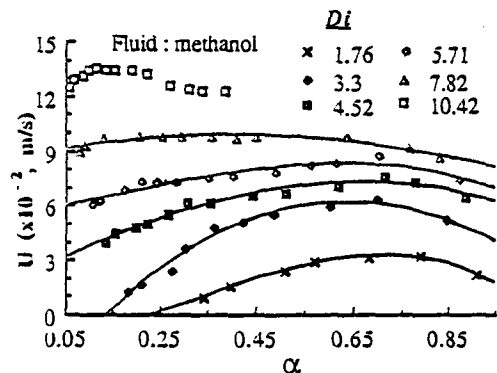


Fig.5 Bubble rising velocity for methanol as working fluid

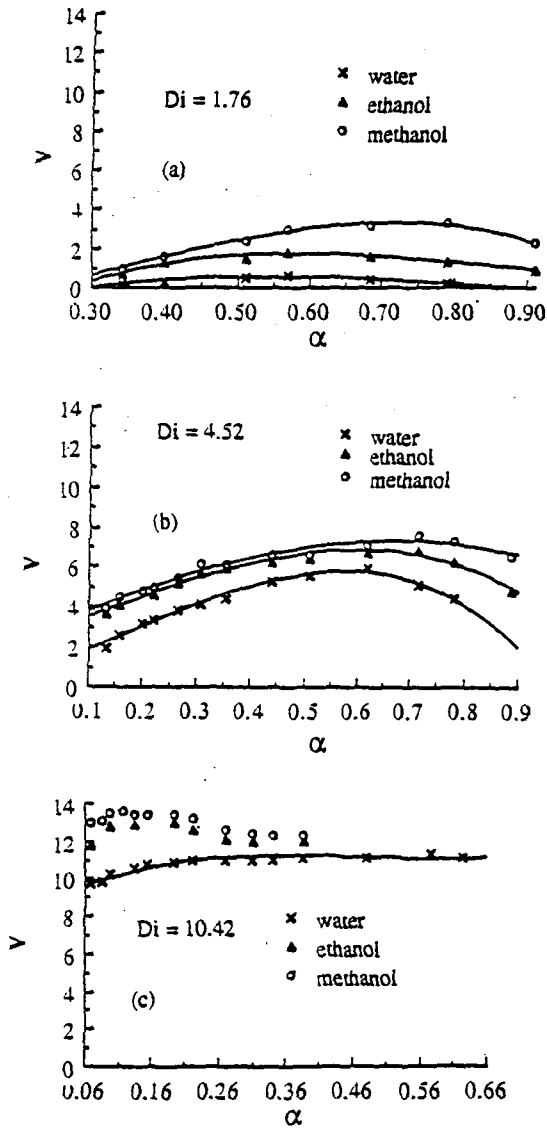


Fig.6 Bubble rising velocity for different diameters; (a)  $D_i=1.76$ , (b)  $D_i=4.52$ , (c)  $D_i=10.42$

10.42mm에서는 작동유체가 에탄올 및 메탄올인 경우  $\alpha=0.1$  근처에서 최대값이 나타나는데 반하여 작동유체가 물인 경우 일정한 값을 유지함을 보여주고 있다. 일정한 유리관 내경과 삽입세션 조건에

서 기포상승속도는 메탄올이 가장 크고 에탄올, 물의 순으로 나타났다. 메탄올이 가장 크고 에탄올, 물의 순으로 나타났다. 메탄올에서 기포의 상승속도가 가장 큰 이유는 Table 1에서 짐작할 수 있다. 상승하고 있는 기포의 형상은 표면장력, 액체 및 기체의 밀도비와 관계되는데 표면장력이 작을수록 기포의 형상은 뾰족해진다. 따라서 표면장력이 작은 에탄올 및 메탄올의 경우 기포의 상승속도가 크리라 짐작된다. 그러나 메탄올이 에탄올에 비해 점성력이 작으므로 기포의 상승속도가 최대가 되고 에탄올, 물의 순으로 나타난다고 사료된다.

Fig.7, Fig.8, Fig.9는 각각 작동유체가 물, 에탄올, 메탄올에 대하여 유리관의 직경을 5.71mm로 고정하고  $\alpha$ 가 각기 0.105, 0.175, 0.28, 0.349, 0.49, 0.702인 경우에 MTPCT의 경사각  $\theta$ 에 대한 상승속도를 도시한 것이다. 가는 와이어에 대한 유리관의 직경비인 작동유체에 관계없이 경사각  $\theta$ 가 증가할수록 즉 MTPCT가 수직에 가까와 갈수록 기포 상승속도가 증가한다. 여기서 특이한 점은 기포의 상승속도는 반드시 수직에서 최대가 아니라 약  $60^\circ$ 에서 최대가 나타난다는 사실이다. 또한 거의 수평에 가까운 위치 즉 약  $10^\circ$ 에서도 기포의 상승속도는 거의 수직에서와 같은속도가 된다는 사실이다.  $\alpha$ 가 증가함에 관계없이 경사각의 변화에 대한 기포의 상승속도는 비슷한 경향을 보인다. 그러나 작동유체가 물인 경우  $\alpha$ 의 값이 매우 큰 0.702에서 기포의 상승속도는 다른 작동유체보다 경사각에 특히 민감하게 영향받음을 보여주고 있다. Fig.7, Fig.8, Fig.9에서와 같이 수직이 아닌 약간 경사진 상태에서 기포의 상승속도가 최대가 되는 현상은 Negishi<sup>(7)</sup>의 결과와 일치한다. 즉 Negishi는 Thermosyphon의 최대성능은 수직인  $90^\circ$ 가 아닌  $60^\circ$  부근임을 밝힌 바 있다. 따라서 본 가시화 실험에서 밝힌 경사각  $60^\circ$ 에서 기포의 상승속도가 최대가 된다는 사실은 Negishi가 실험적으로 도출한 Thermosyphon의 최대 성능이 왜  $60^\circ$ 에서 나타나는 이유를 설명할 수 있다. 즉 기포의 상승속도가 최대이면 단위시간내 상승하는 기포의 수효가 최대가 될 수 있고 이 기포에 의하여 수송되는 열 전달량도 최대가 될 것이다. 여기서 흥미로운 사실은 Negishi는 와이어가 삽입되지 않은 Two-

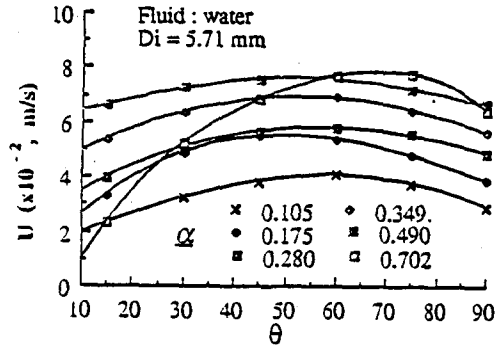


Fig.7 Bubble rising velocity vs MTPCT inclination for different  $\alpha$  in water

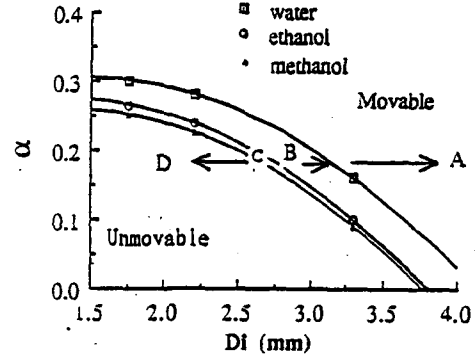


Fig.10 Movable domain of the bubble on working fluids in the MTPCT

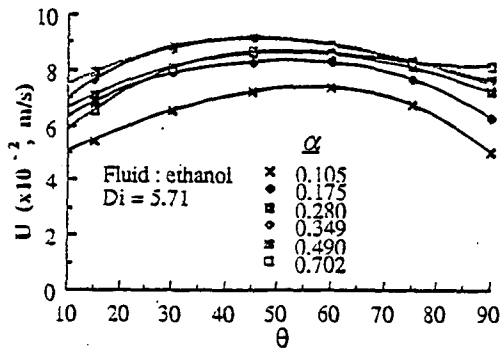


Fig.8 Bubble rising velocity vs MTPCT inclination for different  $\alpha$  in ethanol

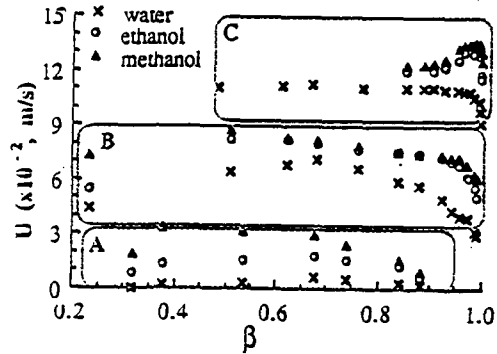


Fig.11 Bubble rising velocity vs  $\beta$  for different tube sizes ( $D_i$ ): (A=1.76, B=5.71, C=10.42)

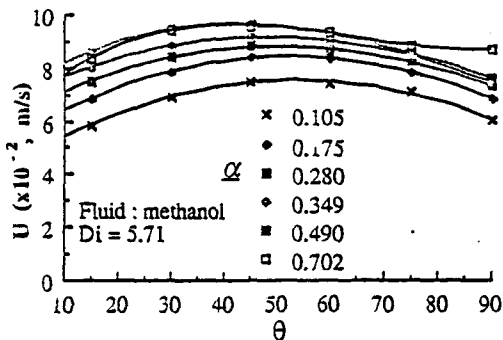


Fig.9 Bubble rising velocity vs MTPCT inclination for different  $\alpha$  in methanol

Phase Closed Thermosyphon을 사용하여 실험하였음에도 불구하고 본 연구와 비슷한 경사각 특성이 도출되었다는 것이다.

Fig.3, Fig.4, Fig.5에서 작동유체가 물, 에탄올 및 메탄올에 대하여 기포가 상승하는 영역을 Fig.10과 같이 규정할 수 있다. Fig.10에서 A영역은 작동유체가 물이나 에탄올, 메탄올에 관계없이 기포의 상승이 가능한 영역 즉 MTPCT가 작동하는 영역이다. B영역은 에탄올 및 메탄올은 작동하나 물이 작동유체인 경우에는 작동하지 않는다. 또한 C영역은 메탄올은 작동하나 물 및 에탄올은 작동하지 않고 D영역에서는 물, 에탄올, 메탄올 모두에 대하여 작동하지 않는 영역이다. 이러한 결과는

향후 실제 MTPCT의 설계를 위한 인자로서 활용될 수 있다. 예를 들면 MTPCT의 내부 직경이 3mm이고 삽입되는 와이어의 직경이 0.5mm인 경우 즉 가는 와이어와 튜브의 직경비인  $\alpha$ 가 0.17인 경우에는 Fig.10으로부터 B인 영역에 해당된다. 이 경우 작동유체가 물에서는 와이어를 삽입하여도 기포가 상승하지 않으나 작동유체가 에탄올이나 메탄올로 바뀌게 되면 기포가 상승하여 MTPCT가 작동가능함을 예측할 수 있다. 또한 이 경우에 작동유체가 물인 MTPCT가 작동하기 위해서는 삽입 와이어나 유리관을 교체하는 방법이 있다. 즉 가는 와이어의 직경을 0.45mm에서 1.0mm로 바꾸어  $\alpha$ 를 0.3이상 되게하거나  $\alpha$ 를 그대로 놓고 직경을 보다 큰 3.5mm 이상의 유리관으로 바꾸게 되면 MTPCT가 작동 가능하게 된다.

Fig.11은 유리관 단면적에 대한 유효단면적(유리관의 단면적에서 가는 와이어 단면적을 뺀 면적)의 비인  $\beta(=1-\alpha^2)$ 에 따른 MTPCT의 기포 상승속도를 나타낸 것이다. 유리관 내부의 단면적이 증가하더라도 즉  $\beta$ 가 증가함에 따라 상승속도는 거의 균일하다가 서서히 감소함을 알 수 있다.  $\beta$ 가 1.0 가까이에서 즉 급격히 감소함은  $\alpha$ 가 0 즉 와이어의 삽입이 없으므로 기포의 상승이 정지하기 때문이다.

#### 4. 이론 해석

Nickens<sup>(6)</sup>는 액체가 가득찬 수직 튜브에서 상승하고 있는 기포의 거동을 해석적으로 규명한 바 있다. 본 연구에서는 가는 와이어가 삽입된 MTPCT 내 기포의 거동을 해석함에 있어, 와이어가 삽입되어 있는 액체가 가득차 있는 수직튜브에서 상승하고 있는 기포의 거동으로 간략화하여 모사하였다.

본 연구의 해석 대상이 매우 작은 구조이므로 점성의 효과가 중요하리라 간주된다. 그러나 점성을 본 해석에 포함시켜서는 해석적인 풀이가 사실상 어렵다. 따라서 기포의 속도가 매우 작다고 가정하고 수직 튜브와 삽입되는 와이어의 간격이 매우 작은 경우를 해석에서 제외함으로써 점성의 효과가 미치는 영향을 최소화 하였다. 실제에 있어서는 상승하면서 수두에 의하여 기포의 크기가 변할 것이

다. 그러나 해석대상이 되는 MTPCT의 길이가 약 30cm 정도로 수두차이를 매우 작을것이므로 상승 위치에 따른 기포의 크기변화는 해석에서 무시하였다.

기포의 상승속도와 관계된 지배 방정식은 기포의 거동과 관련된 Bernoulli방정식 및 기포의 형상과 관계된 Kelvin-Laplace 방정식이다. 좌표계는 Fig.1에서  $U_s$ 로 상승하고 있는 기포를 기준으로한 이동좌표계를 채택하였으며 기포의 정점을 정체점(s)으로 취급하였다. 기체 및 액체의 경계면은 유동함수 표면이므로 액체 및 기체측에서 Bernoulli 방정식은 다음과 같다.

$$P_L + \frac{1}{2} \rho_L V_L^2 + \rho_L g z = P_{Ls} \quad (2)$$

$$P_G + \frac{1}{2} \rho_G V_G^2 + \rho_G g z = P_{Gs} \quad (3)$$

경계면에서 압력관계식은 Kelvin-Laplace 방정식으로 다음과 같이 나타낼수 있다.

$$P_G = P_L + \frac{\sigma}{r_p} \quad (4)$$

여기서  $r_p$ 는 기포의 경계면위에 있는 임의 점 P에서의 곡률 반경이다. 기체와 액체 경계면에서 속도가 같으므로 식 (2)~(4)로 부터 다음식을 유도할 수 있다.

$$T_1(r, z) = u_p^2 + u_s^2 + 2gz + 2\lambda(K - K_s) = 0 \quad (5)$$

$$\lambda = \frac{\sigma}{\rho_L - \rho_G} \quad K = -\frac{1}{r_p}$$

위에서 기체-액체 경계면에서 속도 수직성분이 0이라는 조건으로 부터 다음 식을 쓸 수 있다.

$$\bar{V}_1 \cdot \nabla H = 0 \quad (6)$$

여기서  $H(r, z) = Z(r) - Z = 0$ 은 액체-기체 경계면을 정의 하며  $\bar{V}_1$ 은 경계면에서 액체의 속도 벡터이다. 또한  $z = Z(r)$  경계면에서 물질의 통과가 없으므로 다음과 같은 식이 성립한다.

$$T_2(r, z) = \nu \frac{dz(r)}{dr} - u = 0 \quad (7)$$



액체-기체 경계면을 나타내는 함수  $Z(r)$ 과 관계는 다음과 같이 나타난다.

$$K(r) = \frac{rZ'' + [r + Z'^2]Z'}{r[1 + Z'^2]^{3/2}} \quad (8)$$

와이어가 삽입된 기포 주위 유동은 기포의 상승 속도가 매우 작을 때는 층류유동으로 가정되어도 무리가 없다.

이때 유동 방정식은 Collins<sup>(8)</sup>에 의해 유도된 식을 다음과 같이 변형하여 사용된다.

$$\Psi(r, z) = \left[ \frac{1}{2}(r^2 - R^2) - r \sum_{n=1}^{\infty} \{d_n J_1(\delta_n r) + g_n Y_1(\delta_n r)\} \exp(-\delta_n z) \right] U_s \quad (9)$$

반경 반향 속도 성분  $v$ 와 축방향 속도 성분  $u$ 는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$v(r, z) = \frac{\partial \Psi}{r \partial z} = -U_s \left( \frac{\partial B_{10}}{\partial z} + \frac{\partial C_{10}}{\partial z} \right)$$

$$u(r, z) = -\frac{\partial \Psi}{r \partial r} = U_s \left\{ \frac{B_{10} + C_{10}}{r} + \frac{\partial(B_{10} + C_{10})}{\partial r} - 1 \right\} \quad (10)$$

$$B_{ij} = \sum_{n=1}^{\infty} d_n \delta_n^i J_i(\delta_n r) \exp(-\delta_n z)$$

$$C_{ij} = \sum_{n=1}^{\infty} g_n \delta_n^i Y_i(\delta_n r) \exp(-\delta_n z)$$

식 (5), (7)에 의해 정의된  $T_1, T_2$  함수는 기체-액체 경계면에서 항상 0이 되므로 경계면에서의 전미분(Total Derivative)의 모든 차수도 항상 0이 된다.

경계면을 나타내는 함수  $T(r, z)$ 의 경계면을 따른 2차 미분값은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left( \frac{D^2 T}{Dr^2} \right)_s = (T_{20} + T_{01} Z_2)_s = 0 \quad (11)$$

위의  $T_2$ 를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(Z_2)_s = \left( \frac{u_{20}}{2\nu_{10} - u_{01}} \right)_s \quad (12)$$

식 (8)을 이용하여 다음과 같이 되며

$$K_2(r)_s = Z_4 - 3Z_2^3 - 2 \frac{Z_2}{R_s^2} + \frac{Z_3}{R_s} \quad (13)$$

최종적으로 식 (11)에 식 (5)를 대입하면 다음과 같은 식이 성립한다.

$$(T_{20} + T_{01} Z_2)_s = 2(\nu_{10}^2 + g Z_2 + \lambda K_2)_s = 0 \quad (14)$$

식 (14)에  $\nu_{10}, Z_2, K_2$  등을 대입하면 상승속도  $U_s$ 의 식이 나타난다.

$$U_s = \sqrt{\frac{(3Z_2^3 + 2 \frac{Z_2}{r_2} - \frac{Z_3}{r} - Z_4)\lambda - g Z_2}{\left\{ B_{02} + C_{02} - \left( B_{11} + C_{11} \right) / r \right\}^2}} \Bigg|_{r=R_s} \quad (15)$$

작동유체가 바뀌거나 MTPCT의 지름과 와이어의 크기에 따라 식 (15)의 root 내부가 음이 되어 계산이 안되는 영역이 나타나는데 이와 같은 조건 하에서는 더 이상 기포가 상승하지 않음을 의미한다. 따라서 식 (15)로 부터 MTPCT에서 기포가 상승되는 영역을 이론적으로 구할수 있다.

### 5. 실험과 이론의 비교

Fig.12는 이론적으로 구한 기포의 상승가능 영역이다. Fig.12에서 W, M은 각각 물, 메탄올을 나타내며 A는 작동가능, U는 작동불가능을 나타낸다. 즉 MA는 작동유체 메탄올, 작동가능을 의미한다. 이상과 같은 기호를 따르면 Fig.12에서 WA+MA는 작동유체가 물, 메탄올 모두에서 기포가 상승하는 영역이며 WU+MA는 메탄올에서는 기포가 상승되나 물 기포가 상승되지 않는 영역이다. WU+MU는 물, 메탄올 모두 기포 상승이 없는 영역이다. 실험에서 구한 Fig.10과 이론결과인 Fig.12를 비교하면 이론과 실험 모두에서 메탄올의 경우가 물의 경우보다 더 작은 튜브에서도 기포상승이 가능하다는 점이 일치한다. 또한 Fig.10, Fig.12 모두 메탄올에서는 기포상승이 가능하나 작동유체가 물에서는 기포 상승이 불가능 영역이 나타난다.

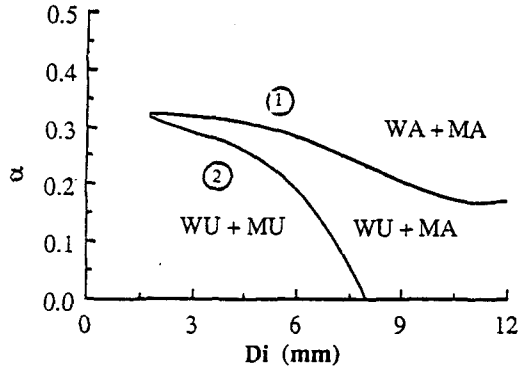


Fig.12 Movable domain of the bubble in analytical theory

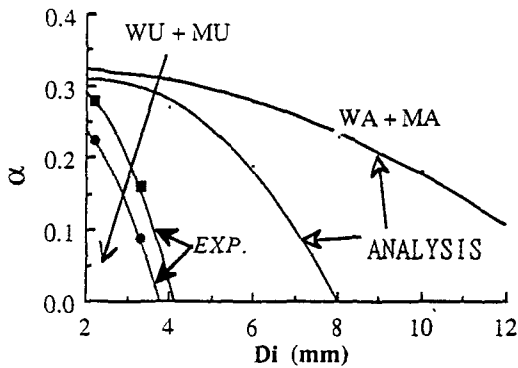


Fig.13 Comparisons of theory with experiment

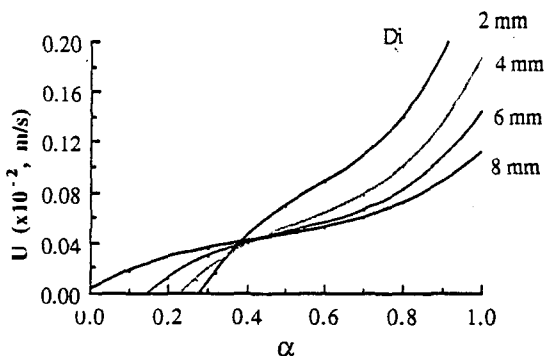


Fig.14 Bubble rise for ethanol in theory and experiment

Fig.13은 실험결과인 Fig.10과 이론결과인 Fig. 12를 포개놓은 것이다. Fig.13에서 보면 이론에서 구한 기포 상승이 가능한 튜브 크기가 실험치보다 전반적으로 크게 나타남을 알 수 있다. 이론에서는 메탄올의 경우 지름 8mm 이하에서는 와이어의 삽입이 없으면 기포상승이 불가능할 것으로 나타난다. 그러나 실험에서는 지름 8mm 이하에서도 와이어의 삽입없이 기포가 상승하였으며 4.2mm 이하가 되면 와이어의 삽입없이 기포 상승의 불가능했다.

또한 이론에서 증류수가 작동유체일때 지름 4mm의 튜브 내에서 기포의 상승이 가능하려면  $\alpha=0.3$  즉 직경 1.2mm 이상인 와이어를 삽입하여야 하나 실험에서는  $\alpha=0.1$  즉 0.4mm 이상인 와이어만 삽입하면 기포의 상승이 가능하였다. 이상과 같이 이론치는 기포의 상승가능한 튜브 직경이 전반적으로 실험치보다 크게 나타났다.

Fig.14는 메탄올의 경우 기포의 상승속도를 식 (4-14)에 의해 산출한 것이다.  $\alpha$ 가 0.4보다 작을 때는 튜브직경이 클수록 기포상승 속도가 크나  $\alpha=0.4$  이상에서는 튜브 직경이 클수록 기포 상승속도가 적다. 또한  $\alpha$ 값이 커질수록 속도는 상승한다. Fig.14는 메탄올을 작동유체로 한 실험 결과인 Fig.5와 비교할 수 있다. Fig.5에서는  $\alpha$ 값이 약 0.6에서 기포 상승속도가 최대가 되며 이보다  $\alpha$ 값이 크면 감소한다. 또한  $\alpha$ 값이 작을때 직경이 클수록 기포 상승 속도가 크게 나타난다. 이 현상은 이론에 의한 결과와 일치한다. 즉 이론에 의한 결과인 Fig.14에서도  $\alpha$ 값이 작을때 MTPCT의 직경이 클수록 기포 상승 속도는 커진다. 그러나  $\alpha$ 값이 0.4보다 클때는 실험결과와는 달리 MTPCT의 직경이 클수록 기포 상승 속도가 감소한다.

이와 같은 실험과 이론의 불일치는 이론적인 해석과정에서 점성효과를 무시하고 식을 유도하였으므로 점성효과가 나타나는  $\alpha=0.4$ 이상에서는 이론치와 실험치의 불일치가 나타난 것으로 사료된다.

## 6. 결 론

초소형 이상 써모사이폰내 기포의 동작관계 및 거동특성에 관하여 실험 및 해석을 통하여 다음과

같은 사실을 도출해 낼 수 있었다.

1) 기포의 상승이 일어나지 않음으로써 작동이 불가능한 초소형 이상 써모사이폰에서 가는 와이어를 삼입하면 기포의 상승이 가능하여진다.

2) 기포의 상승이 불가능한 튜브의 직경은 매탄올의 경우가 물보다 작게 나타난다.

3) 실험에서 기포의 상승이 가능한 튜브직경은 이론에서의 결과보다 전반적으로 작게 나타났다.

4) 직경의 크기에 따른 기포의 상승속도에 관하여서는 실험에서는 지름이 클수록 기포 상승 속도가 증가하나 이론에서는  $\alpha$ 값이 작을때는 지름이 클 때 속도가 크나  $\alpha$ 값이 커짐에 따라 그 경향이 바뀌는 것으로 나타난다.

5) 기포의 상승 속도는 경사각  $60^\circ$  부근에서 최대이며 이는 열전달량이 최대로 나타나는 각도와 일치한다.

#### 참 고 문 헌

1. Bar-Cohen, A., 1992, "State-of-the-Art Trends in the Thermal Packing of Electronic Equipment," J. Electronic Packaging, Vol. 114, pp. 257~265.
2. Cotter, T. P., 1984, "Principles and Prospects of Micro Heat Pipes," Proceedings of the 5th International Heat Pipe Conference, JaTech, Toyko, pp. 328~335.
3. Babin, B. R., 1990, "Steady-State Modelling and Testing of a Micro Heat Pipe," J. Heat Transfer, Vol. 112, pp. 595~601.
4. Lee, Y. S., Lee, Y. P., and Lee, Y., 1992, "An Experimental Study on Micro Two Phase Closed Thermosyphons with inserts, 8th International Heat Pipe Conference."
5. Lee, Y. P., Lee, Y. S., and Lee, Y., 1994, "The Behavior of a Bubble in a Micro Two-Phase Closed Thermosyphon with a Thin Wire Insert," J. of ACR, Vol. 2, Aug. pp. 71~79.
6. Nickens, H. V. and Yannitell, D. W., 1987, "The Effects of Surface Tension and Viscosity on the Rise Velocity of a Large Gas Bubble in a Closed, Vertical Liquid-Filled Tube," Int. J. Multiphase Flow, Vol. 13, No. 1, pp. 57~69.
7. Kanji Negishi and Teruo Sawada, 1983, "Heat Transfer Performance of an Inclined Two-Phase Closed Thermosyphon", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 26, No. 8, pp. 1207~1213.
8. Collins, R. Demoraes, F. F., Davidson, J. F., and Harrison, D., 1978, "The Motion of a Large Gas Bubble Rising Through Liquid Flowing in a Tube," J. Fluid Mech., Vol. 89, pp. 497~514.