

< 論 文 >

원통형 액적내의 표면장력 변화로 인한  
흐름특성에 관한 실험적 연구

이 진 호\* · 강 희 찬\*\* · 이 동 진\*\*

(1987년 3월 17일 접수)

Experimental Study of the Surface-Tension Driven Flow  
in a Cylindrical Liquid Column

Jinho Lee, Hie Chan Kang and Dong Jin Lee

**Key Words :** Thermocapillary Flow(열모세관 유동), Cylindrical Liquid Column(원통형액적),  
Marangoni Number(Marangoni 수), Dynamic Bond Number(동 Bond 수), Ther-  
mooscillation(온도진동)

Abstract

An experiment is carried out to study the surface-tension driven flow characteristics in a cylindrical liquid column heated from above (which is the low gravity floating zone simulated on earth) with varying the aspect ratio and diameter of the liquid column. Hexadecane, octadecane, silicon oil(10cs), FC-40 and water are used as the test liquids. The free surface shape varies sinusoidally for  $Ma > Ma_{cr}$  and its frequency is found to be the same as that of temperature oscillation. It is verified that the surface temperature profile changes from linear to S-shaped profile for  $Ma > Ma_{cr}$ . The frequency of temperature oscillation decreases with increasing liquid volume, while its level increases.  $Ma_{cr}$  decreases with increasing aspect ratio, and also decreases with increasing Prandtl number in the range of  $25 < Pr < 70$ .

기 호 설 명

$Ar$  : 종횡비 ( $L/D$ )

$Bo_d$  : 동 Bond 수 ( $\rho g \beta D^2 / |\partial \sigma / \partial T|$ )

$D$  : 상·하부봉의 직경

$f$  : 온도진동수

$g$  : 중력가속도

$L$  : 액주의 높이

$R$  : 상·하부봉의 반지름

$r$  : 액주의 반경방향 좌표축

$z$  : 액주의 높이방향 좌표축

$Ma$  : Marangoni 수 ( $|\partial \sigma / \partial T| \Delta T \cdot D / \mu \alpha$ )

$Ma_{cr}$  : 임계 Marangoni 수

$Pr$  : Prandtl 수

$T$  : 액주의 온도

$T_h$  : 상부봉의 온도

$T_c$  : 하부봉의 온도

$\Delta T$  : 상·하부봉의 온도차

\* 정회원, 연세대학교 공과대학 기계공학과

\*\* 정회원, 연세대학교 대학원

$\alpha$	: 열확산율
$\beta$	: 체적팽창계수
$\rho$	: 밀도
$\sigma$	: 표면장력
$\mu$	: 점성계수
$\nu$	: 동점성계수
$\theta'$	: 온도진동의 진폭

## 1. 서 론

표면장력 변화에 의한 흐름(surface-tension driven flow)은 자유표면을 갖는 유체의 자유표면에 온도 혹은 농도변화가 주어졌을 때 이에 따른 표면장력 변화로 야기되는 흐름을 말하며 특히 온도변화에 따라 생기는 표면장력 구배에 의한 흐름을 열모세관 유동 혹은 Marangoni 유동이라 한다. 이러한 표면장력 변화로 인한 흐름은 과학기술의 여러 응용면에서 크게 영향을 미치고 있음이 밝혀졌는데 예를 들면 불균일한 온도장하에서의 기포의 이동(migration of a bubble)<sup>(1-3)</sup> 액체연료 표면에서의 화염의 확산(flame spreading)<sup>(4)</sup> 및 용해(melt)로부터의 결정성장(crystal growth) 등이 있다.

표면장력 변화로 인한 흐름에 관한 연구는 70년대 초 유인우주선의 등장으로 우주공간의 과학적 이용이 가능해짐에 따라 미세중력장하에서의 유체유동과 관련되어 활발히 이루어졌으며 특히 최근에는 우주공간에서 부유대 용융법(floating zone method)에 의한 고도의 순수한 양질의 결정을 얻기 위한 연구와 관련되어 많이 이루어졌다. 본 연구의 동기도 이에 기인한다. 부유대 용융법에 의한 미세중력장 하에서의 결정성장은 지상에서의 결정성장 과정에서 중력에 의해 필연적으로 나타나는 자연대류의 영향과 이로 인한 성장결정의 질 저하를 줄일 수 있으며 보다 큰 결정을 얻을 수 있는 잇점이 있다. 그러나 결정화과정(crystallization)에서 온도 및 농도변화로 인한 유체 자유표면의 표면장력 변화로 야기되는 흐름은 그대로 존재하게 되며 자연대류의 영향이 감소함에 따라 상대적으로 지배적인 흐름이 된다. 이에 따라 표면장력 구배로 인해 생기는 흐름에 대한 중요성이 깊이 인식되어 최근 10여년 전부터 이를 모델로 한 원통형 액적내의 표면장력 변화로 인한 흐름에 대한 연구가 집중적으로 활발히 이루어지고 있다.

Ostrach<sup>(5,6)</sup>는 표면장력 흐름의 영향에 대한 자연대류의 영향의 비인 동 Bond 수( $Bo_d = \rho g \beta D^2 / |\partial \sigma / \partial T|$ )

를 제시하여 액적의 크기를 제한시킴으로 자연대류에 비해 표면장력에 의한 흐름의 영향을 크게 하여 미세중력장 하에서의 부유대 용융법에 관한 실험을 지상에서 상사적으로 할 수 있다고 하였다. Schwabe, Scharmann, Preisser 와 Oeder<sup>(7)</sup>는  $\text{NaNO}_3$ 를 사용한 원통형 액적에 대하여 Marangoni 수, 즉  $Ma$  수가 임계값 이상일 때 정상상태로부터 온도진동(thermooscillation)이 생기는 비정상 상태로의 천이가 일어남을 실험적으로 확인하였다. Schwabe 와 Scharmann<sup>(8)</sup>은  $\text{NaNO}_3$ 에 대하여 중황비의 변화에 따른 이와 같은 온도진동이 일어나는  $Ma$  수, 즉 임계  $Ma$  수의 변화를 실험적으로 조사하였으며 Chun 과 Wuest<sup>(9)</sup>는 light-cut method에 의해 액적내에 주기적인 유동이 있음을 확인하고 그로부터 온도진동은 원주 방향의 유체유동에 기인한다고 하였다. 또한 Kamotani 와 Vargas<sup>(10)</sup>는 FC-43과 헥사데칸(hexadecane)에 대하여 임계  $Ma$  수를 실험적으로 구하고 온도진동이 표면 온도분포와 밀접한 관계가 있으며 온도진동의 원인은 표면 온도구배로 인한 액적 자유표면에서의 속도지연과 이로 인한 표면의 변형에 기인한다고 하였다. 또한 Chun 과 Wuest<sup>(11)</sup>는 페이저를 액적에 통과시켜 가시화된 액적의 형상변화로부터 표면변형을 처음으로 관찰하였으며 이 표면변형이 그 위치에서의 온도진동수와 거의 같음을 확인하고 이를 근거로 액적 자유표면의 변형이 액적내부의 유동에 기인한다고 하였다. 한편 Lai<sup>(12)</sup>는 유체 자유표면의 변형이 있는 경우에 해석적 방법으로 표면변형과 속도 및 온도장의 커플링(coupling)에 관한 무차원 파라메타들을 구하였으며  $Pr \geq 1$ 인 경우,  $Pr$  수의 증가에 따라 온도진동이 억제되며  $Pr \ll 1$ 인 경우에는  $Pr$  수의 감소에 따라 온도진동이 억제된다고 예측하였다.

전술한 지금까지의 원통형 액적의 표면장력 흐름에 관한 연구는 실험 목적에 따라 액적의 종류가 제한되어 체계적이지 못하여 온도진동 특성에 관한 연구는 아직까지 충분히 이루어지지 않은 상태이다. 본 연구에서는 헥사데칸, 옥타데칸(octadecane), 실리콘 오일(silicon oil)(10cs), FC-40 과 증류수를 사용한 원통형 액적에서의 유동 및 온도진동 특성을 실험적으로 폭넓게 관찰, 비교하고 아울러  $Pr$  수에 따른 임계  $Ma$  수의 변화도 조사하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 부유대 용융법에 따라

Fig. 1 과 같은 개념에 의거 제작되었다. 그림에서 상 부분과 하부분 사이에 원통형 액적을 안착시켜 상부분을 가열하여 액적 자유표면에 온도구배를 주었다. 시험유체로는 대기중에서 장시간 두어도 비교적 증발이 잘되지 않으며 물성치도 일반적으로 잘 알려져 있는 액체로서 헥사데칸, 옥타데칸, 실리콘 오일(10cs), FC-40, 증류수의 5 가지를 선택해 사용하였다. 지상에서 미세중력장 하에서의 실험을 상사적으로 하기 위해 동 Bond 수가 1 보다 작아야 하므로 상·하부분의 직경을 4.2mm 이하로 제한하였다.

Fig. 2는 본 실험에 사용된 주 실험장치의 개략도이다. 상부분과 하부분은 황동으로 제작하였고 상부분은 니크롬선을 감아 가열할 수 있게 하였다. 이때 상·하부분의 온도차는 니크롬선에 입력되는 전력량을 용량이 75W인 slidacs로 조절하여 제어하였으며 실험의 고온측 온도범위는 70~100°C, 저온측 온도범위는 25~35°C에서 이루어졌다. 액적내의 온도 측정은 직경이 0.075mm인 C-C(copper-constantan) 열전대로 하였다. 상·하부분의 온도는 상·하부분의 액체 접촉면에서 2mm 되는 지점에 직경이 0.125mm인 C-C 열전대를 부착하여 측정하였다. 상부분은 상부분 이송대에 부착하여 피치가 1.5mm인 이송나사로 중첩비를 조절하였다. 액적내 원하는 부위의 온도는 열전대를 수직으로 조합된 정밀한 이차원 열전대 이송대에 부착시켜 이송나사(피치=1.5mm)를 조절하여 측정하였다. 이 열전대에서 나오는 기전력은 최대 50배까지 증폭하여 측정 범위가 0.5 mV/cm인 3-pen 기록계에 기록하였다.

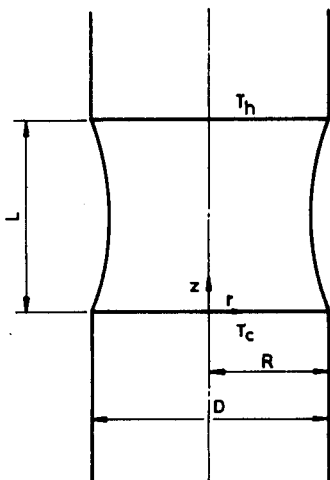
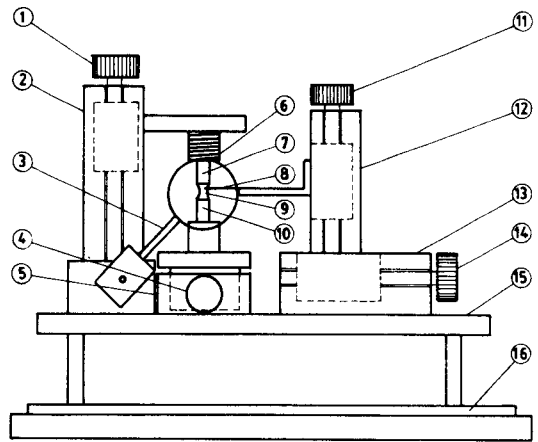


Fig. 1 Schematic of simulated floating zone



- |                                   |                     |
|-----------------------------------|---------------------|
| ① Screw                           | ② Upper rod carrier |
| ③ Magnifier                       | ④ Screw             |
| ⑤ Lower rod carrier               | ⑥ Nichrome wire     |
| ⑦ Upper rod                       | ⑧ Thermocouple      |
| ⑨ Liquid column                   | ⑩ Lower rod         |
| ⑪ Screw                           |                     |
| ⑫ Thermocouple horizontal carrier |                     |
| ⑬ Thermocouple vertical carrier   |                     |
| ⑭ Screw                           |                     |
| ⑮ Absorber                        |                     |
| ⑯ Base                            |                     |

Fig. 2 Schematics of main experimental set up

## 2.2 실험 방법

상·하부분 사이의 액주는 특수 제작된 주사기로 형성하였고 액주 내부의 온도 측정시 항상 덮개로 주 실험장치를 덮어 외부 유동의 영향을 최대한 줄였다. 액적내의 온도 측정은 상·하부분의 온도 및 액적내의 온도 변화가 정상상태로 간주될 만큼 거의 변화가 없을 때 행하였다.

온도 진동의 측정은 여러번의 실험 결과 액주 내의 열전대의 영향이 가장 적은 상부분에서  $(1/5)L$ , 자유표면에서 0.1mm 위치에서 측정하였다. 또한 표면온도 분포는 자유표면에서 0.1mm 되는 위치에서 자유표면의 곡면을 따라 내려가며 측정하였다. 액적의 내부 온도는 열전대를 이송대에 의해 자유표면에서 액주의 중심까지 등간격으로 수평 및 수직이동하며 측정하였다.

액주내의 전체적인 유동은 액적에 매우 미세한 숫가루를 첨가하여 확대경( $\times 10$ )을 통해 그 움직임을 관찰하였으며 비디오 카메라에 확대렌즈 및 마이크로 렌즈를 부착하여 촬영, 녹화하였다. 액주내의 일정 단면의 유동은 Fig. 3과 같은 light-cut 방법으로 관찰, 촬영하였다. 이때 사용된 광원은 5mW He-Ne 레이저이며

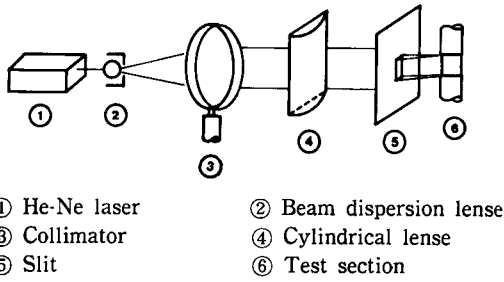


Fig. 3 Schematics of light-cut method

콜리메이터(collimator)와 원통형 렌즈(cylindrical lens)는 촛점거리가 각각 10cm, 30cm이다. 그리고 유동의 사진 촬영시 카메라 렌즈에 접사링을 부착하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 액적의 유동 형태

비디오 시스템 및 light-cut 방법을 이용한 흐름의 가시화로 부터  $Ma$  수가 임계  $Ma$  수, 즉  $Ma_{cr}$  보다 낮은 경우 액적 내부에서 Fig. 4(a)와 같은 표면장력 변화로 인한 흐름이 관찰되었다. Fig. 5는 헥사데칸에 대하여 액적의 직경이 4.2mm, 종횡비가 0.65,  $Ma=0.8 \times 10^4$  인 경우의 실제 유동 사진이다.  $Ma$  수가 임계값보다 큰 경우 액주의 종횡비가 크거나 직경이 클 때 Fig. 4(b,c)와 같은 유동이 주기적으로 번갈아 가며 나타나는데 이는 주로 액적의 자유 표면의 주기적인 변화로 인한 액적 자체의 정적인 불균형 때문으로 판단되나 좀더 엄밀한 조사가 요구된다. Chun<sup>(13)</sup>은 온도진동이 나타나는 경우 유동이 여러 모우드로서 원주 방향으로 회전한다고 하였으나 본 실험에서는 그러한 원주 방향의 회전은 관찰되지 않았다.

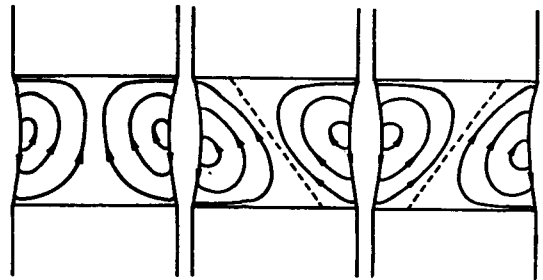
3.2 액적내의 온도

Fig. 6(a, b)은 각각  $Ma$  수가 임계값보다 작을 때와 클 때의 일반적인 액적내부의 온도 분포이다. 이는 액적 내부의 온도를 7×7개 측정하고 보간법을 이용하여 12개의 등온선으로 나타낸 것이다. 내부 온도분포로부터  $Ma$  수가 임계값보다 낮은 경우 상부로부터 하부부으로의 열전달이 주로 전도에 의해 이루어지나  $Ma$  수가 증가함에 따라 점차 표면장력 변화에 의한 유동이 활발해져 대류의 영향이 나타남을 알 수 있다.

Fig. 7(a, b)은 각각 액적의 자유표면 온도 분포를

나타낸 것이다. Fig. 7(a)는 헥사데칸을 사용한 액주의 직경이 3mm, 종횡비가 0.6인 경우  $Ma$  수의 증가에 따른 표면 온도 분포의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 온도진동 발생 전에는 액체의 종류에 관계없이 거의 선형적인 온도분포를 나타내나 온도진동 발생시에는 Vargas<sup>(10)</sup>에 의해 언급된 바와 같이 S자 형태를 나타낸다. 그러나 그와는 달리  $Ma$  수가 커짐에 따라 표면 온도가 대류의 영향으로 점차 높아짐을 알 수 있다. Fig. 7(b)는 헥사데칸을 사용한 액주의 직경이 3mm인 경우 종횡비를 변화시켰을 때의 표면온도 분포이다. 그림에서 종횡비가 감소함에 따라 자유표면의 온도구배가 S자 형태에 점차 가까워짐을 알 수 있다.

Fig. 8(a, b, c)는 액적내에 나타나는 온도진동의 일례를 나타낸 것이다. 가장 일반적인 온도진동의 파형은 Fig. 8(a)와 같은 정현한 사인(sine) 파형이며 이는 주로 자유표면 근처에서 나타났다. Fig. 8(b, c)는 액적의 체적이 크거나  $Ma$  수가 임계  $Ma$  수 보다 훨씬 큰



(a) Steady thermocapillary flow  
 (b, c) Oscillatory thermocapillary flow

Fig. 4 Sketch of the streamlines

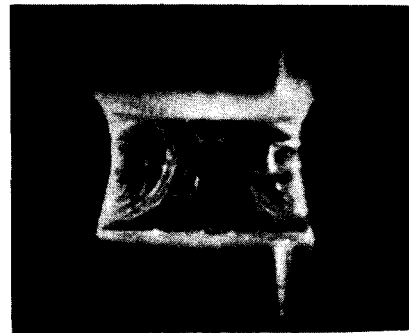


Fig. 5 Photograph; hexadecane,  $Ar=0.65$ ,  $Ma=0.8 \times 10^4$  (shutter speed: 2sec, ASA: 400, exposure time: B)

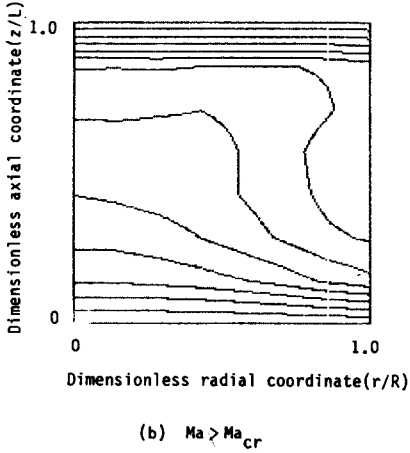
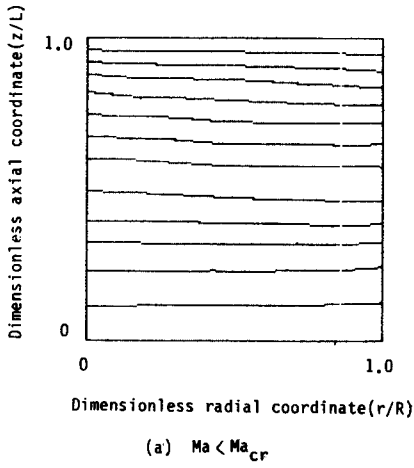


Fig. 6 Isotherms of the liquid column

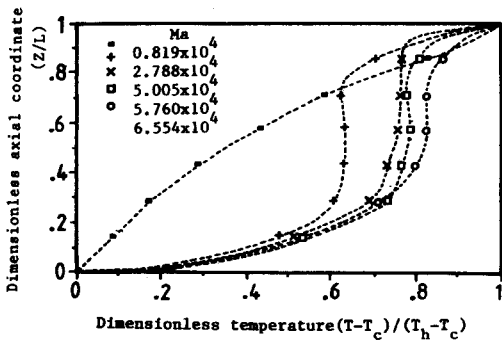


Fig. 7(a) Surface temperature profile variation (Hexadecane,  $d=3\text{mm}$ ,  $Ar=0.6$ )

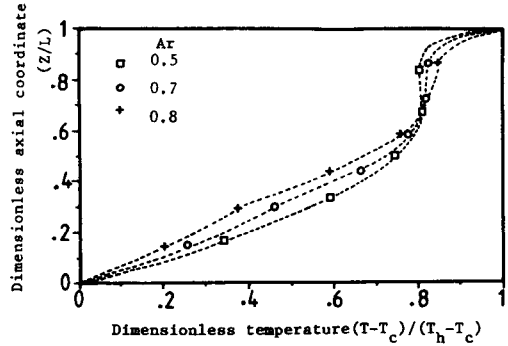
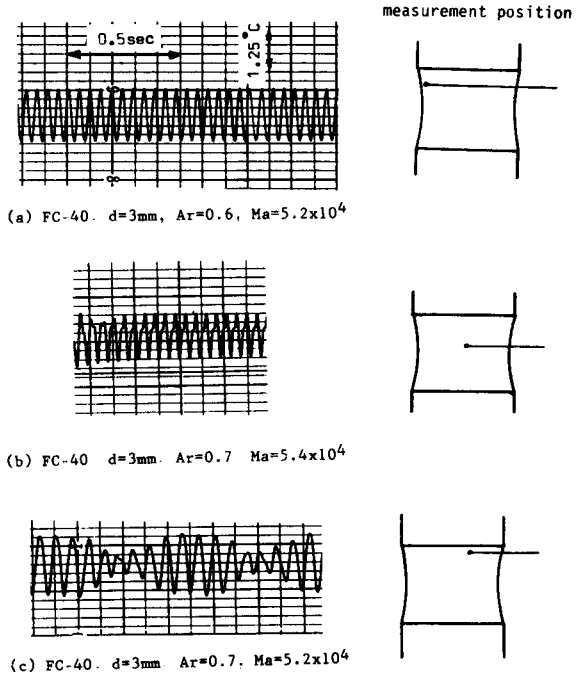


Fig. 7(b) Surface temperature profile variation (Hexadecane,  $d=3\text{mm}$ )

경우 주로 나타났고 이와 같은 파형은 액적내에 주기와 진폭이 다른 2개 이상의 파형이 존재하기 때문으로 생각된다.

온도진동 발생시 자유표면의 주기적인 변형이 상부 봉 근처에서 발견되었다. 이 자유표면 변형의 진동수는 같은 위치에서의 온도진동수와 같음이 비디오 카메라 및 3-pen 기록기로 확인되었다. 따라서 Chun과 Wuest<sup>(11)</sup>에 의해 언급된 바와 같이 자유표면의 변형이 온도진동과 매우 밀접한 관계가 있는 것으로 판단된다.



(a) FC-40.  $d=3\text{mm}$ ,  $Ar=0.6$ ,  $Ma=5.2 \times 10^4$

(b) FC-40  $d=3\text{mm}$ ,  $Ar=0.7$ ,  $Ma=5.4 \times 10^4$

(c) FC-40.  $d=3\text{mm}$ ,  $Ar=0.7$ ,  $Ma=5.2 \times 10^4$

Fig. 8 Temperature oscillation pattern inside the liquid column

Fig. 9(a, b)는 각각 온도진동 발생시  $Ma$  수가 증가함에 따른 온도 진동수와 온도 진폭비의 관계를 보인 것이다. 그림에서 온도 진동수는  $Ma$  수의 증가에 큰 변화가 없으나 온도진폭비( $\theta'/\Delta T$ )는 증가하며 최대점을 가짐을 보인다. 따라서  $Ma$  수는 온도진동의 크기에 주로 관계하며 온도진동수에는 관계가 없는 것으로 판단된다.

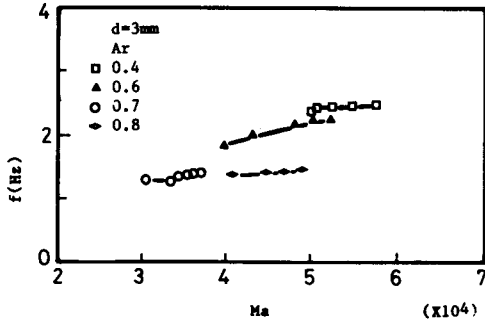


Fig. 9(a) Oscillation frequency variation with Marangoni number ( $d=3\text{mm}$ )

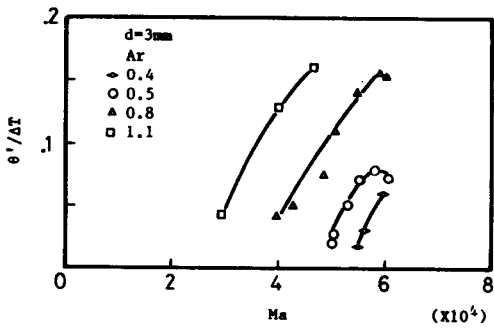


Fig. 9(b) Oscillation level variation with Marangoni number ( $d=3\text{mm}$ )

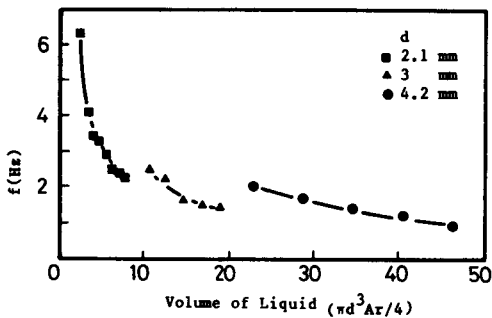


Fig. 10(a) Variation of oscillation frequency for volume of liquid

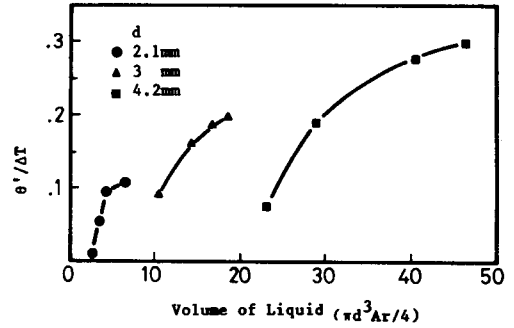


Fig. 10(b) Variation of maximum oscillation level for volume of liquid

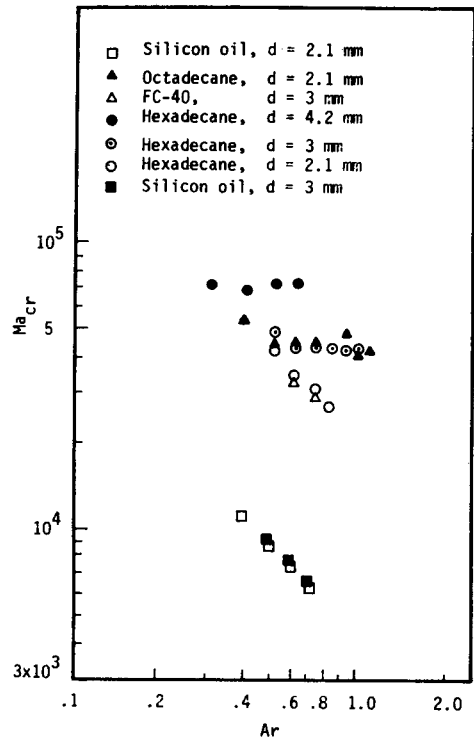


Fig. 11 Critical Marangoni number vs. aspect ratio

Fig. 10(a, b)는 액적량의 증가에 따른 온도진동의 진동수와 최대온도 진폭비의 관계를 나타낸 것이다. 액적량이 증가하면 온도진동의 진동수는 감소하며 최대온도진폭비는 증가하였다. 따라서 온도진동은 액적량과 크게 관계함을 알 수 있다.

Fig. 11은 액주가 헥사데칸, 옥타데칸, 실리콘 오일(10cs), FC-40인 경우 직경이 다른 경우에 대해 중

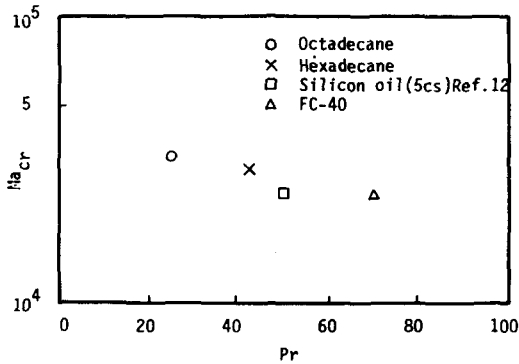


Fig. 12 Critical Marangoni number vs. Prandtl number ( $d=3\text{mm}$ ,  $Ar=0.7$ )

횡비의 증가에 따라 임계  $Ma$  수의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 종횡비가 증가함에 따라  $Ma_{cr}$  값은 감소하는 경향을 나타내고 있으며 이러한 경향은 Vargas<sup>(10)</sup> 등의 실험에서 일부 관찰되었다. 이는 종횡비가 증가함에 따라 동일 직경의 액주에 대해 자유표면이 증대됨으로 그만큼 온도진동의 원인이 되는 자유표면 변형이 쉽게 일어날 수 있기 때문으로 판단된다.

Fig. 12는 액적의 직경이 3mm 이고 종횡비가 0.7 인 경우  $Ma_{cr}$  의 값을  $Pr$  수의 변화에 따라 나타낸 것이다. 그림에서  $Pr$  수가 25~70의 범위에서  $Pr$  수가 증가함에 따라  $Ma_{cr}$  의 값은 감소함을 알 수 있으며 이는 Lai<sup>(12)</sup> 의  $Pr \geq 1$  인 경우  $Pr$  수의 증가에 따라 흐름이 보다 안정된다는 예측과는 상반되는 결과이다. 한편  $Pr$  수가 다른 액체에 비해 작은 증류수의 경우 다른 액체의  $Ma_{cr}$  보다 훨씬 큰  $Ma$  수인  $1.2 \times 10^5$  까지 온도진동이 발생하지 않았다. 이상의 결과로부터  $Pr$  수가 온도진동과 아주 밀접한 관계를 가짐을 알 수 있으며 실험이 가능한 액적들에 대한 보다 많은 연구가 필요하다.

#### 4. 결 론

헥사데칸, 옥타데칸, 실리콘 오일(10cs), FC-40 및 증류수를 사용한 원통형 액적의 직경과 종횡비를 변화시켜 가며 액적의 유동 및 온도특성을 실험적으로 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 액적내의 온도진동은 액적의 자유표면의 온도분포 및 자유표면의 변형에 밀접하게 관련됨이 확인되었다.

(2) 액적량이 증가함에 따라 온도진동수는 감소하고 최대온도 진폭비는 증가한다.

(3)  $Ma_{cr}$  는 액주의 종횡비와 직경이 커짐에 따라 감소한다.

(4)  $Pr$  수가 25~70의 범위에서  $Pr$  수가 증가함에 따라  $Ma_{cr}$  는 감소한다. 즉  $Pr$  수가 증가함에 따라 온도진동이 더욱 쉽게 발생한다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Young, N.O., Goldstein, J.S., and Block, M.J., 1959, "The Motion of Bubbles in a Vertical Temperature Gradient", J. Fluid Mech., Vol. 6, pp. 350~356.
- (2) Papazian, J.M., Gutowski, R., and Wilcox, W. R., 1979, "Bubble Behavior during Solidification in Low Gravity", AIAA J., Vol. 17, pp. 1111~1117.
- (3) Subramanian, R.S., 1981, "Slow Migration of a Gas Bubble in a Thermal Gradient", AIChE J., Vol. 7, pp. 646~654.
- (4) Sirignano, W.A., 1972, "A Critical Discussion of Theories of Flame Spread across Solid and Liquid Fuels", Comb. Sci. and Tech., Vol. 6, pp. 95~105.
- (5) Levich, V.G., 1977, "Physicochemical Hydrodynamics", Vol. 2, Advanced Publications, London, pp. 571~589.
- (6) Ostrach, S., 1978, "Motion due to Surface-Tension Gradients", Proc. COSPAR Space Research, Vol. VIII, Innsbruck, Austria.
- (7) Schwabe, D., Scharmann, A., Preisser, F., and Oeder, R., 1978, "Experiments on Surface Tension Driven Flow in Floating Zone Melting", J. Crystal Growth, Vol. 43, pp. 305~312.
- (8) Schwabe, D., Scharmann, A., 1979, "Some Evidence for the Existence and Magnitude of a Critical Marangoni Number in Crystal Growth Melts", J. Crystal Growth, Vol. 46, pp. 125~131.
- (9) Chun, Ch-H., 1980, "Experiments on Steady and Oscillatory Temperature Distribution in a Floating Zone Due to the Marangoni Convection", Acta Astronautica, Vol. 7, pp. 479~488.
- (10) Vargas, M., 1982, "Surface Tension Driven Convection in a Simulated Floating Zone Configu-

- ration", M.S. Thesis (also ETAS/TR-82-159), Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Case Western Reserve University.
- (11) Chun, Ch-H., and Wuest, W., 1983, "Free-Surface Vibration of a Floating Zone Induced by Surface-Tension-Driven Oscillation Flow", Proceedings of the 4th European Symposium on Materials Sciences under Microgravity, Madrid, Spain.
- (12) Lai, C.L., 1985, "Studies of Thermocapillary Oscillation Phenomena" Ph. D. Dissertation, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Case Western Reserve Univ.
- (13) Chun, Ch-H., and Wuest, W., 1979, "Experiments on the Transition from the Steady to the Oscillatory Marangoni Convection of a Floating Zone under Reduced Gravity Effect", Acta Astronautica, Vol. 6, pp.1073~1082.