

## 단일기포 핵비등 시 미세액막층 구조에 대한 실험적 연구

정승혁\* · 정셋별\* · 김형대\*\*

\* 경희대학교 원자력공학과

### Experimental Study on Geometry of a Microlayer During Single-Bubble Nucleate Boiling

Seunghyuck Jeong\*, Satbyoul Jung\* and Hyungdae Kim\*\*

\* Dept. of Nuclear Engineering, Kyung Hee Univ.

(Received January 30, 2015 ; Revised April 8, 2015 ; Accepted April 8, 2015)

**Key Words:** Interferometry (간섭), Microlayer(미세액막층), Nucleate Boiling(핵비등), Simple Microlayer Model, Single Bubble(단일기포), Total Reflection (전반사)

**초록:** 본 연구에서는 핵비등 시 미세액막층의 증발에 의한 열유속과 열전달률 계산을 위한 simple microlayer model의 물리적 변수들을 측정하기 위하여 미세액막층의 형상을 실험적으로 조사하였다. 레이저를 이용한 전반사 및 간섭 기법을 이용하여 simple microlayer model을 구성하는 인자들인 미세액막층의 초기 두께 및 수평 이동속도를 측정하였다. 대기압 포화상태의 물을 이용하여 수평 벽면에서 단일기포 핵비등 실험을 수행하였고, 평균 열유속 200 kW/m<sup>2</sup> 조건에서 동일한 위치에서 발생하는 기포들의 미세액막층의 구조적 특성을 분석하였다. 본 연구의 범위에서 측정한 미세액막층의 최대 초기 두께는 5.4 μm 이었으며, 증발에 의한 미세액막층의 수평 이동속도는 0.12 m/s 이었다.

**Abstract:** To measure the physical parameters of the simple microlayer model for the prediction of the heat flux and heat transfer rate due to the evaporation of the microlayer during nucleate boiling, the microlayer geometry was experimentally examined. The parameters, including initial thickness, moving velocity and microlayer radius, were measured by total reflection and interferometry techniques using a laser. Single-bubble nucleate boiling experiments were conducted using saturated water on a horizontal surface under atmospheric pressure. The geometric characteristics of the microlayer underneath the bubbles periodically nucleating at a nucleation site at an average heat flux of 200 kW/m<sup>2</sup> were analyzed. The experimental results in the present study show that the maximum initial thickness of the microlayer and the horizontal moving velocity are 5.4 μm and 0.12 m/s, respectively.

– 기호설명 –

$k$  : 열전도도 [W/mK]  
 $n$  : 굴절률 [-]  
 $T$  : 온도 [K]  
 $U$  : 속도 [m/s]  
 $h_{fg}$  : 잠열 [J/kg]  
 $R$  : 반경 [m]  
 $x$  : 거리 [m]  
 $t$  : 시간 [sec]  
 $q''$  : 열유속 [W/m<sup>2</sup>]

$Q$  : 선형 출력 [W/m]

$\dot{Q}$  : 열전달률 [W]

그리스문자

$\lambda$  : 파장

$\delta$  : 미세액막층 두께 [m]

$\delta_0$  : 초기 미세액막층 두께 [m]

$\theta$  : 각도 [°]

$\rho$  : 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]

하첨자

$m$  : 간섭 무늬 순서

$v$  : 기상

† Corresponding Author, hdkims@khu.ac.kr

- $l$  : 액상
- $s$  : 시편
- $M$  : 미세액막층 영역
- $d$  : 건조 영역
- $sat$  : 포화
- $cond$  : 전도
- $evap$  : 증발
- $wall$  : 벽면

1. 서론

핵비등 현상은 가열된 벽면과 접한 과열액체가 기체로 상변화하며 기포가 생성, 성장 및 이탈하는 현상으로, 상변화 시 막대한 크기의 잠열(latent heat)을 필요로 하기 때문에 단상에 비해 매우 효과적인 열전달을 발생시킨다. 따라서 핵융합 발전용 플라즈마 대면 부품의 냉각, 고출력 레이저 및 전자부품의 냉각, 화력 및 원자력 발전소 내 증기 발생기의 예들과 같이 고열유속이 발생하는 여러 산업분야에서 폭넓게 활용되고 있다. 핵비등 열전달에 대한 연구는 수십 년간 지속되어 왔는데도 불구하고 상세한 물리 현상에 대한 이해는 여전히 충분치 못한 상황이다.

Fig. 1은 수평 가열 벽면에서 발생하는 핵비등 시 비등 기포의 생성부터 이탈까지의 과정을 보여주는 개념도이다. 기포가 과열된 액체 내에서 생성될 때 내부 압력은 과열 액체의 포화 온도에 대응되는 포화 압력을 가지므로 기포 내·외부 압력 차에 의해 기포는 빠르게 성장한다. 이때 벽면과 접해있는 기포 하부의 액체는 벽면 전단 응력으로 인해 동일한 속도로 밀려나지 못하고 기포 하부에 수  $\mu\text{m}$  두께의 썸(wedge) 형태의 미세액막층(microlayer)이 형성된다.

핵비등 기포의 하부 구조는 크게 기포중앙의 건조 영역(dry region), 중간 미세액막층 영역(microlayer region), 외곽 과열액체층 영역(macrolayer region)으로 구분된다. 건조 영역과 미세액막층의 경계에는 액체-기체-고체가 만나는 삼중선(triple contact line)이 존재하며, 미세액막층과 과열 액체층의 경계에 해당되는 지점은 일반적으로 기포를 옆면에서 관찰했을 때 벽면과 맞닿아 있다고 보이는 지점에 대응된다. 기포의 성장 과정 동안 미세액막층의 증발은 핵비등 열전달 현상의 주요 메커니즘으로 고려되어 왔으며,<sup>(1-3)</sup> 1960년대부터 미세액막층의 구조에 관한 다양한 실험 연구가 수행되어 왔다. Jawurek<sup>(1)</sup>과 Koffman and Plesset<sup>(2)</sup>은 간접 기법을 이용하여 비등기포 하부에 존재하는 미세액막층의 두께를

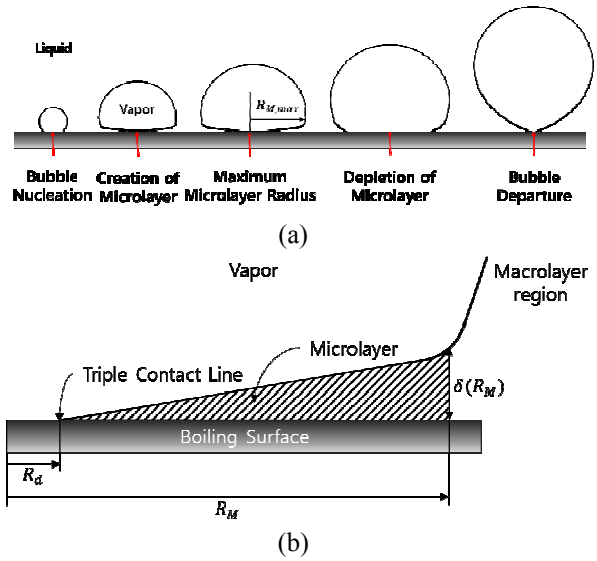


Fig. 1 Conceptual drawing of single bubble nucleate boiling on a heated surface: (a) nucleation, growth and departure processes, (b) microlayer

측정하였고, 시간에 따른 액막 두께의 변화로부터 미세액막층 증발에 의한 열전달량을 계산하였다. 작동 유체로는 각각 에탄올과 메탄올, 물과 에탄올을 사용하였으며 작동 유체에 따른 미세액막층의 구조 변화를 비교/분석하였다. Cooper and Lloyd<sup>(3)</sup>는 비등표면의 온도 측정을 통해 미세액막층에서의 열전달률과 미세액막층의 두께를 계산하였고, 미세액막층의 증발을 비등기포 성장에 주요한 메커니즘으로 고려하였다.

수치해석 방법을 이용하여 핵비등 시 미세액막층의 증발 열전달 특성을 이해하려는 연구 또한 수행되어 왔으며, 대표적인 연구팀으로 미국의 Dhir 그룹<sup>(4)</sup>과 독일의 Stephan 그룹<sup>(5-6)</sup>있다. Dhir 그룹<sup>(4)</sup>은 수평비등표면에서 비등기포의 성장 및 이탈에 대한 수치모사를 수행하였다. 단일기포 성장을 분석하기 위해 미세액막층을 포함하는 micro region과 비등기포를 둘러싸고 있는 액체를 포함하는 macro region으로 나누어 모델링 하였으며, 시간에 따른 micro region의 두께변화를 질량보존 방정식을 이용해 모델링하고 운동량, 에너지 보존 방정식을 결합하여 미세액막층을 통한 열전달량을 계산하였다. Stephan 그룹<sup>(5,6)</sup>은 micro region의 두께, 곡률, 압력 및 열유속을 벽면온도에 대한 방정식으로 표현하여 micro region을 모델링 하였다. 수치해석을 통해 삼중선 근처에서 삼중선의 이동속도와 방향이 삼중선에서 열전달에 영향을 주는 것을 확인하였으며, 액상과 기상 접선거동은 미세액막층에서의 증발현상과 순간적인 열전도현상이 주요하게 작용하는 것을 보였다.

최근에는 상용 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 프로그램들에서도 핵비등 현상을 모사하기 위한 시도들을 하고 있다. Lo 등<sup>(7)</sup>은 STAR-CCM+를 이용하여 원자력발전소 단위 핵연료 집합체 내부의 비등 열전달 특성을 전산모사를 통해 분석하였다. Krepper 등<sup>(8)</sup>은 ANSYS-CFX의 과냉비등모델을 이용하여 핵연료 집합체에서의 비등 열전달과 유동현상을 모사하고 그 결과를 실험결과와 비교하였다. Lee 등<sup>(9)</sup>은 3차원 고정밀 열수력 해석 코드인 CUPID를 이용하여 피동냉각계통 냉각탱크에 발생하는 2상 유동현상을 해석하고 실험결과와 비교하여 해석코드를 검증하였다.

상용 CFD에서 미세액막층에서 발생하는 열전달을 계산하기 위하여 앞선 연구자들이 제안한 모델링 방법을 사용하는 경우 비현실적으로 큰 계산 시간을 필요로 하여 실제적으로 활용이 불가능하다. 따라서 최근 CFD에 활용하기 위해 기존의 미세액막층 모델을 단순화시킨 simple microlayer model이 제안되었다.<sup>(10)</sup>

### 1.1 Simple microlayer model

Fig. 2에서 보여지는 simple microlayer model은 미세액막층의 초기 형성 두께, 평균 이동 속도 및 반경을 이용하여 미세액막층의 증발 열전달률을 단순화하여 계산하기 위해 제안된 모델이다. 미세액막층의 증발 열유속은 다음과 같이 미세액막층 두께 변화를 통해 계산된다.

$$q''_{evap} = \rho_l h_{fg} \left(-\frac{d\delta}{dt}\right) \quad (1)$$

Cooper and Lloyd<sup>(3)</sup>와 Guion *et al.*<sup>(11)</sup>은 미세액막층과 계면저항에서의 열용량이 무시할만하고 미세액막층 내에서 유체의 흐름이 없다고 가정하였다. 따라서 미세액막층 내에서 전도 열유속은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$q''_{cond} = k \frac{T_{wall} - T_{sat}}{\delta} = k \frac{\Delta T}{\delta} \quad (2)$$

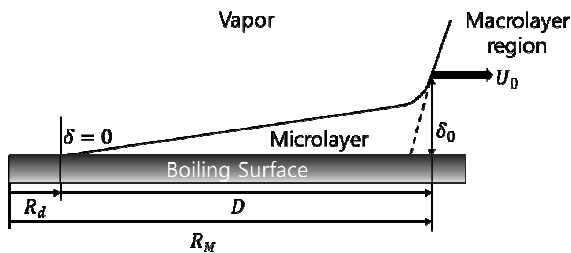


Fig. 2 Conceptual description of simple microlayer model

이 전도 열유속의 크기는 미세액막층 표면에서 증발하는 액체에 의한 열유속의 크기와 같으므로 다음과 같은 관계를 얻게 된다.

$$q''_{cond} = q''_{evap} \quad (3)$$

$$k \frac{\Delta T}{\delta} = \rho_l h_{fg} \left(-\frac{d\delta}{dt}\right) \quad (4)$$

$$\frac{\beta}{\delta} = -\frac{d\delta}{dt} \quad (5)$$

여기서  $\beta = \frac{k\Delta T}{\rho_l h_{fg}}$ 이다. 변수분리를 이용해 미분방정식의 해를 구하면 다음과 같다.

$$\delta = \sqrt{\delta_0^2 - 2\beta t} \quad (6)$$

Fig. 2에서 미세액막층 표면이 증발에 의해 이동하는 거리  $D$ 는 평균 이동 속도와 이동 시간의 곱으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D = U_0 t_{evap} = \frac{U_0 \delta_0^2}{2\beta} \quad (7)$$

이때,  $t_{evap}$ 는  $\delta = 0$ 인 지점으로부터  $\delta = \delta_0$ 를 갖는 지점까지 미세액막층의 증발로 인하여 이동할 때 소요되는 시간으로 식 (6)의 값을 0이 되게 하는 값이다.

$$t_{evap} = \frac{\delta_0^2}{2\beta} \quad (8)$$

따라서 미세액막층이 증발에 의해 거리  $D$ 를 이동하는데 필요한 열전달률은 다음과 같이 계산된다.

$$Q' = \int_0^D q''_{cond} dx = \int_0^D \frac{k\Delta T}{\delta} dx \quad (9)$$

식 (9)에 식 (6)를 대입하면 다음과 같으며,

$$Q' = \int_0^D \frac{k\Delta T}{\sqrt{\delta_0^2 - 2\beta t}} dx \quad (10)$$

최종적으로 다음의 해를 얻는다.

$$Q' = \frac{k\Delta T \delta_0 U_0}{\beta} = \rho_l h_{fg} U_0 \delta_0 \quad (11)$$

### 1.2 연구 목적

상용 CFD 적용을 위하여 simple microlayer model

이 제안되었으나 아직까지 실험적 검증이 이루어지지 않은 상태이다. 본 연구의 목적은 simple microlayer model의 열전달률 예측 정확도 검증을 위해 필요한 단일기포 핵비등 시 미세액막층의 두께 및 이동속도 정보를 광학적 측정 기법을 이용하여 획득하는 것이다.

## 2. 실험

### 2.1 광학 측정 기법

본 연구에서는 단일기포 핵비등 시 미세액막층에 의해 나타나는 빛의 전반사(total reflection) 및 간섭(interference) 특성을 분석하여 미세액막층의 구조 및 이동속도를 측정하였다. 본 절에서는 측정 기법에 대해 설명한다.

#### 2.1.1 전반사 기법

전반사 가시화 기법은 빛이 밀 한 매질에서소한 매질로 이동하면서 경계면에서 굴절되지 않고 모두 반사되는 현상을 이용한 기법이다. 전반사가 일어날 수 있는 최소 입사각을 임계각이라 하며 임계각보다 큰 각으로 입사 했을 때 경계면에서 전반사가 발생하게 된다. 임계각( $\theta_c$ )은 식 (12)을 통해 계산된다.

$$\frac{\sin 90^\circ}{\sin \theta_c} = \frac{n_s}{n_v} \quad (12)$$

기체의 굴절률이 액상보다 작으므로 임계각 또한 작은 값을 가진다. 따라서 기상의 임계각보다 크고 액상의 임계각보다 작은 각으로 빛을 비등표면으로 입사시키게 되면 때 기상에서만 전반사가 일어나며, 전반사 된 빛을 고속카메라를 이용해 촬영하면 기상영역은 밝게, 액상영역은 어둡게 나타난다(Fig. 3). 이를 통해 액상-기상 영역을 구분할 수 있고 삼중선의 위치를 추적할 수 있다.

전반사 기법의 활용을 위해 사선인 방향에서 촬영 시 기울어진 각도에 따라 일정한 비율로 이미지에 왜곡이 발생한다. 이를 보정해주기 위해 4 mm 지름을 가지는 세 개의 원으로 이루어진 시

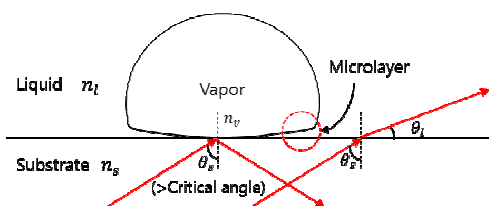


Fig. 3 Conceptual description of total reflection technique

편을 비등 실험 전후에 CaF<sub>2</sub> 기판 위에 올려놓고 촬영하였다. 이후 데이터 분석 시 보정용으로 촬영된 이미지의 타원이 원이 되도록 하는 보정 비율을 찾고 보정인자를 비등 실험 전반사 이미지에 적용하여 왜곡을 보정하였다.

#### 2.1.2 간섭 기법

비등기포 하부에 존재하는 미세액막층의 위치와 두께 정보를 얻기 위해 간섭 기법을 이용하였다.

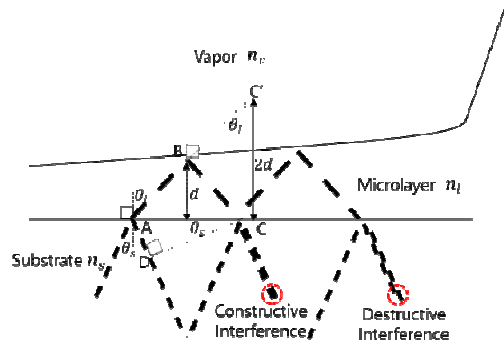
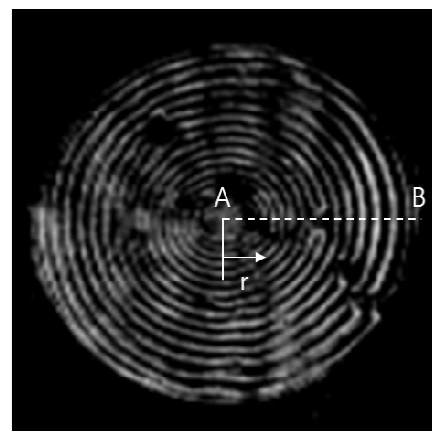
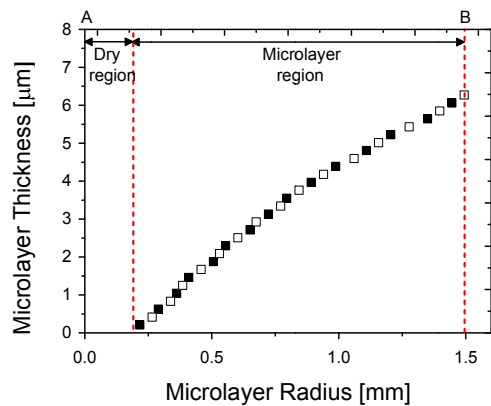


Fig. 4 Conceptual description of interferometry technique



(a)



(b)

Fig. 5 Example of interferometry analysis. (a) Fringe patterns due to microlayer, (b) reconstructed microlayer geometry

Fig. 4 는 미세액막층의 상부면과 하부면에서 반사되는 빛의 광로차에 의해 보강 또는 상쇄 간섭이 발생하는 원리를 나타낸다. 미세액막층의 상부면과 하부면에서 반사되는 빛의 광로차  $\Delta$  (optical path difference)는 식 (13)과 같이 표현된다.

$$\Delta = n_l(\overline{AB} + \overline{BC}) - n_s(\overline{AD}) = 2n_l d \cdot \cos \theta \quad (13)$$

두 빛의 광로차가 파장의 정수 배에 비례하는 경우 보강간섭이 발생하며, 정수+1/2 배에 해당하는 경우 상쇄간섭이 발생한다. 식 (14), 식 (15)는 각각 보강간섭과 상쇄간섭을 나타낸다.

$$2n_l \cdot d_m \cdot \cos \theta = \frac{\lambda}{2} \cdot 2m_l, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (14)$$

$$2n_l \cdot d_m \cdot \cos \theta = \frac{\lambda}{2} \cdot (2m_l + 1), \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (15)$$

최종적으로 간섭 무늬간 미세액막층의 두께차는 다음과 같이 표현된다.

$$d_{m+1} - d_m = \frac{\lambda}{2n_l \cos \theta_l} \quad (16)$$

Fig. 5 는 미세액막층 영역에서 관찰되는 간섭 무늬와 미세액막층의 두께 분석 예시를 보여준다.

### 2.2 실험장치

Fig. 6 은 수평 벽면 실험장치 구성 개념도이다. 실험장치는 크게 비등수조와 전반사 가시화와 간섭 기법 적용을 위한 광학장치로 구성되어 있다. 풀비등 수조 내 이머전 히터(immersion heater)와 T-type 열전대를 설치하여 유체를 포화온도로 유지하였으며, 실험 시편은 비등 수조 바닥에 위치한다.

Fig. 7 은 실험에 사용된 시편의 개념도를 나타낸다. 실험 시편으로는 가시광선에 대한 투과성이 우수한  $\text{CaF}_2$  기판을 사용하였으며, 기판 위에 투명 전극물질인 Indium-Tin-Oxide(ITO)를  $8 \times 15 \text{ mm}^2$  크기로 증착하였다. ITO 양단에 Pt 를 증착하여 전압을 인가하였다. 시편 하부에 직각 이등변 삼각형을 밑면으로 하는 삼각기둥 형태의 프리즘을 설치하여 시편으로부터 유체로 입사하는 빛의 전반사가 가능하도록 하였다.

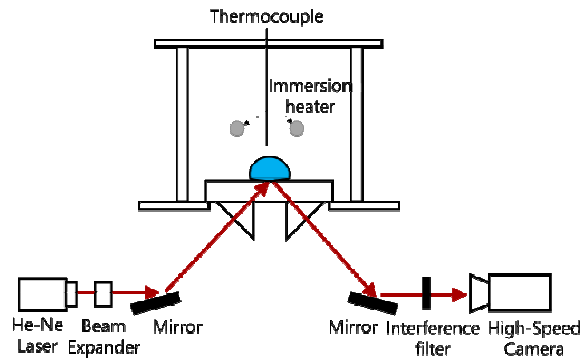
미세액막층 구조를 측정하기 위해서 전반사 가시화 광원으로 섭성 길이(coherence length)가 길고 주파수가 안정적인 파장 632 nm 의 헬륨-네온 레이저를 사용하였다. 레이저 빔의 세기는 대칭 분포를 가지며 가장자리로부터 중심으로 진행할수록 세기가 증가한다. 레이저에서 발생한 빔은 약 1 mm 의 지름을 갖고 있으며 beam expander(Edmund

optics, 20× complete beam expander)를 이용하여 약 20 배 확대된 후 거울과 프리즘을 거쳐 비등표면으로 입사한다. 비등표면에서 반사된 빛의 불필요한 성분을 제거하고 632 nm 파장에 해당하는 빛만을 선별하기 위해 고속카메라 전단에 간섭필터(Edmund optics, 632 nm CWL, 10 nm FWHM, 50 mm mounted diameter)를 설치하였다.

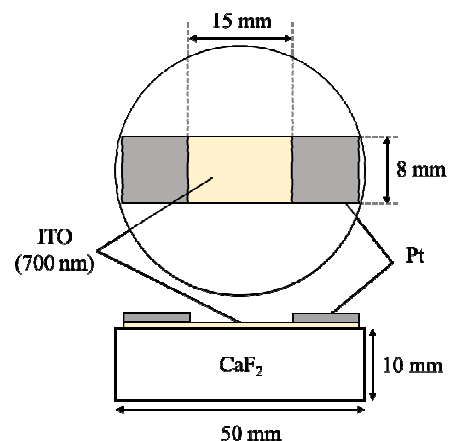
비등 표면으로 입사하는 빛의 각도는 기상의 임계각 약  $41^\circ$ 와 액상의 임계각 약  $59^\circ$ 의 사잇각인  $45^\circ$ 이다. 따라서 기상영역에서 전반사 된 빛이 고속카메라로 입사한다.

**Table 1** Surface temperature before nucleation and bubble data at an input heat flux of  $200 \text{ kW/m}^2$

| Bubble # | Surface Temperature [°C] | Microlayer depletion time [ms] | Bubble departure time [ms] |
|----------|--------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| 1        | 118.2                    | 14.1                           | 24.3                       |
| 2        | 120.3                    | 11.4                           | 25.0                       |
| 3        | 119.6                    | 14.0                           | 24.3                       |
| 4        | 119.3                    | 11.2                           | 23.1                       |



**Fig. 6** Schematic diagram of the experimental setup



**Fig. 7** Schematic diagram of a boiling sample

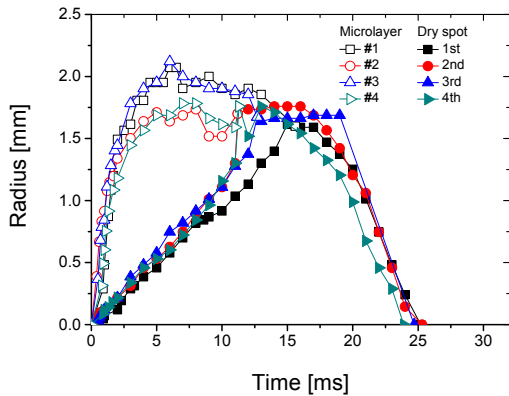


Fig. 8 History of dry spot and microlayer radius

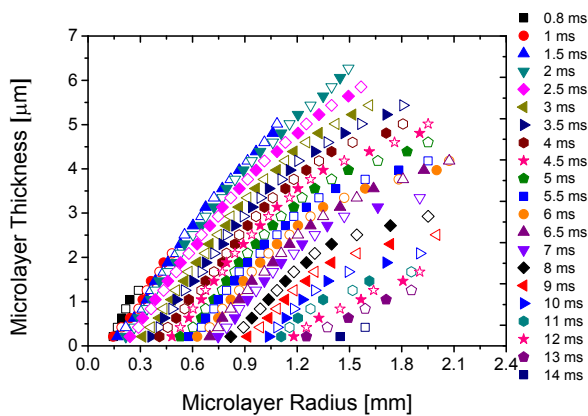


Fig. 9 History of microlayer geometry for #1 bubble

### 3. 실험 결과

본 장의 결과는 풀 상황에서 포화 조건 및 평균 열유속  $200 \text{ kW/m}^2$  에 대한 수평 벽면에서의 순수물의 핵비등 열전달 실험 결과로, 동일한 기포 생성 지점에서 생성되는 4 개의 비등기포를 분석한 것이다. Table 1 은 각 비등기포의 기포의 생성직전 평균 표면 온도, 미세액막층 소멸 시간, 기포이탈시간 및 주기를 보여준다.

적외선 카메라를  $\text{CaF}_2$  시편 아래쪽에 설치하여 ITO 비등 표면에서 방출되는 적외선의 강도를 측정하여 비등표면의 온도를 측정한다.  $\text{CaF}_2$  기판은 가시광선과 더불어 적외선에 대해 높은 투과도를 가지는 반면, ITO 는 적외선에 대해 불투명하다.  $\text{CaF}_2$  기판은 10 mm 두께를 가질 때  $5 \mu\text{m}$  이하의 파장 범위에서 95%의 투과도를 보인다. 본 연구에서는 위 파장 범위에 해당하는 3-5  $\mu\text{m}$  중적외선 카메라를 사용하였다. ITO 에서 방출되는 적외선 강도는 온도와 방출률(emissivity)의 함수이며, 실험 온도 범위 내에서 방출률이 일정하다고 가정할 때 ITO 의 온도와 적외선 강도간의 관계를 사전에 보정하여 얻은 관계식을 이용하여 온도를 환산하였다. 보정에 의한 온도 측정 오차는  $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$  이다.

Table 2 Time and space-averaged microlayer parameters

| Bubble # | $\bar{\delta}_0$ [ $\mu\text{m}$ ] | $\bar{U}_0$ [m/s] |
|----------|------------------------------------|-------------------|
| 1        | 6.269                              | 0.109             |
| 2        | 4.597                              | 0.117             |
| 3        | 6.269                              | 0.128             |
| 4        | 4.597                              | 0.122             |
| Average  | 5.433                              | 0.119             |

#### 3.1 미세액막층 형성과 소멸

Fig. 8 은 미세액막층과 건조영역의 반경 변화를 보여준다. 기포생성초기에는 기포 내부의 높은 압력에 의해 미세액막층이 매우 빠르게 성장하였고 기포 내부 압력이 기포 주변 액체 압력에 가까워지며 미세액막층의 성장속도가 점차 감소하는 것을 확인하였다. 미세액막층은 7 ms 근방에서 최대로 성장한 후 11-14 ms 에 모두 소멸되었다. 반면 삼중선은 벽면과의 전단응력에 의해 미세액막층과 동일한 속도로 성장하지 못한다. 따라서 삼중선의 이동 즉 건조영역의 반경은 미세액막층의 성장에 비해 느리게 성장하며, 미세액막층의 소멸과 동시에 성장을 멈춘 후 건조영역은 수축하며 이내 기포는 표면으로부터 이탈하였다. 이러한 결과를 근거로 미세액막층의 지속적인 증발이 건조영역의 팽창에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

#### 3.2 미세액막층 두께 변화

Fig. 9 는 미세액막층 영역에서의 간섭무늬를 분석하여 얻은 기포 생성 및 성장과정 동안 미세액막층 두께변화를 보여준다. 채워진 점은 상쇄간섭 고리를 나타내며, 비워진 점은 보강간섭 고리를 나타낸다. 앞서 살펴본 미세액막층의 반경 변화와 동일하게 기포성장 초기 ( $t < 2 \text{ ms}$ ) 미세액막층 두께가 매우 빠르게 증가하고, 2 ms 에서 최대 두께를 가지는 것을 확인하였다. 표면 열유속  $200 \text{ kW/m}^2$  에서 물에 대한 미세액막층의 최대 두께는 약  $6 \mu\text{m}$  이며 최대 두께를 가질 때 미세액막층의 반경은 약 1.5 mm 로, 미세액막층이 반경 방향으로 매우 얇게 퍼지는 형상을 나타냄을 확인할 수 있다. Guion 등<sup>(11)</sup>은 이러한 형상의 미세액막층을 ‘extended liquid microlayer’라고 정의하였다.

#### 3.3 초기 미세액막층 두께

초기 미세액막층 두께는 기포 생성 지점으로부터 미세액막층이 확장되면서 반경 방향의 특정지점에 처음 도달한 미세액막층의 두께로 정의한다.<sup>(12-14)</sup> Fig. 10 은 물에서 서로 다른 표면 열유속



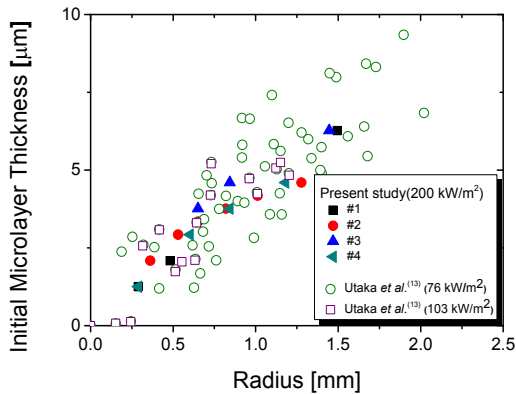


Fig. 10 Initial microlayer thickness vs. radius

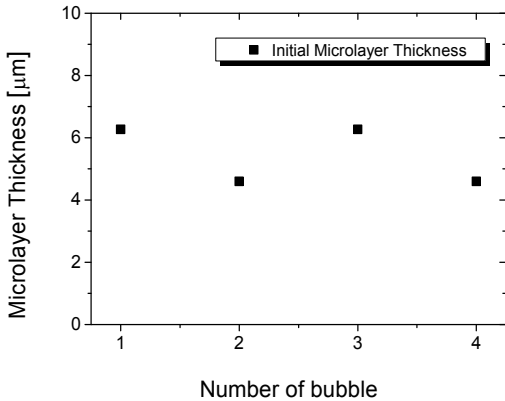


Fig. 11 Initial microlayer thickness

조건에서 초기 미세액막층의 두께를 측정한 본 연구와 Utaka 등<sup>(13)</sup>의 결과를 비교하여 보여준다. 두 연구 반경이 증가함에 따라 초기 액막층의 두께가 큰 특성을 보였으며, 서로 다른 열유속 조건에서 초기 미세액막층의 정량적 두께 또한 매우 유사한 결과를 나타내었다. 미세액막층은 열경계층(thermal boundary layer)의 온도에 대응되는 포화 압력을 가지는 기포가 벽면 근처에서 빠르게 팽창하면서 생성된다. 일반적으로 열경계층의 온도는 열유속에 비례하나 활성공동(active nucleate site)의 유무 또는 특성에 따라 동일한 열유속 조건에서도 서로 다른 표면온도를 가질 수 있다. 따라서 표면온도에 대한 정보가 없이 열유속 정보만을 이용하여 Utaka 등<sup>(13)</sup>와 본 실험결과를 정량적으로 비교하여 평가하는 것은 어렵다. 또한 두 연구에서 변화시킨 열유속의 범위가 초기 미세액막층의 변화를 관찰하기에 너무 작은 것이 원인이었을 가능성 또한 있다. 따라서 향후 더 넓은 열유속 범위에서 초기 미세액막층의 두께 측정 실험을 열유속 뿐만 아니라 표면온도를 함께 측정하는 추가 연구가 수행되어야 할 필요성이 있다.

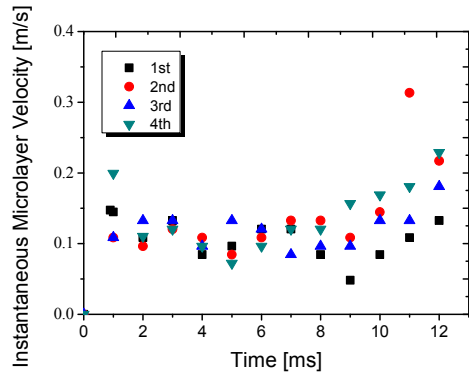


Fig. 12 Microlayer velocity during bubble growth

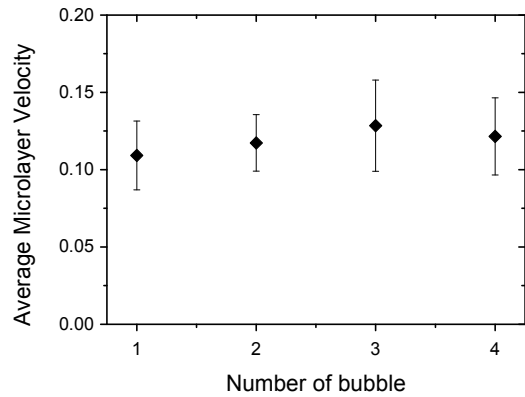


Fig. 13 Average microlayer velocity

Simple microlayer model 에서  $\delta_0$  는 Fig. 2 에서 보여주는 바와 같이 미세액막층의 가장 바깥쪽으로 macrolayer 영역이 시작되는 지점에서의 미세액막층의 두께이며 이는 전체 미세액막층 구간에서 최대값이다. 따라서 실험결과와 비교 시 미세액막층이 완전히 형성된 지점에서의 최대 두께를 선택하는 것이 옳다. Fig. 11 은 동일한 기포 생성 지점에서 생성된 네 개의 기포에 대한 최대 초기 미세액막층 두께를 나타내며, Table 2 는 측정 값들을 요약하여 보여준다. 획득한 값들은 평균  $5.4 \mu\text{m}$  의 초기 미세액막층 두께를 보였으며, 기포에 따라 평균값으로부터 최대  $\pm 0.836 \mu\text{m}$  의 오차를 가졌다.

### 3.4 미세액막층 이동속도

Fig. 8에서 살펴본 바와 같이 미세액막층의 증발이 일어나는 동안 액막층은 거의 일정한 속도를 유지하면서 성장하고, 이후 미세액막층은 완전히 소멸되고 건조영역의 반경이 점차 수축하여 이탈에 이르게 된다.

Fig. 12는 미세액막층이 존재하는 구간에서 증발에 의한 액막층의 수평 이동속도를 나타낸다. 시간에 따라 이동속도가 대부분  $0.10 \text{ m/s}$ 에서  $0.15 \text{ m/s}$  사이 구간에서 경향성 없이 변화하는 특성을

보여준다. 이는 기포의 성장 동안 미세액막층의 증발 특성이 큰 변화 없이 거의 유사하게 유지된다는 것을 의미한다.

Fig. 13은 시간에 따른 미세액막층의 순간 이동속도를 평균한 비등 기포 별 평균 이동속도와 표준편차를 보여준다. 본 연구에서 측정된 네 개 기포의 실험 결과를 분석하여 얻은 미세액막층의 평균 이동속도는 0.12 m/s이었다.

#### 4. 결론

대기압 포화상태 물에서 단일기포 핵비등 시 미세액막층의 두께, 반경 및 수평 이동속도를 전반사 가시화 기법과 레이저 간섭기법을 이용하여 측정하였다. 본 연구에서 얻은 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 핵비등 기포의 빠른 팽창으로 인해 하부에 미세액막층이 매우 얇고 넓게 형성되는 것을 관찰하였으며, 액체의 증발에 의해 두께가 얇아지다가 소멸되면서 건조영역이 확장되는 것을 관찰하였다. 생성되는 미세액막층의 최대 두께 및 대응되는 반경은 6  $\mu\text{m}$  와 1.5 mm 였다.

(2) 시간에 따른 미세액막층 구조 변화로부터 초기 최대 두께 및 평균 이동속도를 계산하였다. 초기 미세액막층의 두께는 평균  $\sim 5.4 \mu\text{m}$  이었고, 증발에 의한 미세액막층의 평균 이동속도는  $\sim 0.12 \text{ m/s}$  이었다.

향후 본 연구를 통해 획득한 미세액막층의 구조 및 운동 특성에 대한 측정 결과를 이용하여 simple microlayer model 의 미세액막층 증발 열유속 예측을 정확도를 평가 연구를 수행할 계획이다.

#### 후 기

이 논문은 2013 년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임. (NRF-2013M2B2A9A03051378)

#### 참고문헌 (References)

- (1) Jawurek, H. H., 1969, "Simultaneous Determination of Microlayer Geometry and Bubble Growth in Nucleate Boiling," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 12, No. 8, pp. 843~848.
- (2) Koffman, L. D. and Plesset, M. S., 1983, "Experimental Observations of the Microlayer in Vapor Bubble Growth on a Heated Solid," *Journal of heat transfer*, Vol. 105, No. 3, pp. 625~632.
- (3) Cooper, M. G. and Lloyd, A. J. P., 1969, "The Microlayer in Nucleate Pool Boiling," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 12, No. 8, pp. 895~913.
- (4) Son, G., Dhir, V. K. and Ramanujapu, N., 1999, "Dynamics and Heat Transfer Associated with a Single Bubble During Nucleate Boiling on a Horizontal Surface," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 121, No. 3, pp. 623~631.
- (5) Kunkelmann, C. and Stephan, P., 2009, "CFD Simulation of Boiling Flows Using the Volume-of-fluid Method within OpenFOAM," *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, Vol. 56, No. 8, pp. 631~646.
- (6) Kunkelmann, C., Ibrahim, K., Schweizer, N., Herbert, S., Stephan, P. and Gambaryan-Roisman, T., 2012, "The Effect of Three-phase Contact Line Speed on Local Evaporative Heat Transfer: Experimental and Numerical Investigations," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, No. 7, pp. 1896~1904.
- (7) Lo, S. and Osman, J., 2012, "CFD Modeling of Boiling Flow in PSBT 5 $\times$  5 Bundle," *Science and Technology of Nuclear Installations*, Vol. 2012, No. 795935, p. 8.
- (8) Krepper, E., Končar, B. and Egorov, Y., 2007, "CFD Modelling of Subcooled Boiling—Concept, Validation and Application to Fuel Assembly Design," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 237, No. 7, pp. 716~731.
- (9) Lee, S., Cho, H. and Yoon, H., 2012, "Multi-dimensional Two-phase Flow Analysis for the Passive Cooling Tank," *Journal of Mechanical Science and Technology*, pp. 326~327.
- (10) Tryggvason, G., 2007, "Studying Dynamics of Heterogeneous Continuum Systems Using DNS," in *Program on Random Media-Opening Workshop*.
- (11) Guion, A., Langewisch, D. and Buongiorno, J., 2013, "Dynamics of the Liquid Microlayer Underneath a Vapor Bubble Growing at a Heated Wall," In *ASME 2013 Heat Transfer Summer Conference collocated with the ASME 2013 7th International Conference on Energy Sustainability and the ASME 2013 11th International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology*, pp. V002T07A044~V002T07A044.
- (12) Zhang, Y. and Utaka, Y., 2012, "Characteristics of Microlayer Formation and Heat Transfer in Mini/microchannel Boiling Systems: A Review," *Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT)*, Vol. 3, No. 1.
- (13) Utaka, Y., Kashiwabara, Y. and Ozaki, M., 2013, "Microlayer Structure in Nucleate Boiling of Water and Ethanol at Atmospheric Pressure," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 57, No. 1, pp. 222~230.
- (14) Utaka, Y., Kashiwabara, Y., Ozaki, M. and Chen, Z., 2014, "Heat Transfer Characteristics Based on Microlayer Structure in Nucleate Pool Boiling for Water and Ethanol," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 68, pp. 479~488.