

# 슬러그 유동 조건에서 국소 기포인자 측정을 위한 4-센서 광섬유 프로브 개발

문정민\* · 윤병조\*†

## Development of 4-sensor Optical Fiber Probe for the Measurement of Local Bubble Parameters under the Slug Flow

Jeongmin moon\*, Byongjo Yun\*†

*Key Words* : Void Fraction(기포율), Bubble Velocity(기포 속도), Interfacial Area Concentration(계면면적밀도),  
4-sensor Optical Fiber Probe(4-센서 광섬유 프로브), Slug(슬러그)

### ABSTRACT

Bubble parameters such as void fraction, bubble velocity, and interfacial area concentration(IAC) are important for an accurate prediction of bubble behaviors in the two-phase flow. The 4-sensor probe method is one of the representative multi-sensor probe techniques which can measure the local bubble parameters regardless of bubble shape and bubble behavior. However, there is a lack of evaluation as to whether it is applicable to flow conditions in which distorted and slug bubbles appear. Therefore, in this study, the performance of 4-sensor probe was investigated with numerical simulations under the postulated flow conditions for various bubble shapes. It is found from the study that bubble parameters are measured more accurately as the radial distance between sensors is close. For the IAC, the method proposed by Revankar et al. showed the best accuracy. Also, in order to verify the design of the optimized 4-sensor optical fiber probe, verification experiment was performed in the air-water flow condition. It showed that the 4-sensor optical fiber probe(4S-OFP) measured the void fraction, bubble velocity, and IAC within 10 %, 8 %, and 22 % of deviations against visualization data, respectively.

### 1. 서 론

2상 유동은 주로 화학공학, 원자력, 바이오 분야에서 다루지는 유동 현상으로 단상 유동과 달리 상 경계면을 통해 질량, 운동량, 에너지가 전달되는 특성이 있다. 이러한 특성으로 인해 관내에서는 2상 유동 압력강하, 비등 및 응축 현상 등 복잡한 유동 현상이 발생된다. 전산유체역학(CFD, computational fluid dynamics) 코드에서는 이러한 2상 유동 현상을 예측하기 위해 각 상에 대한 질량, 운동량 그리고 에너지 보존 방정식과 같은 구성 방정식들이 이용된다. 구성 방정식에 사용되는 대표적인 2상 유동 변수는 기포율, 기포 속도, 그리고 계면면적밀도가 있으며 이들은 물리 모델을 통해 계산된다. 따라서 해석 코드를 이용하여 2상 유동 변수를 정확하

게 예측하기 위해서는 우수한 물리 모델의 적용이 필요하다. 이러한 물리 모델을 다양한 유동 조건에서 범용으로 사용하기 위해서는 신뢰도가 높은 실험데이터를 이용하여 개발하고 검증하는 것이 요구된다. 과거 여러 연구자들은 국소 2상 변수를 측정하기 위해 다중 센서 프로브 기법을 이용하였다.<sup>(1-7)</sup>

대표적인 다중 센서 프로브로 2-센서 프로브와 4-센서 프로브가 있다. 2-센서 프로브는 1 쌍의 전단부와 후단부 센서로 구성되어 있으며 기포가 각 센서를 통과하며 발생시키는 시간 차이를 이용하여 기포 속도와 단위 부피당 계면면적을 의미하는 계면면적밀도를 측정한다.<sup>(1,2)</sup> 그러나 2-센서 프로브를 이용한 측정법은 기포를 구형으로 가정하고 있어 슬러그 기포 변수를 측정하는 경우 오차가 커진다. 이러한

\* 부산대학교 기계공학부 원자력시스템전공(Pusan National University, School of Mechanical Engineering, Nuclear Systems Major)

† 교신저자, E-mail : [bjyun@pusan.ac.kr](mailto:bjyun@pusan.ac.kr)

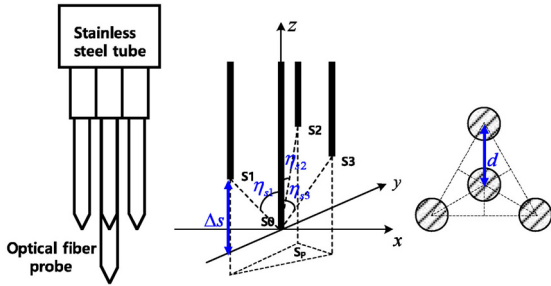


Fig. 1 The 4-sensor optical fiber probe(4S-OPF)

점을 보완하기 위해 여러 연구자들이 기포 형상에 관계없이 기포 변수를 측정할 수 있는 4-센서 프로브 기법을 개발하였다.<sup>(1,3-6)</sup> 4-센서 프로브는 1개의 전단부 센서와 동일 평면상에 위치한 3 개의 후단부 센서로 구성되며, 2-센서 프로브와 달리 3차원 기포 속도를 측정할 수 있다.

Kataoka et al.<sup>(1)</sup>은 4-센서 프로브로 부터 측정된 3 개의 국소 기포 속도값을 이용하여 국소 계면면적밀도를 측정하는 방법론을 제시하였다. 그러나 4-센서 프로브 기법은 프로브를 구성하는 센서 배열에 따라 유로 벽면 근처에서 1개 이상의 누락된 기포 신호가 발생할 수 있고 이 경우 국소 계면면적밀도 측정에 어려움이 따른다. 이를 보완하기 위해 Revankar et al.<sup>(3)</sup>는 유동 방향으로 정사영된 4-센서 프로브의 면적을 이용하여 누락된 기포 신호를 고려하는 국소 계면면적밀도 측정법을 개발하였다. 최근, Le Corre et al.<sup>(8)</sup>은 수치 모의실험을 통해 기포의 형상이 구형인 유동 조건에서 Kataoka et al.<sup>(1)</sup>이 제시한 국소 계면면적밀도 측정법을 평가하고, 누락된 기포 신호를 고려하는 새로운 보정 계수 방법론을 제시하여 국소 계면면적밀도 측정 정확도를 개선하였다. Euh et al.<sup>(9)</sup>은 기존 4-센서에 센서 1개를 추가한 5-센서 전도도 탐침 프로브를 이용하여 누락되는 기포의 수를 최소화 하는 방법론을 제시하고 몬테카를로 수치 모의실험을 통해 측정 방법론을 검증하였다.

기존의 연구자들은 주로 구형의 기포 형상을 가지는 유동 조건에서 4-센서 프로브의 성능 평가를 수행하였다. 그러므로 4-센서 프로브가 슬러그 기포와 같이 원형에서 왜곡된 형상을 가지는 유동 조건에서 적용 가능한 지에 대한 평가가 부족하다. 따라서 본 연구에서는 다양한 종횡비를 가지는 기포 형상에 대한 수치 모사 실험을 수행하여 국소 기포 속도와 국소 계면면적밀도에 관한 4-센서 프로브의 성능을 평가하였다. 평가는 Kataoka et al.<sup>(1)</sup>, Revankar et al.<sup>(3)</sup>, 그리고 Le Corre et al.<sup>(8)</sup>이 제시한 측정법을 대상으로 수행하였다. 그리고 센서의 성능을 실제 유동조건에서 정량적으로 평가하기 위해 유동 현상을 가시화할 수 있는 물-공기 사각유로 실험장치에 가시화 기법과 4-센서 프로브 기법을 적용하여 검증 실험을 수행하였다.

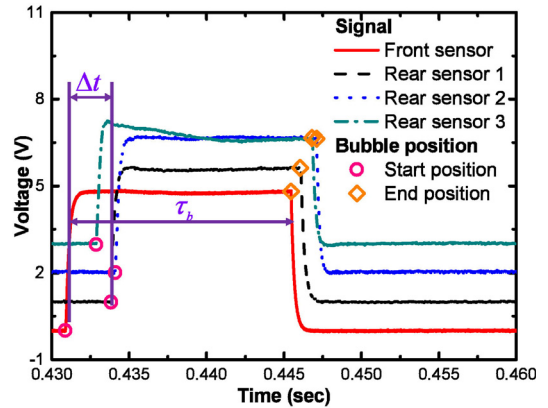


Fig. 2 Typical 4S-OPF signal by a bubble

## 2. 4-센서 광섬유 프로브를 이용한 기포 변수 측정 기법

광섬유 센서는 2상유동에서 상 경계면의 굴절률 차이로 인해 반사되는 레이저의 세기를 이용하여 상을 구별한다. 본 연구에서는 수치기법을 이용하여 4-센서 광섬유 프로브 (4S-OPF, 4-sensor optical fiber probe)의 최적 설계안을 도출하고 다양한 기포 형상에 대해 센서의 측정 정확도에 대한 평가 연구를 수행하였다. 4-센서 광섬유 프로브는 Fig. 1과 같이 1개의 전단부 센서와 동일 평면상에 위치한 3개의 후단부 센서로 구성되며 각각의 센서에서는 Fig. 2와 같은 신호를 발생시킨다. 이때 센서 신호로부터 측정된 각각의 시간 간격( $\tau_b, \Delta t$ )을 이용하여 국소지점에서의 국소 기포율, 국소 기포속도, 그리고 국소 계면면적밀도를 계산할 수 있다.

국소 기포율( $\alpha$ )은 다음 식과 같이 측정된 시간에 대한 기포 통과 시간의 비로 계산된다.

$$\alpha = \frac{\sum_{j=1}^{N_b} (\tau_b)_j}{\Omega} \quad (1)$$

여기서  $\Omega$ 는 전체 측정 시간이며  $\tau_b$ 는 기포가 전단부 센서를 지나는 시간을 의미한다.

국소 기포 속도( $|\vec{v}|$ )는 전단부 센서와 후단부 센서로 조합된 3쌍의 2-센서를 이용하여 식 (2)와 같이 계산된다.<sup>(9)</sup>

$$|\vec{v}|^2 = \frac{|A_0|}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2}}, A = f(v, \eta) \quad (2)$$

국소 계면면적밀도( $\bar{a}_i$ )는 2상유동 해석에서 상간의 질량, 모멘텀 그리고 에너지 전달량을 결정하는 주요 변수 중 하나로서 이를 측정하기 위해 Kataoka et al.<sup>(1)</sup>은 다음 식을 유도하였다.

$$\overline{a_i} = \frac{1}{\Omega} \left\{ \left( \frac{1}{v_{s1j}} \right)^2 + \left( \frac{1}{v_{s2j}} \right)^2 + \left( \frac{1}{v_{s3j}} \right)^2 \right\} \quad (3)$$

그러나 식 (3)은 4-센서 프로브의 물리적 크기와 센서 배치로 인해 기포가 하나 이상의 센서를 통과하지 않는 경우에 적용할 수 없는 문제점이 있다. 이를 보완하기 위해 Revankar et al.<sup>(3)</sup>와 Le Corre et al.<sup>(8)</sup>은 누락된 기포 신호에 대한 국소 계면면적밀도를 고려하는 방법론을 제시하였다. Revankar et al.<sup>(3)</sup>은 유동 방향으로 정사영된 4-센서 프로브의 형상을 이용하여 누락된 기포 신호에 대한 국소 계면면적밀도를 계산하는 다음 식을 제시하였다.

$$\overline{a_{i,missing}} = \frac{\tau_{b,missing}}{\Omega} \frac{l_d}{s_p} \quad (4)$$

여기서,  $l_d$ 는 정사영된 형상의 모서리 국소 길이,  $s_p$ 는 정사영 면적,  $\tau_{b,missing}$ 는 누락된 신호의 잔류시간이다. 식 (5)는 누락된 기포 신호를 고려한 전체 계면면적밀도 계산식이다.

$$\overline{a_{i,total}} = \frac{1}{\Omega} \left\{ \left( \frac{1}{v_{s1j}} \right)^2 + \left( \frac{1}{v_{s2j}} \right)^2 + \left( \frac{1}{v_{s3j}} \right)^2 \right\} + \frac{\tau_{b,missing}}{\Omega} \frac{l_d}{s_p} \quad (5)$$

Le Corre et al.<sup>(8)</sup>은 전체 기포 신호에 대한 누락된 신호의 비율( $r_N$ )을 이용한 증배계수( $f$ )를 적용하여 다음과 같이 계면면적밀도를 정의하였다.

$$\overline{a_{i,total}} = \frac{1}{\Omega} \left\{ \left( \frac{1}{v_{s1j}} \right)^2 + \left( \frac{1}{v_{s2j}} \right)^2 + \left( \frac{1}{v_{s3j}} \right)^2 \right\} \times f, \quad (6)$$

$$f = \frac{1}{\sqrt{1 - \sqrt{2.4r_N - 1.5r_N^2}}}$$

### 3. 수치 모의 기법을 이용한 센서 성능 평가

4-센서 프로브를 이용한 기포 변수 측정 기법은 누락되는 신호의 영향을 받는다. 그러므로 누락되는 신호를 영향을 최소화 하는 최적화된 센서의 형상을 도출하기 위해서는 측정에 영향을 주는 인자들을 종합적으로 평가하여야 한다. 본 연구에서는 수치 모의 기법을 이용하여 다양한 기포 유동 조건에서 4-센서 프로브의 성능을 평가하였다.

#### 3.1 기포 경계 방정식

시물레이션을 통해 국소지점에서 기포율, 기포 속도 그리고 계면면적밀도를 계산하기 위해 기포 잔류 시간과 각각의 센서로부터 측정된 기포 경계면 속도를 정의하여야 하며 이를 위해 시간에 따른 기포 경계면을 수식화하여 나타낼 수

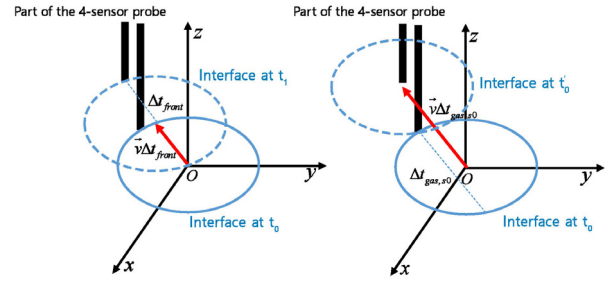


Fig. 3 Diagram of a bubble passing sensors of the probe

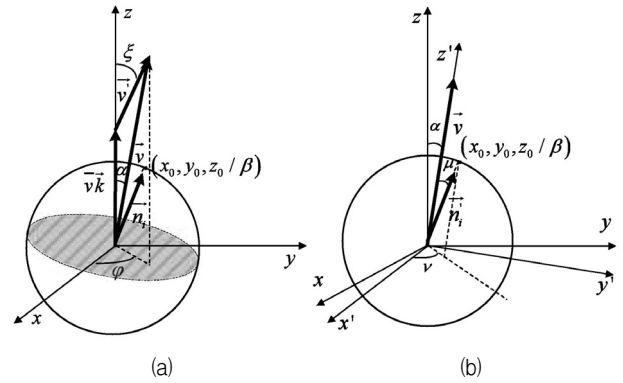


Fig. 4 surface normal vector

(a) in  $xyz$  coordinates (b) in  $x'y'z'$  coordinates

있다. Fig. 3은 직교좌표계에 시간에 대한 기포의 경계면을 나타낸 것으로 이는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$(x_k - v_x \Delta t)^2 + (y_k - v_y \Delta t)^2 + \frac{(z_k - v_z \Delta t)^2}{\beta^2} = R^2, \quad (7)$$

$$k = 0, 1, 2, 3$$

또한 상기 식으로부터 각각의 센서에 기포가 접촉하는 시간은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta t = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} a &= (\beta v_x)^2 + (\beta v_y)^2 + (v_z)^2 \\ b &= -2x_0 v_x \beta^2 - 2y_0 v_y \beta^2 - 2z_0 v_z \beta^2 \\ c &= (\beta x_0)^2 + (\beta y_0)^2 + (z_0)^2 - (\beta R)^2 \end{aligned}$$

여기에서  $(x_k, y_k, z_k)$ 는 기포 경계면에 접촉한 센서의 위치 좌표를 의미하며, 하첨자를 이용하여 전단부 센서( $k=0$ )와 후단부 센서( $k=1,2,3$ )로 구분하여 정의한다. 전단부 센서와 기포 경계면이 접촉하는 위치는 Fig. 4(a)와 같이 기포의 속도 방향과 수직한 단면에서 균일한 확률분포를 가지며, 기포 경계면에 수직한 단위법선벡터( $\vec{n}_i$ )를 이용하여 식 (9)와 같이 정의된다.

$$\left(x_0, y_0, \frac{z_0}{\beta}\right) = k\vec{n}_i \quad (9)$$

이때,  $\vec{n}_i$ 는 Fig. 4(b)와 같이  $\vec{n}_i'$ 과 좌표축으로 이루어진 각도를 이용하여 식(10)으로 나타낼 수 있다.<sup>(8)</sup>

$$\begin{aligned} \vec{n}_i &= B\vec{n}_i', B = f(\varphi, \xi, \vec{v}'/\vec{v}) \\ n_i' &= \sin\mu\cos\nu i + \sin\mu\sin\nu j + \cos\mu k \end{aligned} \quad (10)$$

후단부 센서의 위치는 전단부 센서의 위치와 4-센서 형상 ( $\cos\eta, \Delta s, d$ )의 상관관계에 따라 식 (11)과 같다.

$$(x_k, y_k, z_k) = f\left(\left(x_0, y_0, \frac{z_0}{\beta}\right), \cos\eta, \Delta s, d\right) \quad (11)$$

### 3.2 수치 모의를 위한 변수 정의

#### 3.2.1 기포 잔류 시간

국소 기포율 측정에 사용되는 기포 잔류 시간( $\Delta t_{gas,0,j}$ )은 기포 상부 경계면이 전단부 센서와 접촉하는 시간( $t_{0,j}$ )과 하부 경계면이 전단부 센서와 접촉하는 시간( $t'_{0,j}$ )을 이용하여 식 (12)와 같이 계산한다. 이때 기포 경계면이 센서와 접촉하는 시간은 해석적인 기포 경계 방정식을 이용하여 계산한다.

$$\Delta t_{gas,0,j} = t'_{0,j} - t_{0,j} \quad (12)$$

#### 3.2.2 기포 경계 속도

기포 경계 속도는 국소 기포 속도와 국소 계면면적밀도 측정에 필요한 주요 변수 중 하나로, 식 (13)과 같이 센서 사이의 변위벡터( $\vec{s}$ )와 전 후단부 센서에 기포 경계면이 각각 접촉한 시간의 간격( $\Delta t_{front\ or\ rear}$ )을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{v} = \frac{\vec{s}}{\Delta t_{front\ or\ rear,k,j}}, k = 1, 2, 3 \quad (13)$$

여기에서 시간 간격은 기포 경계방정식을 활용하여 다음과 같이 계산 한다.

$$\Delta t_{front,k,j} = t_{k,j} - t_{0,j} \quad (14)$$

$$\Delta t_{rear,k,j} = \Delta t_{front,j} + \Delta t_{gas,k} - \Delta t_{gas,0}, k = 1, 2, 3$$

#### 3.2.3 유효 신호와 누락된 신호

계면면적밀도 측정법은 기포가 4개의 센서를 모두 접촉한 경우 발생한 유효 기포 신호(Effective signal)와 4개의 센서 중 1개 이상의 센서에 접촉하지 않아 누락되는 기포 신호(missing signal)의 경우로 나누어진다. 그러므로 유효 기포

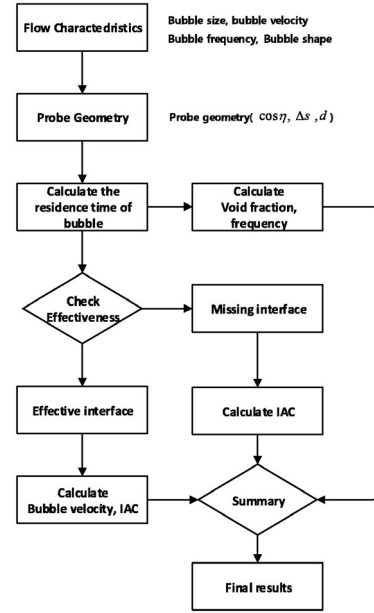


Fig. 5 Flow chart for Monte Carlo simulation

신호와 누락된 기포 신호를 구분할 필요가 있다. 이는 해석적인 기포 접촉 시간인 식 (8)을 활용함으로써 정의된다. 유효 기포 신호는 식 (8)이 실수이며 누락된 기포 신호는 식 (8)이 허수가 된다.

#### 3.2.4 몬테카를로 시뮬레이션

본 연구에서 센서를 이용한 기포인자 측정에 영향을 주는 다양한 변수를 평가하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션 기법을 적용하였다. 몬테카를로 시뮬레이션은 기포의 유동 조건, 기포 형상, 센서의 형상을 고려하여 Fig. 5와 같은 순서도에 따라 수행되었다. 기포는 난류 유동으로 인해 좌우로 흔들리며 상승하고, 이를 모사하기 위해 Fig. 4(a)와 같이 기포 속도( $\vec{v}$ )는 국소 기포 속도( $\vec{v}$ )와 기포 속도의 섭동( $\vec{v}'$ )의 함수로 정의하였다.<sup>(10)</sup>

$$\vec{v} = \vec{v}k + \vec{v}' = \vec{v}(k + H\vec{n}_v), \quad (15)$$

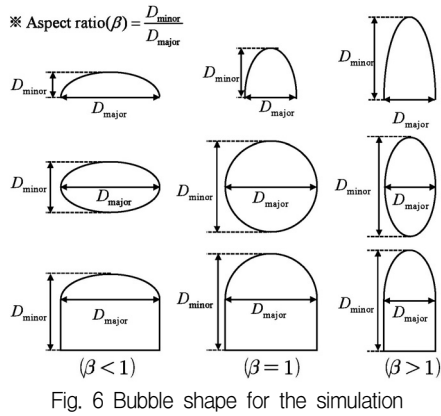
$$\vec{n}_v = \sin\xi\cos\varphi i + \sin\xi\sin\varphi j + \sin\xi k$$

여기에서 기포의 불규칙적 유동은 상대 기포 속도 섭동(H)과 섭동에 평행한 단위 벡터( $\vec{n}_v$ )로 정의하였으며, 각각의 확률 분포는 다음의 식 (16)과 식 (17)과 같다.

$$P(H) = \begin{cases} \frac{1}{H_{max}}, & H \in [0, H_{max}] \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (16)$$

$$P(\xi, \varphi) = \frac{1}{4\pi} \sin\xi, \xi \in [0, \pi], \varphi \in [0, 2\pi] \quad (17)$$

또한, 4-센서 프로브의 성능을 기포류, 슬러그류 유동 조

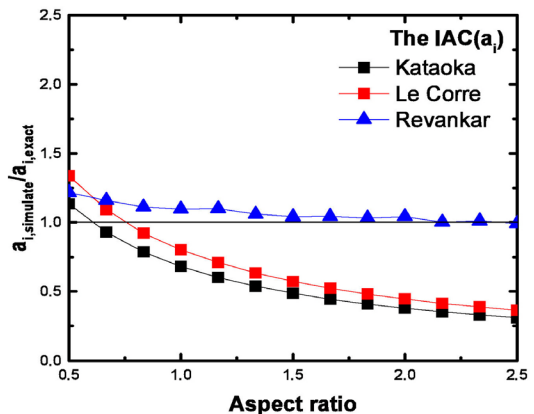
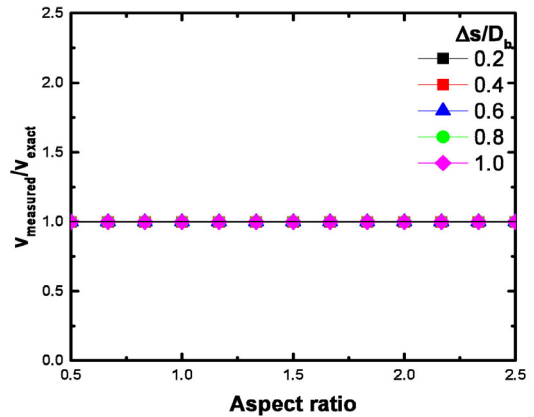
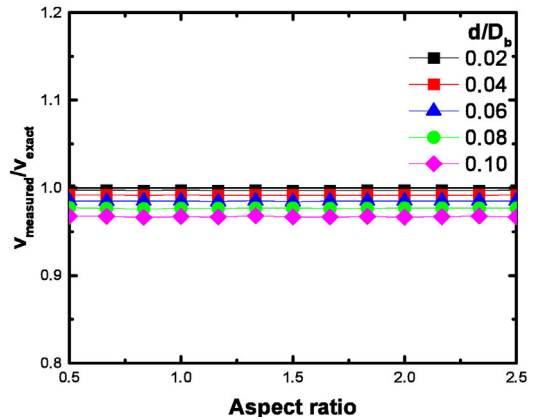


건에서 평가하기 위해 Fig. 6과 같이 다양한 종횡비를 가지는 기포에 대해 시뮬레이션을 수행하였다.

센서의 형상 설계 인자는 Fig. 1과 같이 반경 방향의 거리 ( $d$ )와 수직 방향의 거리( $\Delta s$ )에 따라 평가되었다.

### 3.3 시뮬레이션 결과

4-센서 프로브를 이용한 국소 기포변수 측정에 미치는 인자들을 독립적으로 평가하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하여 국소 기포 속도와 국소 계면면적밀도 측정 성능을 평가하였다. 국소 기포 속도는 프로브의 센서 간 거리와 기포가 전 후단부 센서에 기포 경계면이 각각 접촉하는 시간으로부터 계산됨으로 프로브와 기포의 형상에 영향을 받는다. Fig. 7과 Fig. 8은 다양한 기포 형상 조건에서 4-센서 프로브의 반경 방향의 거리와 수직 방향의 거리에 대한 국소 기포 속도 측정 정확도를 나타낸다. 국소 기포 속도는 센서 간 반경 방향의 거리가 가까울수록 측정 정확도가 높았다. 반면 센서 간 수직 거리와 기포 형상의 경우, 국소 기포 속도 측정에 큰 영향을 미치지 않는다. 국소 계면면적밀도는 누락된 기포 신호, 프로브의 형상 설계, 그리고 난류 섭동의 영향을 받는다. 누락된 기포 신호가 국소 계면면적밀도 측정에 미치는 영향은 계면면적밀도 측정 방법론에 따라 구분된다. Fig. 9는 각 선행 연구자의 국소 계면면적밀도 측정 방법론의 정확도를 나타낸다. 본 평가에서는 Fig. 9에서와 같이 Revankar et al.<sup>(3)</sup>가 제시한 계면면적밀도 측정 방법론이 가장 우수했다. 이는 Revankar et al.가 제시한 측정 방법론이 누락된 기포 신호의 계면면적밀도를 적절히 고려하는 것을 나타낸다. Fig. 10, Fig. 11, 그리고 Fig. 12는 4-센서 프로브의 형상에 대해 Revankar et al.가 제시한 계면면적측정 방법론을 적용하여 평가한 결과를 나타낸다. 국소 계면면적밀도의 경우, 종횡비가 큰 슬러그 기포 조건에서 프로브 형상이 성능에 미치는 영향은 무시 가능하다. Fig. 12는 난류 섭동에 대한 영향을 나타내며, 난류 섭동이 증가할수록 4-센서의 국소 계면면적밀도 측정 정확도는 낮아진다. 슬러그 유동 조



건에서 기포는 유로 단면을 덮으므로 난류 섭동이 4-센서 프로브의 측정에 미치는 영향은 크지 않다.

이러한 수치 시뮬레이션을 적용하면 주어진 유동 조건에서 센서의 최적 설계안을 도출하는 것이 가능하다. 그러나 이러한 기법은 유로 내에서 실제 발생하는 기포의 형상과 형상에

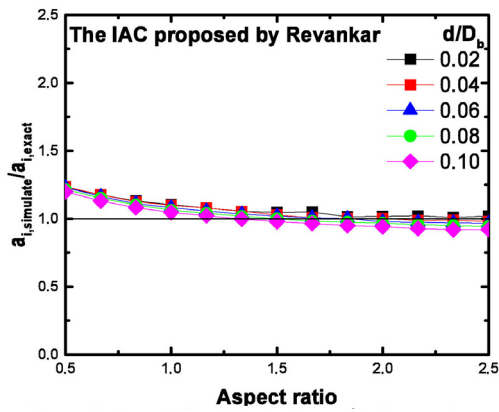


Fig. 10 The IAC ratio to the  $d/D_b$  for probe

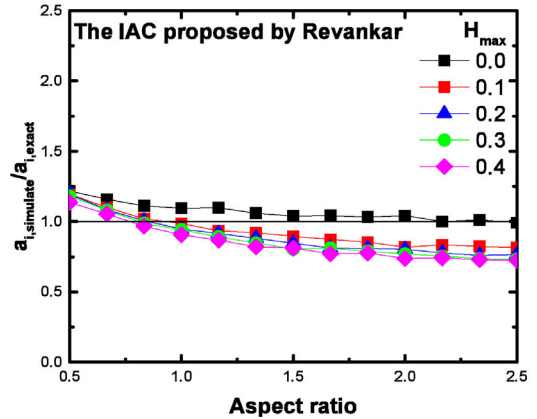


Fig. 12 The IACs ratio to the turbulence intensity

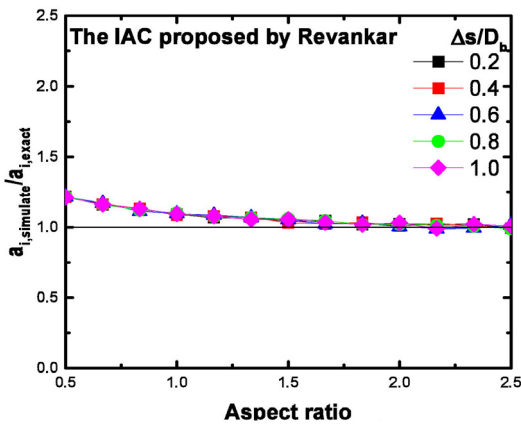


Fig. 11 The IAC ratio to the  $\Delta s/D_b$  for probe

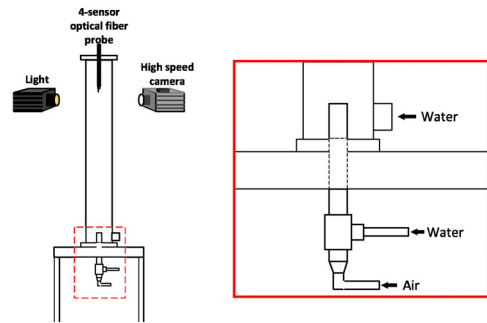


Fig. 13 Schematic diagram of experimental facility

따른 구성비를 알 수 없어 평가에 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 물-공기 조건에 4센서 광섬유 프로브를 적용하여 센서의 성능을 평가하는 실험을 수행하였다.

#### 4. 4-센서 광섬유 프로브 성능 검증 실험

##### 4.1 실험장치

Fig. 13은 수치해석 결과를 반영하여 실험실에서 제작한 4-센서 광섬유 프로브의 성능을 검증하기 위한 실험 장치의 개략도이다. 실험장치는 시험부와 기포발생기로 구성되었다. 시험부는 20 mm×20 mm 단면적을 가지는 사각유로로 총 길이는 1 m이다. 기포 발생기는 시험부 하단에 위치하며 생성되는 기포의 크기를 조절하기 위해 주입되는 물과 공기의 주입 속도를 각각 변화시키며 기포를 발생시킨다. 실험은 Fig. 14와 같은 캡-기포 유동과 슬러그 유동 조건에서 수행되었다. Fig. 15와 같이 실험실에서 제작된 4-센서 광섬유 프로브는 입구로부터  $L/D=40$  지점에 설치되었다. 또한 고속카메라를 이용하여 센서와 동일한 위치에서 기포의 거동을 촬영하였으며, 영상처리기법을 적용하여 국소 기포변수를 구하였다.



Fig. 14 Typical bubble images taken in the experiments

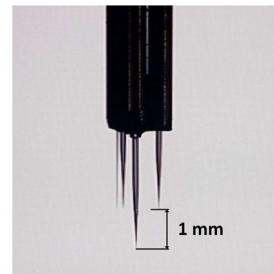


Fig. 15 In-house 4-sensor optical fiber probe

##### 4.2 가시화 실험

국소 기포 인자는 Fig. 16과 같이 영상처리기법을 통해 얻는다. 영상처리의 첫번째 단계로써 최초의 영상인 Fig. 16(a)



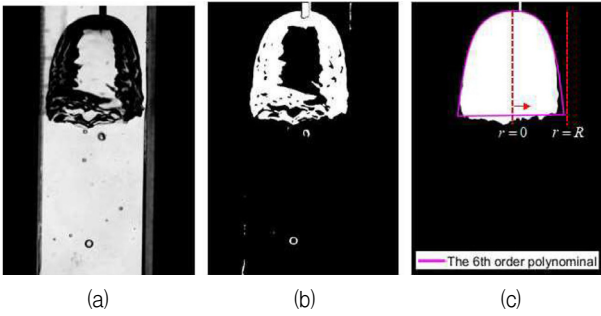


Fig. 16 Procedure for image processing  
(a) Raw image (b) Binary image (c) Final bubble image

에 명암 자동 이진화법을 적용하여 Fig. 16(b)와 같이 기포 경계를 1차로 구분한다. 그러나 조명으로 인해 기포의 경계가 구별되지 않는 영역이 존재할 가능성이 있으므로 모폴로지 연산을 수행하여 기포의 경계를 구분하였다. Fig. 16(c)는 영상처리기법을 적용해 얻은 최종 결과이다.

영상처리기법이 적용된 기포 영상으로부터 국소 기포율을 계산하며, 국소 기포 속도는 프레임 구간 변화에 따른 이동 거리를 계산하여 측정한다.

계면면적밀도는 6차 다항식으로 나타낸 기포의 상부 경계면과 식 (18)를 이용하여 계산된다.<sup>(11)</sup>

$$a_i(r) = \left( 1 + \sqrt{\left( \frac{df(r)}{dr} \right)^2 + 1} \right) \frac{N_s}{v_s} \quad (18)$$

여기서  $f(r)$ 는 최소제곱법을 이용하여 나타낸 기포의 상부 경계면,  $N_s$ 는 단위 시간당 센서를 통과한 슬러그 기포의 개수,  $v_s$ 는 슬러그 기포의 속도이다.

### 4.3 실험 결과

캡-기포 또는 슬러그 유동 조건에서 가시화 기법과 4-센서 광섬유 프로브로 측정된 국소 기포율, 국소 기포 속도 그리고 계면면적밀도를 비교하였다. Fig. 17은 가시화 기법과 4-센서 프로브 기법으로 측정된 기포율을 비교한 결과이다. Fig. 17에서와 같이 4-센서 광섬유 프로브는 캡-기포 또는 슬러그 유동 조건에서 가시화 기법과 비교하였을 때 오차 10% 이내의 범위에서 국소 기포율 측정이 가능하다. Fig. 18과 Fig. 19는 국소 기포 속도와 국소 계면면적밀도에 대한 실험 결과로 기포의 종횡비에 따라 나타내었다. Fig. 18에서와 같이 국소 기포 속도와 국소 계면면적밀도는 각각 오차 8%와 22% 이내에서 측정되었다. 계면면적밀도의 측정 오차는 4S-OFP를 Fig. 14와 같이 비대칭적인 형상을 갖는 기포의 측정에 적용함으로써 발생한다.

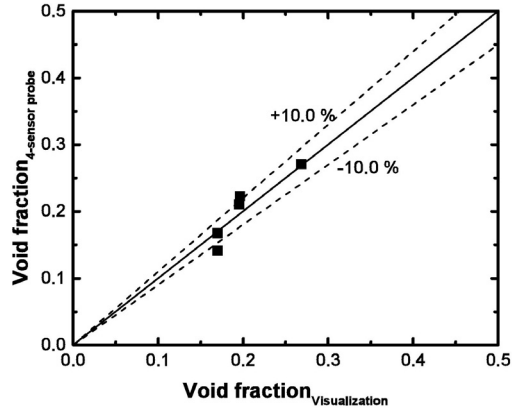


Fig. 17 Comparison of local void fractions obtained from visualization and the 4S-OFP

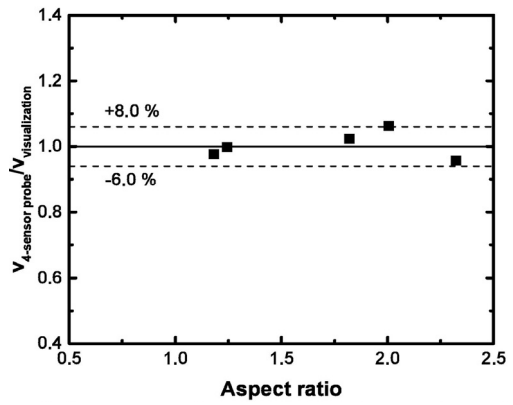


Fig. 18 Comparison of local bubble velocities obtained from visualization and the 4S-OFP

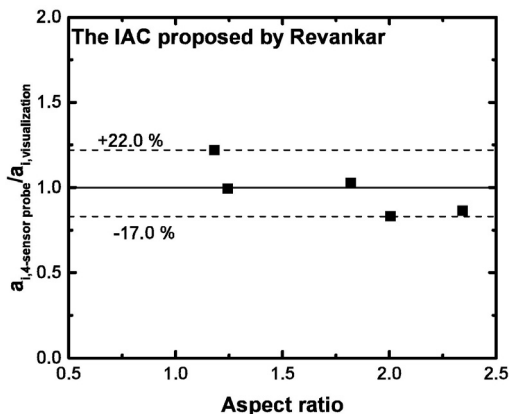


Fig. 19 Comparison of IACs obtained from visualization and the 4S-OFP

## 5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 4-센서 광섬유 프로브 기법(4S-OFP)을 개발하기 위해 시뮬레이션과 가시화 실험을 수행하였다. 시뮬레이션에서는 센서 형상 설계 인자에 따른 센서의 성능을 평가하여 최적화된 프로브 형상을 도출할 수 있었다. 시뮬레

이선 결과, 국소 기포 속도는 반경 방향에 대한 센서 간 거리가 작을수록 정확히 측정되었다. 반면 수직 방향에 대한 센서 간 거리의 영향은 미미하였다. 프로브 형상이 계면면적밀도 측정 성능에 미치는 영향은 크지 않으며, Revankar et al.(3)가 제시한 방법론이 가장 우수한 정확도를 보여주었다. 그러나 실제 기포 유동은 시뮬레이션과 달리 다양한 형상을 갖는 기포가 공존하므로 이에 대한 종합 평가가 필요하다. 따라서, 물-공기 유동조건에서 사각 유로를 이용한 가시화 실험을 통해 4S-OFP의 기포 변수 측정 성능을 평가하였다. 실험은 캡-기포 유동과 슬러그 유동 조건에서 수행되었다. 측정 변수는 국소 지점에서의 기포율, 기포 속도, 그리고 계면면적밀도이며 이들은 가시화 기법과 비교되었다. 실험 결과, 4S-OFP는 물-공기 유로의 캡-기포 또는 슬러그 유동 조건에서 기포율, 기포 속도 그리고 계면면적밀도를 각각 오차 10%, 8%, 그리고 22% 내에서 측정하였다.

### 감사의 글

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

### References

- (1) Kataoka, I., et al., 1986, "Local Formulation and Measurements of Interfacial Area Concentration in Two-phase Flow," *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 12, No. 4, pp. 505~529.
- (2) Hibiki, T., et al., 1998, "Local Measurement of Interfacial Area, Interfacial Velocity and Liquid Turbulence in Two-phase Flow," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 184, No. 2, pp. 287~304.
- (3) Revankar, S. T., et al., 1993, "Theory and Measurement of Local Interfacial Area using a Four Sensor Probe in Two-phase Flow," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, No. 12, pp. 2997~3007.
- (4) Burgess, J. M., et al., 1975 "The Measurement of Bubble Parameters in Two-phase Dispersions I: the Development of an Improved Probe Technique," *Chemical Engineering Science*, Vol. 30, No. 7, pp. 743~750.
- (5) Higuchi, M., et al., 2010, "Quantitative Characterizations of Long-period Fluctuations in a Large-diameter Bubble Column Based on Point-wise Void Fraction Measurements," *Chemical Engineering Journal*, Vol. 160, No. 1, pp. 284~292.
- (6) Shen, X., et al., 2013, "Local Interfacial Velocity Measurement Method using a Four-sensor Probe," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 67, pp. 843~852.
- (7) Worosz, T., et al, 2016 "Sensitivity Studies on the Multi-sensor Conductivity Probe Measurement Technique for Two-phase Flows," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 310, pp. 552~563.
- (8) Le Corre, J. M., et al, 2002, "Numerical Evaluation and Correction Method for Multi-sensor Probe Measurement Techniques in Two-phase Bubbly Flow," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 216, No. 1, pp 221~238.
- (9) Euh, D. J., et al., 2004, "Numerical Simulation of an Improved Five-sensor Probe Method for Local Interfacial Area Concentration Measurement," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 234, pp. 99~116.
- (10) Wu, Q., et al., 1999, "Sensitivity Study on Double-sensor Conductivity Probe for the Measurement of Interfacial Area Concentration in Bubbly Flow." *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 25, No.1, pp. 155~173.
- (11) Kim, S., et al., 2001, "Study on Interfacial Structures in Slug Flows using a Miniaturized Four-sensor Conductivity Probe." *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 204, No. 1-3, pp. 45~55.