

5 저항 센서 프로브를 이용한 계면 면적 밀도 측정 방법 개발

Development of Interfacial Area Concentration Measurement Method Using Five Sensor Resistance Probe

어동진, 이은철
서울대학교

윤병조, 송철화, 권태순, 정문기
한국원자력연구소

요 약

계면면적밀도는 Two-Fluid 모델과 같은 이상유동 해석모델에서 상간의 상호교환항에 매우 중요하게 고려되는 변수이다. 전기저항 프로브법은 채널 내부의 국부적인 위치에서 물과 공기/증기의 전기적 전도도 차이를 이용하여 계면면적밀도를 예측하는 방법으로 유동범위에 따라 프로브의 센서개수를 결정한다. 4센서 프로브법은 측정지점에서 계면의 세 방향 속도성분과 센서의 방향벡터성분을 이용하여 계면의 형태에 대한 가정 없이 계면면적밀도를 예측할 수 있는 방법론이다. 본 연구에서 제안한 5센서 프로브법은 기본적인 접근방식을 4센서 프로브법의 그것과 같이하며, 중앙에 하나의 센서를 추가 설치함으로써 정해진 프로브가 참조하는 측정면적에서 보다 정확한 계면면적밀도를 유도할 수 있다. 본 연구에서는 5센서 프로브를 이용하여 계면면적밀도를 유도하는 수학적 접근 방식을 기술하였고, 이상적인 계면구조, 즉 Cap형의 기포를 난수발생기를 이용하여 생성시켜 모의실험을 수행하였다.

Abstract

Interfacial area concentration is one of the most important parameters in the two-fluid model for two-phase flow analysis. Electrical resistance probe method uses the difference of resistivity between water and air/steam. The number of sensor is dependent on the flow regime of two-phase flow. Four sensor probe methodology predicts the interfacial area concentration without any assumption of bubble shape. The local interfacial area concentration can be calculated by measuring the three dimensional velocity vector elements at the measuring point, and direction cosines of sensors. Five sensor probe methodology proposed in this study is based on the four sensor methodology, and an additional sensor is installed on central position of the sensor. The five probe sensor can predict more exactly the local interfacial area concentration for a given referred measuring trajectory area of probe. In this paper, the mathematical approach of a five sensor probe method for measuring the interfacial area concentration is described, and a numerical simulation is carried out for ideal cap bubbles produced by random number generator.

1. 서론

계면면적밀도는 근래 널리 사용되는 이상유동 해석 모델인 two-fluid 모델의 구성 방정식에서 상간의 상호전달항에 사용되는 중요한 물리량으로 단위체적 당 계면면적으로 정의된다. 전기저항 프로브법은 물과 기포/증기의 전기적 전도도 차이를 이용하여 이상 유동에서 열수력인자를 측정하는 방법이다. 전기저항 프로브를 이용하여 계면면적밀도를 측정하는 이론적 기초는 Ishii가 제시하였고, 아래 식으로 정의된다.[1]

$$\overline{\alpha}_f(x_0, y_0, z_0) = \frac{1}{\Delta} \sum_j \frac{1}{|\underline{y}_j| \cos \phi_j} \quad (1)$$

즉, 측정지점에서 계면의 이동속도 및 계면의 개수를 측정하여 계면면적밀도를 얻을 수 있다. 전기저항 프로브법은 프로브가 가지는 센서의 개수에 따라 이중센서 프로브법과 4센서 프로브법으로 구분할 수 있다. 이중센서 프로브법은 계면의 이동속도와 계면의 수직벡터사이에 아무런 상관관계가 없고, 입자의 형태가 구형이라는 가정하에 그 방법론이 개발되었으며, 기포유동에서 효과적으로 적용할 수 있는 측정 방법이다.[2-7] 그러나 유동의 범위가 넓어지면 계면의 형태는 구형에서 차이를 보이게 되므로, 기포유동에 국한하여 적용되어야 한다. 4센서 방법론은 중앙의 기준센서와 후방의 세 개의 센서를 이용하여 측정지점에서 얻는 세 방향의 입체적 속도성분과 후방에 있는 세 개 센서의 중앙 전방센서에 대한 방향벡터 성분을 이용하여 식(1)로 부터 수학적으로 유도된다.[8-10] 본 논문에서 제시된 5센서 프로브법의 기본 원리는 4센서 방법론의 그것과 같이 하며, 중앙의 후방에 하나의 센서를 추가하여 측 방향의 속도성분을 추가로 얻음으로써 측정지점을 대표하는 계면면적밀도를 보다 정확하게 얻을 수 있다. 본 연구에서는 5센서 프로브법을 이용하여 계면면적밀도를 얻는 측정기법에 대해서 논하고, 그 방법론의 타당성을 수치해석 기법에 의해 확인하였다.

2. 계측 이론

1) 4센서 방법론[8-10]

움직이는 기상-액상 계면 j 의 표면함수를 식 (2)과 같이 정의하면, 국부적인 순간 계면면적밀도를 식(3)과 같이 표현할 수 있다. [1]

$$f_j(x, y, z, t) = 0 \quad (2)$$

$$\alpha_f(x, y, z, t) = \sum_j |\nabla f_j| \delta f_j(x, y, z, t) \quad (3)$$

이 식은 이상유동의 전 유동영역에서 적용될 수 있다. 분포, $\delta f(x, y, z, t)$ 는 실험적으로 계측 가능한 변수가 아니므로 시간 평균 계면면적밀도를 유도한다. 위치 (x_0, y_0, z_0) 에서 Ω 시간 동안, 즉 $t < t_0 < t + \Omega$ 동안 지나는 모든 계면에 대해서 시간평균 계면면적밀도는 아래와 같이 주어진다. [1-2]

$$\overline{\alpha}_f(x_0, y_0, z_0) = \frac{1}{\Delta} \sum_j \left(|\nabla f_j| / \left| \frac{\partial f_j}{\partial t} \right| \right) \quad (4)$$

그림 1의 관계를 이용하면 아래와 같은 관계식을 얻는다.

$$|\nabla f_j| / \left| \frac{\partial f_j}{\partial t} \right| = \frac{1}{|\underline{y}_j| \cos \phi_j} \quad (5)$$

식 (4)(5)를 이용하여 시간평균 계면면적밀도는 다음과 같다.

$$\overline{\alpha}_f(x_0, y_0, z_0) = \frac{1}{\Delta} \sum_j \frac{1}{|\underline{y}_j| \cos \phi_j} \quad (6)$$

여기서 ϕ_j 는 j 번째 계면의 속도성분, $\underline{y}_j$ 와 계면의 수직벡터사이의 각도이다.(그림 1) 충분히 큰

Ω 에 대해 다음 관계식이 성립한다.

$$(\sum_j) = \Omega/\tau \quad (7)$$

N_t 를 단위시간당 측정지점을 지나는 입자의 개수라고 하면 τ 는 $\tau=1/(2N_t)$ 로부터 얻을 수 있다. 식 (7)을 식 (6)에 대입하면 평균치를 의미하는 기호를 사용하여

$$\overline{\partial_r'}(x_0, y_0, z_0) = \frac{1}{\tau} \overline{\frac{1}{|\vec{v}_j| \cos \phi}} \quad (8)$$

를 유도할 수 있고, 여기서 사용된 조화평균은 다음과 같이 정의된다.

$$\overline{\frac{1}{|\vec{v}_j| \cos \phi}} = \sum_j \frac{1}{|\vec{v}_j| \cos \phi_j} / (\sum_j) \quad (9)$$

그림 2는 4센서 프로브에 대한 도식이다. 후방센서의 단위벡터 $\vec{n}_{sk}$ 의 방향성분은 $(\cos \eta_{sx}, \cos \eta_{sy}, \cos \eta_{sz})$ 으로 표현된다. 전방센서를 거쳐, 후방센서, k 를 시간간격, Δt_{kj} 동안 지나는 j 번째 계면을 고려할 때, 이동속도, v_{skj} 는 다음과 같다.

$$v_{skj} = \frac{\Delta s_k}{\Delta t_{kj}}, \quad k = 1, 2, 3 \quad (10)$$

j 번째 계면을 $f_j(x, y, z, t)$ 라고 정의하면 표면방정식은 아래 조건을 만족한다.

$$\begin{aligned} f_j(x_0, y_0, z_0, t_j) &= 0 \\ f_j(x_k, y_k, z_k, t_j + \Delta t_{kj}) &= 0, \quad k=1, 2, 3 \end{aligned} \quad (11)$$

거리 Δs_k 와 Δt_{kj} 가 길이와 시간스케일에 비해 작다고 가정하면 위 조건은 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{\partial f_j}{\partial x} \cos \eta_{sx} + \frac{\partial f_j}{\partial y} \cos \eta_{sy} + \frac{\partial f_j}{\partial z} \cos \eta_{sz} = - \frac{\partial f_j}{\partial t} \frac{1}{v_{skj}} \quad (12)$$

센서의 방향벡터 성분이 선형독립일 때, $|A_0|$ 는 다음과 같고,

$$|A_0| \equiv \begin{vmatrix} \cos \eta_{s1} & \cos \eta_{s1} & \cos \eta_{s1} \\ \cos \eta_{s2} & \cos \eta_{s2} & \cos \eta_{s2} \\ \cos \eta_{s3} & \cos \eta_{s3} & \cos \eta_{s3} \end{vmatrix} \neq 0 \quad (13)$$

식 (12)의 해는 아래와 같다.

$$(\vec{v}_j \cos \phi_j)^{-1} = \frac{\sqrt{|A_1|^2 + |A_2|^2 + |A_3|^2}}{\sqrt{|A_0|^2}} \quad (14)$$

여기서 determinants $|A_1|$, $|A_2|$, $|A_3|$ 는 다음과 같다.

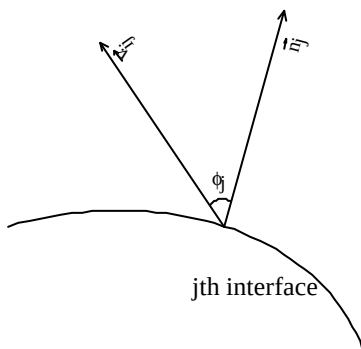


그림 1. $\vec{v}_j$ 와 $\vec{n}_j$ 사이각

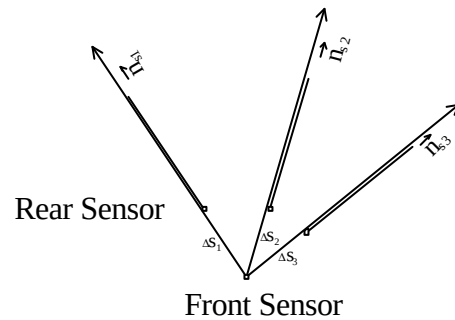


그림 2. 4 센서의 방향벡터

$$|A_1| \equiv \begin{bmatrix} \frac{1}{V_{s1}} \cos \theta_{y1} \cos \theta_{z1} \\ \frac{1}{V_{s2}} \cos \theta_{y2} \cos \theta_{z2} \\ \frac{1}{V_{s3}} \cos \theta_{y3} \cos \theta_{z3} \end{bmatrix}, |A_2| \equiv \begin{bmatrix} \cos \theta_{x1} \frac{1}{V_{s1}} \cos \theta_{z1} \\ \cos \theta_{x2} \frac{1}{V_{s2}} \cos \theta_{z2} \\ \cos \theta_{x3} \frac{1}{V_{s3}} \cos \theta_{z3} \end{bmatrix}, |A_3| \equiv \begin{bmatrix} \cos \theta_{x1} \cos \theta_{y1} \frac{1}{V_{s1}} \\ \cos \theta_{x2} \cos \theta_{y2} \frac{1}{V_{s2}} \\ \cos \theta_{x3} \cos \theta_{y3} \frac{1}{V_{s3}} \end{bmatrix} \quad (15)$$

최종적으로 시간평균 계면면적밀도는 아래와 같이 유도된다.

$$\bar{a}_f^c = \frac{1}{Q} \sum_i \frac{\sqrt{|A_1|^2 + |A_2|^2 + |A_3|^2}}{\sqrt{|A_d|^2}} \quad (16)$$

따라서 국부적인 시간평균 계면면적밀도는 측정지점에서 세 방향의 계면속도성분과 4센서 프로브의 기하학적 인자들을 계속함으로써 얻을 수 있다. 이 식은 동일한 계면이 네 개의 센서 모두를 통과하여야만 적용할 수 있다. 그러나 프로브가 가지는 특정 크기에서 전방센서를 지난 기포들 중에 하나 이상의 후방센서를 우회하여 지나는 경우가 존재할 수 있다. 특히 프로브의 위치가 벽면에 가까울 때, 후방센서 중 하나는 계면을 감지 못할 수 있고, 이러한 계면의 기여도가 중요할 수 있다. 우회하는 계면의 계면면적밀도는 계면이 축 방향과 평행하게 형성이 된다는 가정 하에 아래와 같은 수학적 관계식을 이용하여 얻는다.

$$a_1 = \frac{\tau_b}{Q} \cdot \frac{l_b}{s_p} \quad (17)$$

여기서 l_b 는 두 개의 후방센서간의 거리를, s_p 는 유동방향으로 프로브의 투사면적을, τ_b 는 중앙 센서에 기포가 잔류하는 시간을 의미한다.(그림 3)

2) 5센서 프로브법

5센서 프로브의 전형적인 형태는 그림 4와 같다. 측정하고자 하는 국소 지점은 중앙의 전방센서가 위치하고 있는 곳이며, 5센서 프로브는 4센서 프로브에서 그림 4와 같이 중앙의 후방에 하나의 센서를 추가 설계, 제작함으로써, 측정지점에서 계면의 축 방향 속도 성분을 추가로 얻을 수 있다. 따라서 중앙센서가 존재하는 곳에서 네 방향으로의 계면속도성분을 측정할 수 있고, 계면면적밀도를 그림 5에서 도시된 세 개의 부 삼각형 셀에서 각각 구할 수 있다. 중앙의 전방센서를 기준으로 후방의 센서들이 가지는 방향벡터성분은 센서 끝간의 거리를 이용한 기하학적인 계산을 통해 얻을 수 있다. 본 논문의 부록에 방향벡터를 얻는 과정을 기술하였다. 계면이 중앙센서를 중

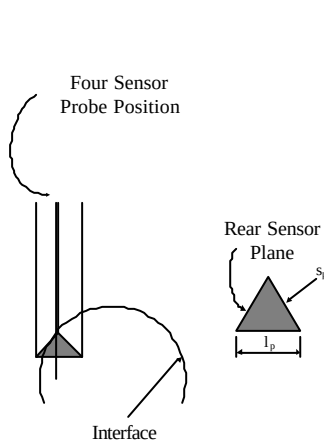


그림 3. 센서 우회 계면

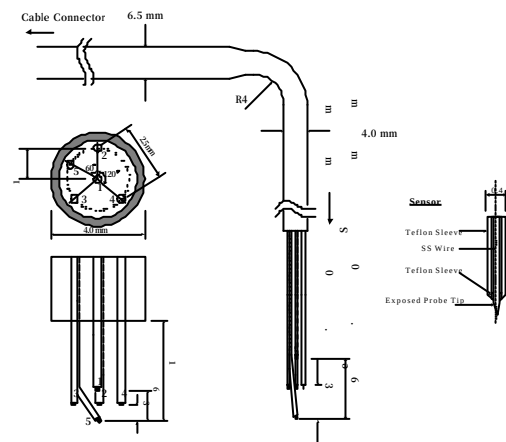


그림 4. 5센서 프로브

심으로 비대칭모양으로 형성되는 일반적인 경우 중앙의 측정지점에서 계면면적밀도는 참조하는 삼각형 셀에 따라서 서로 다른 값을 가지게 되므로, 측정하고자 하는 국부적 위치에서의 값은 각 셀이 중앙센서에서 차지하는 각도에 대한 가중치를 사용하여 평균을 취한다. 이러한 과정은 4센서 프로브법과 비교하여 동일한 프로브 크기에 대해서 계면의 곡면효과를 효과적으로 줄일 수 있는 장점을 가짐과 동시에 하나 이상의 후방센서를 우회하는 경우에 대해, 보다 체계적인 방법으로 계면면적밀도를 유도할 수 있는 장점을 가진다. 하나 이상의 후방센서를 우회하는 기포는 계면의 곡면이 가지는 기울기가 매우 급한 경우가 많고, 이런 경우 계면면적밀도가 크게 예측되기 때문에 개수가 적더라도 이러한 기포들에 의한 기여도를 무시할 수는 없다. 본 논문에서는 계면이 센서를 지나는 형태를 크게 네 가지의 경우로 구분하여 각 경우에 적용방법론을 기술하였다.

a) 후방의 대칭적 세 개 센서를 모두 지나는 경우 (Case 1, 그림 5)

이 경우는 중앙의 측정지점을 중심으로 삼각형모양의 세 개의 셀을 생성할 수 있고, 각 셀이 독립적으로 측정지점에서 공간적으로 세 방향의 계면속도성분을 얻을 수 있다. 따라서 측정지점에서의 계면면적밀도를 세 개의 셀을 참조하여 구할 수 있다. 5센서 방법론은 각 셀이 측정지점과 접하는 각도에 대한 가중치를 두어 아래와 같이 평균을 취한다.

$$\bar{a}_i^t = \frac{(\bar{a}_i^t)_{Cell 1} \alpha_1 + (\bar{a}_i^t)_{Cell 2} \alpha_2 + (\bar{a}_i^t)_{Cell 3} \alpha_3}{2\pi} \quad (18)$$

이러한 방법론은 4센서 프로브를 이용하는 방법론에 비해 측정에 사용되는 셀의 크기를 보다 세밀하게 축소시킬 수 있으므로 계면의 곡면에 의한 불확실성을 줄일 수 있는 장점을 가진다.

b) 후방의 대칭적 세 개 센서 중 두 개를 지나는 경우 (Case 2~4)

우회하는 센서에 따라 또다시 세 가지 경우로 구분할 수 있고, 각 경우는 동일한 방법론을 적용할 수 있다. 이 범주 역시 세 개의 셀로 나누어 고려하여 각각의 셀을 참조하여 얻어진 값을 식 (18)과 같이 중앙의 각도로 웨이팅하여 평균을 취한다. 셀 1로부터의 값은 4센서 방법론에 의해 구할 수 있으나, 나머지 셀에서의 값은 그렇지 못하므로 수학적인 가정을 이용한다. 센서는 하나의 기포에 대해서 두 개의 계면을 감지하는데, 우회하는 기포의 경우 상부 계면은 급격한 기울기를 가지는 반면 하부 계면은 비교적 평평할 가능성이 크다. (16)식에 의해 셀 1에서 얻어진 값과 평평한 계면의 값(식(19)의 우변)과의 관계를 이용하면 계면의 기울기의 급한 정도를 판단할

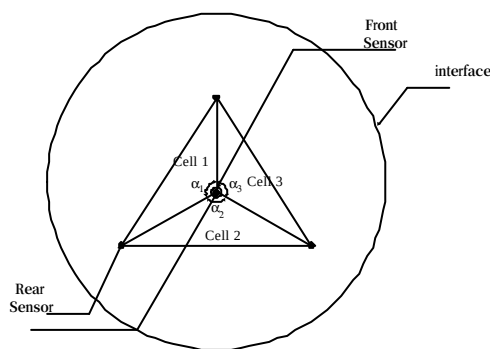


그림 5. Case 1

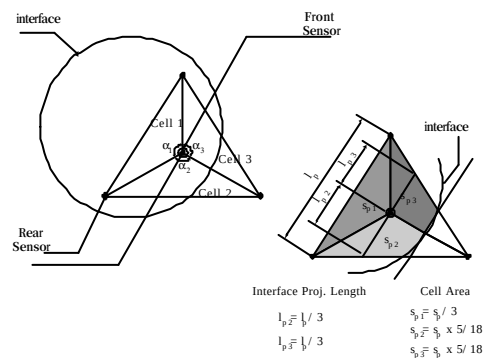


그림 6. Case 2~4

수 있다. 평판형 계면인 경우 계면면적밀도는 셀 1에서의 값을 그대로 사용하고, 그 이외의 경우에는 Ishii와 Revankar [8]가 제시한 가정에 따라 계면이 수직인 형태를 가진다고 가정한다. 즉,

$$(\bar{\alpha}_f')_{\text{cell}1} \sim \frac{1}{d} \frac{1}{v_{\text{st}}} \quad (19)$$

인 경우에는 계면이 평면의 형태로 가정할 수 있으므로

$$(\bar{\alpha}_f')_{\text{cell}2} \sim (\bar{\alpha}_f')_{\text{cell}3} \sim (\bar{\alpha}_f')_{\text{cell}1}$$

인 반면, 좌변이 충분히 큰 경우에는 셀 2, 3에서의 값을 아래 식을 통해 얻는다.

$$\begin{aligned} (\bar{\alpha}_f')_{\text{cell}2} &= \frac{r_b}{d} \frac{l_{p2}}{s_{p2}} \\ (\bar{\alpha}_f')_{\text{cell}3} &= \frac{r_b}{d} \frac{l_{p3}}{s_{p3}} \end{aligned} \quad (21)$$

여기서 l_{p2} , l_{p3} , s_{p2} , s_{p3} 는 셀 2, 3에서 기포가 차지하는 길이와 면적으로서 통계적으로 가정하여 결정하며 셀이 정확히 삼등분 되는 경우에 전체 측정면적과 길이, s_p , l_p 에 대해 가정할 수 있는 분율을 그림 6에 명시하였다.

c) 후방의 대칭적 세 개 센서 중 하나만을 지나는 경우 (Case 5~7)

이 경우 역시 지나는 후방센서에 따라 세 가지를 생각할 수 있고, 각각은 같은 방법론에 의한 다. 이 경우는 제한된 개수의 센서 신호를 이용할 수밖에 없으므로, 수학적인 가정을 적용한다. 그림 7과 같은 경우, 중앙의 측정지점과 지나는 후방센서의 위치에서 계면의 높이차이를 이용하여 계면면적밀도를 예측한다. 세 가지 경우중 대표적으로 중앙위치의 전, 후방센서(센서1,2)와 센서 3을 지나는 경우 계면면적밀도는 아래와 같이 유도할 수 있다.

$$\bar{\alpha}_f' = \frac{N_{\text{ST-7}}}{v_{\text{st}}} \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta x_B}{\Delta x_B} \right)^2 + \left(\frac{\Delta y_B}{\Delta y_B} \right)^2} \quad (22)$$

여기서 분모의 거리차이들은 센서의 구조를 통해 얻을 수 있으며, 각 센서 위치에서 계면의 수직높이 차이는 중앙센서가 위치하는 지점에서의 수직방향 계면속도와 전후방센서의 감지시간 차이를 이용하여 얻을 수 있다. 측정 지점에서 x, y방향으로 계면의 기울기는 센서 위치에서 각 축 성분의 거리차이에 대한 계면의 높이차이를 가정한다. 일반적인 경우 측정지점에서 계면의 양방향 기울기는 두 센서위치에서 선형 기울기에 비해 클 것으로 예상할 수 있으므로 이러한 접근 방식은 유효하다고 할 수 있다. 아래 첨자 1,3은 각각 중앙의 전방센서와 계면이 지나는 후방센서를 의미한다. 후방센서의 방향이 좌표축과 평행한 경우에는 x, y 양방향으로의 계면의 기울기를 효과적으로 얻을 수 없으므로 중앙의 측정지점을 그림 8에서 명시한 위치로 가정하여 예측한다.

d) 중앙의 전후방 센서만 지나는 경우 (Case 8)

구형의 기포형태를 가정하여 Revankar et al.[3], Hibiki et al.[7]이 유도한 이중센서 프로브 방법론을 따른다.

$$\bar{\alpha}_f' = \frac{4N_B \left\{ \sum_i \frac{1}{|v_{\text{st}}|} / (\sum_i 1) \right\}}{1 - \cot \frac{\alpha_0}{2} \ln \left(\cos \frac{\alpha_0}{2} \right) - \tan \frac{\alpha_0}{2} \ln \left(\sin \frac{\alpha_0}{2} \right)} \quad (23)$$

여기서 수치해석적 방법론의 적용을 위해 기포의 속도진동(velocity fluctuation)과 관련된 인자, α_0 를 0으로 가정하면 위 식은 아래와 같은 식으로 표현된다.

$$\bar{\alpha}_f' = 4N_B \left\{ \sum_i \frac{1}{|v_{\text{st}}|} / (\sum_i 1) \right\} \quad (24)$$

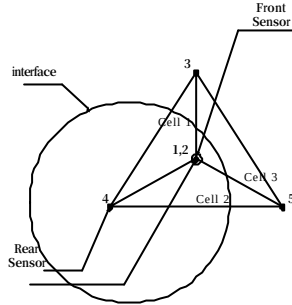


그림 7. Case 5 ~7

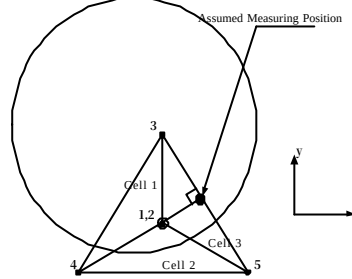


그림 8. Case 5 보정

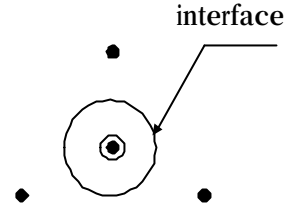


그림 9. Case 8

3. Cap형 기포에 대한 모의 실험

5센서 프로브법의 타당성을 검증하기 위한 모의실험을 수행하였다. 0.08m 내경의 원통형 채널에서 정체유동을 가정하였고, Cap형의 기포를 가정하였다. 난수발생기를 이용하여 입자의 크기를 결정하고, 두 개의 난수를 추가로 발생시켜서 채널 내부에서 입자가 생성되는 위치를 결정하였다. 입자의 크기분포는 Nukiyama et al.[11]이 제시한 지수함수를 가정하였다. 채널의 반경방향으로 20개의 노드를 설정하여 각 노드에서 초당 한 개씩 기포가 검출되도록 생성시켜 10000초 동안 평균 계면면적밀도를 계산하였고, 공간적으로 센서를 지나지 않거나 채널을 벗어나는 기포는 모의에서 제외하였다. 생성된 기포는 Peebles et al.[12]과 Davis et al.[13]의 관계식에 의한 상승속도를 가진다고 가정하였다.

식 (25)로 표현되는 곡면에서 계면면적밀도에 대한 이론값은 식 (26)과 같다.

$$z=f(x,y) \quad (25)$$

$$\bar{a}_r = \frac{1}{2} \sum \frac{1}{V_a} \int \int_K \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} dx dy \quad (26)$$

Cap형의 기포는 구형과 평면의 계면을 가지며 중심이 (x_0, y_0, z_0) 이고 반지름이 r 인 구와 평면의 방정식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} (x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2 &= r^2 & \text{for sphere} \\ z &= \text{const} & \text{for flat interface} \end{aligned} \quad (27)$$

식 (27)과 식 (26)을 이용하면 국부적 위치에서 계면면적밀도의 이론값을 예측할 수 있다. 그림 10은 5센서 프로브법과 4센서 프로브법을 이용한 예측값을 이론값과 비교한 결과이다. 전반적으로 5센서 프로브법이 만족스러운 결과를 보이고 있는 반면 4센서 프로브에 의한 결과는 과소평가 되고 있음을 알 수 있다. 센서가 벽에 거의 근접한 경우에는 두 방법론 모두 정도의 차이는 있으나 낮은 계면 면적 밀도를 예측하고 있다. 이는 센서가 채널 끝에 존재하는 경우에는 후방센서를 지나지 않을 확률이 커지는데, 두 방법론 모두 이러한 경우에 대해 낮게 평가하고 있기 때문이다. 기포가 센서를 지나는 형태에 따라 앞서 정의한 경우에 대해 독립적으로 분석하였다. 각 경우의 계면면적밀도 기여도는 그림 11과 같다. 센서가 벽쪽으로 접근할수록 우회하는 기포에 대한 기여도가 커짐을 알 수 있다. 기포가 모든 센서를 지나는 경우에는 대체적으로 두 방법론이

만족스러운 결과를 보이고 있다.(그림 12) 하나의 후방센서를 지나지 않는 Case 2~4의 경우에는 5센서 프로브법만이 잘 일치하고 있다.(그림 13) 4센서 프로브법은 이 경우, 계면이 수직인 형태로 존재한다는 가정 하에 유도한 수학적식을 사용하여 Cap형 기포의 위쪽 반구형 곡면을 효과적으로 고려할 수는 있으나, 기포의 아래 평평한 계면의 기여도를 고려할 수 없으므로 참값에 비해 작은 값을 보이게 되는 반면 5센서 프로브법은 중앙의 후방센서의 신호를 이용하여 계면의 기울기를 예측할 수 있기 때문에 각 계면을 독립적으로 예측할 수 있다. Case 5~7의 경우에는 4센서 프로브법이 기포 상부의 계면조차 과소평가를 하기 때문에 더욱 오차의 정도는 커진다.(그림 14) Case 8의 경우에는 너무 작은 개수이므로 오차가 큰 의미가 없다. 그림 10과 15를 보면 Case 8에 의한 계면면적밀도 기여도는 공학적으로 무시할 수 있음을 알 수 있다. 그림 16에 본 계산에 사용된 기포의 크기분포를 채널의 반경방향으로 세 지점에 대해 제시하였다.

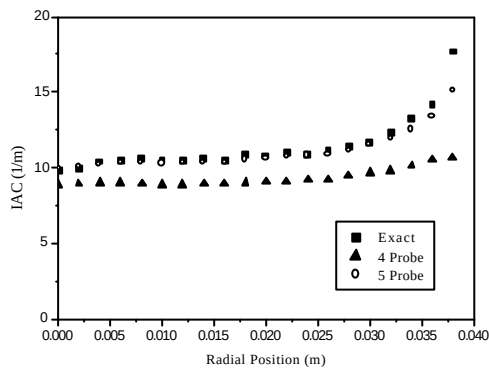


그림 10. IAC 비교(모든 경우 포함)

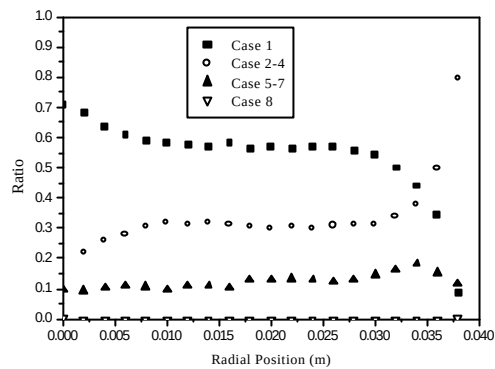


그림 11. 각 경우의 IAC 기여도 비교

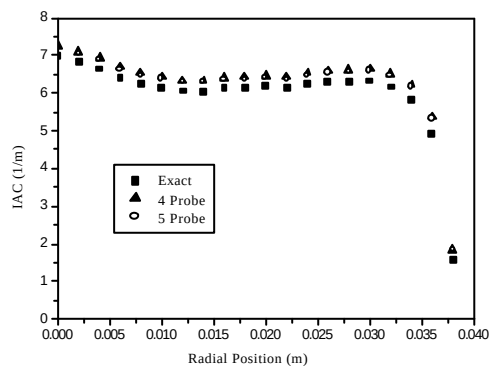


그림 12. Case 1 비교

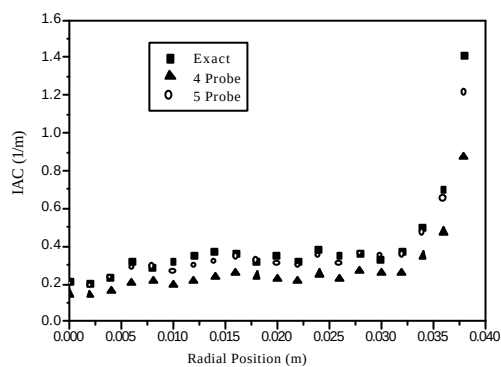


그림 13. Case 1~3 비교

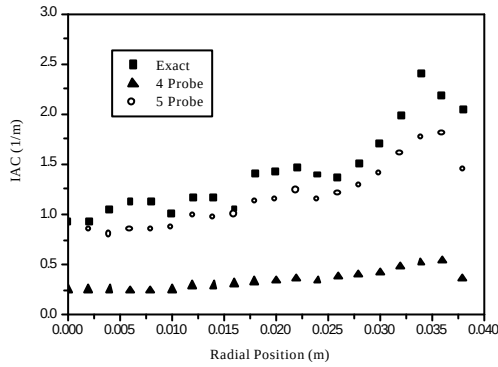


그림 14. Case 5~7 비교

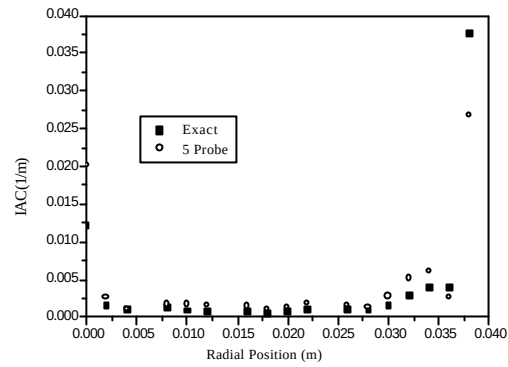


그림 15. Case 8 비교

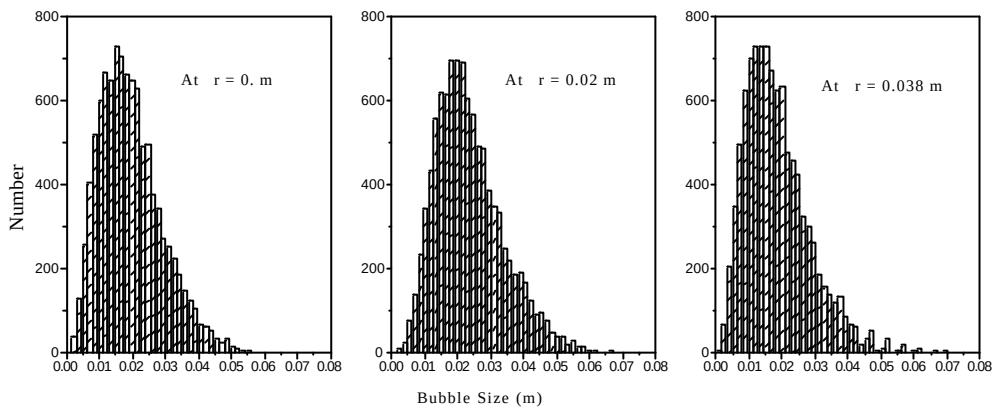


그림 16. 기포크기 분포함수

4. 결 론

본 연구에서는 전형적인 4센서 프로브에서 중앙의 후방에 센서를 추가하여 설계된 5센서 프로브를 제시하였다. 기포가 모든 센서를 지나는 경우 5센서 프로브가 만드는 세 개의 셀을 참조하여 얻어진 값을 평균함으로써 전체 프로브의 크기에 대해서 기포가 가지는 곡면효과를 줄일 수 있다. 하나 이상의 후방센서를 우회하는 경우에는 중앙의 후방센서로부터의 신호를 활용하여 계면의 형태에 대한 보다 정확한 정보를 얻을 수 있고, 단순히 축 방향으로 평행하게 세워져 있는 계면을 가정하는 4센서 방법론에 비해 효과적으로 분석할 수 있다. 중앙의 전후방센서만 지나는 계면의 경우에는 4센서 방법론으로는 계면 면적 밀도를 예측할 수 없으나, 5센서 방법론은 이중 센서 프로브법을 이용하여 기여도를 고려할 수 있다. 그러나, 모의실험결과 센서들로부터 형성되는 제한된 공간 속에서 주변의 센서를 지나지 않는 기포들의 분율은 충분히 작으므로 이 경우는 공학적으로 무시 가능할 것으로 판단된다. 기포크기 및 모양과 관련한 실제 유동상태가 모의실험의 그것과 차이를 보일 수 있고, 계속 도중에 발생할 수 있는 다양한 형태의 불확실성이 고려되지 않았으므로, 5센서 프로브법의 정량적인 오차를 논하기는 부족하지만 모의실험결과 5센서 프로브 방법론이 효과적으로 계면면적밀도를 예측하고 있음을 보이고 있다. 5센서 프로브법은 4센서만을 이용하는 경우에 비해 많은 논리회로를 구성해야하는 단점이 있으나 주어진 측정면적에 대해서 보다 정확한 계면면적밀도를 측정할 수 있다.

5. 참고문헌

- [1] Ishii, M., Thermo-fluid Dynamic Theory of Two-Phase Flow, Eyrolles, Paris, Scientific and Medical Publication of France, New York, 1975
- [2] Kataoka, I., Ishii, M., and Serizawa, A., Local Formulation of Interfacial Area Concentration, Int. J. Multiphase Flow, 12, 505-529, 1986
- [3] Revankar, S. T., Ishii, M., Local Interfacial Area Measurement in Bubbly Flow, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 35, No. 4, pp. 913-925, 1992
- [4] Kataoka, I., Serizawa, A., Interfacial Area Concentration in Bubbly Flow, Nucl. Eng. Design, 120, 163-180, 1990
- [5] Kocamustafaogullari, G., Huang, W. D., Razi, J., Measurement and Modeling of Average Void Fraction, Bubble Size and Interfacial Area, Nucl. Eng. Des. 120, pp. 163-180, 1994
- [6] Wu, Q., Zheng, D., Ishii, M., Veus, S. G., Measurements of Interfacial Area Concentration in Two-Phase Flow with Two-Point Conductivity Probe, Int. J. Multiph. Flow(submitted)
- [7] T. Hibiki, S. Hogsett, M. Ishii, Local measurement of interfacial area, interfacial velocity and liquid turbulence in two-phase flow, Nuc. Eng. and Des. 184, 287-304, 1998.
- [8] Ishii, M., Revankar, S. T., Measurement of Interfacial Area Using Four Sensor Probe in Two Phase Flow, DOE/ER/14147, July, 1991
- [9] M. J. Tan and M. Ishii, Interfacial Area Measurement Methods, ANL-89/5, Feb., 1989
- [10] Revankar, S. T., Ishii, M., Theory and Measurement of Local Interfacial Area Using a Four Sensor Probe in Two-Phase Flow, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 36, No. 12, pp. 2997-3007, 1993
- [11] S. Nukiyama and Y. Yamasawa, The Trans. Soc. Mech. Engrs., Japan, 5, 18, p. 63, 1969
- [12] Peebles, F. N., and H. J. Garber, Chem. Eng. Progr., vol. 49, pp. 88-97, 1953
- [13] Davis, R. M., and G. I. Taylor, Proc. Roy. Soc., vol. 200, ser. A, pp 375-390, London, 1950

부록 A, 센서 프로브에서 각 센서의 방향 코사인

■ 센서 1

$$x_1=y_1=z_1=0.$$

■ 센서 2

$$x_2=y_2=0, \quad z_2=d_{12}$$

■ 센서 3 (그림 A-1, A-2로부터)

$$x_3 = \sqrt{d_{13}^2 - z_3^2}$$

$$y_3 = 0,$$

$$z_3 = \frac{d_{12}^2 + d_{13}^2 - d_{23}^2}{2d_{12}}$$

$$d_{23}^2 - (d_{12} - z_3)^2 = d_{13}^2 - z_3^2 \Rightarrow z_3$$

■ 센서 4 (그림 A-1, A-3으로부터)

$$x_4 = \frac{d_{12}^2 + d_{14}^2 - d_{24}^2 - 2x_3 z_4}{2x_3}$$

$$y_4 = \sqrt{d_{14}^2 - x_4^2 - z_4^2}$$

$$z_4 = \frac{d_{12}^2 + d_{14}^2 - d_{24}^2}{2d_{12}}$$

$$d_{24}^2 - (d_{12} - z_4)^2 = d_{14}^2 - z_4^2 \Rightarrow z_4$$

$$\left(\begin{array}{l} (x_4 - x_3)^2 + y_4^2 + (z_4 - z_3)^2 = d_{34}^2 \\ x_4^2 + y_4^2 + z_4^2 = d_{14}^2 \end{array} \right) \Rightarrow x_4, y_4$$

■ 센서 5 (그림 A-1, A-4로부터)

$$x_5 = \frac{d_{12}^2 + d_{15}^2 - d_{25}^2 - 2x_3 z_5}{2x_3}$$

$$y_5 = \sqrt{d_{15}^2 - x_5^2 - z_5^2}$$

$$z_5 = \frac{d_{12}^2 + d_{15}^2 - d_{25}^2}{2d_{12}}$$

$$d_{25}^2 - (d_{12} - z_5)^2 = d_{15}^2 - z_5^2 \Rightarrow z_5$$

$$\left(\begin{array}{l} (x_5 - x_3)^2 + y_5^2 + (z_5 - z_3)^2 = d_{35}^2 \\ x_5^2 + y_5^2 + z_5^2 = d_{15}^2 \end{array} \right) \Rightarrow x_5, y_5$$

■ 방향코사인

$$(\cos \eta_{21}, \cos \eta_{31}, \cos \eta_{41}) = (0, 0, 1)$$

$$(\cos \eta_{23}, \cos \eta_{33}, \cos \eta_{43}) = \left(\frac{x_3}{d_{13}}, 0, \frac{z_3}{d_{13}} \right)$$

$$(\cos \eta_{24}, \cos \eta_{34}, \cos \eta_{44}) = \left(\frac{x_4}{d_{14}}, \frac{y_4}{d_{14}}, \frac{z_4}{d_{14}} \right)$$

$$(\cos \eta_{25}, \cos \eta_{35}, \cos \eta_{45}) = \left(\frac{x_5}{d_{15}}, \frac{y_5}{d_{15}}, \frac{z_5}{d_{15}} \right)$$

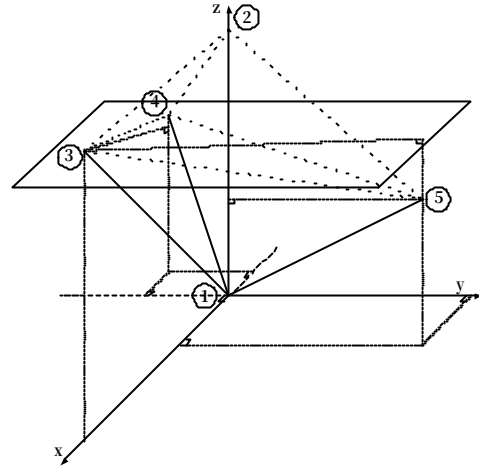


그림 A-1

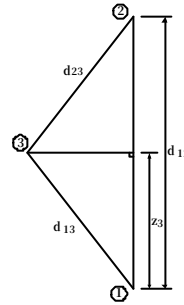


그림 A-2

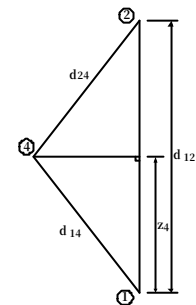


그림 A-3

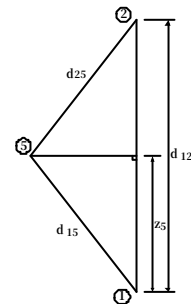


그림 A-4