2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

기포의 Fluctuation 조건에서 Five-Sensor 프로브의 계면면적밀도 측정방법론 개발을 위한 수치모의

Numerical Simulation to Develop the Interfacial Area Concentration Measurement Method by Using Five-Sensor Probe under the Bubble Fluctuation Condition

어동진, 윤병조, 박원만, 송철화

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

계면면적밀도(IAC)는 이상유동 해석을 함에 있어서 중요한 인자이다. 현재 두가지 형태의 프로브법, 즉 이중센서, four-sensor 프로브법이 계면면적측정을 위해 광범위하게 사용되고 있다. 본 연구에서는 기존의 프로브법의 성능을 개선하기 위해 five-sensor 프로브의 기본적인 형태 및 측정방법론을 제시하였다. Five-sensor 프로브법은 four-sensor 법에 기초하여 개발되었으며 하나의 센서를 추가로 고려하여 기존의 방법론을 개선하였다. 계면이 센서들을 지나는 형태를 크게 네가지로 구분하여 독립적인 방법론들이 각 군의 계면들을 위해 적용되었다. 본 방법론은 전형적인 four-sensor 프로브법과 비교할 때 우회기포에 대해 더욱 체계적인 접근 방식을 가지고 있는 장점을 가진다. Five-sensor 프로브법의 적용성을 평가하기 위해 구형기포에 대해 횡적인 운동을 고려한 수치모의를 수행하였다. 계면면적밀도 측정상에 기포의 크기 및 횡적요동 운동이 주는 영향을 아울러 분석하였다. 기포의 운동 및 계면의 구조와 관련된 다양한 기포인자들은 몬테카를로법에 의해 결정되었다.

Abstract

Interfacial area concentration (IAC) is an important parameter in the two phase flow models. Currently, two type of probe methods, double-sensor and four-sensor probe methods, are widely being used to measure the interfacial area concentration. In this study, a configuration of five sensor tips and the measuring method for the interfacial area concentration by using the probe are proposed to improve the performance of the previous probe methods. The five-sensor probe method proposed in this study is essentially based on the four-sensor probe method but improves it by adapting one more sensor. The passing type of interfaces through the sensors is categorized into four and independent methods are applied to the interfaces belong to each category. This approach has an advantage such that a more systematic approach for missing bubbles can be made when compared with the classical four-sensor probe method. To verify the applicability of the five-sensor probe method, numerical tests are performed with considering the bubble lateral movement. The effects of bubble size and intensity of bubble lateral motion on the measurement of interfacial area concentration are also investigated. The bubble parameters related bubble fluctuation and interface geometry are determined by Monte Carlo approach.

1. 서 론

Two-fluid 모델에서 각 상의 평형방정식들을 풀기 위해서는 계면을 통한 전달항에 대한 적절한 구성관계식이 필요하고, 그 모델의 적절성은 이상유동 예측결과에 지대한 영향을 미친다. 일반적으로 계면을 통한 열전달 항은 단위체적당 계면면적으로 정의되는 계면면적밀도(IAC)에 비례한다. 따라서 계면면적밀도는 two-fluid 모델에서 매우 중요한 항이며 해석모델의 개발을 위해서 적절한 측정방법론을 통한 실험데이타를 필요로 한다. 프로브법은 이상유동에서 기포율이나 기포속도등의 유동인자를 측정하는데 유용한 방법이다. 국부적 시간평균 계면면적밀도를 위한 다중센서 측정원리는 Ishii(1975)에 의해 주어진 수학적인 관계식에 기초한다. 현재 두가지 형태의 프로브법이 사용되고 있고, 이중센서 프로브법, four-sensor 프로브법이 그것이다. 이중센서법은 이상유동의 특성에 대한 통계적가정, 그리고 구형기포를 가정하여 확산상에서는 매우 유용한 측정방법론인 반면, 기포의 형태가 변형될 수 있는 많은 유동장에서의 적용성에 다소의 제한이 따른다. (Kataoka 외, 1986; Kataoka 외, 1990; Revankar 외, 1992) Four-sensor 법은 기포의 형태 및 유동특성에 대한 가정없이 IAC 를 예측할 수 있다. (Kataoka 외, 1986; Tan 외, 1989; Ishii 외, 1991; Revankar 외, 1993) 국부 IAC 는 측정위치에서 삼차원 속도성분을 측정하고, 센서들의 기하학적인 방향벡터를 통하여 얻을 수 있다. 그러나 특정한 프로브의 횡적크기로 인해 하나 혹은 그 이상의 후방센서를 기포가 우회하는 경우가 발생할 수 있고, 센서가 그러한 우회기포를 찌르는 부위의 형태는 매우 기울기가 급하여 큰 IAC 를 가지기 때문에 발생 빈도수가 적더라도 전체 IAC 에 큰 영향을 줄 수 있다. 따라서 우회기포의 IAC 를 적절히 측정하여야 하는데 four-sensor 법은 나름대로 특수한 관계식을 가지고는 있으나 계면정보의 부족으로 한계를 가지고 있다. 이러한 우회기포는 기포의 크기가 작은 경우 상대적으로 그 빈도수가 커질 수 있으며 이로 인한 측정의 오차도 심각할 수 있다. Four-sensor 법은 모든 센서를 지나는 경우에 대한 방법론과 우회기포를 위한 모델로 구성되며 본 연구에서는 전자를 four-point 법으로 명명하기로 한다.

Wu(1999)는 이중센서법에서 기포의 횡적운동과 센서의 간격에 따른 국부 IAC 측정에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 이 연구에서 통계적인 기포운동 및 계면의 기하학

적 형태와 관련된 인자들은 몬테카를로법에 의해 결정하였다. 어동진(2001)은 five-sensor 법을 제안하였고, 측정방법론을 평가하기 위해 수치모의를 수행하였다. 이 연구에서는 구형, 반구형, 회전타원체등의 다양한 기포의 형태에 대해 테스트를 수행하였고, 결과로서 제안된 방법이 이론값과 근사함을 제시하였다. 그러나 이 연구에서는 기포의 요동성분을 고려하지 않았고, 중앙의 후방센서가 전방센서와 같은 축선상에 있다는 가정을 적용하였다. 이러한 가정은 실제 센서 설계와 유동특성과 다소 차이가 있을 수 있으므로, 이러한 변수들을 고려한 더 많은 고찰이 이루어져야 한다. Le Corre(2002)는 국부적인 기포의속도와 IAC 측정을 위한 이중센서법과 four-sensor 법을 수치적으로 평가하였다. 이 연구에서는 실제 속도의 과대예측을 제한하기 위해 프로브의 설계기준이 필요하다는 결론을 제시하고 있으며 구형의 기포조건에서는 이중센서법이 어떠한 유동형태에 대해서도 적절한 측정값을 산출하는 반면 four-sensor 법은 우회기포의 기여도로 인해 최대 30% 과소평가하고 있음을 제시하고 있다.

본 연구에서는 five-sensor 프로브의 기본 형태와 이를 이용한 IAC 측정방법론을 제시하고 있다. Five-sensor 프로브법은 four-sensor 법에 기초하여 개발되었으며 하나의 센서를 추가로 고려하여 그 성능을 개선하였다. 이 방법은 기존 방법론과 비교하여 우회기포에 대해 보다 체계적인 분석을 가능케하는 장점을 가진다. Five sensor 법의 적용성을 평가하기 위해 기포의 횡적 운동과 실제 프로브 설계를 고려하여 수치모의를 수행하였다. 기포의 형태는 구형으로 가정하였으며 기포의 크기 및 요동성분 강도의 영향을 아울러 고찰하였다. 기포의 횡적운동과 계면의 구조와 관련된 기포인자들은 몬테카를로법에 의해 결정하였다.

2. Five-Sensor 법

2-1 센서팁의 구성과 분석기포들의 구분

Five-sensor 프로브 설계상의 센서팁 구성은 그림 1 과 같다. 후방 센서팁간 간격, a_0 는 측정의 정확성에 영향을 준다. 우회기포의 빈도수를 줄이고 계면의 곡면효과로 인한 오차를 줄이기 위해 이 센서팁간의 간격은 작아야 한다. 본 연구에서는 1.0mm 의 팁 간격을 적용하였다. 프로브는 중앙의 전, 후방센서와 세개의 대칭위치에 있는 후방센서로 구성이 된다. 중앙의 후방센서를 이용하여 계면의 수직방향 속도성분을 얻을 수 있고, 후방의 하나이상의 센서를 우회하는 기포들에 대해서 기존 방법론보다 효과적인 기포인자 측정을 할 수 있다. 전방센서로부터 각 후방센서로의 방향벡터 성분은 프로브의 기하학적 모양으로 유도할 수 있으며 어동진외(2001)에 자세히 기술하고 있다. 본 연구에서의 five-sensor 법은 계면이 센서들을 지나는 형태를 네개의 군(Category)으로 구분하고, 각 군에 해당하는 계면에 대해 독립적인 방법론을 제공한다. 각 경우에 대한 계면과 센서팁간의 구성은 그림 2 에서 표현하고 있다. 군 II 와 군 III 에 속하는 계면은 측정위치에서 급격한 기울기를 가지는 형태로서 빈도수는 적지만 큰 계면면적밀도값을 야기하는 중요한 우회기포에 해당한다. 군 IV 는 중앙의 전 후방센서만 지나는 경우로서 센서의 크기와 관심 기포크기 영역을 고려할 때, 발생가능성이 적어 무시가능할 만하다 (어동진외, 2001)

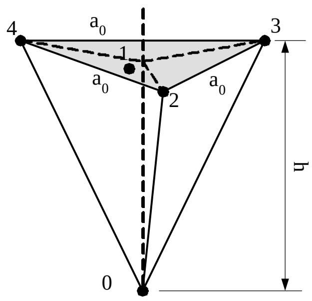
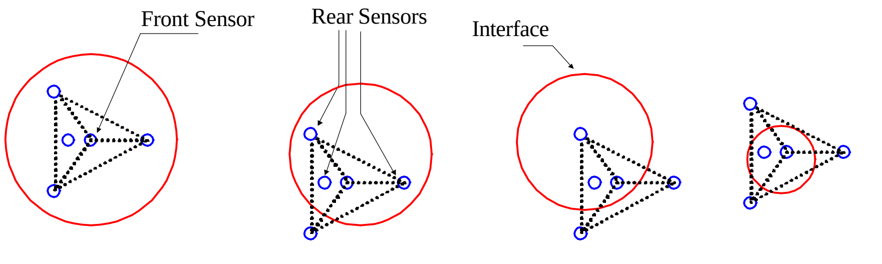


그림 1. 센서팁구성



(a) Category I (b) Category II (c) Category III (d) Category IV

그림 2. 기포군 정의

2-2 I 군 계면 측정방법론

I 군 계면은 프로브내의 모든 센서들을 지난다. 어동진외(2001)는 측정단면적에서 센서팁에 의해 구분되는 세개의 부 영역을 고려하여 각 부 영역에서 도출된 세개의 IAC 값을 평균하는 방법론을 제시하였다. 이러한 방법은 측정단면적에서 계면의 곡률효과를 줄일 수 있는 장점을 가진다. 그러나 작은 측정단면적에 대해서는 계면의 곡면효과가 크기 않기 때문에 본 연구에서는 중앙의 후방센서를 제외한 네개의 센서를 이용한 four-point 법을 적용하였다. 어동진외(2001)는 부 영역 고려 유무에 따른 결과 차이가 크지 않음을 보인바 있다. Four point 법에 의한 IAC 도출은 다음 식에 의한다.

$$\bar{a}_i^t = \frac{1}{\grave{U}} \sum_j \frac{\sqrt{|A_1|^2 + |A_2|^2 + |A_3|^2}}{\sqrt{|A_0|^2}} \tag{1}$$

여기서

$$|A_0| = \begin{vmatrix} \cos\varsigma_{x1} & \cos\varsigma_{y1} & \cos\varsigma_{z1} \\ \cos\varsigma_{x2} & \cos\varsigma_{y2} & \cos\varsigma_{z2} \\ \cos\varsigma_{x3} & \cos\varsigma_{y3} & \cos\varsigma_{z3} \end{vmatrix} \neq 0, \quad |A_1| = \begin{vmatrix} \frac{1}{V_{i1j}} & \cos\varsigma_{y1} & \cos\varsigma_{z1} \\ \frac{1}{V_{i2j}} & \cos\varsigma_{y2} & \cos\varsigma_{z2} \\ \frac{1}{V_{i3j}} & \cos\varsigma_{y3} & \cos\varsigma_{z3} \end{vmatrix}$$

$$|A_2| = \begin{vmatrix} \cos\varsigma_{x1} & \frac{1}{V_{i1j}} & \cos\varsigma_{z1} \\ \cos\varsigma_{x2} & \frac{1}{V_{i2j}} & \cos\varsigma_{z2} \\ \cos\varsigma_{x3} & \frac{1}{V_{i3j}} & \cos\varsigma_{z3} \end{vmatrix}, \qquad |A_3| = \begin{vmatrix} \cos\varsigma_{x1} & \cos\varsigma_{y1} & \frac{1}{V_{i1j}} \\ \cos\varsigma_{x2} & \cos\varsigma_{y2} & \frac{1}{V_{i2j}} \\ \cos\varsigma_{x3} & \cos\varsigma_{y3} & \frac{1}{V_{i3j}} \end{vmatrix}$$

2-3 II 군 계면 측정방법론

II 군 계면은 후방의 하나의 센서를 우회한다. 본 방법론은 이러한 경우, 그림 3 과 같이 세개의 부영역을 정의하여 각 부영역에서 도출되는 IAC 를 중심각에 대해 가중평균 취하여 얻는다. 즉,

$$a_{ij} = \frac{(a_{ij})_{Cell\,1}\alpha_1 + (a_{ij})_{Cell\,2}\alpha_2 + (a_{ij})_{Cell\,3}\alpha_3}{2\pi} \quad (2)$$

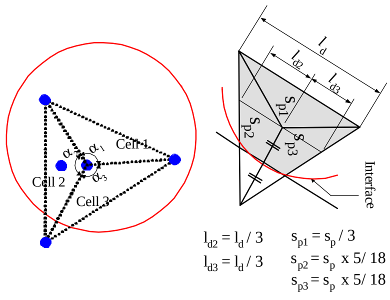


그림 3. II군기포 모델

그림 3 은 II 군에 속하는 경우중 하나로서 부영역 1 에서는 세개의 계면속도 성분을 얻을 수 있으므로 four-point 법을 이용하여 IAC 를 얻는다. 그러나 다른 부영역에서는 두개의 계면속도성분만을 얻을 수 있으므로 별도의 수학적 고려가 이루어 져야 한다. 본 연구에서는 이러한 우회계면에 대한 관계식을 four-sensor 법에서 제시하고 있는 형태와 유사한 접근 방식에 의해 정의하였다. 한 센서는 기포당 두개의 계면을 경험한다. 우회기포경우 측정지점에서 상부계면은 급격한 기울기를 가질것으로 예상할 수 있고, 하부계면은 기포의 크기에 따라 다양한 기울기를 가질 수 있다. 계면의 기울기는 부영역 1 을 참조하여 얻은 IAC 와 수평계면의 그것과 비교함으로써 판단할 수 있다. 급격한 기울기의 계면경우 계면은 프로브와 평행하다는 가정을 적용하여 four-sensor 법과 유사한 형태의 관계식을 적용하고, 완만한 기울기를 가지는 계면은 각 부영역에서의 IAC 값이 큰 차이를 보이지 않기 때문에 부영역 1 을 참조하여 얻은 IAC 를 측정지점에서의 대표값으로 가정한다. 부영역 2,3 에 적용되는 수학적인 관계식은 아래와 같다.

$$\text{for } \left|(a_{ij})_{Cell\,1} - \frac{1}{\Omega}\frac{1}{v_{iz}}\right| < \varepsilon, \qquad \text{(flat interface)}$$
$$(a_{ij}) = (a_{ij})_{Cell\,1} \qquad (3a)$$

$$\text{for } \left|(a_{ij})_{Cell\,1} - \frac{1}{\Omega}\frac{1}{v_{iz}}\right| > \varepsilon, \qquad \text{(steep interface)}$$
$$(a_{ij})_{Cell\,2} = \frac{\tau_b}{\Omega}\frac{l_{d2}}{s_{p2}}$$
$$(a_{ij})_{Cell\,3} = \frac{\tau_b}{\Omega}\frac{l_{d3}}{s_{p3}} \qquad (3b)$$

식 (3)에서의 조건문은 계면의 기울기를 판단하기 위함이다. 절대기호의 두번째 항, $1/(\Omega v_{iz})$ 은 수평계면의 국부적인 IAC 이다. l_{dk} 와 s_{pk} 는 부영역 k 에서 기포가 차지하는 길이 및 면적으로서 평균적으로 그림 3 에서 명시하고 있는 경우와 같은 통계적인 가정을 적용한다. 프로브의 투영단면적이 세개의 부영역으로 3 등분되는 경우 각 부영역에서 길이 및 면적인자는 그림 3 과 같다. 이러한 관계식은 정리과정에서 아래와 같은 방

정식으로 조건문 없이 정리될 수 있다.

$$(a_i)_{bubble} = \frac{(a_{ij})_{Cell\,1\,upper\,interface} + (a_{ij})_{Cell\,1\,buttom\,interface} + (a_{ij})_{Cell\,2} + (a_{ij})_{Cell\,3}}{3} \qquad (4)$$

부 영역 1 에서는 상, 하부 계면에 모두 four-point 법이 적용되며 나머지 부 영역에서는 우회계면의 관계식 (3)이 고려된다.

그림 4 는 우회센서에 따라 정의할 수 있는 II 군의 세가지 경우중 하나이다. 이 경우 부영역 2 에 four-point 법을 이론적으로는 적용할 수 있으나 3 개의 속도벡터의 독립성이 적음으로 인한 오차가 매우 크게 발생할 수 있다. 이러한 속도벡터의 의존성은 부영역 2 에서 세개의 후방센서(하나의 중앙 후방센서와 두개의 대칭적 위치의 후방센서)의 팁이 거의 같은 선상에 존재하기 때문이다. 따라서 이 경우 우회기포에 대해 four-sensor 법이 가지는 식을 적용하였다. 즉,

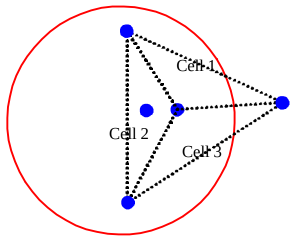


그림 4. II군의 한 형태

$$(a_i)_{bubble} = \frac{\hat{o}_b}{\grave{U}} \frac{l_d}{s_p} \qquad (5)$$

2-4 III 군 계면 측정방법론

III 군 계면은 대칭적 위치에 있는 두개의 후방 센서를 우회한다. 그림 5 는 III 군에 속하는 세가지의 경우중 하나를 보여주고 있다. III 군 기포를 위한 방법론은 분석해를 위한 관계식을 이용한다. 국부적 측정위치 0 에서 계면의 x 및 y 방향의 순간 기울기를 직접적으로 얻지 못하므로 측정가능한 물리량을 이용하여 근사하였다..

예를 들어 계면이 센서 0, 1, 2 를 지나는 경우를 고려하면 측정위치 0 에서 x, y 방향으로 계면의 기울기는 센서 0 와 2 위치에서의 계면의 선형 기울기보다 클 것으로 예상할 수 있다. 따라서 각 방향으로의 계면의 기울기는 센서 0 과 2 사이의 x, y 방향 거리에 대해 각 센서위치에서의 계면의 높이차로 가정한다. 즉, 계면면적밀도를 얻기 위한 관계식은 아래와 같다.

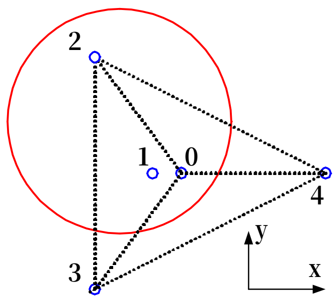


그림 5. III군기포 모델링

$$(a_{ij}) = \frac{1}{\Omega}\frac{1}{v_{iz}}\sqrt{1+\left(\frac{\Delta z_{s02}}{\Delta x_{02}}\right)^2+\left(\frac{\Delta z_{s02}}{\Delta y_{02}}\right)^2} \qquad (6)$$

여기서 아래첨자 0 과 2 는 센서의 고유번호를, 분모의 Δx_{02} 와 Δy_{02} 는 센서 0 과 2 사이의 x 축 혹은 y 축상 거리를 의미한다. 센서 0, 2 위치에서의 계면의 높이차이, Δz_{s02} 는

중앙의 전후방센서로부터의 축방향 속도성분과 후방센서의 지연시간을 통하여 얻을 수 있다. 만약 두 센서사이의 x 혹은 y 축방향의 거리가 0 이면, 식 (6)을 적용하기 어렵다. 따라서 이러한 경우 후방센서 4 의 위치를 그림 6 에서 정의한 위치로 가정하여 수행하였다. 이과정에서 발생할 수 있는 오차는 후에 수치모의부분으로 미루기로 한다.

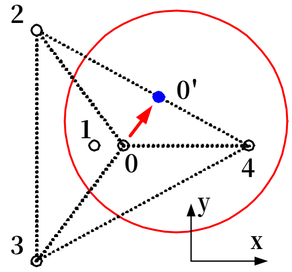


그림 6. III군의 한 형태

2-5 IV 군 계면 측정방법론

IV 군 계면은 오직 중앙의 전후방센서를 지나는 경우로 정의한다. (그림 2(d)) 이러한 계면의 경우 이중 센서법을 적용할 수 있다. 그러나 후방의 세개의 센서로 구성이 되는 측정 단면적이 매우 작기 때문에 IV 군 기포가 발생할 수 있는 가능성은 매우 적다. 따라서 이러한 계면들의 기여도 역시 무시가능하다.

3. 수치 모의 방법

계면면적밀도를 얻기위한 과정은 그림 7 의 순서도에 따른다. 주요 유도 관계식을 아울러 그림에 명시하였다. 두 센서와 모의 계면사이의 수학적인 정의는 Le Corre 외 (2002)의 그것에 따른다. 기포의 크기, 기포속도, 빈도수 그리고 기포의 형태등의 기포 및 유동특성은 사용자의 입력사항으로 결정된다. 본 연구에서는 각 테스트 조건에서 100000 개의 샘플 기포를 이용하였다. 전방센서로부터 각 후방센서로의 방향벡터는 프로브의 기하학적 모양을 통하여 직접적으로 얻을 수 있다. 계면의 수직벡터와 속도벡터는 각각 두가지의 특성각도(ξ, φ 와 μ, ν)에 의해 정의할 수 있으며 이들은 난수발생기를 통하여 결정한다. 구형기포의 경우에는 이러한 벡터들을 통계적인 가정을 통하여 손쉽게 유도할 수 있으나 다른 형태의 기포들에 대해서는 좀 더 많은 수학적 고찰이 요구된다. 본 연구에서의 모의는 구형기포에 국한하여 이루어졌으며 다른 형태에 대해서는 추후로 미루고자 한다. 기포의 횡방향운동을 고려하지 않는 경우에 대해서는 구형이외에 반구형, 회전타원체형에 대해 어동진외(2001)에서 분석한 바 있다. 본 연구에서는 기포의 요동에 따른 수평운동을 모의에 고려하고 있으며 그 횡방향 운동의 정도는 축방향 속도에 대한 최대 요동속도비를 사용자가 정의하고 각 기포가 가지는 요동속도성분은 난수발생기를 통하여 얻는다. 계면이 전방센서를 지난후 후방센서에 도달하기까지 걸리는 시간을 측정하기 위하여는 다소의 복잡한 관계식을 필요로 하며 그 유도과정은 Le Corre(2002)의 연구를 따른다. 이러한 지연시간을 계산하는 과정에서 해가 존재하지 않는 경우가 발생할 수 있고, 이 경우는 전방센서를 지난 계면이 후방센서를 우회하는 경우이다. 지연시간의 해가 존재하는지의 유무를 확인하는 과정을 순서도 상에서 “Check Effectiveness”로 표현하였다. 우회하는 센서에 따라서 앞서 정의한 계면의 “군”이 정의되고, 각 군에서의 IAC 측정 방법론에 따라 IAC 를 예측한다.

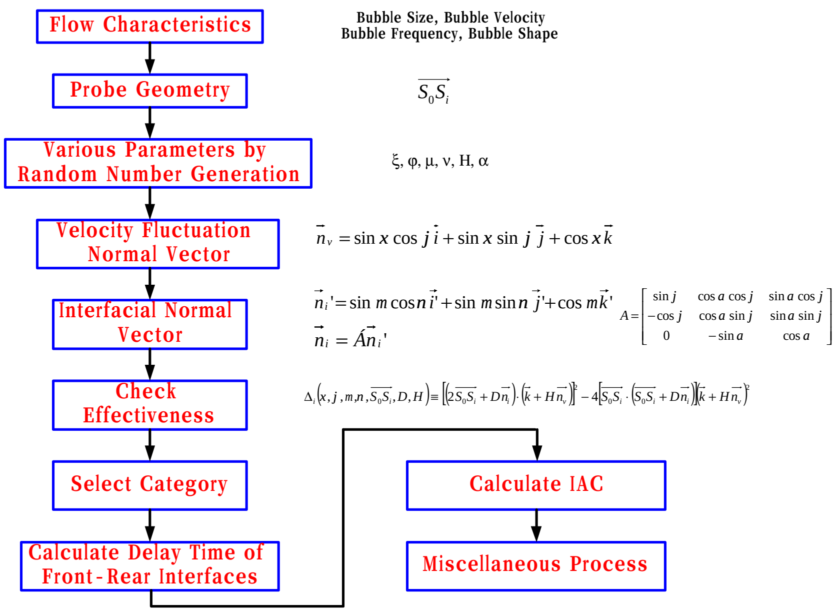


그림 7. 계면면적밀도 측정모의를 위한 순서도

4. 결과 및 토의

Five-sensor 프로브를 이용한 IAC 모의 결과는 four-sensor 법과 이론값과 비교하여 평가되었다. 비교과정에서 참조하고 있는 four-sensor 프로브는 하나의 전방센서와 3 개의 대칭적 위치의 후방센서를 가지는 경우로서 five-sensor 프로브에서 중앙의 후방센서가 없는 경우와 동일하다. 그림 8 은 기포의 횡방향 운동이 없는, 즉 순수한 축방향 운동을 하는 경우에 대해 기포크기에 따른 결과이다. y 축은 모의값과 참값의 비로 정의되며 두 값이 일치하면 1.0 의 값을 가진다. 2mm 미만의 크기가 작은 기포의 경우 두 방법론 모두 IAC 값을 과소평가하는 결과를 보이고 있지만 five-sensor 프로브의 경우가 four-sensor 프로브에 대해 좋은 결과를 보이고 있다. 그 외 크기에 대해서는 본 연구에서 제시하였던 five-sensor 법이 참값과 거의 일치하였다. 그림 9 부터 12 는 기포의 크기가 2.0mm~10.0mm 인 경우에 대해 횡방향 운동을 고려하는 경우로서 각 경우에 단일 크기의 기포를 고려하였다. 기포의 횡방향 운동이 강해지면서 참값에 대한 모의 IAC 비가 전반적으로 상승하는 경향을 보이고 있다. 이는 우회기포 모델 결과의 추이에 의한 영향이다. 우회기포모델은 계면이 프로브와 나란히 서있는 형태 및 기포가 축방향으로 지나는 경우에 대해 근사한 모델인데, 횡방향 운동을 고려하면 주어진 형태에 대해서 기포가 센서에 잔류하는 시간이 늘어나고, 축방향 속도도 줄어들기 때문이다. 이러한 오차의 허용성은 분석 후반에 명시하고 있다. 기포의 크기가 2.0mm 로 작은 경우에서는 순수 축방향 운동의 경우와 유사하게 IAC 를 과소평가하고 있으며 five-sensor 모델의 경우 전반적으로 10%의 오차를 보이고 있다. Four-sensor 법은 30% 이상의 오차를 보이고 있다. 기포의 크기가 3mm 이상의 경우에 대해서는 그림 10, 11, 12 에서 보듯이 five-sensor 법이 참값에 근사하는 좋은 결과를 보이고 있다. 그림 13 은 지수함수 형태

의 기포 크기분포를 가정하고 기포의 평균 직경이 3.0mm 인 경우에 대한 모의 결과로서 그림 10 에서 제시하고 있는 3.0mm 직경의 단일 기포의 경우와 거의 흡사한 결과를 보여주고 있다.

그림 14 는 평균 직경 3.0mm 지수함수 기포크기 분포의 경우에 대해 앞 절에서 정의하고 있는 각 군의 IAC 측정방법론에 대한 독립적인 평가결과이다. I 군 기포, 즉, 기포가 모든 센서를 지나는 경우에는 four-sensor, five-sensor 두 방법론 모두 참값에 근사하는 좋은 결과를 보이고 있다. II 군 기포의 경우에는 두 방법론 상의 차이는 크지 않고, five-sensor 법이 four-sensor 법에 비해 약간 큰 결과값을 산출하고 있다. 기포의 횡방향 운동이 강하면서 참값대비 모의 IAC 값이 상승하는 결과를 보이고 있으며, 전반적으로 두 방법론 모두 참값에 근사하는 결과를 보이고 있다. 전술한 바와 같이 본 연구에서는 구형기포에 국한하여 분석을 하고 있는데, 이 경우 측정지점에서 우회계면은 상-하부 모두 급격한 기울기를 가지는 형태를 예상할 수 있다. 그러나 아래가 평평한 형태를 가지는 기포의 경우에는 두 방법론 결과상에 차이가 커지며 순수 축방향 운동을 하는 경우에 대한 분석(어동진외, 2001)에 따르면 five-sensor 의 경우 여전히 참값에 잘 근사하는 반면 four-sensor 경우 과소평가하는 결과를 보임을 제시한 바 있다. III 군 기포에 대해서 five-sensor 법은 최대 횡방향 속도비가 0.4 보다 작은 경우 과소평가, 큰 경우 과대평가를 하고 있으나 그 오차의 폭은 크지 않은 반면, four-sensor 법은 상당한 과소평가 결과를 보이고 있다. 이는 우회기포에 대해 four-sensor 법이 가지는 관계식에서 정의하는 기포의 길이 및 면적 인자가 III 군 기포에 대해서는 부적절함을 의미한다. 그림 15 는 그림 13 및 14 에서 설정하고 있는 테스트 조건에 대해 각 군기포들의 전체 빈도수 및 IAC 에 대한 기여도를 각각 나타내고 있다. 주어진 조건에서 기포들이 전체 센서를 지나는 I 군 기포의 경우가 제일 많고, II 군과 III 군 기포들이 비슷한 정도의 빈도수를 가지고 있다. 그러나 IAC 기여도는 세개의 군이 모두 비슷한 비율을 차지하고 있다. 이는 우회기포가 큰 IAC 를 가지고 있음을 잘 설명하는 결과로서, 측정지점에서 계면의 형태가 급격한 기울기를 가지기 때문이다. 결론적으로 본 연구에서 제시하고 있는 five-sensor 방법론은 관심 기포 크기 영역에서 기존의 방법론에 비해 효과적인 성능을 보임을 알 수 있으며 개별 군의 모델 역시 참값에 근사하는 좋은 결과를 보이고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 five-sensor 프로브를 이용한 IAC 측정방법론을 제시하였다. Five-sensor 프로브법은 기존의 four-sensor 프로브법에 기초하여 그 기능을 강화한 IAC 측정방법론으로서 유동속에서 기포가 프로브를 구성하는 센서들의 일부를 지나지 않는 경우에 대해서 효과적인 측정기법을 가지고 있다. 방법론의 검증을 위하여 구형의 기포 및 fluctuation 유동조건에서 다양한 기포크기 및 횡방향 운동의 정도에 따른 민감도 분석을 수행하였으며 그 결과 기존의 four-sensor 법에 비해 좋은 결과를 보여주고 있다. 또한 측정방법론 상에서 정의한 군들에 대한 독립적인 평가 및 기여도 평가는 우회하는 기포들의 특성에 대해 잘 설명해 주고 있다.

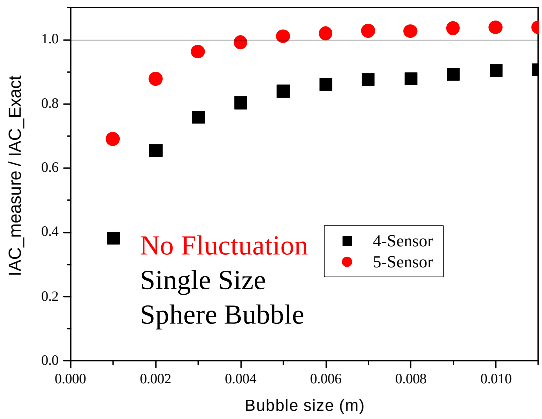


그림 8. 순수축방향운동 경우 IAC 모의

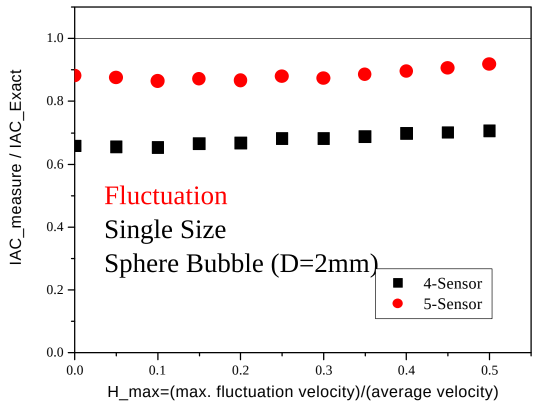


그림 9 기포직경 2mm 경우 IAC 모의

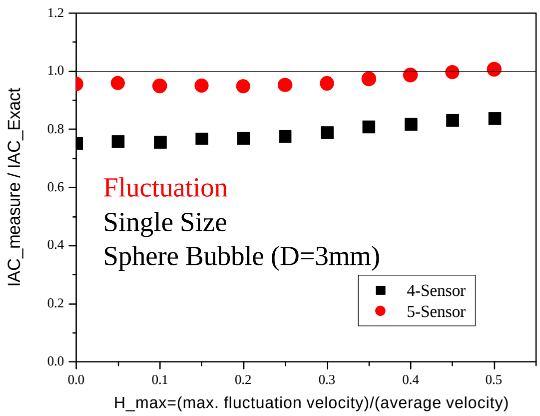


그림 10 기포직경 3mm 경우 IAC 모의

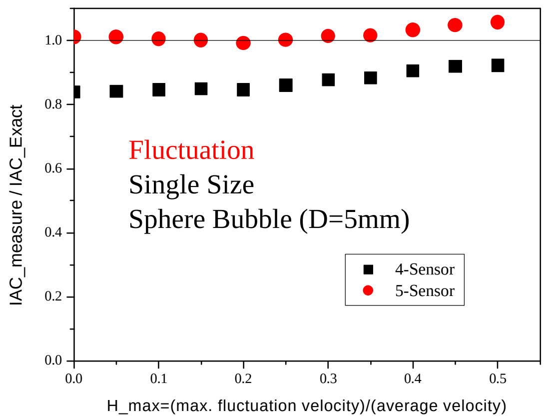


그림 11 기포직경 5mm 경우 IAC 모의

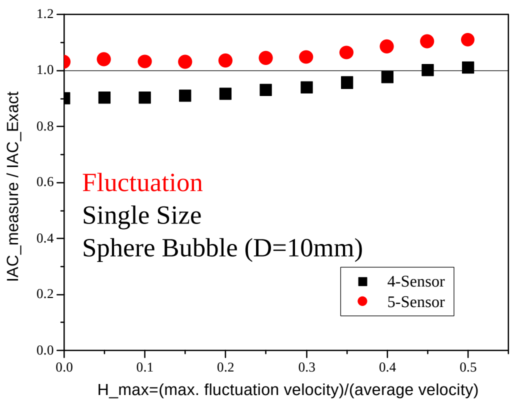


그림 12 기포직경 10mm 경우 IAC 모의

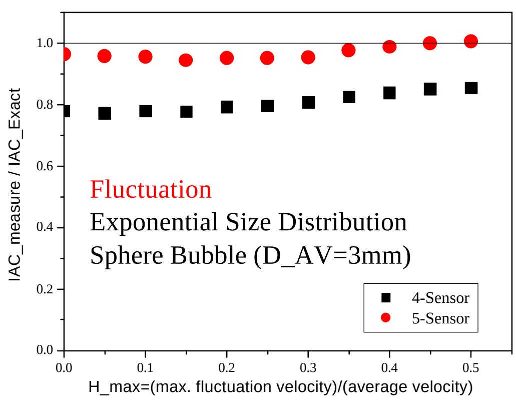


그림 13. 지수함수크기분포 기포들에 대한 IAC모의 (평균 3mm 직경)

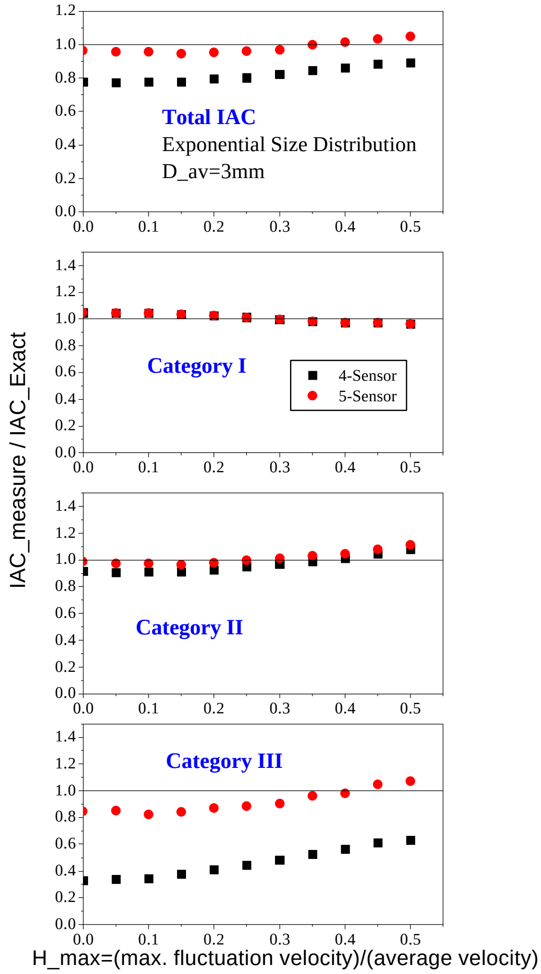


그림 14 각 군의 IAC 모의결과

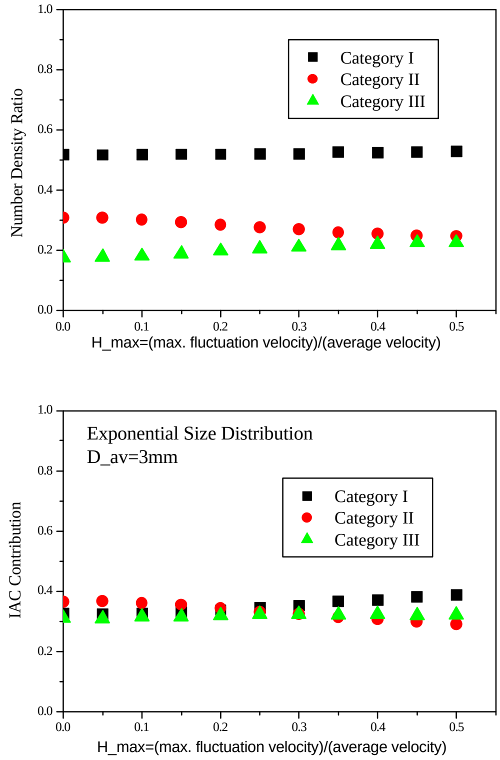


그림 15 각 군 기포의 빈도수 및 IAC 기여도

감사의 글

본 연구는 과학기술부 중장기 연구개발과제의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. D.J.Euh, B.J.Yun, C.H.Song, T.S.Kwon, M.K.Chung, U.C.Lee, 2001, "Development of the Five-Sensor Conductivity Probe Method for the Measurement of the Interfacial Area Condensation", *Nucl. Eng. and Des.*, **Vol. 205**, pp.35-51
2. J.-M. Le Corre, 2002, "Numerical Evaluation and Correction Method for Multi-Sensor Probe Measurement Techniques in Two-Phase Bubbly Flow, *Nucl. Eng. and Des.*, **Vol. 216**, pp.221-238.
3. M. Ishii, 1975, *Thermo-Fluid Dynamic Theory of Two-Phase Flow*, Eyrolles, Paris, Scientific and Medical Publication of France, New York
4. M. Ishii, S.T. Revankar, 1991, *Measurement of Interfacial Area Using Four Sensor Probe in Two Phase Flow*, DOE/ER/14147
5. I. Kataoka, M. Ishii, and A. Serizawa, 1986, "Local Formulation of Interfacial Area Concentration", *Int. J. Multiphase Flow*, **Vol. 12**, pp. 505-529
6. I. Kataoka, A. Serizawa, 1990, "Interfacial Area Concentration in Bubbly Flow", *Nucl. Eng. Des.*, **Vol. 120**, pp. 163-180
7. S.T. Revankar, M. Ishii, 1992, "Local Interfacial Area Measurement in Bubbly Flow", *Int. J. Heat Mass Transfer*, **Vol. 35(4)**, pp. 913-925
8. S.T. Revankar, M. Ishii, 1993, "Theory and Measurement of Local Interfacial Area Using a Four Sensor Probe in Two-Phase Flow", *Int. J. Heat Mass Transfer*, **Vol. 36**, 12, pp. 2997-3007.
9. Tan, M.J., Ishii, M., Interfacial Area Measurement Methods, ANL-89/5, Feb 1989
10. Q. Wu, M. Ishii, 1999, "Sensitivity Study on Double-Sensor Conductivity Probe for the Measurement of Interfacial Area Concentration in Bubbly Flow", *Int. J. Multiphase Flow*, **Vol. 25(1)**, pp. 155-173.