2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

Five-Sensor Conductivity Probe를 이용한 계면면적밀도 측정방법 및 단열조건에서의 데이터 생산

Experimental Method and Data Generation for Interfacial Area Concentration in Adiabatic Condition by Using a Five-Sensor Conductivity Probe

어동진, 윤병조, 박원만, 송철화, 정문기
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

이은철
서울대학교
서울특별시 관악구 신림9동 산56-1

요 약

계면 면적 밀도는 Two-fluid 모델의 계면을 통한 상호 전달항에 관련된 구성 관계식에서 매우 중요하게 다루어지는 인자이다. 본 논문에서는 Five-Sensor Conductivity Probe를 이용한 계면면적밀도 측정방법에 대해 간단히 기술하였다. 실험데이타를 생산하기 위하여 0.08 m 직경의 주 시험부를 가지는 공기/물 실험장치를 제작, 설치하였고, Five-Sensor Conductivity Probe를 이용하여 계면면적밀도 실험데이타를 생산하였다. 계면면적밀도의 수송현상은 주 시험부 세 지점(L/D=12.2, 42.2, 100.7)에서 측정된 계면면적밀도 실험데이타를 이용하여 고찰되었고, 실험범위는 액상의 겉보기 속도가 0.47~2.87m/s, 기상의 겉보기 속도는 0.11~1.58m/s 이며 기포유동 및 슬러그 유동에 해당한다. 본 연구에서는 기포를 크기기준으로 두 개의 군으로 구분하여 각 군에 대한 계면면적밀도 및 기포율 자료를 생산함으로써 생산되는 데이터가 이군 계면면적 수송방정식의 모델링에 효과적으로 활용될 수 있도록 하였다.

Abstract

Interfacial area concentration is one of important parameters in the constitutive relations relating to the interfacial transfer terms in the two-fluid model. In this paper, the measuring method for the interfacial area concentration by using a five-sensor conductivity probe is briefed. To generate IAC data, an air/water test loop is constructed, which has the 0.08m diameter of test section. The IAC transport phenomena are examined by measuring the IAC at vertical three positions: L/D=12.2, 42.2, 100.7. The test range is 0.47~2.87m/s of superficial liquid velocity and 0.11~1.58m/s of superficial gas velocity, which corresponds to the bubbly and slug flow in the flow regime map. In this study, the bubbles are categorized into two groups based on their size, and IAC and void fraction data of each group are generated respectively. Since the IAC data are classified into two groups, the data could be directly used to model the IAC by two group interfacial area transport equations.

1. 서 론

계면 면적 밀도는 이상 유동을 해석하기 위한 모델들 중 Two-fluid 모델의 계면을 통한 상호 전달항에 관련된 구성 관계식에서 매우 중요하게 다루어지는 인자이다. 이 인자는 유동장(flow regime)에 따라 서로 다른 상관식의 형태로 개발되어 왔으나, 최근에 입자들의 동적 특성을 고려한 수송 방정식을 이용하여 보다 다양한 유동장 및 유동 상황에서 일관적인 방법론으로 해석하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 모델들의 개발을 위해 다양한 유동 형태에서 많은 실험 자료가 요구되고 있으나, 아직 계측의 어려움과 현상학적인 복잡성으로 인해 모델링을 위한 충분한 데이터가 부족한 실정이다.

Conductivity Probe법은 이상유동에서 기포율이나 기포속도와 같은 유동인자를 측정하는데 유용한 방법으로서 물과 기체가 가지는 전기적 저항의 차이를 이용하여 상을 구분할 수 있는 기본 원리를 이용한다. 국부적 시간 평균 계면면적밀도(IAC)은 Ishii(1975)가 개발한 식에 기초하여 얻을 수 있으며 아래와 같은 식으로 표현된다.

$$\bar{a}_i^t(x_0, y_0, z_0) = \frac{1}{\Omega}\sum_j \frac{1}{|\vec{v}_{ij}|\cos\phi_j}. \tag{1}$$

즉, IAC는 국부적 측정 지점에서 계면의 속도와 단위시간당 개수를 측정하여 얻는다. 지금까지 적용되어 오고 있는 Conductivity Probe는 크게 Double-Sensor Probe와 Four-Sensor Probe로 구분할 수 있다. Double-Sensor Probe는 기포의 형태를 구형으로 가정하여 기포의 개수와 한방향 속도를 측정하여 IAC를 얻는 방법으로서 확산유동장에서 매우 유용하고 실용적인 반면 기포의 형태가 구형을 벗어나는 다양한 유동장에의 적용은 제약이 따른다(Kataoka et al., 1986; Kataoka et al., 1990; Revankar et al., 1992; Kocamustafaogullari et al., 1994) 반면 Four-Sensor Conductivity Probe는 기포의 형태에 대한 가정을 사용하지 않고 IAC를 예측할 수 있다.(Tan et al., 1989; Ishii et al., 1991; Revankar et al., 1993) Four-Sensor Conductivity Probe법은 측정지점에서 계면의 공간적 세방향 속도와 센서끝의 방향벡터를 측정함으로서 국부적 IAC를 얻는다. 그러나, 프로브가 가지는 기본적 횡방향 크기로 인해 후방에 있는 세개중 하나 이상의 센서가 계면을 감지하지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 이러한 우회계면은 프로브가 기포의 횡방향 끝에 위치하는 경우 주로 발생하며 국부적인 위치에서 급격한 기울기를 가지는 계면을 예상할 수 있다. 시간평균 IAC 측면에서 급격한 기울기를 가지는 계면의 면적은 완만한 기울기를 가지는 그것에 비해 크기 때문에, 우회계면은 그 빈도수가 적더라도 적절히 고려되어야 한다. Four-Sensor Method는 그러한 계면에 대해 특정 수학적 관계식을 사용하여 보상하고는 있으나 여전히 계면의 정보부족으로 인한 한계를 가진다. 또한 Four-Sensor Method는 프로브의 크기에 대해 상대적으로 큰 기포에 대해서는 효과적인 IAC 데이터를 생산할 수 있지만 프로브에 대해 작거나 비슷한 크기를 가지는 기포에 대해서는 계면의 곡면에 따른 오차가 커질 수 있다. 본 연구에서 제안하는 Five-Sensor Conductivity Probe는 기본적으로 Four-Sensor Method에 기초하고 있으나 하나의 센서를 추가하여 그것의 성능을 개선하였다.

Five-Sensor Conductivity Probe는 중앙의 전방센서와 중앙의 후방센서, 그리고 원주방향으로 대칭적인 3개의 후방센서를 가진다. (그림 1) 기존의 Four-Sensor Probe와 비교할 때, Five Sensor Probe는 중앙의 후방센서로부터 하나의 계면속도성분을 추가적으로 얻을 수 있기 때문에 기포가 프로브를 지나는 다양한 우회기포의 경우에 대해서 효과적인 측정방법론을 도출 할 수 있다. 본

연구에서는 계면이 지나는 센서의 개수에 따라 계면을 크게 4범주로 구분하여 각각의 범주에 독립적인 수학적 관계식을 적용하였다. (Euh et al., 2001, 2002)

본 연구에서는 Five Sensor Conductivity Probe법에 의해 IAC 데이터를 생산하였다. 실험장치는 직경 8cm의 원통형 아크릴 테스트 섹션을 가지는 Air/Water Test Loop으로서 수직방향으로 IAC 및 기포율이 수직방향으로 전파되어 가는 현상을 보기 위해서 세 측정 지점을 선정하여 Impedance Void Meter(IVM) 및 Conductivity Probe를 설치하였다. 측정지점은 각각 L/D=12.2, 42.2, 100.7이다. 본 연구에서의 실험조건은 입구조건 기준으로 물의 겉보기속도는 0.47~2.81 m/s, 기체의 겉보기속도는 0.11~1.58m/s의 범위를 가지며 기포유동과 슬러그 유동에 해당한다. 향후 효과적인 이군 수송방정식의 모델링을 위하여 각 테스트 조건에서 IAC 및 기포율의 측정데이타는 기포의 크기에 따라 Cap/Slug 형 기포군과 작은 구형의 기포군으로 구분하여 생성되었다.

2. Five-Sensor Conductivity Probe Method

본 연구에서 사용하였던 Five-Sensor Conductivity Probe의 설계는 그림 1과 같다. 프로브는 중앙의 전방센서, 후방센서, 원주방향의 세개의 후방센서로 구성된다. 국부적인 측정위치는 중앙의 전방센서가 위치하는 지점으로 정의되고, Four-Sensor Conductivity Probe와 비교하여 중앙의 후방센서를 하나 추가함으로써 계면의 축방향 속도성분을 추가로 얻을 수 있다. 따라서 측정지점에서 계면의 4개의 속도성분을 얻을 수 있고, 이를 활용하면 기포가 센서를 지나는 다양한 경우에 대해서 효과적인 측정방법을 도출할 수 있다. 본 연구는 그림 2에 도시한 바와 같이 센서들을 지나는 계면의 경우를 크게 네개의 범주로 구분하여 각각의 범주의 계면에 대해서 독립적인 모델링을 수행하였다. 범주 I은 모든 5개의 센서를 계면이 지나는 경우이고 범주 II는 대칭적 위치에 있는 3개의 후방센서중 하나를 우회하는 경우, 범주 III은 3개의 후방센서중 2개를 우회하는 경우, 마지막으로 범주 IV는 중앙의 전후방 센서만 계면이 지나는 경우로 정의하였다. 여기서 범주 II와 III은 계면이 지나는 센서의 종류에 따라 다시 각각 3가지의 경우로 구분될 수 있다. 계면을 평면에 투영한 모양과 센서끝점간의 관계를 각 범주에 대해서 그림 2에 도식화하였다. 각 경우에 대한 구체적인 모델링 방법은 본 논문에서 생략하기로 한다. (Euh et al., 2001, 20002)

범주 I에 속하는 계면에 대해서는 중앙의 측정지점을 중심으로 삼각형 모양의 세개의 Sub-Cell을 고려하면 각 Sub-Cell 내에서 측정지점으로부터의 세방향의 계면속도를 독립적으로 얻을 수 있으므로 참조 Sub-Cell에서 독립적으로 얻은 세개의 IAC값을 Sub-Cell이 중앙 측정지점에 접하는 각도에 대해 가중평균취하여 대표값을 얻는다.

범주 II에 속하는 계면은 세개의 Sub-Cell중 하나에서는 Four-Sensor 법을 통해 IAC를 얻고, 나머지 셀에 대해서는 Four-Sensor 법에서 우회기포에 대해 제한적으로 적용하고 있는 관계식과 유사한 형태를 적용하였다. 여기서 우회기포에 대한 관계식은 급격한 기울기를 가정한 계면에 대해 적용할 수 있는 형태로서 평평한 형태의 계면이 측정되는 경우에는 세방향 속도성분을 얻을 수 있는 Sub-Cell에서의 값을 중앙의 측정지점을 대표하는 값으로 한다.

범주 III에 속하는 계면에 대해서는 아래와 같은 이론적 관계식을 측정가능한 물리량으로 근사하여 적용한다.

$$\bar{a}_i^t = \frac{1}{\Omega}\sum_j \frac{1}{|\vec{v}_{iz}|}\sqrt{1+\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} \qquad (2)$$

범주 IV의 경우는 기포의 크기가 작은 경우이므로 구형의 기포를 가정하여 Double-Sensor Probe Method를 적용하였다.

$$\bar{a}_i^t = 2N_t\left\{\sum_j \frac{1}{|v_j|}\Big/\sum_j\right\}\{I\} \qquad (3)$$

여기서 I는 기포의 요동성분에 대한 보상항으로서 아래식을 적용하였다.(Kim et al., 2000):

$$I = 2+\left(\frac{v_b'}{v_b}\right)^{2.25} . \qquad (4)$$

실제 실험상에서는 기포의 형태가 구형이라고 가정해도 무방한 작은 크기의 기포에 대해서는 범주 IV기포로 정의하여 편입시켰다. 구체적인 내용은 다음장에 기술하기로 한다. 전체 시간 평균 IAC는 모든 범주의 IAC를 합하여 얻는다.

3. 실험

3-1. 장치개요

본 실험장치는 공기/물 테스트 장치로서 크게 Conductivity Probe Spoolpiece와 Impedance Void Meter(IVM) Spoolpiece를 포함하는 주시험부, 기포발생기, 파이핑, DAS 계통으로 구분할 수 있다. 주시험부는 내경 0.08m 규격의 아크릴 파이프로 구성되어 있고, 약 10m의 전체높이를 가진다. 본 장치의 주시험부에는 이상유동속에서 국부적인 위치에서 기포속도, 기포율, 계면면적밀도를 측정하기 위한 Conductivity Probe Spoolpiece와 기포율을 측정하기 위한 IVM Spoolpiece가 짝으로 구성되어 있고, 이들 인자들의 공간적 전파특성을 측정하기 위해 주시험부 수직방향으로 세지점(L/D=12.2, 32.2, 100.7)에 설치하였다. Conductivity Probe의 교정은 IVM을 이용하여 얻어지는 기포율을 이용하여 이루어진다. 따라서 각각의 IVM은 Conductivity Probe Spoolpiece의 바로 하부에 설치하여 비슷한 높이에서 물리량을 측정하도록 하였다. 온도계는 주시험부 하부에 설치되어 측정용과 Test Section으로 진입하는 유체의 온도를 일정하게 유지시키기 위한 제어용으로 사용된다. 본 실험은 상온, 상압 조건에서 수행되었지만, 유체의 온도 변화로 인한 저항 변화영향을 최소화하기 위해서 유체의 온도를 일정하게 유지하도록 하였다. 본 장치에서는 테스트 섹션 전단에 위치하고 있는 예비 히터(Preheater)와 저장탱크 내부에 열교환튜브가 테스트섹션 입구의 온도정보를 받아서 열조절을 하도록 하였다. 압력은 첫번째 Conductivity Probe가 삽입되는 높이에 정압계를 연결하여 측정하고, 상부의 두개의 Conductivity Probe 삽입위치에 각각 차압계를 연결하여 측정된 차압값과 하부의 정압값을 이용하여 각 위치에서의 압력을 측정한다. 본 장치의 설계는 그림 3과 같다. 테스트섹션의 압력은 입구조건 기준으로 2 bar 및 30°C조건을 유지하면서 운전하였다. 주시험대를 흐르는 기포는 주시험대 하부의 기포발생기로부터 생성되며, 기포발생기의 대략적인 구조는 그림 4와 같다. 기포발생기 중앙부는 상부의 주시험대와 연속적으로 이어지는 관의 형태를 가지며 이곳을 통하여 Main Water Flow가 형성되게 되며, 일부 Water Flow가 주 시험대 전단의 급수 배관으로부터 분기하여 기포발생기 측면에서

기체유동과 섞여 노즐을 통해 주 시험대로 흐른다. 여기서 기포발생기 내부 관벽의 노즐의 크기와 측면의 Water유동과 Air 유동이 섞이면서 발생하는 Turbulence의 정도에 의해 기포의 크기가 결정 된다. 따라서 본 기포발생기는 주 시험대 내의 유속 및 유량을 변화하지 않은 상태에서 기포의 크기를 조절할 수 있는 장점을 가진다. Water Flow의 전체유량은 Coriolis Meter를 이용하여 측정하며 주 급수배관으로부터 분기하여 기포발생기의 측면으로 주입되는 물 우회유량은 두 개의 Rotameter를 이용하여 측정한다. 그림 5는 Conductivity Probe Spoolpiece를 보여주고 있다. 이 Spoolpiece에는 Conductivity Probe를 삽입, 이송 및 실링을 위한 부대장치 및 부품을 포함한다. Conductivity Probe는 Spoolpiece측면으로부터 삽입되어 이송장치를 통해 채널내 원하는 국부적 위치로 이송하게 되며 1/100 mm 정확성을 가진다. DAS는 크게 Signal Conditioner와 A/D 보드, PC로 구성된다. 압력, 온도, 유량, IVM 신호는 하나의 A/D 보드로 처리를 하고 3개의 Conductivity Probe로부터 얻어지는 15 신호(5 Sensor X 3EA)는 두개의 동시샘플링 A/D board를 이용하여 받는다. 각 보드는 IBM Pentium MMX 233 MHz 산업용 컴퓨터를 이용하여 신호처리를 수행하였다. 정상상태 실험이기 때문에 압력, 온도, 유량등의 유동인자들을 측정하기 위한 A/D보드는 1 kHz의 속도로 데이타를 처리하고, Conductivity Probe로부터의 신호를 처리하기 위한 두 개의 A/D보드는 짧은 거리차이를 두고 있는 센서 끝점들로부터의 신호의 시간차이를 정밀하게 측정하여야 하기 때문에 20 kHz의 샘플링 속도로 15개의 모든 신호들을 동시에 받도록 하였다.

3-2 Five-Sensor Conductivity Probe 및 신호처리

본 연구에서 사용된 Conductivity Probe는 5개의 센서를 포함하고 있으며 전방의 기준역할을 하는 하나의 센서와 후방의 네개의 센서로 구성되어 있다. 그림 6은 Five Sensor Conductivity Probe의 사진이다. 각 센서는 테프론으로 피복된 직경 0.07mm의 스테인레스 선이 외경 0.5mm의 스테인레스 스틸관에 삽입된 후 에폭시로 절연 및 고정하여 그림 1과 같이 정렬된다. Conductivity Probe법에 의해 얻어지는 전압신호는 이상적인 경우 사각파형을 형성하게 되지만 실제로는 회로의 특성뿐 아니라, 계면이 센서를 지날 때, 센서에 존재하는 잔여액체의 Wetting현상때분에 사각형태의 신호파형을 벗어나게 된다. 따라서 Conductivity Probe를 이용하여 상의 구분을 하기 위해서는 적절한 임계전압(Threshold Voltage)를 설정하여 액상과 기상의 경계를 결정하여야 한다. 임계전압은 각각의 기포에 의해 생성되는 파형의 높이를 고려하여 달리 적용이 되며 아래와 같은 식에 의해 결정된다.

$$V_T = S(V_{peak} - V_L) + V_L \tag{5}$$

여기서 V_{peak}와 V_L은 각각 하나의 기포에 의해 생성되는 최대 전압과 액상의 평균 전압을 의미한다. 경우에 따라서 두개이상의 기포가 순간적으로 센서와 접촉함으로써 임계전압위에서 다중 극대치를 가지는 파형이 형성될 수 있으며 이러한 파형은 파형의 기울기 조건 및 극소점에 대한 판단기준에 의해 각기 다른 기포로 정의된다. 본 방법론은 센서에 인가되는 전압변화 및 여타 외적요인에 의해 파형의 높이가 변화되어도 효과적인 상분리를 할 수 있다는 장점을 가진다. 본 연구에서는 상기 기술한 여러가지의 판단기준을 반영한 소프트웨어를 사용하여 상분리를 수행하였다. (Yun et al(1996)) Cutoff Value, S는 IVM로부터 얻어진

기포율을 통하여 결정하였다. 유로내의 국부적 위치에서 기포율은 전체 측정시간 대비 기포가 센서에 잔류하는 시간으로 정의할 수 있다. 다중센서 프로브에서 기포율은 센서중 하나의 신호를 이용하여 얻을 수 있고, 본 연구에서는 중앙의 전방센서에서의 데이터를 활용하였다.

$$\alpha = \frac{\sum Gas\ Count}{Total\ \ Sample\ \ Number} \tag{6}$$

각 센서를 지나는 계면은 동일한 계면이어야 하고, 이에 대한 판단을 해주어야 한다. 이러한 과정은 중앙의 전방센서 신호를 기준으로 각각의 4개의 센서 신호에 대해 독립적으로 행해진다. Five-Sensor Probe는 횡방향으로 공간을 차지하고 있기 때문에 중앙의 전방센서로부터 얻어지는 기포의 크기, 즉 기포의 센서에 잔류시간이 후방센서의 그것과 비교하여 작은 기포에 대해서는 큰 차이를 보일 수 있기 때문에 일률적으로 기포의 크기 비교만으로는 효과적인 동일계면정의를 하기가 어렵다. 본 연구에서 적용한 판단기준은 다음과 같다. 동일계면 판단은 Rectangulization을 수행한 이후의 변조된 신호에 대해 수행한다.

i) 전방센서에서 기포신호가 발생한 시점을 전후로 후방센서로부터도 기포가 감지되는 시점을 두 곳을 차례로 선정하여 전-후방 센서에서의 기포신호 시작점 이후의 신호가 잘 겹쳐지는지 체크한다. G(i)함수를 아래와 같이 정의하면

G(i): f(i_begin+i)= f(j_begin+i) 이면 1
f(i_begin+i)≠f(j_begin+i) 이면 0

$$cross = \frac{\sum_{i=0}^{N} G(i)}{N} \tag{7}$$

이 식을 통하여 얻어진 두개의 cross 값중 최대값을 가지는 j_begin을 찾는다. 여기서 함수 f는 사각파로 변조된 신호함수이고, i_begin과 j_begin은 각각 전 후방센서에서 기포신호가 시작하는 count number를 의미한다.

ii) 두 센서를 지나는 기포의 크기가 비슷해야 한다.

$$\left| \frac{\tau_{bi} - \tau_{bj}}{\tau_{bi}} \right| < \varepsilon_1 \tag{8}$$

iii) 전방센서를 지난 이후 후방센서에서 기포신호가 발생하는 시간이 기포의 평균속도에 비해 지나치게 커서는 안된다. 이 경우는 같은 계면이라고 보기 어렵다.

$$\frac{\Delta s}{\Delta t} < k\bar{v}_i \tag{9}$$

iv) 후방센서의 신호들중 기포가 후방의 4개의 센서중 하나 이상을 완전히 통과한 이후의 시간에 기포를 감지하기 시작하는 센서신호는 같은 계면의 것이라고 보기 어렵다. 이 경우 계면이 해당 센서를 우회하는 것으로 정의한다.

유동조건에 따라 유로를 흐르는 기포들은 다양한 형태 및 크기를 가진다. 형태로 구분을 하면 구형과 변형구형, Cap형, 슬러그기포들이 그것이다. 본 연구에서는 이군 수송방정식으로 계면면적밀도를 분석하고자 하기 때문에 그 목적에 맞추어 기포들을 크게 두개의 군으로 구분하였고, 각 군이 포함하는 기포의 형태는 다음과 같다.

1 군: Spherical, Distorted Bubble

2 군: Cap, Slug bubble

이상의 구분은 기포의 형태를 기준으로 구분되고 있으나, 기포의 형태는 기포의 크기와 연관되어 있다. 각 군으로 구분하기 위한 기포의 크기는 Bubble Chordal Length에 준하여 얻는다. 각 군의 경계가 되는 기포의 크기는 Spherical/Distorted 기포와 Cap/Slug형 기포의 경계점으로 정의하였고, Clift et al(1978)의 모델에 따라 Eo=40으로 설정하였다. 본 실험조건 (2 bar, 30^{o}C)에서 이에 해당하는 기포의 크기는 17.08mm이다.

이상의 과정을 통해 동일계면인식작업이 이루어진후 중앙의 전방센서로부터 각 방향으로의 속도를 계산하고, 계면이 지나는 센서를 판단하여 앞서정의한 4개의 범주중 하나를 결정한다. 범주 I, II, III로 분류되는 계면에 대해서는 앞서 소개한 방법론을 그대로 적용하였고, 범주 IV에 대해서는 실제 유동조건을 고려하여 다소 수정한 모델을 적용하였다. 크기가 특정값보다 작은 기포는 구형으로 가정할 수 있다. 구형의 형태를 가정할 수 있는 크기의 기포에 대해서는 Double Probe법에 의해 효과적으로 계면면적밀도를 측정할 수 있다. 따라서 기포의 크기가 특정값이하인 경우는 Double-Sensor 방법론을 적용하였다. 구형 기포로 존재할 수 있는 최대 기포크기는 Ishii(1977)에 의한 모델을 적용하였으며, 본 실험조건인 2bar의 30^{o}C에서 상기 모델이 예측하는 최대 구형 기포크기는 1.86mm이다. 이 모델에 따라 본 연구에서는 기포의 Chordal Length가 D_{ds}보다 작은 기포는 구형이라는 가정하에 범주 IV에 편입시켰다. 한 계면에 대한 범주가 결정이 되면 앞서 소개한 방법론을 적용하여 계면면적밀도를 구한다.

실제유동조건에서는 계면이 전방센서를 먼저 접촉하기 이전에 후방센서를 지나는 경우가 발생할 수 있다. 이것은 기포가 순수한 축방향 운동을 하는 경우에는 발생가능성이 희박하지만, 실제 유동상황에서는 기포들이 어느정도의 횡방향 운동을 하기 때문에 이러한 계면이 발생하게 된다. 이 경우 측정지점, 즉, 중앙의 전방센서의 끝점으로부터 각 센서방향으로의 계면의 속도가 역방향으로 걸리게 되어 계면면적밀도계산을 하기가 어렵다. 이러한 계면을 Non Effective 계면으로 정의하여 앞의 우회기포들과 구분하기로 한다. Non-Effective 계면의 IAC를 얻어내는 과정은 가정을 사용하여 여러가지의 분석방법론이 있을 수 있겠지만, 본 연구에서는 Non-Effective 계면의 계면면적밀도는 평균 Effective 계면면적밀도로 가정하여 처리하였고, 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{a}_i = \left(\bar{a}_i\right)_{eff,front} \frac{N_{\mathrm{detect}}}{N_{\mathrm{eff,front}}} + \left(\bar{a}_i\right)_{eff,rear} \frac{N_{\mathrm{detect}}}{N_{\mathrm{eff,rear}}} \tag{10}$$

4. 결과

Five-Sensor Conductivity Probe의 적용성을 분석하기 위해서 가상적인 유동조건을 설정하여 수치모의한 결과를 그림 7에 제시하였다. 본 분석에서는 각 경우에 대해 기포의 형태를 고정하였고, 정체유동, 기포의 운동은 순수 수직운동을 고려하였다. 그림에서 보듯이 Five-Sensor Method가 Four-Sensor Method에 비해 좋은 결과를 보이고 있음을 알수 있다. 이 결과는 실제유동조건과 차이가 있을 수는 있으나 IAC측정방법론의 고유한 특성을 보기위한 예비계산의 의미를 가진다.

계면면적수송방정식을 이용한 IAC 해석 방법론을 개발하기 위하여 본 연구에서 생산한 실험데이타에 대한 분석을 수행하였다. 그림 8에 실험조건을 Flow Regime Map상에 도시하였다. 이 그림을 보면 모든 테스트 경우에 대해서 유동이 상부로 진행되면서 슬러그 유동방향으로 유동패턴이 천이하고 있음을 보여주고 있다.

낮은 압력을 가지는 상부지점에서는 기상의 밀도가 하부의 그것에 비해 작고, 이로 인해 기상의 겉보기 속도가 커지게 되는 반면, 액상의 경우 밀도값이 주 시험대에서 거의 일정한 값을 가지므로 액상의 겉보기 속도는 상부와 하부가 거의 일정한 값을 가진다. 따라서 주 시험대에서의 유동패턴은 상부로 진행하면서 Flow Regime Map상에서 오른쪽으로 향하는 결과를 얻게 된다.

비교적 잘 알려져 있는 모델들을 이용하여 압력, 기포율, 그리고 기포속도 데이터에 대한 분석을 수행하였다. 그림 9는 각각의 인자들의 결과이다. 압력은 Lockhart and Martinelli 관계식(1949)을 적용하였고, 실험데이타와 3.76% 오차범위내에서 일치하였다. 기포율은 Drift Flux Model을 이용한 해석 결과와 비교를 수행하였다. 본 계산에는 Taitel et al(1980)이 구분한 유동장 기준으로 기포유동 및 Fine Dispersed Flow Regime에서는 Wallis(1969)가 제시한 모델을 적용하였고, 슬러그 유동영역에서는 Zuber상관식을 적용하였다. 그림 9(b)에 실험데이타와 비교결과를 제시하였고, 그 오차는 8.5%이다. 그림 9(c)는 기체유량계에 의해 예측된 기포의 속도와 Conductivity Probe의 중앙의 전-후방 센서를 통하여 얻어진 속도의 비교결과로서 11.8%의 오차를 가진다. 여기서 Conductivity Probe에 의한 기포의 속도 측정값은 기포의 frequency에 가중취한 값을 의미한다. 이상과 같이 유동인자에 대한 측정값은 예측모델과 잘 일치하는 결과를 보이고 있다.

Conductivity Probe에 의해 측정된 기포율과 IAC의 오차분석결과는 표 2에 간략히 정리하였다. 오차인자는 크게 Bias Error와 우연오차로 구분하였고, Bias Error는 세가지의 세부인자를 정의하였다. 일부 정량화하기 힘든 인자는 참고문헌을 활용하여 가정하였다.

단열조건의 수직유로에서 유동이 진행하면서 기포율 및 IAC 변화는 시스템의 압력강하와 입자들의 동적인 상호반응에 의해 영향을 받는다. 압력강하는 기포율과 IAC 및 기포의 크기를 증가시키는 요인으로 작용한다. IAC에 영향을 주는 기포의 상호반응은 크게 Breakup과 Coalescence반응이며, 각각은 서로 상반되는 결과를 야기한다. Breakup반응은 기포의 평균 크기를 줄이는 동시에 개수를 늘리기 때문에 IAC를 증가시킨다. 반면에 Coalescence반응은 기포의 크기를 증가시키는 반면 IAC를 감소시킨다. 이러한 입자의 상호반응은 평균 기포율에 직접적인 영향을 주지는 않으나 만약 기포를 두개의 군으로 구분하여 각 군에 대한 분석을 하게 되면 이러한 기포들의 상호반응이 각 군의 기포율에 대해서 중요한 영향을 미친다. 예를들어 작은 기포가 큰 기포에 흡수되는 Wake-Entrainment 현상이 주요한 메커니즘이면, 큰 기포군(2군)의 기포율은 증가하는 반면 작은 기포군(1군)의 그것은 줄어들게 된다. 이러한 영향을 고려하여 실험 set중 대표적인 두개의 경우에 대한 분석을 기술하였다.

Case 08은 작은 기포들만 존재하는 유동조건이다. 기포율은 압력강하의 영향으로 유동이 진행하면서 증가한다. 기포율분포를 보면 하부에서 Wall Peaking현상이 발생하고 상부로 진행하면서 균일한 분포를 보이고 있다. 이는 기포유동의 고유한 특성일 수 있으나 공기가 채널의 벽면으로부터 주입이 되는 본 장치의 특성으로 인해 발생하는 현상일 것으로 판단된다. IAC의 평균값은 상부와 하부가 비슷한 값을 가진다. 따라서 압력강하와 Breakup에 의한 IAC상승 요인과 Coalescence에 의한 IAC감소 요인이 균형을 이루고 있다고 할 수 있다.

Case 05는 Cap Bubble과 작은 구형의 기포들이 섞여 흐르는 슬러그 유동이다. 각 군의 기포인자들의 결과는 그림 11과 같다. 기포율 데이터를 보면 1-2구간에서는

작은 기포군의 기포율이 급증하고 있고, 2-3구간에서는 큰 기포군의 기포율이 상대적으로 큰 증가현상을 보이고 있다. 이는 주 시험부 하부에서는 큰 기포의 Breakup에 의한 작은 기포의 생성현상이 상부에서는 Wake Entrainment현상이 주요한 현상임을 의미한다. 그런데 특이한 사항은 2-3구간에서 작은 기포의 IAC가 계속 증가하는 경향을 보이면서 기포의 크기는 더욱 작아지고 있다. 이러한 경향은 작은 기포군의 Breakup현상 혹은 큰 기포로부터 Breakup되어 생성되는 작은 기포의 크기가 작은 경우 나타날 수 있는 현상으로서 대부분의 이군 유동조건에서 비슷하게 나타나고 있다. 이러한 각 메커니즘에 대한 독립적인 분석은 추후 다양한 실험데이타를 통하여 규명해야 할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 IAC해석 모델 개발을 위한 IAC 실험데이타 생산을 주 내용으로 하고 있으며 공기/물 유동조건하에서 Five-Sensor Conductivity Probe법을 적용하였다. 각 기포 데이터는 기포크기에 따라 두개의 군으로 구분하여 생산되었기 때문에 이군 계면면적수송방정식을 개발하는데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 아울러 유동이 진행되어 가면서 기포율과 IAC의 수송현상을 정성적으로 고찰하였다. IAC는 압력변화와 Breakup, Coalescence등의 기포의 동적거동 및 기타 시스템적 영향에 의해 복합적으로 영향을 받기 때문에 각 메커니즘에 대한 독립적인 영향을 보기는 어려웠으나 개괄적인 현상에 대한 분석을 수행하였다. 향후 보다 많은 실험을 통하여 각 메커니즘에 대한 정성적 혹은 정량적 연구가 필요할 것으로 판단된다.

REFERENCES

D.J. Euh, B.J. Yun, C.H. Song, T.S. Kwon, M.K. Chung, U.C. Lee, “Development of the Five Sensor Conductivity Probe Method for the Measurement of Interfacial Area Concentration”, Nuclear Eng. Des., pp. 35-51, 2001

D.J. Euh, A Study on the Measurement Method and Mechanistic Prediction Model for the Interfacial Area Concentration, Ph. D Thesis, Seoul Univ., 2002

I. Kataoka, M. Ishii, and A. Serizawa., “Local Formulation of Interfacial Area Concentration,” Int. J. Multiphase Flow, 12, pp. 505-529, 1986.

I. Kataoka and A. Serizawa, “Interfacial Area Concentration in Bubbly Flow,” Nucl. Eng. Design, 120, 163-180, 1990

T. Hibiki, M. Ishii, “Two-Group Interfacial Area Transport Equations at Bubbly-to-Slug Flow Transition,” Nuclear Engineering and Design, Vol. 202, pp. 39-76, 2000

M.Ishii, Thermo-fluid Dynamic Theory of Two-Phase Flow, Eyrolles, Paris, New York, 1975

M.Ishii, One Dimensional Drift Flux Model and Constitutive Equations for Relative Motion Between Phases in Various Two Phase Flow Regimes, Argonne National Laboratory Report, ANS-77-47, 1977

M. Ishii, S. T. Revankar, Measurement of Interfacial Area Using Four Sensor Probe in Two Phase Flow, DOE/ER/14147, July, 1991

M. Ishii, S. Kim, “Micro Four Sensor Probe Measurement of Interfacial Area Transport for Bubbly Flow in Round Tubes,” Nuclear Eng. Des., pp. 123-131, 2001

G., Kocamustafaogullari, W. D. Huang, and J. Razi, "Measurement and Modeling of Average Void Fraction, Bubble Size and Interfacial Area," Nucl. Eng. Des. 120, pp. 163-180, 1994

J.M. Le Corre, E.Hervieu, M.Ishii, J.M.Delhaye, "Benchmarking and Improvements of Measurement Techniques for Local Time-Averaged Two-Phase Flow Parameters," ICMF 2001, New Orleans, 2001

S.T. Revankar and M. Ishii, "Local Interfacial Area Measurement in Bubbly Flow," Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 35, No. 4, pp. 913-925, 1992

S.T. Revankar and M. Ishii, "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

M.J. Tan and M. Ishii, Interfacial Area Measurement Methods, ANL-89/5, Feb., 1989

B.J. Yun, Measurement of Two-Phase Flow Parameters in the Subcooled Boiling, Ph. D. Thesis, Seoul National University, Korea, 1996

표 1. 유동인자 정리

Case No.	j_f m/s	$j_g(1)$ m/s	$j_g(2)$ m/s	$j_g(3)$ m/s	P(1) 10^5Pa	P(2) 10^5Pa	P(3) 10^5Pa	α(1) %	α(2) %	α(3) %	Liquid Flow kg/s	Gas Flow g/s	Temp °C
01	1.36	0.113	0.117	0.142	2.13	1.92	1.46	5.86	6.88	8.52	6.81	1.19	30.7
02	1.21	0.304	0.373	0.453	2.01	1.81	1.42	14.7	16.8	20.7	6.06	3.54	31.0
03	1.02	0.195	0.230	0.277	2.02	1.81	1.41	11.3	12.6	15.5	5.13	2.20	31.1
04	2.01	0.308	0.366	0.454	2.09	1.87	1.45	9.9	11.5	14.8	10.1	3.68	31.1
05	0.99	0.410	0.560	0.686	1.99	1.80	1.46	20.5	24.9	29.3	4.94	4.81	31.0
06	2.67	0.214	0.249	0.372	2.10	1.86	1.40	5.46	6.38	9.33	13.4	2.77	31.1
07	0.47	0.122	0.149	0.187	1.94	1.72	1.27	13.6	14.3	16.1	2.35	1.16	31.0
08	0.75	0.136	0.151	0.189	2.01	1.79	1.32	11.2	12.1	14.9	3.76	1.28	30.8
09	0.57	0.259	0.330	0.400	2.15	1.95	1.54	17.9	21.0	25.2	2.84	2.93	30.7
10	2.87	1.85	2.16	2.77	1.92	1.71	1.28	34.6	38.9	45.2	14.1	20.7	30.7

표 2. 불확실도 인자

Errors		기포율 (%)	IAC (%)
Bias error	Distance Between Sensor Tips		0.5
	Channel Averaging	3.0	3.0
	Acq&Threshold Effect (Le Corre, 2001)	10.0 (가정)	10.0 (가정)
Random Error		1.83~11.0	3.2~12.2
Total Uncertainty		10.6~15.2	10.9~16.1

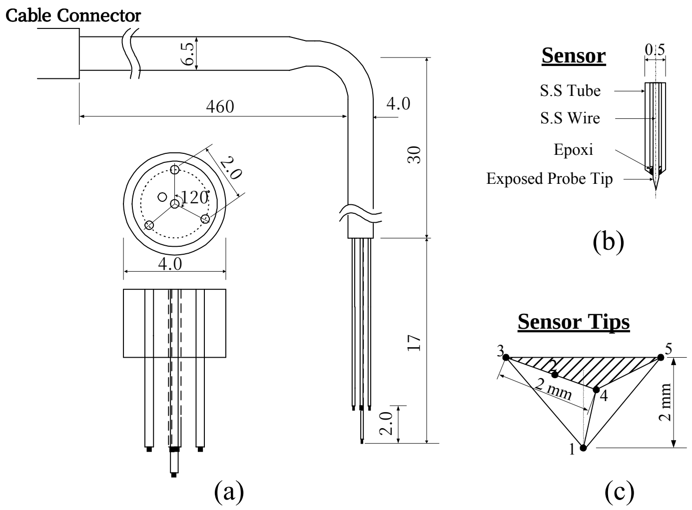


그림 1. Five-Sensor Conductivity Probe 설계사양

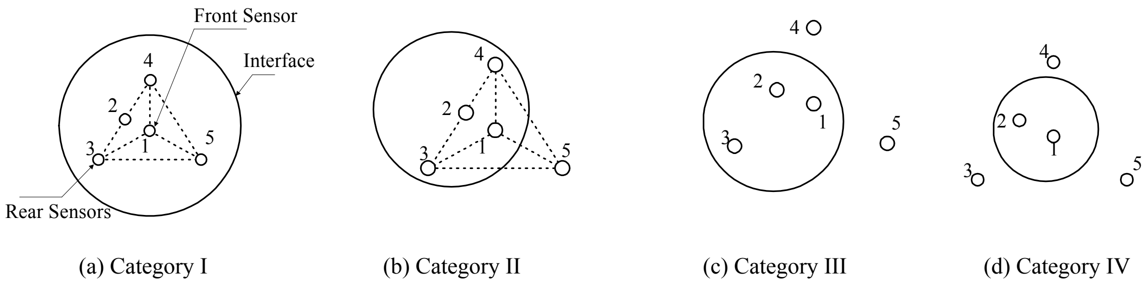


그림 2. 각 Category계면의 정의

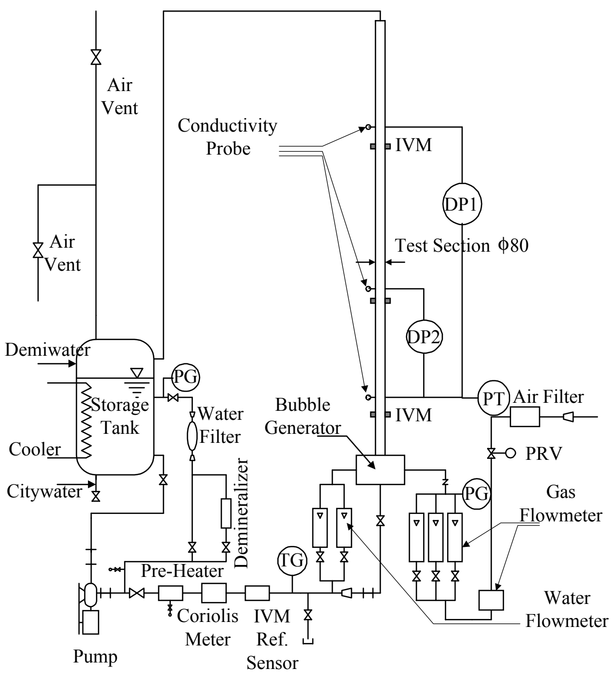


그림 3. 실험장치 설계

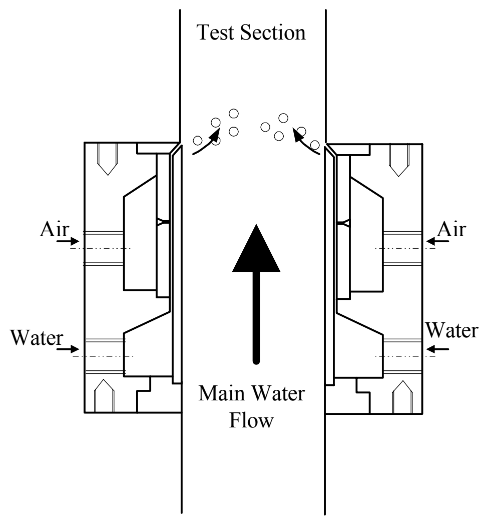


그림 4. 기포발생기

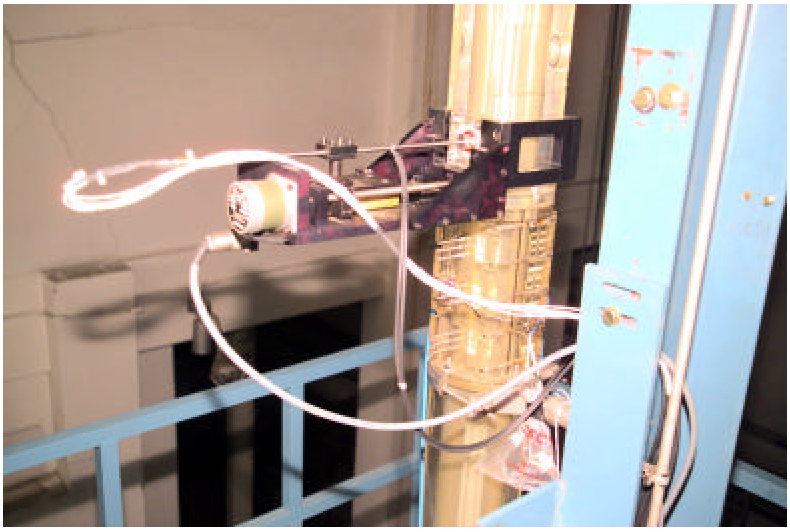


그림 5. Conductivity Probe Spoolpiece

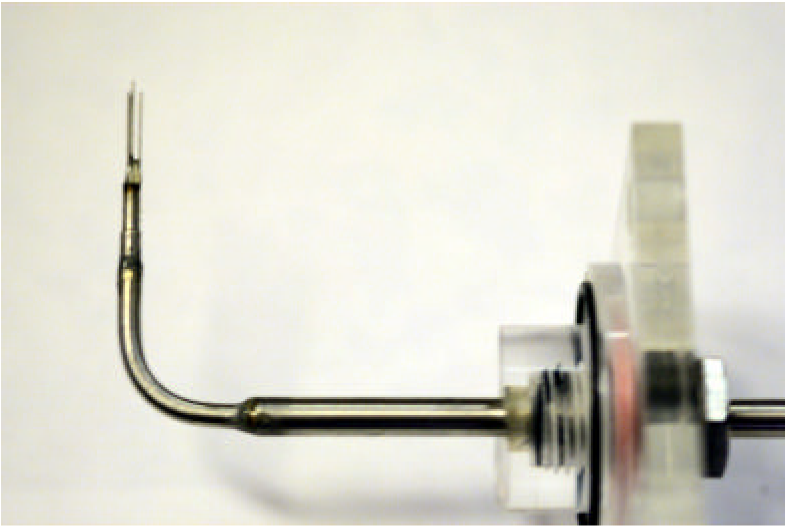
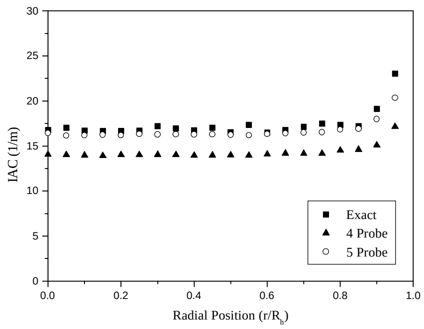
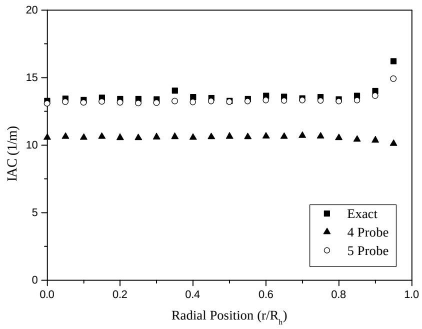


그림 6. Five-Sensor Conductivity Probe



(a) Spherical Bubble



(b) Cap Bubble

그림 7. 구형기포 및 Cap Bubble 에 대한 수치모의결과(수직기포운동조건)

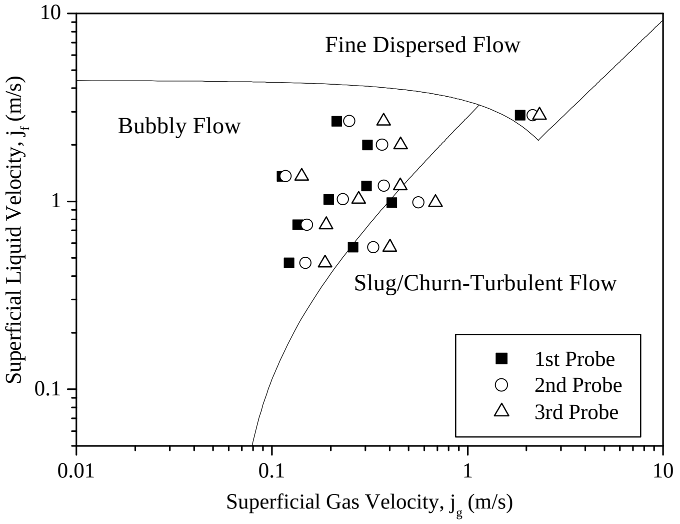
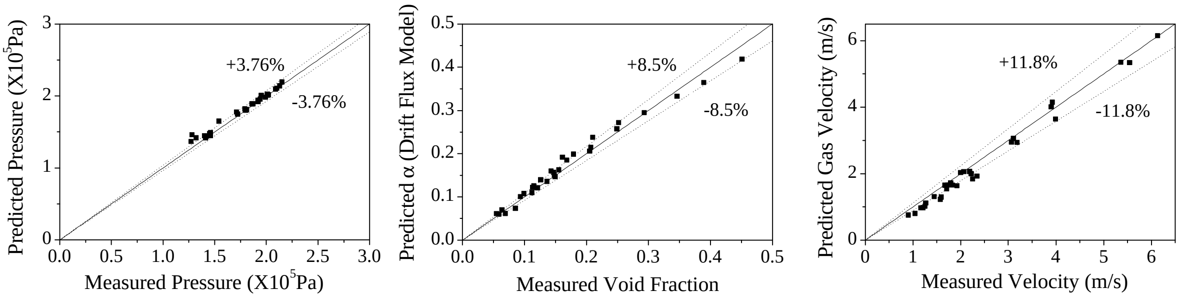
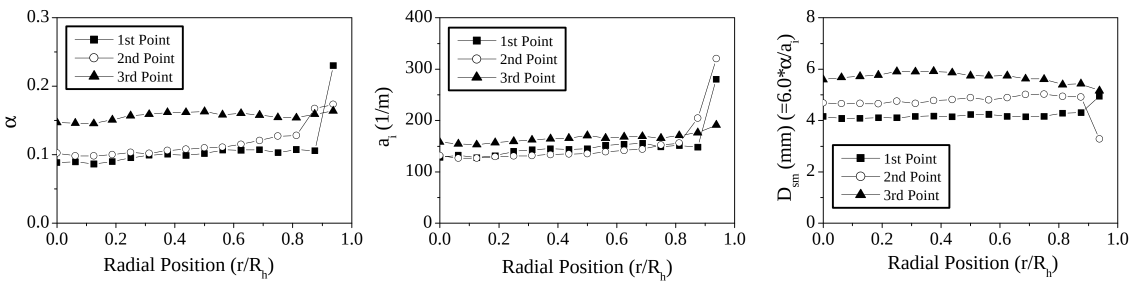


그림 8. 실험조건



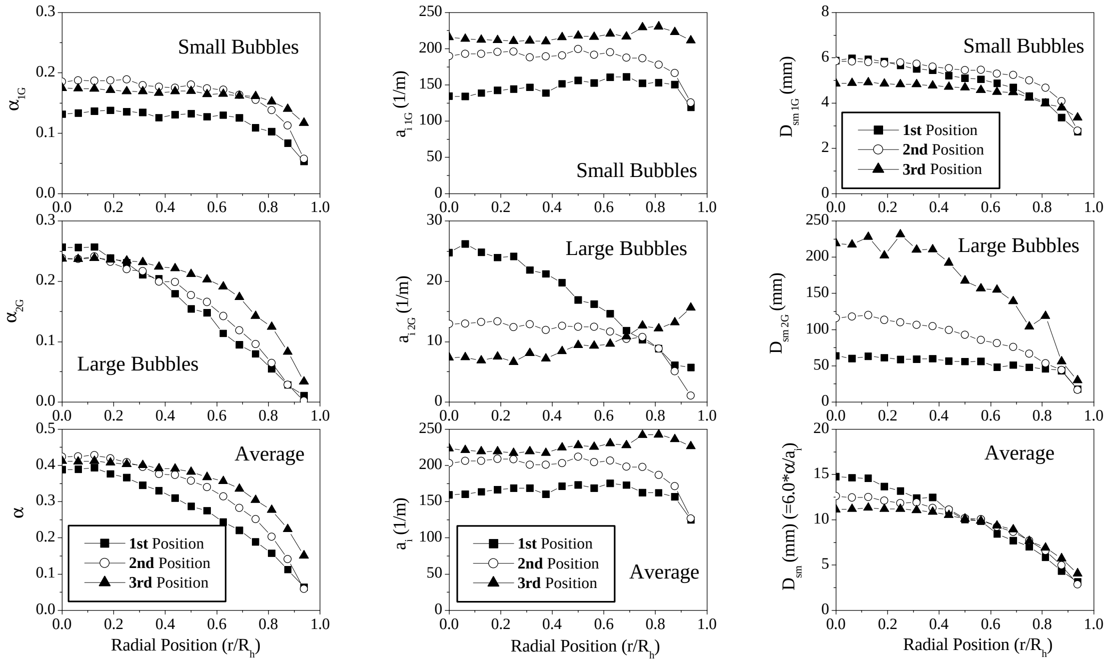
(a) (b) (c)

그림 9. 유동인자의 측정값과 예측모델의 비교



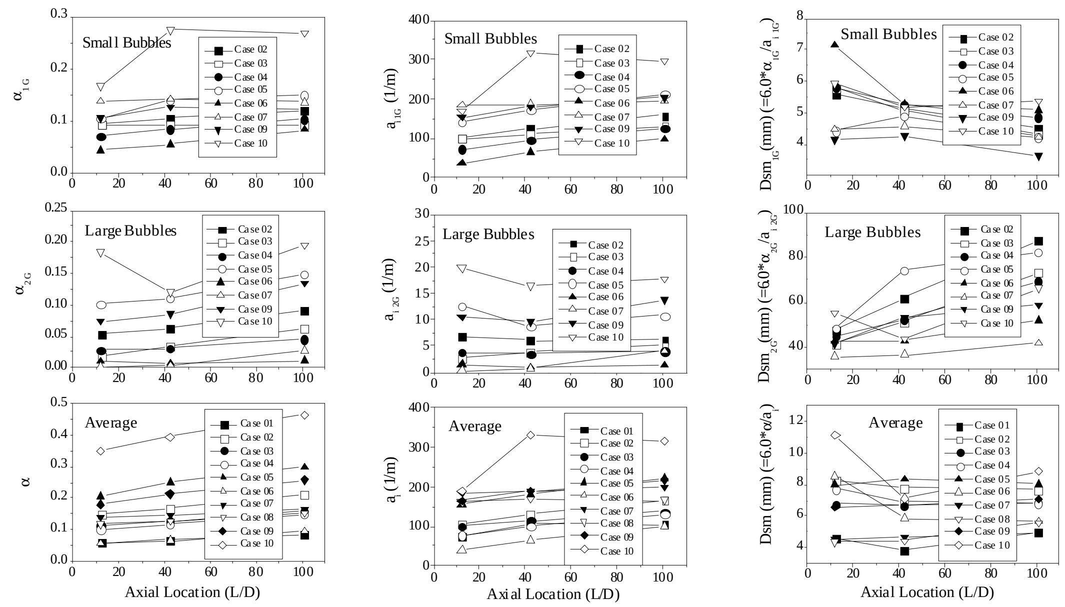
(a) Void Fraction (b) Interfacial Area Concentraton (c) Sauter Mean Diameter

그림 10. Case 08 (j_{go}=0.127, j_f=0.75, α_0=10.5%)



(a) Void Fraction (b) Interfacial Area Concentration (c) Sauter Mean Diameter

그림 11. Case 05 (j_{go}=0.417, j_f=0.99, α_0=19.9%)



(a) Void Fraction (b) Interfacial Area Concentration (c) Sauter Mean Diameter

그림 12. **유로단면적평균 기포측정인자**