



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

수평유로에서 분산 기포 유동의  
국부적 계면 구조 특성에 대한  
실험적 연구



濟州大學校 大學院

에너지 工學科

金 熙 哲

2006 年 12 月

수평유로에서 분산 기포 유동의  
국부적 계면 구조 특성에 대한  
실험적 연구

指導教授 金 信

金 熙 哲

이 論文을 에너지 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2006年 12月

金熙哲의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 鄭 鈺 津 印

委 員 金 信 印

委 員 宋 哲 和 印

濟州大學校 大學院

2006年 12月

An Experimental Study on the Interfacial  
Structure Characteristics of Dispersed Bubbly  
Flow in a Horizontal Channel

Hee-chul Kim

(Supervised by Professor Sin Kim)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement  
for the degree of Master of Science

2006. 10.

This thesis has been examined and approved.

.....  
Thesis director, Sin Kim, Prof. of Nuclear and Energy Engineering

.....  
.....  
.....

.....  
Date

Department of Nuclear & Energy Engineering  
GRADUATE SCHOOL  
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

# 목 차

LIST OF FIGURES .....	iii
LIST OF TABLES .....	vi
SUMMARY .....	vii
I. 서론 .....	1
1. 연구 배경 .....	1
2. 연구현황 분석 .....	3
3. 연구 목적 .....	7
II. 이론적 배경 .....	8
1. 기포 유동 .....	8
2. 계면구조의 매개 변수 .....	8
III. 실험 장치 .....	12
1. 시험대 .....	12
2. 주순환계통 .....	12
(1) 저장조 .....	12
(2) 주입펌프 .....	13
(3) 물 저장 탱크 .....	13
(4) 물 공급 배관 .....	13
3. 공기공급계통 .....	14
(1) 압축기 .....	14
(2) 공기 블로워 .....	14

(3) 공기 공급 배관 .....	14
4. 계측 및 제어 계통 .....	15
IV. 실험 방법 및 조건 .....	22
1. 측정 방법 .....	22
(1) 초음파 센서를 이용한 수평관 2상유동 판별기법 .....	22
1) 측정원리 .....	22
2) 측정장치 및 신호처리 .....	24
(2) 2-센서 프로브 측정원리 .....	24
1) 측정원리 .....	24
2) 측정장치 및 신호처리 .....	25
2. 실험 조건 및 범위 .....	27
V. 결과 및 토의 .....	34
1. 초음파센서를 이용한 수평관 2상유동 판별기법에 대한 결과 .....	34
2. 일반적인 상 분포 특성 .....	41
3. 국소적 기포율 분포특성 변화 .....	53
4. 기포 통과주기 분포특성 변화 .....	54
5. 국소적 계면면적밀도 분포특성 변화 .....	55
6. 기포크기 분포특성 변화 .....	56
7. 기포 속도 분포특성 변화 .....	56
VI. 결론 .....	63
참고문헌 .....	65

## LIST OF FIGURES

Fig. 2-1(a) A Bubbly flow in a Vertical Flow .....	11
Fig. 2-1(b) A Bubbly flow in a Horizontal Flow .....	11
Fig. 2-2 The Definition of an Angle and a Vector on the Interface .....	11
Fig. 3-1 The Diagram of Horizontal Two-phase Experimental Apparatus ·	17
Fig. 3-2 The Sketch of Overall Experimental Apparatus .....	18
Fig. 3-3 The Sketch of Test Section Unit .....	19
Fig. 3-4 The Diagram of Reservoir .....	20
Fig. 3-5 The Connection of Thermocouples .....	21
Fig. 3-6 The Connection of Flowmeter Transmitter .....	21
Fig. 3-7 The Connection of Pressure Transmitter .....	21
Fig. 4-1 The Composition of The Ultrasonic Measurement Apparatus ···	29
Fig. 4-2 The Design of Two-Sensor Conductivity Probe .....	29
Fig. 4-3 The Diagram of Data Flowchart .....	30
Fig. 4-4 The Bridge circuit for Two-sensor Conductivity Probe .....	30
Fig. 4-5 A Signal Output of Two-sensor Conductivity Probe .....	31
Fig. 4-6 Raw Data of Two-sensor Conductivity Probe at the Horizontal Pipe .....	31
Fig. 4-7 The Rectangularization of a Modified Data .....	32
Fig. 4-8 The Flow Condition of Experiment 1 on the Horizontal Flow Regime .....	32
Fig. 4-9 The Flow Condition of Experiment 2 on the Horizontal Flow Regime .....	33
Fig. 4-10 The Position of Probe .....	33
Fig. 5-1 A Plug Flow on the Upper Test Section at $j_g=0.9\text{m/s}$ , $j_f=0.3\text{m/s}$ by Using Ultrasonic Sensor .....	36
Fig. 5-2 A Plug Flow on the Lower Test Section at $j_g=0.9\text{m/s}$ , $j_f=0.3\text{m/s}$ by Using Ultrasonic Sensor .....	36
Fig. 5-3 A Slug Flow on the Upper Test Section at $j_g=4.3\text{m/s}$ , $j_f=1.0\text{m/s}$ by Using Ultrasonic Sensor .....	37
Fig. 5-4 A Slug Flow on the Lower Test Section at $j_g=4.3\text{m/s}$ , $j_f=1.0\text{m/s}$ by Using Ultrasonic Sensor .....	37
Fig. 5-6 A Bubbly Flow on the Upper Test Section at $j_g=0.9\text{m/s}$ , $j_f=5.4\text{m/s}$ by Using Ultrasonic Sensor .....	38

Fig. 5-6 A Bubbly Flow on the Lower Test Section at $j_g=0.9\text{m/s}$ , $j_f=5.4\text{m/s}$ by Using Ultrasonic Sensor .....	38
Fig. 5-7 A Bubbly Flow on the Upper Test Section at $j_g=4.5\text{m/s}$ , $j_f=5.3\text{m/s}$ by Using Ultrasonic Sensor .....	39
Fig. 5-8 A Bubbly Flow on the Lower Test Section at $j_g=4.5\text{m/s}$ , $j_f=5.3\text{m/s}$ by Using Ultrasonic Sensor .....	39
Fig. 5-9 A Stratified Flow on the Upper Test Section at $j_g=1.24\text{m/s}$ , $j_f=0.11\text{m/s}$ by Using Ultrasonic Sensor .....	40
Fig. 5-10 A Stratified Flow on the Lower Test Section at $j_g=1.24\text{m/s}$ , $j_f=0.11\text{m/s}$ by Using Ultrasonic Sensor .....	40
Fig. 5-11 The Photograph of Case 1 .....	43
Fig. 5-12 The Profiles of Void Fraction and IAC of Case 1 .....	43
Fig. 5-13 The Profiles of Bubble-passing Frequency and Bubble Velocity of Case 1 .....	44
Fig. 5-14 The Profiles of Sauter Mean Diameter of Case 1 .....	44
Fig. 5-15 The Photograph of Case 2 .....	45
Fig. 5-16 The Profiles of Void Fraction and IAC of Case 2 .....	45
Fig. 5-17 The Profiles of Bubble-passing Frequency and Bubble Velocity of Case 1 .....	46
Fig. 5-18 The Profiles of Sauter Mean Diameter of Case 2 .....	46
Fig. 5-19 The Photograph of Case 3 .....	47
Fig. 5-20 The Profiles of Void Fraction and IAC of Case 3 .....	47
Fig. 5-21 The Profiles of Bubble-passing Frequency and Bubble Velocity of Case 3 .....	48
Fig. 5-22 The Profiles of Sauter Mean Diameter of Case 3 .....	48
Fig. 5-23 The Photograph of Case 4 .....	49
Fig. 5-24 The Profiles of Void Fraction and IAC of Case 4 .....	49
Fig. 5-25 The Profiles of Bubble-passing Frequency and Bubble Velocity of Case 4 .....	50
Fig. 5-26 The Profiles of Sauter Mean Diameter of Case 4 .....	50
Fig. 5-27 The Photograph of Case 5 .....	51
Fig. 5-28 The Profiles of Void Fraction and IAC of Case 5 .....	51
Fig. 5-29 The Profiles of Bubble-passing Frequency and Bubble Velocity of Case 5 .....	52
Fig. 5-30 The Profiles of Sauter Mean Diameter of Case 4 .....	52

Fig. 5-31 The Comparison of Influences of Liquid Velocity on the Local Void Fraction at the Gas Velocity between 0.25m/s and 0.7m/s .....	58
Fig. 5-32 The Comparison of Influences of Gas Velocity on the Local Void Fraction at Liquid Velocity between 3.8m/s and 4.4m/s .....	58
Fig. 5-33 The Comparison of Influences of Liquid Velocity on the Bubble Frequency at the Gas Velocity between 0.25m/s and 0.7m/s .....	59
Fig. 5-34 The Comparison of Influences of Gas Velocity on the Bubble Frequency at the Liquid Velocity between 3.8m/s and 4.4m/s .....	59
Fig. 5-35 The Comparison of Influences of Liquid Velocity on the IAC at the Gas Velocity between 0.25m/s and 0.7m/s .....	60
Fig. 5-36 The Comparison of Influences of Gas Velocity on the IAC at the Liquid Velocity between 3.8m/s and 4.4m/s .....	60
Fig. 5-37 The Comparison of Influences of Liquid Velocity on the Sauter Mean Diameter at the Gas Velocity between 0.25m/s and 0.7m/s .....	61
Fig. 5-38 The Comparison of Influences of Gas Velocity on the Sauter Mean Diameter at the Liquid Velocity between 3.8m/s and 4.4m/s .....	61
Fig. 5-39 The Comparison of Influences of Liquid Velocity on the Bubble Velocity at the Gas Velocity between 0.25m/s and 0.7m/s .....	62
Fig. 5-40 The Comparison of Influences of Gas Velocity on the Bubble Velocity at the Liquid Velocity between 3.8m/s and 4.4m/s .....	62

LIST OF TABLES

Table 3-1. Test Section specification ..... 16  
Table 3-2. The Specification of Reservoir ..... 16  
Table 3-3. The Specification of SIT and HPSI Pump ..... 16  
Table 4-1. The Specification of High Speed ADC ..... 28  
Table 4-2. Flow Condition of Experiment 2 ..... 28



## SUMMARY

Phases and phasic velocity distributions in a horizontal pipe are asymmetric due to a density difference between the phases, while they are symmetric in a vertical pipe. The asymmetric phase distribution across the cross section in a horizontal bubbly flow due to a buoyancy can cause a flow pattern to change. Most experimental studies have been performed for the vertical pipes in which a symmetric phase distribution is formed, while few studies for bubbly flow at low flow rate have been performed for horizontal pipes. So a study about how overall bubbly flow changed is needed to perform. This study consists of two experiments. One experiment is performed to identify a horizontal two-phase flow pattern by using the ultrasonic sensor. The other is performed to understand phasic distributions in a horizontal channel. Required parameters are local void fraction, interfacial area concentration, Sauter mean diameter and bubbly velocity in this study. These parameters are measured by using the two-sensor conductivity probes. And the bubbly flow at several flow conditions is examined at a location,  $L/D = 154$ , in which represents near fully developed bubbly flow patterns. Based on the measured parameters, the phase distribution is experimentally analyzed.

# I. 서 론

## 1. 연구 배경

일상생활에서 접촉하는 유체 유동 중 2개 이상의 물질들이 2개 이상의 상과 함께 흐르는 유동을 다상유동(Multi-phase Flow)이라고 한다. 이러한 다상유동은 현대 산업사회의 여러 분야에서 이용되고 있다. 특히 다상유동(Multi-phase Flow) 중에서 액상과 기상의 두 개의 상이 서로 혼합되어 흐르는 2상유동(Two-phase Flow)은 각종 보일러, 응축기, 건조기, 열 파이프, 공기조화 장치, 냉동 장치, 담수화 장치, 석유화학 플랜트, 제철 플랜트 그리고 화력 및 원자력 발전소의 열교환 장치에 이르기까지 이용되는 곳이 많다. 그러므로 2상유동 현상의 연구는 열공학적인 측면에서도 매우 중요하다. 또한 2상유동 현상에 대한 연구는 제반 2상유동 현상에 대한 좀 더 정확한 예측으로 인한 더 복잡해진 원자력발전소 계통 설계, 일반 대중의 안전성에 대한 우려 그리고 원자력 발전 단가 상승 등으로 인하여 침체 국면에 처해 있는 원자력 산업의 활성화에도 기여할 수 있을 것이다.

2상유동은 액상과 기상 두 상 간에 밀도, 점도 등의 물성치와 유동 방향, 조건 및 유로의 형상에 따라 유동의 형태가 달라진다. 그 뿐만 아니라 두 상 간의 상호작용으로 인하여 상 경계면에서의 형상 변화 및 전달 현상이 매우 복잡한데, 한정된 몇몇의 경우를 제외하면 지배 방정식을 기반으로 한 순수한 수식만으로 전반적인 2상 유동 관련 변수를 정량화하기는 불가능하다. 따라서 2상유동 현상의 좀 더 정확한 해석을 하기 위해서는 이론적 해석과 더불어 많은 실험적 연구를 통한 고찰이 병행되어야 한다[이상용 외, 1999].

2상유동 현상에 대한 이론적 해석의 측면은 2상유동의 열수력학적인 거동분석을 위해 균질유동 모델(Homogeneous Flow model), 드리프트 플럭스 모델(Drift flux model) 그리고 Two-fluid 모델 등이 개발되었다. 이 모델들은 거시적인 관점에서 2상유동 해석에 이용되고 있다. 균질유동 모델은 액상과 기상에 대해 같은 평균 밀

도, 점도 그리고 같은 속도로 가정하는 가장 간단한 2상유동 해석 모델로 Two-fluid 모델의 특수한 경우이다. 이 균질유동 모델은 제한된 유동조건 및 유동 양식에서의 유동해석이나 복잡한 모델링을 하기 전의 첫 단계로 이용된다. 그러나 각상의 속도 분포(Velocity Distribution), 기포율 분포(Void Fraction Distribution) 그리고 액상과 기상의 경계면에서의 두 상 간의 상호작용 등의 해석을 하는 것에는 한계가 있다. 드리프트 플럭스 모델은 각 상의 개별적인 유동보다 각 상간의 상대 운동에 관심을 가지고 2상유동을 기술하는 모델이다. 이 모델은 각 상간의 상대 운동(Slip Ratio)이 각 상의 절대 속도 자체에 거의 무관하게 몇 개의 주요 변수에 의해서 주로 결정되는 경우에 유용한 혼합 모델이다. 이 모델에 사용되는 주요 인자에 대한 상관식의 형태에 따라 여러 가지 모델이 존재하게 된다. Two-fluid 모델은 각 상에 대한 보존 방정식을 세우고, 상 경계면에서의 질량, 운동량 그리고 에너지의 전달에 따른 상호작용에 대한 관계식을 이용한 모델이다. 각 상의 상호작용을 다룰 수 있다는 관점 때문에, 이 모델은 위의 모델들 중 가장 정확한 모델로 알려져 있다. 그러나 이 모델은 경계면의 형태 및 운동과 관련한 각종 전달 현상을 어떠한 방식으로든지 모델링하고 구성 관계식을 얻어야 하는 문제점이 있다. 또한 경계면에서의 상호작용에 의한 전달 현상을 일반화하여 표현할 수 없기 때문에, 현재까지의 해석 기법으로는 이 모델에 사용된 각종 구성 관계식만 사용하는 것으로 적용 범위가 제한된다[박군철 외, 1996].

이런 2상유동은 상들 사이에 계면이 항상 존재하고 유로를 따라 계면이 변형된다. 이 복잡성 때문에 2상유동의 수학적 공식들이 가장 도전적인 문제들 중 하나로 고려되고 있다. 위의 모델들 중 Two-fluid 모델은 Ishii에 의해 공식화되었는데, 각 상의 질량, 운동량, 에너지의 균형을 검증하는 순간적인 보존 방정식들로 이루어진다. Two-fluid의 공식에서 각 상의 평균화된 거시적 영역들로 표현되는 식들은 서로 독립적이기 때문에, 계면에서 상호작용하는 관계식이 필요하다. 이들 상호작용을 표현하는 관계식들은 계면들을 통한 각 상들의 질량, 운동량, 에너지의 수송을 반영하고 계면면적밀도와 작용하는 힘의 함수로 표현된다. 그러므로 단위 유체 체적 당 계면면적으로 정의되는 계면면적밀도는 Two-fluid 모델에서 가장 중요한 매개변수 중 하나가 된다. 계면면적밀도에 대한 실험 상관식들은 Two-fluid 모델에 사용된다. 그러나 이런 계면면적밀도에 대한 연구는 실험적으로 매우 제한적이다.[허병길

외, 2005]

## 2. 연구현황 분석

계면 변수와 관련하여 수직관에서의 기포유동에 대한 연구가 많이 수행되었다. 그 중에서 밀접하게 관련이 있는 연구를 찾아보면 다음과 같다.

처음 수직관에서의 연구는 난류구조(Turbulence Structure)를 연구한 A. Serizawa 외(1975)의 연구이다. 시험대의 직경은 60mm이고, 액상의 겉보기 속도가 0.3~1.03m/s이고, 건도가 0.0085~0.09%정도이다. 매개 변수는 기포율(Void fraction)과 기포속도로 2-센서 프로브(Two-sensor Probe)를 이용하여 측정하였다. 실험 결과를 보면, 대부분의 국소적인 매개 변수들은 충분히 섞인 기포유동 지역에서 관 단면에 걸쳐서 균일하게 분포하였다. 이 국소적인 매개변수의 분포는 전달 가능한 양의 격렬한 난류 수송을 따라 균일하게 분포한다. 유동의 바깥 지역에서 벽에 대한 효과는 국소적인 기포율과 기포로 채워진 비율의 최대값으로 나타났다. 또한 기포의 올라가는 속도와 물 속도의 통계적 특성이 연구되었는데, 기포와 물의 속도 스펙트럼이 Poisson 분포와 정규분포 함수를 따라 분포하였다. 일정한 물의 속도에 대해 기체 속도가 증가함에 따라 난류 강도는 감소하였고, 반대로 일정한 기체 속도에서 액체의 속도가 증가함에 따라 난류 강도도 증가하는 경향을 보였다 [A. Serizawa et al, 1975].

Hibiki 외(2001)의 연구는 계면면적 수송 방정식의 개발과 관련하여 액체 속도와 난류 강도를 측정하기 위한 기법으로 Hot-Film Anemometry법을 이용하였고, 2-센서 프로브 방법을 이용하여 기포율, 계면면적밀도, 계면 기체속도, 그리고 Sauter mean diameter의 국소적인 측정을 수행했다. 측정 위치는 관의 반지름 방향으로 15개의 다른 위치를 설정하고, 축으로  $z/D=6.00$ , 30.3 그리고 53.5의 3개의 위치에서 기포-슬러그 천이 유동뿐만 아니라 기포 유동에 대해서까지 확장하여 수행했다. 액체 속도(Liquid velocity)와 기포율의 범위는 각각 0.491~5.0m/s와 5~45%이다. 기포 합체(Coalescence)와 분열(Breakup)로 인한 1차원 계면면적 수송은 체적 유동

건도(Volumetric flow quality)의 함수로 표시되었다.  $\langle j_f \rangle = 0.491 \text{m/s}$ 에 대해 기포 합체와 분열의 비율은 평형 상태에 있었고,  $\langle j_f \rangle = 0.986$ 과  $2.01 \text{m/s}$ 에 대해서는 기포 합체 비율이 기포 분열의 비율보다 더 컸다.  $\langle j_f \rangle = 5.00 \text{m/s}$ 에 대해 지배적인 계면면적 수송 현상은 기포율의 증가로 기포 합체로부터 기포 분열로 변했다. 이를 종합하여 볼 때, 계면면적 수송의 메커니즘은 기포 혼합의 길이(Bubble mixing length), 난류강도(Turbulence intensity), 기포율 등등에 의존하는 것으로 볼 수 있었다[T. Hibiki et al., 2001].

S. Kim 외(2002)의 연구에서는 2-센서 프로브를 이용하여 제한된 공기-물 기포 2상 유동의 세부 구조를 평가했는데, 이것도 계면면적 수송 방정식의 개발에 필요한 Database를 확립하기 위해서 수행되었다. 측정된 국소적인 2상유동 매개변수들은 역시 기포율, 계면면적밀도 그리고 기포속도이다. 유동 영역은 기체와 액체의 겹보기 속도의 범위가 각각  $0.05 \sim 0.19 \text{m/s}$ 와  $0.32 \sim 1.89 \text{m/s}$ 였다. 현재 2-센서 프로브 기술과 연관된 측정오차는 약  $\pm 7\%$ 였고, 이미지 해석방법에 의해 기준을 정하여 보정하였다. 기포속도의 분포들은 난류 속도의 분포의 것과 유사하였으며, 명확하고 균일하게 유지되었다. 평가된 모든 유동 조건에서 기존의 Sauter mean diameter가 약  $3 \text{mm}$ 에서 거의 균일하게 유지되었다. 국소적인 매개 변수는 기포들 사이 수송현상과 상호작용을 평가하기 위해 유동관의 단면적을 통해 평균화되었다. 시험관을 따라 면적 평균화된 계면면적밀도(IAC)의 발달은 유동 조건에 따라 변하였다. 압력 변화에 의해서 관을 따라 기포 팽창을 고려하여,  $\langle a_i \rangle$ 의 감소 또는 거의 균일한 경향은 평가된 유동 조건에서 활동하는 합체 메커니즘을 의미하는 것이었다. 이것은 다른 기포와의 상호작용 메커니즘이 유동조건에 의존하여 지배적일 수 있다는 것을 의미하는 것이었다[S. Kim et al, 2002].

이상은 수직관 연구에 대한 내용이었고, 수평관에 대해 연구 현황은 다음과 같다. 수평관에서의 계면구조에 대한 연구논문은 1991년에 Wisconsin-Milwaukee 대학의 G. Kocamustafaogullari와 Z. Wang에 의해서 처음 발표되었다. G. Kocamustafaogullari와 Z. Wang(1991)는 직경  $50.3 \text{mm}$ 의 투명한 관에서 같은 방향의 공기-물 기포 유동의 내부 상 분포를 2-센서 프로브 기술을 사용하여 실험적으

로 연구하였다. 액체와 기체 체적 곱보기 속도의 범위가 3.74~5.71m/s와 0.25~1.37m/s이었고, 평균 기포율의 범위는 4.3~22.5%이었다. 측정 변수들로는 기포율, 계면면적밀도, 평균 기포 직경, 그리고 기포 계면 속도, 현의 길이(Chord length)와 주기 분포들의 국소적인 값들을 측정하였다. 실험 결과를 보면, 기포율, 계면면적밀도 그리고 기포 통과주기(Bubble passing frequency)가 관 벽 상부 근처에서 국소적인 최대값을 가졌고, 측면은 평균 기포율이 증가함에 따라 평평해지는 경향을 보였다. 수평 기포유동에 대해 관찰된 피크 기포율(Peak void fraction)은 0.65, 피크 계면면적밀도(Peak IAC)는  $1000m^2/m^3$ , 그리고 기포 주기(Bubble frequency)는 2200/s의 값에 도달한 것을 실험을 통해 알 수 있었다. 일정한 기체 유동에서 액체 유동의 감소 또는 고정된 액체 유동에서 기체 유동의 증가 중 하나를 통해 국소적 기포율(Local Void fraction), 계면면적밀도 그리고 기포 주기가 증가할 것이라고 예측할 수 있었다. 축의 기포 계면 속도는 관 벽 상부 근처를 제외하고, 상대적으로 균일한 분포를 보인 것에 비해 관 벽 상부 근처에서는 속도가 급격하게 감소하였다. 국소적 기포 계면 속도와 기포 속도 난류 맥동들은 기체 유속의 증가와 함께 증가한다. 이 연구에서 국소적 계면면적밀도, 기포율, 기포의 Sauter mean diameter 들 사이 관계식을 사용하여 평균 기포 직경 분포를 계산하였고, 평균 기포 직경은 위치와 유동조건에 의존하며 2~5mm의 범위를 가졌다. 또한 일정한 액체 속도에서 기체 유속이 증가하면 기포의 직경이 역시 증가하였다[G. Kocamustafaogullari & Z. Wang, 1991].

G. Kocamustafaogullari와 W.D. Huang(1994)의 연구는 위와 같은 실험 장치에서 내부구조와 계면 속도 발달에 대해 연구하였는데, 3개의 축 위치인 L/D=25, 148, 253의 위치에서 프로브를 설치하여 평가했다. 실험 결과는 유동의 유로 단면적동안 계면 매개 변수의 2차원 투시도 그래프로 나타났다. 공기-물 혼합 유동들은 약 L/D=148에서 거의 평형상태 쪽으로 발달하는 것을 보였다. 기포율, 계면면적밀도 그리고 기포통과주기의 형태는 유동 구조의 연속적인 변화가 액상에 의해서 기상의 팽창의 형태로 부분적으로 설명되었다. 속도 분포는 거의 평형상태의 분포 쪽으로 발달하는데, 난류 유동의 약 1/7의 제곱승 범칙의 분포로 나타난다[G. Kocamustafaogullari & W.D. Huang, 1994].

G. Kocamustafaogullari 외(1994)는 위의 최종적인 연구로 계면 구조의 국부적인

값들을 측정하여 모델링하는 연구였다. 이런 국소적이고 면적에 평균화된 계면의 매개변수가 액과 기상 둘 다 표면 체적유속의 함수로 해석되었는데, 액체 유동의 변화가 기체 유동의 변화보다 기포 크기에 더 큰 효과를 가진다는 것을 보여줬다. 이 논문에서 기록된 실험관찰들은 기상의 드리프트 속도  $\bar{u}_{gj}$ 와 기체 상 분포 매개변수  $c_0$ 들이 액체 유동에 의해 시스템에 영향을 미친다는 것을 보여 주었다. 그러므로 드리프트 플럭스 모델의 상관식은 수평 기포 유동에 적절하지 않았고, 그 대신에 평균 기포율의  $\langle \alpha \rangle - \langle \beta \rangle$ 의 그래프로 표현한 수평 기포 유동 상관식이 더 적절하게 나타낼 수 있었음을 확인하였다. 마지막으로 기포의 분열(Breakup) 과정의 모델링을 기반으로 하여 Sauter mean diameter와 계면면적밀도도 이론적으로 모델링되었다. 이론적으로 예측된 기포크기와 계면면적밀도가 측정된 것들만큼 상당히 일치한다는 것을 찾았는데, 이것은 이론적 모델 개발이 적절하게 설명된 것이었다 [G. Kocamustarfaogullari et al., 1994].

A. Iskandrani와 G. Kojasoy(2001)는 역시 위와 동일한 직경을 가진 실험장치에서 기포율, 기포 주기 그리고 액체 속도(Liquid velocity)의 국소적인 값을 측정하였다. 실험 결과들은 기포율과 기포 통과 주기가 관 상부 근처에 국소적 최대값을 가졌고 측면을 보면 액체 유동의 비율이 증가함에 따라 평평해지는 위의 Kocamustafaoullari 외(1991, 1994, 1994)의 연구에서와 같은 경향을 보여주었다. 유동범위는 기체와 액체의 속도가 각각 0.25~0.8m/s와 3.8~5.0m/s이다. 수평 기포유동에 대해 관찰된 시간에 평균화된 국소적인 기포율은 최대 65%에 도달하였고 기포주기는 1400m/s이었다. 또한 액상의 속도를 측정하기 위해 Hot-Film을 이용하여 난류 강도의 측면에 대한 연구도 수행되었는데, 액체 속도 분포의 흥미로운 특징은 관의 아래 부분에서 완전히 발달한 난류 관-유동 측면을 형성하는 경향을 보였다는 것이다. 높은 기포율에서 기체 속도의 증가는 난류 속도 맥동(Turbulence velocity fluctuation)과 난류 강도(Turbulence intensity) 형태에 의해 특성화된 난류 구조(Turbulence structure)를 급격하게 높였다. 이것은 일반적으로 국소적 난류강도(Turbulence intensity)가 주로 국소적 기포율의 함수로 나타낼 수 있다는 것이다 [A. Iskandrani & G. Kojasoy, 2001].

### 3. 연구 목적

이 연구의 목적은 두 가지이다. 하나는 초음파 센서를 이용하여 실험 장치에서 수평관 2상유동의 특성을 판별하는 것이고, 다른 하나는 계면면적 수송 이론과 관련하여 기포 유동에서 기포율의 분포 또는 상 분포에 관한 실험적 연구를 하기 위함이다.

기포율(Void fraction), 계면면적밀도(IAC), Sauter Mean Diameter 등과 같은 2상 유동 매개변수를 얻기 위해서, 한국원자력연구소에 설치된 수평관 공기-물 2상유동 실험장치에서 실험을 수행했다. 실험장치는 시험대, 공기 주입기, 물 공급 계통, 공기 공급 계통 그리고 데이터 처리 계통으로 이루어진다. 시험대는 직경이 80mm이고 길이가 14,400mm인 투명한 아크릴 관으로 만들어졌다. 시험대에는 2상 유동 양식을 판별하기 위한 초음파 센서와 국부 기체 속도, 기포율, 계면면적밀도 그리고 기포 속도를 측정하기 위한 2-센서 프로브가 장착되었다. 이 실험에서 액체 겉보기 속도와 기체 겉보기 속도의 범위는 각각 3.8~4.4과 0.25~1.1m/s이다. 2-센서 프로브에 대한 실험적 데이터는 수직의 반경방향을 따라 16개의 측정 지점에서 국소적으로 얻는다.

## II. 이론적 배경

### 1. 기포유동

#### (1) 수직관(Vertical channel)

이 유동양식은 기상이 분산된 작은 기포들의 형태로 연속적인 액상 내에 축대칭의 형태로 분포한다. 이 때 기포의 크기(직경)는 관 직경에 비하여 매우 작으며, 따라서 기포유동은 관 벽면의 직접적인 영향을 받지 않는다. 그러나 관 벽면과 항상 접촉하고 있는 액상에 의하여 기포의 유동이 영향을 받는다. 그러므로 관 벽면의 영향을 간접적으로 받게 되며, 유동 조건에 따라서 단면에 따른 기포 분포의 상태가 변하게 된다. 이 유동양식은 기포율이 0.3이하에서 주로 나타난다. 작은 기포의 형태는 대체로 구형을 이루나, 기포의 양이 많을 경우 기포간의 충돌 및 합착에 의해서 좀 더 큰 기포가 형성되며, 큰 기포들은 주위 유동에 의해서 변형되어 타원형이나 캡(Cap)의 형태를 보이기도 한다. 이 수직관에서의 기포 유동의 그림은 Fig. 2-1(a)에 나타나 있다[이상용 외, 1999].

#### (2) 수평관(Horizontal channel)

이 유동 양식은 수직 2상유동 양식에서의 기포유동과 마찬가지로 연속적인 액상에 작은 기포가 분산된 형태이다. 부력의 영향에 의해서 기포들은 수평관 상부에 더 많이 분포한 상태로 흐르게 되는데, 액체의 유량이 증가할수록 관 단면 전체에 균일하게 분포하는 경향을 보인다. 이 수평관에서의 기포유동의 그림은 Fig. 2-1(b)에 나타나 있다[이상용 외, 1999].

### 2. 계면 구조의 매개변수

(1) 기포율(Void Fraction)

유로 내의 한 지점에서 국소적인 기포율(Local Void fraction)은 총 측정시간동안 기포 통과시간의 분률로 정의할 수 있다. 즉,  $f(t)$ 을 기포의 통과 시 1, 액상의 통과 시 0으로 정의되는 함수라 하고, 총 측정시간을  $T$ 라고 하면 국소적인 기포율( $\alpha$ )은 다음과 같이 정의된다[G. Kocamustafaogullari & Z. Wang, 1991] :

$$\alpha = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt. \quad (1)$$

(2) 계면면적밀도(Interfacial Area Concentration)

계면면적밀도(Interfacial Area Concentration ; IAC)는 2상유동 혼합물의 단위 체적 당 계면의 총 면적으로 정의되며 길이의 역수의 단위를 가진다. 2상유동을 해석하기 위해 많은 안전성 분석 코드들은 계면을 통해 질량, 운동량 및 에너지의 전달량을 계면면적밀도(IAC)라는 변수를 통해서 예측하고 있다. 대부분의 계면을 통한 전달량은 계면면적밀도와 일차적인 비례관계를 가지며, 이 항의 적절한 모델링은 2상유동의 전반적인 해석결과에 매우 중요한 영향을 끼친다. 현재 활용되고 있는 시스템의 최적 안전성 분석을 위해 사용되는 코드에서 이 인자를 모델하기 위해 유동의 패턴에 기반을 둔 유동장을 구분하고, 각각의 유동장에 별도의 방법론으로 개발된 계면면적밀도 모델을 적용하고 있다[송철화 외, 2004].

정의는 어떤 공간 위치  $r$ 에서 국소적 계면면적밀도(Local Interfacial Area Concentration ; Local IAC))는 Ishii(1977)에 의해 다음과 같이 주어진다 :

$$a_i(r) = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^{N_i} \frac{1}{|\vec{v}_i \cdot \vec{n}_i|_j}. \quad (2)$$

이때  $a_i$ ,  $T$ ,  $\vec{v}_i$ 와  $\vec{n}_i$ 는 각각 계면면적밀도, 샘플링 시간(sampling time), 계면 속도(interfacial velocity) 그리고 계면의 단위 수직 벡터이다.  $N_i$ 는 샘플링 시간  $T$ 안에 한 점을 통해 지나는 계면의 총 개수이다. 물리적으로 이 국소적 계면면적밀도는

그 점에서 일어나는 계면의 확률을 표현한다[G. Kocamustafaogullari & Z. Wang, 1991]. 이 식의 정의는 Fig. 2-2와 같이 표현할 수 있다.

### (3) Sauter Mean Diameter

이 Sauter Mean Diameter는 기포율과 계면면적밀도를 연결해 주는 매개 변수로, 주로 기포 크기를 결정할 때 사용된다. 일반적으로 다음과 같은 식으로 계산이 된다[G. Kocamustafaogullari & W. D. Huang, 1994] :

$$D_{sm} = \frac{6\alpha}{a_i}. \quad (3)$$

$D_{sm}$  은 Sauter Mean Diameter,  $\alpha$ 는 국소적 기포율,  $a_i$ 는 국소적인 계면면적밀도이다.



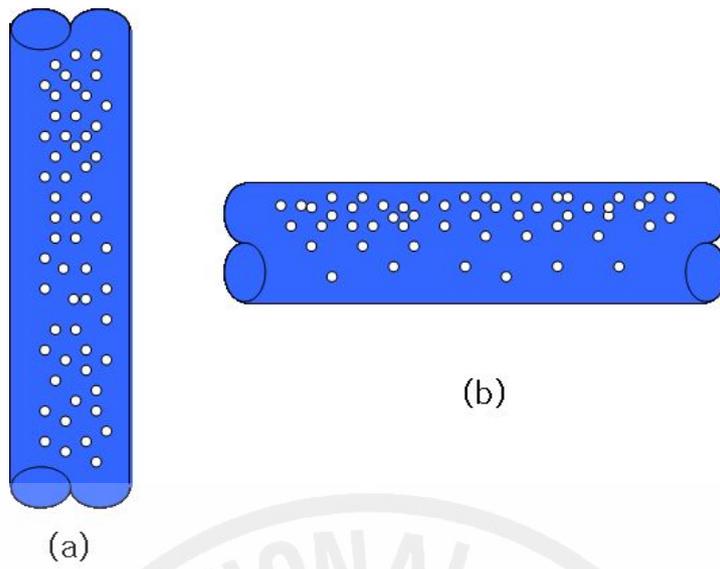


Fig. 2-1. (a) A Bubbly flow in a Vertical Flow and (b) A Bubbly flow in a Horizontal Flow

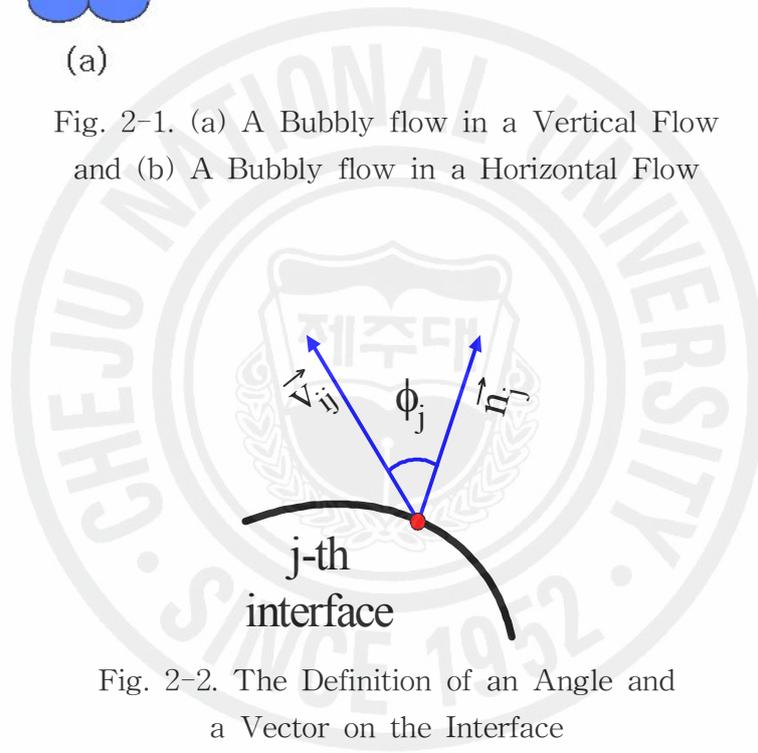


Fig. 2-2. The Definition of an Angle and a Vector on the Interface

### III. 실험 장치

수평관에서 기포유동의 계면구조 특성의 현상을 실험적으로 모사하기 위해 Fig. 3-2와 같은 실험 장치를 제작하였다. 실험 장치는 크게 시험대, 주순환계통, 공기공급계통으로 구성된다. 전체적인 도면은 Fig. 3-1에 나타내었다.

#### 1. 시험대

시험대(Test Section)는 수평관 2상유동을 수행하기 위한 원통형 관으로서, 재질은 유동의 가시화를 위해 투명 아크릴을 사용하여 제작하였다. 직경은 80mm이고, 원통형관의 길이는 1m의 단위로 이루어져 있는데, 이는 유로길이(L/D)에 따라 계측기를 설치함에 용이하기 위함이다. 총 길이가 14,700mm이고, 유로길이는 184이다. 그리고 시험대(Test Section)의 양 옆으로 저장조(Reservoir)가 연결되었다. 주요 제원은 Table 3-1에 있다. 시험대의 단위 원통형 관의 모양은 Fig. 3-3에 나타내고 있다.

#### 2. 주순환계통

주순환계통은 크게 저장조(Reservoir)와 주입펌프(Injection Pump), 물 저장 탱크(Water Storage Tank), 물 공급 배관(Water Supply Line)로 나뉜다.

##### (1) 저장조(Reservoir)

저장조(Reservoir)는 시험대 중심으로 양 옆에 입구 저장조(Inlet Reservoir)와 출구 저장조(Out Reservoir)가 설치되었다.

입구 저장조는 물 공급 배관(Water Supply Line)에서 들어오는 배관이 붙어 있고, 입구 저장조의 위쪽으로 8"의 공기 공급 배관(Air Supply Line)과 연결되었다. 저장조 안에는 직경이 3mm의 구멍인 다공판이 위, 아래쪽으로 100mm 간격으로 2

개씩 놓아져 있다. 시험대는 밑판에서부터 600mm의 위치에서 연결되었고, 밑판에 1"의 배수관을 설치해 물을 빨 수 있게 했다.

출구 저장조(Outlet Reservoir)는 아래쪽으로 12"의 배관이 설치되어 시험대에 흘린 물을 다시 물 저장 탱크(Water Storage Tank)에 보낼 수 있게 물 공급 배관(Water Supply Line)과 연결된다. 그리고 위쪽으로는 8"의 배관을 설치해 시험대에 주입한 공기를 대기로 방출할 수 있게 개방했다.

또한 입구와 출구 안을 볼 수 있게 저장조의 원통 가운데 아크릴 창을 만들었다. 도면은 Fig. 3-4에 제원은 Table 3-2에 있다.

#### (2) 주입 펌프(Injection Pump)

펌프(Pump)는 안전주입펌프(SIT Pump)와 고압안전주입 펌프(HPSI Pump) 2개를 사용하였다. 주로 유동양식의 대부분 영역에서 안전주입펌프가 사용되며, 일부 물의 고 유량이 필요할 경우에는 고압안전주입 펌프가 사용된다. 조절은 DIVA 유량 제어반을 통해 조절하였다.

펌프의 주요 제원은 Table 3-3과 같다.

#### (3) 물 저장 탱크(Water Storage Tank)

물 저장 탱크(Water Storage Tank)는 용량이  $10m^3$ 이며, 주 순환하는 물을 저장하는 탱크이다.

#### (4) 물 공급 배관(Water Supply Line)

물 공급 배관(Water Supply Line)은 물 공급 탱크에서 입구 저장조까지 35m의 구간에 설치되며 4"와 1.5"의 Stainless Steel 배관으로 구성된다. 4"는 안전주입 펌프와 연결되고 1.5"는 고압 안전주입 펌프와 연결된다.

### 3. 공기 공급 계통

공기 공급 계통은 압축기(Central Compressed Air)와 공기 블로워(Air Blower) 그리고 공기 공급 배관(Air Supply Line)으로 나뉜다.

#### (1) 압축기(Central Compressed Air)

압축기는 공기의 고유량을 주입하는 환형 유동(Annular flow) 영역을 제외한 대부분의 유동영역을 형성하는데 사용된다. 이 장치는 연구소의 중앙 공급 장치에서 공급되는 공기를 끌어와서 조절기(Regulator)를 통해 조절된다.

#### (2) 공기 블로워(Air Blower)

공기 블로워(Air Blower)는 기체의 고유량을 형성하기 위해서 4대의 루츠 블로워(Roots Blower)를 이용하여 공기를 주입시킨다. 블로워는 최대 압력(1.7bar)에서 최대 30m/s(1000m<sup>3</sup>/hr)로 공기를 주입할 수 있는 성능을 지닌다. 실험은 DIVA 유량 제어판을 통해 블로워 모터의 회전수를 조절하여, 기체속도를 변화시켜 유량을 조절할 수 있다.

#### (3) 공기 공급 배관(Air Supply Line)

공기 공급 배관(Air Supply Line)은 공기 압축기(Air Compressor)와 공기 블로워(Air Blower)로부터 시험대 또는 저장조에 이 배관을 통해 연결되었다.

이 배관은 Air Blower로부터 시험대까지 약 35m의 구간에 설치되었다. 주로 8"의 Stainless Steel 배관으로 구성되며 공기 압축기가 들어오는 배관과 만나는 곳에서부터 6" 배관이 설치되었다. 그리고 유량을 조절하기 위해 3"와 1"로 다시 분리된다. 공기 압축기 쪽으로 들어오는 배관은 1"로 연결되었다. 압축기를 사용할 때에는 기포 주입기와 연결하게 되고 고유량의 공기를 사용할 때는 입구 저장조에 연결된 8"의 배관을 사용하게 된다.

#### 4. 계측 및 제어 계통

계측기는 크게 기본 계측기기와 특수 계측기기로 나눌 수 있다. 기본 계측기기는 유량, 온도 그리고 압력 등등을 측정할 수 있는 계측기들로 공기 공급 배관과 물 공급 배관에 설치되었다. 그리고 특수 계측기기는 초음파 센서와 국소적 기포율 (Local Void Fraction)을 측정할 수 있는 2-센서 프로브가 있는데 이 특수 계측기기는 시험대에 설치되었다. 주요 측정 변수 및 계측기의 종류는 다음과 같다.

Fluid Temperature (TF) : Thermocouples

Flow Rate of Water (QF) : Vortex meters(1.5", 4"), Coriolis(1")

Flow Rate of Air (QG) : Vortex meters(0.5", 3", 6"), Delta meters(1")

Void Fraction : Local Void Fraction : Two-Sensor Probe

제어 계통은 각각 유동영역의 형성에 따라 필요한 유량이 다르기 때문에 직경이 다른 공기 공급 배관과 물 공급 배관에 밸브를 설치해서 유량을 조절한다. DIVA 유량 제어반에 달려 있는 조절기에는 안전 주입 펌프와 고압 안전 주입 펌프 조절기와 4개의 공기 블로워의 조절기가 있다. 이 중에서 앞의 펌프 조절기로 물의 유량을 제어하고, 4개의 공기 블로워(Air Blower)의 조절기를 통해 공기의 고유량을 제어할 수 있다. 일반적으로 공기 유량은 압축기의 조절기로 조절한다.

유량계에서 측정된 유량 값은 열전대와 압력계에서 측정된 온도와 압력을 이용하여 보정하여 계산된다. 열전대, 압력계 그리고 유량계와 컴퓨터와 연결된 그림은 Fig. 3-5, 3-6, 3-7에 나타나 있다. 이 연구에서는 기포 유동에 한정되어 있기 때문에 4"의 물 공급 배관과 0.5"의 공기 공급 배관만 사용된다. 그리고 4"에 연결된 안전 주입 펌프와 압축기만 사용한다.

이런 위의 계측기를 통해 물리적 현상을 전기적 신호의 측정을 통해 Data Acquisition System(DAS)에서 변화되어 데이터가 Computer에 저장이 된다.

Table 3-1. Test Section specification.

재질	투명 아크릴
직경(D)	80mm
길이(L)	14700mm
L/D	184

Table 3-2. The Specification of Reservoir

		Reservoirs
원통	내경(mm)	Inlet:600/Outlet:600x600
	높이(mm)	800
	두께(mm)	5
Plate	직경(mm)	700
	두께(mm)	10
아크릴창	가로x세로(mm)	200/290
	두께(mm)	20

Table 3-3. The Specification of SIT and HPSI Pump

	SIT Pump	HPSI Pump
Head(m)	180	130
Revolution(rpm)	2180	3600
Poles(P)	2	2
Frequency(Hz/V)	60/440	60/440
Motor Power(kW)	132	30
Capacity(m <sup>3</sup> /min)	2.67	0.247
Type	Centrifugal	Centrifugal
Control Type	VVVF	VVVF
Material	SUS304	SUS304

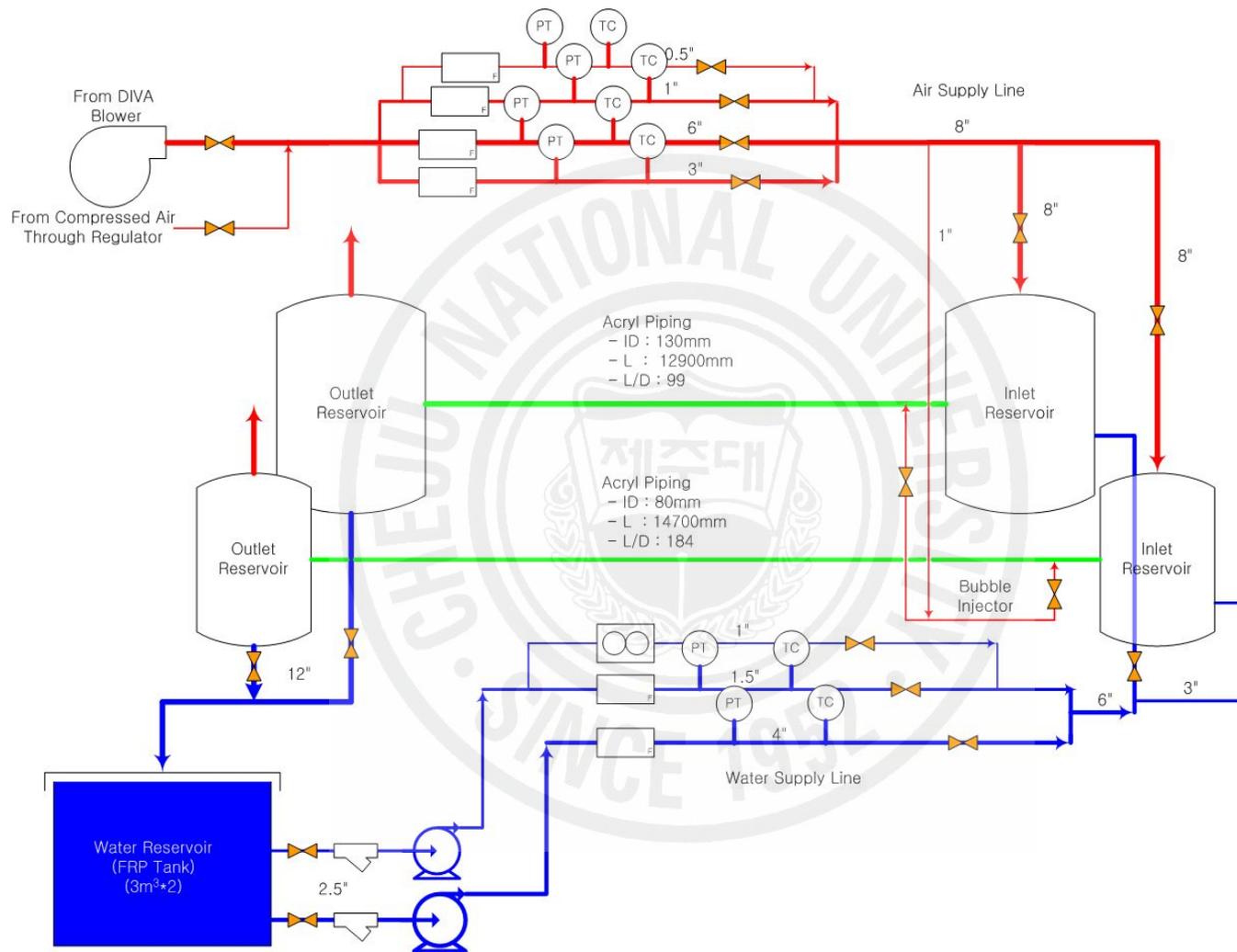


Fig. 3-1. The Diagram of Horizontal Two-phase Experimental Apparatus

최대 경사각 : 5도  
 - 높이 증가 : 1170mm

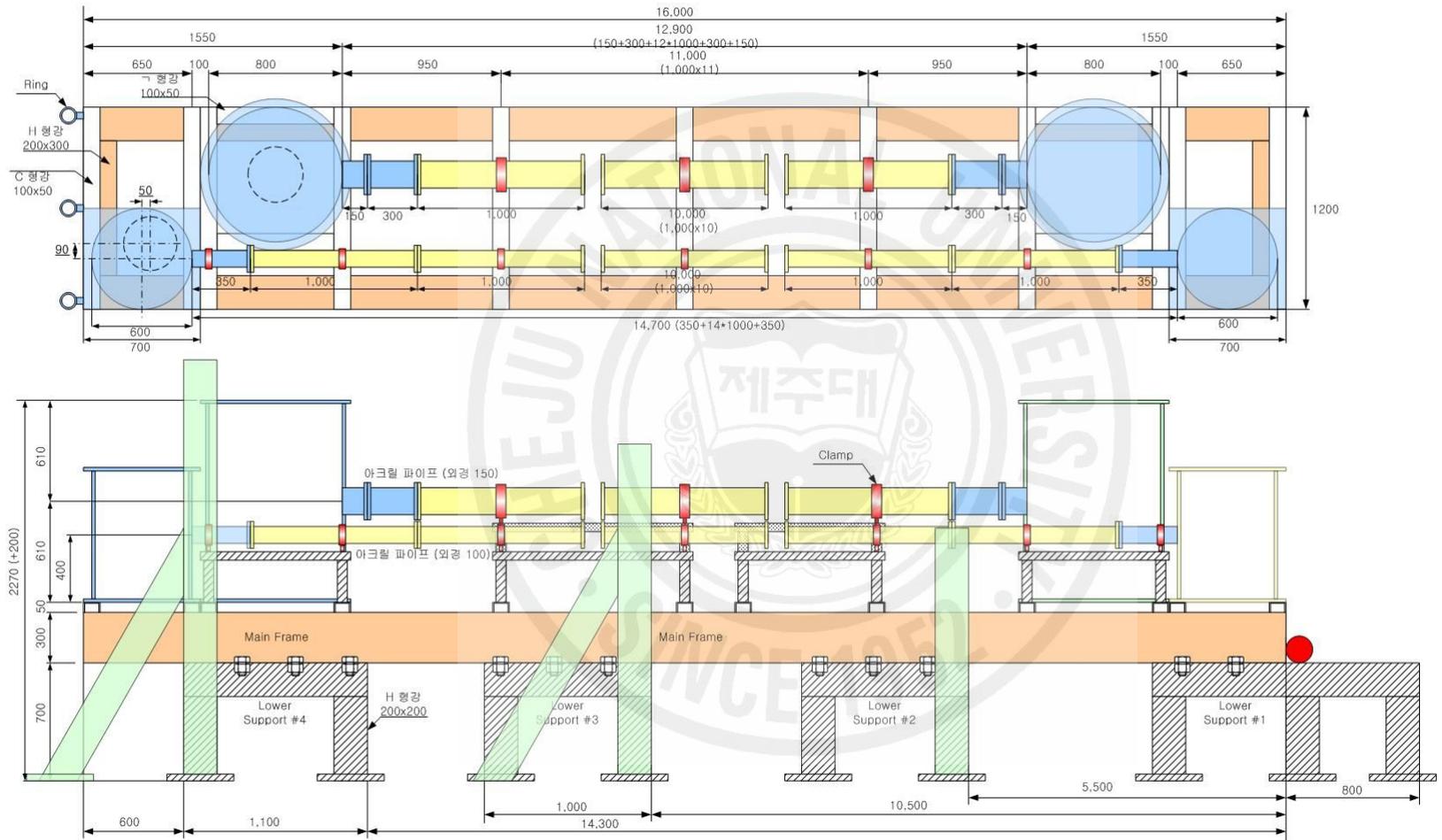


Fig. 3-2. The Sketch of Overall Experimental Apparatus

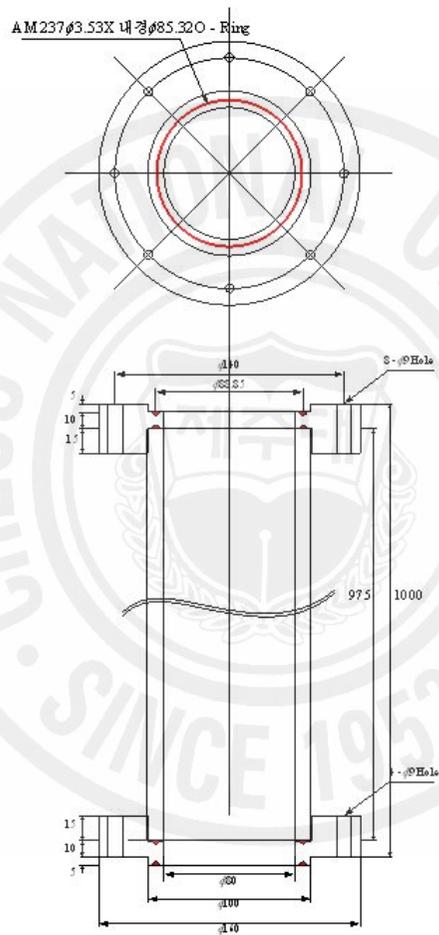


Fig. 3-3. The Sketch of Test Section Unit

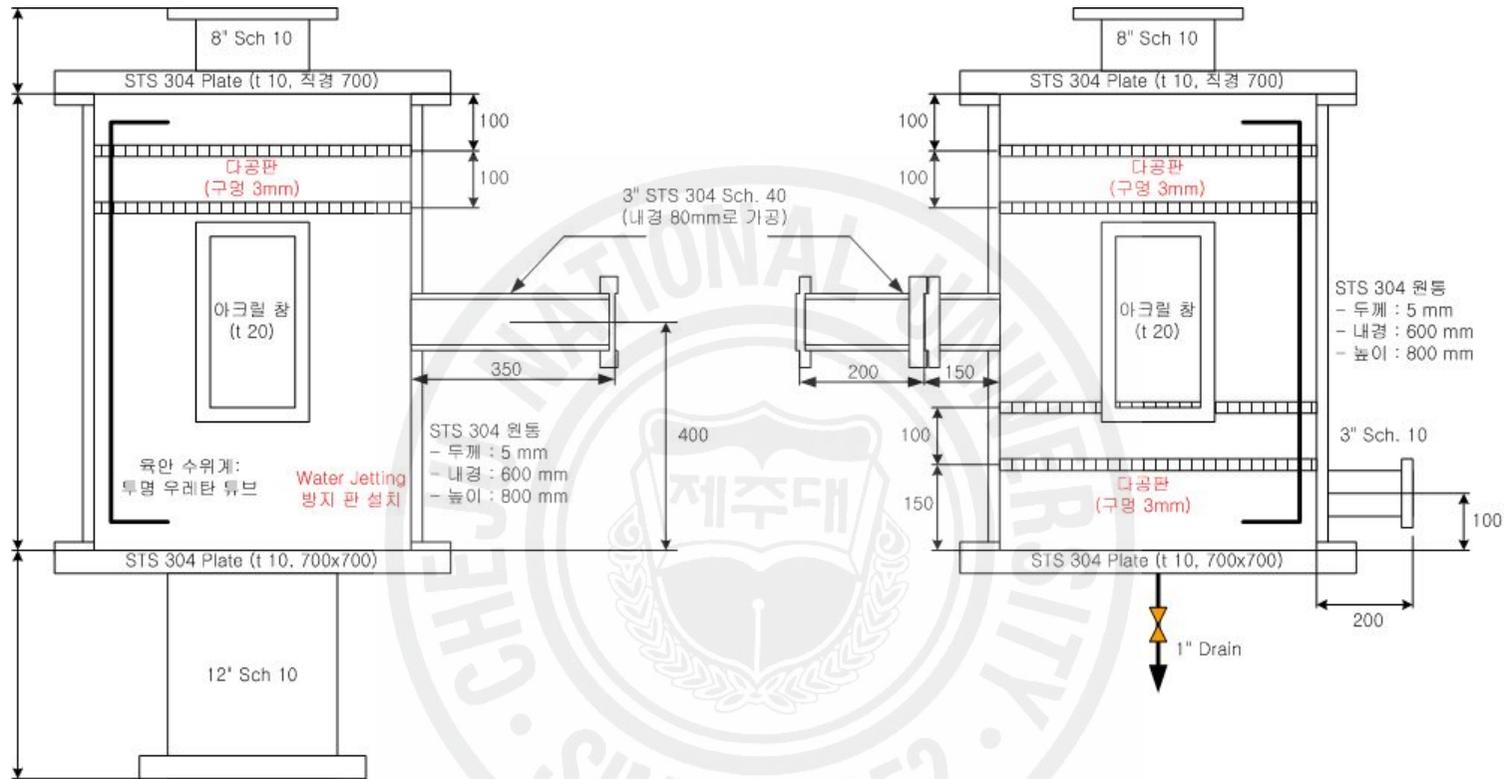


Fig. 3-4. The Diagram of Reservoir

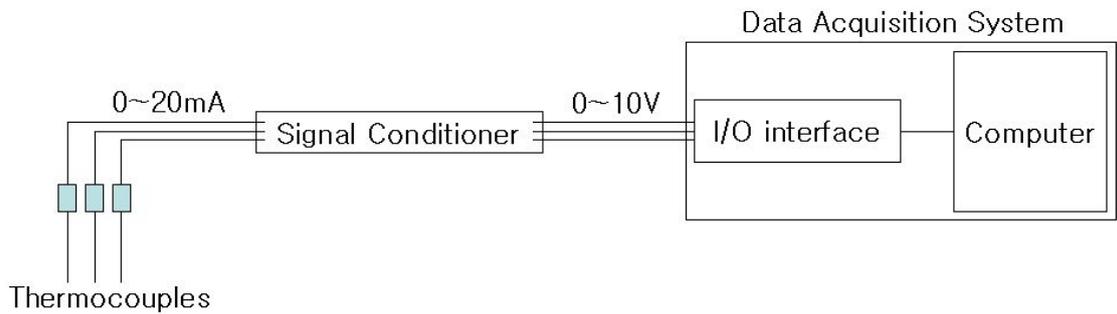


Fig. 3-5. The Connection of Thermocouples

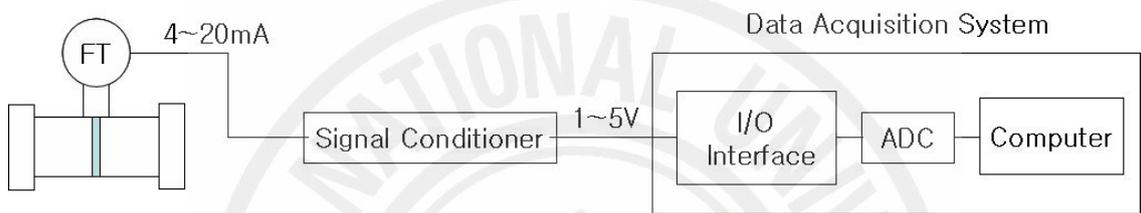


Fig. 3-6. The Connection of Flowmeter Transmitter

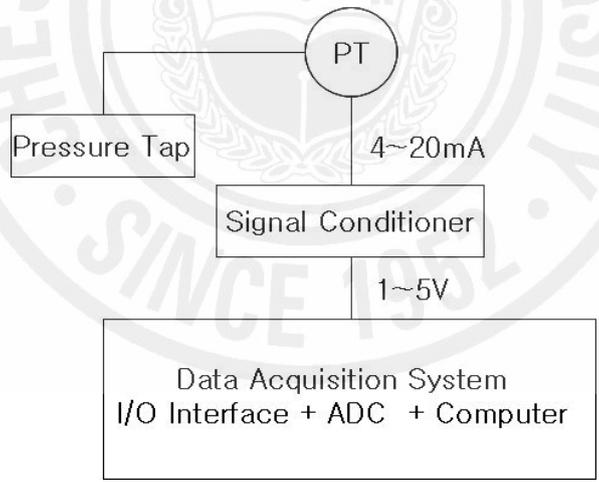


Fig. 3-7. The Connection of Pressure Transmitter

## IV. 실험 방법 및 조건

이 연구에서는 2가지의 실험이 수행되었는데, 실험 1은 수평관 실험 장치에서 수평 2상유동 양식을 판별하는 것이고, 실험 2는 분산 기포유동에서 상 분포 특성에 대한 실험이다. 그래서 측정 방법과 실험 조건은 각각 2가지로 나누어 설명한다.

### 1. 측정 방법

#### (1) 초음파를 이용한 수평관 2상유동 판별 기법

##### 1) 측정 원리

일반적으로 초음파는 주파수가 20 kHz 이상인 음파로 정의되며, 음파의 전달 특성에 따라 종파(longitudinal wave), 횡파(transverse wave), 신장파(extensional wave) 및 비틀림파(torsional wave), 그리고 표면파(Rayleigh wave) 등으로 분류될 수 있다. 본 실험에서는 종파만을 사용한다.

초음파가 재질이 다른 두 매질의 경계면에 입사하면 경계면에서 일부는 반사하고 일부는 투과하게 된다. 이때 반사 및 투과하는 초음파의 음압 비율은 초음파가 진행하는 두 매질의 음향 임피던스의 차이에 따라 달라진다. 초음파가 제 1매질에서 제 2매질로 두 매질의 경계면에 수직으로 입사할 경우, 입사파의 음압에 대한 반사파 및 투과파의 음압의 비, 즉 음압 반사율(R)과 음압 투과율(T)은 다음과 같다.

$$R = \frac{P_r}{P_i} = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (4)$$

$$T = \frac{P_t}{P_i} = \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (5)$$

여기서,  $P_i$ ,  $P_r$ ,  $P_t$ 는 각각 입사파, 반사파, 그리고 투과파의 음압을 나타내고,  $\rho$ 는 매질의 밀도, 그리고  $c$ 는 매질 내에서의 음속이다. 아래첨자 1은 입사매질을, 아래첨자 2는 투과 매질을 나타낸다. 또한  $\rho c$ 는 매질의 음향 임피던스( $Z$ )라고 불린다.

식 (4) 및 (5)에서 보는 것과 같이 입사 매질과 투과 매질 간의 음향 임피던스 차이가 적을 때에는, 입사 초음파가 거의 반사되지 않으며 투과 초음파의 음압도 입사 초음파의 음압과 거의 유사하게 된다. 하지만 액상으로부터 기상으로의 초음파 투과와 같이 두 매질의 음향 임피던스 차이가 큰 경우에는, 음압 반사율은 1에 가깝게 되고 음압 투과율은 매우 작아져서 입사 초음파는 매질 경계면에서 거의 100% 반사되고 투과되는 초음파의 음압은 거의 0에 가깝게 된다.

액체-기체의 상 경계면에서 이와 같은 초음파의 전 반사(Total Reflection) 현상은 초음파를 이용한 2상유동 양식 판별을 가능하게 하는 기본적인 특성이 된다.

투과 초음파의 음압 및 투과 빈도가 2상유동 양식 판별에 중요한 역할을 한다.

초음파 투과법의 경우 대각선 방향으로 두 개의 초음파 트랜스듀서가 설치되며, 이 중 하나는 초음파를 발생시키는 역할을 하는 송신(Pulsing) 트랜스듀서이고 반대편 하나는 투과 초음파를 측정하는 수신(Receiving) 트랜스듀서가 된다.

단상 액체 유동의 경우, 액체/기체 또는 고체/기체의 경계면과 같이 초음파의 투과 경로 상에 극심한 음향 임피던스의 차이를 나타내는 상 경계면은 존재하지 않는다. 따라서 송신 트랜스듀서에서 발생한 초음파의 음압 및 에너지는 벽면과 액체의 경계면에서 일부 감쇄되기는 하지만, 수신 트랜스듀서에 무난히 도달하게 된다. 이때 측정된 투과 초음파의 음압은 주어진 유로의 2상유동 조건에서 측정 가능한 최대 음압이 된다. 또한 단상 액체 유동내부에서는 상 경계면이 존재하지 않기 때문에, 초음파 전파 특성에 변동의 소지가 없다. 따라서 송신 트랜스듀서에서 발생된 모든 초음파는 동일한 음압을 가지면서 모두 수신 트랜스듀서에 도달하게 된다. 즉, 동일한 크기의 신호(음압에 해당하는 전압)가 연속적으로 측정되는 것이다.

초음파의 전파 경로 상에 기포가 존재하는 경우, 액체와 기체의 상 경계면 영역에 도달하는 초음파는 극심한 음향 임피던스의 차이에 의해 상 경계면을 투과하지 못한다. 따라서 수신 트랜스듀서에 도달하는 초음파 빔 단면적보다 큰 기체의 상이 존재하는 경우는 전체 초음파 빔 단면에서의 극심한 음향 임피던스의 차이에 의해 상 경계면을 전혀 투과하지 못한다. 따라서 수신 트랜스듀서에 도달하는 투과 초음

파 신호는 계측되지 않는다.

## 2) 측정 장치와 신호 처리

초음파 측정 장치는 초음파 트랜스듀서, Pulser-Receiver, High Speed Analog-to-Digital Converter(ADC), 그리고 자료 저장 장치 등으로 이루어져 있다. Fig. 4-1은 초음파 측정 장치의 구성도를 보여준다.

압전 소자를 이용한 초음파 트랜스듀서가 가장 보편적으로 사용된다. 초음파 트랜스듀서는 압전 효과에 의해 음파를 전압으로 또는 전압을 음파로 변환하는 역할을 한다. 압전 효과라는 것은 압전 소자에 외부 응력, 진동 변위 등을 인가하면 그 출력단에 전기 신호가 발생하는 현상 및 압전 소자에 외부로부터 전압을 순간적으로 인가하면 소자가 기계적 진동 변위를 일으키는 현상을 말한다.

Pulser-Receiver는 spike voltage pulse를 발생하여 초음파 트랜스듀서에 전달하는 역할과 초음파 트랜스듀서에서 발생한 고주파의 미세전압을 받아서 정류(filtering) 및 증폭하는 역할을 한다. Table 4-1은 Pulser-Receiver의 사양을 보여준다. 이 Pulser-Receiver는 가변 pulse 폭을 갖는 spike wave pulse를 발생시킴으로써, 보다 큰 에너지의 초음파를 얻을 수 있는 장점이 있다.

송신 트랜스듀서에 도달하는 에코 초음파 및 수신 트랜스듀서에 도달하는 투과 초음파 신호는 모두 수 MHz의 높은 주파수를 갖는다. 따라서 정확한 초음파 신호의 측정을 위해서는 수십 MHz 이상의 sampling rate를 갖는 ADC가 사용되어야 한다. 표4-1은 High speed ADC 사양을 보여준다.

## (2) 2-센서 프로브 측정원리

### 1) 측정원리

기포와 액체 사이의 전기적 저항 차에 기반을 둔 2-센서 프로브는 상 분포를 연구하기 위해 필요한 기기로서 국소적 기포율을 측정한다. 이 2-센서 프로브 기법은 이 연구를 위해 원자력 연구소에서 만들어졌다. 2-센서 프로브의 그림은 Fig. 4-2에

나와 있다. 후방 센서는 전방 센서의 신호 높이와 비교하여 후방의 프로브의 떨어지는 신호의 높이를 피하기 위해 설계된다.

이 2-센서 프로브에서 측정된 국소적인 저항의 변화와 순간적인 측정들은 전방 팁과 접지 사이의 전압 강하 안에서 변환된다. 전도 프로브는 연속적인 액체에 접촉하면 폐쇄회로가 된다. 그러나 공기를 주입하게 되면 회로가 열리게 되어 전기가 흐르지 않게 된다.

탐지하는 부분은 외경 0.127mm 외경의 stainless steel 전선으로 만들어지고, 이 탐지하는 끝들은 steel epoxy에 의해 고정된다. 탐지하는 부분은 전기적으로 절연이 되지 말아야 하고 충격의 운동량에서 빠르게 움직이는 작은 기포의 적은 변형과 함께 뚫리도록 날카롭고 빠른 신호를 보낸다. 이 두 개의 분리된 Tip들은 기포속도 측정을 위해 2-센서 프로브로부터 외경 1.6mm의 stainless steel 튜브에 봉해진다. 튜브 안으로 물이 들어가면 저항차가 발생하지 않기 때문에 물이 들어가지 않게 잘 봉해야 한다. 두 팁 간의 거리는 충분한 정확도와 함께 기포속도를 측정할 수 있도록 선택되어야 하는데, 여기서는 2mm로 제작되었다.

## 2) 측정 장치와 신호 처리

Fig. 4-3은 2상유동으로부터 신호를 얻기 위한 전체적인 하드웨어 구성 및 신호의 흐름을 보여주고 있다. 외부적인 직류 전원이 프로브에 공급되어 센서 끝에서 측정되는 유체의 전기적인 정보가 신호에 따라 신호 조절기(Signal Conditioner)에 전달된다. 이때 2상 유동은 회로 상에서 저항의 역할을 한다. 센서 감지부에서 유체의 물성이 액상이면 저항이 작고, 기상이면 매우 큰 저항을 가지게 된다. 신호 조절기는 신호의 교류성분을 제거하고 Low Pass Filter를 이용하여 신호의 고주파 성분을 걸러낸다. 신호를 증폭하고, 노이즈를 제거하는 역할도 본 장치에서 수행된다. 이 과정을 거친 신호는 단자대로 전달되며, A/D변환기를 통해서 아날로그 신호가 디지털 신호로 변환된다.

본 계통에서 프로브와 신호 조절기는 연구소 자체 제작, 개발하였으며 A/D 변환 장치는 NI DAS 시스템을 이용하였다. 본 A/D 변환기는 8개의 Single Ended 채널을 가지며 동시에 각 채널의 데이터를 받을 수 있다. 2-센서 프로브는 속도가 중요

한 측정 인자이고 이는 전-후방 센서에서의 기포 신호의 시간 간격을 측정하는 원리를 이용하기 때문에 각 채널로부터의 데이터 취득 상의 시간지연이 발생하면 별도의 추가적인 신호 변화의 노력이 필요하다. 그러나 각 채널의 데이터를 동시에 받는 본 장비의 특성 때문에 이러한 추가적인 과정이 필요가 없다. 데이터를 취득하기 위한 PC는 Pentium-4 PC를 활용하였다.

신호를 파형으로 바꿔 주기 위해, 전기 회로가 제작되었다. 2가지가 제작되었는데, 하나는 직류 회로인 Bridge amplifier 회로이며 다른 하나는 교류 회로인 rectifier 회로이다. 수평유동의 빠른 기포 속도로 인해 이 연구에서는 처음에는 교류회로를 채택하였다가 빠른 기포 속도에 비해 응답속도가 다소 늦어서 직류 회로로 바꾸게 되었다. 직류 회로의 도면은 Fig. 4-4에 나타나 있다.

연속적인 접근 형태의 ADC는 국부적 계면 구조 변수들의 측정에 사용된다. ADC의 해상력은 32bit이고 변환 비율이 500kHz까지 접근할 수 있다. 디지털화된 data는 Pentium 4 PC를 통해 메모리에 보내진다. Sampling rate는 기포의 국소적 측정에 있어 약 50kHz 정도이다.

연속적인 액체 유체의 표면장력은 매우 높기 때문에 프로브의 젖는 현상을 최소화해야 한다. 일반적으로 신호는 Fig. 4-5에서 보여주는 것과 같이 probe가 젖는 현상으로 인해 커브가 그려진다. 이렇게 생성된 신호는 기포의 신호를 구분하기 위해 사각 형태의 신호를 형성해야 한다.

실험을 시작해서 2-센서를 통해 받은 전기적 신호는 직류 회로인 신호 조절기 (Signal Conditioner)를 거쳐서 Fig. 4-6과 같은 Raw Data를 얻게 된다. 실험 환경이 좋지 못하여 Raw Data에 잡음(noise)이 포함된 데이터이다. 여기에서 먼저 노이즈를 제거하기 위해 필터링을 한다. Fig. 4-7과 같이 필터링이 된 데이터는 기포 신호의 구분을 위해 사각화를 진행하게 된다. 두 상들 사이 경계를 구분하는 것은 신호의 기울기로 판단하게 되는데, 신호가 증가할 때 기울기가 양이 되고 신호가 감소할 때 기울기가 음이 되면 기포 신호로 인정하게 하는 알고리즘이다. 이러한 과정을 거쳐서 전방 센서에서 국소적 기포율이 계산되고, 기포 통과 주기를 계산하게 된다. 그리고 전방 센서와 후방 센서를 통해서 계면면적밀도와 기포 속도가 계산이 되고 이 변수들의 값을 가지고 식 3을 통해 Sauter Mean Diameter가 계산이 된다. 이들을 계산하는 알고리즘은 어동진(2002)의 논문에 나와 있다.

## 2. 실험 조건 및 범위

수평 유동에서의 2상유동 양식은 여러 가지가 있는데, 이 연구에서는 Mandhane의 것이 사용되었다.

실험 1의 유동 조건은 수평관 2상유동의 전반적인 유동양식을 판별하는 것이기 때문에 임의로 위치를 정하였다. 그래서 Mandhane의 것에 실험 1의 유동 조건을 Fig. 4-8에 나타내었다.

실험 2는 액체 유속, 기체 유속과 Probe의 반지름 방향의 위치에서 기체와 액체가 잘 섞인 기포유동 조건 하에서 수행했다. 액체 겉보기 속도의 범위는  $3.8\sim 4.4\text{m/s}$ 이고 기체 겉보기 속도의 범위는  $0.25\sim 1.1\text{m/s}$ 이다. 실험 조건의 세부사항들은 Table 4-2에 요약되었고, Mandhane의 유동양식에 유동 조건을 자세히 표시한 것은 Fig. 4-9에 나타내었다.

프로브의 측정 위치는 각각 내경 80mm를 좌우 중심선 축을 중심으로 위로 각각 11등분, 아래로 5등분으로 나누어 위치를 정하고 각 위치에서 측정을 했다. 프로브의 이송 최대 범위가 74mm이기 때문에, 각 등분의 거리는 위로 11등분한 사이의 거리가 약 3.7mm이고 아래 5등분한 사이의 거리는 약 7.4mm이다. 이 프로브의 측정 위치는 Fig. 4-10에 나타내었다.

각 고정된 액체의 겉보기 속도에서 기체 겉보기 속도의 변화는 유동양식이 증가한 기포 유동만큼 증가된다.

Table 4-1. The Specification of High Speed ADC

<b>PULSER</b>		
Pulse Type (Main Bang)	Negative Square Wave	Spike Wave
Max. Pulse Amplitude	400V (no external load)	245V
Pulse Width	10 preset fixed widths; each can be tune by at least $\pm 25\%$	22~230ns
Repetition Rate	0.1~5.0kHz	0.1~5.0kHz
Pulse Rise and Fall Time	typically 10ns	typically 10ns
Available Pulse Voltage (no load)	100, 200, 300, 400 volt	60, 160, 270 volt
Sync Signal Output	+3.0V TTL	+5.0V TTL
Mode	Pulse-Echo or Thru Transmission	Pulse-Echo or Thru Transmission
<b>RECEIVER</b>		
Input Resistance - Pulse Echo Mode - Thru Transmission Mode	50 or 500 ohms 500 ohms	900 ohms 900 ohms
Max. Input Power (Thru Transmission Mode)	500mW	
Phase (RF Output)	Inverting or noninverting	noninverting
Voltage Gain ( $R_L=50\Omega$ )	0 to 59 dB in 1dB steps	7 to 79 dB in 1dB steps
Bandwidth	35MHz	35MHz
Noise (Referred to Input)	Typically 30 $\mu$ V RMS	N/A
High Pass Filter	1kHz or 1MHz	0.001, 0.3, 1.0, 5.0 MHz
Low Pass Filter	35MHz or 10MHz	10, 15, 25, 35MHz
Isolation (Thru Transmission Mode)	53dB min. @ 10MHz	N/A
Max. Output Voltage	$\pm 1.0V_{pk}$ min. ( $R_L=50\Omega$ )	$\pm 3.0V_{pk}$ max. ( $R_L=500\Omega$ )
Output Impedance	50 ohms	50 ohms

Table 4-2. The Flow Condition of Experiment 2

No.	$j_f$ (m/s)	$j_g$ (m/s)
1	3.8	0.25
2	3.8	0.7
3	4.4	0.25
4	4.4	0.7
5	4.4	1.10

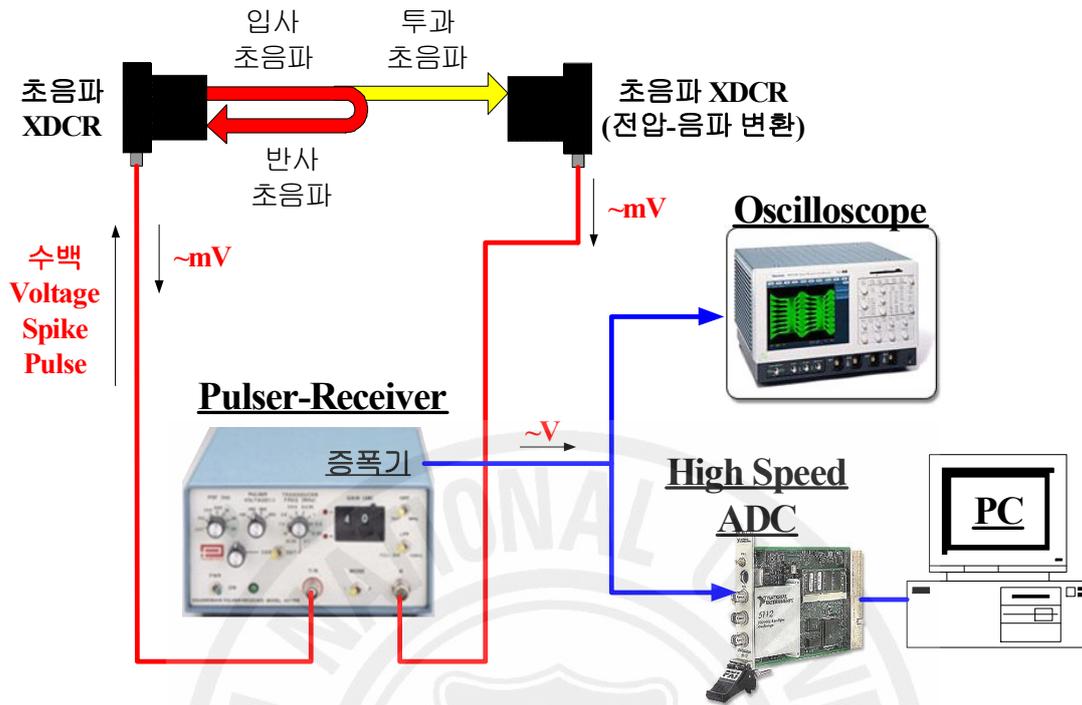


Fig. 4-1 The Composition of The Ultrasonic Measurement Apparatus

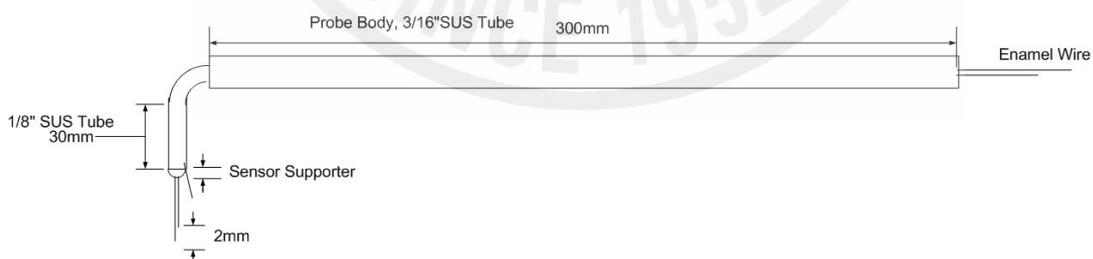


Fig. 4-2 The Design of Two-sensor Conductivity Probe

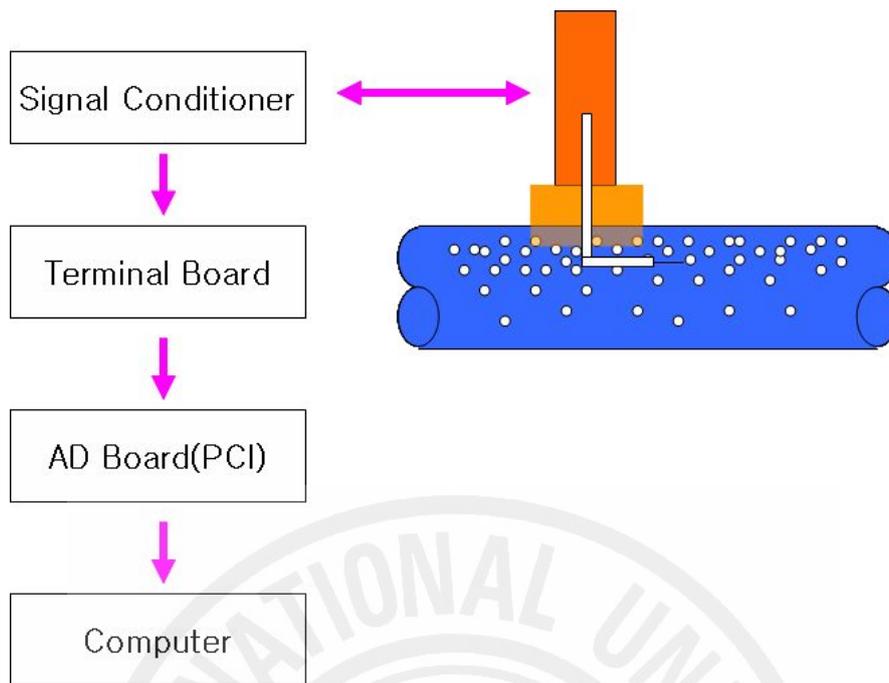


Fig. 4-3 The Diagram of Data Flowchart

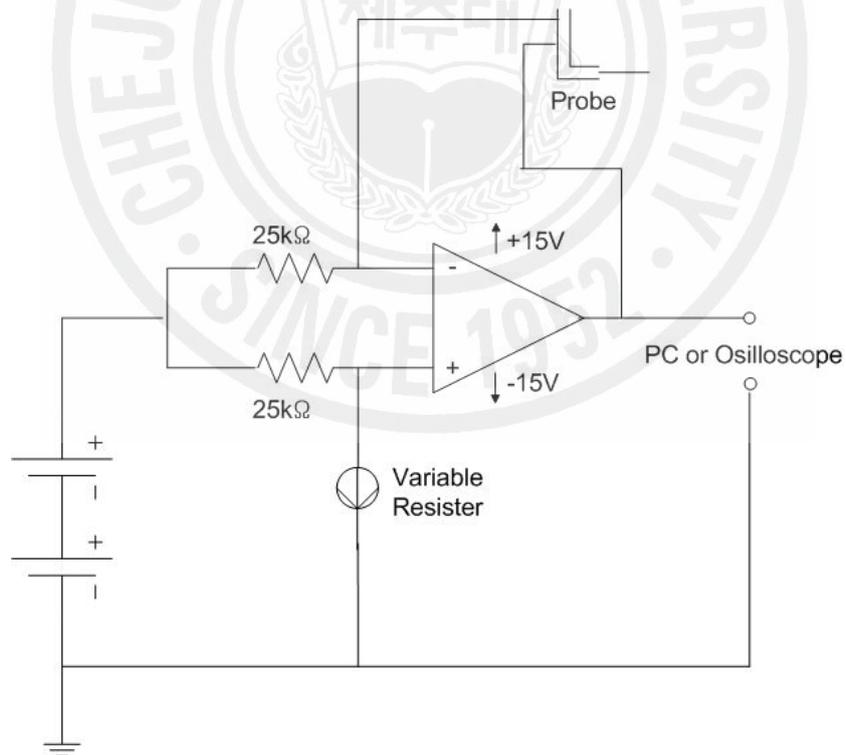


Fig. 4-4 The Bridge circuit for Two-sensor Conductivity Probe.

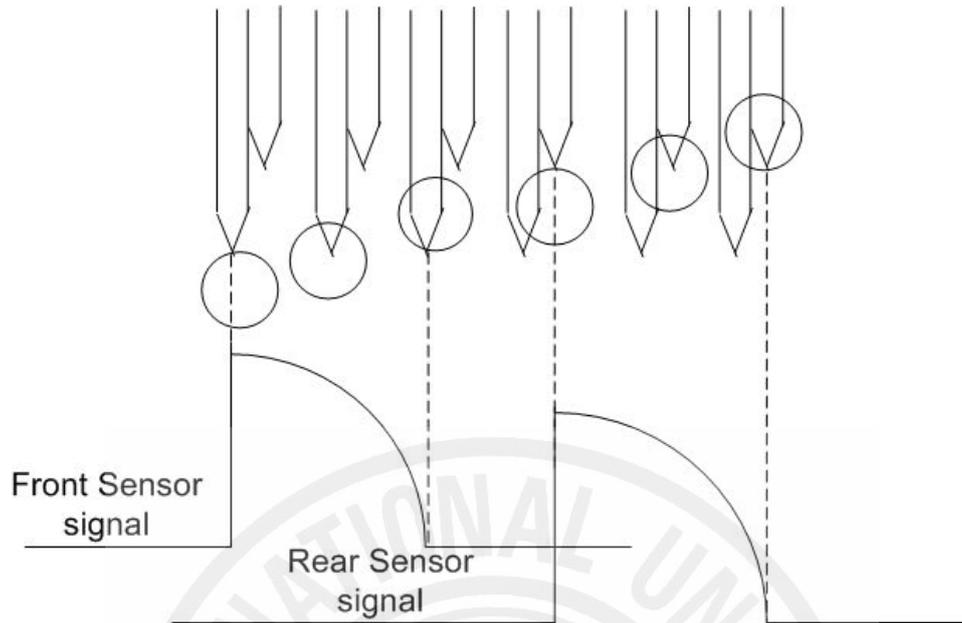


Fig. 4-5 A Signal Output of Two-sensor Conductivity Probe.

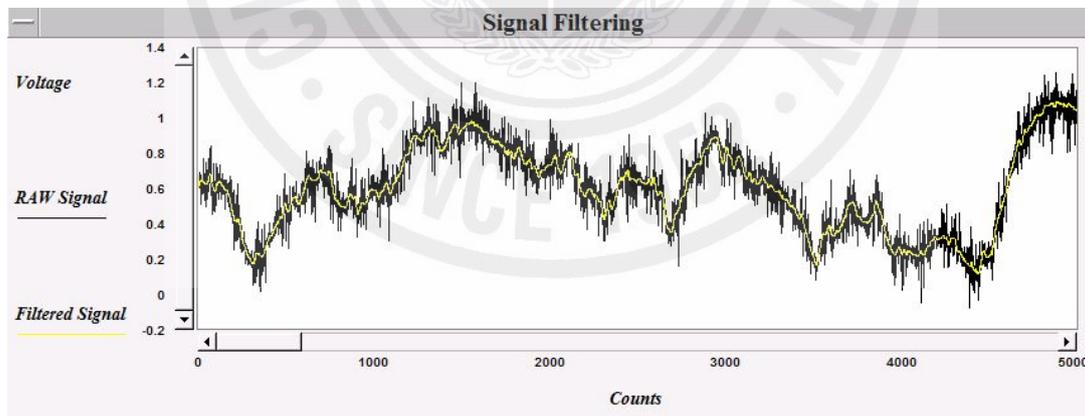


Fig. 4-6 Raw Data of Two-sensor Conductivity Probe at the Horizontal Pipe.

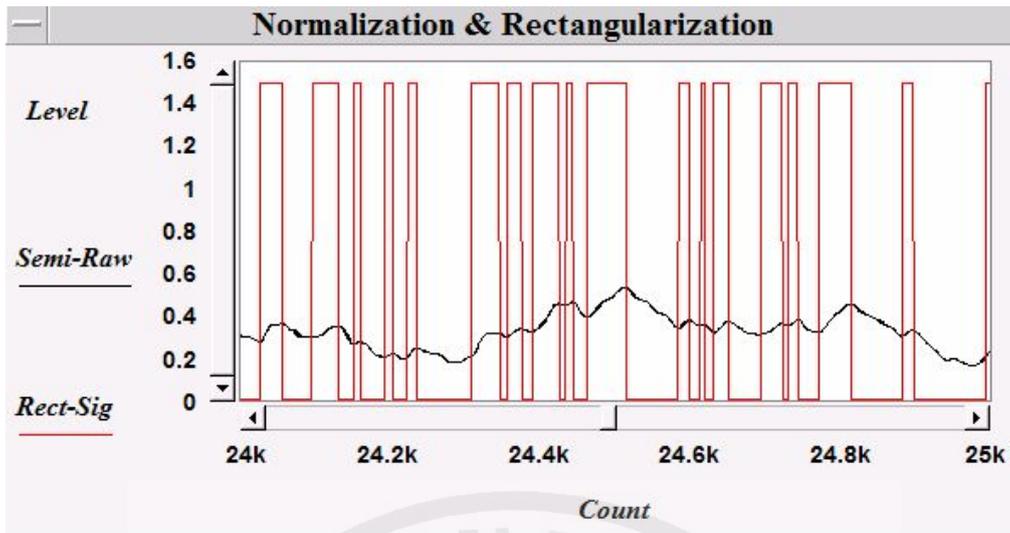


Fig. 4-7 The Rectangularization of a Modified Data

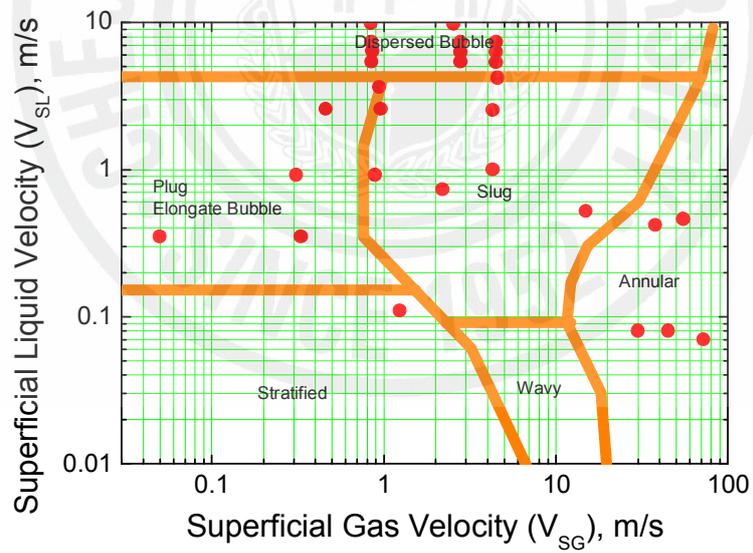


Fig. 4-8 The Flow Condition of Experiment 1 on the Horizontal Flow Regime.

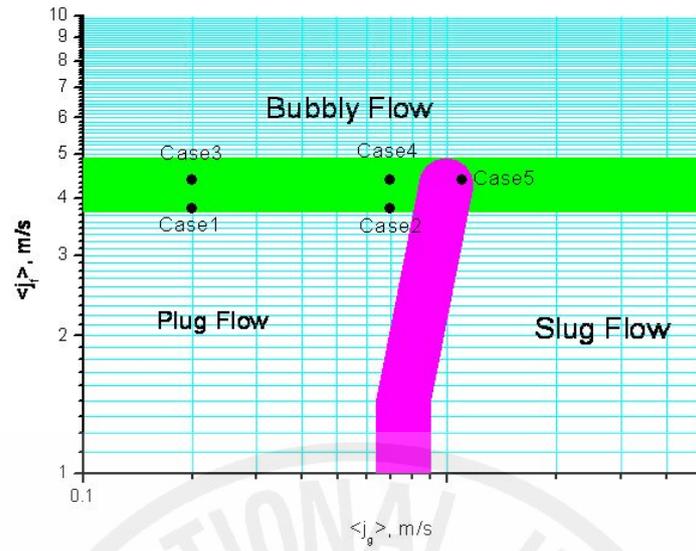


Fig. 4-9 The Flow Condition of Experiment 2 on the Horizontal Flow Regime.

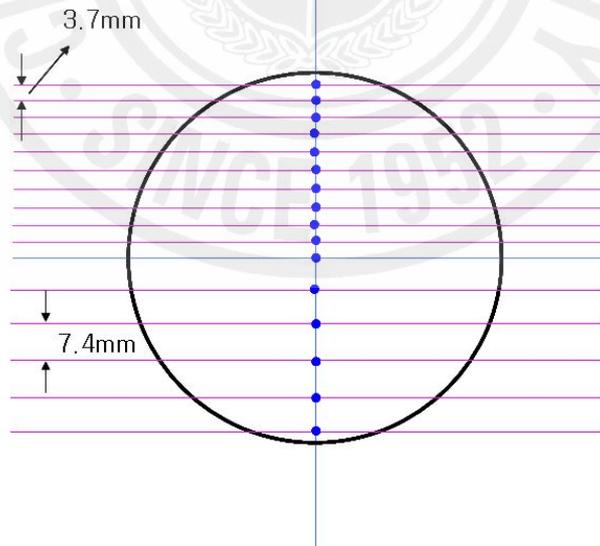


Fig. 4-10 The Position of Probe

## V. 실험 결과 및 토의

앞에서 말한 것과 같이 실험 1과 실험 2를 나누어 수행하였다. 그렇기 때문에, 실험 1에 대한 실험결과를 보고 난 후, 실험 2의 결과를 보겠다. 실험 1은 수평 2상 유동 양식을 판별한 것이다.

### 1. 초음파 센서를 이용한 수평 2상유동 양식 판별 실험에 대한 결과

실험 1은 유동의 양식을 판별할 수 있게 초음파 신호를 가지고 유동 조건을 무작위로 선택하여 측정한 것을 보여 준다.

먼저 판별하기 쉬운 플러그 유동과 슬러그 유동의 신호는 Fig. 5-1, Fig. 5-2와 Fig. 5-3, Fig. 5-4에 나타나 있다. 각각의 유동 조건은  $j_g=0.9\text{m/s}$ ,  $j_f=0.3\text{m/s}$ 와  $j_g=4.3\text{m/s}$ ,  $j_f=1.0\text{m/s}$ 이다. 그래프의 구성은 관 상부에서 얻은 신호와 관 하부에서 얻은 신호로 구성된다. 물에서는 초음파가 통과하지만 공기에서는 통과하지 않기 때문에, 물인 경우 약 4V 정도로 표시되고, 공기(기포)인 경우 초음파가 통과하지 못하기 때문에 0V로 표시된다. 그래서 플러그 유동인 경우 관상부에 물과 큰 기포가 번갈아 가며 흐르는 반복적인 모습을 보여주고, 관 하부에는 기포가 없이 물만 흐르는 전형적인 플러그 유동의 모습을 보여준다. 그리고 슬러그 유동 영역에의 특징은 액체 슬러그 안에 기포가 흐르는 것이 특징이다. 그래프에서 보는 것과 같이 4V에서 아주 가느다란 신호가 여럿 잡히는 것을 볼 수 있는데, 이것은 캡 기포 안에 작은 액적이 포함되어 있는 것을 말하는 것이다. 관 하부에는 상부에 캡 기포가 흐르는 시간에 물이 흐르고 난 후 액체 슬러그 안에 녹아 흐르는 기포들의 신호를 확인할 수 있다.

기포 유동은 크게 저유량과 고유량 영역으로 나뉘어서 설명하겠다. 이 기포 유동의 신호는 Fig. 5-5~Fig. 5-8에 나타나 있다. 일반적으로 수평 기포 유동은 관 상부에

기포가 모여 있는 것이다. 저유량인  $j_g=0.9\text{m/s}$ ,  $j_f=5.4\text{m/s}$ 에서의 경우 그 특징이 뚜렷하게 나타나는데, 관 상부 쪽의 신호를 보면 물의 신호보다 기포의 신호가 더 많이 보인다. 관 하부 쪽의 신호를 보면 대부분 물이 지나가며 가끔 기포가 흐르는 신호를 확인할 수 있다. 이것으로 수평 기포 유동은 부력의 영향을 받는다고 평가할 수 있다. 고유량인  $j_g=4.5\text{m/s}$ ,  $j_f=5.3\text{m/s}$ 에서의 경우는 부력의 영향을 받지 않는다고 평가할 수 있다. 관 상부 쪽의 신호를 보면 대부분 기포의 신호로 기포가 많아 초음파를 통과시키지 못할 정도로 많다는 것을 뜻하고 관 하부 쪽의 신호도 마찬가지로 많다. 이는 기체 유속이 크기 때문에 부력의 영향을 무시할 수 있을 정도로 큰 것이다. 나머지 지점도 크게 다르지 않기 때문에 대표적인 신호의 그래프만 넣었다.

마지막으로 성층류의 신호에 대해 설명하겠다. 성층류의 특성은 경계면에서 파형을 그리지 않고 관상부에는 기체만 흐르고 관 하부에는 물만 흐르는 상구분이 뚜렷한 유동이다. 성층류의 신호는 Fig. 5-9, Fig. 5-10에 나타나 있다. 신호는 위의 특징 그대로 표현해 주고 있다.

이로서 실험 1인 초음파 센서를 이용하여 수평 2상유동 양식을 판별할 수 있었다.

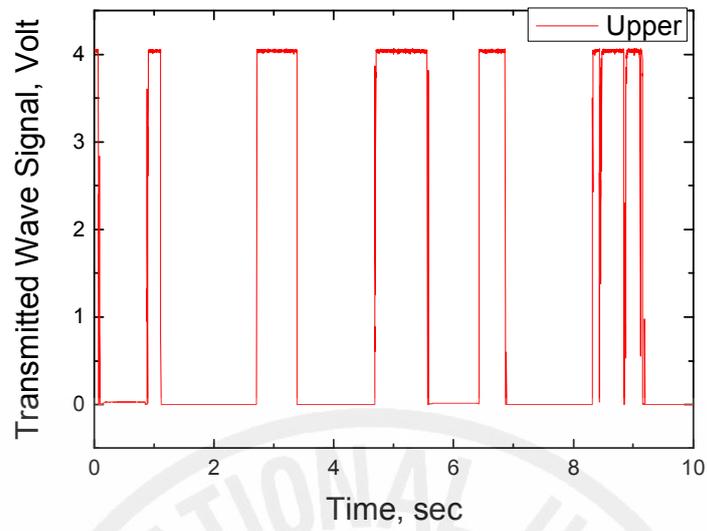


Fig. 5-1 A Plug Flow on the Upper Test Section at  $j_g = 0.9\text{m/s}$ ,  $j_f = 0.3\text{m/s}$  by Using Ultrasonic Sensor

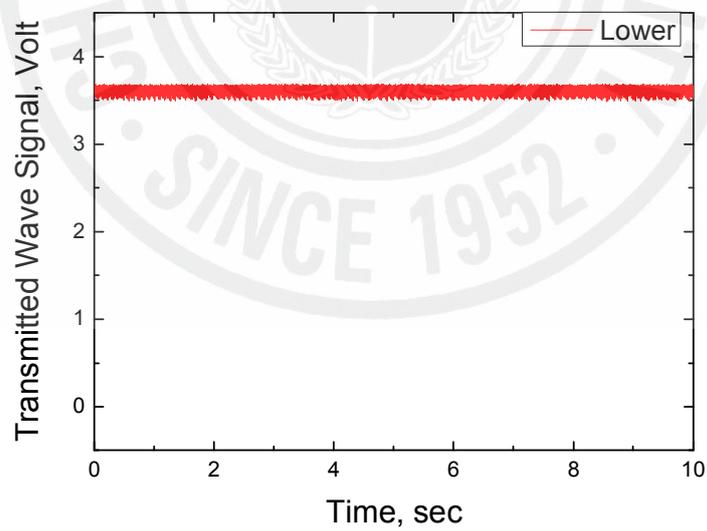


Fig. 5-2 A Plug Flow on the Lower Test Section at  $j_g = 0.9\text{m/s}$ ,  $j_f = 0.3\text{m/s}$  by Using Ultrasonic Sensor

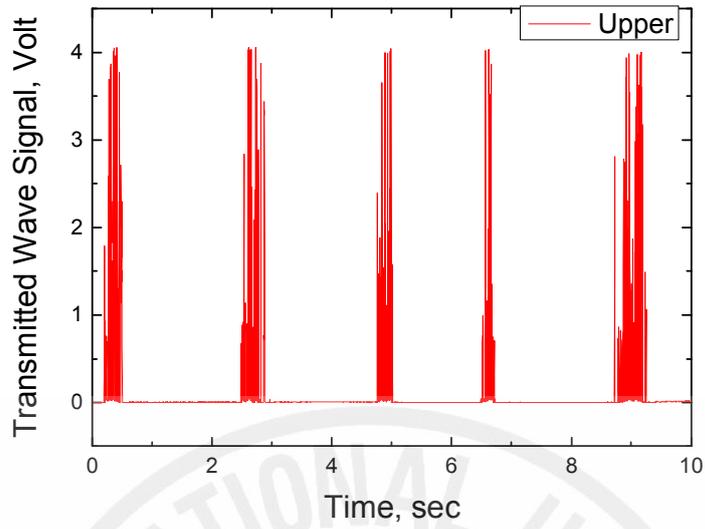


Fig. 5-3 A Slug Flow on the Upper Test Section at  $j_g = 4.3\text{m/s}$ ,  $j_f = 1.0\text{m/s}$  by Using Ultrasonic Sensor

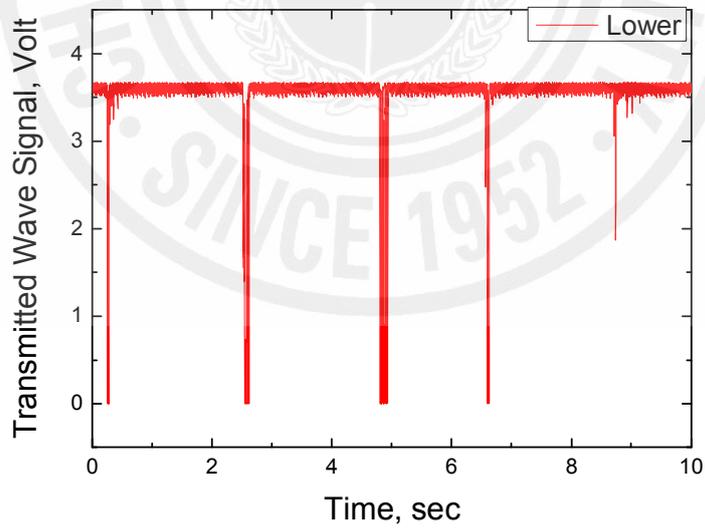


Fig. 5-4 A Slug Flow on the Lower Test Section at  $j_g = 4.3\text{m/s}$ ,  $j_f = 1.0\text{m/s}$  by Using Ultrasonic Sensor

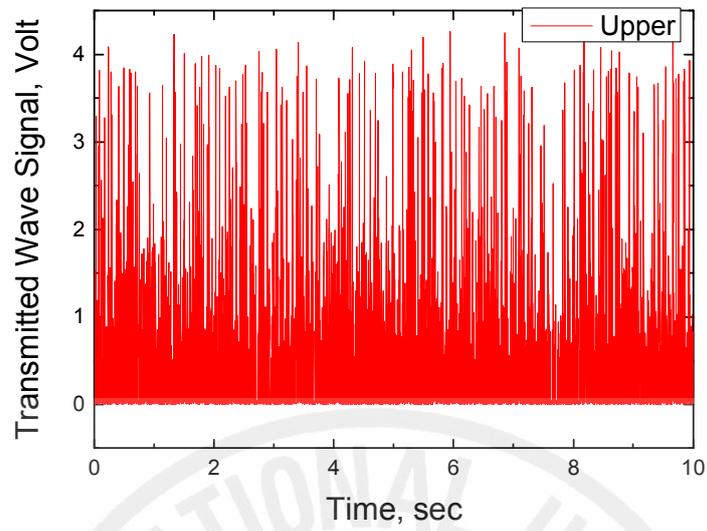


Fig. 5-5 A Bubbly Flow on the Upper Test Section at  $j_g = 0.9\text{m/s}$ ,  $j_f = 5.4\text{m/s}$  by Using Ultrasonic Sensor

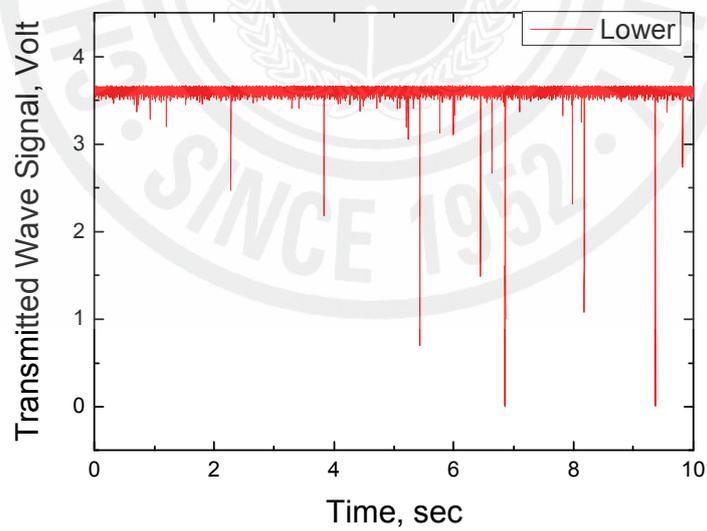


Fig. 5-6 A Bubbly Flow on the Lower Test Section at  $j_g = 0.9\text{m/s}$ ,  $j_f = 5.4\text{m/s}$  by Using Ultrasonic Sensor

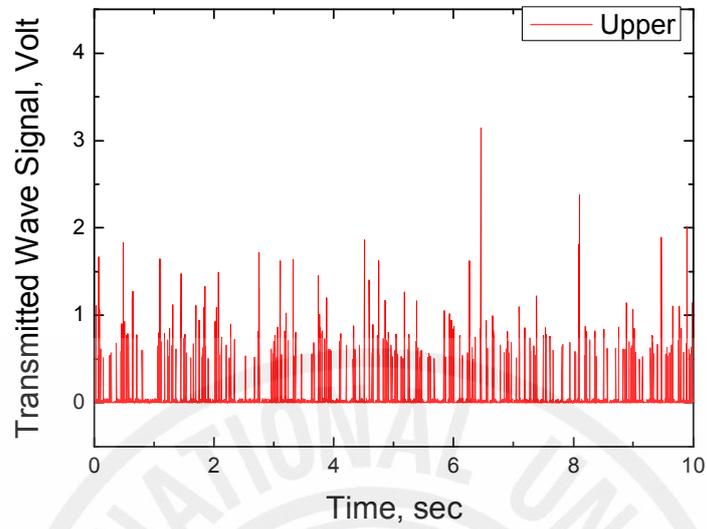


Fig. 5-7 A Bubbly Flow on the Upper Test Section at  $j_g = 4.5\text{m/s}$ ,  $j_f = 5.3\text{m/s}$  by Using Ultrasonic Sensor

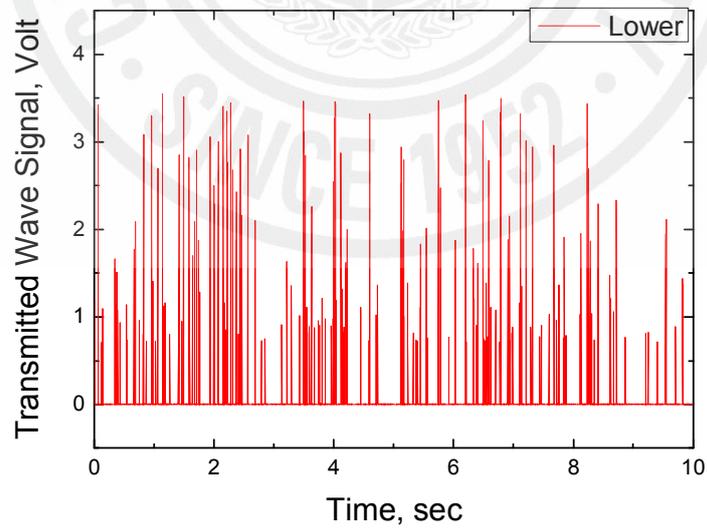


Fig. 5-8 A Bubbly Flow on the Lower Test Section at  $j_g = 4.5\text{m/s}$ ,  $j_f = 5.3\text{m/s}$  by Using Ultrasonic Sensor

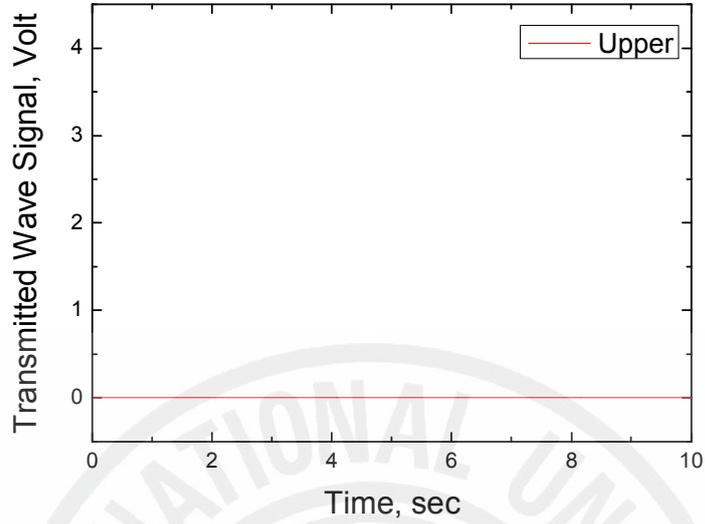


Fig. 5-9 A Stratified Flow on the Upper Test Section at  $j_a=1.24\text{m/s}$ ,  $j_f=0.11\text{m/s}$  by Using Ultrasonic Sensor

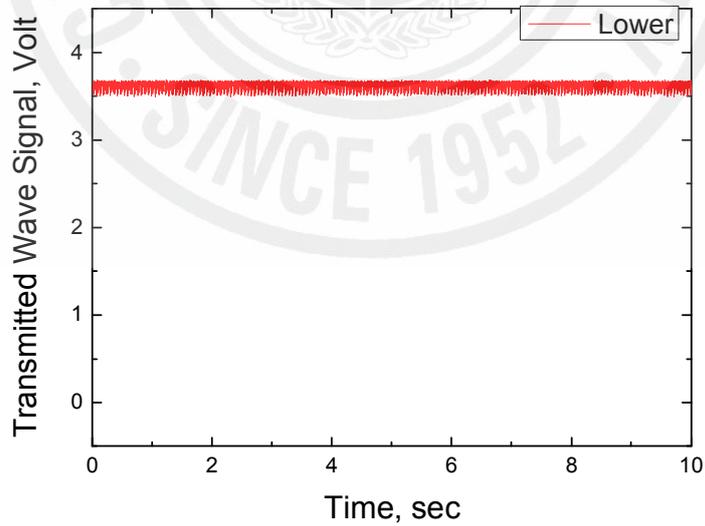


Fig. 5-10 A Stratified Flow on the Lower Test Section at  $j_a=1.24\text{m/s}$ ,  $j_f=0.11\text{m/s}$  by Using Ultrasonic Sensor

지금까지는 실험 1의 결과이고 다음은 실험 2인 수평관에서의 상 분포 특성을 파악한 실험이다. 각 개별 케이스에서의 상 분포 특성을 보고난 후, 기체 유량의 변화에 따른 특성과 액체 유량의 변화를 알아보겠다. 이 연구에서 계산된 변수들의 값들은 이전 논문에서의 국부적 계면 변수들의 값들보다 작은 값들을 갖는다. 이것은 작은 기포로 인해 신호가 작아져 노이즈와 판별이 불가능해지기 때문에, 신호가 노이즈를 제거하는 과정에서 많이 제거되었다. 그리고 기포들 사이의 간격이 거의 없어서 기포신호를 인식할 때, 신호들의 중첩으로 인하여 여러 개의 신호를 큰 기포의 신호로 인식한 것이라 보고 있다.

## 2. 일반적인 상 분포 특성 변화

Case 1은 공기 걸보기 속도  $\langle j_g \rangle$ 가 0.25m/s이고 물 걸보기 속도  $\langle j_f \rangle$ 가 3.8m/s이다. Case 1의 유동영역에 대한 사진은 Fig. 5-11에 나타나 있다. Case 1에 대한 기포율과 계면면적밀도의 분포, 기포 통과 주기와 기포 속도의 분포, Sauter mean diameter의 그림은 각각 Fig. 5-12, 5-13, 5-14에 나타나 있다.

Case 2는 공기 걸보기 속도가  $\langle j_g \rangle$ 가 0.7m/s이고 물 걸보기 속도  $\langle j_f \rangle$ 가 3.8m/s이다. Case 2의 유동영역에 대한 사진은 Fig. 5-15에 나타나 있다. Case 2에 대한 기포율과 계면면적밀도의 분포, 기포 통과 주기와 기포 속도의 분포, Sauter mean diameter의 그림은 각각 Fig. 5-16, 5-17, 5-18에 나타나 있다.

Case 3은 공기 걸보기 속도  $\langle j_g \rangle$ 가 0.25m/s이고 물 걸보기 속도  $\langle j_f \rangle$ 가 4.4m/s이다. Case 3의 유동영역에 대한 사진은 Fig. 5-19에 나타나 있다. Case 3에 대한 기포율과 계면면적밀도의 분포, 기포 통과 주기와 기포 속도의 분포, Sauter mean diameter의 그림은 각각 Fig. 5-20, 5-21, 5-22에 나타나 있다.

Case 4는 공기 걸보기 속도  $\langle j_g \rangle$ 가 0.7m/s이고 물 걸보기 속도  $\langle j_f \rangle$ 가 4.4m/s이다. Case 4의 유동영역에 대한 사진은 Fig. 5-23에 나타나 있다. Case 4에 대한 기포율과 계면면적밀도의 분포, 기포 통과 주기와 기포 속도의 분포, Sauter mean

diameter의 그림은 각각 Fig. 5-24, 5-25, 5-26에 나타나 있다.

Case 5는 공기 겉보기 속도  $\langle j_g \rangle$ 가 1.1m/s이고 물 겉보기 속도  $\langle j_f \rangle$ 가 4.4m/s이다. Case 5의 유동영역에 대한 사진은 Fig. 5-27에 나타나 있다. Case 5에 대한 기포율과 계면면적밀도의 분포, 기포 통과 주기와 기포 속도의 분포, Sauter mean diameter의 그림은 각각 Fig. 5-28, 5-29, 5-30에 나타나 있다.

위의 것들을 종합하여 볼 때, 사진에서 보는 것과 같이 수평관에서의 기포유동의 특성인 관 상부에 기포가 물리는 특성을 보여주고 있으며, 기포율과 계면면적밀도의 분포는 대략 비슷하게 분포한다는 것을 알 수 있다. 또한 기포율이 낮은 곳에서 계면면적밀도가 상대적으로 증가한 것은 보다 더 작은 기포가 많이 지나갔을 것이라고 생각되는데, 이것은 기포통과주기에서 확인이 된다. 기포 속도는 액체 속도보다 약간 낮은 수치를 보여주고 있지만 이전 관련 논문과 비교 시 타당한 수준으로 나타났다. Sauter mean diameter인 경우 서서히 증가하는 경향을 보였다. 이것은 수평 기포 유동은 관 상부에 기포들끼리 붙어서 가는 것을 센서에서 하나의 큰 기포로 인식하여 점점 증가한 것으로 보인다. 수평관에서의 계면구조의 연구는 거의 없었고 현재 새롭게 보완하고 있는 상황이기에 앞으로 더 많은 연구를 수행하게 되면 도움이 될 것이라 사료된다.



Fig. 5-11 The Photograph of Case 1

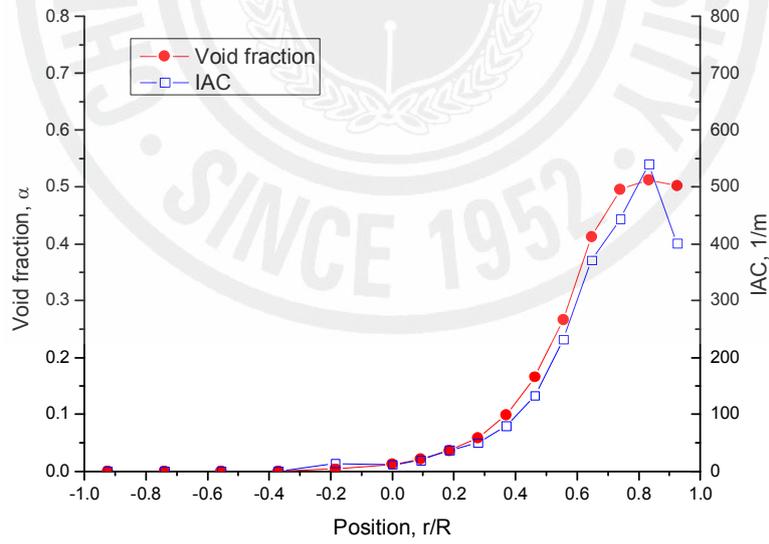


Fig. 5-12 The Profiles of Void Fraction and IAC of Case 1

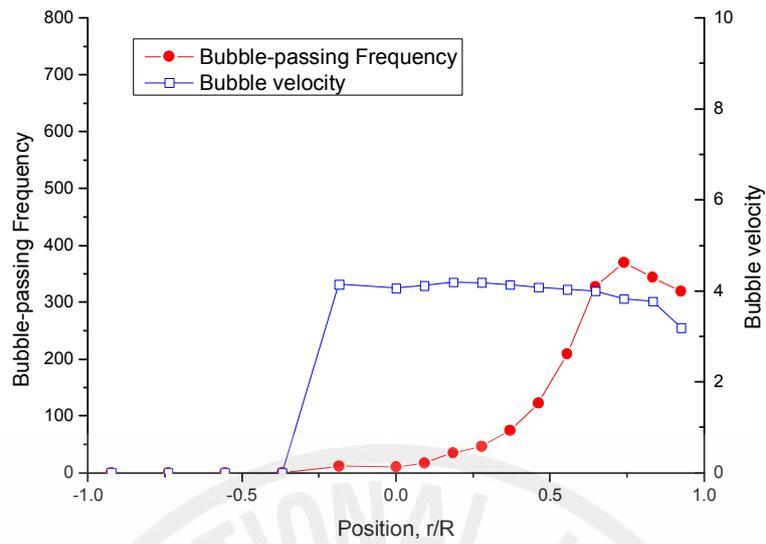


Fig. 5-13 The Profiles of Bubble-passing Frequency and Bubble Velocity of Case 1.

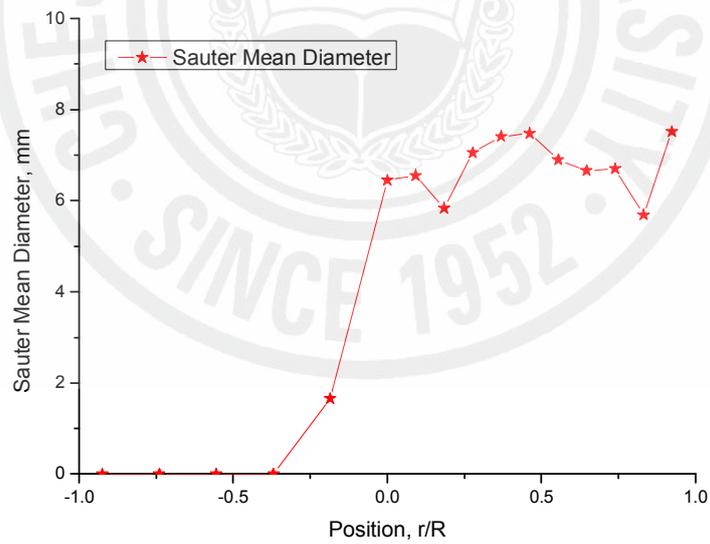


Fig. 5-14 The Profile of Sauter Mean Diameter of Case 1



Fig. 5-15 The Photograph of Case 2

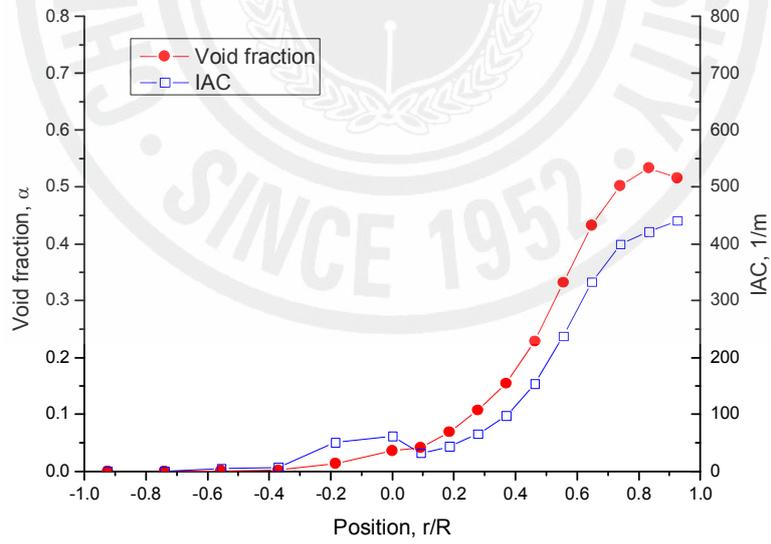


Fig. 5-16 The Profiles of Void Fraction and IAC of Case 2

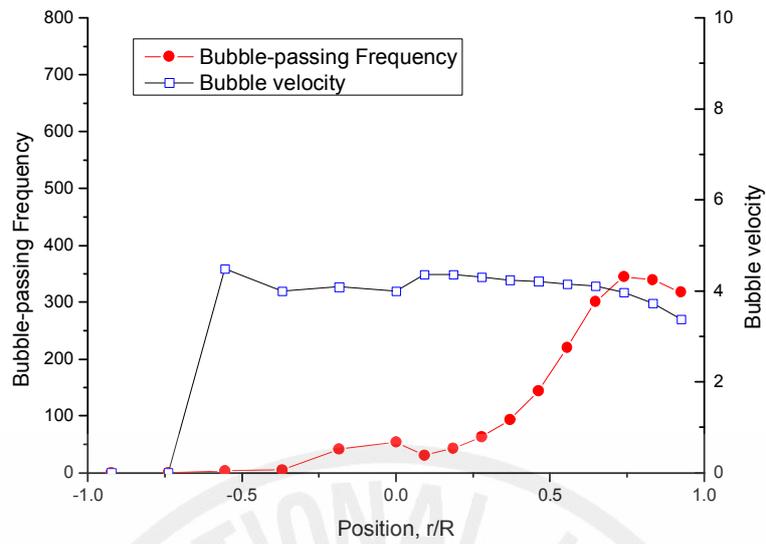


Fig. 5-17 The Profiles of Bubble-passing Frequency and Bubble Velocity of Case 2.

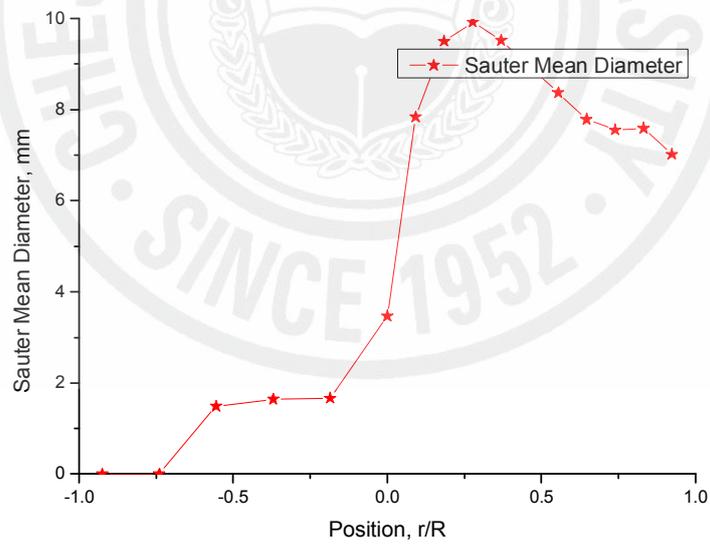


Fig. 5-18 The Profile of Sauter Mean Diameter of Case

2



Fig. 5-19 The Photograph of Case 3

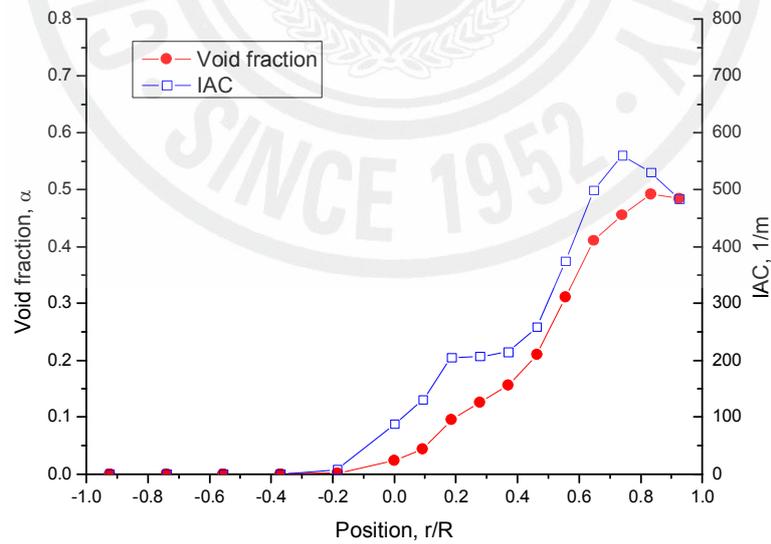


Fig. 5-20 The Profiles of Void Fraction and IAC of Case 3

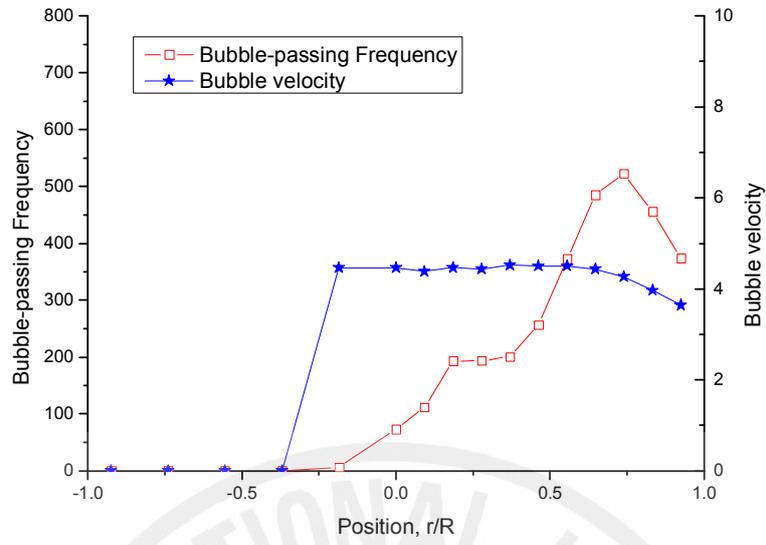


Fig. 5-21 The Profiles of Bubble-passing Frequency and Bubble Velocity of Case 3.

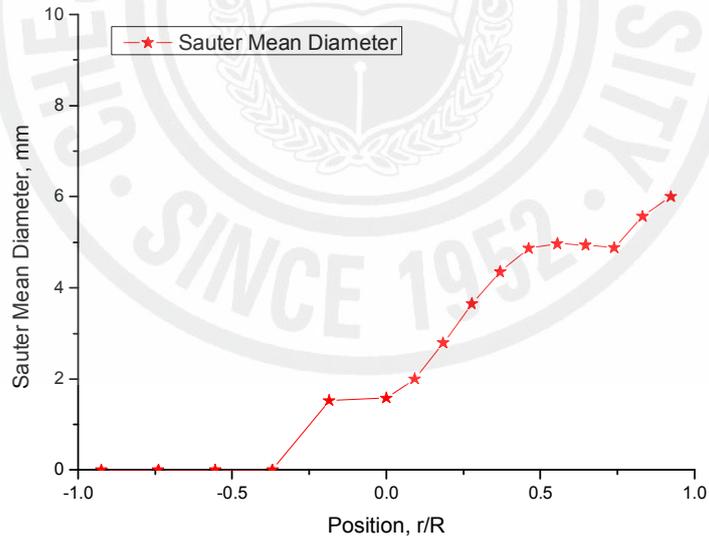


Fig. 5-22 The Profile of Sauter Mean Diameter of Case 3



Fig. 5-23 The Photograph of Case 4

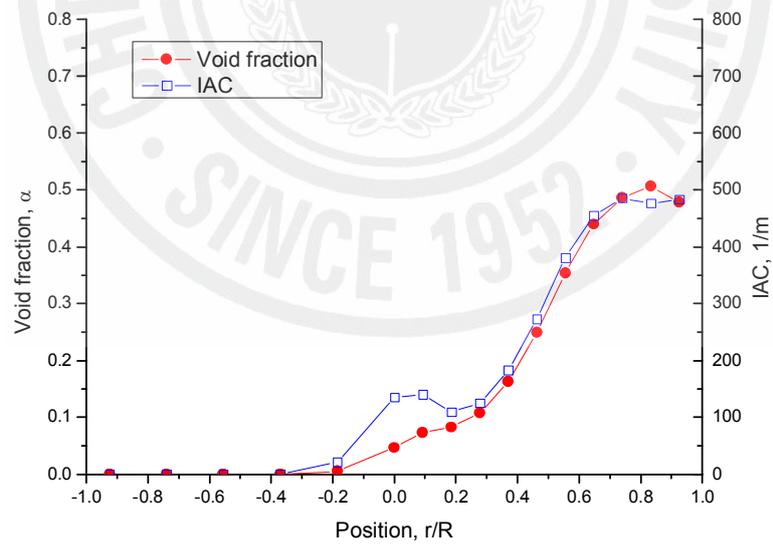


Fig. 5-24 The Profiles of Void Fraction and IAC of Case 4

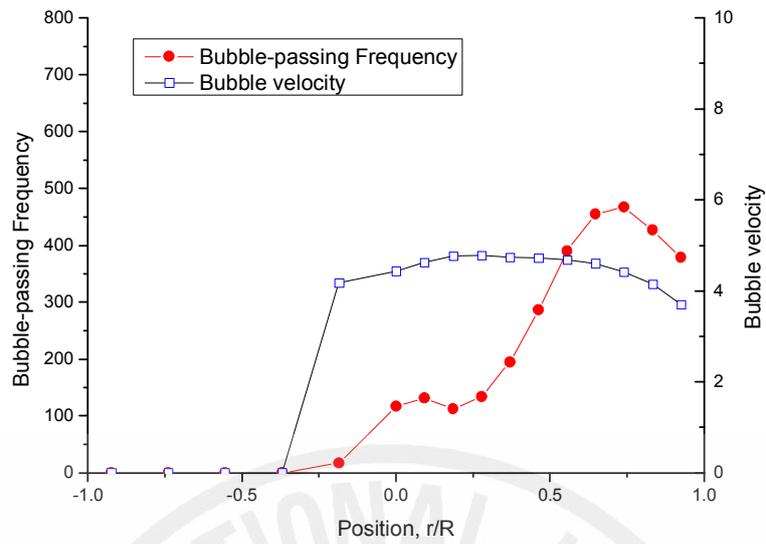


Fig. 5-25 The Profiles of Bubble-passing Frequency and Bubble Velocity of Case 4.

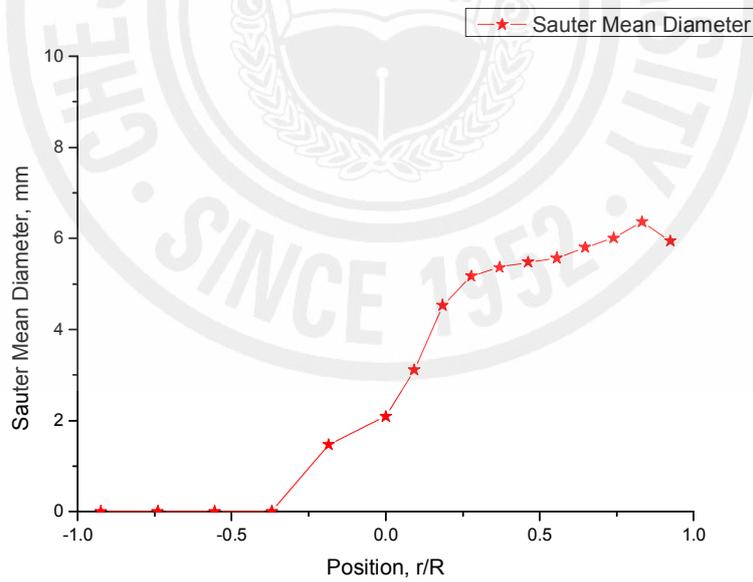


Fig. 5-26 The Profile of Sauter Mean Diameter of Case 4



Fig. 5-27 The Photograph of Case 5.

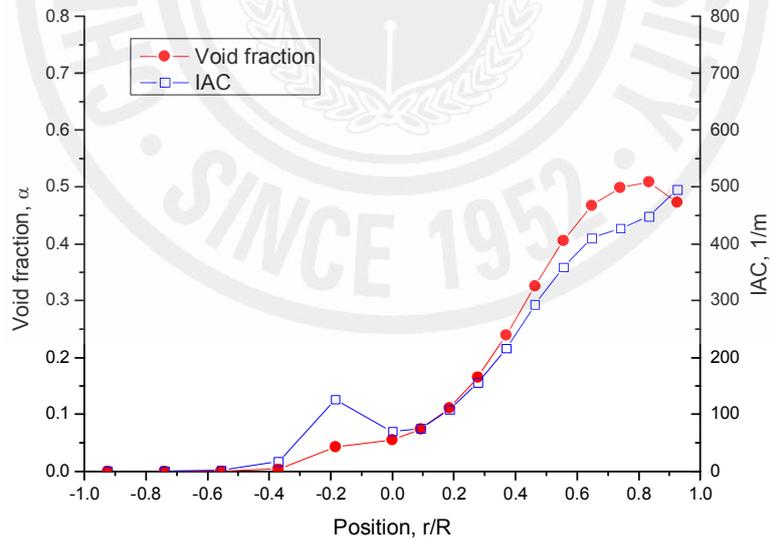


Fig. 5-28 The Profiles of Void Fraction and IAC of Case 5

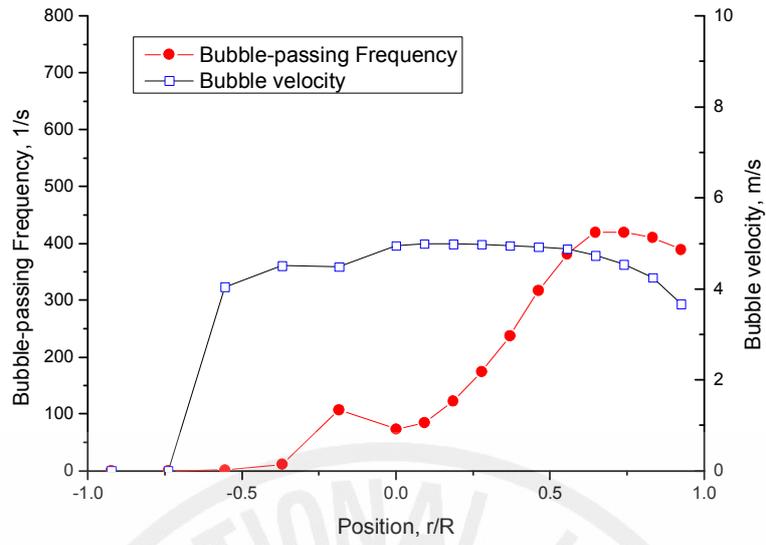


Fig. 5-29 The Profiles of Bubble-passing Frequency and Bubble Velocity of Case 5.

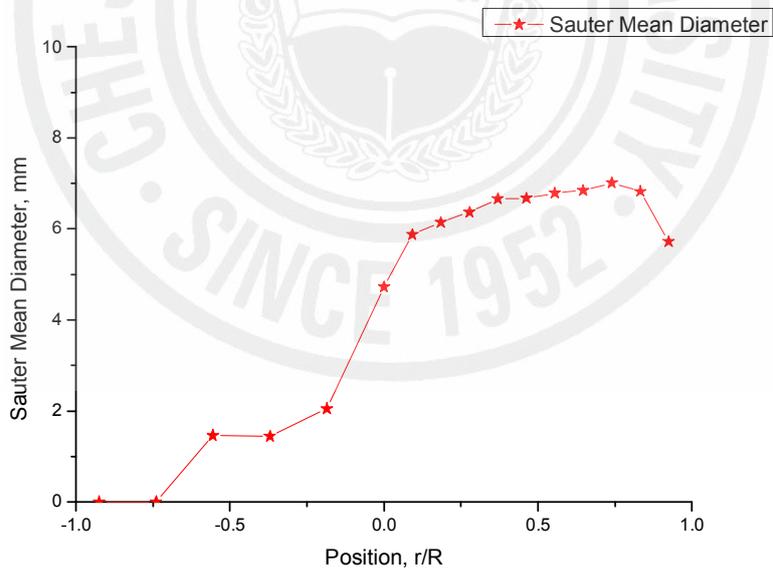


Fig. 5-30 The Profile of Sauter Mean Diameter of Case 5

### 3. 국소적 기포율 분포특성 변화

#### (1) 액체속도 변화에 따른 영향

0.25m/s의 일정한 기체 속도에서 액체 속도가 3.8m/s가 4.4m/s로 변할 때와 0.7m/s의 일정한 기체 속도에서 액체 속도가 위의 속도로 변할 때의 국소적 기포율의 분포의 그래프를 동시에 Fig. 5-31에서 나타냈다. 분포의 경향은 액체 속도가 변하면 피크 기포율이 감소하고, 전체적으로 평평한 경향을 보인다. 이것은 피크 위치에 있던 기포들이 액체 속도가 증가함에 따라 관 하부 쪽으로 이동하기 때문에 이러한 현상이 생기는 것으로 생각이 된다. 이 경향은 기존의 논문과 비슷했다. 그러나 기포율의 분포 모양은 이전 Kojasoy 외(2001)의 연구에서와 비교했을 때 관 상부에서 안 맞지만, 이는 관 크기에 따라 특성 속도가 다르기 때문이라고 생각이 된다. 즉, Kojasoy 외의 논문에서는 3.8m/s와 4.4m/s는 분포 모양이 다른 속도이지만, 이 연구에서 이 속도들은 분포 모양이 비교적 비슷한 속도인 것으로 볼 수 있겠다.

#### (2) 기체속도 변화에 따른 영향

3.8m/s의 일정한 액체 속도에서 변하는 기체 속도에 따른 영향과 4.4m/s의 일정한 액체 속도에서 변하는 기체 속도에 따른 영향을 같이 Fig. 5-32에 나타내었다. 그림을 보면 기체의 속도가 0.25m/s에서 0.7m/s로 증가하면 기체의 양도 많아지기 때문에, 기포율의 분포가 0.25m/s 일 때보다 더 두터워진 양상을 띤다. 마찬가지로 관상부에서도 기포율이 증가할 것이라 생각했는데, 증가하지 않는 실험 결과를 보였다. 기포의 양과 크기가 증가하기 때문에 앞에서 언급한 기포의 신호들이 간격을 유지하지 못하고 중첩이 발생하여 하나의 큰 기포로 인식하여 증가하지 않았다고 생각이 된다. 최대 피크 값이 기존 Kocamustafaogullri 외(1991)와 Kojasoy 외의 연구를 보면 0.6~0.65로 나와 있는데, 이 실험에서는 피크 기포율이 다소 낮게 나왔기 때문에 존재 여부를 확인할 수 없었다.

#### 4. 기포 통과주기 분포특성 변화

##### (1) 액체속도의 변화에 따른 영향

0.25m/s의 일정한 기체 속도에서 액체 속도가 3.8m/s와 4.4m/s로 변할 때와 0.7m/s의 일정한 기체 속도에서 액체 속도가 3.8m/s와 4.4m/s로 변할 때 기포 주기 분포 그래프를 동시에 비교가능하게 Fig. 5-33에 나타내었다. 0.25m/s와 0.7m/s에서 각각 동일한 기체 속도인 경우에는 4.4m/s의 액체 속도에서 더 많은 기포 주기를 보여주었는데, 이는 액체 속도가 더 빨라지면 난류를 더 많이 발생시켜서 기포가 잘게 분열이 되었을 것이라 생각된다. 이 분포의 변화도 기포율 분포와 비슷하지만 관 상부에는 다르게 나타났다. 주기가 감소하는데, 기포로 인하여 발생한 난류와 액체 유동의 저항으로 인하여 기포 속도가 느려지기 때문에 통과한 양이 감소된 거라 생각된다.

##### (2) 기체속도의 변화에 따른 영향

3.8m/s의 일정한 액체 속도에서 기체 속도가 0.25m/s와 0.7m/s로 변할 때와 4.4m/s의 일정한 액체 속도에서 기체 속도가 0.25m/s, 0.7m/s와 1.1m/s로 변할 때 기포 주기 분포 그래프를 동시에 비교 가능하도록 Fig. 5-34에 나타내었다. 전체적으로 액체 속도가 4.4m/s일 때가 기포 주기 분포가 넓어진다는 것을 확인할 수 있고, 간혹 관 상부에 기포 주기가 감소하지 않는 것은 데이터 처리과정에서 약간의 오류라고 볼 수 있는데 추후에 확인해야 할 필요가 있다. 또한 기체 속도가 커지면 주기도 커져야 하는데, 작아진 이유는 앞에서 언급한 신호의 중첩으로 인하여 기포 수가 감소한 것이라 생각이 된다. 참고로 Kocamustafaogullari 외의 연구에서는 기포 주기가 최대 2200/s까지 올라갔다고 보여준다.

단지 이 그래프를 보고 관상부에 기포 주기의 최대치가 존재하기 때문에 그 위치

에서 기포율 분포나 계면면적밀도의 분포가 최대가 되는 것을 설명할 수 있다.

## 5. 국소적 계면면적 밀도 분포 특성 변화

### (1) 액체속도 변화에 따른 영향

0.25m/s의 일정한 기체 속도에서 3.8m/s에서 4.4m/s로 변하는 계면면적밀도의 변화의 그래프와 0.7m/s의 일정한 기체 속도에서 3.8m/s에서 4.4m/s로 변하는 계면면적밀도의 변화의 그래프는 Fig. 5-35에 나타나 있다. 대체적으로 이 계면면적밀도는 기포율의 분포와 비슷한 분포를 가진다. 같은 기포 속도일 때 액체의 속도가 증가하면 계면면적밀도의 분포도 커진다는 것은 작은 기포가 많아진다는 것을 의미한다. 액체 속도가 증가하면서 액체가 난류를 발생시켜 기포를 쪼개는 역할을 하여 보다 더 작은 기포들의 수가 증가했기 때문에, 계면면적밀도가 증가하였기 때문이라고 본다.

### (2) 기체속도 변화에 따른 영향

각각 3.8m/s와 4.4mm/s의 일정한 액체 속도에서 기체 속도의 변화에 따른 영향은 Fig. 5-26 에 보여주고 있다.

기존의 Kocamustafagoulli 외의 연구에서 측정된 국부적 계면면적밀도를 보면 1000/m이 넘는데, 이 실험에서는 700~800/m정도 밖에 안 나타났다. 이는 데이터 처리에서 문제가 있는 것으로 작은 기포들의 신호가 노이즈와 구별할 수 없을 정도로 낮게 검출되기 때문에, 작은 기포들은 노이즈와 함께 제거되면서 낮은 수치로 검출되었다고 생각된다. 또한 다른 이유로는 신호의 중첩으로 인해 큰 기포로 신호를 잘못 인식하기 때문이라 생각된다. 이것은 차후에 프로그램에서 수정되어야 할 것으로 생각된다.

## 6. 기포 크기 분포특성 변화

위의 계면면적밀도와 관련하여 계면면적밀도의 정의는 표면과 체적의 비율로 정의할 수 있다. 작은 기포의 표면과 체적의 비율이 큰 기포의 경우보다 커지기 때문에, 계면면적밀도는 기포 크기에 의해 영향을 받는다. 기포가 구형이 아닐 때에는, 체적과 표면 면적 비율은 같은 기포율에서 기포의 모양에 의존하게 된다.

기포 크기는 위의 식 (3)으로 계산이 된다. 기존의 Kocamustafaogullari 외의 연구에서 기포의 크기는 위치와 유동 조건에 따라 2~5mm로 말하고 있으나 이 실험에서는 1~8mm 정도로 계산되었다.

### (1) 일정한 기체 유량에서 변하는 액체 유량에 따른 영향

각각 0.25m/s와 0.7m/s의 일정한 기체 속도에서 액체 속도의 변화에 따른 영향을 보여주는 그래프는 Fig. 5-37에 나타나 있다. 0.25m/s의 일정한 기체 속도에서 액체 속도가 커지면 기포 크기도 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이것은 앞에서도 말한 것과 같이 액체 속도가 증가하면 난류가 더 발달하기 때문에 기포들이 더 많은 분열이 일어져 크기를 감소시키는 것이라 생각된다.

### (2) 일정한 액체 유량에서 변하는 기체 유량에 따른 영향

각각 3.8m/s와 4.4m/s의 일정한 액체 속도에서 기체 속도의 변화에 따른 영향을 보여주는 그래프는 Fig. 5-38에 나타나 있다. 일정한 액체 속도에서 기체 속도가 증가하면 기체의 양이 증가하기 때문에 기포의 크기가 커진다는 것을 확인할 수 있다.

## 7. 기포속도 분포특성 변화

### (1) 액체속도 변화에 따른 영향

각각 0.25m/s와 0.7m/s의 일정한 기체 속도에서 액체 속도의 변화에 따른 영향을 보여주는 그래프는 Fig. 5-39에 나타나 있다. 기포가 검출이 안 된 곳은 속도가 0으로 나왔고, 비교적 액체 속도와 비슷하게 기포속도가 계산되었다. 비교적 일정한 속도를 보여주고 액체 속도가 증가할수록 기포 속도도 증가한다. 관 상부는 액체유동의 저항과 기포로 인해 발생한 난류 때문에 기포의 속도가 감소한 것으로 생각된다.

## (2) 기체속도 변화에 따른 영향

각각 3.8m/s와 4.4m/s의 일정한 액체 속도에서 기체 속도의 변화에 따른 영향을 보여주는 그래프는 Fig. 5-40에 나타나 있다. 여기에서도 마찬가지로 기포가 검출이 안 된 곳은 0으로 나왔고, 비교적 액체 속도와 비슷하게 기포속도를 보여 주고 있다. 또한 관 상부 쪽으로 갈수록 기포 속도가 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 액체유동의 저항과 기포로 인해 발생한 난류 때문에 기포의 속도가 감소한 것으로 생각된다.

이상 실험 2인 수평 분산 기포유동의 상 분포 특성을 살펴보았다. 위에서 설명을 했지만, 2-센서 전도 프로브의 신호가 수평 분산 기포유동의 조건에서는 최적의 신호특성을 보여주지 않는다는 것을 보여준다. 프로브의 Wetting으로 인해 기포의 신호가 늦게 형성이 된다. 이 늦게 형성되는 신호는 빠른 기포의 속도 때문에 신호의 중첩이 발생하고 기포의 구분을 어렵게 한다. 또한 전도 프로브가 전기적인 신호를 가지고 진행이 되는 것이기 때문에, 전기적인 노이즈가 없는 깨끗한 환경에서 진행되어야 한다. 또한 응답속도가 빠른 광센서를 이용하면 기포의 신호가 더 정확하게 구분이 되어 더 적합할 것이라 보고 있다.

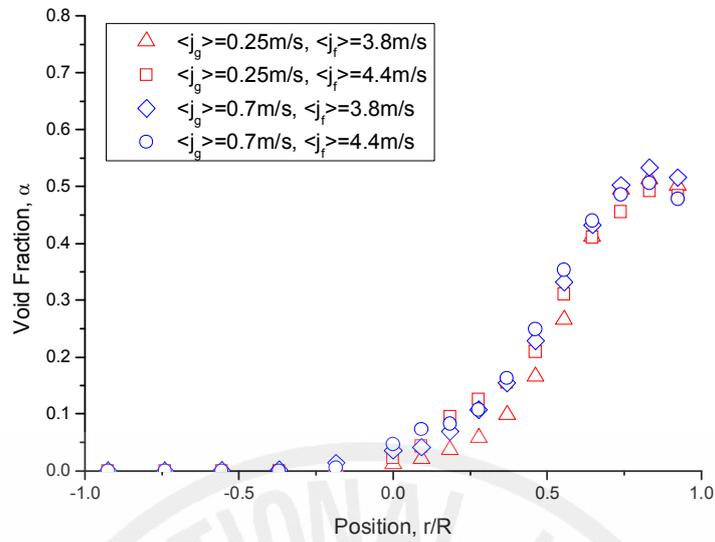


Fig. 5-31 The Comparison of Influences of Liquid Velocity on Local Void Fraction at the Gas Velocity between 0.25m/s and 0.7m/s

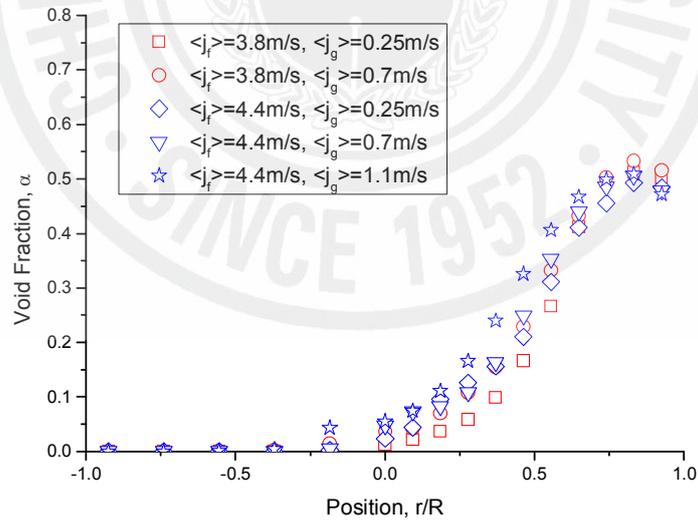


Fig. 5-32 The Comparison of Influences of Gas velocity on Local Void Fraction at Liquid Velocity between 3.8m/s and 4.4m/s

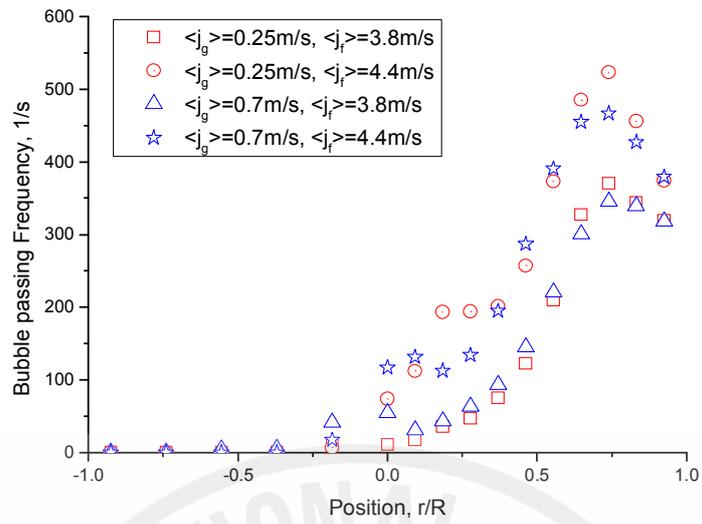


Fig. 5-33 The Comparison of Influences of Liquid Velocity on the Bubble Frequency at the Gas Velocity between 0.25m/s and 0.7m/s

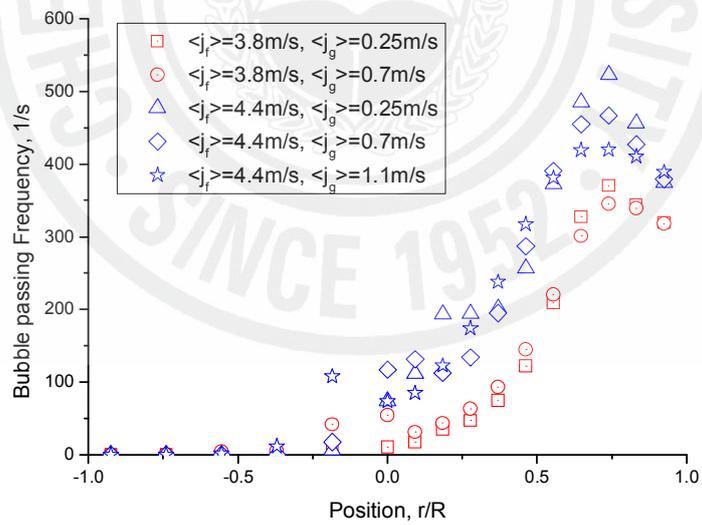


Fig. 5-34 The Comparison of Influences of Gas Velocity on the Bubble Frequency at the Liquid Velocity between 3.8m/s and 4.4m/s

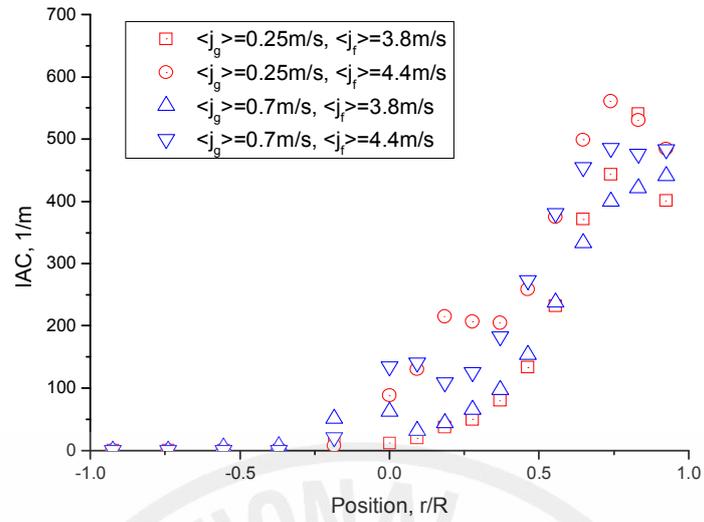


Fig. 5-35 The Comparison of Influences of Liquid Velocity on the IAC at the Gas Velocity between 0.25m/s and 0.7m/s

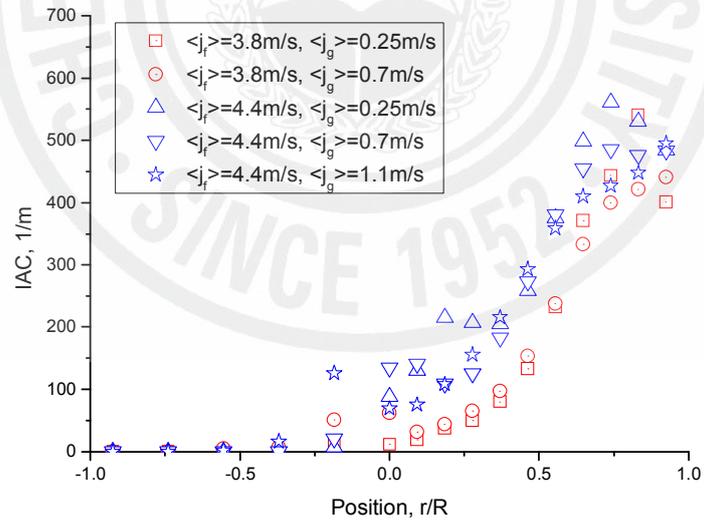


Fig. 5-36 The Comparison of Influences of Gas Velocity on the IAC at the Liquid Velocity between 3.8m/s and 4.4m/s

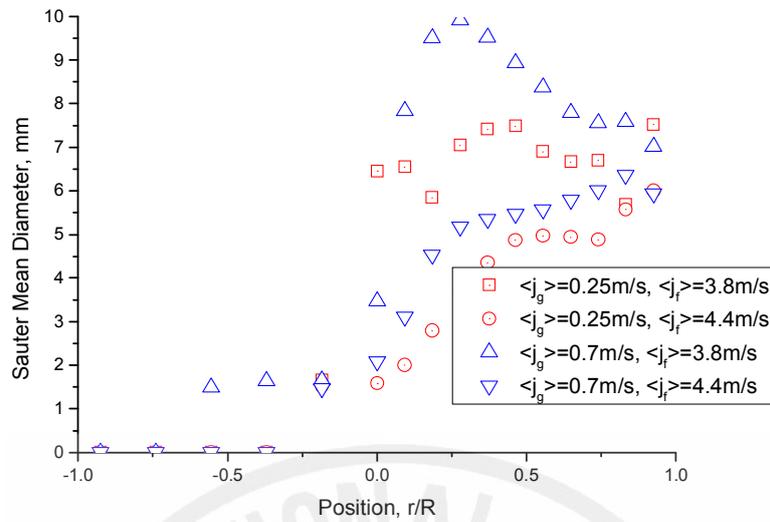


Fig. 5-37 The Comparison of Influences of Liquid Velocity on the Sauter Mean Diameter at the Gas Velocity between 0.25m/s and 0.7m/s

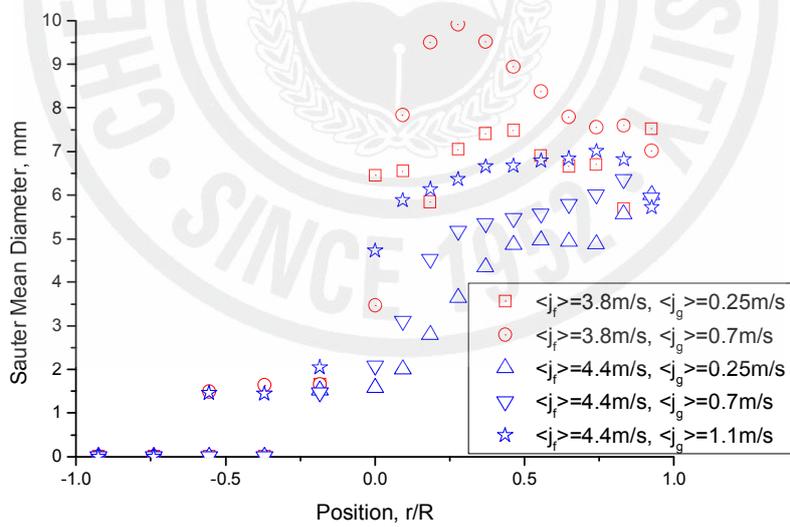


Fig. 5-38 The Comparison of Influences of Gas Velocity on the Sauter Mean Diameter at the Liquid Velocity between 3.8m/s and 4.4m/s

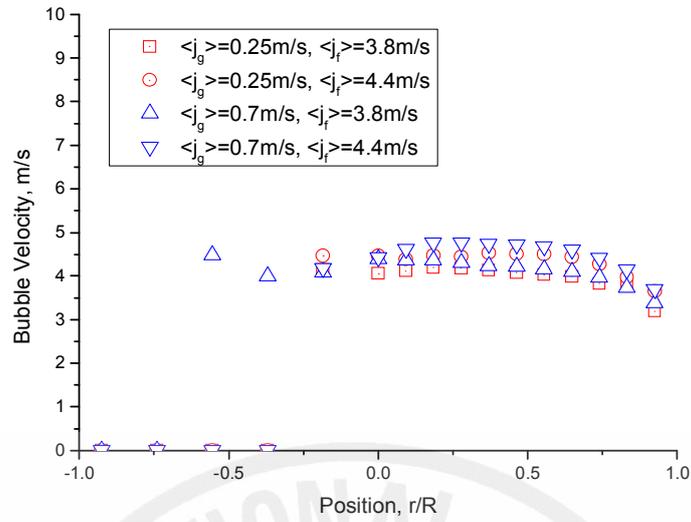


Fig. 5-39 The Comparison of Influences of Liquid Velocity on the Bubble velocity at the Gas Velocity between 0.25m/s and 0.7m/s

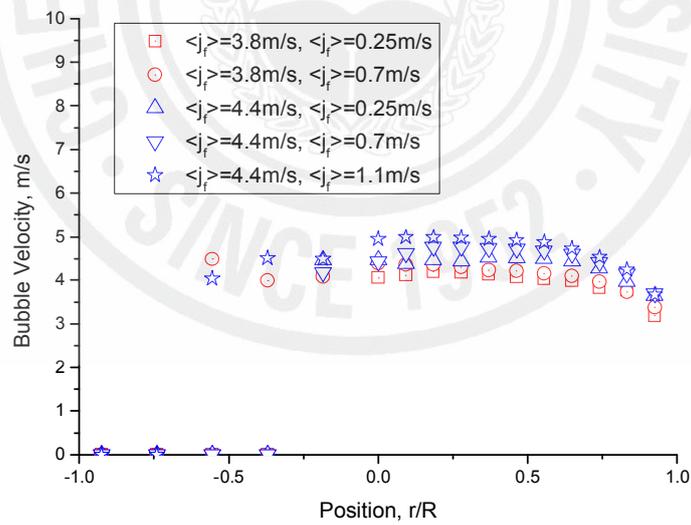


Fig. 5-40 The Comparison of Influences of Gas Velocity on the Bubble velocity at the Liquid Velocity between 3.8m/s and 4.4m/s

## V. 결 론

Two-fluid 모델에서 독립적인 각 상들 사이의 상호작용하는 식에는 계면이라는 변수가 있다. 이런 계면은 유동 조건에 따라 계면 형상이 달라지고 계면 사이의 전달량은 계면면적에 비례하기 때문에, 이런 계면에 관한 변수들을 측정함으로써 분산 기포 유동의 질량, 운동량, 에너지의 전달능력을 평가할 수 있다.

이 연구에서는 2가지의 실험을 했다. 실험 1은 80mm의 직경 투명한 관에서 초음파 센서를 이용하여 수평 2상유동의 양식을 판별했다. 실험 2는 같은 직경의 관에서 물-공기 기포 유동의 계면 구조는 2-센서 프로브 기술을 사용하여 실험적으로 연구했다. 액체와 기체 표면 속도의 범위가 각각 3.8~4.4m/s와 0.2~1.1m/s이다. 기포율, 계면면적밀도, 평균 기포 직경 그리고 기포 통과 주기의 국소적인 값이 측정되었다.

실험 결과는 초음파를 이용하여 수평 2상유동의 양식을 판별할 수 있었고, 실험2에서는 기포율, 계면면적밀도 그리고 기포 통과 주기가 관 상부 벽 근처에 국부적인 최대를 가지고 Profile들은 기체 속도가 증가함에 따라 평평해지는 경향을 가짐을 확인할 수 있다. 수평 기포 유동에서 관찰된 피크 기포율, 피크 계면면적밀도, 기포 통과주기가 기존의 연구의 값보다 낮은 값으로 나왔다.

그리고 관 하부에 기포율이 없는 이유는 액체 층이 존재하고 기포들이 부력에 의해 관 상부에 몰려들었기 때문이라고 말할 수 있다. 그러나 기체 속도가 증가하면 기포수가 증가하여 이 액체 층이 줄어들게 된다.

기포통과주기가 관 상부에서 최대로 되는 것이 국소적 기포율과 계면면적밀도가 최대가 되는 것을 설명할 수 있다.

앞에서도 말했지만, 계면 매개변수의 값이 기존의 것보다 낮게 나왔다. 이것은 프로브의 젖는 현상으로 인하여 기포의 신호가 완전히 만들어지지 않고 중첩되는 효과를 보였기 때문이라 생각하고, 또한 전기적인 신호를 받기에 좋지 않은 환경이면 2-센서 전도 프로브는 적합하지 않다고 생각이 된다. 또한 더 정확한 신호를 얻기 위해서는 응답신호가 매우 좋은 광센서를 이용하는 것이 좋다고 생각한다. 또한

앞으로 더 체계적인 연구를 위해서는 유동이 발달하면서 변화하는 상 분포를 파악하기 위한 실험이 수행되어야 하고, 관 전체적으로 2차원적 분포특성을 얻어서 단면에 평균화된 상 분포에 대한 정보를 얻을 수 있는 과정이 필요할 것이다.



## 참 고 문 헌

박군철 등, “경사유로 내에서 이상유동 현상에 관한 실험적 연구”, KAERI/CM-084/96, 1996

송철화 등, “원자로계통 핵심 열수력 특성 실험”, KAERI/RR-2535/2004, 2004

윤병조, “미포화 비등 영역에서 이상유동 변수의 측정”, 서울대, 1996

어동진, “계면면적밀도에 대한 측정기술 및 해석방법에 대한 연구”, 서울대, 2002

이상용 등, “이상유동 열전달”, 대영사, 1999

허병길 등, “수직 2상유동에서의 계면면적 전파특성에 관한 실험 및 해석”, KAERI/TR-2955/2005, 2005

A. Serizawa et al., “TURBULENCE STRUCTURE OF AIR-WATER BUBBLY FLOW”, International Journal of Multiphase Flow, 2, pp. 221-246, 1975.

T. Hibiki et al., “Axial interfacial area transport of vertical bubbly flows”, International Journal of Heat and Mass Transfer, 44, pp.1869-1999, 2001

S. Kim et al., “Interfacial structures of confined air-water two-phase bubbly flow”, Experimental Thermal and Fluid Science, 26, pp.461-472, 2002

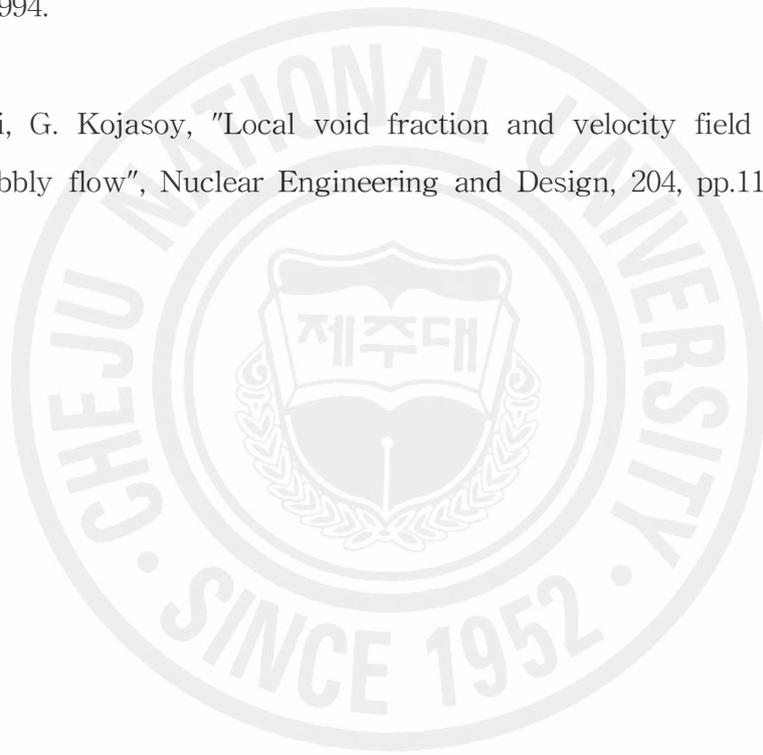
G. Kocamustafaogullari & Z. Wang, “An Experimental Study On Local Interfacial Parameters In a Horizontal Bubbly Two-phase Flow”, International Journal of

Multiphase Flow, 17, No. 5, pp.553-572, 1991.

G. Kocamustafaogullari & W.D. Huang, "Internal structure and interfacial velocity development for bubbly two-phase flow", Nuclear Engineering and Design, 151, pp.79-101, 1994.

G. Kocamustafaogullari et al., "Measurement and modeling of average void fraction, bubble size and interfacial area", Nuclear Engineering and Design, 148, pp.437-453, 1994.

A. Iskandrani, G. Kojasoy, "Local void fraction and velocity field description in horizontal bubbly flow", Nuclear Engineering and Design, 204, pp.117-128, 2001.



## 감사의 글

졸업을 앞두고 학연학생의 생활을 하면서 여러 가지를 배울 수 있는 기회가 많았음에도 불구하고 많이 배우지 못한 것 같아 아쉬움이 남습니다. 그러나 2년이라는 짧은 시간동안 주위의 소중한 분들께서 부족한 저를 도와주신 덕분에 이 논문을 통해 저의 작은 결실을 맺을 수 있게 되었습니다. 그래서 이 소중한 분들께 이 지면을 통해 저의 마음을 표현하고자 몇 자 적어 봅니다.

먼저 부족한 저를 세심한 지도와 배려를 해 주시고 학연학생의 길을 갈 수 있도록 해주신 김신 교수님, 논문을 심사숙고를 하여 심사하시며 애써주신 정범진 교수님, 송철화 박사님께 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 학부 4년과 석사 2년 동안 저에게 가르침을 주신 이윤준 교수님, 이현주 교수님, 박재우 교수님, 김남진 교수님께 감사의 말씀을 드립니다.

학연학생으로 저를 받아 주시어 논문의 지도뿐만 아니라 아낌없는 지원을 해 주신 송철화 박사님께 특별히 감사의 말씀을 드립니다. 바쁘신 와중에도 실험에서 제일 필요한 것과 조언들을 지원해주신 윤병조 박사님, 어동진 박사님 그리고 박원만 선생님께도 감사의 말씀을 전합니다.

또한 바쁘신 와중에도 장치 구축과 미숙한 제가 실험하는데 옆에서 도와주시고 많은 조언을 주신 주인철 선배, 같은 방에서 계속적으로 관심을 갖어주신 권태순 박사님과 박춘경 박사님 그리고 실험실에 필요한 장비확보와 인적으로 도와주신 최남현 선생님과 민경호 선생님께 감사의 말씀을 드립니다. 많은 격려와 도움을 주신 열수력 안전 연구부의 모든 분들께도 감사의 말씀을 드립니다.

대학원에 들어와서 고민과 걱정을 들어 주어시고 의지가 된 영주 누나, 준호 형, 지훈이 형께 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 같은 학연학생으로서 연구소에 온 재철이, 학부 동기이자 1년 늦게 학연학생으로 온 덕지 그리고 학교에 있으면서 많은 도움을 주었던 동기 덕원이에게 서로 의지할 수 있어서 고맙다는 말을 전합니다. 그리고 실험실 후배로서 필요한 것들을 도와준 순일과 정성이 그리고 실험실 후배들에게도 고맙다는 말을 전합니다. 또한 학부 4년 동안 같은 수업을 들으며 진로에 대한 많은 얘기들을 나눴던 98학번 동기들에게 모두 잘 되길 건투를 빕니다.

그리고 변함없는 우정을 보여준 중고등학교 친구들인 성한, 경남, 유성 등에게 연락을 자주는 못하지만 항상 편하게 대해줘서 고맙다는 말을 전합니다.

저를 낳아 길러주시고 바른 길로 인도하여 주시고 편안하게 학업에 열중하게끔 해주신 아버지와 어머니께, 듬직하게 동생을 돌봐준 큰 형님 내외와 작은 형님 내외께 감사의 말씀을 드립니다. 떨어져서 지내면서도 논문에 전념할 수 있게 해주고 옆에서 격려를 해 준 사랑스러운 경애에게 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

마지막으로 저에게 사랑을 베풀어 주신 모든 분들에게 감사하며 이 논문을 드립니다.