



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

수평관 및 경사관에서 기포율 및  
속도 동시측정을 위한 임피던스  
센서 개발

濟州大學校 大學院

에너지 工學科

元 又 妍

2016年 2月

# 수평관 및 경사관에서 기포율 및 속도 동시측정을 위한 임피던스 센서 개발

指導教授 李 演 鍵

元 又 妍

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2015年 12月

元又妍의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 金 南 鎮

委 員 李 演 鍵

委 員 崔 秀 錫



濟州大學校 大學院

2015年 12月



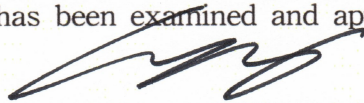
Development of an impedance sensor for  
simultaneous measurement of void  
fraction and velocity of the two-phase  
flow in horizontal and near-horizontal  
pipes

Woo Youn Won  
(Supervised by professor Yeon-Gun Lee)

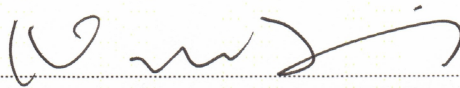
A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement  
for the degree of Master of Engineering

2016. 2.

This thesis has been examined and approved.



Thesis director, Yeon-Gun Lee, Prof. of Nuclear and Energy Engineering



Nam-Jin Kim, Prof. of Nuclear and Energy Engineering



Sooseok Choi, Prof. of Nuclear and Energy Engineering

2016. 2.

Department of Nuclear & Energy Engineering  
GRADUATE SCHOOL  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

# 목 차

LIST OF FIGURES .....	iii
LIST OF TABLES .....	v
SUMMARY .....	vi
I. 서 론 .....	1
1. 배경 .....	1
2. 목적 .....	3
3. 개요 .....	4
II. 센서 설계 및 최적화 .....	5
1. 센서 설계 관점에서 유동현상에 대한 이해 .....	5
2. 지배 방정식 .....	6
3. 센서 최적화를 위한 수치해석 .....	7
4. 수치해석 결과 .....	11
1)센서 전극간 갭 사이즈 결정 .....	11
2)다중센서 시스템에서 전극간 간섭현상을 최소화하기 위한 거리 계산 .....	15
III. 실험 장치 및 계측 .....	18
1. 장치 구성 .....	18
2. 정적 실험 결과 .....	20
3. 임피던스 센서 측정 기법 .....	20
1)기포율 측정 기법 .....	20

2)유동양식 판별 .....	23
3)속도 측정 기법 .....	23
4. 비교 데이터 측정 .....	23
1)와이어 메쉬 센서 .....	26
2)고속 카메라 .....	27
6. 수평관 및 경사관 실험 설계 .....	30
1)수평관 및 경사관 설비 .....	30
2)실험 조건 .....	32
<b>IV. 실험 결과 및 고찰 .....</b>	<b>35</b>
1. 수평유로 유동양식 판별 및 기포율 측정 결과 .....	35
2. 경사유로 기포율, 유동양식 및 속도 측정 결과 .....	42
3. 기포율 측정 분석 .....	49
4. 속도측정 분석 .....	52
<b>V. 결    론 .....</b>	<b>54</b>
<b>참 고 문 헌 .....</b>	<b>55</b>

## LIST OF FIGURES

[Fig. 1] Concept of the proposed impedance sensor .....	4
[Fig. 2] Some typical flow regime in a horizontal(a) and inclined(b) pipe .....	6
[Fig. 3] Stratified and annular flow with the impedance sensor installed .....	10
[Fig. 4] The nonlinearity error for $\theta_1$ .....	13
[Fig. 5] The nonlinearity error for $\theta_2$ .....	14
[Fig. 6] The nonlinearity error for $\theta_3$ .....	15
[Fig. 7] Numerical result for stratified flow and annular flow .....	16
[Fig. 8] Numerical result for gap size .....	17
[Fig. 9] Measurement system configuration .....	19
[Fig. 10] Acryl rods for static experiments .....	19
[Fig. 11] Comparison between numerical solutions and experimental results	20
[Fig. 12] Schematic diagram of the measurement system .....	22
[Fig. 13] Real-time data monitoring system for the void fraction measurement .....	22
[Fig. 14] Multi-sensor system for velocity measurement .....	25
[Fig. 15] Wire-mesh sensor electronics with a $4 \times 4$ sensor configuration	26
[Fig. 16] Measuring area of the high-speed camera .....	28
[Fig. 17] Cross-correlation method using camera images .....	28
[Fig. 18] Velocity calculation flowchart for the high speed camera .....	29
[Fig. 19] Schematic of the the horizontal loop system .....	30
[Fig. 20] Schematic of the the inclined loop system .....	31
[Fig. 21] Photo of the sensor installations in the horizontal loop .....	31
[Fig. 22] Photo of the sensor installations in the inclined loop .....	32
[Fig. 23] Some selected flow conditions on the horizontal flow regime map of Mandhane et al. ....	34

[Fig. 24] Some selected flow conditions on the inclined flow regime map of Taitel and Dukler. ....	34
[Fig. 25] Comparison between instantaneous void fraction of the proposed sensor and WMS for superficial liquid velocities .....	38
[Fig. 26] Comparison between instantaneous void fraction of the proposed sensor and WMS for superficial gas velocities .....	41
[Fig. 27] Comparison between proposed sensor and WMS for superficial liquid velocities .....	45
[Fig. 28] Comparison between proposed sensor and WMS for superficial gas velocities .....	48
[Fig. 29] Comparison in time-averaged void fraction between proposed sensor and WMS in the horizontal loop .....	50
[Fig. 30] Comparison in time-averaged void fraction between proposed sensor and WMS in the inclined loop .....	50
[Fig. 31] Comparison between void fraction of the proposed sensor and WMS using visualization technique. ....	52



## LIST OF TABLES

<Table 1> Conditions for numerical analysis .....	9
<Table 2> Some geometries of nonlinearity error .....	12
<Table 3> Specifications of measurement instruments used for experiments .....	18
<Table 4> Criteria for flow pattern classification .....	24
<Table 5> Test matrix for some selected flow conditions in the horizontal loop .....	33
<Table 6> Test matrix for flow conditions in the inclined loop .....	33
<Table 7> Comparison between structure velocity of the proposed sensor and high speed camera .....	53
<Table 8> Structure velocities and time-averaged void fraction .....	53

## SUMMARY

Two-phase flow is a general phenomenon in a variety of industries including nuclear power plant. The void fraction and velocity in two-phase flow is one of the most important parameters associated with system analysis and design. For this reason, many techniques including gamma ray or X-ray absorption, ultrasonic wave, optical probe, and electrical impedance methods have been proposed. Among these instruments the electrical impedance technique has a variety of advantages such as easy implementation, no intrusiveness of flow field, no radiation, and convenient mobility. In the impedance sensor, the electrical signals depend on the flow structure as well as the void fraction. Therefore, the electrical responses to a given void fraction differ according to the flow pattern. In this study, An impedance sensor is developed to determine the flow pattern with the three electrodes, and at the same time, to measure the void fraction. In addition, through the parallel arrangement of two sensors, a velocity measurement is performed using the time-averaged void fraction correlation. Prior to the real applications of the proposed approach, several numerical calculations based on the finite element method(FEM) are performed to optimize the electrode and insulator sizes in terms of the sensor linearity and these are verified in comparison with the data from static experiments. Finally, the sensor system is applied to horizontal and near-horizontal loops and measuring performance for the void fraction and velocity is compared with that of a wire-mesh sensor and high-speed camera system.

# I. 서 론

## 1. 배경

이상유동은 서로 다른 두 상이 혼합되어 흐르는 유동현상을 말한다. 이상유동 현상은 배관계통을 구비하고 있는 다양한 설비에서 발생하는 현상이기 때문에 이러한 이상유동의 특성을 파악하고 예측하는 일이 매우 중요하다. 이상유동 시스템에서 기포율(void fraction) 및 속도(velocity)는 이상혼합밀도, 점도, 평균속도, 압력강하, 유량, 유동양식 등과 같은 여러 가지 변수를 결정하는 중요한 역할을 한다. 이러한 중요성으로 인해 방사선[1], 초음파[2~3], 광섬유센서[4], 와이어 메쉬 센서[5~6], 전기 임피던스[7~8]등을 포함한 다양한 측정 기법들이 사용되어 왔다.

방사선 기법은 측정하고자 하는 영역에 감마선이나 중성자, X-ray등을 투과시켜 입자의 에너지가 감쇄되는 비율을 통해 기포율을 측정하는 방법이다. 비침투식이기 때문에 유로에 변형을 가하거나 내부 유동에 영향을 주지 않는 장점이 있으나, 선원을 발생시키기 위한 장비가 비교적 크고 많은 에너지를 소모하며 방호를 위한 차폐체 설치 공간 확보가 필요하고 이러한 설비가 갖추어지지 않은 곳에서는 법적으로 사용의 제약을 받는 등 많은 단점을 지니고 있다.

초음파 기법은 관 내부로 초음파를 발생시켜 파동이 관 내부 형상이나 매질에 따라 반사되거나 산란되는 정도를 측정하는 방법이다. 방사선 기법에 비해 기계 성능이나 공간상의 제약이 적은 비 침투식 기법이지만, 이상유동에서 계면의 형태가 복잡한 유동의 경우 적용 할 수 없다는 단점을 지니고 있다.

광섬유 센서의 경우 관 내부에 바늘모양의 광섬유 프로브를 삽입하여 프로브를 지나가는 매질의 굴절률에 따라 빛이 반사되는 정도를 기준으로 기포율을 측정하는 장비이다. 전자대신 광자를 이용한 측정법이기 때문에, 유체의 전도도에 영향을 받지 않으며 전기적 간섭에 강하고 매우 감도가 높은 장점이 있으나, 침투

식으로 유동을 방해할 수 있고 충격에 예민하여 유동변화가 심하거나 빠른 유속의 이상유동장에서 사용하기 힘들다는 단점이 있다.

와이어 메쉬 센서는 관 내부에 그물형태의 와이어를 배치하여, 와이어 사이를 지나는 유체의 전도도 차이를 이용하여 기포율을 측정하는 센서이다. 기포율 측정뿐만이 아닌 내부 가시화가 가능하고 측정 속도가 타 기법에 비해 빠르다는 장점이 있으나, 와이어에 의해 센서 후방 유동을 교란시키며 유체 내부에 이물질이나 입자들이 존재하는 경우 사용할 수 없다는 단점이 있다.

일반적으로 전기적 기법은 여러 형상에 대해 적용하기 쉽고, 데이터 취득속도가 비교적 빠르며, 이동이 간편하고, 가격이 저렴하다는 장점을 지니고 있다. 이러한 장점들로 인하여 전기적 기법을 활용한 다양한 형태의 측정 센서들이 연구, 개발되어왔다. 기포율을 측정하기 위한 여러 형태의 센서들 중 대표적인 센서는 플레이트 타입 센서이다. 이 센서는 원형 관 내부 혹은 외부에 몇 쌍의 대칭되는 전극이 부착되어 있는 형상이다[9~14]. 또 다른 형태로는 링 타입 센서가 있는데, 두 개 이상의 고리모양의 전극이 파이프를 감싸고 있는 모양으로 구성되어 있다.[15~19]. 다른 모양으로는 나선형[20, 21], 내부 삼입형[22], 와이어 전극 등을 사용한 센서가 있다[23].

전기적 센서를 통해 측정되는 전기 신호는 서로 다른 전기적 특성을 지닌 상이 차지하는 비율, 다시 말해 기포율에만 의존하는 것이 아닌 유동의 형상에 의해서도 달라지게 된다. 따라서 어떠한 유동양식에서 기포율을 측정할 것인지에 따라 측정되는 전기적 신호도 달라지게 되는 것이다. 기존 연구들의 경우 한 가지 유동양식만을 기준으로 기포율을 측정하거나, 다수의 전극을 이용하여 내부를 가시화함으로써 유동양식과 기포율을 동시에 측정하는 방법을 사용하였다. 그러나 전자의 경우 유동양식이 다양하게 변화하는 시스템에서는 사용할 수가 없고, 후자의 경우 다수의 전극을 이용하게 되면 처리해야 할 데이터의 수가 상대적으로 많아지게 되어 이를 처리하기 위한 복잡한 알고리즘과 이에 걸맞는 고성능, 고가의 신호처리 장비가 필요하게 된다. 또한 전극 개수가 적은 센서들에 비하여 다수의 신호를 동일시간에 처리하기 위해서는 필연적으로 센서의 시간분해능이 떨어지는 결과를 가져오게 된다. 따라서 다양한 유동양식에 따른 기포율을 측정하기 위해서는 간단한 구조로도 유동양식에 따른 기포율을 측정하는 임피던스 센서가 요구된다.

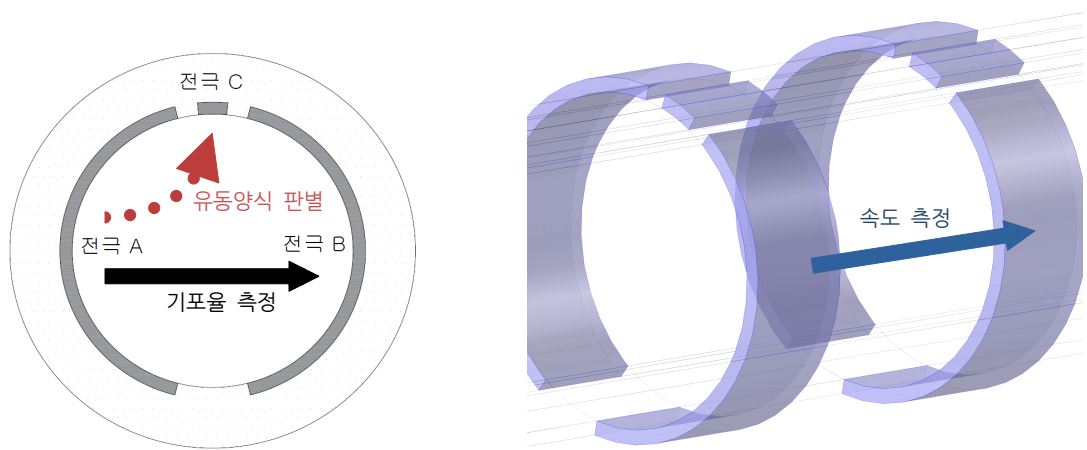
## 2. 목적

앞서 언급한 문제점들을 해결하기 위한 목표는 다음과 같다. 먼저 전극의 구조가 단순하여 제작하기 쉽고, 여러 유동양식에 따른 기포율을 측정할 수 있어야 하며, 상대적으로 낮은 비용으로 기포율 측정 시스템을 구성할 수 있어야 한다.

그림 1(a)은 이러한 목적을 달성하기 위해 본 연구에서 제안된 임피던스 센서 시스템의 개념도이다. 원형 관 내부에 플레이트 타입 전극이 한 쌍이 자리 잡고 있고 관 상부에 작은 전극 하나가 추가로 달려있다. 서로 마주보는 형태의 두 전극 A-B(void fraction sensor :  $S_v$ )를 이용하여 기포율을 측정하고 전극 A-C(flow pattern sensor :  $S_f$ )를 통해 유동양식을 판별한다. 일반적으로, 수평관에서 이상유동은 중력의 영향을 받아 무거운 유체가 관 아래쪽으로 흐르는 형태를 가지게 된다. 물-공기 이상유동을 고려하였을 때, 성층류 혹은 파형류의 경우는 물이 관 하부로만 흐르기 때문에 관 상부에는 물이 닿지 않는다. 따라서  $S_f$  전극 사이에 전압을 걸어주었을 때, 성층류 혹은 파형류에서는 전류가 거의 흐르지 않게 된다. 반면 환상류의 경우 관 중심부를 빠른 속도의 기체가 흐르고 관 내벽 전체가 액막에 둘러싸여 있는 형태로 유동이 진행되기 때문에,  $S_f$  전극 사이에 전압을 걸어주게 되면, 성층류나 파형류에 비해 큰 전류가 흐르게 될 것이다.

이러한 유동 형상의 차이를 잘 고려하여 전극을 적절히 배치하는 것만으로도 최소한의 데이터 수집을 통해 유동양식을 판별하고 이를 통해 해당 유동양식에 알맞은 기포율을 산출 할 수 있게 된다. 또한, 그림 1(b) 와 같이 두 개의 동일한 형태의 센서를 배치하게 되면, 두 센서 사이의 거리를 알고, 유동이 센서 1 과 센서 2 사이를 지나는 동안 거의 동일한 기포율을 유지한다고 가정하게 되면 센서를 지나는 유체의 속도를 측정 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 유동양식에 따른 기포율 측정과 속도측정을 동시에 하는 임피던스 센서를 설계하고 이를 타 장비와 비교 검증하여 실제 이상유동설비에 적용하는 것이 목적이다.



(a) Sectional view of the sensor

(b) Multi-sensor system

[Fig. 1] Concept of the proposed impedance sensor

### 3. 개요

본 논문은 총 5 장으로 구성되었다. 2 장에서는 고안한 아이디어를 바탕으로 센서를 제작하기 이전에, 전기적 기법에 대한 이론적 배경을 설명하고 센서를 최적화하고 센서간 간섭현상을 최소화하기 위한 수치계산을 수행하였다. 3 장에서는 제작한 센서를 이용하여 정적 실험을 수행하고 수치계산 결과와 비교 검증하였다. 그리고 기포율 측정 및 유동양식 판별, 속도 측정에 사용된 기법들에 대해 설명하고 임피던스 센서를 검증하기 위해 사용한 장비들에 대해 설명하고, 수평관과 경사관 설비와 실험 조건에 대해 설명하였다. 4 장에서는 앞서 결정한 여러 실험조건에 대하여 제주대학교 원자력과학기술 연구소에 위치한 물-공기 이상유동 설비를 이용하여 동적 실험을 수행하였다. 수평유로 설비를 이용하여 단일센서에서 성능을 검증한 뒤 경사유로에 멀티센서 시스템을 적용하여 최종적으로 속도측정 성능을 실험하였다. 동적 실험결과 검증을 위하여 기포율 측정은 와이어 메쉬 센서를, 속도측정은 고속카메라를 이용하여 비교분석하였다.

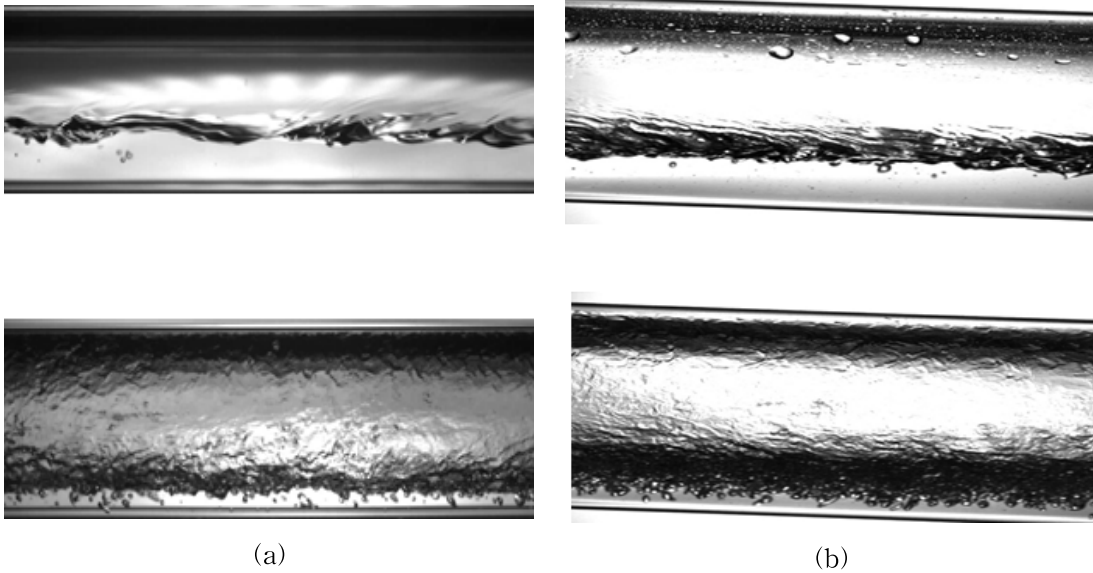
## II. 센서 설계 및 최적화

### 1. 센서 설계 관점에서 유동현상에 대한 이해

수평관의 경우, 중력의 영향이 관 반경방향으로 작용하기 때문에 유동현상은 관 중심축을 기준으로 비대칭적인 형태를 가지게 되며, 물-공기 이상유동에서는 상대적으로 밀도가 큰 물이 아래쪽으로 흐르는 경향을 보이게 된다. 경사관의 경우, 유동의 진행방향으로도 중력이 작용하기 때문에 각 상의 속도에 따른 유동양식이 수평관에서의와 다르게 나타나기는 하지만, 각 유동양식의 형태는 큰 차이를 보이지 않는다. 그림 2 는 각각 수평관(a)과 경사관(b)에서 성층류와 환상류 흐름을 나타낸 사진이다.

액체상이 관 내부를 연속적으로 흐르고 있는 상태에서, 기체는 밀도 차이에 의해 관 상부로 모여서 진행하게 된다. 기체와 액체가 모두 느린 속도로 관 내부를 흐를 때에는 두 상 간의 경계면이 부드러운 형태를 지닌 성층류가 나타나게 된다. 성층류에서 기체의 속도가 증가하여 두 유체간의 상대속도가 증가하게 되면 경계면 마찰에 의해 표면파가 유동방향으로 발생하는 파형류가 발생하게 되며, 기체의 걸보기 속도가 매우 커지면 관 중심부로 빠른 속도의 기체가 흐르고 액체가 얇은 막의 형태로 관 내벽 전체를 둘러싸고 진행하는 형태의 환상류로 변화하게 된다. 기체의 걸보기 속도가 낮은 상태에서 액체의 걸보기 속도를 증가시키거나, 액체와 기체 모두의 걸보기 속도를 증가시키면 경계면의 표면파가 크게 증가하여 간헐적으로 관 상부를 훑고 진행하는 형태의 간헐류가 나타나게 된다.

본 연구에서는 유동의 형상에 따른 전기적 신호 특성을 이용하기 때문에,  $S_f$  전극을 통해 유동 판별이 가능한 성층류, 간헐류, 환상류에 대하여 고려하였다.



[Fig. 2] Some typical flow regime in a horizontal(a) and inclined(b) pipe  
(stratified, annular flow)

## 2. 지배 방정식

이상 유동장에서 임피던스 기법을 통해 기포율을 측정하기 위해서는, 먼저 각 상에 대한 전기적 특성을 이해하여야 한다. 물-공기 이상 유동장에서 각 상에 대한 전기적 특성의 분포는 다음과 같은 라플라스 방정식을 통해 나타낼 수 있다.

$$\nabla \cdot (\sigma + i\omega\epsilon)\nabla u = 0, \quad (1)$$

여기서  $\sigma$  과  $\epsilon$  은 전기적 도전율과 유전율을 뜻하며,  $i$  는 복소수 항이고  $\omega$  는 주파수가  $2\pi f$  일 때 위상각이며,  $f$  는 주파수를 뜻한다. 전위 분포는 각 상에서  $u$  로 나타나게 된다.

식 1 에서, 유전율에 비해 도전율 성분이 매우 클 경우에는 ( $\omega\epsilon \ll \sigma$ ), 리액턴스가 임피던스에 거의 영향을 미치지 않기 때문에 지배방정식을 다음과 같이 고쳐



쓸 수 있다.

$$\nabla \cdot \sigma \nabla u = 0, \quad (2)$$

이러한 방법을 *컨덕턴스 기법*이라고 한다. 반대로, 도전율에 비해 유전율 성분이 매우 클 경우에는( $\sigma \ll \omega\epsilon$ ), 리액턴스에 의한 영향이 임피던스에 큰 영향을 미치지 않기 때문에 지배방정식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\nabla \cdot \epsilon \nabla u = 0, \quad (3)$$

이러한 방법을 *커패시턴스 기법*이라고 한다. 본 연구에서 제안한 센서는 두 기법 모두 적용이 가능하나, 유동양식 변화에 따른 측정 전기 신호의 편차가 상대적으로 크고 주위 물성치 변화에 영향을 적게 받는 *컨덕턴스 기법*을 적용하여 실험을 진행하였다. 또한 본 실험에서 사용된 교류 주파수인 10 kHz에서 전기용량은 대부분 컨덕턴스 성분이 차지하기 때문이기도 하다[3, 16, 17, 24, 25].

### 3. 센서 최적화를 위한 수치해석

유동 형상에 있어 가장 큰 차이를 보이는 성층류와 환상류의 경우 각각 그림 3의 (a), (b)와 같은 형태로 나타나게 된다. 물과 공기의 전기 전도도는 각 상에서  $\sigma_l$  와  $\sigma_g$  로 나타나게 되며 전위분포 또한  $u_l$  와  $u_g$  로 나타나게 된다. 이를 각 상에 대해서 정리해보면,

$$\nabla \cdot \sigma_l \nabla u_l = 0, \text{ (liquid phase)} \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \sigma_g \nabla u_g = 0, \text{ (gas phase)} \quad (5)$$

여기서 하침자  $l$  은 액체 상을,  $g$  는 기체 상을 의미한다.

서로 마주보는 두 전극 하단부는  $\theta_1$  만큼 떨어져 있고, 상부 전극과 양 전극 사이는  $\theta_2$  만큼 떨어져 있으며, 상부 전극의 크기는  $\theta_3$  에 의해 결정된다. 전극 사이를 흐르는 전류를  $I$  라고 하였을 때, 컨덕턴스  $G$ 는 다음과 같이 나타 낼 수 있다.

$$G = \frac{I}{\Delta V}, \quad (5)$$

여기서  $\Delta V$  는 전극 A 와 B 사이에 인가된 전압 차를 의미한다. 다양한 형태의 센서에서 기포율에 따른 컨덕턴스 값을 쉽게 비교 하기 위해서 무차원 컨덕턴스 값을 도입하였다. 무차원화를 통하면 센서의 형태가 결정될 경우 그 크기에 상관 없이 기포율 또는 유동양식에 따른 무차원 컨덕턴스 신호의 크기는 항상 동일한 값을 가지게 되므로 다양한 크기의 관에서 동일한 방법을 적용 할 수 있게 된다.

$$G^* = \frac{G}{G_1}, \quad (6)$$

여기서  $G_1$  은 관 내부가 물로 가득 찼을 때( $\alpha = 0$ ) 두 전극사이에서 측정되는 컨덕턴스 신호( $G$ )를 의미한다.

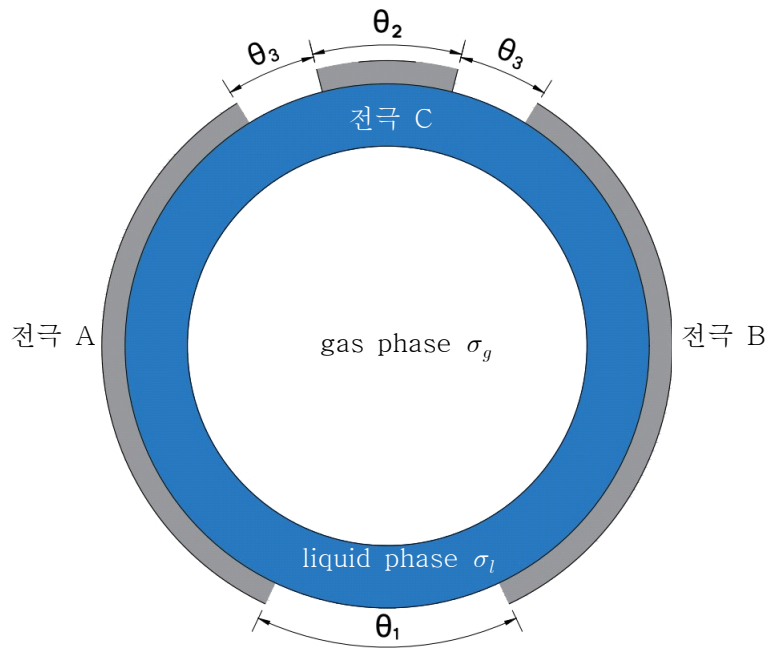
선형성 관점에서 센서 설계 최적화를 위하여 편미분 방정식(PDE) 기반의 다중 물리 현상을 유한요소법(FEM)으로 해석하는 상용 소프트웨어인 COMSOL Multiphysics를 사용하였다. 임피던스 센서를 통해 기포율을 측정하기 위해서는, 전기신호와 기포율 사이의 관계가 선형성을 보여야 한다. 임피던스 센서에 있어 컨덕턴스 혹은 커패시턴스 응답의 선형성은 전극의 형태와 전극사이의 거리에 의해 결정된다 [12, 17, 25]. 본 연구에서 제안한 플레이트 타입 센서의 경우,  $\theta_1 \sim \theta_3$  의 크기에 의해 선형성이 결정되기 때문에, 수치해석을 통해 다양한 전극 사이 거리 및 상부 전극의 크기를 비교하여 센서의 형상을 결정하였다. 표 1 은 수치해석에 적용된 계산조건을 정리한 표이다.

<Table 1> Conditions for numerical analysis

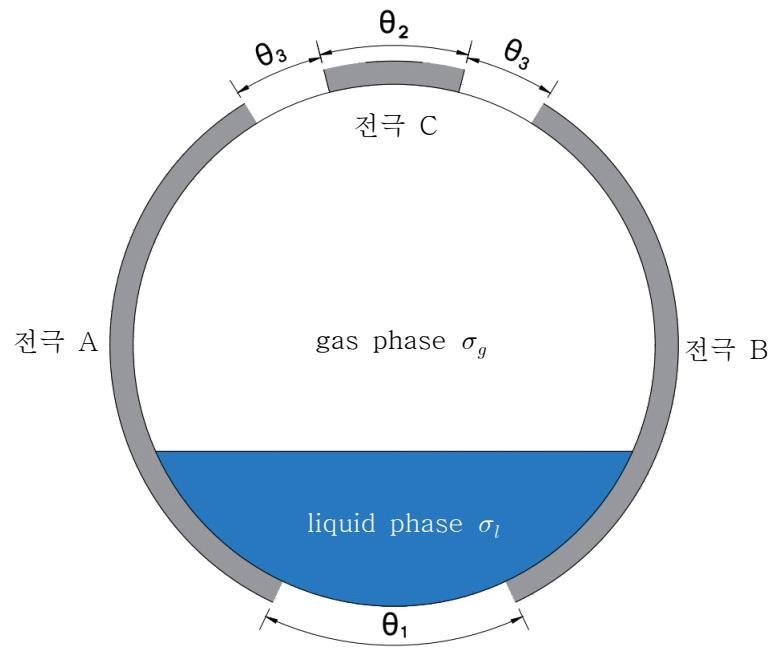
	Condition	
	Conductivity ( $S/m$ )	Water
Air		0
Electrode		1,000,000
Gap		0
Applied voltage( $V$ )	1	
Signal frequency( $kHz$ )	10	
$\theta_1 \sim \theta_3$ ( $rad$ )	0.1~0.5 (step : 0.1)	
Sensor inner diameter( $mm$ )	Single	40 (horizontal)
	Multi	45 (inclined)
Electrode thickness( $mm$ )	15	
Averaged mesh number	56,000	

센서 전극을 제외한 모든 경계면은 절연조건이며, 두 상 간의 계면은 연속조건으로 가정하였다. 성층류에서는 모든 기포율 범위에 대하여( $\alpha = 0 \sim 1.0$ ) 계산을 수행하였고 환상류에서는 기포율 0.5 에서 1.0 까지 0.05 간격으로 계산을 수행하였다. 이는 수평관에서 일반적으로 기포율이 0.76 이상인 경우에 환상류가 나타나기 때문이다[26].

본 수치해석에서는 유동양식을 판별하기 위한  $S_f$  전극 사이의 선형성 계산은 수행하지 않았다. 이는 유동양식을 판별함에 있어서는 선형적이고 세밀한 컨덕턴스 응답보다는 유동양식을 구분할 수 있을 정도의 문턱값만을 고려하기 때문이다. 다만 문턱값을 계산하기 위해서 각 유동양식에서 기포율에 따른 무차원 컨덕턴스 값을 반드시 필요하다.



(a) Annular flow



(b) Stratified flow

[Fig. 3] Stratified and annular flow with the impedance sensor installed

#### 4. 수치해석 결과

##### 1) 센서 전극간 갭 사이즈 결정

그림 4~6 은 각각  $\theta_1 \sim \theta_3$  의 변화에 따른 비선형성 에러를 수치해석을 통해 계산한 결과 그래프이다. 여기서 비선형성 에러는  $S_v$  전극에서 측정된  $G^*$  값과 기포율이 1:1 관계로 비례하는 이상적인 값( $G^*_{linear}$ )에서 벗어난 정도를 의미하며, 다음과 같은 간단한 식으로 나타낼 수 있다.

$$Nonlinearity\ error = |G^*_{linear} - G^*_{opp}|_{\max} \times 100 (\%) \quad (7)$$

먼저 환상류에 대한 결과를 보면  $\theta_2$ 의 변화, 즉 상부 전극 크기의 변화에 따른 비선형성 에러는 큰 차이를 보이지 않는다. 오히려  $\theta_2$ 가 동일할 때  $\theta_1$ 과  $\theta_3$ 가 커짐에 따라 비선형성 에러가 큰 폭으로 줄어드는 것을 확인 할 수 있다. 이러한 경향성은 나머지 두 그래프에서도 찾아볼 수 있는데,  $\theta_1$ 과  $\theta_3$ 가 각각 커짐에 따라 비선형성 에러가 줄어드는 결과를 보여주고 있다. 그러나  $\theta_2$ 와  $\theta_3$ 가 동시에 커질 때 보다는  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ 가 동시에 커질 때 비선형성 에러가 더 큰 폭으로 감소하는 것으로 보아 상부 전극과 간극보다는 하부 간극의 크기에 대한 영향이 더 크다는 것을 알 수 있다.

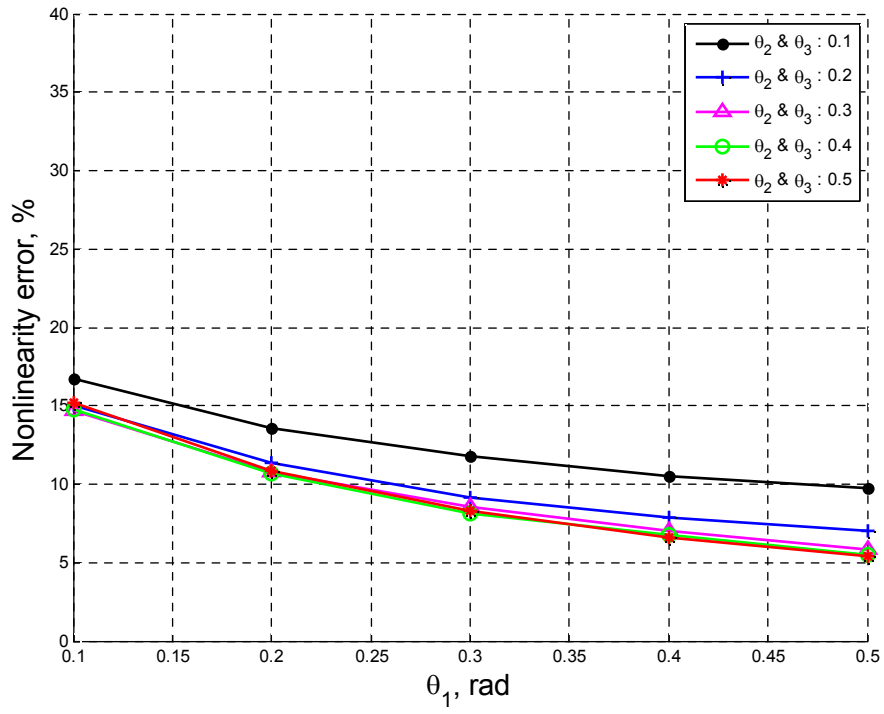
성층류에 대한 결과는 환상류와는 다른 경향성을 보여주고 있다. 마찬가지로 상부전극( $\theta_2$ ) 크기 변화에 따른 결과를 보면 전체적으로 간극의 영향보다 비선형성 에러 변화폭이 크지는 않으나 전극이 커짐에 따라 비선형성 에러가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 성층류의 경우 기포율 변화가 관 내부 수위변화에 직접적인 영향을 주어서 상부 전극에 물이 닿기 전후 컨덕턴스 신호의 변화폭이 커지기 때문이다. 이러한 경향은  $\theta_3$  결과에서도 마찬가지로 확인할 수 있다.  $\theta_1$ 의 경우 환상류에서와 마찬가지로 간극이 커질수록 선형성이 증가하는 모습을 볼

수 있는데, 이는 전극 사이 거리가 멀어질수록 내부에 생성되는 전기장의 모양이 좀 더 편평해지기 때문이다[27].

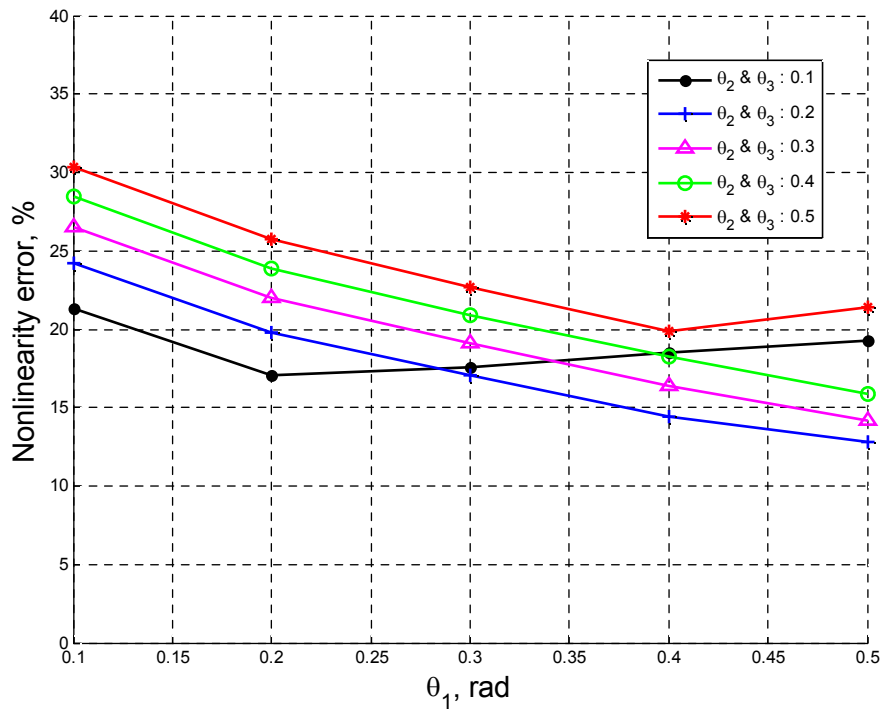
결과들을 종합적으로 분석하였을 때 최종적으로 결정된 전극 및 간극 크기는  $\theta_1 = 0.5 \text{ rad}$ ,  $\theta_2 = 0.2 \text{ rad}$ ,  $\theta_3 = 0.3 \text{ rad}$  이다. 결정된 센서의 형태에서 비선형성 에러는 환상류와 성층류에서 각각 5.7 %와 12.7 %이다. 이를 통해 결정된 센서의 형상을 이용하여 각 유동에서 기포율에 따른  $G^*$  값을 계산하였으며, 이는 실제로 제작한 센서와 비교를 위해 사용되었다. 계산 결과는 그림 7 과 같다.

<Table 2> Some geometries of nonlinearity error

Dimension	Nonlinearity (stratified flow)	Nonlinearity (annular flow)
$\theta_1 = 0.5 \text{ rad}, \theta_2 = 0.5 \text{ rad}, \theta_3 = 0.3 \text{ rad}$	13.2 %	5.5 %
$\theta_1 = 0.5 \text{ rad}, \theta_2 = 0.2 \text{ rad}, \theta_3 = 0.3 \text{ rad}$	12.7 %	5.7 %
$\theta_1 = 0.4 \text{ rad}, \theta_2 = 0.4 \text{ rad}, \theta_3 = 0.3 \text{ rad}$	15.6 %	8.0 %
$\theta_1 = 0.4 \text{ rad}, \theta_2 = 0.3 \text{ rad}, \theta_3 = 0.3 \text{ rad}$	16.3 %	7.8 %
$\theta_1 = 0.3 \text{ rad}, \theta_2 = 0.2 \text{ rad}, \theta_3 = 0.2 \text{ rad}$	17.5 %	9.6 %
$\theta_1 = 0.5 \text{ rad}, \theta_2 = 0.2 \text{ rad}, \theta_3 = 0.2 \text{ rad}$	14.4 %	8.4 %

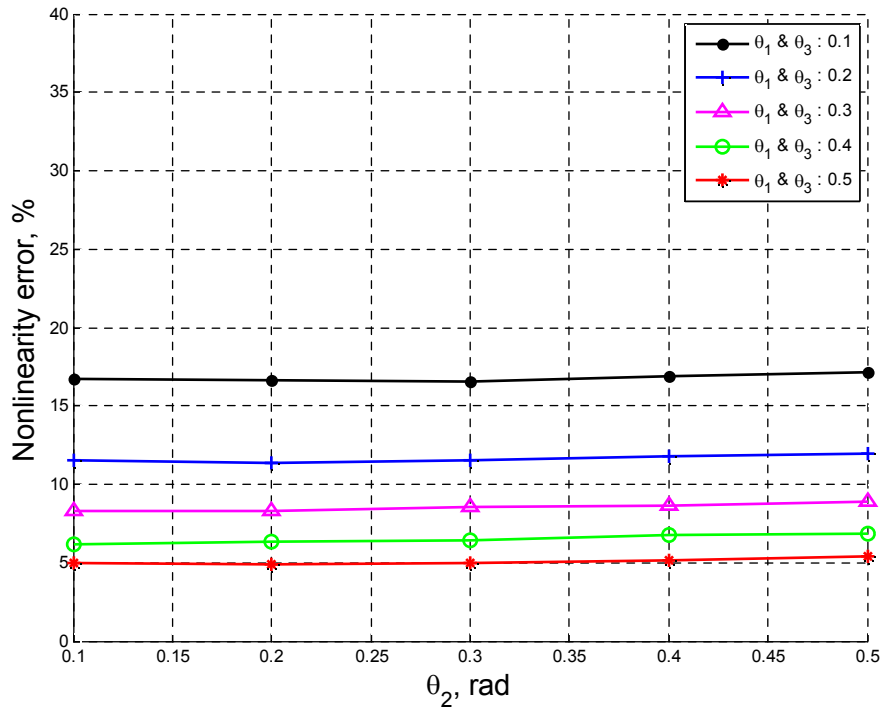


(a) Annular flow

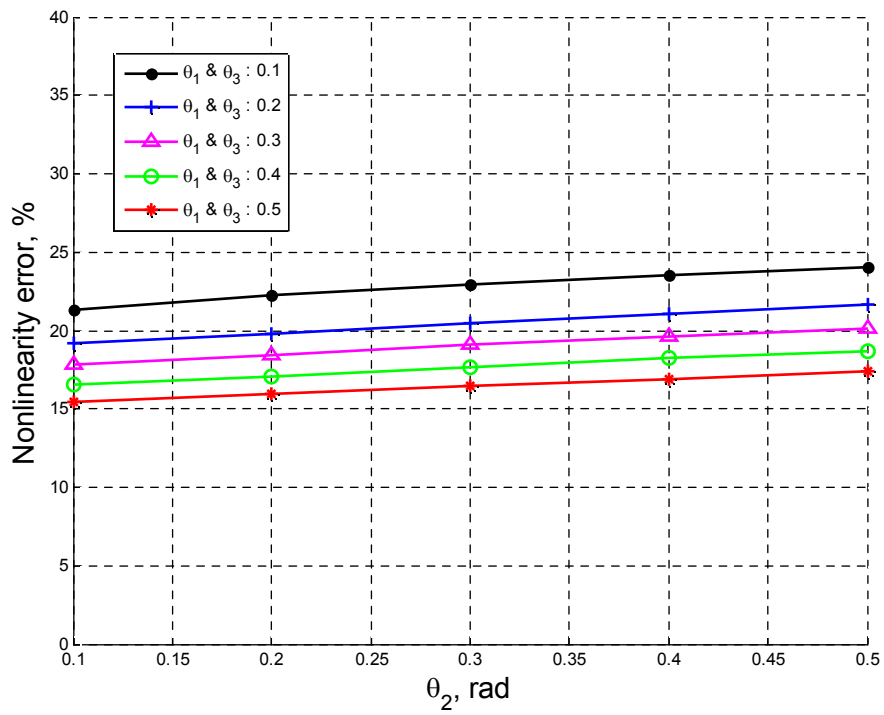


(b) Stratified flow

[Fig. 4] The nonlinearity error for  $\theta_1$



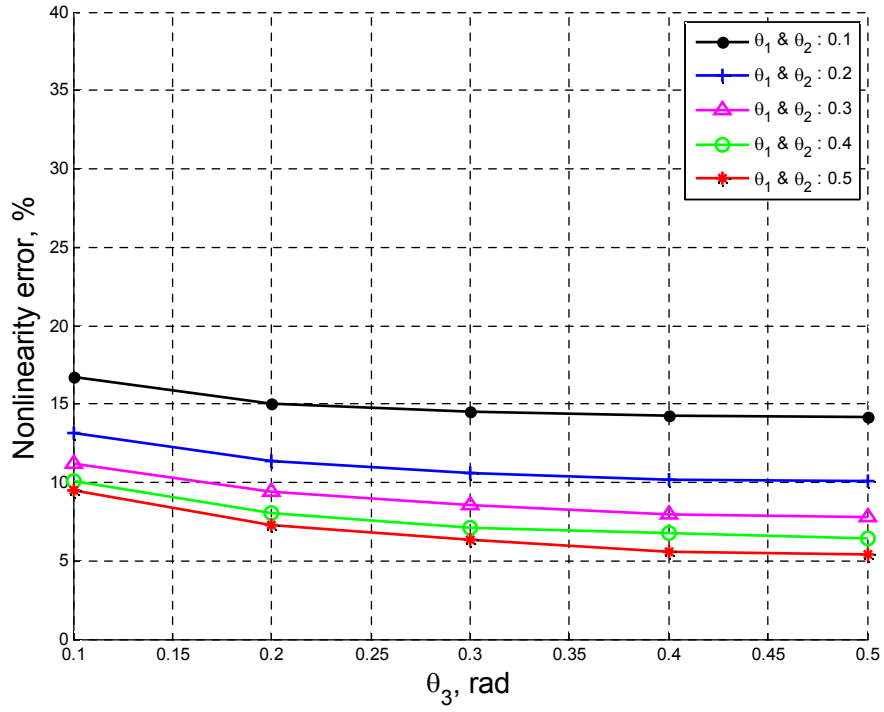
(a) Annular flow



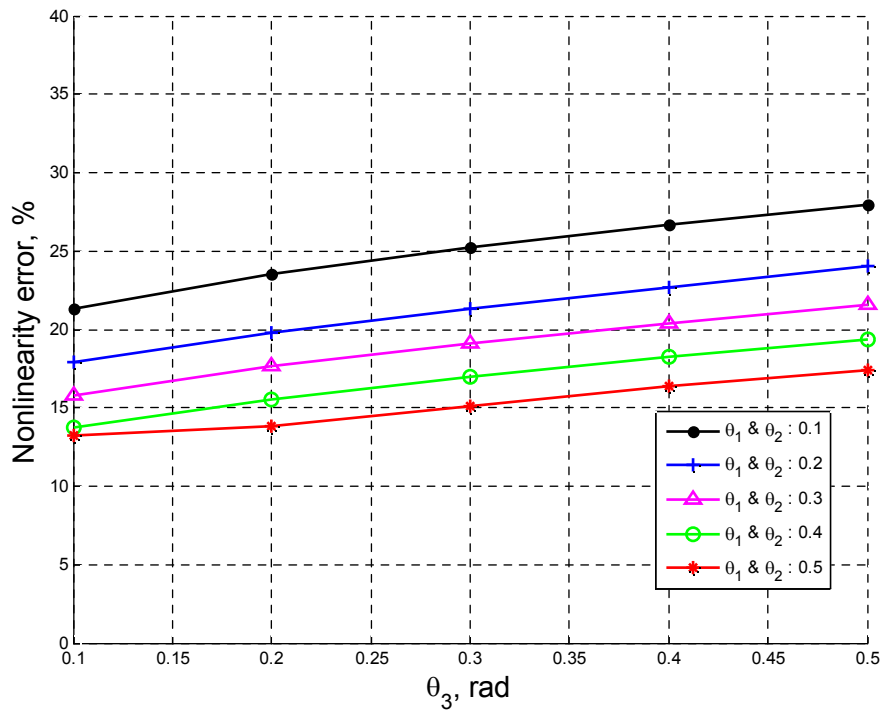
(b) Stratified flow

[Fig. 5] The nonlinearity error for  $\theta_2$



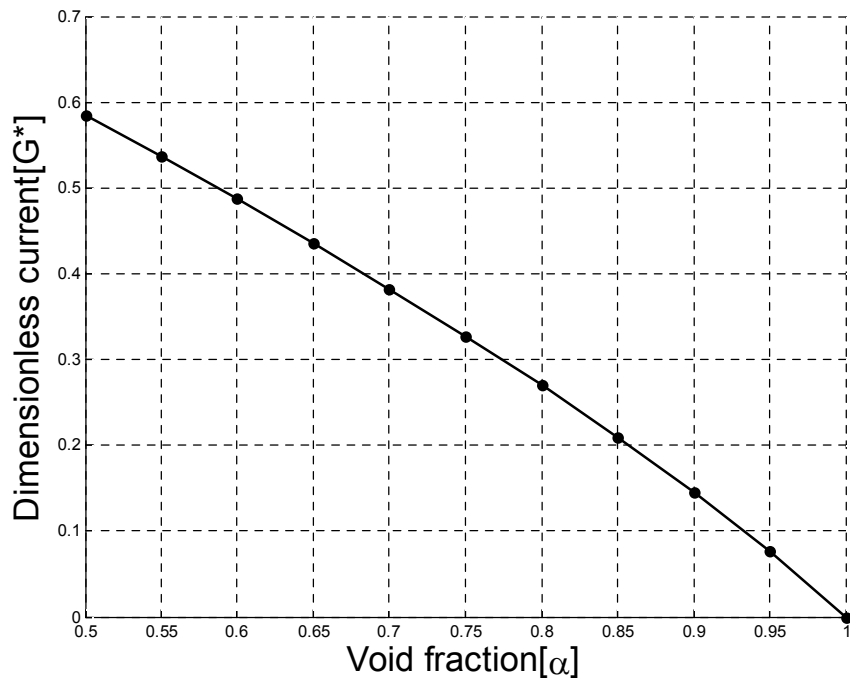


(a) Annular flow

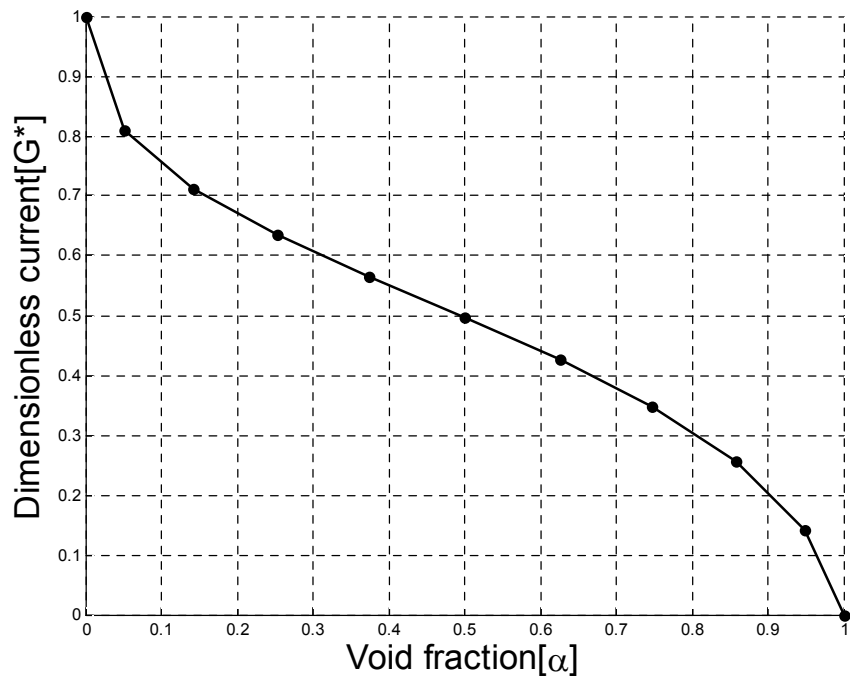


(b) Stratified flow

[Fig 6] The nonlinearity error for  $\theta_3$



(a) Annular flow

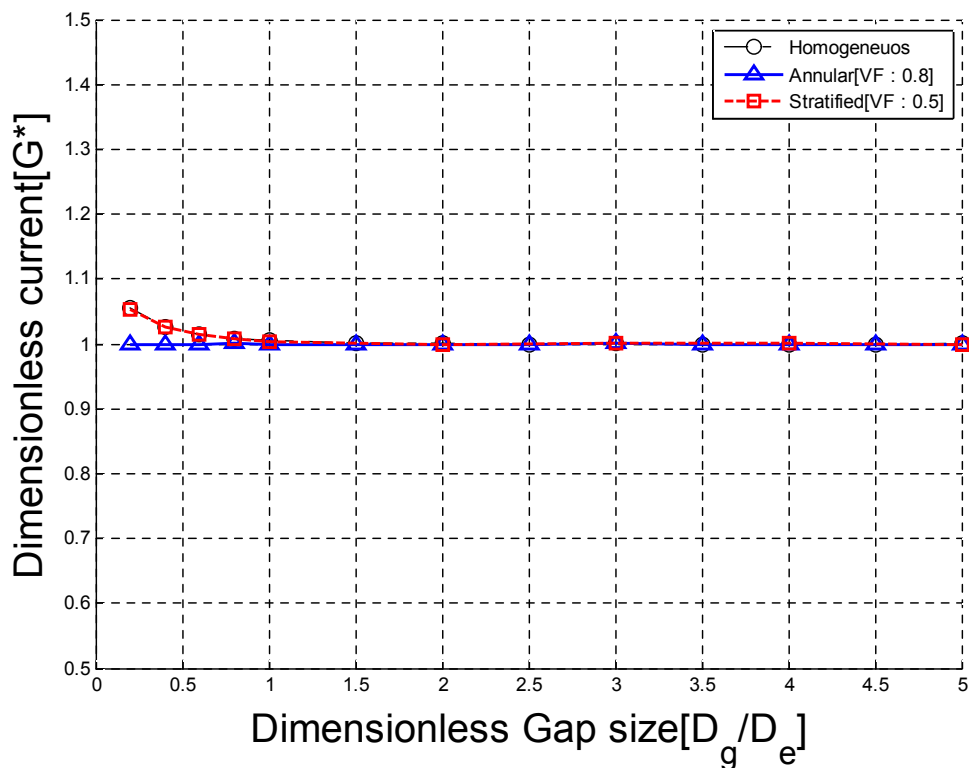


(b) Stratified flow

[Fig. 7] Numerical result for stratified flow and annular flow

2) 이중센서 시스템에서 전극간 간섭현상을 최소화하기 위한 거리 계산

속도측정을 위해 제작될 센서는 동일한 형태의 여러 센서가 근접해 있는 형태이기 때문에 가까운 거리에서 전극에 의한 전기적 간섭이 발생할 우려가 있다. 그러나 속도측정을 위해 센서의 전기적 신호를 판단할 때는 유동이 진행하면서 변형되지 않아야 하므로 최대한 짧은 거리에 위치해 있는 것이 유리하다. 따라서 센서들이 서로 전기적 간섭을 무시할 수 있는 가장 근접한 거리를 계산하여 실제 센서 제작시에 반영하여야 한다. 센서간의 거리는 센서 전극의 두께인 15 mm를 기준으로 0.25 ~ 5 배까지 증가시켜가며 물이 가득 찼을 때와 기포율이 0.5 인 성층류에서, 그리고 기포율이 0.8 인 환상류에서 계산을 수행하였다. 그림 8 은 센서 간 거리에 따른  $G^*$  값 변화를 나타낸 그래프이며, 최종적으로 단일센서에서  $G^*$  값과 비교하여 오차가 1 % 이내로 나타나는 거리인 2 배(30 mm)로 결정되었다.



[Fig. 8] Numerical result for gap size

### Ⅲ. 실험 장치 및 계측

#### 1. 장치 구성

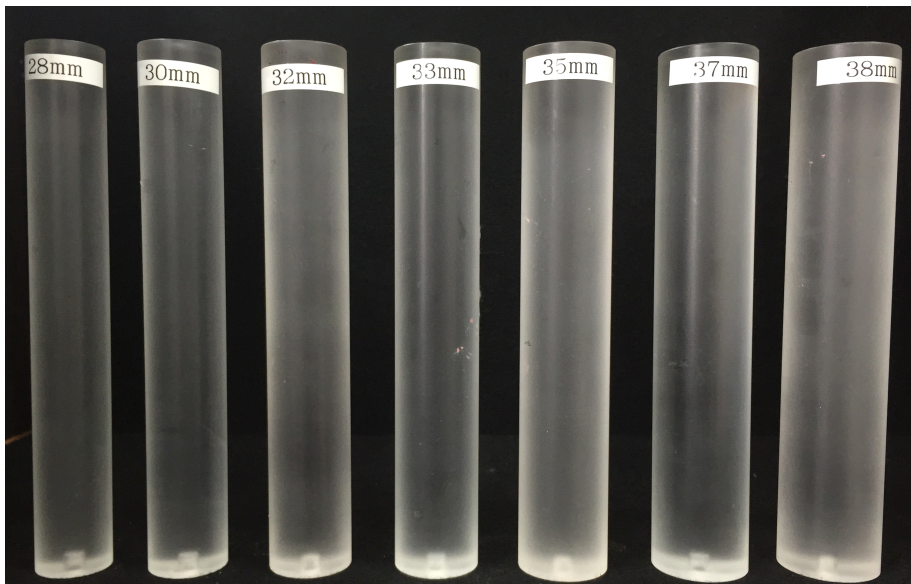
수치해석에서 얻은 결과를 바탕으로 제작한 센서를 실제 유로에 적용하기에 앞서 정적실험을 통해 얻어진 측정값을 바탕으로 선형성 비교검증을 수행하였다. 그림 9는 실험에 사용된 장치들의 사진이다. 센서를 포함한 모든 측정장비는 NI Labview 프로그래밍을 통해 자동으로 제어되며, Agilent 4284A LCR meter를 통해 원하는 주파수의 교류 전압을 인가하면 NI-2536 스위칭 장비를 통하여 원하는 전극 사이에 전압을 걸어주게 된다. 각 전극 사이에 알고 있는 크기의 저항을 달고 저항 양단의 전압차를 계산하면 저항 사이에 흐르는 전류의 크기를 알 수 있게 된다. 측정에 사용된 장비의 상세한 사양은 표 3 과 같다.

<Table 3> Specifications of measurement instruments used for experiments

Instruments	Accuracy	Signal range	Time definition
Agilent 4284A LCR meter	0.05 ~ 0.5%*	Up to 20 V with 1 MHz	N/A
NI PXI-2536	N/A	Up to $\pm 12$ V and 100 mA	50,000 cross-points/sec
NI PXIe-6368	3 mV for $\pm 10$ V range	Up to $\pm 10$ V	2,000,000 samples/channel



[Fig. 9] Measurement system configuration

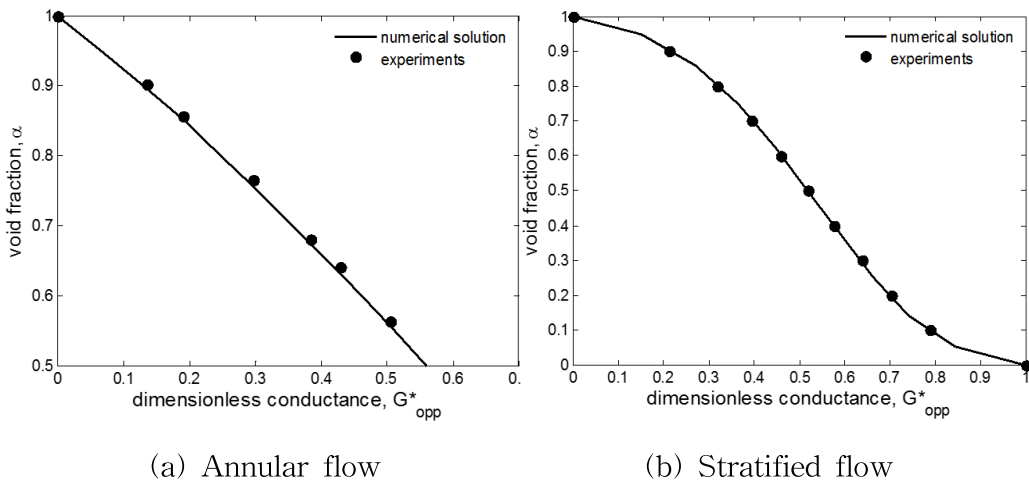


[Fig. 10] Acrylic rods for static experiments

## 2. 정적 실험 결과

성층류를 모의하기 위해서 센서 내부에 각각 기포율에 해당하는 부피의 물을 채운 뒤 센서를 수평으로 고정시킨 후 측정을 수행하였고, 환상류를 모사하기 위해 다양한 환상류 기포율에 해당하는 부피의 아크릴 봉을 물이 가득 찬 관 중심부에 삽입하여 측정하였다. 측정에 사용된 아크릴봉은 그림 10 과 같다. 정적 실험을 위한 조건은 표 1 에 주어진 바와 같고, 각 실험에 대해 100 회 반복 측정하였다.

그림 11 은 각각 환상류와 성층류 모의를 통해 얻은 정적 실험 결과를 수치 해석 결과와 비교한 그래프이다. 두 케이스에서 비선형성 에러는 환상류에서 7.0 %, 성층류에서 12 %로 나타났다. 이는 수치 해석 결과인 5.7 %, 12.7 %와 잘 일치하는 것으로, 센서를 실제로 제작할 때 발생할 수 있는 전극 형상의 차이 등을 고려한다면 제작된 센서가 설계한 형상과 유사하다는 것을 알 수 있다.



[Fig. 11] Comparison between numerical solutions and experimental results

### 3. 임피던스 센서 측정 기법

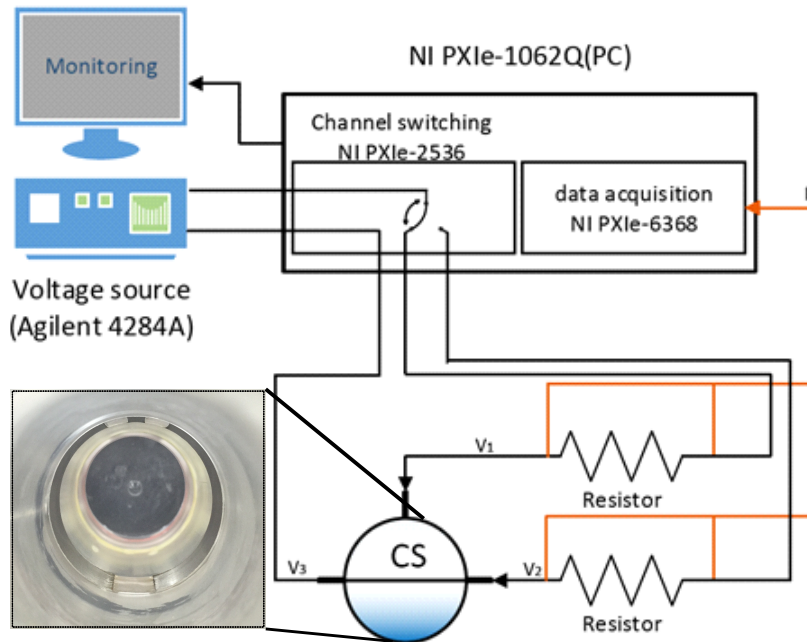
#### 1) 기포율 측정 기법

본 연구에서 고안한 임피던스 센서는 1 장에서 설명한 바와 같이  $S_o$  전극(기포율 측정)과  $S_f$  전극(유동양식 판별) 사이에 흐르는 컨덕턴스 신호의 크기를 무차원화 하여 기포율과 유동양식을 측정한다. LCR meter를 통해 일정한 주파수의 교류전압을 양 전극에 주게 되면, 스위칭 장비를 통해 원하는 시간동안 대칭전극과 수직전극을 번갈아 가며 전압을 인가하게 된다. 각 전극과 스위칭 장비 사이에는 분로 저항이 달려있고, 저항 양단에 걸리는 전압을 DAQ 장비를 통해 전류로 변환하여 지속적으로 수집하게 된다.

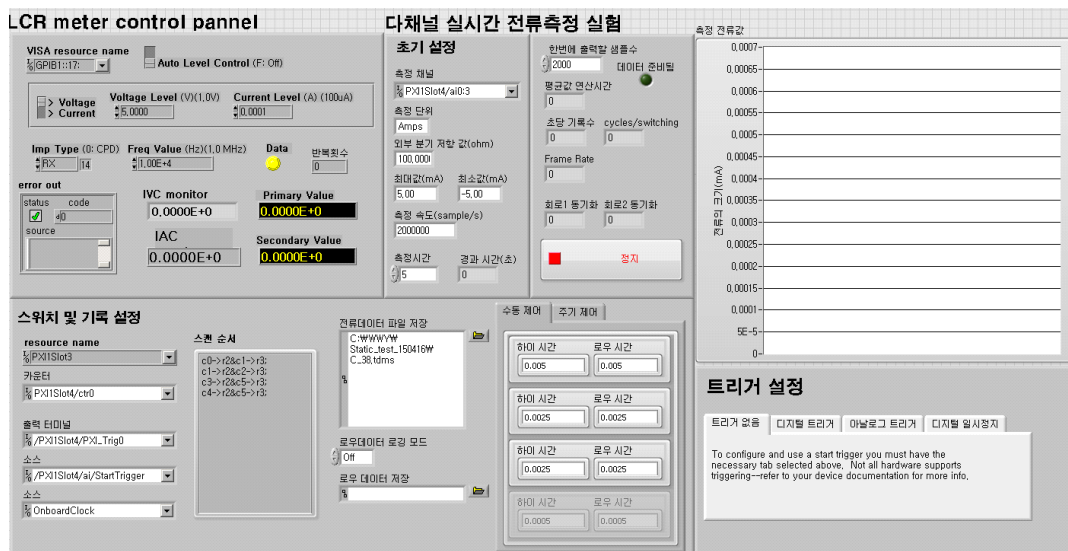
시스템의 전체적인 개념도는 그림 12 와 같다. DAQ의 데이터 수집 속도 조절을 비롯하여 인가 전압 및 주파수 조절, 전극간 스위칭 속도 조절, 교류 신호의 실효값 계산, 데이터 저장 등의 모든 과정은 그림 13 과 같이 Labview 프로그래밍을 통해 일괄적으로 처리되며, 실시간으로 모니터링 가능하다. 임피던스 센서의 측정 속도는 인가되는 교류전압의 주파수 및 DAQ의 데이터 수집 속도, 대칭전극과 수직전극의 스위칭 속도를 고려하여 결정하게 되는데, 일반적으로 교류전압 신호를 통해 실효값을 얻기 위해서는 주파수 1주기 당 2개 이상의 전압신호가 필요하게 된다.

본 연구에서는 컨덕턴스 성분을 고려하기 위해 10 kHz의 주파수로 전압을 인가하였고, 따라서 DAQ에서 초당 20,000 개 이상의 전압 데이터를 수집해야 한다. 또한, 최소한 한 주기의 교류 전압 신호를 유동양식 판별 또는 기포율 측정을 위해 사용해야하므로 본 연구에서 사용된 주파수에서는 최대 스위칭 속도가 초당 10,000 번으로 제한된다. 모든 조건을 고려하였을 때 본 실험에서 가능한 임피던스 센서에서는 각 스위칭 주기 당 유동양식과 기포율 판별을 번갈아가며 수행하므로 측정 속도는 스위칭 속도의 절반이 된다. 따라서 본 실험조건에서 임피던스 센서의 최대 측정 속도는 초당 5,000 frame이며, 주파수의 영향을 고려하지 않는

다면, 최대 초당 25,000 frame의 초고속 측정이 가능하다. 본 연구에서는 성능보다는 기포율 측정의 정확도를 높이고 장비의 오작동을 줄이기 위해 모든 실험에서 초당 500 frame으로 측정을 실시하였다. DAQ에서 수집되는 데이터는 초당 2,000,000 개로 설정하였으며 스위칭 속도는 수평관에서 1 kHz, 경사관에서 2 kHz로 설정하였다.



[Fig. 12] Schematic diagram of the measurement system



[Fig. 13] Real-time data monitoring system for the void fraction measurement



## 2) 유동 양식 판별

본 연구에서는 수평관과 경사관에서 유동양식을 성층류와 환상류 그리고 간헐류의 세 가지로 구분하게 된다. 성층류에서 유동의 경계면은 두 유체가 섞이지 않고 관 상하부로 나뉘어 흐르게 된다. 본 실험에서 전도성 유체인 물이 관 하부로 흐르게 되므로 수직전극에서 측정되는  $G^*$  값( $G_{adj}^*$ )은 매우 작은 값을 나타낼 것이다. 정적 실험에서 측정된  $G_{adj}^*$  값은 0.005(0.5 %) 이하로 나타났으며, 이 값은 실제 측정 데이터의 표준편차에 해당하는 값이다. 그러나 실제 유동에서는 벽을 타고 흐르는 물방울의 영향이나 전극을 완전히 덮지 못한 액막의 영향 등을 고려하여 적절한 기준값을 선택해 주어야 하기 때문에 실험에서 사용된  $G_{adj}^*$  값은 1 %로 결정 하였다( $G_{adj}^* \leq 0.01$ ).

유동이 성층류에서 간헐류나 환상류로 변화할 때 전도성을 지닌 액막 혹은 액체 슬러그가 관 상부에 닿게 된다. 이 경우  $G_{adj}^*$ 에서 측정되는 값은 성층류의 기준 이상이 된다( $G_{adj}^* \geq 0.01$ ). 기존 연구에 의하면, 성층류에서 간헐류로 유동이 변하는 구간은 기포율이 0.5이상일 경우에 나타난다[29]. 따라서 간헐류가 발생할 때 대칭전극에서 측정되는  $G^*$  값( $G_{opp}^*$ )은 그림 7에서 측정된 바와 같이 0.51 이상이어야 한다( $G_{opp}^* \geq 0.51$ ). 그러나 본 연구에서는 간헐류 구간의 기포율 계산을 성층류와 동일하게 계산하기 때문에 적용하지 않았다. 비슷하게 환상류는 수평관에서 기포율이 0.76 이상일 경우 나타나게 되므로[26], 이에 해당하는  $G^*$  값( $G_{opp}^*$ )은 0.3 이하로 측정되어야 한다( $G_{opp}^* < 0.3$ ). 반대로 간헐류는 환상류에 해당하는  $G^*$  값 이외의 영역에서 나타나게 된다( $G_{opp}^* \geq 0.3$ ). 경사관의 경우 수평관에 비해 기포율이 높은 구간에서 환상류가 발생하지만, 그 차이가 크지 않기 때문에 동일한 기준을 사용하였다[30]. 따라서, 유동양식 판별 기준들을 정리하면 각 유동양식에 따라 표 4 와 같이 정리 할 수 있다.

<Table 4> Criteria for flow pattern classification

$G_{opp}^*$	$G_{adj}^*$	Flow pattern
< 0.01		Stratified flow
≥ 0.01	< 0.32 ( $\alpha > 0.76$ )	Annular flow
	≥ 0.32 ( $\alpha \leq 0.76$ )	Intermittent flow

### 3) 속도 측정 기법

본 연구에서 사용한 속도측정 방법은 일반적인 피어슨 상관계수(pearson correlation coefficient)를 이용한 상관분석(correlation analysis)으로, 분석하고자 하는 두 변수가 모두 연속적일 때 두 변수간의 선형적인 상관관계의 크기를 모수적(parametric)인 방법으로 나타내는 방법이다. 피어슨 상관계수( $R$ )은 -1 에서 1 사이의 값을 가지고 있으며 일반적으로 1 과 -1 에 가까울수록 강한 상관관계를, 0 에 가까울수록 약한 상관관계를 나타낸다. 본 연구에서는 두 변수, 즉 두 개 이상의 센서를 통해 측정된 기포율의 변화가 동일할 경우 같은 유동으로 판단 할 수 있기 때문에 상관계수가 1 에 가까울수록 좋다.

동시에 측정된 두 센서 혹은 한 개의 센서를 통해 얻은 두 가지 이상의 데이터를 이용하여 상관계수를 구하고 가장 큰 상관관계를 나타내는 두 지점 사이의 지연 시간( $\Delta t$ )을 알고, 측정된 두 지점 사이의 거리( $d$ )를 안다면 유동의 속도는 다음과 같은 간단한 식을 통해 계산할 수 있다.

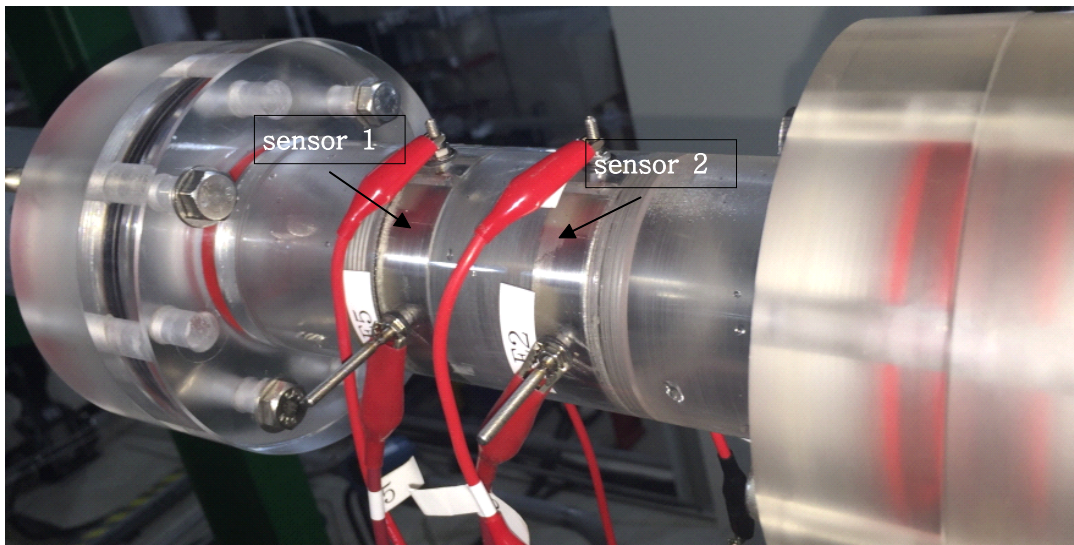
$$j_{sv} = \frac{d}{\Delta t} (m/s) \quad (8)$$

여기서  $j_{sv}$  는 structure velocity이며, 이는 관 내부를 진행하는 물-공기의 겹보기 속도에 의해 유동양식이 변화하며 생기는 계면 구조의 변화 혹은 유동 내에서 기포율 변화에 의해 계면구조가 달라지면서 이동하는 속도를 의미한다[31].

임피던스 센서에서 속도측정은 동일한 구조의 두 개 이상의 센서로부터 동시에

측정된 기포율 데이터를 통해 계산 가능하다. 그림 14 는 경사유로에서 속도측정을 위해 제작한 멀티 센서 시스템의 사진이다. 두 임피던스 센서 사이가 유동이 변화하지 않을 정도로 가깝고 각 센서에서 기포율을 측정하는 간격, 즉 측정 속도가 충분히 빠르다면 각 센서에서 시간에 따른 기포율 변화는 유동의 진행속도와 센서 사이 거리에만 의존하게 된다. 센서 사이의 거리는 변하지 않으므로 우리가 알고자 하는 구간에서 두 센서 사이의 시간에 따른 기포율 변화 그래프를 통해 가장 큰 양의 상관관계를 가지는 지점을 구하고, 두 지점 사이의  $\Delta t$  를 구함으로써 간단하게 유동의 속도를 구할 수 있게 된다.

이렇게 계산한 속도는 고속카메라를 이용한 결과와 비교를 통해 교차검증 하였으며 두 센서 데이터와 WMS 그래프 피팅을 통해 전체 구간에서 유동 구조의 진행속도가 잘 일치하는지 확인하였다.



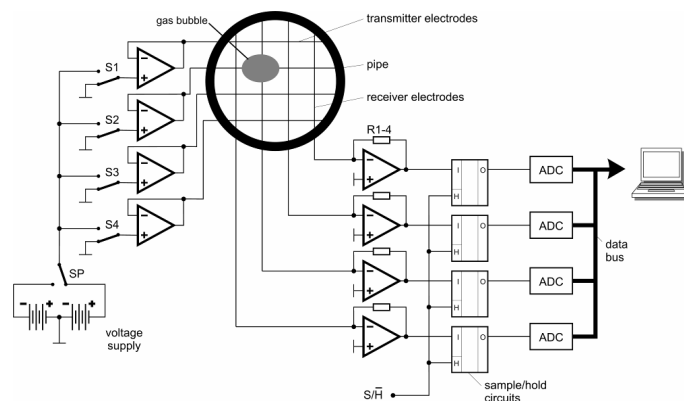
[Fig. 14] Multi-sensor system for velocity measurement

#### 4. 비교 데이터 측정

##### 1) 와이어 메쉬 센서

임피던스 센서에서 측정된 기포율 데이터의 검증 및 비교를 위해 와이어 메쉬 센서(WMS)를 사용하였다. 본 연구에 사용된 WMS는 독일 HZDR사에서 개발된 사용 센서로, 다상유동 현상에서 유체의 전기적 성질 차이를 이용하여 기포율을 측정하고 가시화하는 장치이다[6]. 그림 15는 4개의 송,수신부를 갖는 WMS의 구성도이다. 본 연구에서 사용된 WMS는 총 16 개의 송신부와 수신부를 갖는 와이어가 수직으로 배열되어있고, 이로 인해 256 개의 교차점이 생기게 된다. 와이어의 두께는 0.125 mm이며 각 와이어 사이의 거리는 2.5 mm떨어져 있다. WMS는 임피던스 센서와 200 mm거리를 두고 유로 후방부에 설치하였는데, 이는 두 센서간 전기 간섭을 최소화 하면서 유동 진행에 따른 변화율을 최소화하기 위한 거리를 수치해석을 통해 분석한 결과이다. 본 실험조건은 수평유로와 경사유로에서 모두 동일하게 적용하였다.

WMS에서 기포율과 측정된 전압은 선형적인 관계라고 가정한다[28]. 이를 통해 측정된 전압을 기포율로 변환시킬 수 있게 된다. 본 연구에서 사용한 WMS의 최대 측정 속도는 10,000 frame/sec 이다.



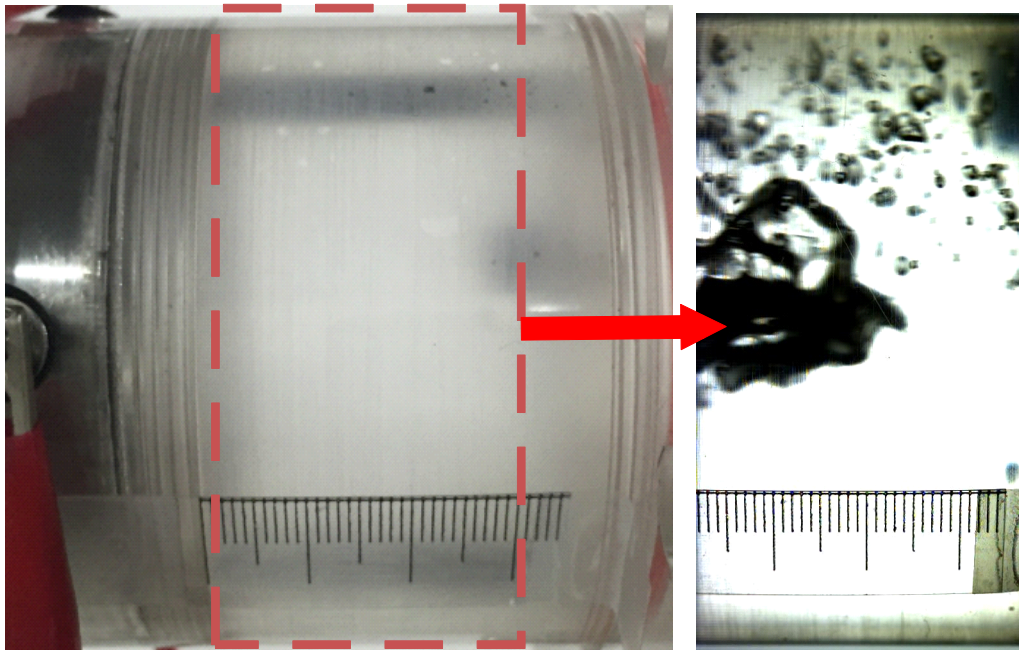
[Fig. 15] Wire-mesh sensor electronics with a  $4 \times 4$  sensor configuration (Prasser *et al.* 1998).

## 2)고속 카메라

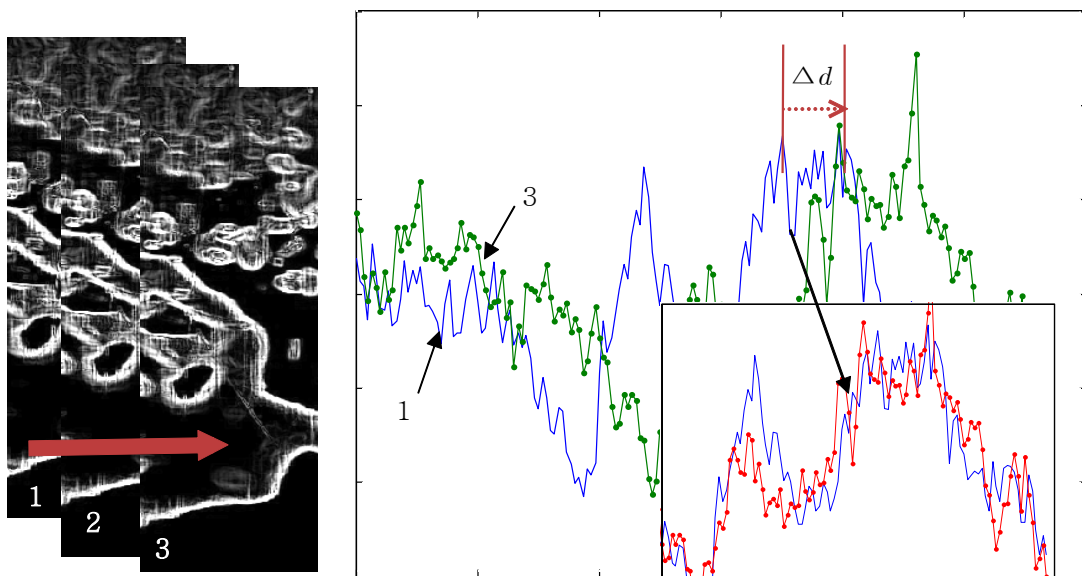
센서를 통해 계산된 속도를 교차 검증하기 위해 고속카메라를 이용한 속도 측정 기법 사용하였다. 고속카메라는 일본 Photron사의 Fastcam SA4 모델로 최대 1024x1024 pixel 해상도로 측정이 가능하며, 최대 50,000 fps의 속도로 고속 촬영이 가능하다. 고속카메라 촬영부의 중심은 센서로부터 약 30 mm 떨어져 있으며 시간에 따라 유동이 진행한 거리를 계산하기 위해 측정부 하단에 스케일 바를 부착하였다.

유동을 가시화하기 위해 조명을 카메라와 마주보도록 배치하고 측정부와 조명 사이에 확산판을 설치하여 빛의 양을 고르게 조절하였다. 조명이 측정부 뒤에서 비추게 되므로 유동의 경계면에서 그림자가 생기게 되고(그림 16), 이를 Sobel edge 기법을 활용하여 소프트웨어적 처리를 거치게 되면(그림 17) 시간에 따른 유동의 경계면 변화를 좀 더 정확하게 추적할 수 있게 된다. 결론적으로 데이터의 상관관계를 구하는 방식은 임피던스 센서와 동일하지만 고속카메라에서 두 변수는 시간에 따른 기포율 변화가 아닌 측정영역에서 유동 진행방향에 따른 빛의 세기 변화로 주어지게 된다.

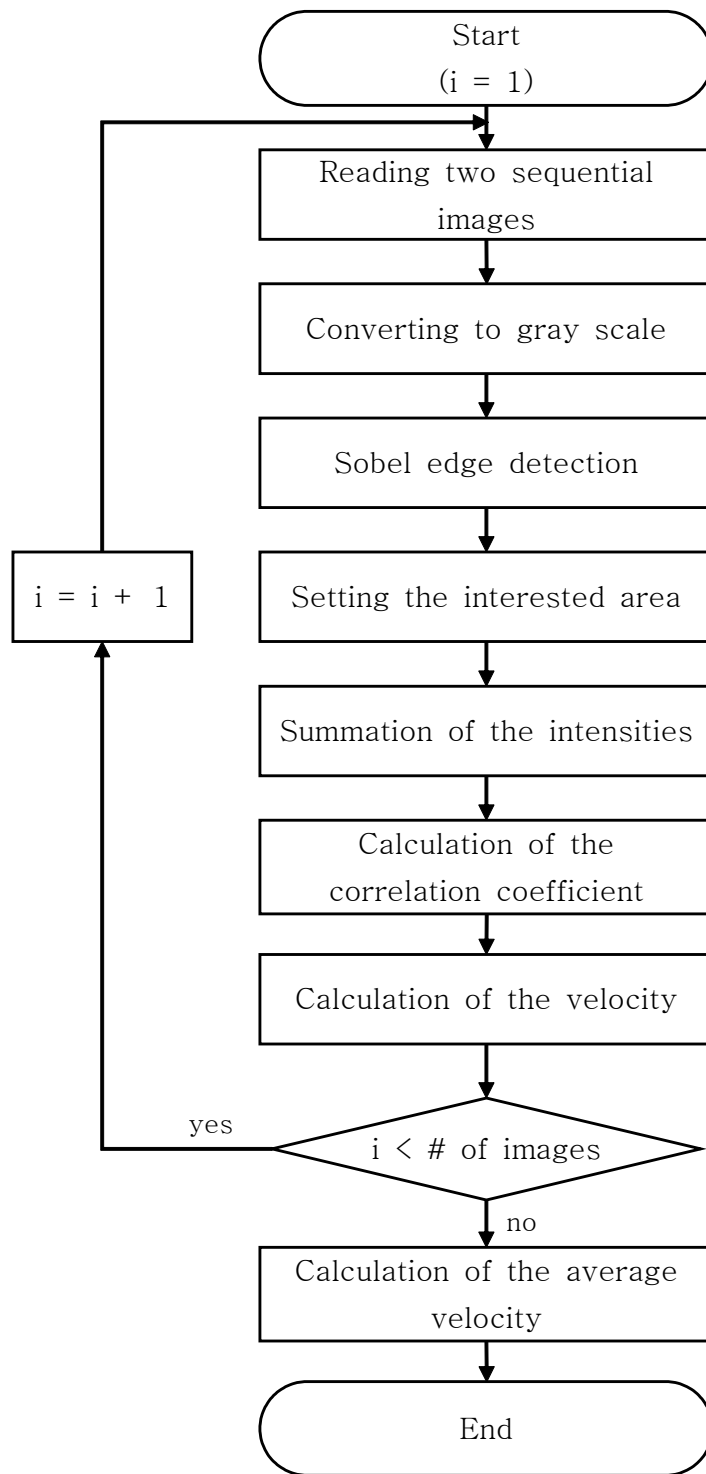
그림 17 에서 보는 바와 같이, 유로 내부를 지나가는 이상유동의 형상에 따라 측정부 각 영역에서 명도가 달라지게 되며 이를 유동의 진행방향에 따라 합산하여 나타내면 그림 17 의 오른쪽 그래프 1 과 같이 나타나게 된다. 동일한 측정부에서 일정한 시간 뒤에 촬영한 사진은 그림 17 의 왼쪽 사진과 같이 형상은 동일하고 유동의 진행방향으로 옮겨놓은 형태가 될 것이다. 이를 통해 동일한 방법으로 그래프를 그리게 되면 그림 17 의 그래프 3 과 같은 형태가 나타나게 되고 두 그래프를 이용하여 상관 관계를 구함으로써 유동의 속도를 측정할 수 있게 된다. 그림 18 은 고속카메라를 이용한 속도측정 알고리즘을 순서도로 나타낸 것이다. 임피던스 센서에서는 고정된 거리(30 mm)에서 지연 시간( $\Delta t$ )를 계산하였다면, 고속카메라에서는 일정한 시간(1/frame rate)에서 intensity가 이동한 거리( $\Delta d$ )를 측정하는 방식이다.



[Fig 16] Measuring area of the high-speed camera



[Fig. 17] Cross-correlation method using camera images

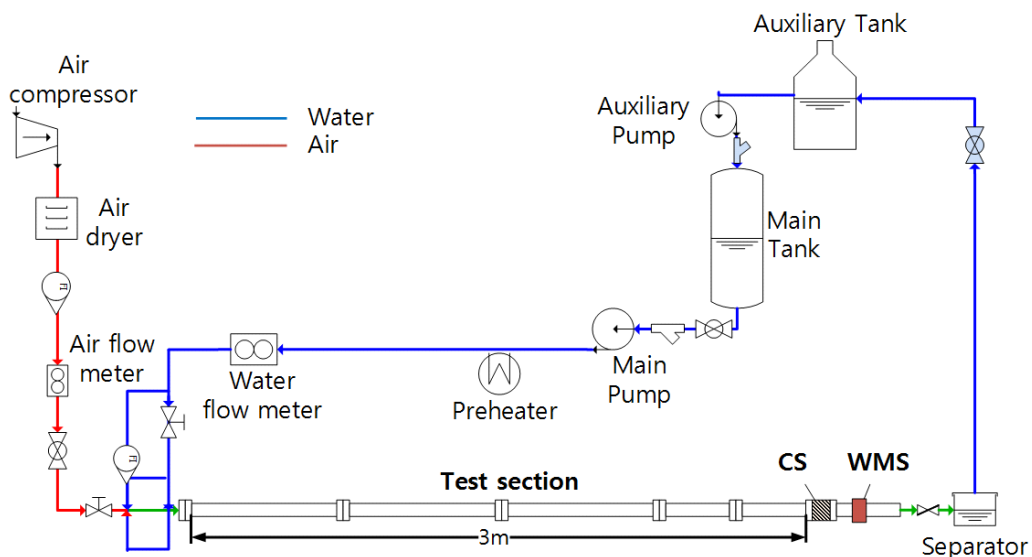


[Fig. 18] Velocity calculation flowchart for the high speed camera

## 6. 수평관 및 경사관 실험 장치

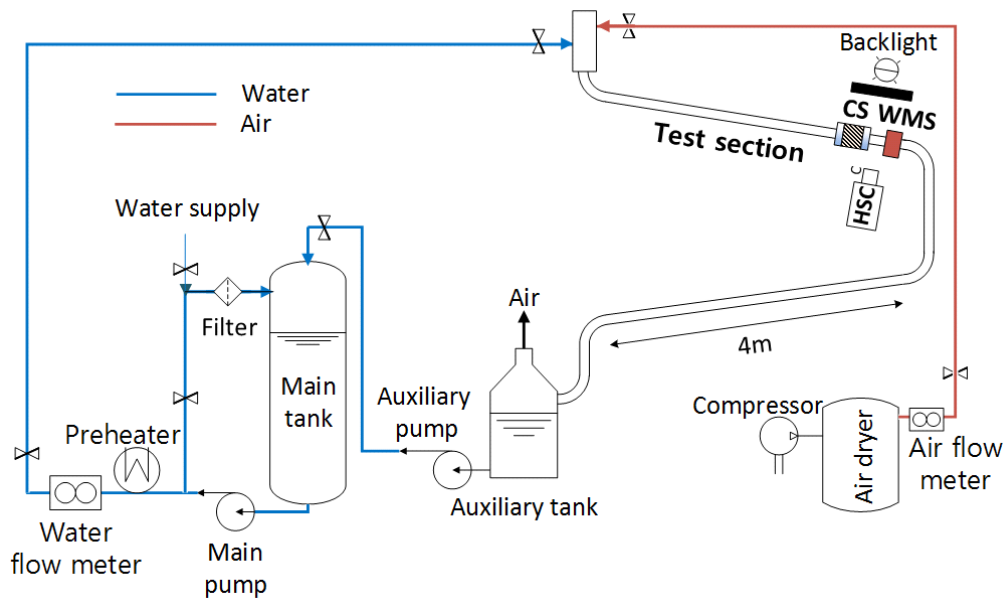
### 1) 수평관 및 경사관 설비

제주대학교 원자력과학기술연구소에 설치된 이상유동 실험설비를 이용하여 동적실험을 수행하였다. 전체 유로는 수평유로, 수직유로, 경사 유로로 구성되어 있으며, 주 탱크, 주 펌프, 예열기, 공기 컴프레셔, 분리기, 보조 탱크, 보조 펌프를 공유하여 사용하고 있다. 모든 유로는 투명 아크릴 재질로 내부 유동을 관측 할 수 있게 되어있으며, 수평 유로의 직경은 40 mm이고 총 길이는 5,000 mm이다. 이는 그림 18 에서 확인할 수 있다. 경사 유로의 직경은 45 mm 이고 상, 하부 경사구간의 길이는 3,000 mm이며, 경사도는 3도이다. 그림 19 에서 이를 나타내었다. 이는 한국형 차세대 원자로인 APR+에 적용된 피동 안전계통의 하나인 PAFS(passive auxiliary feedwater system)의 구조와 동일하다[32]. 입구효과에 의한 유동발달을 고려하여 센서는 수평관 입구로부터 3,000 mm(L/D=75), 경사관에서는 2,500 mm(L/D=55)떨어진 지점에 설치하였다. 그림 20 과 21 은 실제 센서 및 계측장비들이 설치된 사진이다.

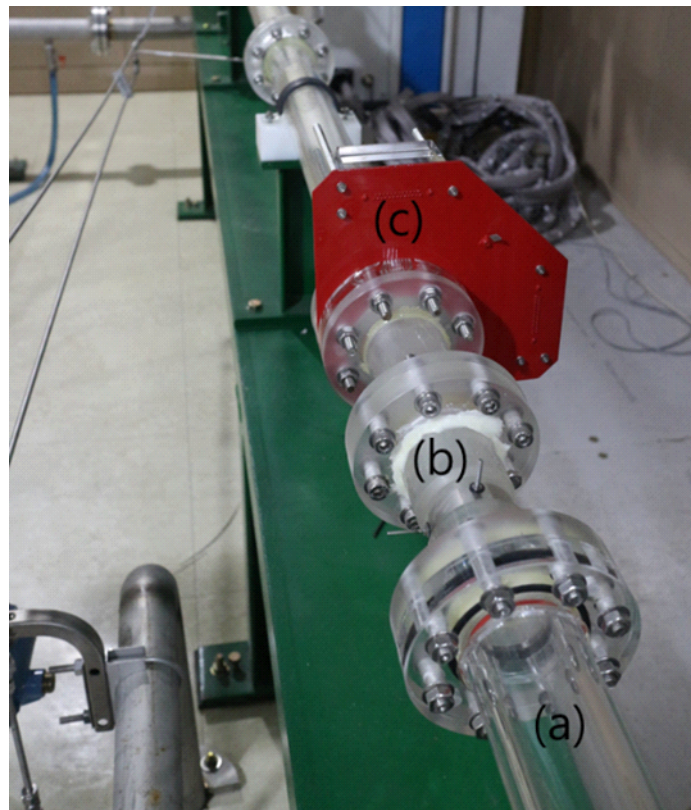


[Fig. 19] Schematic of the horizontal loop system

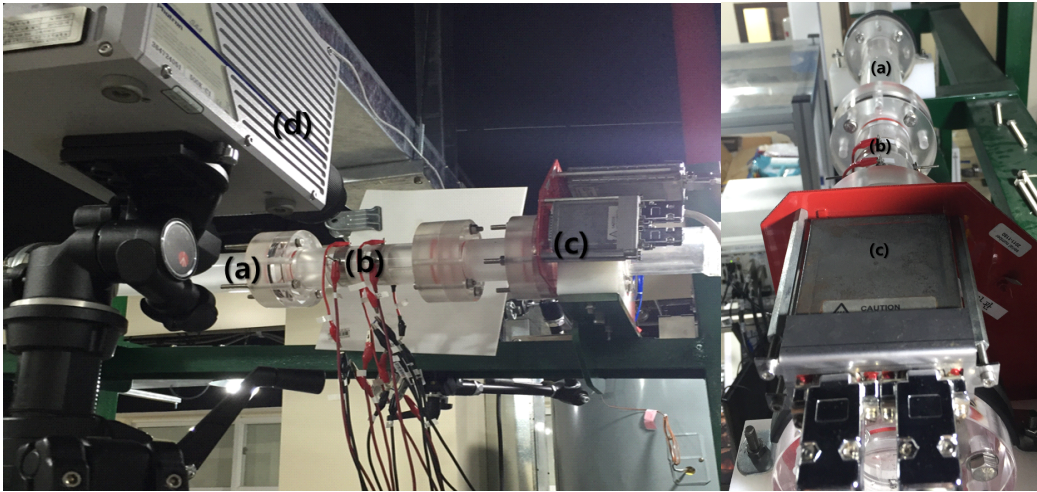




[Fig. 20] Schematic of the inclined loop system



[Fig. 21] Photo of sensor installations in the horizontal loop :  
 (a) test section, (b) impedance sensor, (c) wire-mesh sensor



[Fig. 22] Photo of sensor installations in the inclined loop : (a) test section, (b) multi-impedance sensor, (c) wire-mesh sensor, (d) high speed camera

## 2) 실험 조건

다양한 걸보기 속도 범위에서 동적 실험을 수행하였다. 수평유로에서 물의 걸보기 속도는  $0.05 \sim 1.2 \text{ m/s}$  ( $j_l = 0.05 \sim 1.2 \text{ m/s}$ ), 공기의 걸보기 속도는  $0.8 \sim 14.7 \text{ m/s}$  로 실험하였고 ( $j_g = 0.8 \sim 14.7 \text{ m/s}$ ), 경사유로에서 물의 걸보기 속도는  $0.1 \sim 3 \text{ m/s}$  ( $j_l = 0.1 \sim 3 \text{ m/s}$ ) 로, 공기의 걸보기 속도는  $0.1 \sim 18 \text{ m/s}$  ( $j_g = 0.1 \sim 18 \text{ m/s}$ ) 사 이에서 실험을 수행하였다.

표 5 와 그림 22 는 수평 유로 실험 결과 중 몇 가지 유동 조건을 선택해 나타낸 것이다. 경사 유로 실험은 수평 유로 실험을 통한 분석을 바탕으로, 다양한 기체, 액체의 걸보기 속도 조건에서 센서의 성능을 평가하였다. 표 6 과 그림 23 은 경사 유로에서 수행한 실험의 유동 조건에 대해 나타낸 것이다.

수평 유로에서는 스위칭 속도  $1 \text{ kHz}$ , 인가 전압  $5 \text{ V}$ , 주파수  $10 \text{ kHz}$ 에서 실험을 수행하였고, 경사유로에서는 스위칭 속도  $2 \text{ kHz}$ 로 실험을 수행하였다. 최종적인 측정속도는 스위칭되는 전극의 개수에 따라 달라지게 되므로 단일 센서인 수평유로 와 이중 센서인 경사유로에서 모두  $500 \text{ fps}$ 로 동일하게 된다.

기포율 측정은 모든 조건에서 WMS와 비교하였고 속도 측정 비교를 위해 고속카 메라를 통해 속도 판별이 가능한 몇 가지 조건에 대해 비교를 수행하였으며 나머

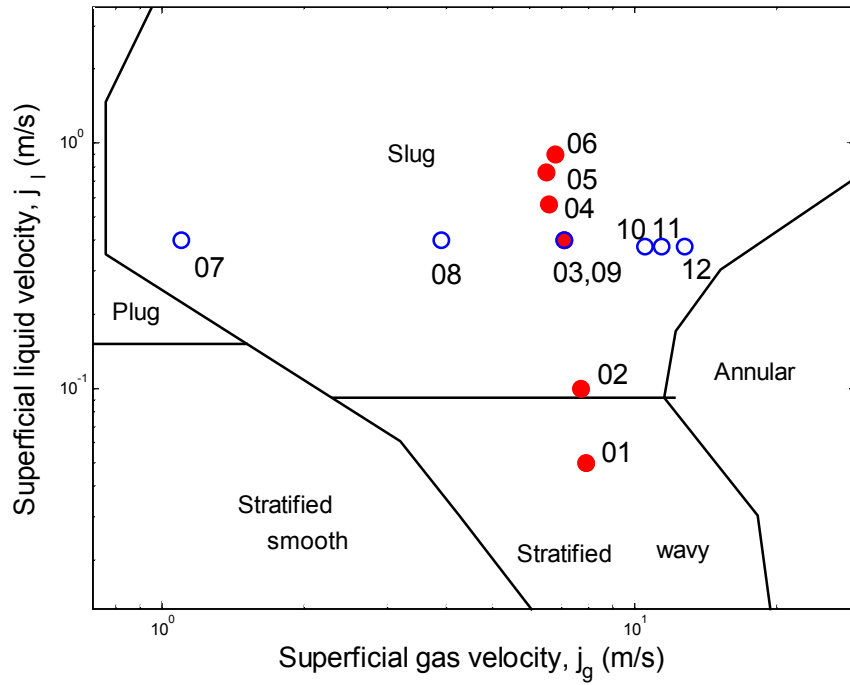
지 조건에 대해서는 센서를 통해 계산한 속도를 이용하여 WMS의 데이터와 비교 분석하였다. 또한 모든 센서는 동기화하여 동일 시간동안 측정되도록 설정하였다.

<Table 5> Test matrix for some selected flow conditions in the horizontal loop

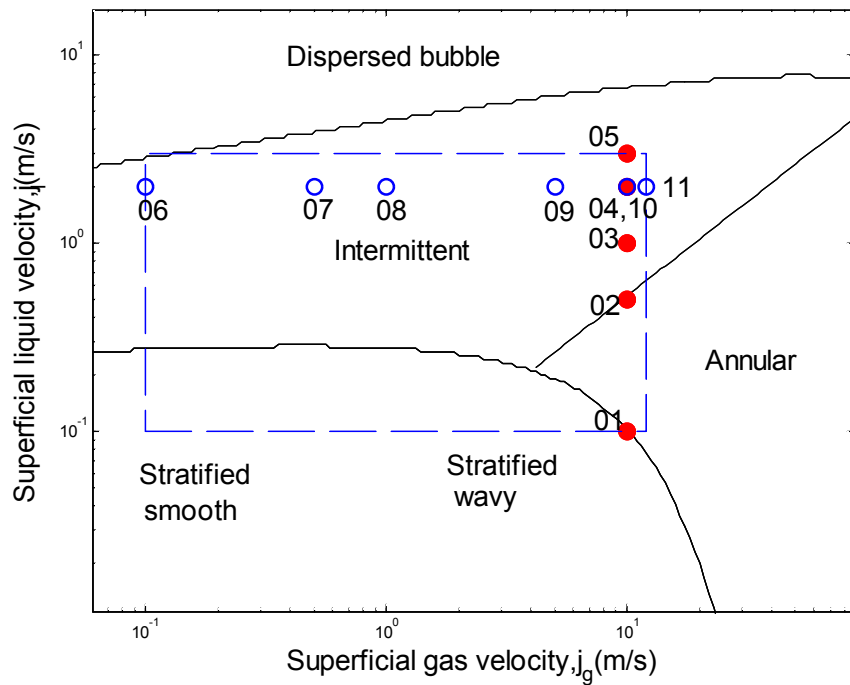
Case	$j_l$ (m/s)	$j_g$ (m/s)	Flow pattern
01	0.05	7.9	Stratified flow
02	0.1	7.7	Stratified flow
03	0.4	7.1	Intermittent flow
04	0.56	6.6	Intermittent flow
05	0.76	6.5	Intermittent flow
06	0.9	6.8	Intermittent flow
07-12	0.2	4.2, 6.3, 8.5, 10.8, 12.7, 14.2	Intermittent flow

<Table 6> Test matrix for flow conditions in the inclined loop

Case	$j_l$ (m/s)	$j_g$ (m/s)	Flow pattern
01-05	0.1	0.1, 0.5, 1.5, 10, 12	Stratified flow
06	0.3	18	Stratified flow
07-11	0.5	0.1, 0.5, 1.5, 10, 12	Stratified flow
12-16	1	0.1, 0.5, 1.5, 10, 12	Intermittent flow
17-21	2	0.1, 0.5, 1.5, 10, 12	Intermittent flow
22-25	3	0.1, 0.5, 1, 10	Intermittent flow



[Fig. 23] Some selected flow conditions on the horizontal flow regime map of Mandhane et al[33].



[Fig. 24] Some selected flow conditions on the inclined flow regime map of Taitel and Dukler[29].

## IV. 실험 결과 및 고찰

### 1. 수평유로 유동양식 판별 및 기포율 측정 결과

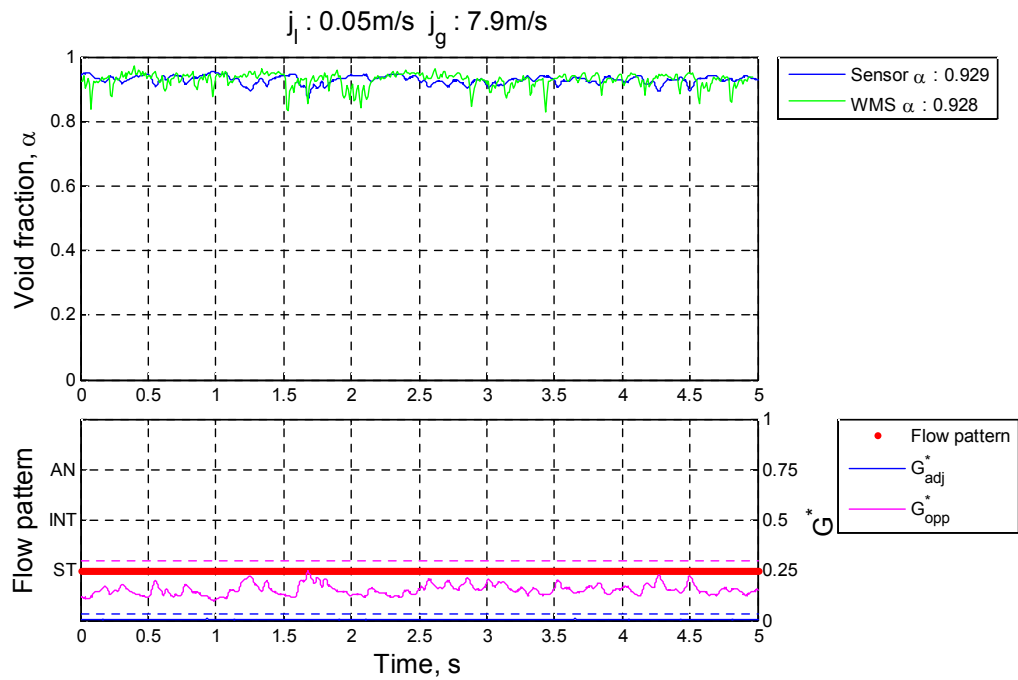
그림 25 와 26 은 임피던스 센서와 WMS의 결과를 비교한 것이다. 그래프 하단에 위치한 유동양식 판별은 앞서 정한 기준에 따라 측정 시점의  $G^*$  값이 성층류이면 ST(stratified flow) 환상류이면 AN(annular flow) 간헐류이면 INT(intermittent flow)로 나타나게 된다.

그림 25 의 case 1~6 번은 수평관에서 액체의 겉보기 속도 변화에 대한 결과이다. 수평유로에서 액체의 겉보기 속도가 매우 낮은 경우 기체의 겉보기 속도에 영향을 거의 받지 않고 높은 기포율 영역에서 안정적인 성층류 유동을 보인다. 기체의 겉보기 속도가 비슷한 상황에서 액체의 겉보기 속도가 점차 증가하면 시간에 따른 기포율 변화가 커지게 되고 기포율이 감소하면서 점차 불안정한 형태의 파형류가 만들어지게 된다. 액체의 속도가 좀 더 빨라지게 되면 기체에 겉보기 속도에 영향을 받아 생기는 기포율의 변화가 매우 불안정해지게 되며, 관 상부를 쓸고 지나가는 슬러그 형태의 유동이 생겨나면서 컨덕턴스 신호가 간헐류와 환상류로 구분하는 영역이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

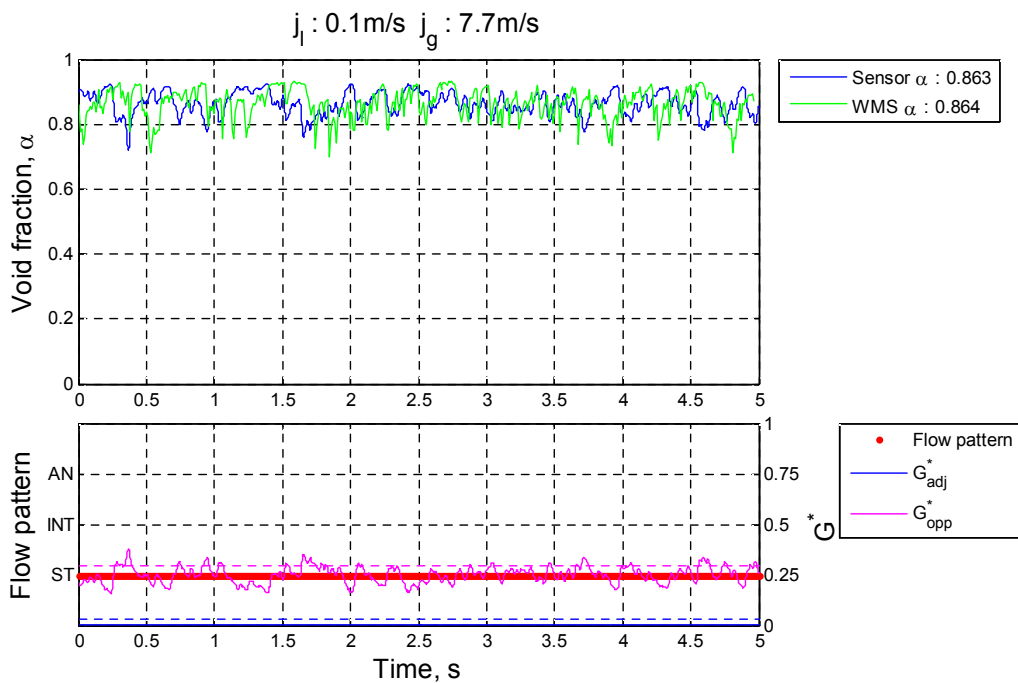
그림 26 의 case 7~12 번은 수평관에서 기체의 겉보기 속도 변화에 대한 결과이다. 액체의 겉보기 속도를 고정시킨 상태에서 기체의 겉보기 속도가 증가하게 되면, 슬러그 형태의 파형류는 점차적으로 감소하게 되고, 대신에 센서 주변 벽면을 액막이 둘러싸고 진행하는 형태의 유동으로 변화하게 된다. 이는  $S_f$  전극에서 측정되는  $G_{adj}^*$  의 크기변화를 통해 유추할 수 있다. 기체의 겉보기속도가 증가함에 따라 기포율은 점차 증가하게 되고 시간에 따른 기포율 변화는 액체의 겉보기 속도가 낮을 때와 유사하게 보이나  $S_v$  전극에서 측정되는 컨덕턴스 신호의 크기와 패턴이 완전히 달라지는 것을 확인할 수 있다.

기포율 측정결과는 WMS와 비교하였을 때 매우 잘 일치하는 것을 확인할 수 있

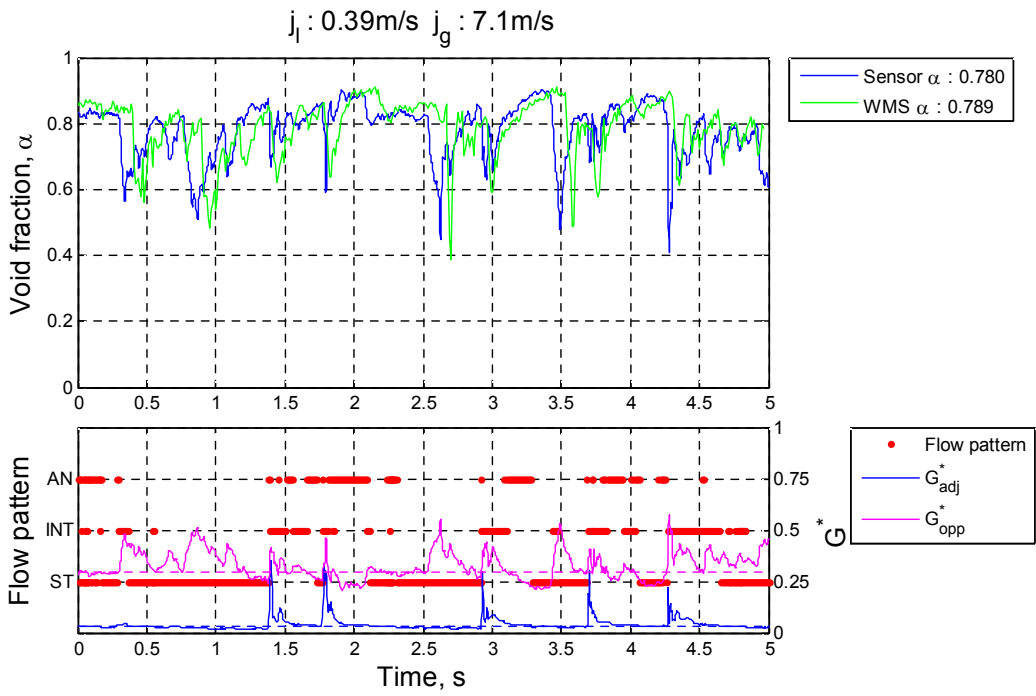
다. 또한 유동양식을 판별하는 기준이 매우 간단함에도 불구하고 동일한 기포율의 간헐류 구간과 성층류 구간을 구분 짓는데 매우 유용한 정보를 보여주고 있다.



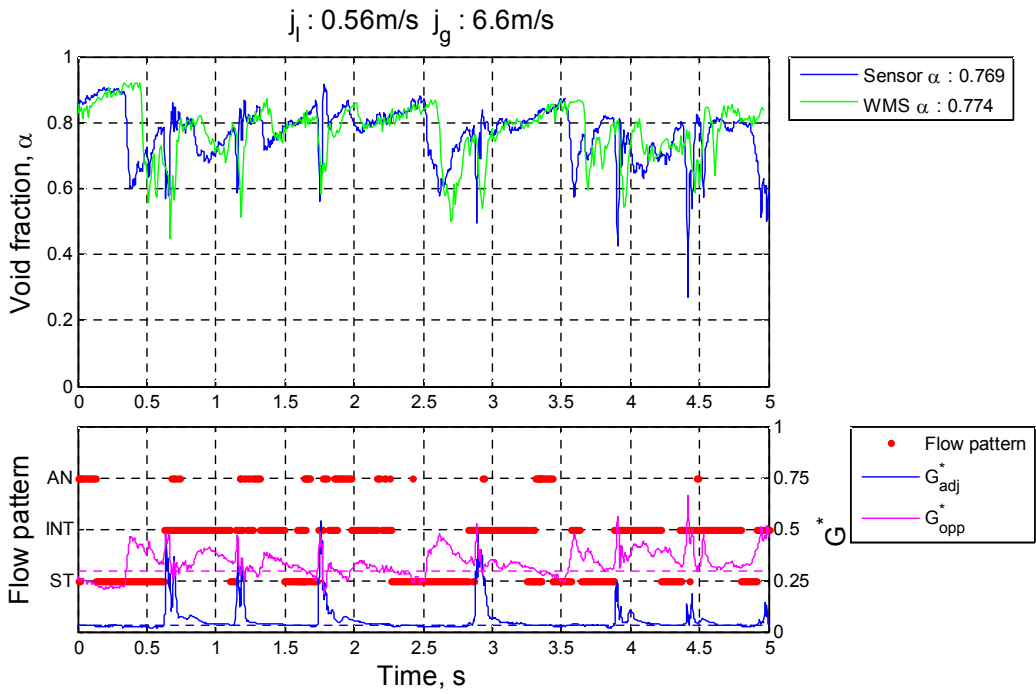
(a) Case 1



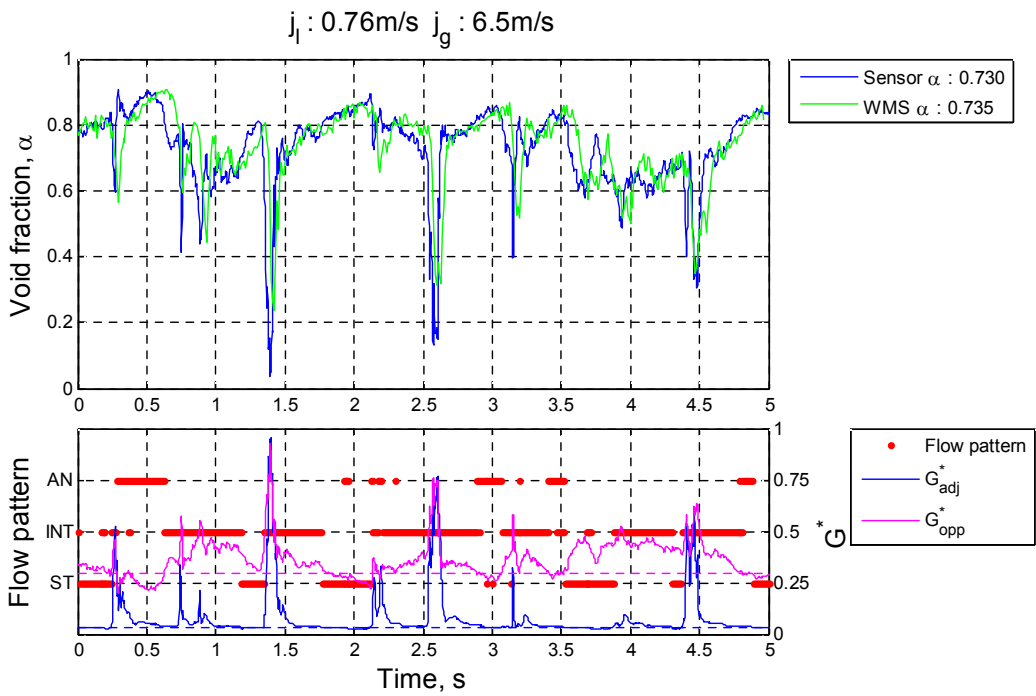
(b) Case 2



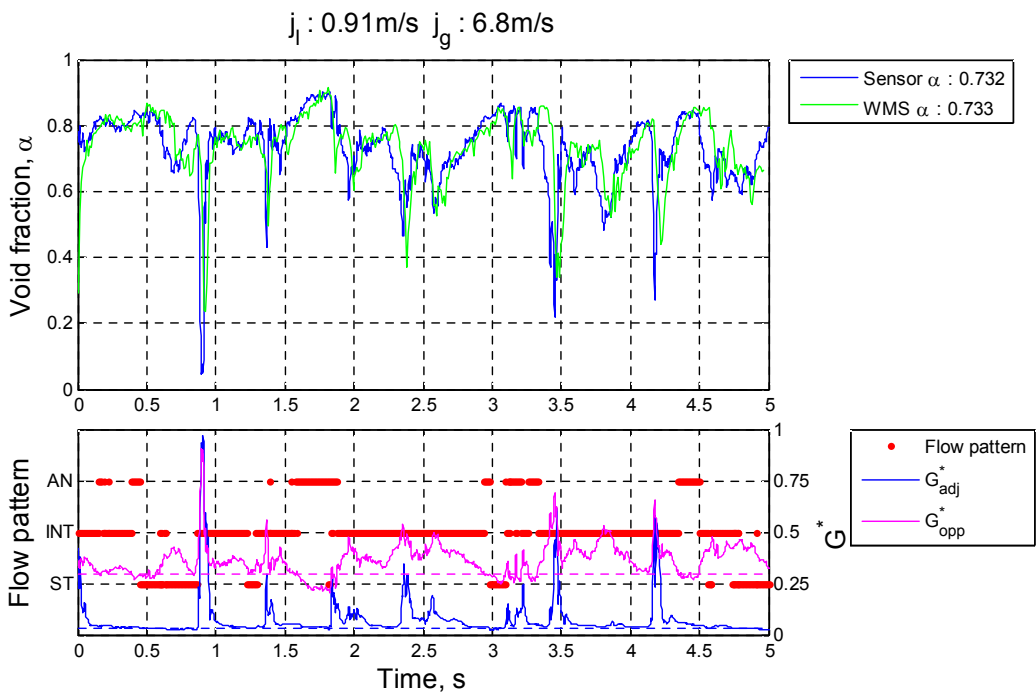
(c) Case 3



(d) Case 4



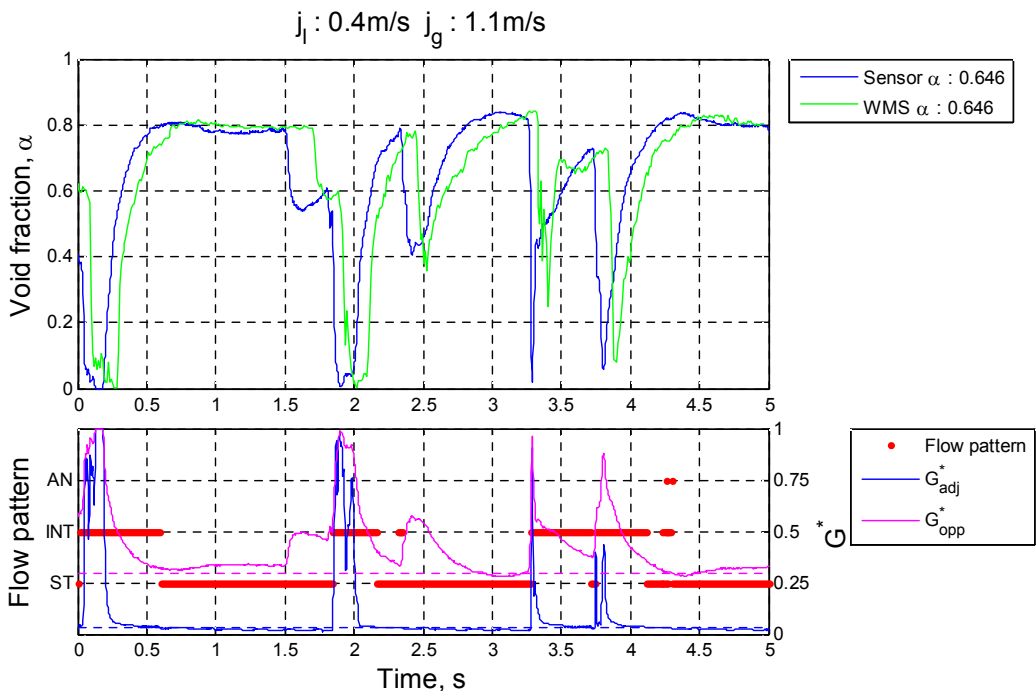
(e) Case 5



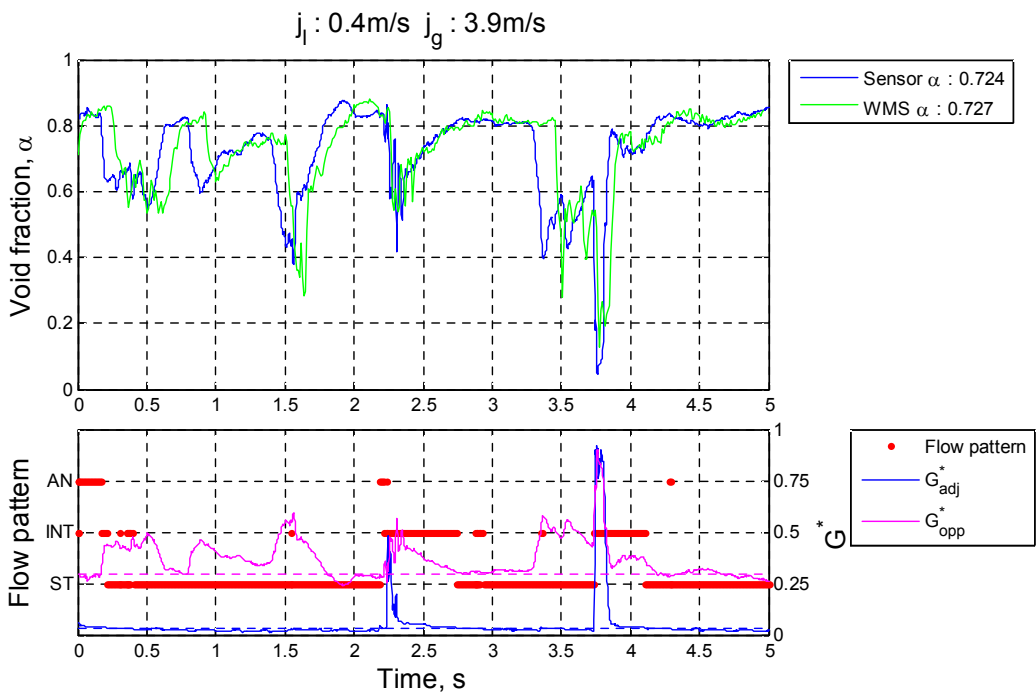
(f) Case 6

[Fig. 25] Comparison between instantaneous void fraction of the proposed sensor and WMS for superficial liquid velocities

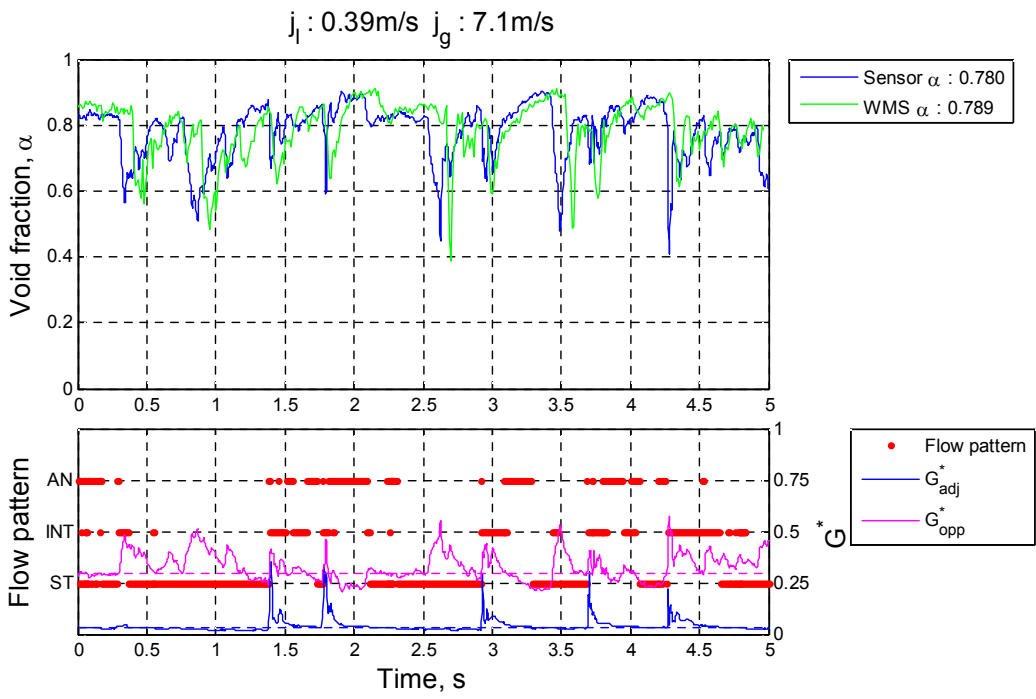




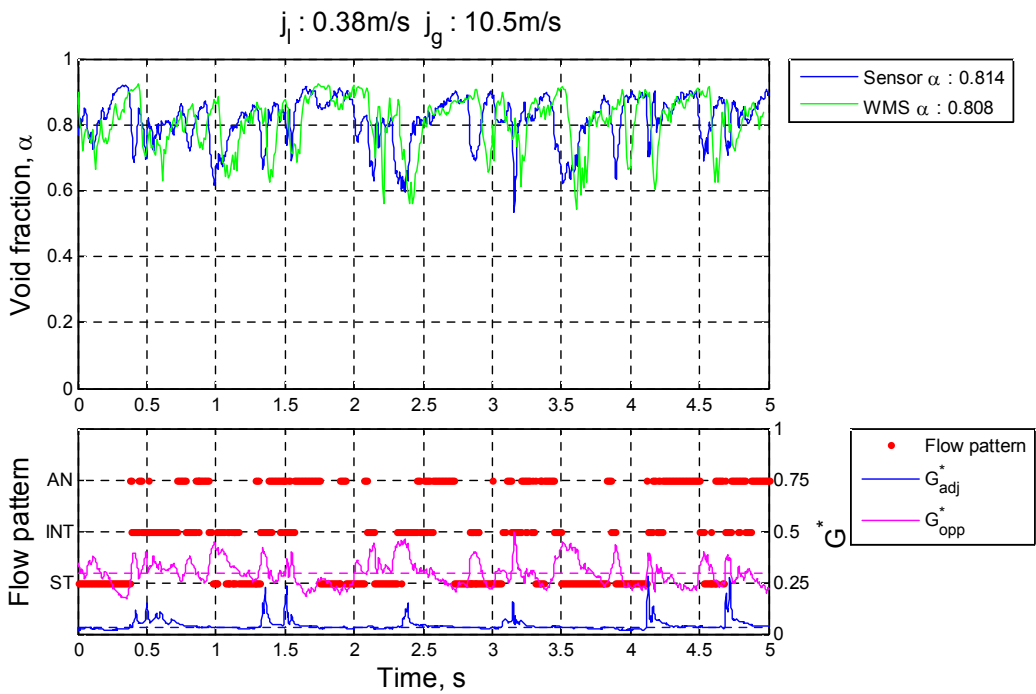
(a) Case 7



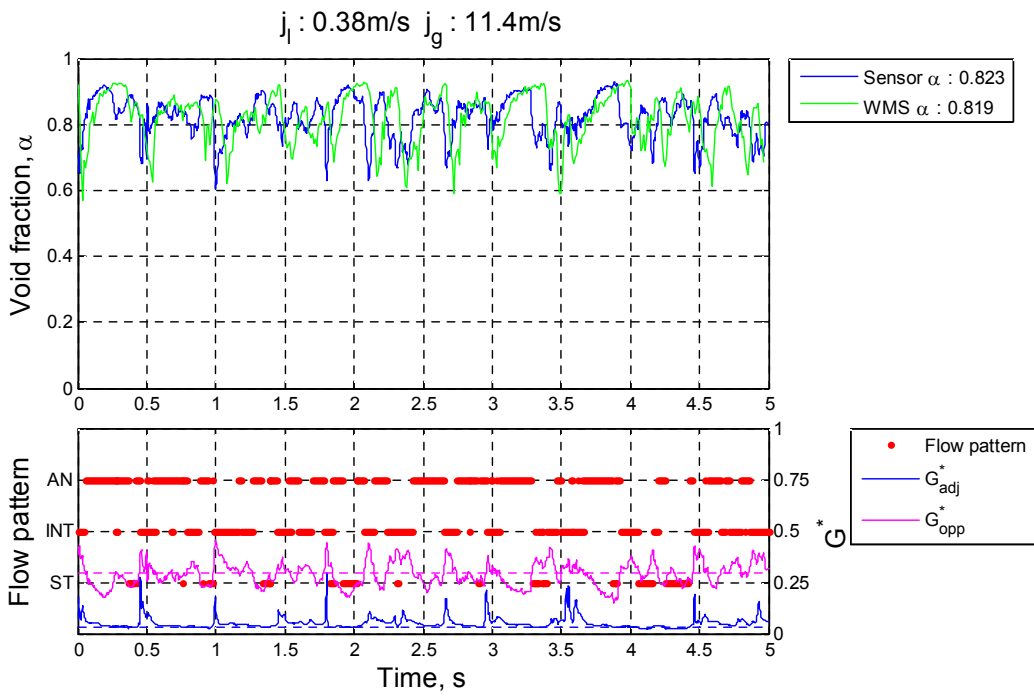
(b) Case 8



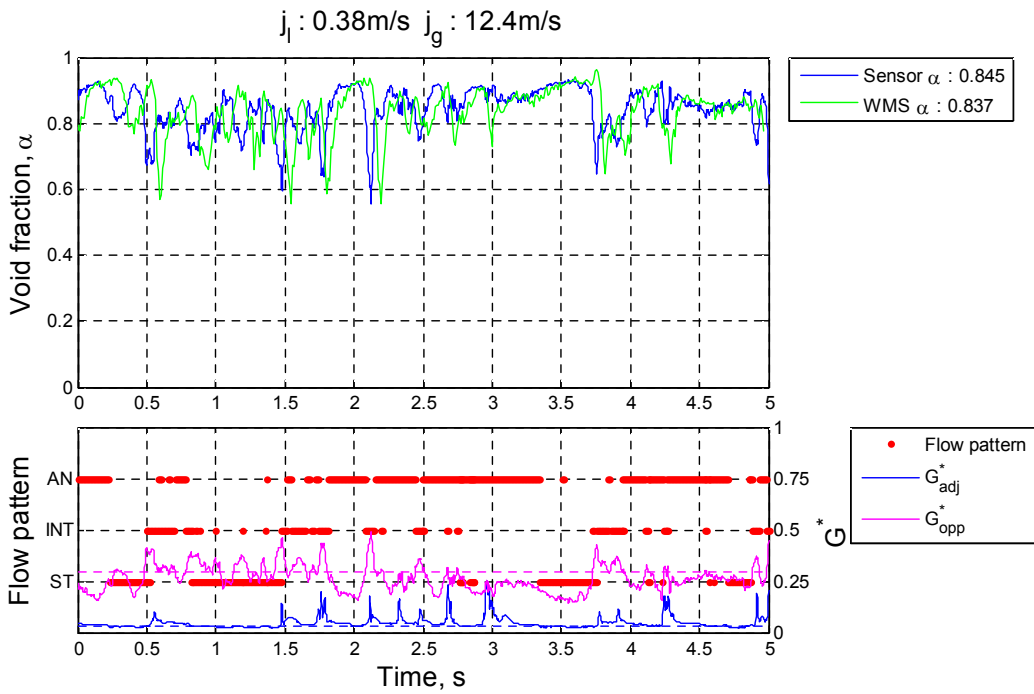
(c) Case 9



(d) Case 10



(e) Case 11



(f) Case 12

[Fig. 26] Comparison between instantaneous void fraction of the proposed sensor and WMS for superficial gas velocities

## 2. 경사유로 기포율, 유동양식 및 속도 측정 결과

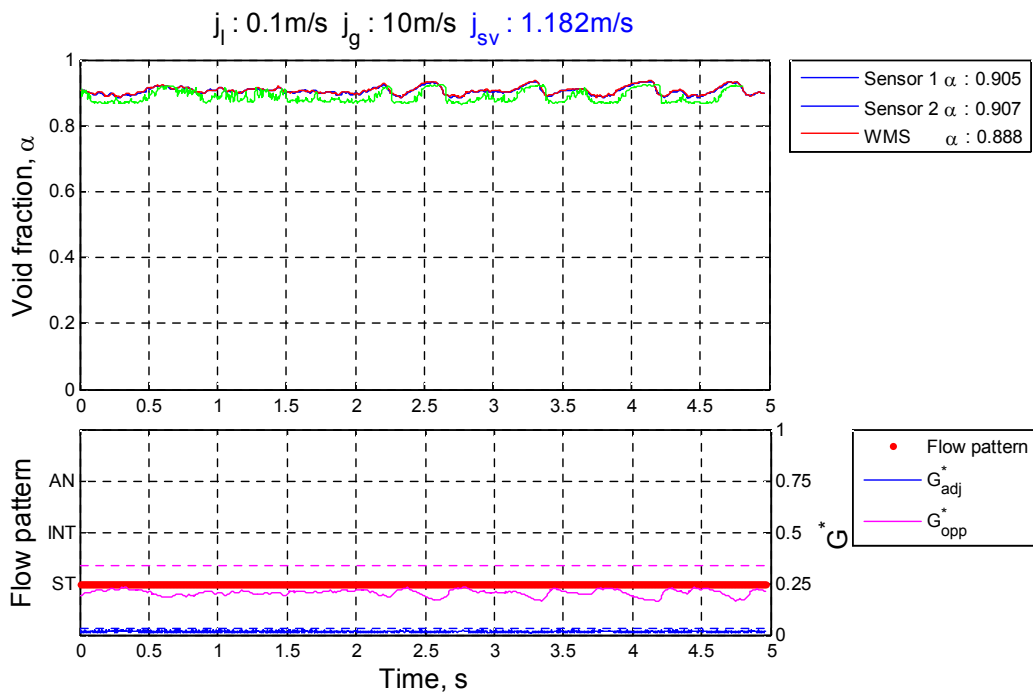
그림 27 과 28 은 이중 센서를 이용하여 기포율 및 속도를 측정된 뒤 시간 지연을 계산하여 나타낸 그래프이다.  $j_{sv}$  는 멀티 센서를 통해 계산한 structure velocity이다. 두 센서를 통해 측정되는 시간에 따른 기포율 변화는 거의 오차 없이 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 이는 두 센서 사이를 지나는 유동의 구조 변화가 거의 없이 일정한 모양으로 흐른다는 것을 의미한다. 각 센서의 기포율 데이터는 계산한 structure velocity를 바탕으로 재배치하였다. 이를 통해 센서에서 측정된 속도가 모든 구간에 대해 지속적으로 유지되는지 혹은 기체와 액체의 겹보기 속도에 따라 센서 1 과 센서 2 사이, 센서 2 와 WMS 사이에서 유동의 구조가 잘 유지되는지를 판단할 수 있다.

그림 27 의 case 1~5 번은 경사관에서 액체의 겹보기 속도 변화에 대한 결과이다. 액체의 겹보기 속도가 매우 낮은 경우에는 수평유로에서와 마찬가지로 기체의 겹보기 속도에 영향을 거의 받지 않고 높은 기포율 영역에서 안정적인 성층류 유동을 보인다. 액체의 겹보기 속도가 증가함에 따라 파형류가 발생하고 점차 슬러그 형태의 유동이 생겨나는 모습은 유사하나, 수평유로에 비해 슬러그의 크기와 길이가 짧고, 관 벽에 생기는 액막의 두께가 두꺼운 형태의 간헐류로 발달하게 된다. 이러한 양상은 유동양식 판별구간에서 측정되는  $G_{adj}^*$  값이 슬러그 구간에서는 수평유로에 비해 더 낮으나 간헐류 구간에서 평균치는 더 높게 측정되는 양상을 통해 유추할 수 있다. 액체와 기체의 겹보기속도가 모두 느릴 때 발생하는 기포율 변화 또한 수평유로에서는 큰폭으로 급격하게 변화하면서 매끄러운 곡선의 형태를 유지하지만, 경사유로에서는 기포율 변화가 서서히 일어나고 그 폭이 좁으며 기포가 지나가는 구간동안 매우 불안정한 형태로 요동치는 것을 확인할 수 있다.

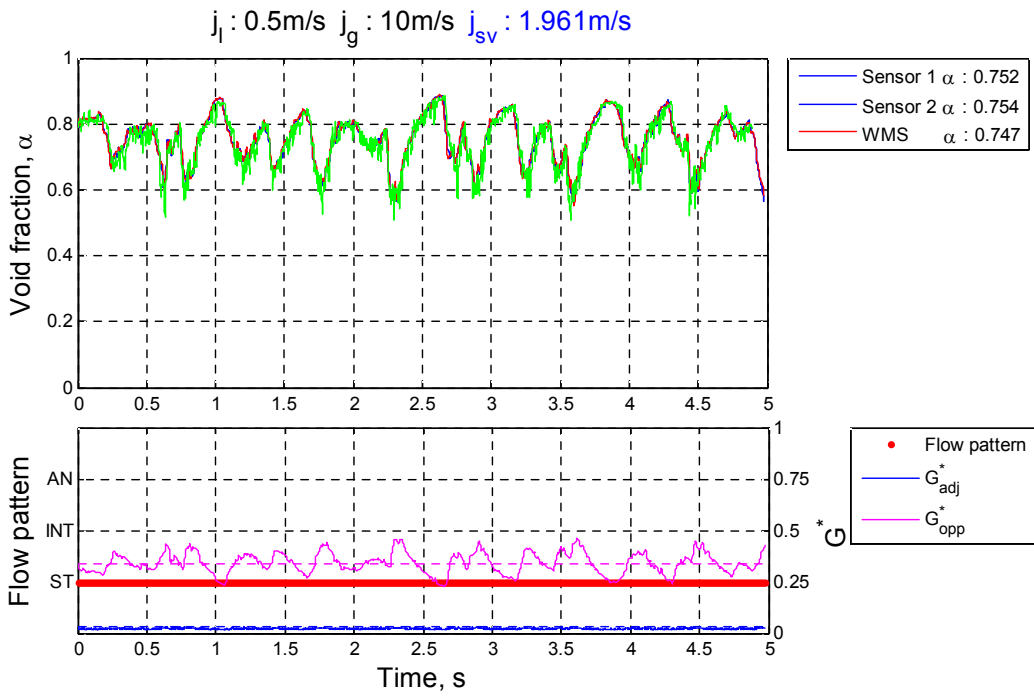
그림 28 의 case 6~11 번은 경사관에서 기체의 겹보기 속도 변화에 대한 결과이다. 액체의 겹보기 속도를 고정시킨 상태에서 기체의 겹보기 속도가 증가할 때 보이는 양상은 수평유로에서 결과와 거의 유사하나 앞서 설명한 바와 같이 기체

의 겉보기 속도에 의한 영향을 덜 받는 것을 알 수 있다. 액체의 겉보기 속도와 기체의 겉보기 속도가 빨라짐에 따라 생기는 액막이 유지되는 시간이 경사유로에서 더 길지만 기포율이 더 낮게 측정되기 때문에 유동관별에서 환상류로 분류되는 구간은 더 줄어들게 되었다.

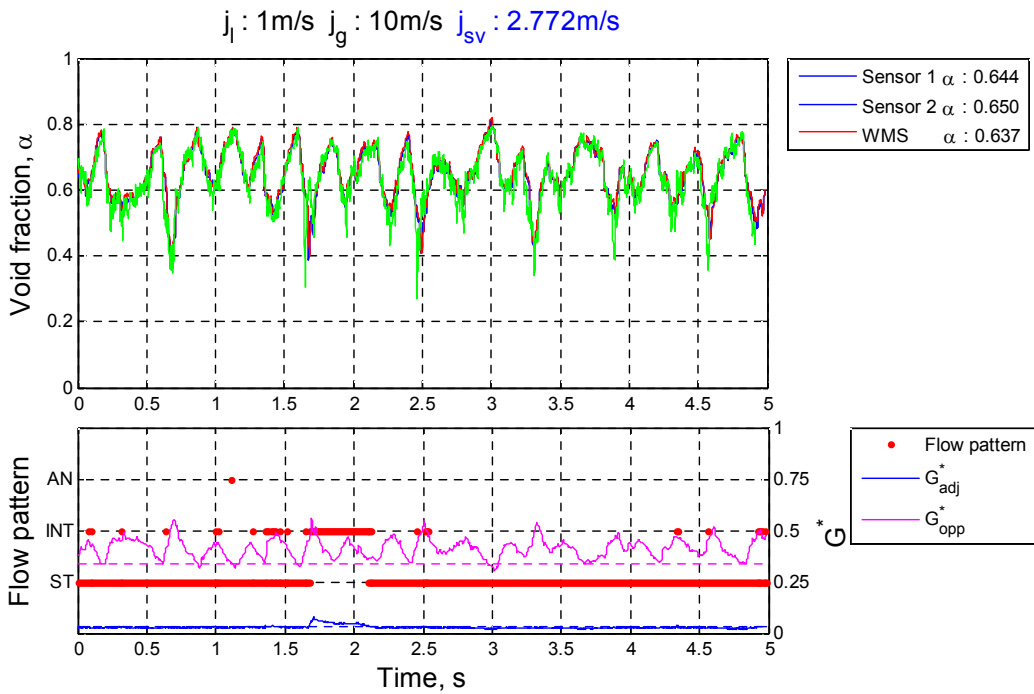
Cross-correlation을 통한 유동의 structure velocity 변화는 기체에 의한 영향보다는 액체의 겉보기 속도 증가에 의한 영향 더 큰 것을 확인할 수 있는데, 이는 현재의 결과들만을 이용하면 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다. 기포율이 높은 성층류 구간에서  $j_{sv}$ 는 기체의 겉보기 속도보다는 액체의 겉보기 속도와 중력의 영향을 크게 받으며, 간헐류 구간 혹은 환상류 구간에서  $j_{sv}$ 는 기체의 겉보기 속도의 영향을 더 크게 받기 때문이다.



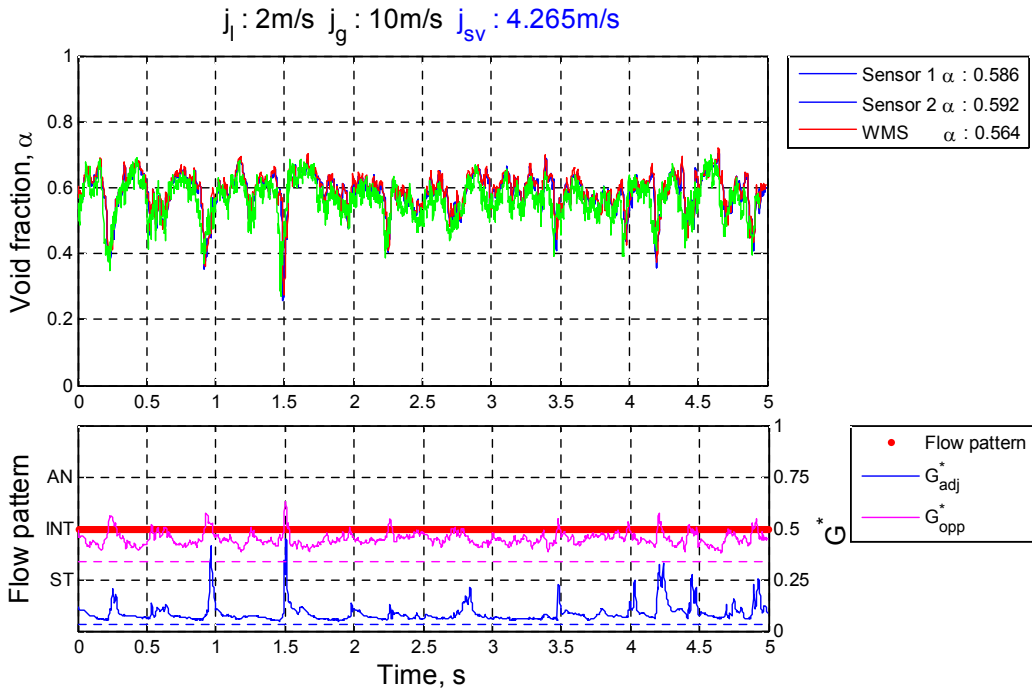
(a) Case 1



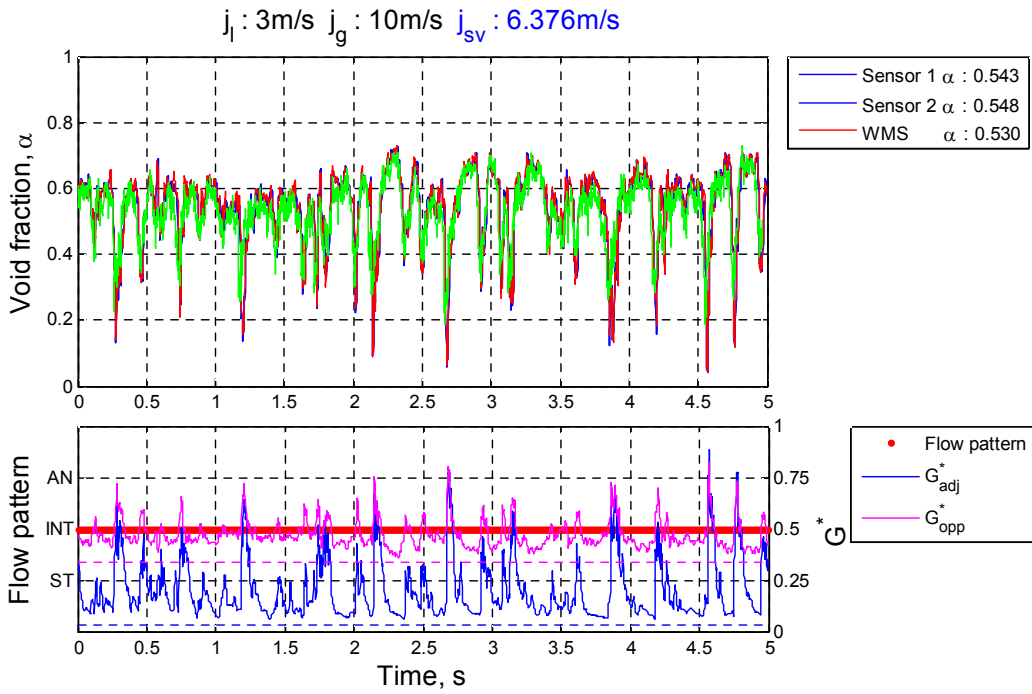
(b) Case 2



(c) Case 3

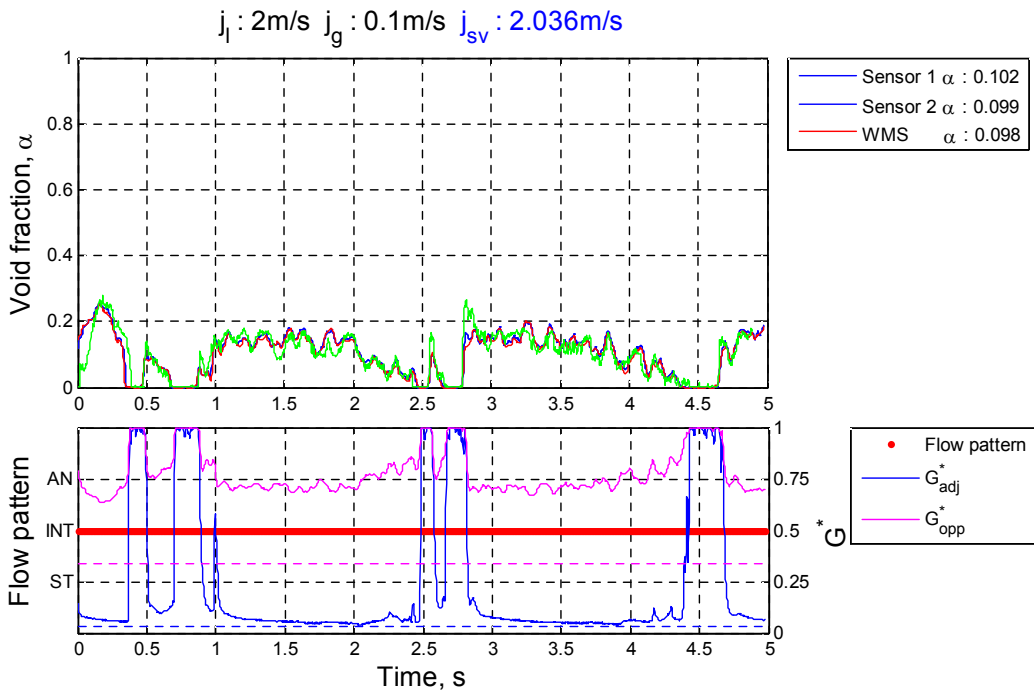


(d) Case 4

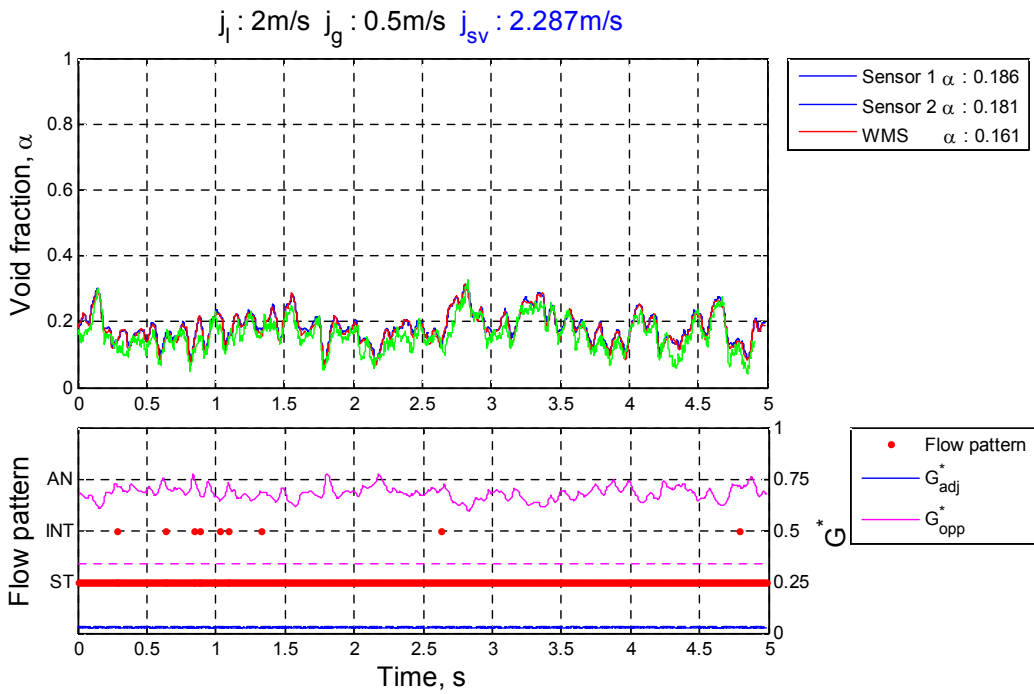


(e) Case 5

[Fig. 27] Comparison between proposed sensor and WMS for superficial liquid velocities

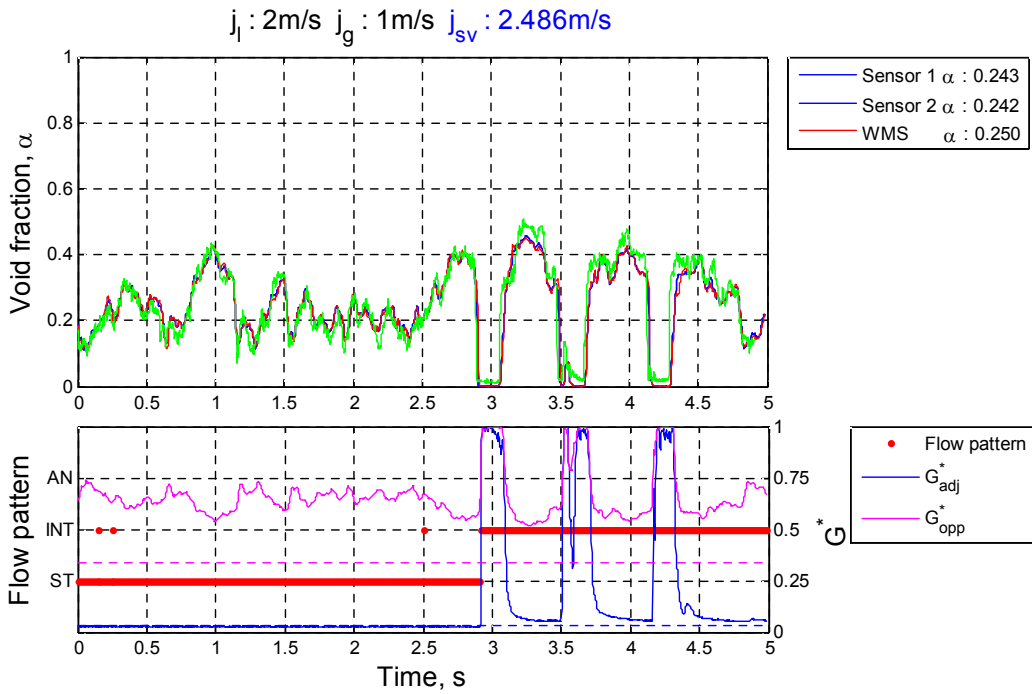


(a) Case 6

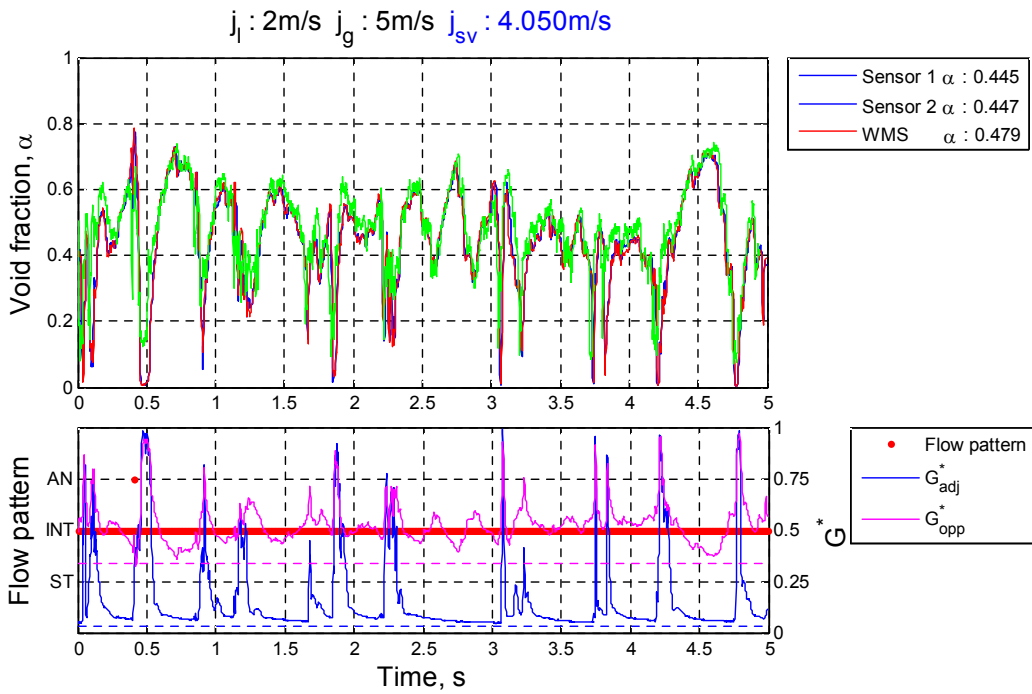


(b) Case 7

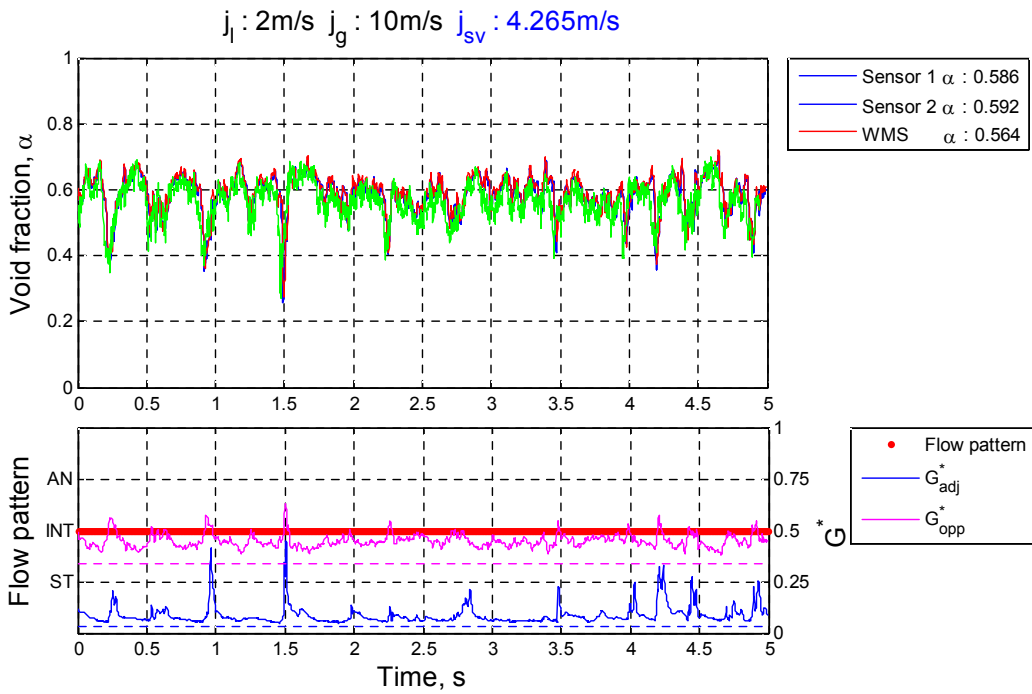




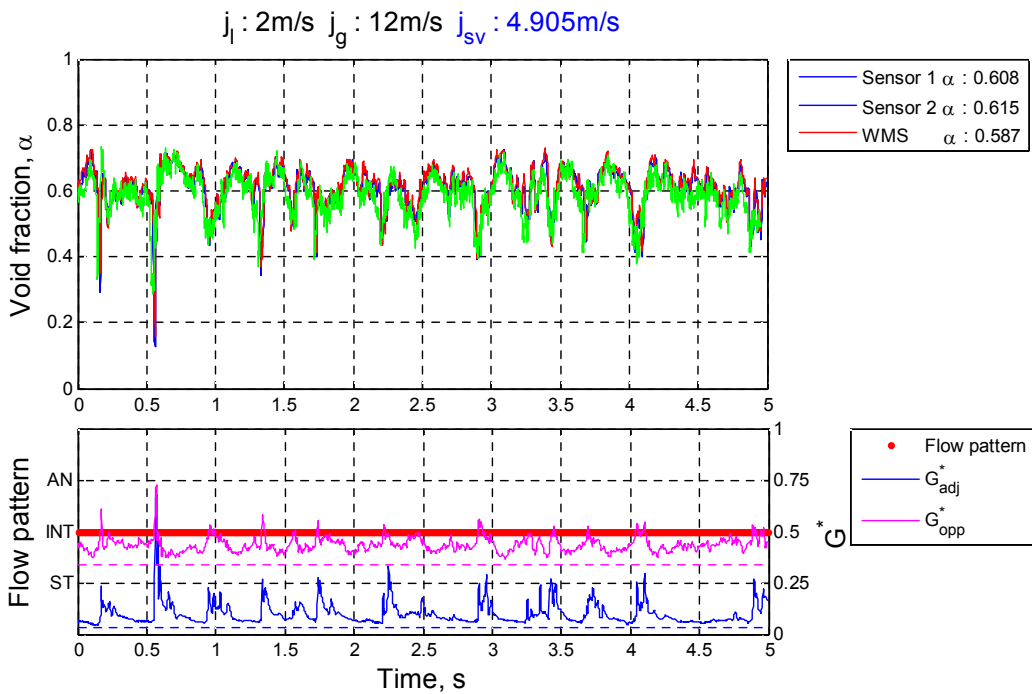
(c) Case 8



(d) Case 9



(e) Case 10

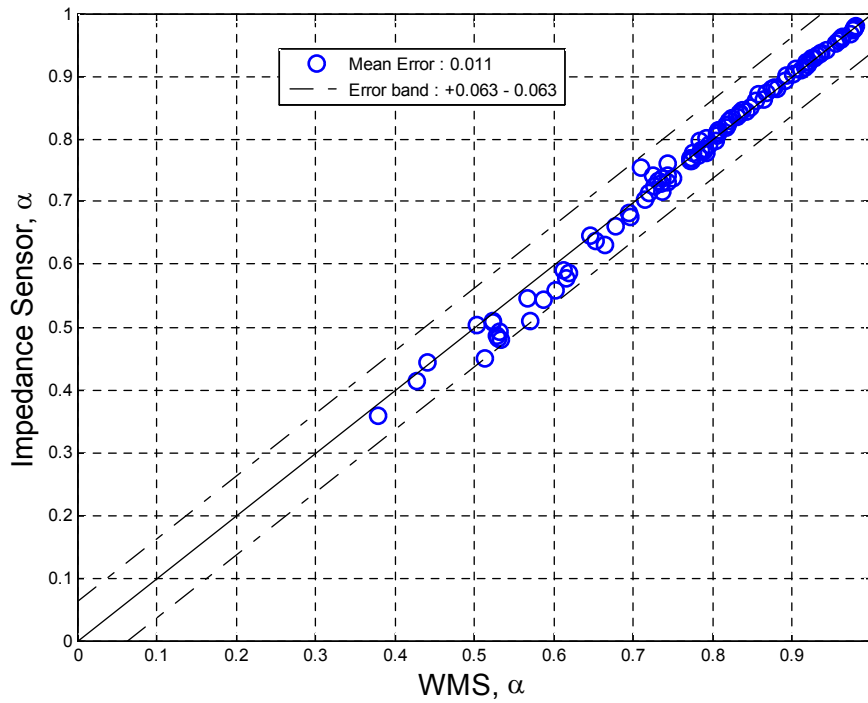


(f) case 11

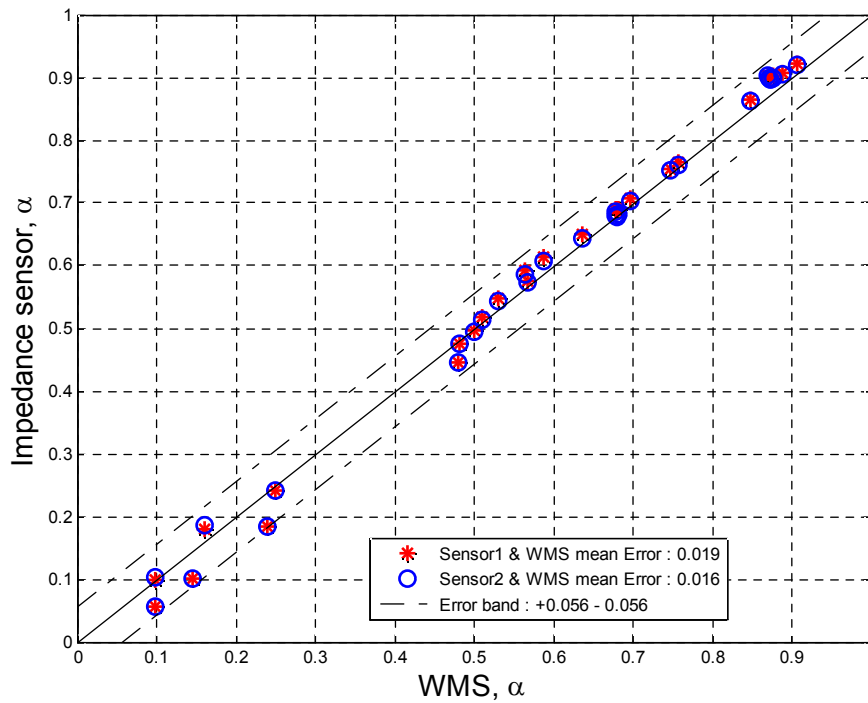
[Fig. 28] Comparison between proposed sensor and WMS for superficial gas velocities

### 3. 기포율 측정 결과 분석

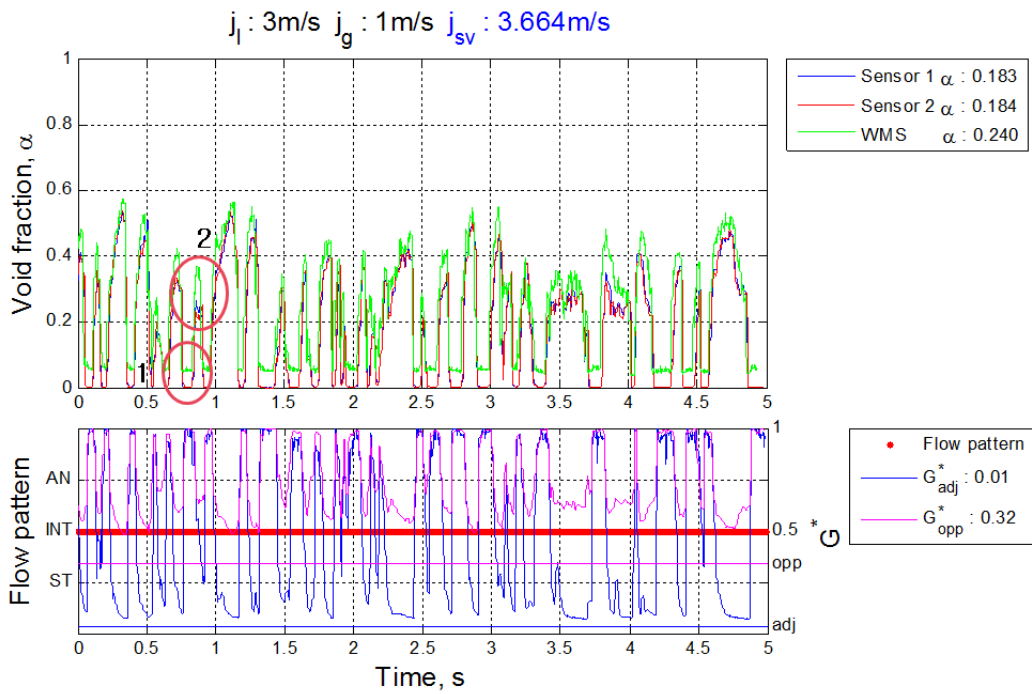
그림 29 와 30 은 각각 수평유로와 경사유로에서 임피던스 센서와 WMS 간의 시간평균 기포율을 비교한 결과이다. 두 결과 모두 WMS와 비교하여 비교적 잘 일치하고 있으나, 전체적으로 임피던스 센서가 WMS에 비해 기포율을 낮게 예측하고, 낮은 영역에서 편차가 커지는 것을 확인 할 수 있다. 그림 32 는 경사유로 실험중 두 센서가 기포율 오차가 큰 조건( $j_l : 3.0 \text{ m/s}$ ,  $j_g : 1.0 \text{ m/s}$ )에서의 시간에 따른 기포율 데이터와 특정 시점에서 고속카메라 영상과 WMS 단면을 가시화 한 것이다. 그림 32(b) 는 그래프(a)의 1 번 시점을 가시화 한 것으로, 관 내부가 물로 가득 차 있고 적은 양의 기포가 그 사이로 흐르는 것을 알 수 있다. 이 경우 임피던스 센서는 기포의 영향을 적게 받아 기포율이 거의 0에 가깝게 측정되는 반면, WMS는 내부에 존재하는 기포의 영향을 더 크게 측정하여 상대적으로 높은 기포율로 측정되는 것으로 보인다. 그림 32(c) 의 2 번 시점의 경우 임피던스 센서에서는 간헐류로 판단하여 성층류에 해당하는 기포율을 계산하게 되는데, 실제로는 관 상부에 존재하는 액막의 영향에 의해서 액막이 존재하지 않을 경우와 비교하여 동일한 기포율이라도 측정되는 컨덕턴스 값이 더 커지게 된다. 따라서 측정된 기포율은 실제값보다 더 낮게 예측하게 되는것이다. 실제 유동에서는 이러한 경우 외에도 빠른 기체의 속도에 의해 경계면에서 떨어져 나온 액적들이 센서의 영향 없이 관 내부로 지나가는 형태의 유동이나 그림 32 와 비슷한 형태의 동심원이 아닌 환상류 등이 발생할 것이다. 본 연구에서 적용한 임피던스 센서는 설계구조상 이러한 기하학적인 영향을 반영하기 힘들기 때문에 약간의 오차가 발생할 수 있다. WMS센서의 경우 표면장력에 의해 액막이 남아 있거나 기포가 wire사이에 체류하면서 발생하는 오차들 또한 생길 수 있다. 그러나 이러한 오차에도 불구하고 두 센서간 기포율 최대 오차는 수평유로에서 6.3 %, 경사유로에서 5.6 % 이내이고, 평균 오차는 2 % 이내인 점을 고려하였을 때 기포율 측정 센서로서 성능은 수용 가능한 범위 내에 있다고 판단 가능하다.



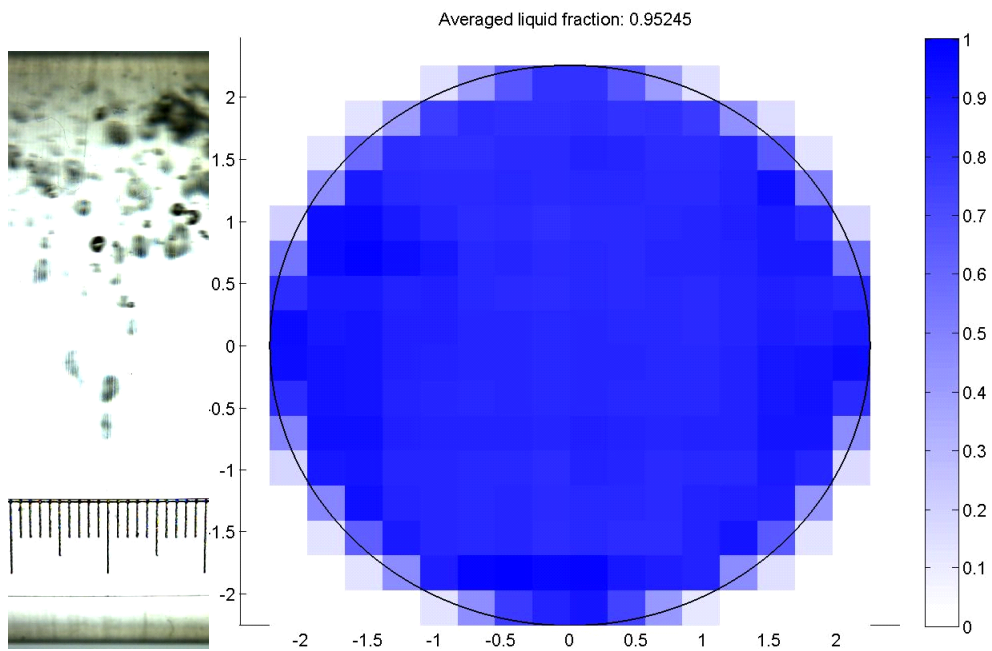
[Fig. 29] Comparison between time-averaged void fraction of the proposed sensor and WMS in the horizontal loop



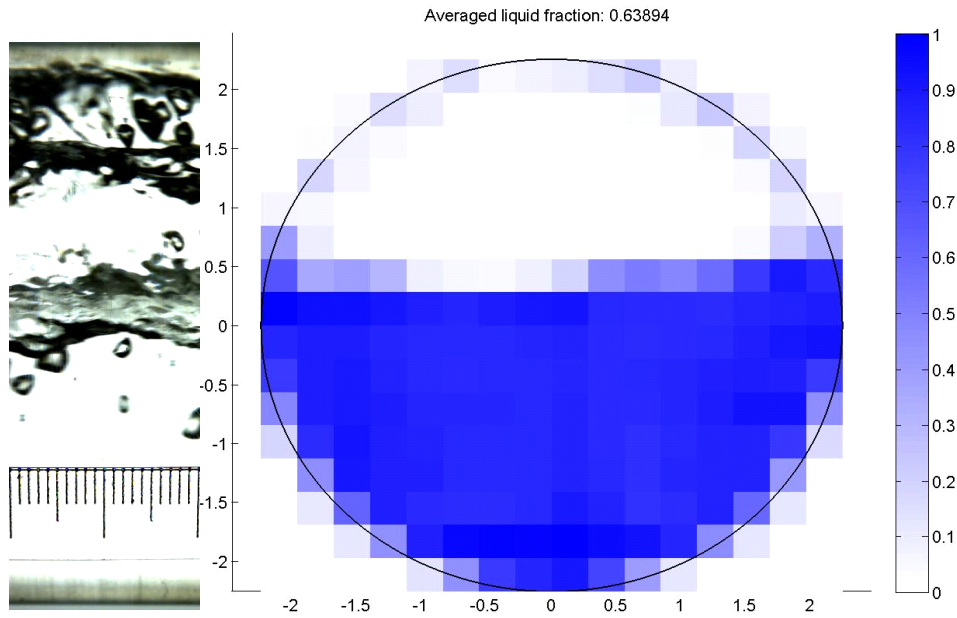
[Fig. 30] Comparison between time-averaged void fraction of the proposed sensor and WMS in the inclined loop



(a) Void fraction comparison between the proposed sensor and WMS



(b) Photos and WMS visualization in 'case 1'



(c) Photos and WMS visualization for 'case 2'

[Fig. 31] Comparison between void fraction of the proposed sensor and WMS using visualization technique.

#### 4. 속도측정 결과 분석

표 7 은 경사 유로에서 적용한 멀티 센서를 통해 측정된 structure velocity를 고속카메라를 이용한 속도측정 기법과 비교한 결과이다. 센서에서 속도측정은 전기포울 구간에 대한 상관계수를 계산하여 적용하였고, 고속카메라에서는 측정 시점에서 임의의 구간 평균 낸 값이다. 고속카메라에서 속도측정 기법은 기존의 sobel edge 검출법에 비해 다양한 영역에서 적용이 가능하지만, 아직 검증되지 않았기 때문에 측정의 정확성을 높이기 위하여 육안으로 확인 가능한 슬러그 기포가 나타나는 구간에 대해서만 속도 측정을 실시하였다. 두 측정 기기간에 계속 오차는 1 % 이내로 잘 일치하고 있으며, 이러한 결과를 바탕으로 이중센서를 이용한 모든 조건에 대해 속도를 계산한 결과를 표 8 에 나타내었다.

<Table 7> Structure velocity comparison between proposed sensor and high speed camera

Case	$j_l$ (m/s)	$j_g$ (m/s)	$j_{sv}$ (m/s)	
			sensor	high speed camera
01	3.0	0.5	3.19	3.16
05	3.0	1.0	3.66	3.66

<Table 8> Structure velocities and time-averaged void fraction

Case	$j_l$ (m/s)	$j_g$ (m/s)	$j_{sv}$ (m/s)	$\alpha$
01	0.1	0.1	1.15	0.902
02		0.5	1.11	0.897
03		1	1.13	0.896
04		5	1.15	0.898
05		10	1.18	0.905
06		12	1.29	0.920
07	0.5	0.1	1.64	0.681
08		0.5	1.64	0.678
09		1	1.66	0.678
10		5	1.69	0.702
11		10	1.96	0.751
12		12	2.09	0.761
13	1	0.1	1.87	0.474
14		0.5	1.95	0.494
15		1	2.06	0.513
16		5	2.28	0.573
17		10	2.77	0.644
18		12	3.08	0.685
19	2	0.1	2.04	0.102
20		0.5	2.29	0.185
21		1	2.49	0.242
22		5	4.05	0.444
23		10	4.27	0.585
24		12	4.90	0.607
25	3	0.1	2.80	0.056
26		0.5	3.19	0.101
27		1	3.66	0.183
28		10	6.37	0.543

## V. 결 론

본 연구를 통하여 수평관 및 경사관에서 유동양식에 따른 기포율을 측정함과 동시에 속도측정이 가능한 센서를 개발하였다. 수치해석을 통하여 선형성 관점에서 센서를 최적화 하였고, 무차원화를 통하여 다양한 직경의 유로에서도 적용이 가능하도록 설계하였다. 이를 바탕으로 수평관과 경사관에 적용하기 위한 임피던스 센서를 제작하였다. 정적 실험에서 비선형성 에러는 성층류에서 12 % 환상류에서 7 %로, 수치해석에서 결과와 잘 일치하는 것을 확인하였다. 기포율 측정 비교검증을 위하여 WMS를 센서 뒷단에 설치하였으며, 다양한 액체와 기체의 걸보기 속도에서 유동양식 판별 및 기포율 측정을 수행하였다. WMS와 비교하였을 때, 기포율이 낮은 구간에서 두 센서간 오차가 발생하였으나 최대 6.3 % 이내, 평균 1.5 % 이내의 오차로 매우 잘 일치한다고 판단된다.

속도 측정 비교검증을 위하여 고속카메라를 이용하였다. 새로 고안한 고속카메라를 통한 속도측정 기법은 이전 기법들에 비해 복잡한 유동영역에서도 적용이 가능하지만, 속도측정의 정확도를 높이기 위해 슬러그 유동이 뚜렷하게 관찰되는 두 가지 조건에 대해서만 측정 및 비교를 수행하였다. 속도측정 결과는 두 측정 방법에서 1 % 이내 오차로 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 또한 센서에서 측정된 속도를 이용하여 센서와 WMS간의 기포율 그래프 시간 지연을 보정한 결과, 두 센서와 WMS 그래프가 아주 잘 일치하는 결과를 확인하였다. 이는 센서를 통한 structure velocity가 유동의 속도를 매우 정확하게 측정하고 있다는 것을 보여주는 것이다.

결과적으로 아주 단순한 구조의 센서 디자인을 통해, 다양한 직경의 유로에서 타 기법과 비교하여 빠른 속도로 유동양식에 따른 기포율 측정과 속도 측정을 동시에 수행하는 비 침투식 센서를 개발할 수 있었다. 향후 유동양식 판별 기준의 정확성을 높이고, 다양한 형상의 유동에 대한 컨덕턴스 신호 데이터를 추가하여 좀 더 정확도 높은 기포율 측정이 가능하도록 하고, 속도측정 데이터의 신뢰성을 높이기 위해 다양한 조건에서 비교 실험 데이터를 수집 할 예정이다.



## 참 고 문 헌

- [1] Pike, R. W., Wilkins Jr., B., Ward, H. C., 1965, "Measurement of the Void Fraction in Two-Phase Flow by X-Ray Attenuation," American institute of Chemical Engineers, Vol. 11, Issue 5, p. 794.
- [2] Boon, J. D., Brubaker, J. M., 2008, "Acoustic-Microwave Water Level Sensor Comparisons in an Estuarine Environment," MTS/IEEE Oceans '08 International Conference, Quebec, Canada.
- [3] Hauptmann, P., Hoppe, N., Puttmer, A., 2002, "Application of Ultrasonic Sensors in the Process Industry," Measurement Science and Technology, Vol. 13, No. 8, Review Article 73.
- [4] Vejražka J, Večeř M, Orvalho S, Sechet P, Ruzicka M C and Cartellier A, 2010, "Measurement accuracy of a mono-fiber optical probe in a bubbly flow" Int. J. Multiph.Flow, vol. 36, pp.533-548.
- [5] Zhang Z, Bieberle M, Barthel F, Szalinski L and Hampel U, 2013, "Investigation of upward cocurrent gas-liquid pipe flow using ultrafast X-ray tomography and wire-mesh sensor" Flow Meas. Instrum, vol. 32, pp. 111-118.
- [6] Vieira R E, Kesana N R, McLaury B S, Shirazi S A, Torres C F, Schleicher E and Hampel U, 2014, "Experimental investigation of the effect of 90° standard elbow on horizontal gas-liquid stratified and annular flow characteristics using dual wire-mesh sensors" Exp. Therm. Fluid Sci, vol. 59, pp. 72-87.

- [7] Coney, M. W. E., 1973, "The Theory and Application of Conductance probe for the Measurement of Liquid Film Thickness in Two Phase Flow," *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, Vol. 6, No. 9, p. 903.
- [8] Paranjape S, Ritchey S N and Garimella S V, 2012, "Electrical impedance-based void fraction measurement and flow regime identification in microchannel flows under adiabatic conditions" *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 42, pp. 175-183.
- [9] Kendoush A A and Sarkis Z A, 2002, "Void fraction measurement by x-ray absorption" *Exp. Therm. Fluid Sci*, vol. 25, pp. 615-621.
- [10] Lowe D C and Rezkallah K S, 1999, "Flow regime identification in microgravity two-phase flows using void fraction signals" *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 17, pp. 433-457
- [11] Ahmed W H 2006 Capacitance sensors for void-fraction measurements and flow-pattern identification in air-oil two-phase flow *IEEE Sensors J*, vol. 6, pp. 1153-1163.
- [12] Canière H, T'Joel C, Willockx A and De Paepe M, 2008, "Capacitance signal analysis of horizontal two-phase flow in a small diameter tube" *Exp. Therm. Fluid Sci*, vol. 32, pp. 892-904.
- [13] Kim S, Lee J S, Kim K Y, Kang K H and Yun B J, 2009, "An approximate formula for the capacitance-void fraction relationship for annular flows" *Meas. Sci. Technol*, vol. 20, Article 125404.
- [14] De Kerpel K, Ameal B, De Schampheleire S, T'Joel C, Canière H and

De Paepe M, 2014, “Calibration of a capacitive void fraction sensor for small diameter tubes based on capacitive signal features” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 63, pp. 77–83.

[15] Andreussi P, Di Donfrancesco A and Messia M, 1988, “An impedance method for the measurement of liquid hold-up in two-phase flow” *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 14, pp. 777–85.

[16] Tsochatzidis N A, Karapantsios D K, Kostoglou M V and Karabelas A J, 1992, “A conductance probe for measuring liquid fraction in pipes and packed beds” *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 18, pp. 653–667.

[17] Fossa M, 1998, “Design and performance of a conductance probe for measuring the liquid fraction in two-phase gas-liquid flows” *Flow Meas. Instrum.*, vol. 9, pp. 103–109.

[18] Kim J R and Ahn Y C and Kim M H, 2009, “Measurement of void fraction and bubble speed of slug flow with three-ring conductance probes” *Flow Meas. Instrum.*, vol. 20, pp. 103–109.

[19] Rosa E S and Flora B F and Souza M A S F, 2012, “Design and performance prediction of an impedance void meter applied to the petroleum industry” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 23, Article 055304.

[20] Geraets J J M and Borst J C, 1988, “A capacitance sensor for two-phase void fraction measurement and flow pattern identification” *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 14, pp. 305–320.

[21] Ye J, Peng L, Wang W and Zhou W, 2011, “Optimization of helical

capacitance sensor for void fraction measurement of gas-liquid two-phase flow in a small diameter tube” IEEE Sensors J., vol. 11, pp. 2189-2196.

[22] Yang H C, Kim D K and Kim M H, 2003, “Void fraction measurement using impedance method” Flow Meas. Instrum., vol. 14, pp. 151-160.

[23] Huang S, Zhang X, Wang D and Lin Z, 2008, “Equivalent water layer height (EWLH) measurement by a single-wire capacitance probe in gas-liquid flows” Int. J. Multiph. Flow, vol. 34, pp. 809-818

[24] Song C H, Chung M K and No H C, 1998, “Measurements of void fraction by an improved multi-channel conductance void meter” Nucl. Eng. Des., vol. 184, pp. 269-285.

[25] Devia F and Fossa, M 2003, “Design and optimisation of impedance probes for void fraction measurements Flow” Meas. Instrum., vol. 14, pp. 139-149.

[26] Barnea D, 1986, “Transition from annular flow and dispersed bubble flow - unified models for the whole range of pipe inclinations” Int. J. Multiph. Flow, vol. 12, pp. 733-744.

[27] Ko M S, Yun b J, Kim K Y and Kim S, 2012, “Design of a capacitance sensor for void fraction measurement in annular flows through a vertical pipe” Meas. Sci. Technol., vol. 23, Article. 105301.

[28] Prasser H-M, Bottger A and Zschau J, 1998, “A new electrode-mesh tomograph for gas-liquid flows Flow” Meas. Instrum., vol. 9, pp. 111-119.

- [29] Taitel Y and Dukler A E, 1976, "A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow" AICHE J., vol. 22, pp. 47-55.
- [30] Afshin J. Ghajar and Swanand M. Bhagwat, 2014, "Gas-liquid two phase flow phenomenon in near horizontal upward and downward inclined pipe orientations" Int. J. Mechanical., Vol. 8, No. 6, pp. 1091-1105
- [31] Ronald E. Vieira, Netaji R, Kesana, Brenton S. McLaury, siamack A. Shirazi, Carlos F. Torres, Eckhard shleiche and Uwe Hampel, 2014, "Experimental inverstigation of the effect of 90° standard elbow on horizontal gas-liquid stratified and annular flow characteristics using dual wire-mesh sensors" Exp. Therm. and Flui. Sci., vol. 59, pp. 72-87
- [32] Kim, M. S., Cheon, J. and Kang, S. H., 2010, "The development of a passive auxiliary feedwater system in APR+" ICAPP 10., pp. 169-176
- [33] Mandhane, J. M., Gregory, G. A., and Aziz, K., 1974, "A Flow Pattern Map for Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipes," Int. J. Multiphase Flow, Vol. 1, pp. 537~553.

## 감사의 글

뒤돌아보니 어느덧 2년이라는 시간이 지났습니다. 아직도 한참 부족하고 배울 것이 많이 남아 있는 것 같은데, 이렇게 하나의 마침표를 찍는다는 것이 어색하기도 하고 부끄럽기도 합니다. 쉽지 않은 길이었기 때문에 곁에서 조언을 아끼지 않고 격려해주신 많은 분들께 깊은 감사의 마음을 전합니다.

먼저 부족한 저를 받아주시고 여기까지 이끌어 주신 이연건 지도교수님께 감사드립니다. 깊은 통찰력과 이해심으로 연구실 구성원들에게 올바른 방향을 제시하고 꼼꼼히 지도해 주시는 모습은 존경해 마지않을 수 없었습니다. 교수님의 제자로써 깊은 자부심을 느끼고, 제자로써 부끄럽지 않은 모습 보여드리도록 더욱 노력하겠습니다. 바쁘신 와중에도 심사에 참석해 주시어 조언을 아끼지 않으신 김남진 교수님과 최수석 교수님께도 이 자리를 빌어 감사드립니다.

아마 제 연구에 있어 가장 큰 도움을 주신 분을 꼽자면 이보안 박사님이 아닐까 합니다. 제가 2년 동안 가장 많은 조언을 얻었고, 연구에 있어서나 삶에 있어서도 진정한 선배로써 많은 깨달음을 얻게 해주신 점, 진심으로 감사드립니다.

연구실 생활에 고민이 있을 때마다 큰 버팀목이 되어 저를 다독여주시고 격려해주신 영준이형, 친구로서 실험실 선배로서 묵묵히 도와준 친구 바로, 가끔 짜증날 때도 있지만 대학원 동기로 서로 부족한 점에 대해 많은 도움을 준 실험실의 감초 동재, 어리버리 아직은 실험실 분위기 파악 중인 막내 현미까지 모두 감사드립니다.

끝으로 하나밖에 없는 자식이 가는 길에 불평 한 번 없이 응원해 주시는 어머니 아버지께 감사드립니다. 4년이 넘는 긴 시간동안 나를 믿고 의지해준 사랑하는 영주에게도 감사의 마음을 전합니다. 30년이라는 시간동안 저에게 사랑과 믿음을 주고 지켜봐 주신 부모님께 이 논문을 바칩니다.