



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 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](#) 

수평유로에서의 wire-probe를 이용한 수위 측정 연구

洪允偵

二〇一三



碩士學位論文

수평유로에서의 wire-probe를
이용한 수위 측정 연구

濟州大學校 大學院

에너지 工學科

洪 允 偵

2013年 2月

수평유로에서의 wire-probe를 이용한 수위 측정 연구

指導教授 金 信

洪 允 偵

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2012年 12月

洪允偵의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 朴 在 雨 印

委 員 金 信 印

委 員 鄭 鈺 津 印

濟州大學校 大學院

2012年 12月

A Study of Water Level Measurement by a Wire-Probe in a Horizontal Pipe

Yun Jeong Hong
(Supervised by professor Sin Kim)

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

2012. 12.

This thesis has been examined and approved.

.....
Thesis director, Nicholas F. Colovos, Prof. of Oceanography

.....
.....
.....
(Name and signature)

.....
Date

Department of Nuclear & Energy Engineering
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

LIST OF FIGURES	iii
LIST OF TABLES	iv
SUMMARY	v
I. 서 론	1
II. 임피던스 기법	5
III. 센서 결정	7
1. 수치 계산	7
2. 수치 계산 결과	9
IV. 센서 제작 및 검증 실험	14
1. 한 쌍의 wire-probe 센서 제작	14
2. 검증 실험	15

1) 실험 조건	15
2) 실험 결과	17
3. 다섯 쌍의 wire-probe 센서 제작	18
4. 검증 실험	19
1) 실험 조건	19
2) 실험 결과	20
V. 결 론	23
참 고 문 헌	24

LIST OF FIGURES

Fig 1. Comparison of numerical results for the different gap size between a pair wire probe sensor	9
Fig 2. The results for numerical calculation of 1st wire-probe sensor	11
Fig 3. The results for numerical calculation of 2nd wire-probe sensor	12
Fig 4. The results for numerical calculation of 3rd wire-probe sensor	13
Fig 5. Proposed a pair of wire-probe sensor	14
Fig 6. A pair of wire-probe sensor for static experiment	15
Fig 7. Comparison of numerical solutions and experiments current for given liquid fraction	17
Fig 8. Proposed 5 pairs of wire-probe sensors	18
Fig 9. 5 pairs of wire-probe sensors for static experiment	19
Fig 10. Comparison between numerical and static experiment for 5 pairs of wire-probe sensors	20
Fig 11. Comparison between numerical and static experiment for 5 pairs of wire-probe sensors	20
Fig 12. Comparison between numerical and static experiment for 5 pairs of wire-probe sensors	21

LIST OF TABLES

Table 1. Condition of numerical calculations	8
Table 2. Relative error between numerical results and ideal line for each electrodes width	9
Table 3. Relative error for each wire-probe sensor	22

SUMMARY

Air-water two-phase phenomenon analysis is dealt with quite importantly in basis science research as well as various engineering systems including thermal-hydraulic systems of the nuclear power plant. Also, parameters such as void fraction, water level, interfacial structure in two-phase flow play a crucial role in heat and material transfer, safety analysis and engineering design of the nuclear power plant. Hence, it is essential to understand such parameters exactly for two-phase analysis. Due to these importance, a lot of experimental and theoretical research have been proposed.

In this study, a pair of wire-probe sensor is manufactured and impedance method is applied to the sensor for basis experiment for measuring the water level which is one of the characteristic of air-water two-phase flow in horizontal stratified flow. Electrical signal varying as water level is measured by numerical analysis. Then static experiment is performed for verifying measurement performance of the wire-probe sensor. A pair of wire-probe sensor is possible to apply in the stratified flow as well as other flow regimes, but it is impossible to measure the interfacial approximately in irregular flow such as wavy flow. Therefore the number of wire-probe sensor increases for applying wire-probe sensor in different flow regimes. Thus 5 pairs of wire-probe sensors are manufactured for case of unspecific interfacial and verification experiment is performed.

I. 서 론

일상생활에서 접할 수 있는 유체 유동 중 2개 이상의 상(相, phase)들이 함께 섞여 흐르는 유동을 다상유동(Multiphase flow)이라고 한다. 다상유동 중에서 고체와 액체, 고체와 기체, 액체와 기체 같이 두 개의 상이 서로 혼합되어 흐르는 유동을 이상 유동(Two-phase flow)이라고 하고, 특히 액체-기체 이상 유동은 유체역학적 측면에서 좀 더 복잡하고 일반적인 현상이라 볼 수 있다.

액체와 기체 이상 유동은 두 상 간에 밀도, 점도 등의 물리적 특성과 유동 방향, 유동 조건 및 유로의 형상에 따라 유동의 형태가 달라진다. 뿐만 아니라 두 상 간의 상호작용으로 인하여 상 경계면에서의 형상 변화 및 전달 현상이 매우 복잡하게 발생하며, 한정된 몇몇의 경우를 제외하고는 지배 방정식을 이용해서 유도한 순수한 수식만으로 전반적인 이상 유동 관련 변수를 정량화하기는 불가능하다. 따라서 이상 유동 현상의 정확한 해석을 하기 위해서는 이론적 해석과 더불어 많은 실험적 연구를 통한 고찰이 병행되어야 한다.

이런 액체-기체 이상 유동 현상 해석은 기초 과학 연구뿐만 아니라 화학공정 및 열수력 시스템을 포함한 원자력 발전소에 이르기까지 여러 공학 시스템에서 상당히 중요하게 다루어진다. 또한 이상 유동 현상에서 기포율, 수위, 계면 구조와 같은 중요한 매개 변수들은 열 및 물질전달 그리고 원자력발전소의 공학적 설계 및 안전해석에 결정적인 역할을 한다. 게다가 이런 매개 변수를 측정하면, 상 분포, 질량, 운동량 그리고 에너지의 전달에 사용되는 면적을 설명할 수 있다. 그러나 매개 변수를 측정하기 위해서는 이상 유체 모형 공식에 대한 변수가 요구되는데, 이는 상 분포 간 다양한 전달 메커니즘의 이상 유동 계면 구조에 의존

한다. 그러므로 이런 매개변수들의 정확한 지식을 이해하는 것은 이상 유동 해석에 대해서 필수적이다. 이러한 중요성으로 인해 수위를 측정하기 위한 많은 실험 및 이론적 연구가 시도되고 있다.

이상유동의 매개변수 중의 하나인 기포율과 관련하여 수위, 계면 속도, 상 분포 그리고 유동 양식처럼 이상 유동의 기본이 되는 특성들을 측정하기 위한 많은 기술들이 수십 년 이상 개발되고 있다. 그 중 전기적인 방법, 방사선 방법 등과 같은 측정 기법들이 있다. 예를 들어 Kendoush and Sarkis (2002)는 공기-물 이상 유동에서 기포들을 묘사하기 위해 플라스틱 관의 수량과 배치를 조절하고 X-ray 흡수 기법을 적용하여 기포율을 측정하였다. Chakrabarti et al. (2006)은 수평 유로에서 액체-액체 성층유동에 적용하기 위해 설계된 비탐침 optical probe를 사용함으로써 서로 다른 유동 양식들을 확인하였다. Coney (1973)는 환상류에서의 액막 두께를 측정하기 위해 ring-type 센서에 전기 전도도 probe를 적용하였다. Tshochatzids et al. (1992)은 이론과 실험을 비교하여 성층류에서 ring-type sensor의 반응을 해석적 표현으로 유도하였다. Song et al. (1998)은 다양한 기포율 때문에 이상 유동장의 전기 전도도가 다르다는 특성에 기반을 둔 multi-channel conductance void meter를 개발했다. Devia and Fossa (2003) 수평관에서 기포율을 측정하기 위하여 ring and half-ring type sensor를 설계했고, ring들 사이의 거리를 조절함으로써 실험을 수행하여 sensor를 최적화 시켰다.

전기적 임피던스 기법에는 컨덕턴스와 커패시턴스 기법이 있다. 이런 기법들은 전기전도도, 유전율과 같은 다른 전기적 특성을 갖는 두 유체 주위에 특수하게 제작된 전극을 배치하고, 이 전극에 전기신호를 인가하고 상의 분포 및 부피에 따라 유기되는 전기신호를 측정하여 물체 내부의 유동 구조를 추정하는 원리를 기본으로 한다. 임피던스 기법은 이상 유동의 다양한 특성들을 연구하기 위해 다

음과 같이 많은 특징들을 갖고 있는 측정 기술이다. 특히, 임피던스 기법은

- (1) 유동장의 교란이 없기 때문에 실험적 정보의 불확실성을 줄일 수 있다.
- (2) 기포율을 순간적으로 측정하기 위한 높은 시간 분해능과 연속적인 신호 처리로, 유동이 빠르게 천이되어 지나가는 원자력 발전소 열수력 시스템에 적용할 수 있다.
- (3) 크기에 상관없이 크고 작은 구조에서도 효과적으로 적용 가능하다.

임피던스 기법을 이론적 및 실험적으로 연구한 많은 사례들이 있다. Manera et al. (2009)은 실험을 통하여 기포율, 기포 속도 그리고 계면 밀도와 같은 이상 유동의 매개변수를 측정하기 위하여 유체 전도도 측정에 기반을 둔 wire-mesh sensor와 conductive needle-probes의 측정 성능을 비교하였다. Huang et al. (2007)은 새로운 탐침기구인 4개의 평행한 wire capacitance sensor를 제시하였다. 이 wire sensor는 커패시턴스가 액막의 길이에 따라 비례하도록 개선되었다. Fossa (1998)는 이상 기체 유동에서 liquid fraction을 측정하기 위해 설계된 2개의 다양한 ring-type의 conductance sensor를 제안했다. 그리고 Coney의 표현식 (1973), Tsochatzidis의 풀이과정 (1992), 그리고 classical maxwell 관계식을 이용한 각 sensor로부터 측정 결과 값을 비교함으로써 이 식들의 측정 능력을 비교하였다. Hunag et al. (2008)은 single-wire capacitance probe로 이론적 및 실험적으로 모든 수평 유동 양식에 대하여 동등한 수위를 측정하고 분석하였다. 또한 연속된 시간에 대하여 측정한 수위를 고속 카메라에 의해 측정된 영상과 비교하여 유동 양식의 특성을 반영하였다.

본 연구에서는 수평관 성층류에서 기체-액체 이상 유동 특성 중의 하나인 수위를 측정하기 위한 기초실험으로 한 쌍의 wire-probe를 제작하고 임피던스 기법을 적용하였다. 먼저 2장에서는 임피던스 기법에 대해 정의 및 특징을 기술하

였고, 3장에서는 수치 해석을 통해 수위에 따라 변하는 전기 신호를 관찰하였다. 마지막으로 실제 수평 유로 실험관에 적용할 수 있도록 수치 계산을 기반으로 센서의 측정 성능을 검증하기 위한 정적 실험을 수행하였다.

본 실험에서 주의해야 할 점은 센서가 수위의 증감에 따라 선형성을 갖느냐는 것이다. 임피던스 센서의 경우 전극 형상 및 개수에 따라 민감도가 달라지기 때문에, 수위를 과대평가 또는 과소평가 할 수 있다. 이러한 측면으로 인해 신뢰할 만한 수위 측정이 엄격히 요구된다.

Wire-probe 센서는 성층류 뿐만 아니라 다른 유동 양식에도 적용이 가능하다. 하지만, 파형류와 같이 계면이 불규칙한 유동은 wire-probe 한 쌍으로는 대략적인 계면 측정이 불가능하다. 따라서 다른 수평 유로의 유동 양식에도 wire-probe 센서를 적용하기 위하여 wire-probe의 개수를 증가시켜, 계면을 불특정한 경우에 대해 이용 가능할 수 있도록 5쌍의 wire-probe 센서를 제작하여 검증 실험을 하였다.

II. 임피던스 기법

임피던스 기법은 사용하는 물질의 특성에 따라 두 유형으로 분류할 수 있다. 커패시턴스 기법과 전기전도도 기법이다. 전기 전도도 기법은 이상유동의 기포율을 측정하기 위해 물처럼 전도성을 갖는 물질을 사용한다. 이는 기포율 뿐만 아니라 성층류에서의 수위나 환상류에서의 액막 두께 또한 측정 할 수 있다.

앞 장에서도 언급했듯이, 임피던스 기법에서 이상 유동장의 상 분포는 전기적 특성 즉, 전기 전도도의 분포로 간주된다. 따라서 유체의 전기적 특성이 각각 주어진 경우 경계 전압은 Maxwell 방정식과 경계 조건에 의해 결정될 수 있다.

$$\nabla \cdot \sigma \nabla V = 0 \quad (1)$$

여기서, σ 는 관심 유체 영역의 전기 전도도이고 V 는 결정되는 전압 분포이다. 임피던스 기법은 옴의 법칙으로부터 계측기에서 기포율이나 수위에 따라 반응하는 임피던스 변화를 측정하게 된다.

성층류는 수평 및 약간 기울어진 하향류에서 기체 및 액체가 저속일 때 각 상이 분리되어 흐르는 유동 구조로 액체와 기체간의 상대속도가 작을 때 경계면이 부드러운 Stratified smooth flow가 형성된다. 기체의 유동 속도가 증가하게 되면 두 유체간의 상대속도가 커져서 경계면에 표면파가 발생하는 Stratified wavy flow가 형성된다. 물과 공기의 전기 전도도는 σ_w 와 σ_a 로 주어지며 상수이다. 여기서 하첨자 w 는 물(water), a 는 공기(air)를 나타낸다. gap을 가진 두 probe는

반경이 r 인 관 중앙에 대칭적으로 삽입되며, gap은 두 probe 사이 $\partial\Omega_g$ 로 표현된다. 각 영역에서 전위 분포는 다음의 Laplace 방정식을 만족한다.

$$V = V_0 \text{ on probe 1} \quad (2)$$

$$V = 0 \text{ on probe 2} \quad (3)$$

$$\sigma_w \frac{\partial u_w}{\partial r} = 0 \text{ on } \partial\Omega_g \text{ (gap)} \quad (4)$$

각 probe의 인가된 전압이 V , probe에 물이 젖은 부분은 σ 일 때, 전류 I 는 V/R 식으로 계산된다.

III. 센서 결정

1. 수치 계산

임피던스 센서를 수위 측정에 적용하기 위해서는 수위와 전기신호의 상관관계를 평가해야 한다. 성층류는 비대칭 문제이므로 센서의 형태 및 개수 등의 결정을 고려할 필요가 있다. 먼저 기초 연구로서 한 쌍의 센서를 택하였다. 센서 결정을 위해 유한요소법(FEM, finite element method)을 기반으로 한 상용 소프트웨어인 COMSOL Multiphysics를 이용하여 구조적인 변수 wire-probes 사이의 거리를 결정하였다. 한 쌍의 wire-probe 센서 결정을 바탕으로 같은 측정 기법을 적용하여 다섯 쌍의 wire-probe 센서도 수치 계산 하였다.

일반적으로 임피던스 기법에서는 전기신호와 관심 영역의 상 부피간의 관계를 lookup table로 저술할 수 있다. 따라서 어떤 상 부피는 단순히 lookup table을 분석함으로써 측정 할 수 있다.

1) 계산 조건

수치 계산 조건은 다음 Table 1 과 같다.

Table 1. Condition of numerical calculations

	조 건	
파이프 내경	1	
liquid fraction(수위)	0~1 (계산 간격 : 0.1)	
인가 전압(V)	1	
전기 전도도, σ (S/m)	물	공기
	0.003	10e-10

liquid fraction 및 전기 신호는 다음 식 (5)를 사용하여 0부터 1까지의 값을 갖도록 하였다.

$$\alpha = \frac{\text{물이 차지하는 부피}}{\text{팬텀 전체 부피}} \quad (5)$$

측정된 전기 신호 값은 물만 가득 차 있을 때 측정된 값과 각각의 수위에 대해 측정된 값의 비로서 무차원화 하였다. 측정된 전기 신호의 무차원화 식은 다음과 같다.

$$I^* = \frac{I}{I_w} \quad (6)$$

2. 수치 계산 결과

1) 한 쌍의 wire probe 센서

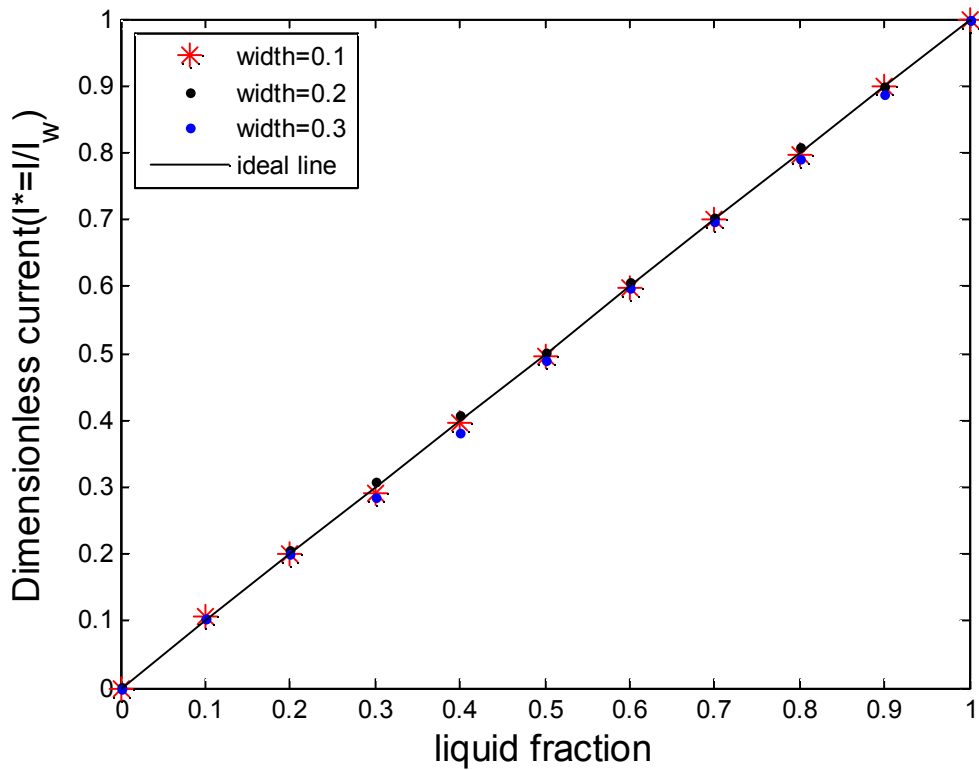


Fig. 1. Comparison of numerical results for the different gap size between a pair wire probe sensor.

Table 2. Relative error between numerical results and ideal line for each electrodes width

	Width=0.1	Width=0.2	Width=0.3
Relative Error	1.6%	1.5%	1.7

Fig. 1은 wire-probe 센서 사이의 거리에 따른 수위와 전류의 상관관계를 나타내는 그래프이다. Table 2는 선형인 이상적인 라인과 간극 구조에 따른 전기신호의 상대오차를 나타낸다. 비교 결과구조에서 wire-probe의 간극 거리가 0.2인 구조에서 약 1.5%의 최소 평균 오차를 보였다.

제안하는 wire-probe 타입의 임피던스 센서는 센서 내 평균 수위를 측정하기 때문에 좁은 구간 내 유동이 빠르게 지나가고 급격히 변동하는 유동에서 센서 폭이 좁아야 유리하다. 따라서 전체 센서 폭이 좁으면서 평균 상대오차가 작은 구조를 택해야 하므로 두 번째로 센서 간극 거리 및 평균 상대오차가 작은 간극 거리 0.2의 구조로 결정하였다. 위의 계산에서 wire-probe 간의 거리가 0.2일 때 최소 평균 상대오차 값을 보였으며, 가장 선형성을 보였다.

2) 5 쌍의 wire-probe 센서

한 쌍의 wire-probe에서 결정된 규격으로 5 쌍의 wire-probe 센서에 적용시켜 수치계산을 하였다. 센서의 개수가 증가하면서 센서간의 폭이 좁아질 수 있다. 이럴 경우, 측정 시 전기 신호간의 교란 및 간섭이 발생할 수가 있다. 따라서 실제 실험 시 전기신호의 간섭을 제거하기 위해 수치 계산을 통하여 각 wire-probe 쌍들 간의 거리를 계산하였다. 이를 통해 다음 Fig. 2~4와 같은 전기신호와 수위의 상관관계를 얻었다. 이는 추후 실제 실험에서 수위를 추정하기 위한 lookup table이 된다. 1번과 5번 wire 그리고 2번과 4번의 wire를 대칭으로 5쌍의 wire-probe 센서간의 간격은 모두 같다. 여기서 4번과 5번 wire-probe는 3번 wire-probe 기준으로 각각 2번과 1번 wire-probe와 대칭이다. 따라서 같은 결과를 얻을 수 있다.

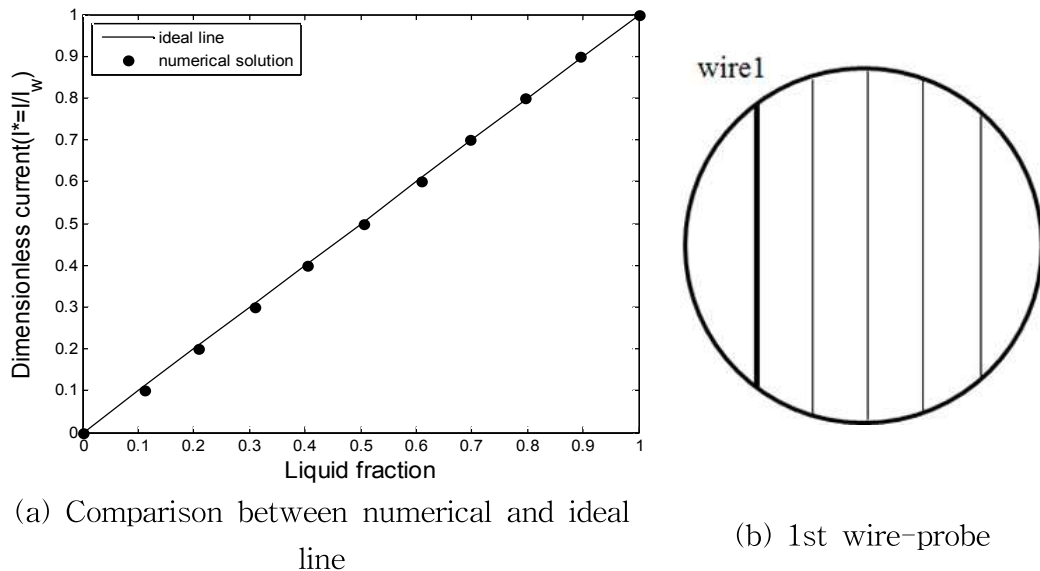


Fig. 2. The results for numerical calculation of 1st wire-probe sensor

Fig. 2에서 1번 wire-probe 센서의 길이는 0.0298m이고, 1번 wire-probe에 대해서 liquid fraction을 계산하여 무차원화 시켰다. ideal line과 수치해석간의 평균 상대오차는 0.1%이다.

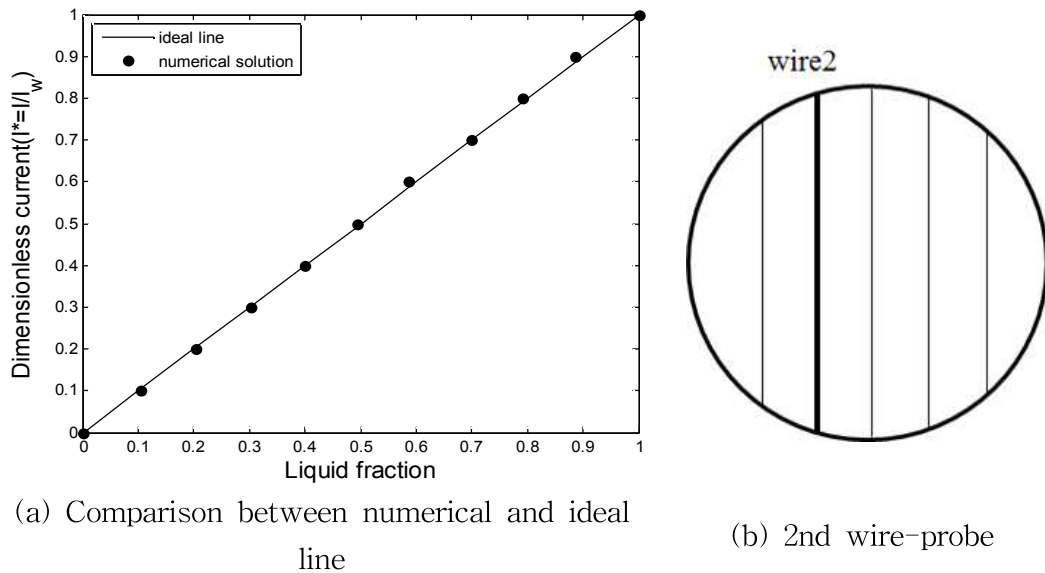
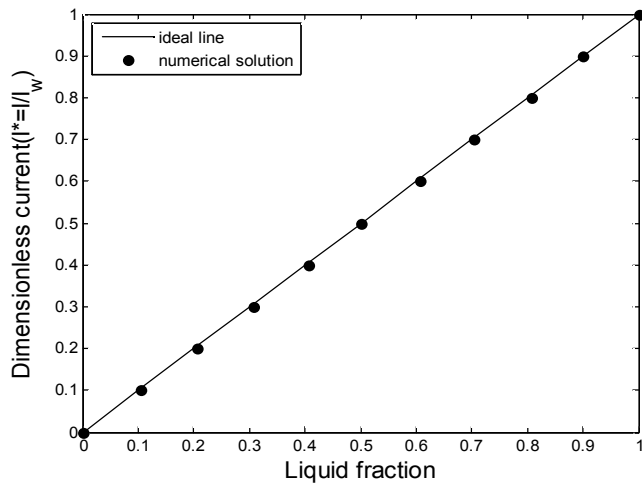
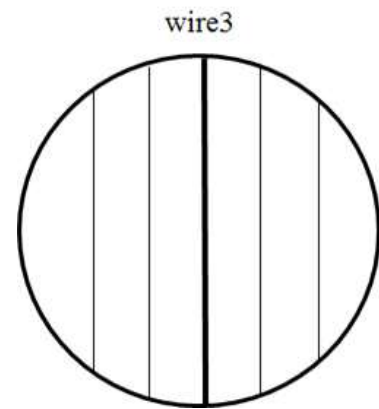


Fig. 3. The results for numerical calculation of 2nd wire-probe sensor

Fig. 3에서 2번 wire-probe 센서의 길이는 0.03771m이고, 1번 wire-probe의 방법과 마찬가지로, 2번 wire-probe에 대해서 liquid fraction을 계산하여 무차원화 시켰다. ideal line과 수치해석간의 평균 상대오차는 0.1%이다.



(a) Comparison between numerical and ideal line



(b) 3rd wire-probe

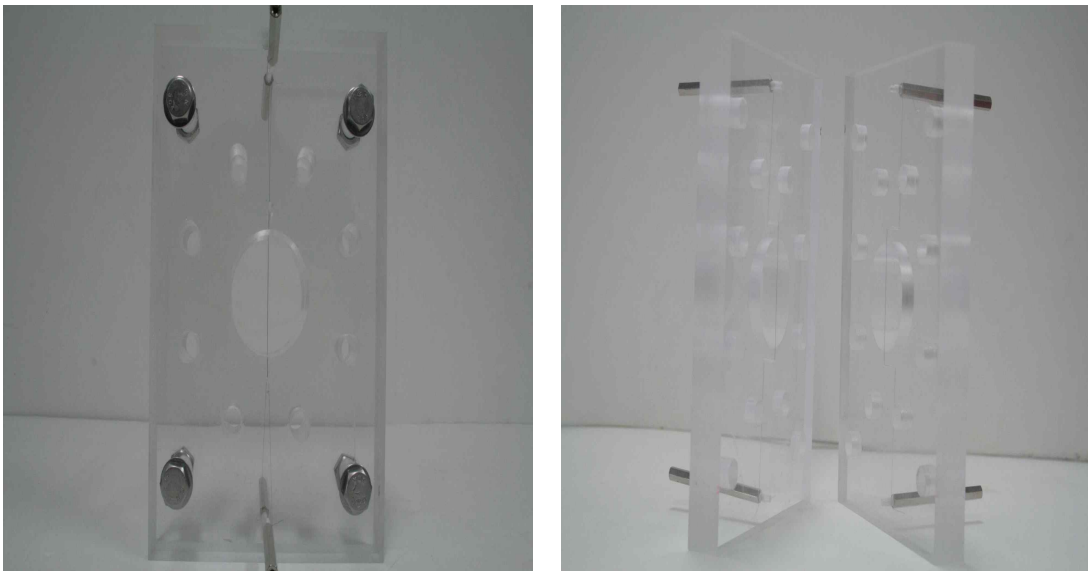
Fig. 4. The results for numerical calculation of 3rd wire-probe sensor

Fig. 4에서 3번 wire-probe 센서의 길이는 0.04m이고, 위의 방법과 마찬가지로, 3번 wire-probe에 대해서 liquid fraction을 계산하여 무차원화 시켰다. ideal line 과 수치해석간의 평균 상대오차는 0.1%이다.

IV. 센서 제작 및 검증 실험

1. 한 쌍의 wire-probe 제작

향후 수평 유로 실험관에서 임피던스 센서를 적용하기 이전에, 수치 계산 결과를 입증하기 위하여 Fig. 5 (a)와 (b)에 보여지는 것처럼 직경이 40mm인 wire-probe 센서를 제작하였다. 직경은 수평 유로 실험관의 내경 크기와 동일하다. Wire는 stainless steel 재질이고, 두께는 0.12mm, probe 1과 probe 2의 거리는 2mm이다. 센서 외부 물질은 아크릴로 절연 처리용 자재이다.



(a) Front of the wire-probe sensor (b) Side of the wire-probe sensor

Fig. 5. Proposed a pair of wire-probe sensor

2. 검증 실험

1) 실험 조건

수치 계산을 통해서 얻은 전기 신호와 수위(물이 차지하는 부피, liquid fraction)와의 상관관계를 실제 wire-probe 센서의 참조값으로 활용하기 위해서는 검증 실험이 필요하다. 따라서 수치계산 결과와 정적 실험을 통해 비교 검증하였다.



Fig. 6. A pair of wire-probe sensor for static experiment

수위를 추정하기 위하여 Fig. 6과 같이 두께 2mm의 고무막을 두고, 두 개의 센서를 결합하였다. 반대편 덮개에는 물을 주입할 수 있도록 주입구를 부착하여 계산한 기포율에 해당하는 물의 양을 주사기를 이용해서 센서 내로 주입하였다. 측정하고자 하는 전류 값을 얻기 위하여 16089B Kelvin 집게와 연결된 Agilent 4284A LCR meter를 택하였다. 2개의 Kelvin 집게를 마주보는 wire-probe 센서에 각각 집고, 한 집게에는 1V의 전압을 나머지 다른 하나의 집게는 기저 상태를 유지하고 측정하고자하는 전류 값을 얻었다. 팬텀 내 물이 젖는 wire-probe의 길이에 따라 다른 전류 값이 측정된다. 따라서 각각의 전류 값을 lookup table에 대입하여 수위를 추정할 수 있다. 각각의 물의 양에 대하여 반복 측정 실험을 하였다.

2) 실험 결과

Fig. 7은 수치 계산 결과와 정적 실험 결과에서 수위와 전기신호의 상관관계를 보여주는 그래프이다. 그래프에서 실선은 수치 계산을 통해 얻은 무차원화 수위와 전류의 상관관계이고, 원형 점은 정적 실험을 통해 얻은 상관관계이다.

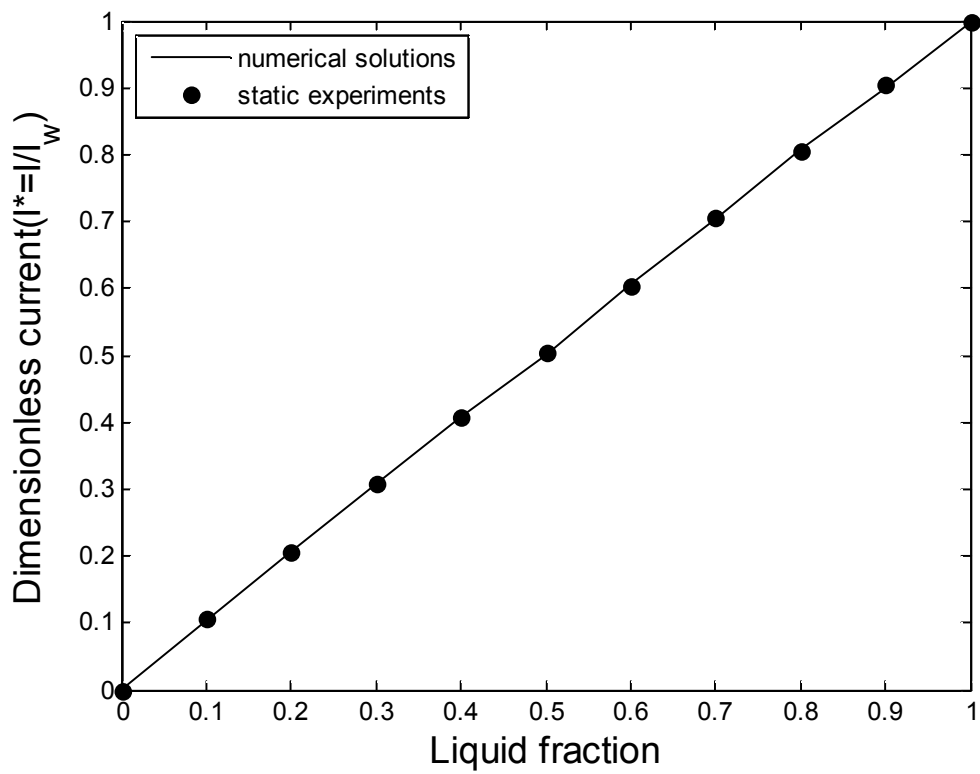
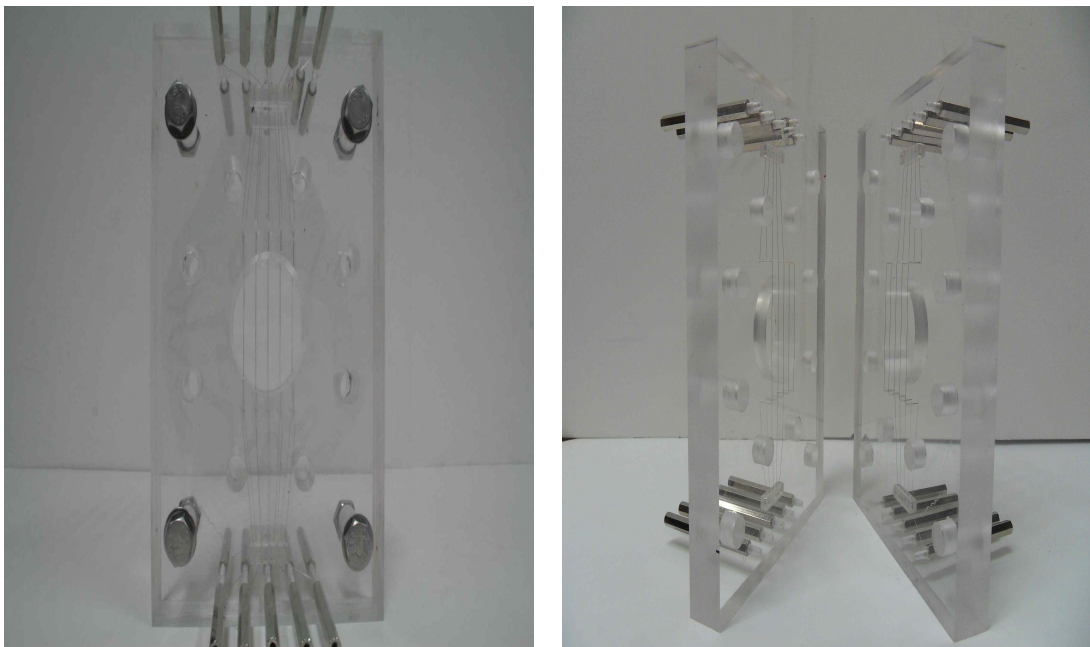


Fig. 7. Comparison of numerical solutions and experiments current for given liquid fraction

3. 다섯 쌍의 wire-probe 센서 제작

실험 B의 wire-probe 센서는 이상 유동의 계면이 매끄럽지 않은, 즉 표면파가 발생하는 파형류에서의 계면 측정을 목표로 설계한 장비이다.

실험 B 또한 수치 계산 결과를 입증하기 위하여 Fig. 8 (a)와 (b)에서 보여주는 것처럼 직경이 40mm인 wire-probe 센서를 제작하였다. 실험 장비에 사용된 재질은 실험 A와 같으나, wire-probe 의 개수가 5쌍이다. Wire의 두께는 0.12mm 이고, probe (a) 와 probe (b)의 거리는 2mm, 같은 선상에 있는 다섯 쌍의 wire 간의 거리 (c)는 6.77mm이다.



(a) Front of the wire-probe sensor

(b) Side of the wire-probe sensor

Fig. 8. Proposed 5 pairs of wire-probe sensors

4. 검증 실험

1) 실험 조건

수치 계산을 통해서 얻은 전기 신호와 수위와의 상관관계를 실제 wire-probe 센서의 참조값으로 활용하기 위해서는 검증 실험이 필요하다. 따라서 수치계산 결과와 정적 실험을 통해 비교 검증하였다. 실험 방법 및 순서는 실험 A와 같다.



Fig. 9. 5 pairs of wire-probe sensors for static experiment

2) 실험 결과

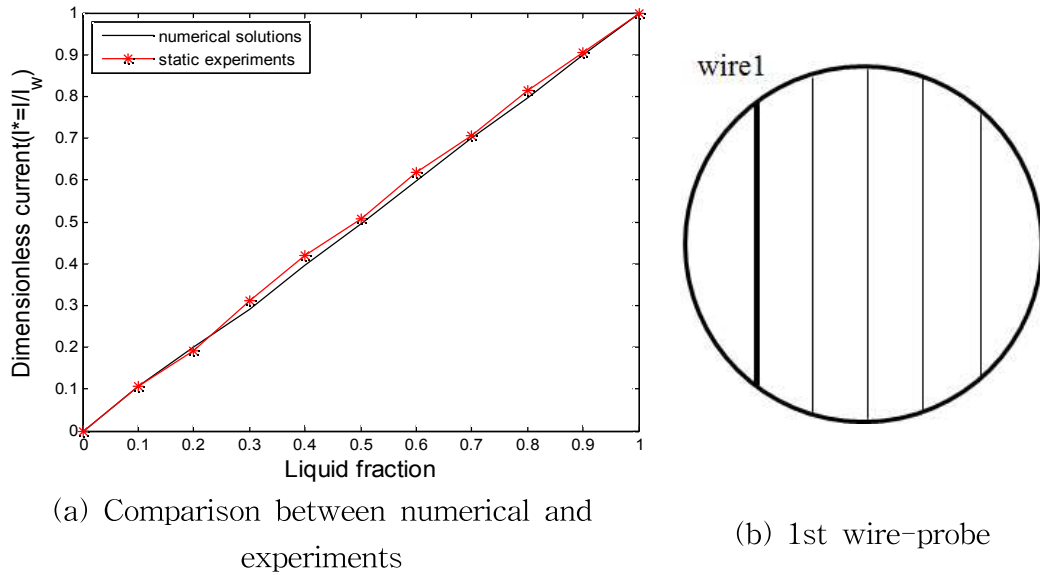


Fig. 10. Comparison between numerical and static experiment for 5 pairs of wire-probe sensors

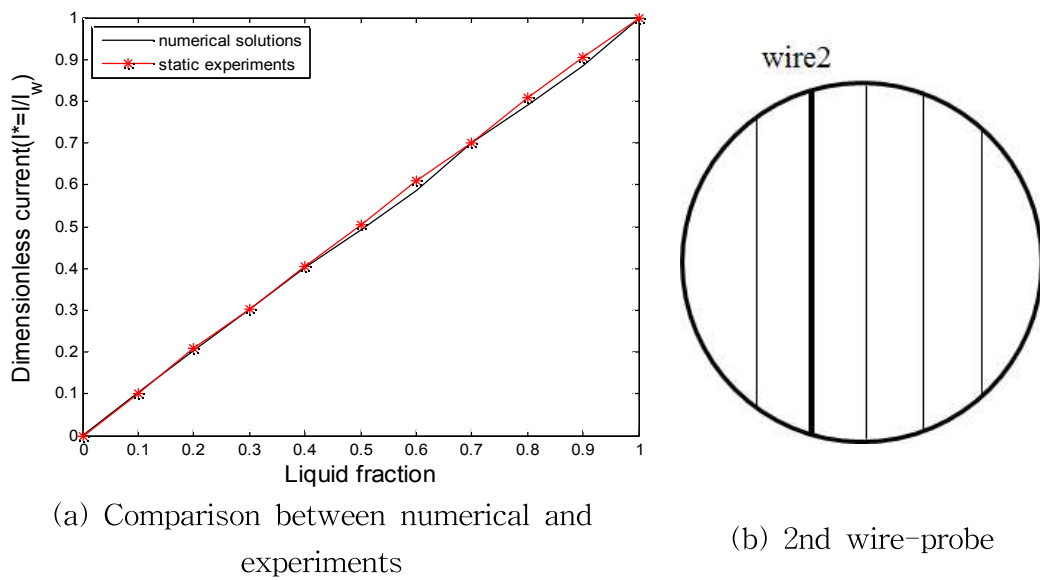


Fig. 11. Comparison between numerical and static experiment for 5 pairs of wire-probe sensors

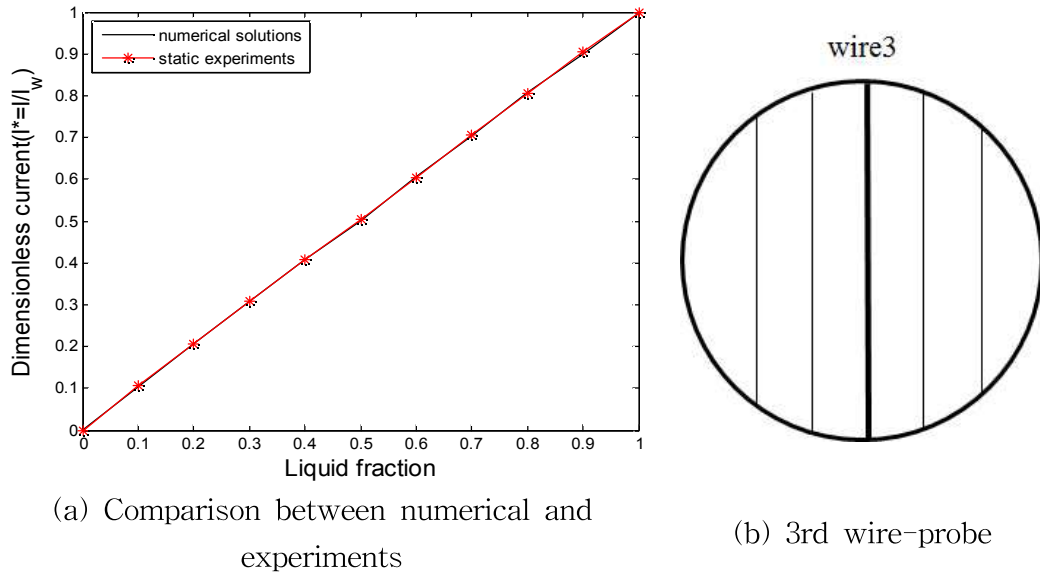


Fig. 12. Comparison between numerical and static experiment for 5 pairs of wire-probe sensors

Fig. 10부터 Fig. 12까지의 (a)는 수치계산 결과와 정적실험 결과의 비교 그래프이고, (b)는 전기 신호가 측정된 wire-probe의 위치이다. 그림 (a)에서 실선과 별 포인트는 각각 수치 계산과 정적 실험을 통해 얻은 결과를 나타낸다. 가로축은 제작 센서 팬텀의 전체 부피에서 물이 차지하는 부피를, 세로축은 무차원의 전류 값을 의미한다. 이론적인 수치 계산과 센서의 성능을 평가하기 위해 다음과 같은 각각의 수위에 대한 상대 오차를 도입하였다.

$$Error = \frac{|I_{theory}^* - I_{exp}^*|}{I_{theory}^*} \quad (10)$$

I_{theory}^* 와 I_{exp}^* 는 각각 수치 계산과 실험을 무차원화 전류 값이다. 각 wire-probe 에 대한 평균 상대 오차는 다음 표와 같다.

Table 3. Relative error for each wire-probe sensor

Wire No.	Wire 1	Wire 2	Wire 3	Wire 4	Wire 5
Relative error	2.4%	1.5%	0.5%	1.5%	2.4%

대체적으로 수치 계산과 정적 실험의 결과 값의 오차가 크지 않으며, 잘 일치함을 보였다.

V. 결 론

본 연구에서는 수평관 성층류에서 기체-액체 이상 유동 특성 중의 하나인 수위를 측정하기 위한 기초실험으로 한 쌍의 wire-probe를 제작하고 임피던스 기법을 적용하였다. Wire-probe 센서가 선형성을 갖을 수 있도록 센서간의 거리를 달리하면서 수치 계산을 하여 선형성에 가까운 센서를 설계하였다. 결정된 센서의 규격은 40mm의 관의 내경을 기준으로 환산하여 wire-probe의 간극 거리가 2mm로 동일하였다. 이 규격을 토대로 실제 임피던스 센서를 제작하였다. 또한 성층류뿐만 아니라 파형류에서의 계면의 분포를 알기위하여 wire-probe의 개수를 증가시켜 한 쌍의 wire-probe 센서와 동일하게 수치 계산을 하였다. 이를 통해 센서를 제작하고 정적실험을 수행하여 센서의 측정 성능을 검증하였다.

향후 연구로는 제주대학교 원자력 과학기술 연구소에 설치된 이상 유동 루프에 직접 센서를 설치하여 실제 유동장에서 센서의 측정 능력을 확인할 것이다. 더불어 관 내부의 유동장을 가시화하기 위하여 상용화된 wire-mesh sensor와 또 다른 가시화 장비인 고속 카메라와 같이 설치하여 비교 검증할 것이다. 그리고 수위뿐만 아니라 기포율, 계면 면적 측정을 위한 도구로서 평가할 것이다.

참 고 문 헌

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," *International Journal of Multiphase Flow*, 34 (9), pp. 809-818.

Fossa M., 1998, "Design and performance of a conductance probe for measuring the liquid fraction in two-phase gas-liquid flows," *Flow Measurement and Instrumentation*, 9 (2), pp. 103-109.

Kendoush A., A. and Sarkis Z. A., 2002, "Void fraction measurement by X-ray absorption," *Experimental Thermal and Fluid Science*, 25 (8), pp. 615-621.

Kendoush A. A. and Sarkis Z. A., 1995, "Improving the accuracy of the capacitance method for void fraction measurement," *Experimental Thermal and Fluid Science*, 11 (4), pp. 321-326.

Andressui P., Di Donfrancesco A. and Messia M., 1988, "An impedance method for the measurement of liquid hold-up in two phase flow," *International Journal of Multiphase Flow*, 14 (6), pp. 777-785.

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*, 6 (9), art. no. 030, pp.903-911.

Devia F., Fossa M., 2003, "Design and optimization of impedance probes for void fraction measurements," *Flow Measurement and Instrumentation*, 14 (4-5), pp. 139-149.

Fossa M., 1998, "Design and performance of a conductance probe for measuring the liquid fraction in two-phase gas-liquid flows," *Flow Measurement and Instrumentation*, 9 (2), pp. 103-109.

Chakrabarti, D. P., Das, G. and Das, P. K., 2007, "Identification of stratified liquid-liquid flow through horizontal pipes by a non-intrusive optical probe," *Chemical Engineering Science*, 62 (7), pp. 1861-1876.

감사의 글

짧으면 짧고, 길면 길다고 할 수 있는 지난 2년 동안 부족한 저에게 힘이 되어 주시고 도와주신 여러분 덕분에 작은 결실을 맺을 수 있게 되었습니다. 고마움의 표현을 잘 못하는 저에게 힘이 되어 주신 여러분께 글로나마 감사의 마음을 전할 수 있어서 몇 자 적어봅니다.

먼저 연구실 일원이 된 이래로 5년간 꾸준히 학연의 길로 갈 수 있도록 격려해 주시고 지도해주신 김신 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 그리고 바쁘신 와중에 논문 심사를 위해 시간을 내주신 박재우 교수님, 정범진 교수님께도 감사의 말씀을 드립니다.

2년 넘게 연구실에서 동고동락한 정성 오빠, 보안 오빠, 민석 오빠, 영준 오빠, 성용오빠, 바로 오빠, 유나, 송혜령 선생님, 고은별 선생님, 문지영 선생님, 룡리에게도 감사드립니다. 또한 연구실 회의하면서 조언을 주신 김경연 교수님, 김봉석 박사님과 아닐, 임정범 오빠께도 감사드립니다.

또한 2년 동안 대학원 생활을 함께 해온 에너지 공학과 선배 준호 삼촌, 지훈 삼촌, 상범 오빠, 승진오빠, 영민 오빠, 정환 오빠, 철규 오빠, 세민 오빠, 태형 오빠, 승현 오빠, 인제 오빠, 경호 오빠, 철웅 오빠, 행욱 오빠, 용현 오빠 그리고 동기인 다희, 명선, 유나, 덕우, 종근, 원직, 상웅에게도 감사드립니다.

그리고 어렸을 때부터 지금까지 힘들 때마다 옆에서 위로해주고 큰 힘이 되어준 친구들 고은지, 김은지, 숙화, 수연, 강미란, 이미란, 명지, 은정, 귀한, 용우, 태훈, 현택, 용훈, 승용, 민정아 완전 많이 고마워.

마지막으로 항상 우리 가족을 위해 기도해주신 우리 할머니, 뒤에서 묵묵히 지켜봐주시고 돌봐주시고 사랑해주시는 우리 부모님, 우리 오빠, 귀여움으로 언니의 활력소가 되어주는 우리 동생 감사하고 또 감사드립니다.

부족한 저에게 조언과 격려를 아낌없이 주시고 사랑으로 베풀어 주신 모든 분들께 감사하면서 논문의 마지막 장을 마무리하겠습니다.

여러분의 성원에 대단히 감사드립니다. Thank you very much.