



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

성층류 수위 측정을 위한
링 타입 임피던스 센서 설계

濟州大學校 大學院

에너지 工學科

李 成 龍

2012年 8月

성층류 수위 측정을 위한
링 타입 임피던스 센서 설계

指導教授 金 信

李 成 龍

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2012年 6月

李成龍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 金 慶 淵 印

濟州大學校 大學院

2012年 6月

Design of ring-type impedance sensor
for water level measurement
in stratified flows

Sung Yong Lee
(Supervised by professor Sin Kim)

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

2012. 6.

This thesis has been examined and approved.

.....
Thesis director, Bum-Jin Chung, Prof. of Nuclear and Energy Engineering

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

.....
Kyung-Youn Kim, Prof. of Electronic Engineering
(Name and Signature)

2012. 6.
Date

Department of Nuclear & Energy Engineering
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

LIST OF FIGURES	iii
LIST OF TABLES	vii
SUMMARY	ix
I. 서 론	1
II. 센서 최적화	3
1. 수치 계산	3
2. 수치 계산 결과	9
1) 전극 폭 0.1, 간극 폭 0.1부터 1.0까지 변경 계산	9
2) 전극 폭 0.15, 간극 폭 0.1부터 1.0까지 변경 계산	11
3) 전극 폭 0.2, 간극 폭 0.1부터 1.0까지 변경 계산	13
4) 전극 폭 0.25, 간극 폭 0.1부터 1.0까지 변경 계산	15
5) 전극 폭 0.3, 간극 폭 0.1부터 1.0까지 변경 계산	17

Ⅲ. 제작 센서 검증 실험	21
1. 실험 장치	21
1) 제작 센서	22
2) 측정 프로그램	24
2. 검증 실험	26
1) 실험 조건	26
2) 실험 결과	28
Ⅳ. 수평 유로 적용 실증 실험	32
1. 수평 유로 설비	32
2. 고속카메라	34
3. 실증 실험	37
1) 실험 조건	37
2) 실험 결과	39
Ⅴ. 결 론	57
참 고 문 헌	58

LIST OF FIGURES

Fig. 1. Schematic diagram of stratified flow in ring-type impedance sensor	4
Fig. 2. The structure of the finite element	6
Fig. 3. The potential distribution in ring-type impedance sensor	7
Fig. 4. The current distribution and current flow in ring-type impedance sensor	7
Fig. 5. Numerical results for the electrodes width 0.1 ($W_e = 0.1$)	9
Fig. 6. Numerical results for the electrodes width 0.1 and gap width 0.5 ($W_e = 0.1, W_g = 0.5$)	9
Fig. 7. Relative error between numerical results and guide line for electrodes width 0.1 ($W_e = 0.1$)	10
Fig. 8. Numerical results for the electrodes width 0.15 ($W_e = 0.15$)	11
Fig. 9. Numerical results for the electrodes width 0.15 and gap width 0.3 ($W_e = 0.15, W_g = 0.3$)	11
Fig. 10. Relative error between numerical results and guide line for electrodes width 0.15 ($W_e = 0.15$)	12

Fig. 11. Numerical results for the electrodes width 0.2 ($W_e = 0.2$)	13
Fig. 12. Numerical results for the electrodes width 0.2 and gap width 0.3 ($W_e = 0.2, W_g = 0.3$)	13
Fig. 13. Relative error between numerical results and guide line for electrodes width 0.2 ($W_e = 0.2$)	14
Fig. 14. Numerical results for the electrodes width 0.25 ($W_e = 0.25$)	15
Fig. 15. Numerical results for the electrodes width 0.25 and gap width 0.2 ($W_e = 0.25, W_g = 0.2$)	15
Fig. 16. Relative error between numerical results and guide line for electrodes width 0.25 ($W_e = 0.25$)	16
Fig. 17. Numerical results for the electrodes width 0.3 ($W_e = 0.3$)	17
Fig. 18. Numerical results for the electrodes width 0.3 and gap width 0.2 ($W_e = 0.3, W_g = 0.2$)	17
Fig. 19. Relative error between numerical results and guide line for electrodes width 0.3 ($W_e = 0.3$)	18
Fig. 20. The results of numerical experiment	20
Fig. 21. Diagram of measurement system	21
Fig. 22. Production drawing of ring-type impedance sensor	22
Fig. 23. Picture of the ring-type impedance sensor	22
Fig. 24. Control and measurement program	24

Fig. 25. Static experiments for stratified smooth flow	26
Fig. 26. Comparison between numerical and static experiment (absolute current)	28
Fig. 27. Comparison between numerical and static experiment (absolute impedance)	28
Fig. 28. Comparison between numerical and static experiment (capacitance)	29
Fig. 29. Comparison between numerical and static experiment (resistance)	29
Fig. 30. Comparison between numerical and static experiment (reactance)	30
Fig. 31. Schematic of test facility	32
Fig. 32. Test section	33
Fig. 33. High-speed camera	34
Fig. 34. Scale bar attached for water level readings	35
Fig. 35. Water level measurement of the stratified flow using high-speed camera	35
Fig. 36. Scale error	36
Fig. 37. Ring-type sensor installed in test section	37
Fig. 38. Horizontal flow regime map [Mandhane et al., 1974]	38

Fig. 39. Comparison of water level measurement between ring-type impedance sensor and high-speed camera	54
Fig. 40. Comparison of water level measurement between ring-type impedance sensor and high-speed camera (absolute current) ·	55
Fig. 41. Comparison of water level measurement between ring-type impedance sensor and high-speed camera (absolute impedance)	55
Fig. 42. Comparison of water level measurement between ring-type impedance sensor and high-speed camera (capacitance)	56
Fig. 43. Comparison of water level measurement between ring-type impedance sensor and high-speed camera (resistance)	56
Fig. 44. Comparison of water level measurement between ring-type impedance sensor and high-speed camera (reactance)	57
Fig. 45. Comparison between observed flow regimes and Mandhane map	57

LIST OF TABLES

Table 1. Condition of numerical calculations	6
Table 2. Relative error between numerical results and guide line for electrodes width 0.1 ($W_e = 0.1$)	10
Table 3. Relative error between numerical results and guide line for electrodes width 0.15 ($W_e = 0.15$)	12
Table 4. Relative error between numerical results and guide line for electrodes width 0.2 ($W_e = 0.2$)	14
Table 5. Relative error between numerical results and guide line for electrodes width 0.25 ($W_e = 0.25$)	16
Table 6. Relative error between numerical results and guide line for electrodes width 0.3 ($W_e = 0.25$)	18
Table 7. Relative error between numerical results and guide line	19
Table 8. Comparison of water level measurement between high-speed camera and ring-type impedance sensor ($j_l = 0.03 m/s$, $j_g = 0 \sim 8 m/s$)	42

Table 9. Comparison of water level measurement between high-speed camera and ring-type impedance sensor ($j_l = 0.06 m/s$, $j_g = 0 \sim 8 m/s$)	46
Table 10. Comparison of water level measurement between high-speed camera and ring-type impedance sensor ($j_l = 0.09 m/s$, $j_g = 0 \sim 8 m/s$)	50

SUMMARY

It is very important issues to monitor the phase distribution, void fraction and water level for effective design and analysis of system in various engineering fields such as chemical and nuclear industry.

For these reasons various measurement techniques have been proposed, for example, radiation, micro wave, ultrasonic, and electrical impedance method. However, most techniques have limitations in terms of economic point of view and also these are difficult to apply to the case of the rapid change of phase distributions. The probe level meter which has been widely used for water level measurement tends to disturb the flow fields, in case of ultrasonic level meter water level measurement can be hard when numerous bubbles forms in the interface of two phases.

This study considers electrical impedance method which does not disturb the flow field and is simple to design. In this work, a ring-type sensor was designed to measure the water level in the stratified regime. Prior to loop experiments, as a reference the relationship between the electrical signal and normalized water level was constructed based on numerical calculation and this relationship was compared with static phantom experiments. In addition, a designed ring-type sensor was installed in the horizontal test section and

sensor signals for various water levels created by a variety of flow rate conditions were measured. By applying these measured signals to precalculated lookup table, corresponding water levels were evaluated. Also, these results were successfully compared with those of images captured by high-speed camera.

I. 서론

공학 분야 중 접근할 수 없는 고온 유체를 이용하는 분야 또는 유독성 화학물질의 혼합, 원자력 발전 분야와 열교환기 튜브 내에서 유체상의 상태 변화 또는 기포율, 수위 등을 감시하는 것은 열전달 및 유동 해석 또는, 설계 및 안전의 관점에서도 매우 중요한 일이다. 이러한 중요성으로 인해 방사선[Pike, R. W., et al., 1965], micro wave[Boon, J. D., et al., 2008], ultrasonic[Hauptmann, P., et al., 2002], 전기 임피던스[Coney, M. W. E., 1973]등을 이용한 방법 등 다양한 측정 방법들이 연구되고 있다. 방사선을 이용한 기법은 중성자나 X-ray 등을 측정하고자 하는 영역에 방사시켜 투과 방사선을 대칭 방향에서 측정하는 방법으로 방사선을 생성하기 위한 대규모 장치와 이를 차폐할 차폐체등 설치로 인한 공간 제약적인 문제가 발생하고, 이동설치가 쉽지 않다는 단점이 있다. 초음파를 이용한 기법은 관 외벽에 초음파원과 초음파 센서를 부착하여 초음파가 관을 통과하여 산란 및 반사되는 신호를 측정하는 기법으로 센서 체결을 위해 관의 절단 등과 같은 유로의 가공 없이 측정할 수 있다는 장점이 있지만, 이상 유동장의 경계면이 복잡한 유동에 적용 할 수 없다는 단점이 있다. 일반적으로 수위 측정에 널리 사용되는 probe level meter는 유동이 있는 관 내부에 탐침을 삽입하여 직접 측정하는 탐침방식으로 인해 유동장 교란이 발생하며, ultrasonic level meter는 이전에 설명 했던 바와 같이 물질 계면이 복잡 하거나 많은 양의 기포가 존재하면 수위 측정에 문제를 일으킬 수 있다.

광범위한 산업분야에서 안정성 및 열전달 성능평가의 정확성을 높이기 위해 기포율 또는 수위의 실시간 측정이 필요하며, 성층류(stratified flow)에 속하는

과형류(stratified wavy flow)와 같은 짧은 시간동안 계면 변화가 급격한 이상유동장의 수위를 측정하기 위해서는 측정기기의 빠른 반응성이 요구된다. 임피던스 기법은 이상 유동에서 유동의 임피던스를 측정하여 기포율 또는 수위를 판별하는 기법으로, 유체의 전기적 특성을 이용하여 반응 시간이 ms이하의 속도로 빨라 실시간 측정에 용이하며 전극 설계 방법에 따라 유동 교란 없이 측정 할 수 있다는 장점이 있다.

따라서 본 연구에서는 구성 및 원리가 간단한 임피던스 기법을 이용하여 전극을 관 내벽에 부착하는 방식으로 유동장을 교란 하지 않고 극소량의 수위부터 고수위까지 측정이 가능한 링 타입 전기 임피던스 센서를 설계 및 제작을 하고, 수위 측정 시스템을 구성하여 수평 물-공기 이상 유동 실험 설비에 적용, 고속카메라 가시화를 통해 비교 검증 하는 것을 최종 목표로 한다.

II. 센서 최적화

임피던스 센서를 수위 측정에 적용하기 위해서는 수위와 전기신호의 상관관계를 알고 있어야 한다. 성층류의 경우 비대칭 문제 이므로 센서 최적화 설계를 위해 유한요소법 기반 상용 소프트웨어인 COMSOL MULTIPHYSICS를 이용하여 구조적인 변수 두 개인 전극의 폭과 전극과 전극 사이 간극 폭을 결정 하였다.

1. 수치 계산

임피던스 기법에서 이상 유동장의 유체 상 분포는 전기적 특성의 분포로 간주된다. 따라서, 이상 유체의 전기적 특성이 각각 주어진 경우 경계 전압은 Maxwell 방정식과 경계 조건에 의해 결정 된다.

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

여기서, σ 는 관심 유체 영역의 전기 전도도이고 u 는 결정되는 전위 분포이다. 임피던스 기법은 음의 법칙에 의해 기포율 또는 수위에 따라 계측기에서 임피던스 변화를 측정하게 된다.

성층류는 수평 및 약간 기울어진 하향류에서 기체 및 액체가 저속일 때 각 상이 분리되어 흐르는 유동 구조로 두 상의 상대속도가 작을 때는 경계면이 유연한 Stratified smooth flow가 형성되고 기체의 유동속도가 증가하게 되면 마찰에

의해 경계면에 표면파가 발생하는 Stratified wavy flow가 형성된다. Fig. 1은 센서와 성층류의 개략도를 보여준다.

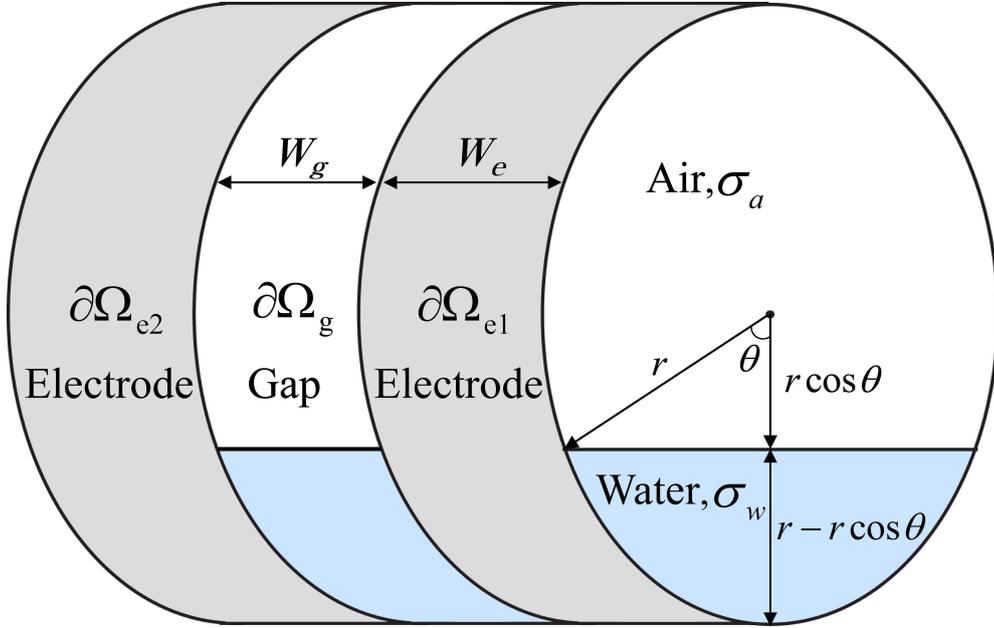


Fig. 1. Schematic diagram of stratified flow in ring-type impedance sensor

물과 공기의 전기 전도도(electric conductivity, 단위 S/m)는 σ_w 와 σ_a 로 주어지며 상수이다. W_e 의 폭을 가진 두 동일 링 전극은 $\partial\Omega_{e1}$ 과 $\partial\Omega_{e2}$ 로 표현되고 r 반경 파이프 내벽에 굴곡 없이 부착되며, W_g 는 두 링 전극 사이 간극의 폭으로 $\partial\Omega_g$ 로 표현된다. 만약 형성된 수위가 r 보다 작을 때, 이 센서 내에 형성된 수위는 파이프 반경과 삼각함수 형태인 $r - r \cos \theta$ 로 표현 된다. 이때 각 영역에서 전위 분포는 다음의 Laplace 방정식을 만족한다.

$$\nabla \cdot \sigma_w \nabla u_w = 0 \quad \text{for } 0 \leq R_w \leq r - r \cos \theta \quad (\text{water region}) \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \sigma_a \nabla u_a = 0 \quad \text{for } r - r \cos \theta \leq R_a \leq r + r \cos \theta \quad (\text{air region}) \quad (3)$$

여기서 하첨자 w 와 a 는 각각 물, 공기 영역을 나타낸다. 만약 형성 수위가 r 보다 클 때 식(2)의 지배 방정식에서 하첨자는 $w \rightarrow a$ 로 바뀌어 물 영역은 공기 영역으로 바뀌게 된다. 마찬가지로 식(3)에서 하첨자는 $a \rightarrow w$ 로 바뀌어 공기에서 물 영역으로 바뀐다. 지배 방정식은 다음과 같은 경계 조건에 종속된다.

$$V = V_0 \quad \text{on} \quad \partial\Omega_{e1} \quad (\text{electrode 1}) \quad (4)$$

$$V = 0 \quad \text{on} \quad \partial\Omega_{e2} \quad (\text{electrode 2}) \quad (5)$$

$$\sigma_w \frac{\partial u_w}{\partial r} = 0 \quad \text{on} \quad \partial\Omega_g \quad (\text{gap}) \quad (6)$$

$$\sigma_w \frac{\partial u_w}{\partial r} \Big|_{r=r\cos\theta} = \sigma_a \frac{\partial u_a}{\partial r} \Big|_{r=r\cos\theta} \quad (7)$$

센서의 인가된 전압이 V , 링 전극 표면에서 계산되는 전류가 I 일 때, 임피던스 Z 는 옴의 법칙에 의해 V/I 로써 계산된다.

링 타입 임피던스 센서 내 층상류는 비대칭 문제로 3차원 계산을 해야 한다. 센서의 최적화 설계를 위해 편미분 방정식(PDE) 기반의 다중 물리 현상을 유한 요소법(FEM)으로 해석하는 상용 소프트웨어 COMSOL Multiphysics를 이용하여 계산하였다. 전기신호 측정을 통해 저 수위부터 고 수위까지 정확한 수위를 판별하기 위해서는 수위와 전기신호의 관계가 선형성을 보여야 한다. 하지만 임피던스 센서의 전극 형상 개수 등은 민감도를 결정하는 중요한 변수로서 이에 따라 비선형성을 보일 수도 있다. 따라서 센서 구조적 변수 두 개인 전극의 폭과 간극의 폭을 계산을 통해 결정 하였다. 표 1은 계산 조건을 나타낸다. 계산 시 링 전극에 인가하는 교류 전압의 주파수는 실제 센서 계측에 이용되는 LCR

meter의 최대 주파수 범위인 1MHz로 조건을 주어 계산 하였다. 고 주파수를 이
 용 시 센서 측정 시간 단축 및 노이즈 저감 효과를 얻을 수 있다.

Table 1. Condition of numerical calculations

전기 전도도, σ (S/m)	조 건	
	물	공기
센서 내경	1	
전극 폭	0.1 ~ 0.3 (계산 간격 : 0.05)	
간극 폭	0.1 ~ 1 (계산 간격 : 0.1)	
수 위	0 ~ 1 (계산 간격 : 0.1)	
인가 전압, (V)	1	
주파수, (Hz)	1E6	

FEM 계산은 요소의 개수나 형태에 따라 계산 결과에 영향을 준다. 따라서 링
 타입 임피던스 센서는 전극 표면에서 신호를 계산하기 때문에 신뢰도가 높은 테
 이터를 도출하기 위해 요소는 swept 방법(원통 외부-map mash)으로 나누었고
 계산에 사용된 총 요소의 수는 약 200,000~300,000개이다. 다음 그림은 계산에
 사용된 요소 구조들 중 일부의 형태를 보여준다.

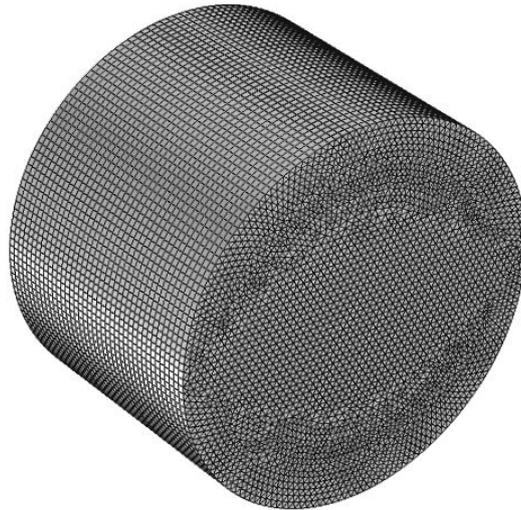


Fig. 2. The structure of the finite element

다음 그림 Fig. 3, Fig. 4는 중간 수위의 계산 결과로 각각 센서 내의 전위 분포, 그리고 전류 분포 및 흐름을 보여준다.

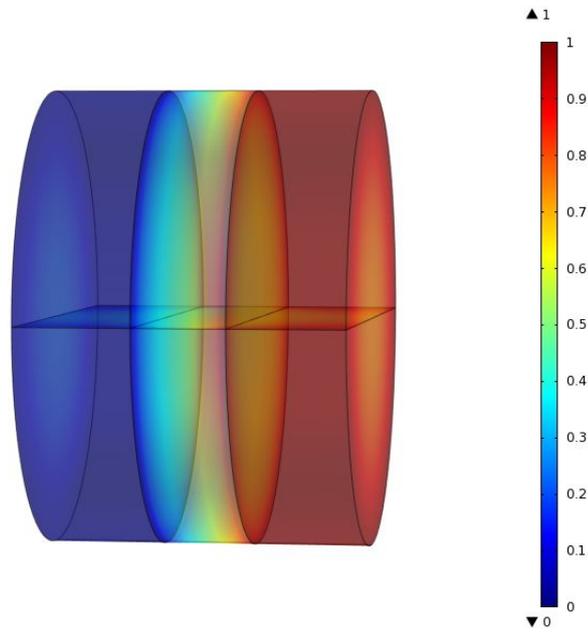


Fig. 3. The potential distribution for ring-type impedance sensor

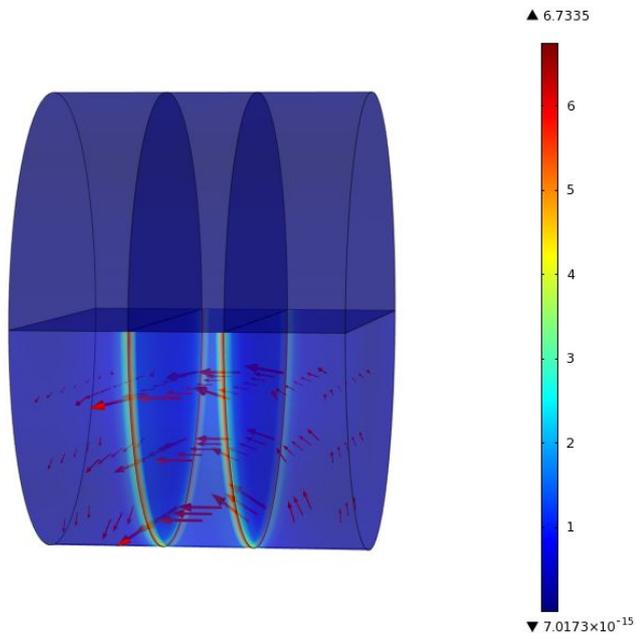


Fig. 4. The current distribution and current flow for ring-type impedance sensor

수위 및 전기 신호는 다음의 방법으로 무차원화 하여 0에서 1의 값을 갖도록 나타내었다. 수위는 다음 식을 통해 무차원화 하였다.

$$H^* = \frac{H}{D} \quad (8)$$

여기서, H 는 실제 수위이고 D 는 유로의 내경이다.

전기신호는 물이 가득 차 있을 때 측정된 값과 각각의 수위에 대해 측정된 값의 비로서 무차원화 하였다. 각각의 전기신호에 대한 무차원화 식은 다음과 같다. 아래 식에서 하첨자 *water*는 물이 가득 차 있는 경우 이다.

$$\text{Normalized Absolute Current } |I|^* = \frac{|I|}{|I_{water}|} \quad (9)$$

$$\text{Normalized Absolute Impedance } |Z|^* = \frac{|Z_{water}|}{|Z|} \quad (10)$$

$$\text{Normalized Capacitance } C^* = \frac{C}{C_{water}} \quad (11)$$

$$\text{Normalized Resistance } R^* = \frac{R_{water}}{R} \quad (12)$$

$$\text{Normalized Reactance } X^* = \frac{X_{water}}{X} \quad (13)$$

2. 수치 계산 결과

1) 전극 폭 0.1, 간극 폭 0.1부터 1.0까지 변경 계산

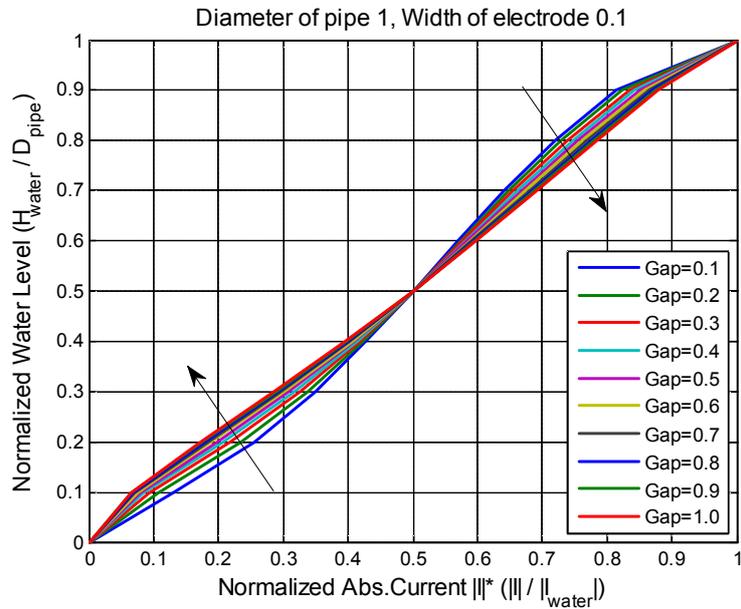


Fig. 5. Numerical results for the electrodes width 0.1 ($W_e = 0.1$)

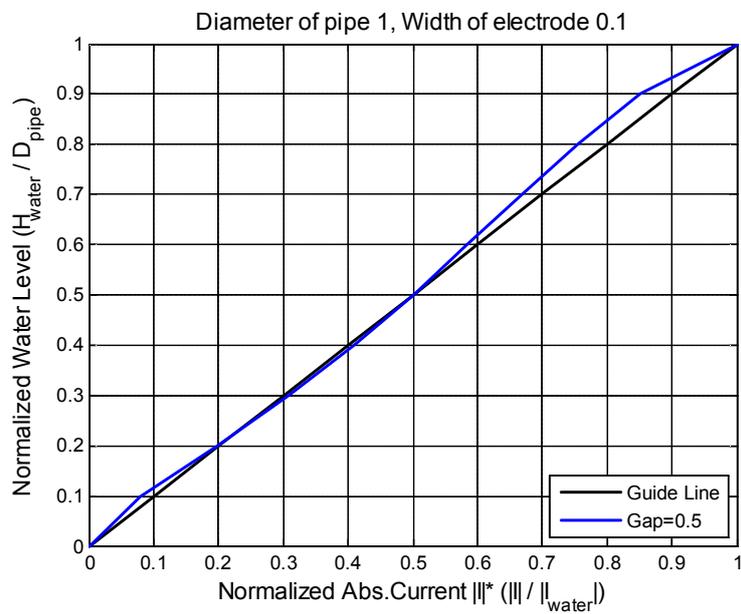


Fig. 6. Numerical results for the electrodes width 0.1 and gap width 0.5 ($W_e = 0.1, W_g = 0.5$)

Fig. 5는 전극의 폭이 0.1일 때 간극의 폭에 따른 수위와 절대 전류의 상관관계를 나타내는 그래프이다.

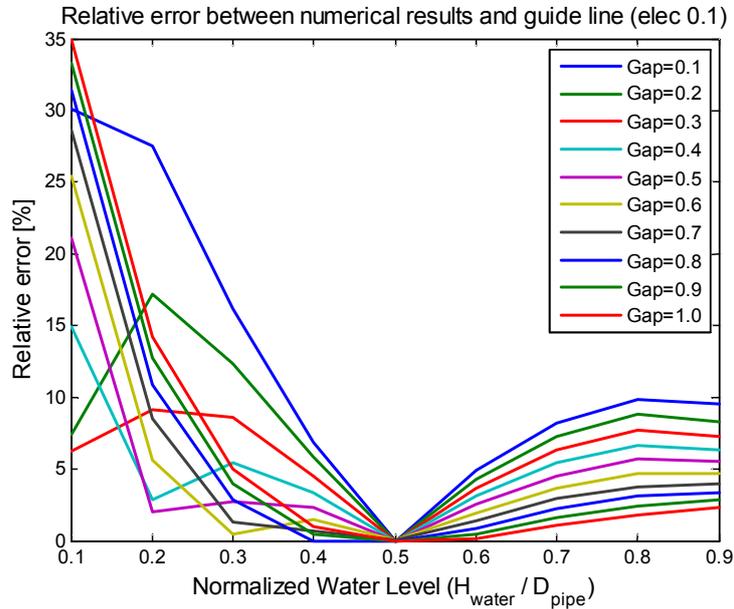


Fig. 7. Relative error between numerical results and guide line for electrodes width 0.1 ($W_e = 0.1$)

Table 2. Relative error between numerical results and guide line for electrodes width 0.1 ($W_e = 0.1$)

		Gap									
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
Water	0.1	30.1	7.4	6.2	14.9	21.1	25.4	28.7	31.4	33.3	35.0
	0.2	27.5	17.2	9.1	2.8	2.0	5.6	8.5	10.9	12.7	14.2
	0.3	16.2	12.3	8.6	5.4	2.7	0.5	1.3	2.8	4.0	5.0
	0.4	6.9	5.8	4.5	3.4	2.3	1.5	0.7	0.0	0.5	1.0
	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
Level	0.6	4.9	4.3	3.7	3.1	2.5	1.9	1.4	0.9	0.5	0.2
	0.7	8.2	7.3	6.4	5.4	4.5	3.7	2.9	2.2	1.6	1.1
	0.8	9.9	8.8	7.7	6.7	5.7	4.7	3.8	3.1	2.4	1.8
	0.9	9.5	8.3	7.3	6.3	5.5	4.7	4.0	3.4	2.8	2.3
Average		12.6	8.0	5.9	5.3	5.1	5.3	5.7	6.1	6.4	6.7

Fig. 7 및 Table 2는 선형인 가이드라인과 간극 구조에 따른 전기신호의 상대오차를 나타낸다. 비교결과 센서 폭이 0.1인 구조에서 간극의 폭은 0.5일 때 5.1%의 최소 평균 오차를 보였다.

2) 전극 폭 0.15, 간극 폭 0.1부터 1.0까지 변경 계산

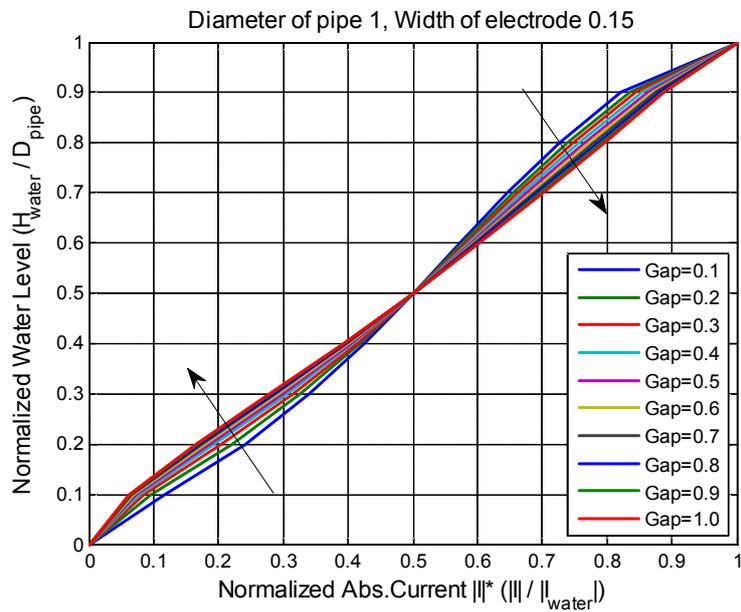


Fig. 8. Numerical results for the electrodes width 0.15 ($W_e = 0.15$)

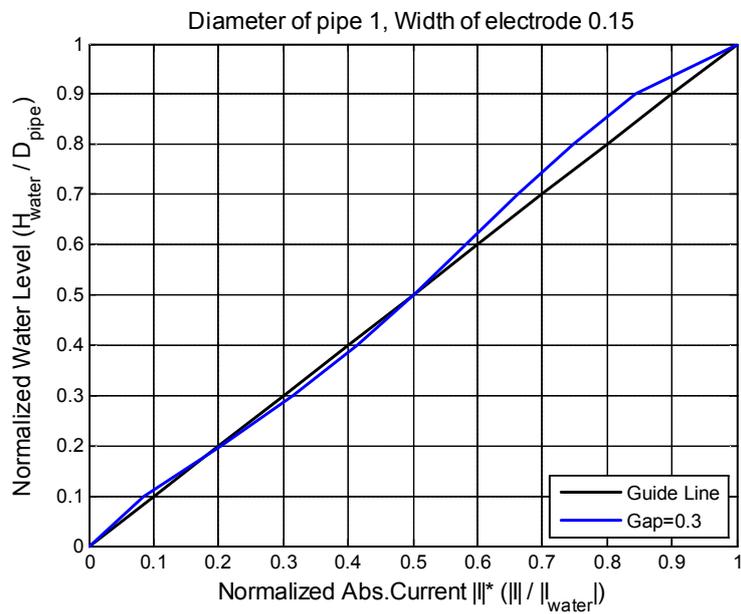


Fig. 9. Numerical results for the electrodes width 0.15 and gap width 0.3 ($W_e = 0.15, W_g = 0.3$)

Fig. 8은 전극의 폭이 0.15일 때 간극의 폭에 따른 수위와 절대 전류의 상관관계를 나타내는 그래프이다.

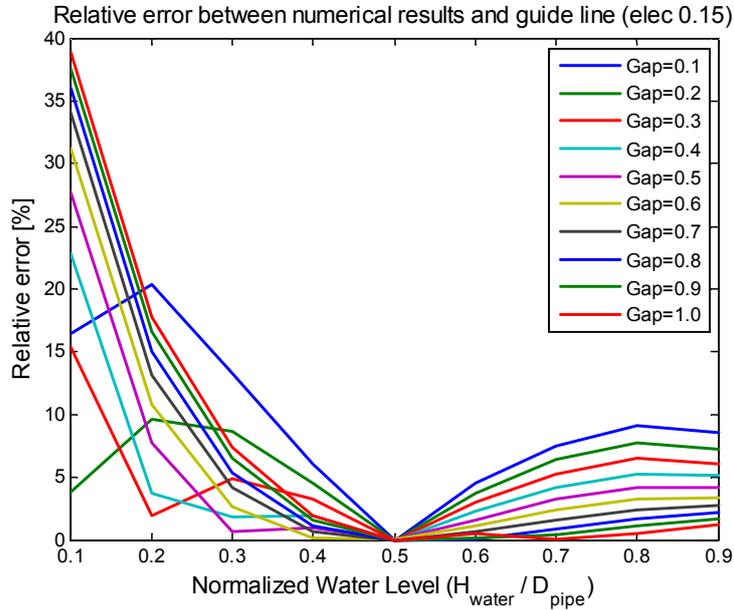


Fig. 10. Relative error between numerical results and guide line for electrodes width 0.15 ($W_e = 0.15$)

Table 3. Relative error between numerical results and guide line for electrodes width 0.15 ($W_e = 0.15$)

		Gap									
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
Water Level	0.1	16.5	3.8	15.4	22.8	27.7	31.2	34.0	36.0	37.6	38.9
	0.2	20.3	9.6	1.9	3.7	7.7	10.8	13.2	15.1	16.6	17.8
	0.3	13.3	8.7	4.9	1.8	0.7	2.6	4.2	5.4	6.5	7.4
	0.4	6.1	4.5	3.2	1.9	1.0	0.2	0.6	1.1	1.6	2.0
	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Average	0.6	4.5	3.7	3.0	2.3	1.6	1.1	0.6	0.1	0.2	0.5
	0.7	7.5	6.4	5.3	4.2	3.2	2.4	1.6	0.9	0.4	0.1
	0.8	9.1	7.7	6.5	5.3	4.2	3.2	2.4	1.7	1.1	0.5
	0.9	8.6	7.3	6.1	5.1	4.2	3.4	2.8	2.2	1.7	1.2
Average		9.6	5.8	5.1	5.2	5.6	6.1	6.6	7.0	7.3	7.6

Fig. 10 및 Table 3은 선형인 가이드 라인과 간극 구조에 따른 전기신호의 상대 오차를 나타낸다. 비교결과 센서 폭이 0.15인 구조에서 간극의 폭은 0.3일 때 5.1%의 최소 평균 오차를 보였다.

3) 전극 폭 0.2, 간극 폭 0.1부터 1.0까지 변경 계산

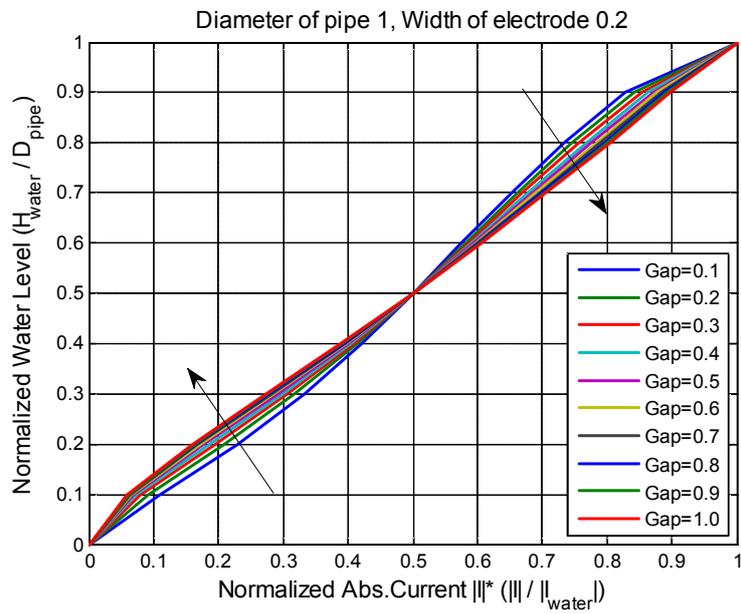


Fig. 11. Numerical results for the electrodes width 0.2 ($W_e = 0.2$)

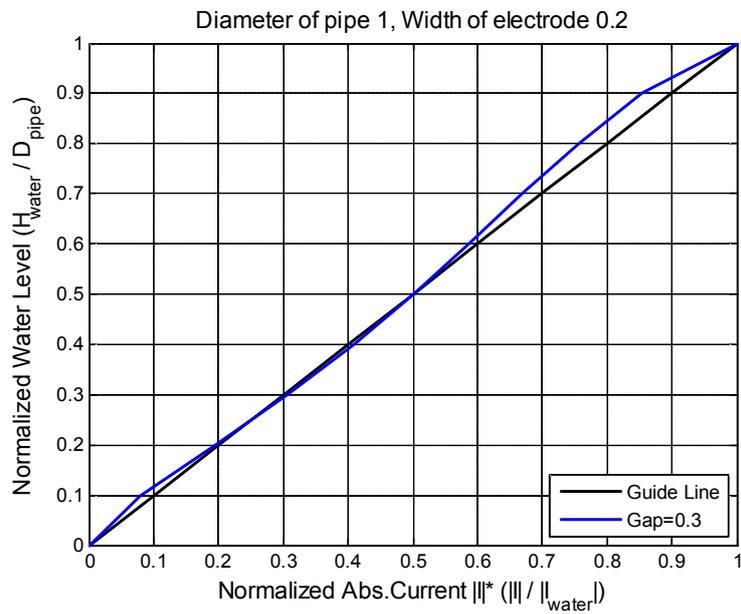


Fig. 12. Numerical results for the electrodes width 0.2 and gap width 0.3 ($W_e = 0.2$, $W_g = 0.3$)

Fig. 11은 전극의 폭이 0.2일 때 간극의 폭에 따른 수위와 절대 전류의 상관관계를 나타내는 그래프이다.

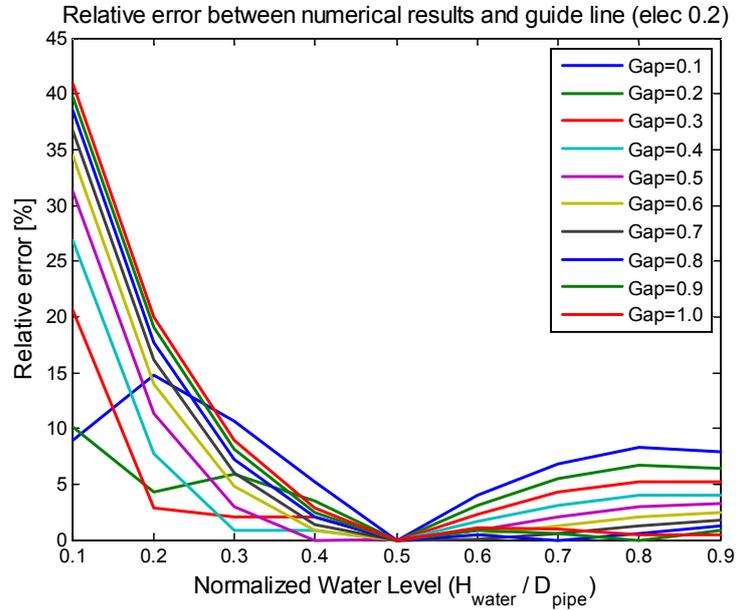


Fig. 13. Relative error between numerical results and guide line for electrodes width 0.2 ($W_e = 0.2$)

Table 4. Relative error between numerical results and guide line for electrodes width 0.2 ($W_e = 0.2$)

		Gap									
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
W a t e r	0.1	8.9	10.1	20.6	26.9	31.3	34.4	36.7	38.5	39.8	41.0
	0.2	14.8	4.3	2.8	7.7	11.3	14.0	16.1	17.7	19.0	20.0
	0.3	10.7	5.9	2.1	0.8	3.0	4.8	6.1	7.3	8.2	8.9
	0.4	5.2	3.5	2.0	0.9	0.0	0.8	1.4	2.0	2.4	2.8
	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
L e v e l	0.6	4.1	3.1	2.3	1.6	0.9	0.4	0.1	0.5	0.8	1.1
	0.7	6.8	5.5	4.3	3.1	2.1	1.3	0.6	0.0	0.6	1.0
	0.8	8.3	6.7	5.3	4.1	3.0	2.1	1.3	0.6	0.0	0.5
	0.9	7.9	6.4	5.2	4.1	3.2	2.5	1.8	1.3	0.8	0.4
Average		7.4	5.1	4.9	5.5	6.1	6.7	7.1	7.5	8.0	8.4

Fig. 13 및 Table 4는 선형인 가이드 라인과 간극 구조에 따른 전기신호의 상대 오차를 나타낸다. 비교결과 센서 폭이 0.2인 구조에서 간극의 폭은 0.3일 때 4.9%의 최소 평균 오차를 보였다.

4) 전극 폭 0.25, 간극 폭 0.1부터 1.0까지 변경 계산

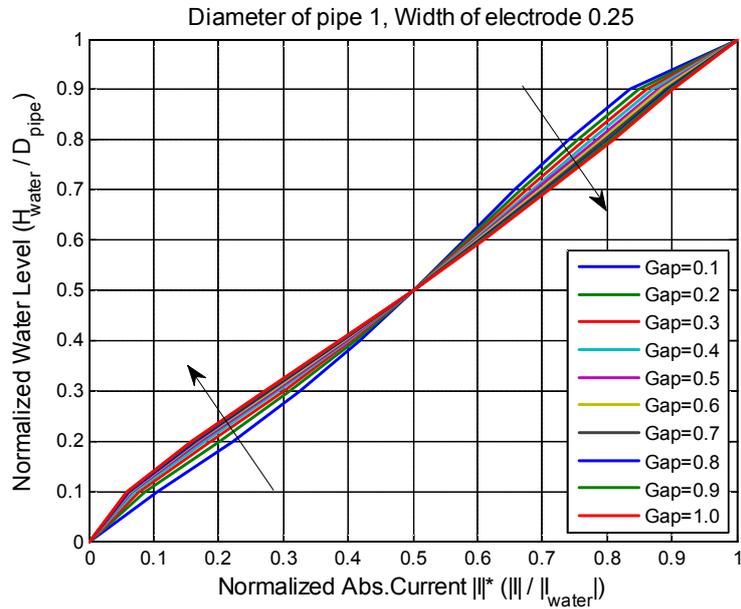


Fig. 14. Numerical results for the electrodes width 0.25 ($W_e = 0.25$)

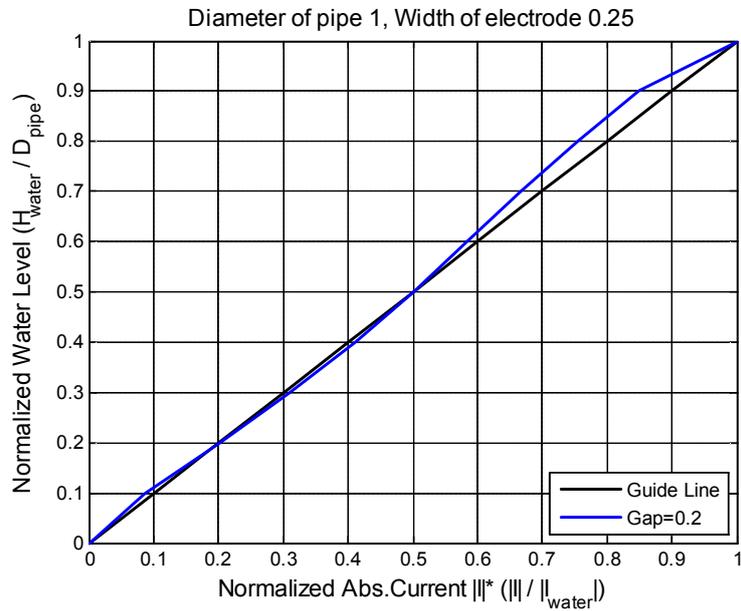


Fig. 15. Numerical results for the electrodes width 0.25 and gap width 0.2 ($W_e = 0.25, W_g = 0.2$)

Fig. 14는 전극의 폭이 0.25일 때 간극의 폭에 따른 수위와 절대 전류의 상관관계를 나타내는 그래프이다.

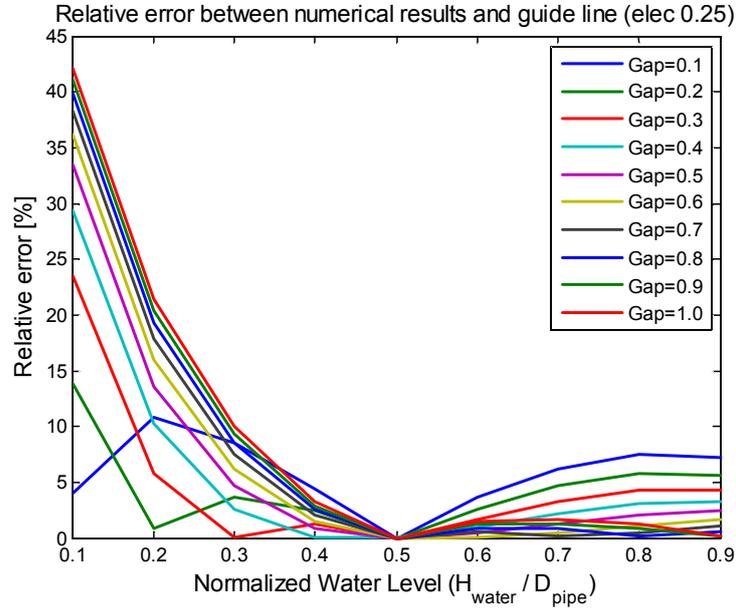


Fig. 16. Relative error between numerical results and guide line for electrodes width 0.25 ($W_e = 0.25$)

Table 5. Relative error between numerical results and guide line for electrodes width 0.25 ($W_e = 0.25$)

		Gap									
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
Water	0.1	4.1	13.9	23.5	29.4	33.5	36.2	38.3	39.9	41.1	42.2
	0.2	10.8	0.8	5.8	10.3	13.6	16.0	17.9	19.3	20.4	21.4
	0.3	8.5	3.6	0.1	2.6	4.7	6.2	7.5	8.5	9.3	10.0
	0.4	4.4	2.5	1.2	0.1	0.8	1.5	2.1	2.6	2.9	3.3
	0.5	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Level	0.6	3.6	2.6	1.7	1.0	0.4	0.1	0.6	0.9	1.2	1.5
	0.7	6.2	4.7	3.3	2.2	1.3	0.5	0.2	0.8	1.3	1.7
	0.8	7.5	5.8	4.3	3.1	2.0	1.1	0.4	0.2	0.8	1.3
	0.9	7.2	5.6	4.3	3.3	2.4	1.7	1.1	0.6	0.2	0.2
Average		5.8	4.4	4.9	5.8	6.5	7.0	7.6	8.1	8.6	9.1

Fig. 16 및 Table 5는 선형인 가이드 라인과 간극 구조에 따른 전기신호의 상대 오차를 나타낸다. 비교결과 센서 폭이 0.25인 구조에서 간극의 폭은 0.2일 때 4.4%의 최소 평균 오차를 보였다.

5) 전극 폭 0.3, 간극 폭 0.1부터 1.0까지 변경 계산

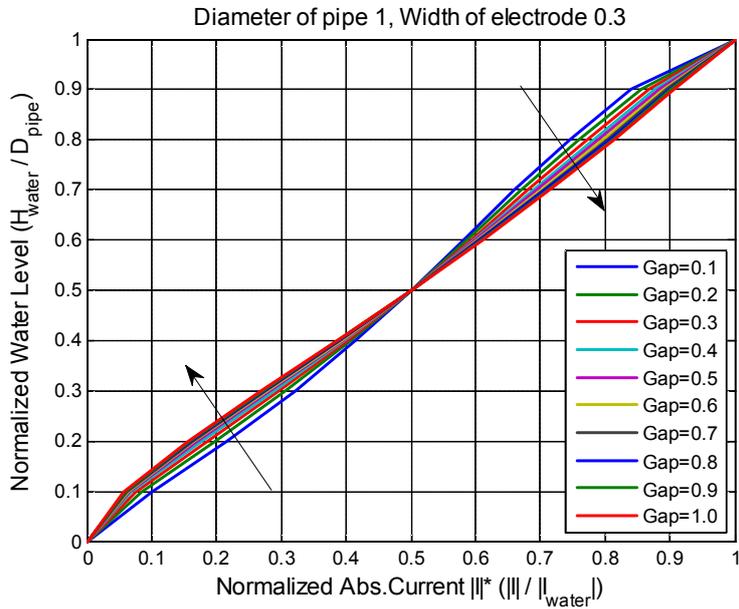


Fig. 17. Numerical results for the electrodes width 0.3 ($W_e = 0.3$)

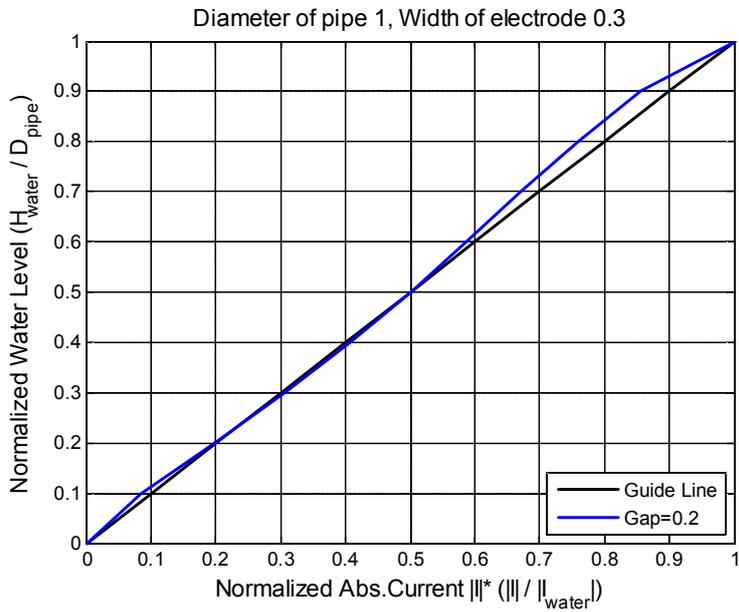


Fig. 18. Numerical results for the electrodes width 0.3 and gap width 0.2 ($W_e = 0.3, W_g = 0.2$)

Fig. 17은 전극의 폭이 0.3일 때 간극의 폭에 따른 수위와 절대 전류의 상관관계를 나타내는 그래프이다.

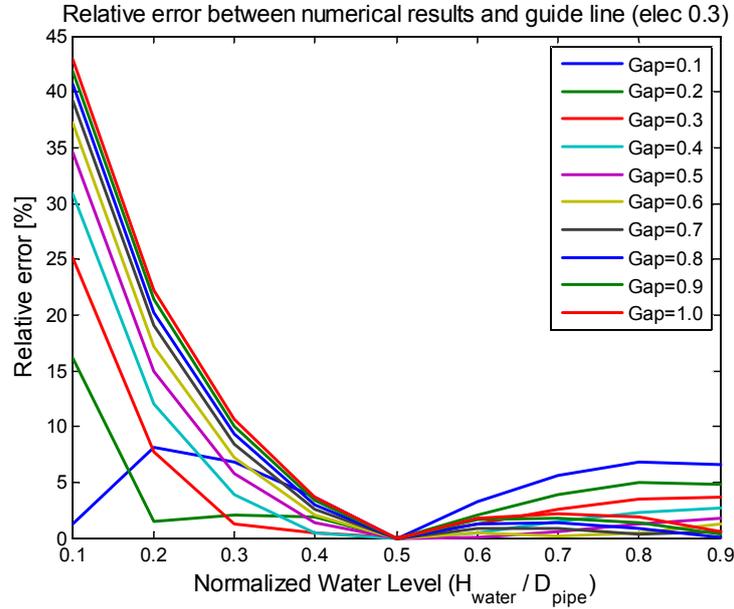


Fig. 19. Relative error between numerical results and guide line for electrodes width 0.3 ($W_e = 0.3$)

Table 6. Relative error between numerical results and guide line for electrodes width 0.3 ($W_e = 0.25$)

		Gap									
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
Water	0.1	1.3	16.1	25.2	30.9	34.6	37.2	39.2	40.7	41.9	42.9
	0.2	8.2	1.5	7.7	12.0	15.0	17.2	19.0	20.3	21.4	22.3
	0.3	6.8	2.1	1.3	3.9	5.8	7.2	8.4	9.3	10.0	10.7
	0.4	3.7	1.9	0.5	0.5	1.4	2.0	2.6	3.0	3.4	3.7
Level	0.5	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.6	3.2	2.1	1.2	0.5	0.1	0.5	0.9	1.3	1.6	1.8
	0.7	5.6	3.9	2.6	1.5	0.6	0.2	0.8	1.4	1.8	2.2
	0.8	6.8	5.0	3.5	2.3	1.3	0.4	0.3	0.9	1.4	1.9
	0.9	6.6	4.9	3.7	2.7	1.8	1.2	0.6	0.1	0.3	0.6
Average		4.7	4.2	5.1	6.0	6.7	7.3	8.0	8.6	9.1	9.6

Fig. 19 및 Table 6은 선형인 가이드 라인과 간극 구조에 따른 전기신호의 상대 오차를 나타낸다. 비교결과 센서 폭이 0.3인 구조에서 간극의 폭은 0.2일 때 4.2%의 최소 평균 오차를 보였다.

다음의 표는 각각의 전극 구조에서 선형 가이드라인과 평균 상대오차가 최소인 센서 규격과 상대오차 등을 나타내고 있다.

Table 7. Relative error between numerical results and guide line

The geometry of ring-type impedance sensor						
Width	W_e (electrode)	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3
	W_g (gap)	0.5	0.3	0.3	0.2	0.2
	$W_e + W_g + W_e$ (total)	0.7	0.6	0.7	0.7	0.8
Water level		Relative error (%)				
0.1		21.1	15.4	20.6	13.9	16.1
0.2		2.0	1.9	2.8	0.8	1.5
0.3		2.7	4.9	2.1	3.6	2.1
0.4		2.3	3.2	2.0	2.5	1.9
0.5		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.6		2.5	3.0	2.3	2.6	2.1
0.7		4.5	5.3	4.3	4.7	3.9
0.8		5.7	6.5	5.3	5.8	5.0
0.9		5.5	6.1	5.2	5.6	4.9
Average		5.1	5.1	4.9	4.4	4.2

계산한 결과를 종합해보면 전체 결과 중 전극 폭 0.3, 간극 폭 0.2의 구조가 4.2%의 평균 상대오차로 가장 선형성을 보였다. 그러나 제안 하는 링 타입 임피던스 센서는 센서 내 평균 수위를 측정하기 때문에 좁은 구간 내 수위가 급격히 변동하는 과형류의 수위를 국부적으로 측정하기 위해서는 전체 센서 폭이 좁아야 유리 하다. 따라서 전체 센서 폭이 좁으면서 평균 상대오차가 작은 구조를 택해야 하므로 두 번째로 센서 전체 폭 및 평균 상대오차가 작은 전극 폭 0.25, 간극 폭 0.2의 구조로 결정 하였다. 내경 4cm인 실제 수평관에 적용하기 위한 전극 및 간극 폭의 환산 규격은 전극 1cm, 간극 0.8 cm 이다.

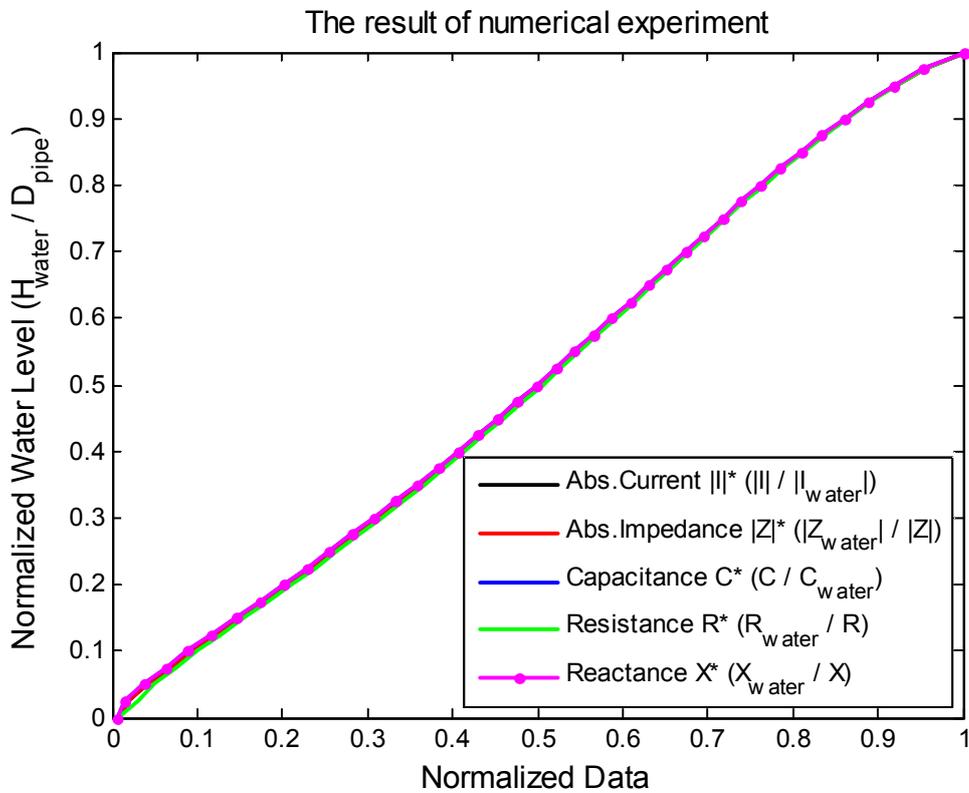


Fig. 20. The results of numerical experiment

실제 센서 사용 시 참조값(lookup table)과 센서에서 측정된 신호의 선형 보간을 통해 수위가 판별되기 때문에 정확한 수위 판별을 위해서는 많은 양의 수위별 신호 데이터가 필요로 한다. 하지만, 앞에서 계산한 데이터는 수위를 0.1 간격으로 변경하며 계산한 결과로 실제 수위 측정에서 많은 오차를 수반할 수 있다. 따라서 결정 구조에서 수위를 0.01 간격으로 0.01부터 1까지 추가 계산하였고, 이에 대한 결과는 Fig. 20에 그래프로 나타나있다. 이 결과는 실제 센서의 수위 측정을 위한 참조값으로 사용 된다.

Ⅲ. 제작 센서 검증 실험

1. 실험 장치

실험 장치는 다음 Fig. 21와 같이 구성되어 있다. 링 타입 임피던스 센서에 Agilent사의 4284A LCR meter를 연결하고 PC의 LabVIEW 제어를 통해 교류 전압을 인가함과 동시에 레지스턴스(resistance)와 리액턴스(reactance) 값을 각각의 수위에 대해 취득하고 저장한다.

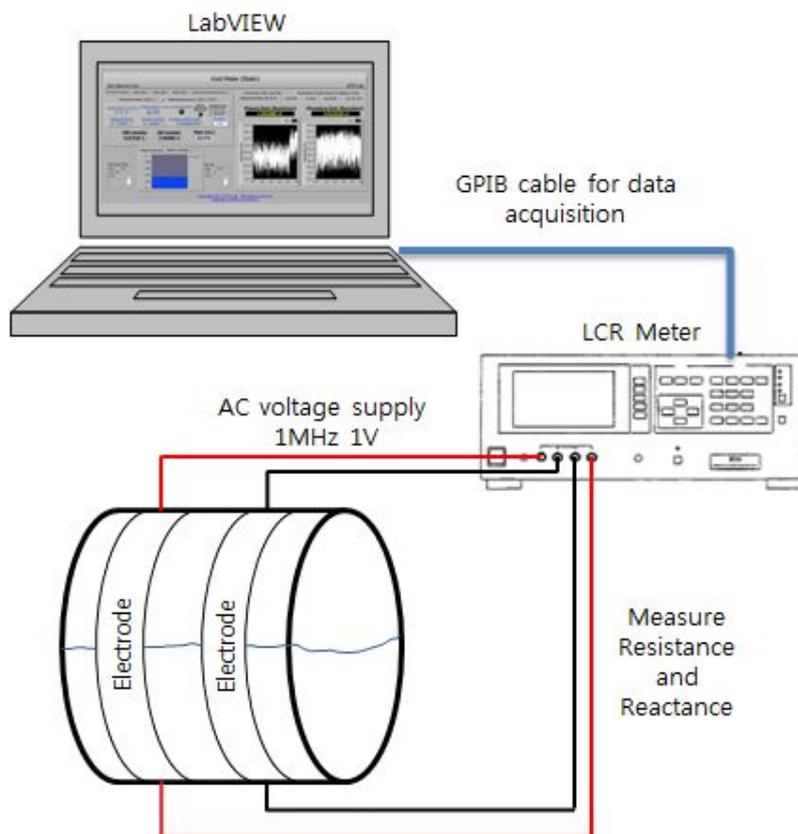


Fig. 21. Diagram of measurement system

1) 제작 센서

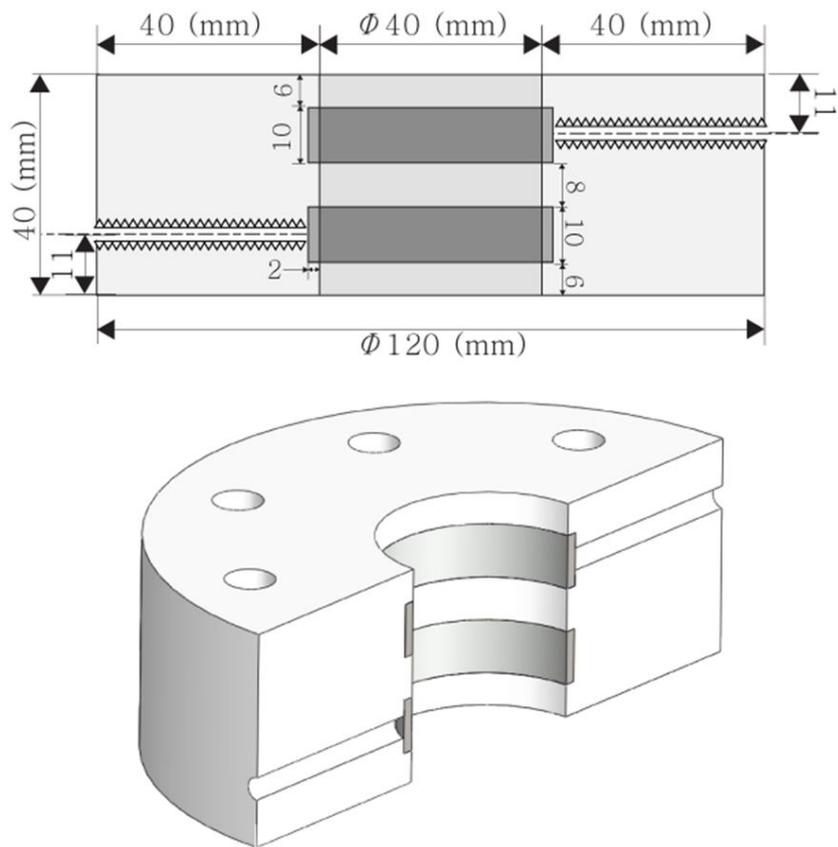


Fig. 22. Production drawing of ring-type impedance sensor

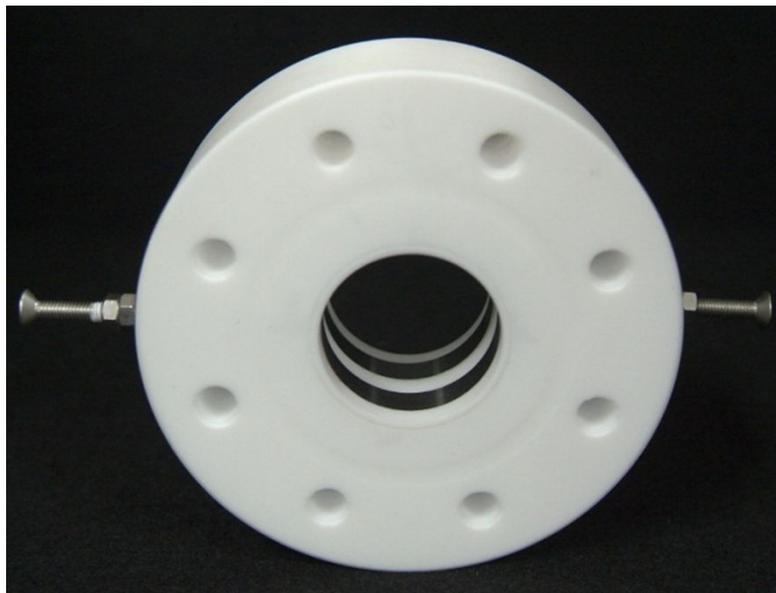


Fig. 23. Picture of the ring-type impedance sensor

결정 구조에 따라 실제 센서의 몸체에 해당하는 간극은 내열, 내한성이 우수하며, 내약품성, 전기 절연성 등이 우수한 테프론(PTFE) 봉을 이용하여 가공하였고, 전극은 부식에 강한 스테인레스 파이프(SUS 304)를 이용하여 제작하였다. 수평 물-공기 이상유동 설비의 플랜지 외경은 120mm 이고, 유로 내경은 40mm, 센서 삽입부의 폭은 40mm 이다. 따라서 설비 플랜지 외경과 동일한 120mm 규격의 테프론 봉을 이용하여 내경 44mm로 가공하고 유동장 교란이 발생하지 않도록 내경 40mm, 두께 2mm, 폭 10mm로 스테인레스 파이프를 가공하여 테프론 블록과 결합 하였다. 전극을 통해 전압 인가와 전기 신호 취득을 위해 링 전극과 수직이 되도록 테프론 블록에 나사 탭 가공을 하여 스테인레스 볼트를 체결하였다. Fig. 22는 제작 센서의 도면이고, Fig. 23은 제작센서의 실제 모습을 보여준다.

2) 측정 프로그램

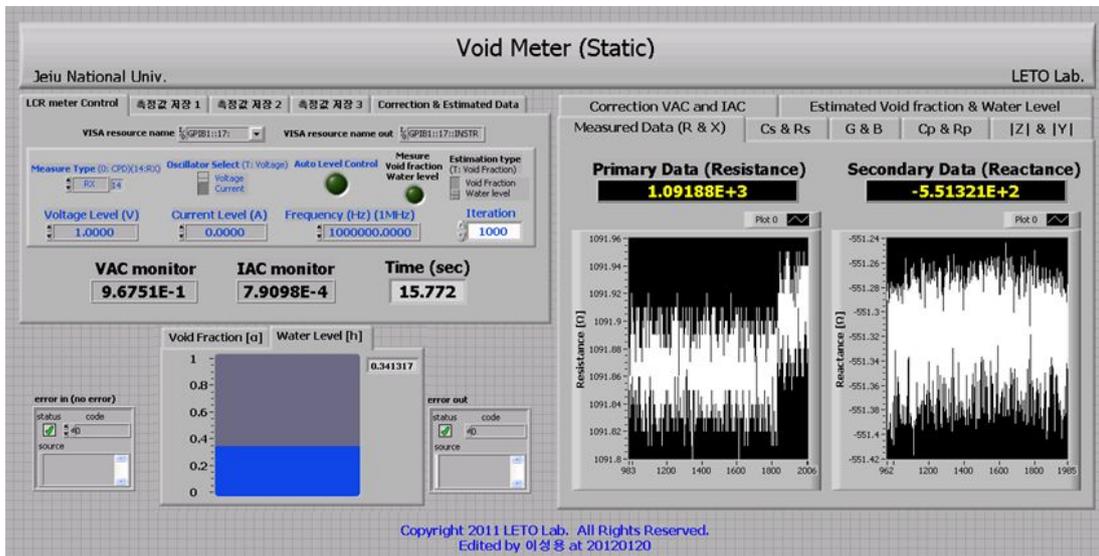


Fig. 24. Control and measurement program

센서에 교류 전압을 인가하고 전기신호를 취득하기 위해 LabVIEW를 통해 LCR meter를 제어 할 수 있도록 프로그래밍 하였다. LabVIEW는 National Instruments사에서 개발한 프로그래밍 언어로 공학과 과학 분야의 전반적인 어플리케이션에서 응용할 수 있고, 텍스트 타입 프로그래밍 언어로 코딩 하는 방식이 아닌 시각적 프로그래밍 언어인 G 코드를 이용하여 프로그램 제작 및 사용이 간편한 프로그래밍 언어이다.

LCR meter를 통해 측정되는 전기적 특성 값은 임피던스의 실수부인 레지스턴스와 허수부인 리액턴스이다. 이 두 가지 값과 인가전압의 특성을 알고 있으면 RLC 회로 이론에 의해 절대 임피던스(absolute impedance), 커패시턴스(capacitance), 컨덕턴스(conductance), 인덕턴스(inductance), 어드미턴스(admittance) 등을 도출 할 수 있다. 현 시스템에서는 일반적으로 임피던스 센서 측정에 이용되는 전기적 특성인 레지스턴스, 리액턴스, 절대 전류(absolute

current), 절대 임피던스, 커패시턴스를 측정 할 수 있도록 프로그래밍 하였다. 레지스턴스와 리액턴스는 앞서 설명한 바와 같이 계측기에서 취득하는 값이다.

절대 임피던스(absolute impedance)는 식(14)와 같이 계산된다.

$$|Z|[\Omega] = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (14)$$

여기서, $R[\Omega]$ 과 $X[\Omega]$ 는 LCR meter를 통해 직접 측정되는 레지스턴스(resistance)와 리액턴스(reactance) 성분이다.

절대 전류(absolute current)는 다음 식(15)와 같이 계산된다.

$$|I|[A] = \frac{|V|}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{|V|}{|Z|} \quad (15)$$

여기서, $|V|[V]$ 는 센서를 통해 인가된 전압 절대치이고 $|Z|[\Omega]$ 는 식(14)를 통해 계산된 절대 임피던스이다.

커패시턴스(capacitance)는 다음 식(16)을 통해 계산된다.

$$C[F] = -\frac{1}{2\pi f X} \quad (16)$$

여기서, $f[Hz]$ 는 인가한 전압의 주파수이며 $X[\Omega]$ 는 리액턴스로 LCR meter를 통해 측정되는 값이다.

Fig. 24는 실제 측정 프로그램의 인터페이스를 보여준다.

2. 검증 실험

수치 계산을 통해 얻은 전기 신호와 수위와의 상관관계를 실제 임피던스 센서의 참조값으로 활용하기 위해서는 검증 실험이 필요하다. 따라서 수치계산 결과와 정적 실험을 통해 비교 검증하였다.

1) 실험 조건

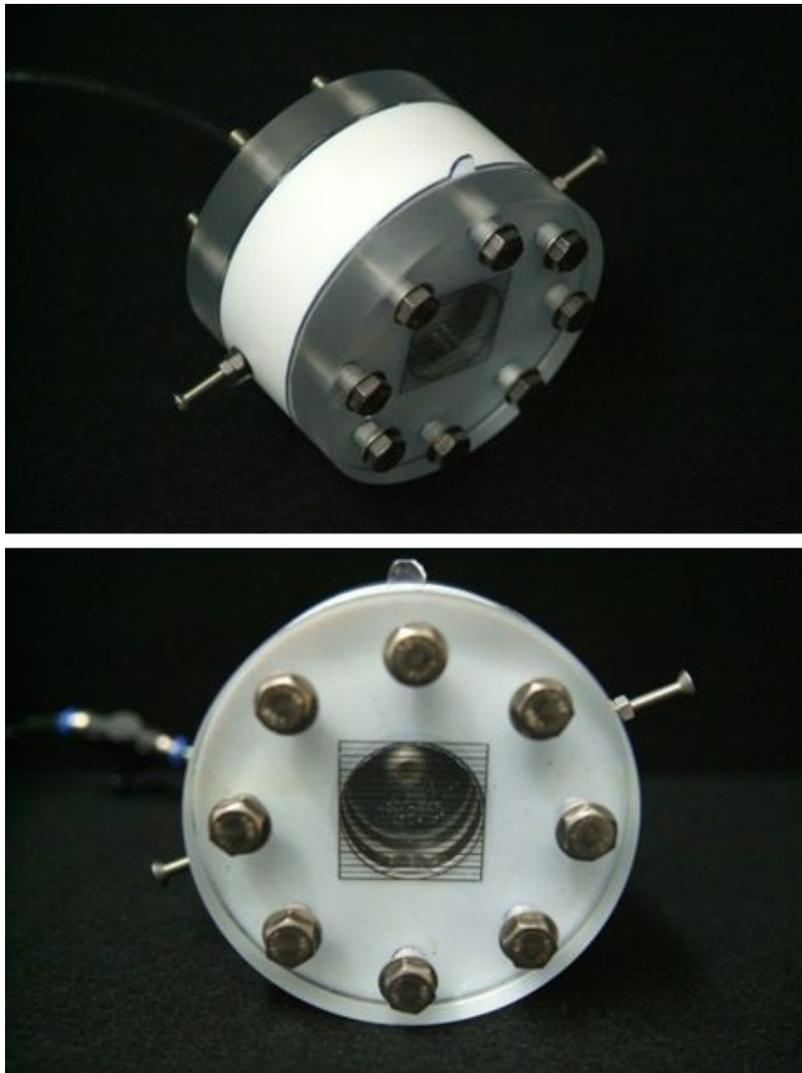


Fig. 25. Static experiments for stratified smooth flow

제작 센서 내에 수위를 형성하기 위하여 Fig. 25와 같이 덮개에 mm 단위의 눈금을 안쪽 면에 부착하고 센서와 결합하였다. 덮개 한쪽에는 물을 주입할 수 있도록 주입구를 부착 하였고 실제 수위에 해당하는 물의 양을 전자저울을 통해 계량하고 주사기를 이용하여 센서 내로 주입하였다. 눈금을 통해 적정 수위가 형성 되었는지 재확인 하였다.

정적 실험은 다음 조건하에 수행하였다.

- ① 물의 온도 : 23.5 ℃
- ② 인가전압 : 1 V
- ③ 주파수 : 1MHz
- ④ 반복측정 : 100회
- ⑤ 실험횟수 : 5회

2) 실험 결과

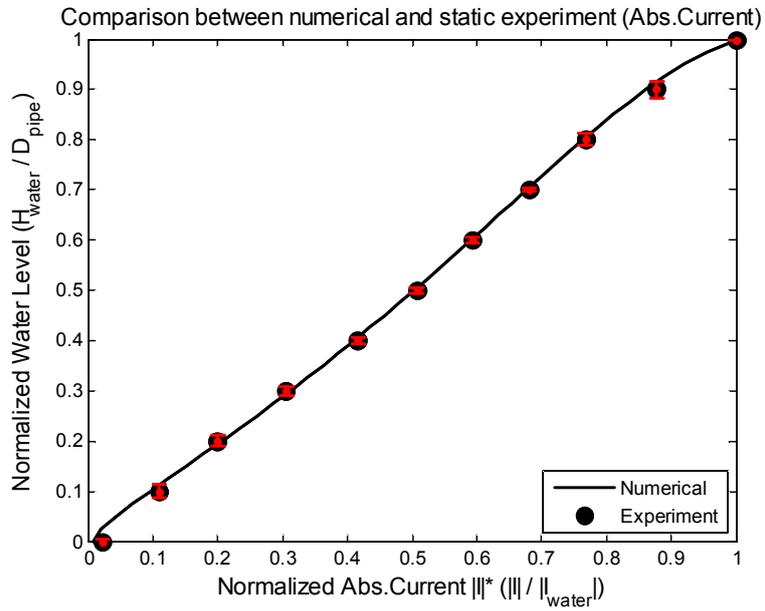


Fig. 26. Comparison between numerical and static experiment (absolute current)

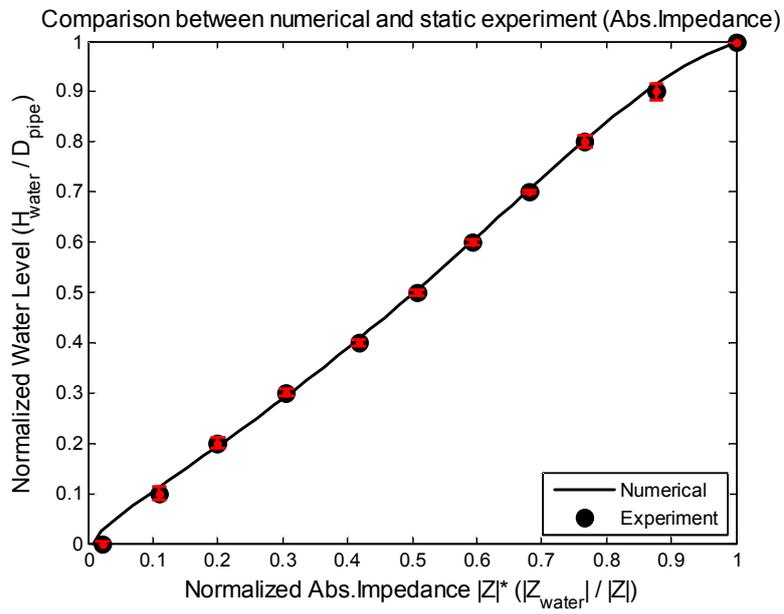


Fig. 27. Comparison between numerical and static experiment (absolute impedance)

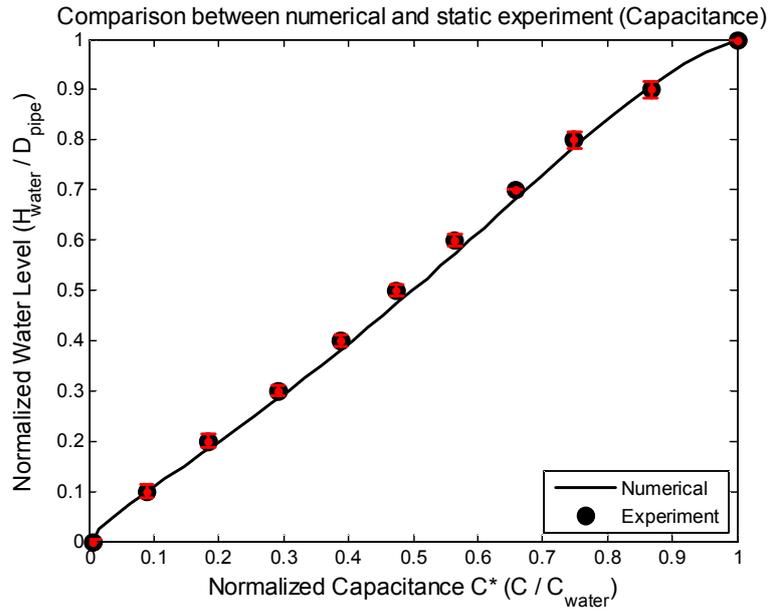


Fig. 28. Comparison between numerical and static experiment (capacitance)

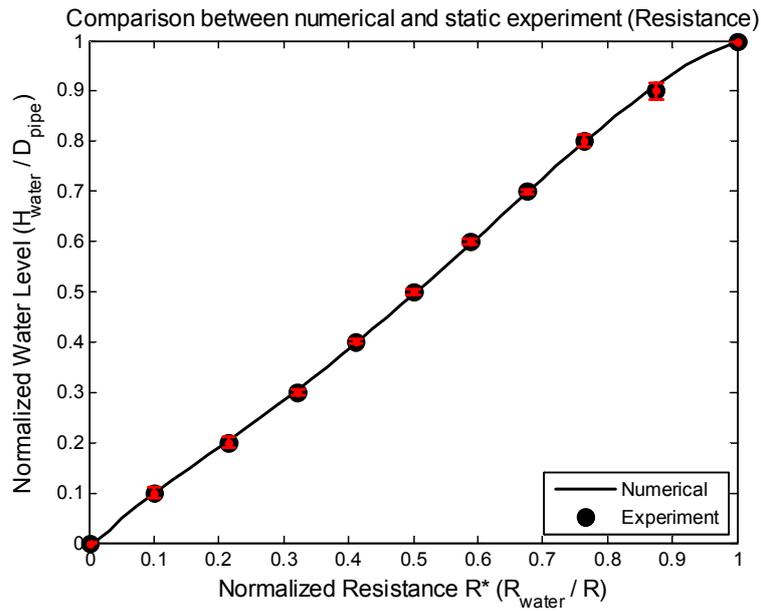


Fig. 29. Comparison between numerical and static experiment (resistance)

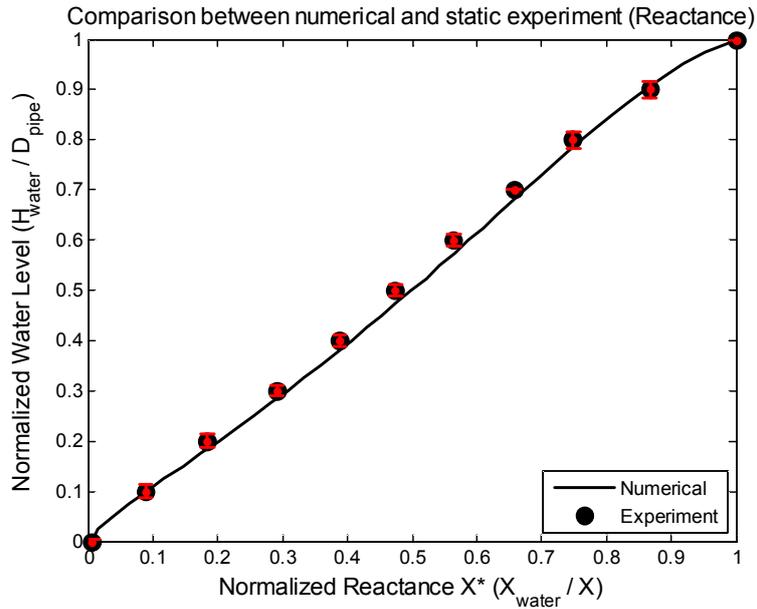


Fig. 30. Comparison between numerical and static experiment (reactance)

Fig. 26 부터 Fig. 30은 수치계산 결과와 정적실험 결과의 비교 그래프이다. 위의 그래프에서 실선은 수치계산을 통해 얻은 수위와 전기신호의 상관관계 결과이고 원형 포인트는 정적 실험을 통해 얻은 결과이다. 반복 및 실험횟수에 대한 오차는 빨간색 에러 바로 나타내었다. X축은 무차원화 전기신호이고, Y축은 무차원화 수위이다.

절대 전류 및 절대 임피던스 결과의 수위 오차는 평균 ± 0.008 , 커패시턴스는 ± 0.013 , 레지스턴스 ± 0.004 , 리액턴스 ± 0.013 의 수위 오차로 전체 평균 ± 0.009 의 수위 오차로 잘 일치함을 보였다. 이들 결과 중 커패시턴스와 리액턴스는 전체적으로 수치계산 결과 보다 약간 작은 전기 신호가 측정됨을 보인다. 그 이유는 리액턴스는 주변 환경에 영향을 많이 받는 신호로서 주변에 자기장 또는 도체 및 전해질 물질 등이 있을 경우 신호 변화가 생긴다. 예를 들어 실험 측정 중 센서

주변에 손을 가까이 두어도 신호의 변동이 생긴다. 이에 따라 커패시턴스는 리액턴스 값을 이용하여 계산되는 수치로 같은 영향을 받게 된다. 따라서 수치계산 결과와 오차를 보이는 이유는 센서와 덮개의 체결을 위해 사용된 스테인리스 볼트와 너트 그리고 LCR meter에서 방출되는 자기장의 영향으로 판단된다. 이러한 이유로 임피던스 센서 중 커패시턴스 신호를 이용하는 센서는 주변의 자기장 등 외부 노이즈가 실제 데이터를 취득하는 영역 내에 영향을 주지 않도록 센서 외부에 가드 전극을 부착하여 환경적인 영향을 줄이도록 설계하기도 한다.

IV. 수평 유로 적용 실증 실험

1. 수평 유로 설비

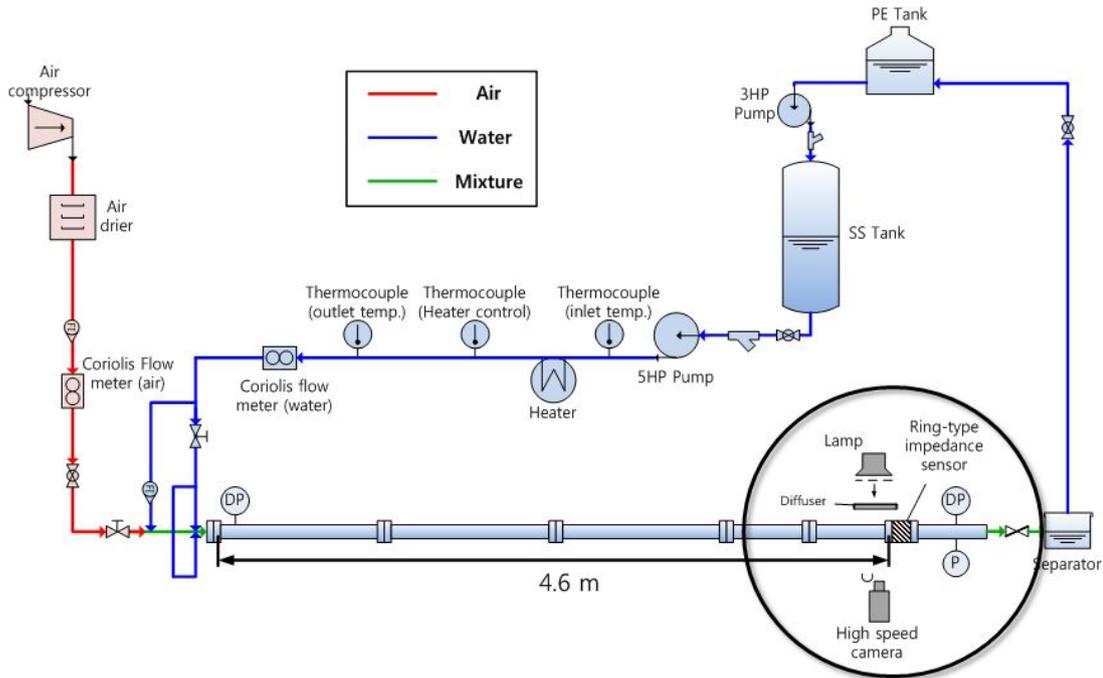


Fig. 31. Schematic of test facility

위의 Fig. 31은 수평 물-공기 이상 유동 실험 설비의 개략도이다. 파란색의 화살표는 물 주입 영역 설비이며, 빨간색 화살표는 공기, 그리고 녹색 화살표는 혼합유체 영역을 의미한다. 물은 주 탱크로부터 5마력 펌프와 히터를 거쳐 코리올리스 질량유량계와 밸브의 조절을 통해 원하는 유속으로 주입되고, 공기는 공기 압축기로부터 드라이어를 거쳐 수분이 제거되어 코리올리스 질량유량계와 밸브의 조절을 통해 원하는 유속 조건으로 주입된다. 이 두 유체는 혼합기의 허니콤(honeycomb)과 다공성 파이프(porous pipe)를 통해 혼합되어 테스트 섹션에

주입 된다. 테스트 섹션을 지난 두 유체는 기-액 분리기(separator)를 통해 분리
가 되어 공기는 외부로 유출 되고 물은 다시 보조탱크로 회수 된다. 테스트 섹션
은 내경 40mm, 두께 10mm의 아크릴 파이프로 구성되어 있다. 아래 Fig. 32는
실제 수평 테스트 섹션의 모습을 보여준다.



Fig. 32. Test section

2. 고속카메라

수평 물-공기 이상 유동 실험 설비에 센서를 체결하고 센서를 통해 측정되는 수위와 실제 형성되는 수위를 판별하기 위해 고속카메라를 이용하였다. 사용된 고속카메라는 일본 Phtron 사의 Fastcam SA4 모델로 기본 1024×1024 px 해상도로 3600 fps의 속도로 촬영 할 수 있고 최대 500,000 fps 속도로 촬영이 가능하다. Fig. 33은 고속카메라의 모습을 보여준다. 이외에 1kW의 조명과 shadow 촬영을 하기 위해 확산판이 사용되었다. 보통 일반적인 영상 촬영을 하기 위해서는 조명을 카메라가 촬영하는 방향과 동일하게 위치 시켜야 하지만 파이프 표면과 유체 표면에서 난반사가 발생하여 실제 유동을 가시화하는데 어려움이 있다. Shadow 촬영 기법을 이용하면 두 유체의 경계면에 그림자가 형성됨으로 유동을 가시화 할 수 있어 일반적인 유동 가시화에 사용되는 기법이다. Shadow 촬영을 위해 조명, 확산판, 테스트 섹션, 고속카메라 순으로 배치하였다. 이에 대한 배치는 Fig. 31의 검정색 원으로 표시된 부분과 같다.



Fig. 33. High-speed camera

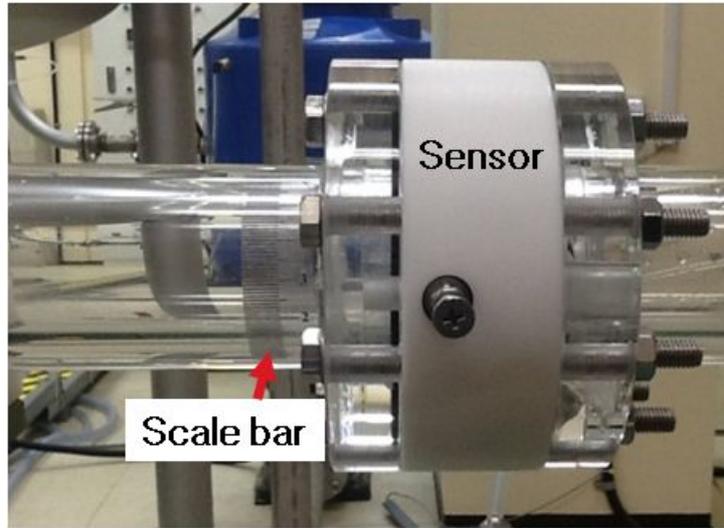


Fig. 34. Scale bar attached for water level readings

고속카메라를 이용하여 수위 관별을 하기 위해 눈금자를 부착 하였다. 이 눈금자는 원형 파이프 곡률에 의한 굴절 오차를 최소화하기 위해 Fig. 34에 보이는 바와 같이 관 내벽에 부착 하였다. 또한, 센서 측정과 고속카메라 촬영 위치를 최대한 동일한 위치에 두기 위해 고속카메라 촬영 위치는 센서 바로 앞에서 촬영을 하였다.

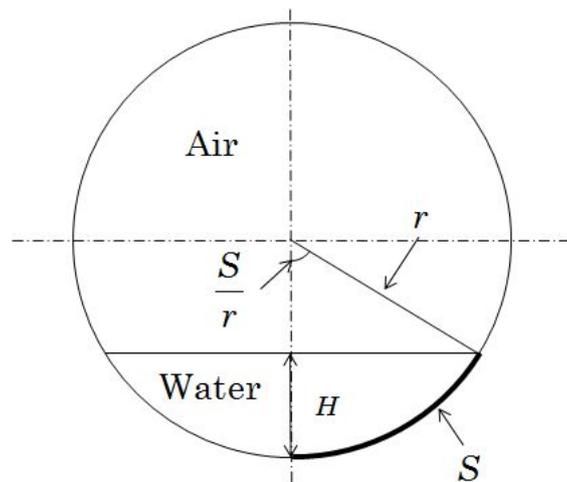


Fig. 35. Water level measurement of the stratified flow using high-speed camera

원형관내 성층류의 형상은 Fig. 35와 같다. 따라서 수위의 반호 길이에 해당하는 S 를 원형관 내벽에 부착된 눈금을 통해 읽게 되면 실제 수위 H 는 삼각함수의 형태로 표현을 할 수 있다. 따라서 실제수위는 다음 식(17)을 이용해 산출할 수 있다.

$$H = r \left[1 - \cos \left(\frac{S}{r} \right) \right] \quad (17)$$

여기서, H 는 실제 수위이며, r 은 Test section의 반경, S 는 눈금자를 통해 읽은 수위의 반호 길이이다. 이 실제 수위를 위에서 언급한 식(8)을 통해 무차원화 하였다. 사용한 눈금자의 최소길이는 1mm이기 때문에 눈금오차는 0.5mm 이다. 그러나 이 눈금자를 통해 읽는 길이는 수위에 대한 반호 길이이므로 수위에 따라서 눈금오차에 대한 영향이 변화하게 된다. 이에 대한 오차는 Fig. 36의 그래프와 같다.

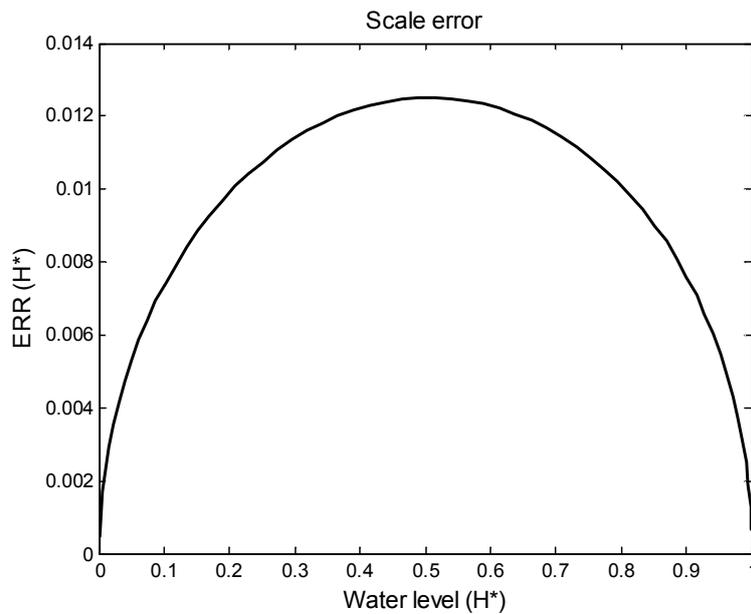


Fig. 36. Scale error

3. 실증 실험

1) 실험 조건

검증 실험을 통해 수치계산 결과의 타당성을 검증하였으므로 실제 수평 물-공기 이상 유동 실험 설비에 적용하여 실험 하였다. 완전 발달을 고려 하여 Fig. 31과 같이 유체 주입구로부터 약 4.6m 떨어진 곳에 제작한 링 타입 임피던스 센서를 Test section에 체결 하였다. 센서를 통한 수위 측정 시 인가전압 및 주파수는 정적 실험과 동일한 조건이다. 아래 보이는 그림은 실제 센서가 체결된 모습을 보여 준다.

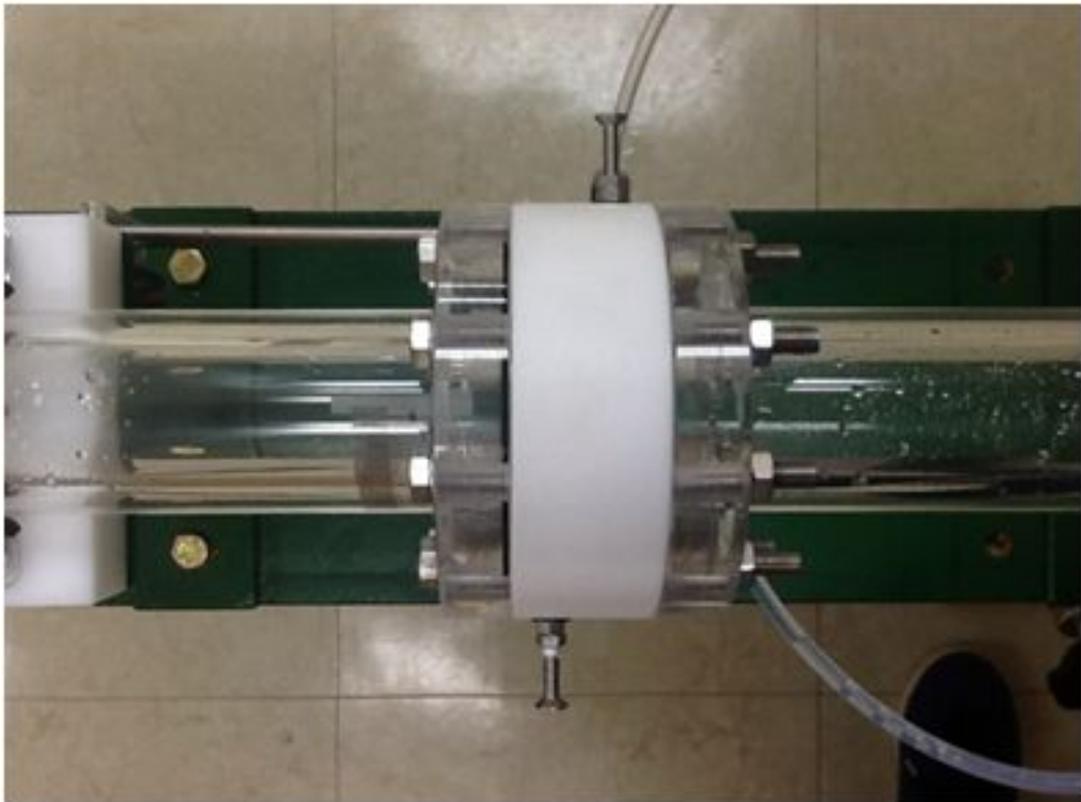


Fig. 37. Ring-type sensor installed in test section

이전 연구[Mandhane et al., 1974]에 의하면 파형류(stratified wavy flow) 포함 성층류 영역은 겉보기 속도(superficial velocity)가 각각 기체는 약 21.34 m/s 이하, 액체는 약 0.15 m/s 이하의 영역에서 형성된다고 알려져 있다. 이 결과는 아래 Fig. 38에 유체 겉보기 속도 좌표계에 따른 유동양식 선도로서 나타나 있다. 이 그래프는 약 5935번의 실험 데이터를 이용하여 작성된 결과로 관 내경이 12.7~165.1mm 인 수평 유로에 적용이 가능하다. 따라서 본 연구에 이용된 수평 물-공기 이상 유동 설비는 관 내경이 40mm 이므로 Fig. 38 유동 양식 선도를 기준으로 실험 가능한 조건하에 수행 하였다. 이 조건은 간헐류 발생 시 워터 해머 등으로 인한 기-액 분리기(separator) 파손 및 안정성 등을 고려하여 물의 겉보기 속도는 0.1 m/s 이내, 공기의 겉보기 속도는 10 m/s 이내의 조건에서 실험 하였다.

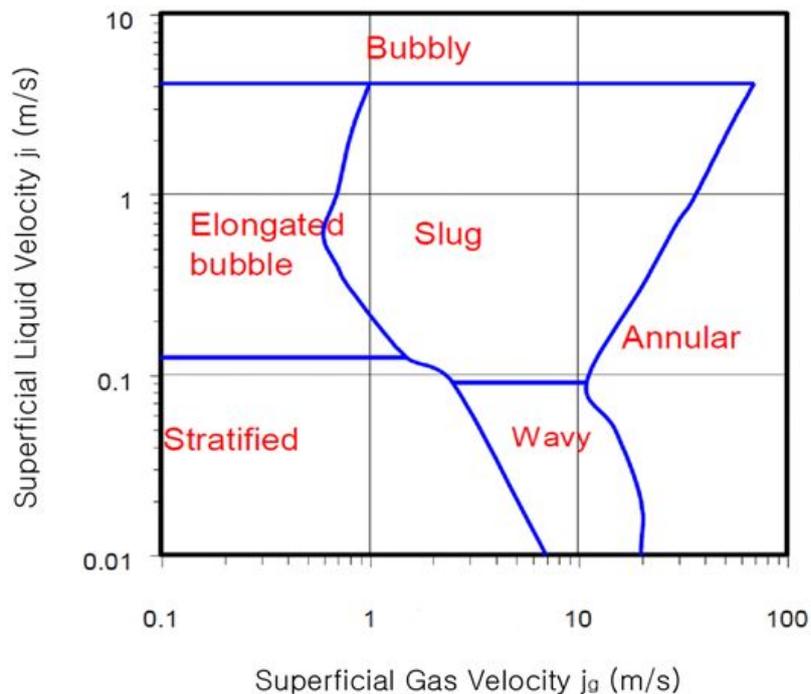


Fig. 38. Horizontal flow regime map [Mandhane et al., 1974]

2) 실험 결과

아래 보이는 표 Table 8~10은 실제 물-공기 이상 유동 실험 설비에 제작한 센서를 적용 하여 실험한 결과로서 표 상단에는 유체의 결보기 속도로 j_l 은 물, j_g 는 공기의 결보기 속도를 나타내고, 중간에 있는 사진은 고속카메라를 이용하여 성층류를 가시화한 영상이며, 영상 옆의 S라고 명시된 수치는 눈금을 통해 읽은 수위의 반호 길이이다. 이 길이를 앞서 설명한 식(17)에 대입하여 실제 수위를 판단하게 된다. Smooth flow의 경우 시간에 따라서 수위가 변동하지 않으나, wavy flow의 경우 계면이 불안정 하여 계면에 표면파가 발생하기 때문에 센서 신호가 취득되는 동일 시간대의 촬영 영상 프레임을 추출 후 평균하여 수위를 산출하였다. 표 하단 영역은 고속카메라와 제작 센서를 통해 측정된 수위 결과로 이전에 설명한 바와 같이 0 부터 1사이 값을 갖는 무차원화 수위(normalized water level)로 나타내었다. 여기서 High-speed camera는 고속카메라 촬영을 통해 얻은 수위 판별 결과와 오차를 나타내었고, Sensor 영역에서 $|I|$, $|Z|$, C , R , X 의 영역은 무차원화 전기 신호를 이용하여 수위를 측정된 결과 및 합성 표준 불확도로서 순서대로 절대 전류, 절대 임피던스, 커패시턴스, 레지스턴스, 리액턴스 신호를 통해 측정된 수위 결과를 나타낸다.

센서 측정 및 고속카메라 가시화 측정 각각의 합성 표준 불확도(combined standard uncertainty)는 다음과 같이 표현된다.

- 링 타입 임피던스 센서 무차원화 수위 측정 합성 표준 불확도

$$u_{c_{Sensor}} = \sqrt{(c u_{SM})^2 + (c u_{LCR})^2} \quad (18)$$

$$u_{SM} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (H_i^* - \bar{H}^*)^2} \quad (19)$$

$$u_{LCR} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (H_i^* \times accuracy_{LCR})^2} \quad (20)$$

- 고속카메라 무차원화 수위 측정 합성 표준 불확도

$$u_{Camera} = \sqrt{(c u_{CM})^2 + (c u_{Scale})^2} \quad (21)$$

$$u_{CM} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (H_i^* - \overline{H^*})^2} \quad (22)$$

$$u_{Scale} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (H_i^*_{Scale})^2} \quad (23)$$

$$H_i^*_{Scale} = \frac{1}{D} \left[r \left\{ 1 - \cos \left(\frac{S_i + S_{Scale}}{r} \right) \right\} - r \left\{ 1 - \cos \left(\frac{S_i}{r} \right) \right\} \right] \quad (24)$$

여기서 u_{Camera} 와 u_{Sensor} 는 센서 및 고속카메라의 합성 표준 불확도이며, u_{SM} 은 센서 측정을 통해 얻은 무차원화 수위 표준 불확도, u_{LCR} 은 LCR meter의 정확도 (accuracy)에 의한 무차원화 수위 표준 불확도를 나타낸다. u_{CM} 은 고속카메라 가시화 측정을 통해 얻은 무차원화 수위 표준 불확도, u_{Scale} 은 고속카메라 가시화 측정에 이용된 눈금자에 의한 무차원화 수위 표준 불확도를 나타낸다. $H_i^*_{Scale}$ 는 각각의 프레임의 눈금오차에 의한 무차원화 수위 오차이다. c 는 감도계수 (sensitivity coefficient)로 $c = \partial H^* / \partial H = 0.25$ 이며, 하첨자 i 는 각각의 센서 측정 신호 및 측정 신호 시간대와 동일한 시간대의 프레임을 추출 판별한 무차원화 수위를 의미한다. $\overline{H^*}$ 는 측정을 통해 얻은 평균 무차원화 수위이고, H_i^* 는 각각의 측정값의 무차원화 수위를 나타낸다. $accuracy_{LCR}$ 는 LCR meter의 정확도로 1MHz 주파수 영역에서 0.0005이다. D 와 r 은 파이프 내경 및 반경을 나타내고, S_i 는 앞서 언급한 바와 같이 센서 측정 신호의 시간대와 동일한 시간대의 각각의

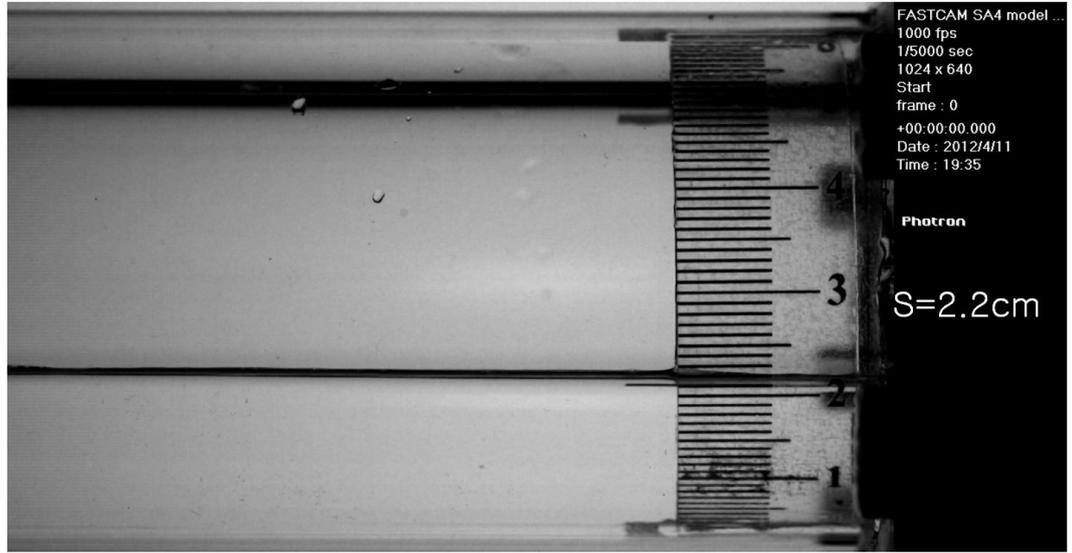
프레임의 눈금을 통해 읽은 호 길이를 의미한다. S_{Scale} 은 파이프 내벽에 부착된 눈금자의 눈금오차로 0.05cm 이다.

표 내 (a)부터 (h) 항목의 가시화 영상과 측정 결과를 보면 공기의 겉보기 속도가 증가 함에 따라 수위가 점차 낮아지고 파형류가 생성됨을 알 수 있고 파형류가 생성됨에 따라 측정오차 또한 증가함을 확인 할 수 있다. 그리고 Table 8부터 10의 가시화 영상을 보면 물의 겉보기 속도가 증가함에 따라 물의 수위도 높게 형성됨을 알 수 있다. 실험 결과로서 제작센서를 통해 측정된 수위 결과는 전류 및 절대 임피던스 신호를 통해 측정된 수위가 고속카메라 수위 결과와 대체적으로 잘 일치 하였고, 고속카메라와 센서를 통해 측정된 무차원화 수위의 차는 약 0.01 이하 이다.

Table 8. Comparison of water level measurement between high-speed camera and ring-type impedance sensor ($j_l = 0.03 \text{ m/s}$, $j_g = 0 \sim 8 \text{ m/s}$)

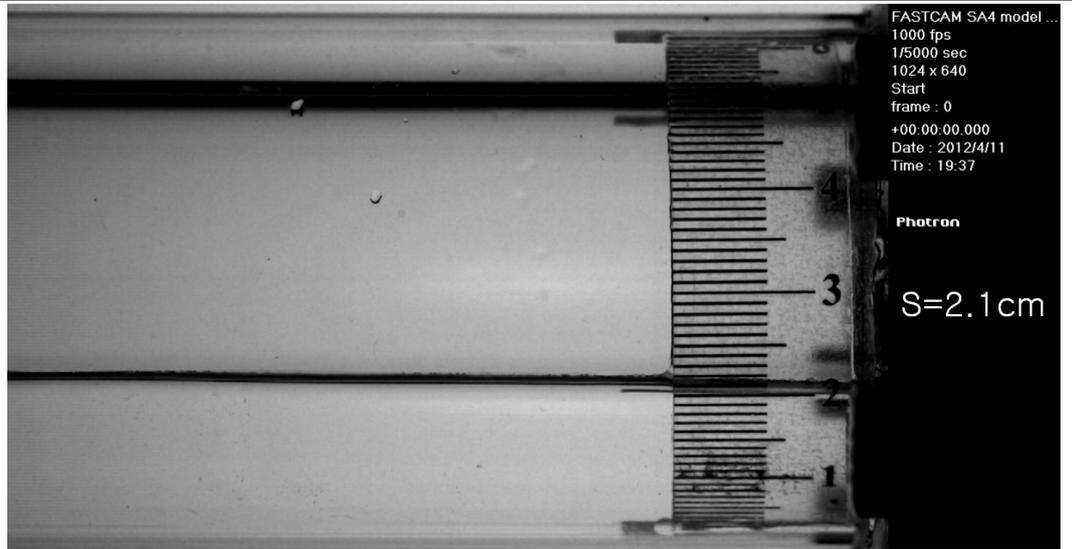
(a) $j_l = 0.03 \text{ m/s}$, $j_g = 0 \text{ m/s}$						
	High-speed camera	Sensor (Normalized signal)				
		$ I ^*$	$ Z ^*$	C^*	R^*	X^*
Normalized water level H^*	0.32 ± 0.000	0.32 ± 0.000	0.32 ± 0.000	0.29 ± 0.000	0.35 ± 0.000	0.29 ± 0.000
(b) $j_l = 0.03 \text{ m/s}$, $j_g = 0.5 \text{ m/s}$						
	High-speed camera	Sensor (Normalized signal)				
		$ I ^*$	$ Z ^*$	C^*	R^*	X^*
Normalized water level H^*	0.30 ± 0.000	0.31 ± 0.000	0.31 ± 0.000	0.28 ± 0.000	0.34 ± 0.000	0.28 ± 0.000

(c) $j_l = 0.03 \text{ m/s}$, $j_g = 1 \text{ m/s}$



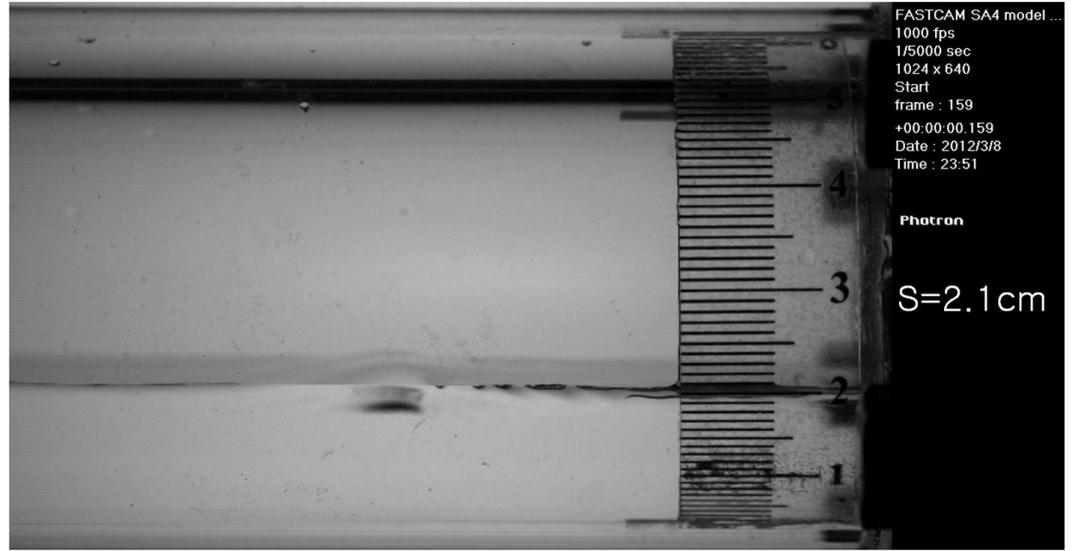
	High-speed camera	Sensor (Normalized signal)				
		$ I ^*$	$ Z ^*$	C^*	R^*	X^*
Normalized water level H^*	0.27 ± 0.000	0.27 ± 0.000	0.27 ± 0.000	0.24 ± 0.000	0.3 ± 0.000	0.24 ± 0.000

(d) $j_l = 0.03 \text{ m/s}$, $j_g = 1.5 \text{ m/s}$



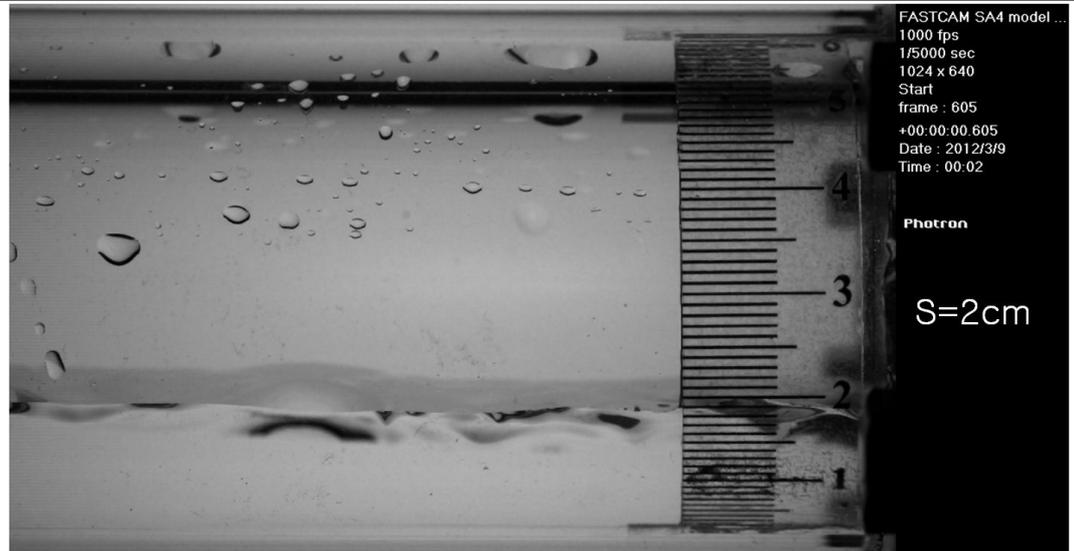
	High-speed camera	Sensor (Normalized signal)				
		$ I ^*$	$ Z ^*$	C^*	R^*	X^*
Normalized water level H^*	0.25 ± 0.001	0.25 ± 0.001	0.25 ± 0.001	0.23 ± 0.001	0.28 ± 0.001	0.23 ± 0.001

(e) $j_l = 0.03 \text{ m/s}$, $j_g = 2 \text{ m/s}$



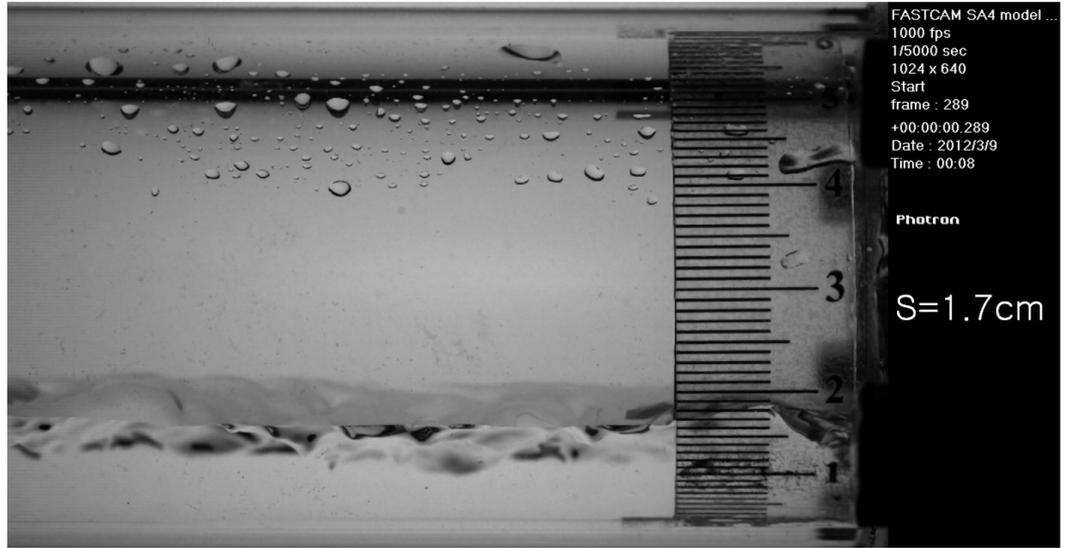
	High-speed camera	Sensor (Normalized signal)				
		$ I ^*$	$ Z ^*$	C^*	R^*	X^*
Normalized water level H^*	0.25 ± 0.003	0.26 ± 0.003	0.26 ± 0.003	0.23 ± 0.002	0.29 ± 0.003	0.23 ± 0.002

(f) $j_l = 0.03 \text{ m/s}$, $j_g = 4 \text{ m/s}$



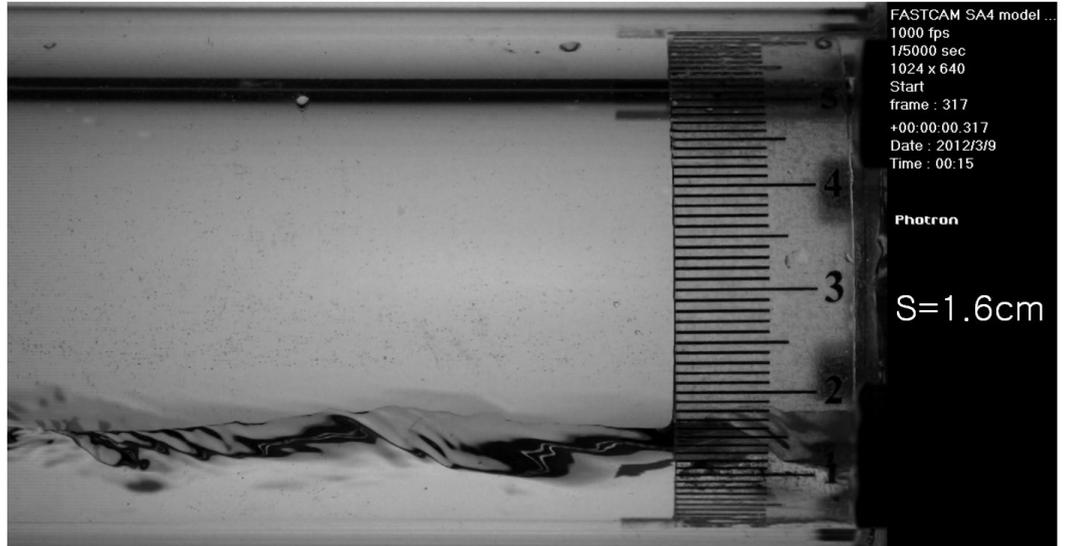
	High-speed camera	Sensor (Normalized signal)				
		$ I ^*$	$ Z ^*$	C^*	R^*	X^*
Normalized water level H^*	0.23 ± 0.003	0.25 ± 0.002	0.24 ± 0.002	0.22 ± 0.004	0.27 ± 0.002	0.22 ± 0.002

(g) $j_l = 0.03 \text{ m/s}$, $j_g = 6 \text{ m/s}$



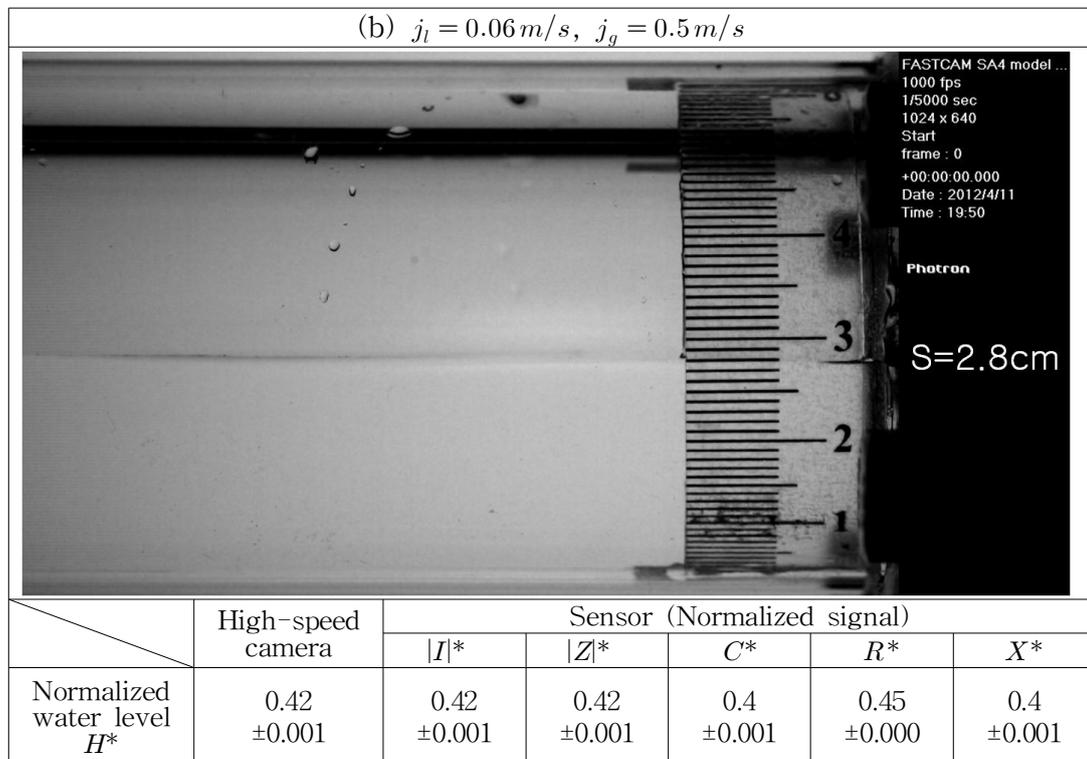
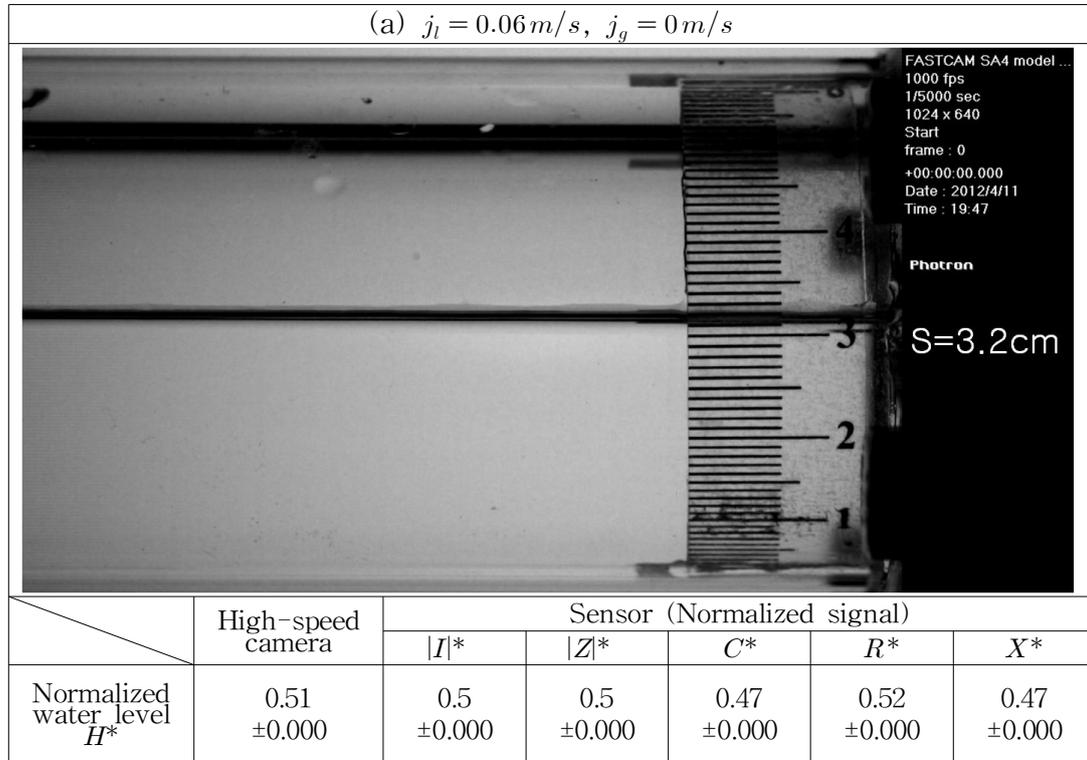
	High-speed camera	Sensor (Normalized signal)				
		$ I ^*$	$ Z ^*$	C^*	R^*	X^*
Normalized water level H^*	0.17 ± 0.003	0.18 ± 0.04	0.18 ± 0.004	0.15 ± 0.004	0.21 ± 0.004	0.15 ± 0.004

(h) $j_l = 0.03 \text{ m/s}$, $j_g = 8 \text{ m/s}$

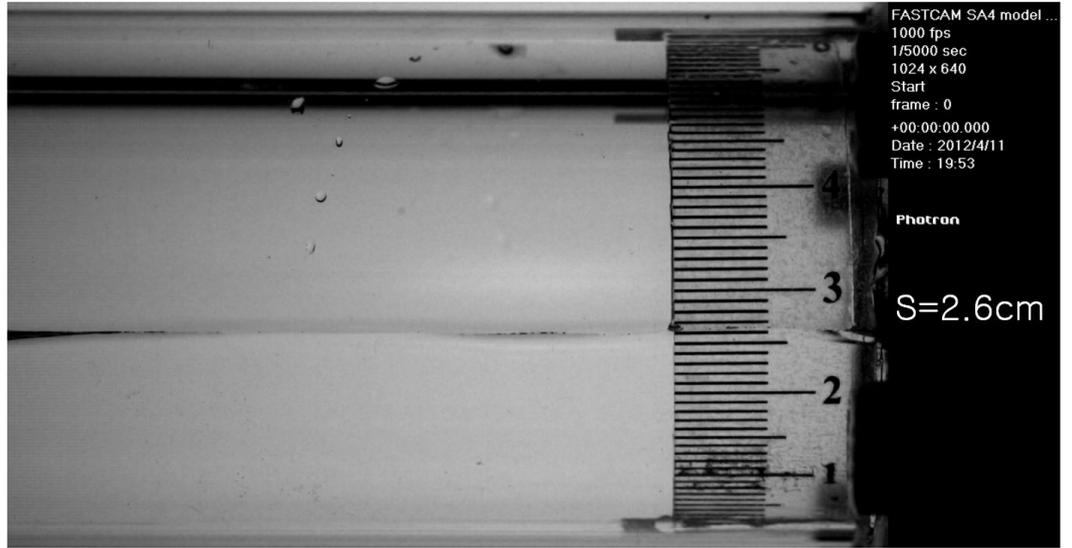


	High-speed camera	Sensor (Normalized signal)				
		$ I ^*$	$ Z ^*$	C^*	R^*	X^*
Normalized water level H^*	0.15 ± 0.009	0.15 ± 0.003	0.14 ± 0.003	0.12 ± 0.003	0.18 ± 0.003	0.12 ± 0.003

Table 9. Comparison of water level measurement between high-speed camera and ring-type impedance sensor ($j_l = 0.06 \text{ m/s}$, $j_g = 0 \sim 8 \text{ m/s}$)

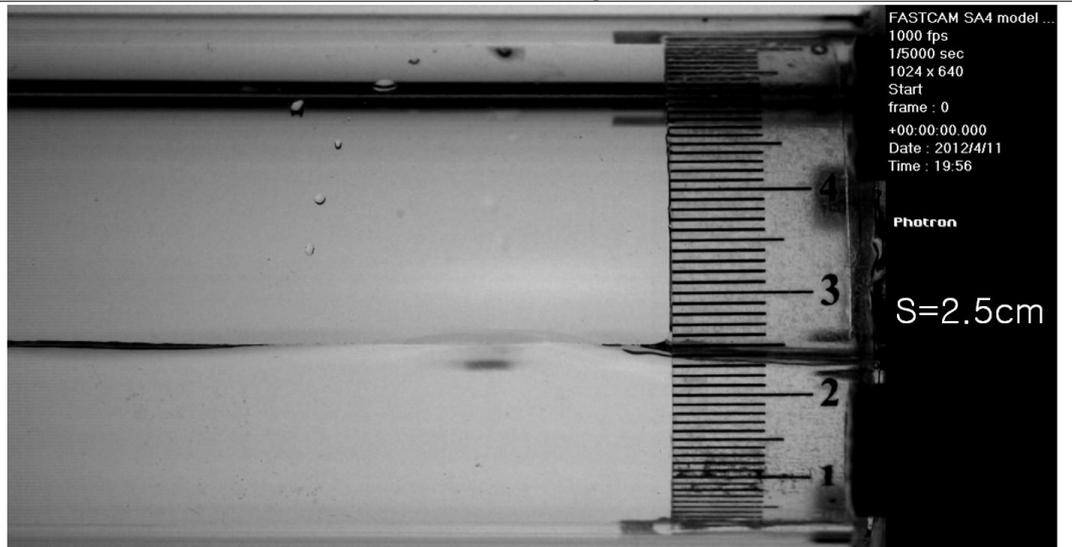


(c) $j_l = 0.06 \text{ m/s}$, $j_g = 1 \text{ m/s}$



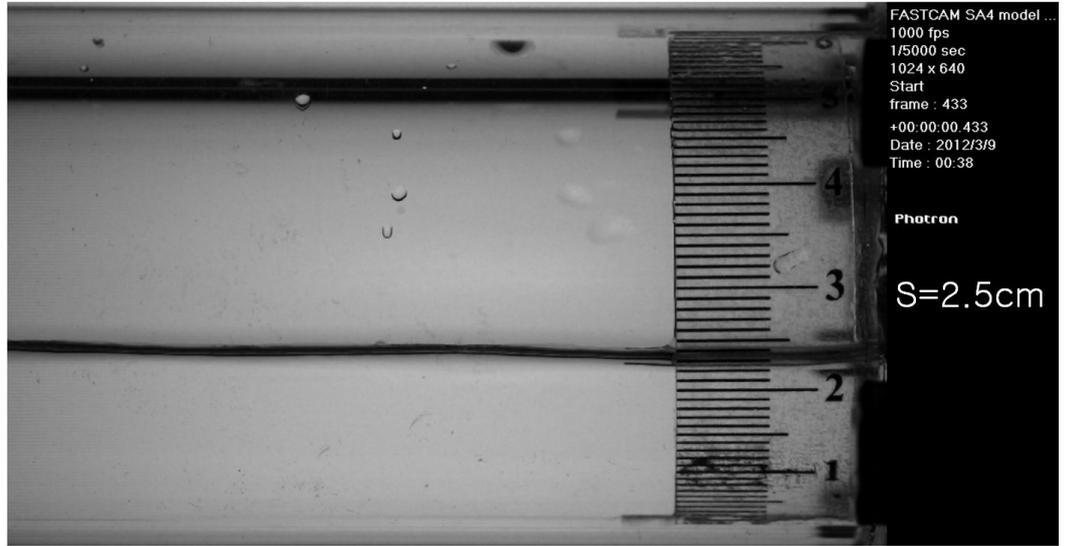
	High-speed camera	Sensor (Normalized signal)				
		$ I ^*$	$ Z ^*$	C^*	R^*	X^*
Normalized water level H^*	0.37 ± 0.002	0.36 ± 0.003	0.36 ± 0.003	0.34 ± 0.0003	0.38 ± 0.003	0.34 ± 0.003

(d) $j_l = 0.06 \text{ m/s}$, $j_g = 1.5 \text{ m/s}$



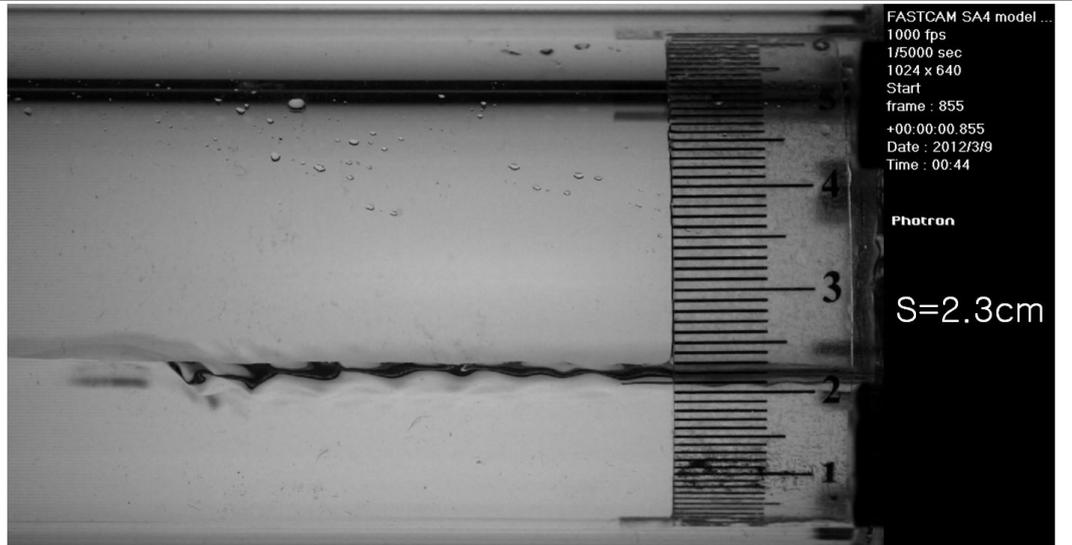
	High-speed camera	Sensor (Normalized signal)				
		$ I ^*$	$ Z ^*$	C^*	R^*	X^*
Normalized water level H^*	0.34 ± 0.003	0.34 ± 0.004	0.34 ± 0.004	0.31 ± 0.0104	0.36 ± 0.004	0.31 ± 0.004

(e) $j_l = 0.06 \text{ m/s}$, $j_g = 2 \text{ m/s}$



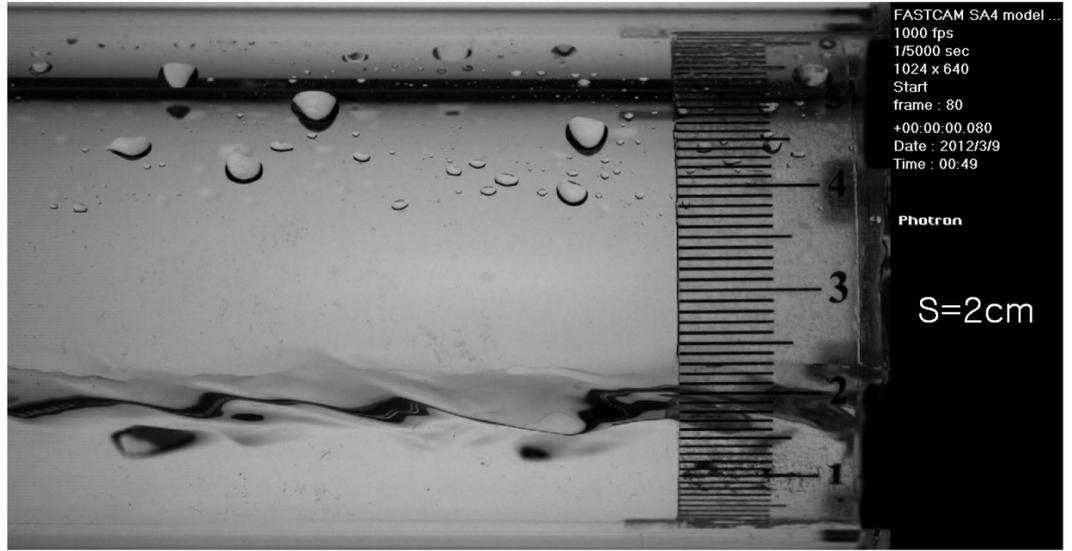
	High-speed camera	Sensor (Normalized signal)				
		$ I ^*$	$ Z ^*$	C^*	R^*	X^*
Normalized water level H^*	0.34 ± 0.004	0.34 ± 0.004	0.34 ± 0.004	0.31 ± 0.004	0.36 ± 0.004	0.31 ± 0.004

(f) $j_l = 0.06 \text{ m/s}$, $j_g = 4 \text{ m/s}$



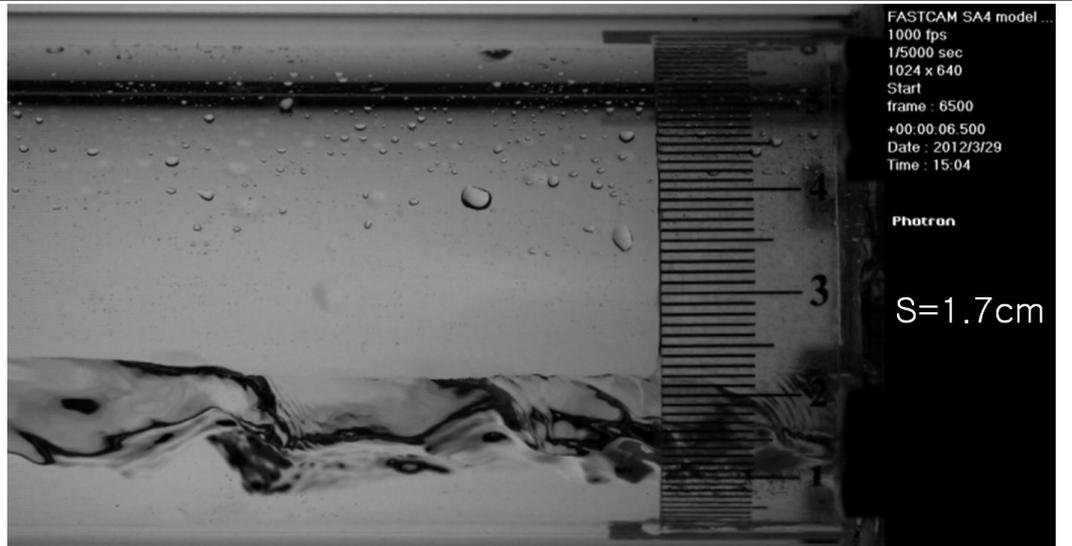
	High-speed camera	Sensor (Normalized signal)				
		$ I ^*$	$ Z ^*$	C^*	R^*	X^*
Normalized water level H^*	0.30 ± 0.004	0.3 ± 0.005	0.3 ± 0.005	0.28 ± 0.005	0.33 ± 0.006	0.28 ± 0.005

(g) $j_l = 0.06 \text{ m/s}$, $j_g = 6 \text{ m/s}$



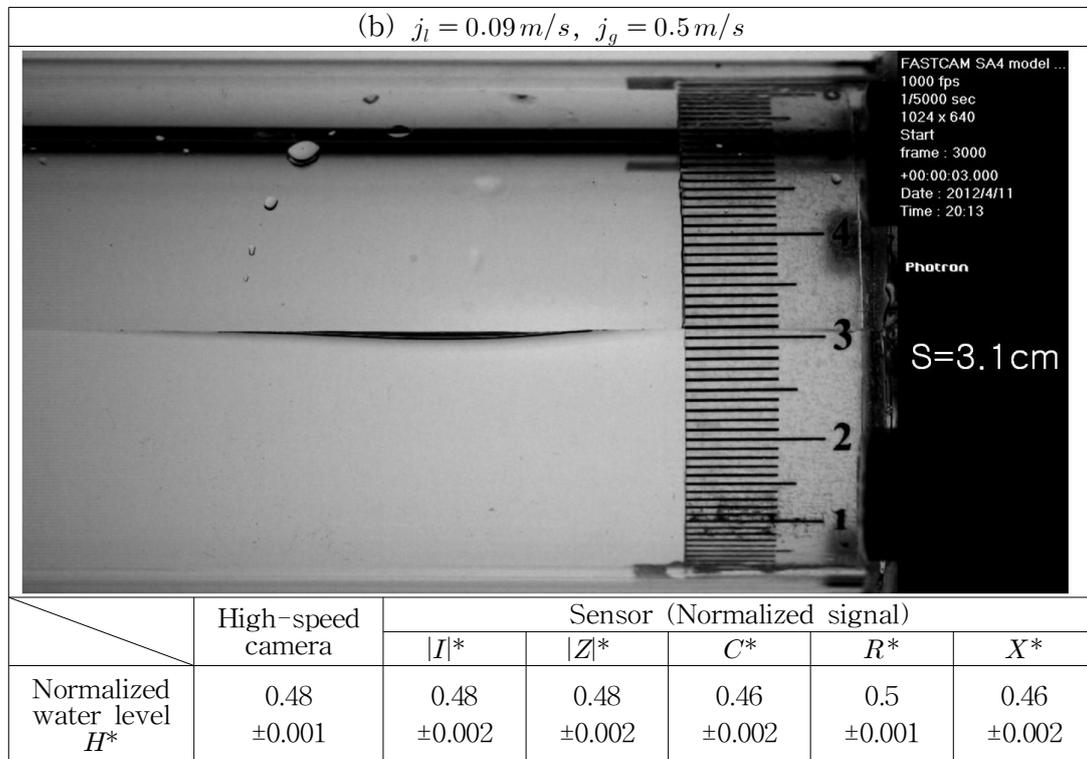
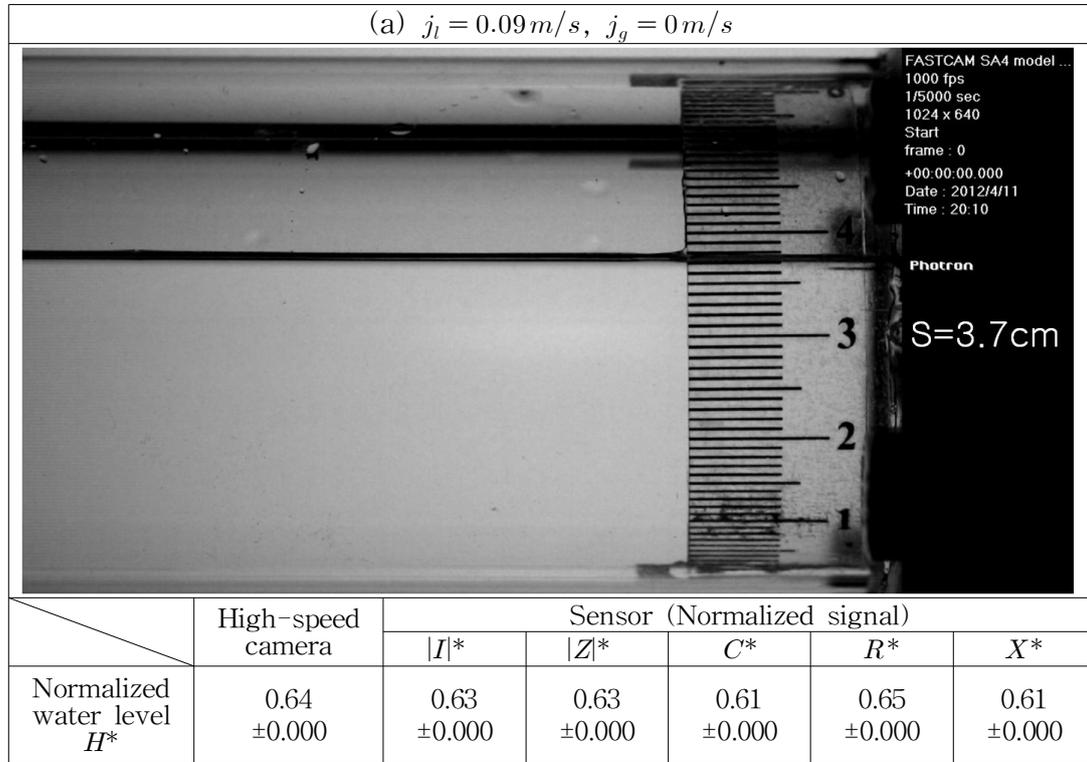
	High-speed camera	Sensor (Normalized signal)				
		$ I ^*$	$ Z ^*$	C^*	R^*	X^*
Normalized water level H^*	0.23 ± 0.003	0.23 ± 0.007	0.22 ± 0.008	0.2 ± 0.007	0.25 ± 0.007	0.2 ± 0.009

(h) $j_l = 0.06 \text{ m/s}$, $j_g = 8 \text{ m/s}$

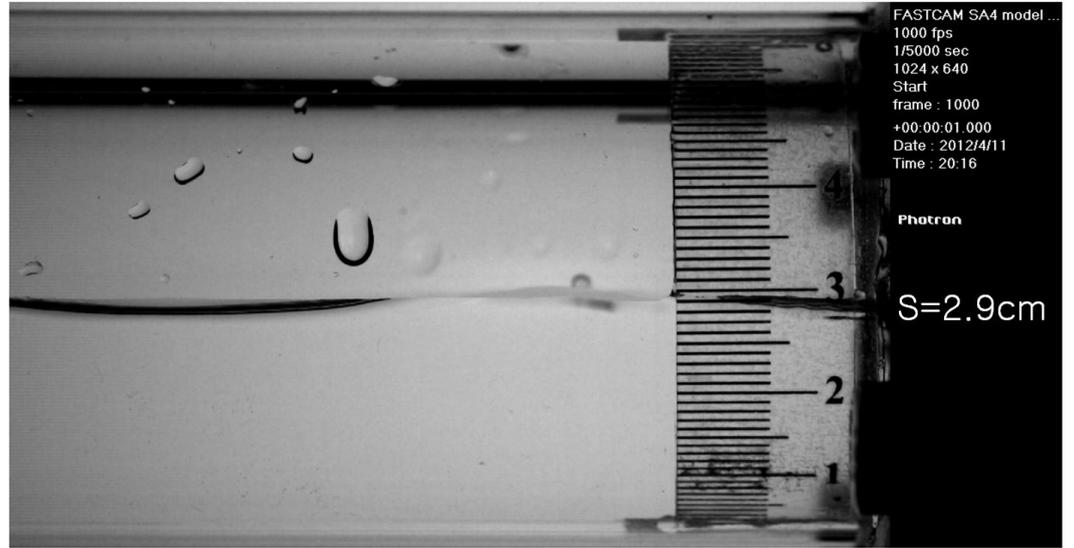


	High-speed camera	Sensor (Normalized signal)				
		$ I ^*$	$ Z ^*$	C^*	R^*	X^*
Normalized water level H^*	0.17 ± 0.009	0.17 ± 0.005	0.16 ± 0.005	0.15 ± 0.004	0.19 ± 0.004	0.14 ± 0.004

Table 10. Comparison of water level measurement between high-speed camera and ring-type impedance sensor ($j_l = 0.09\text{ m/s}$, $j_g = 0 \sim 8\text{ m/s}$)

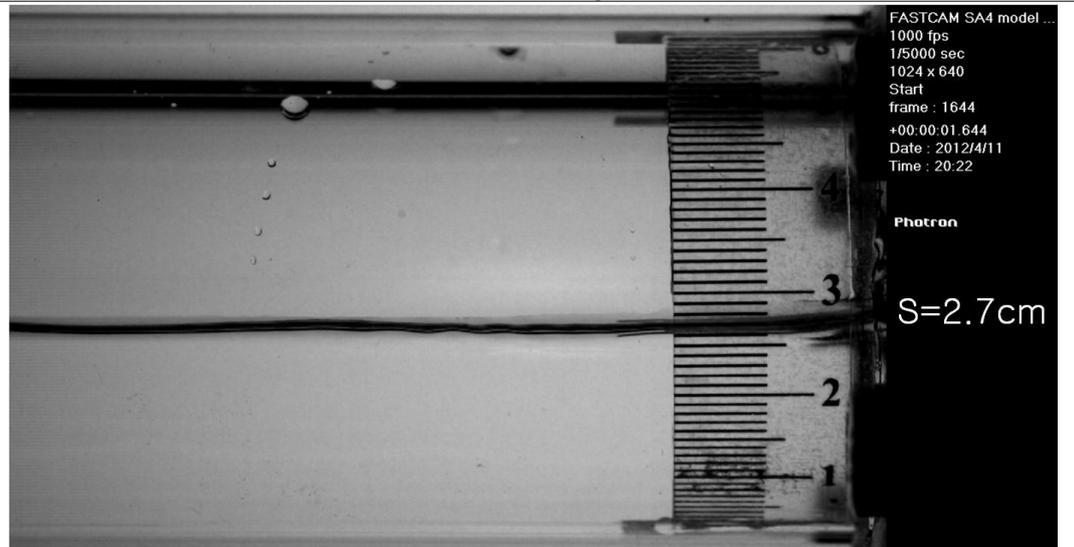


(c) $j_l = 0.09 \text{ m/s}$, $j_g = 1 \text{ m/s}$



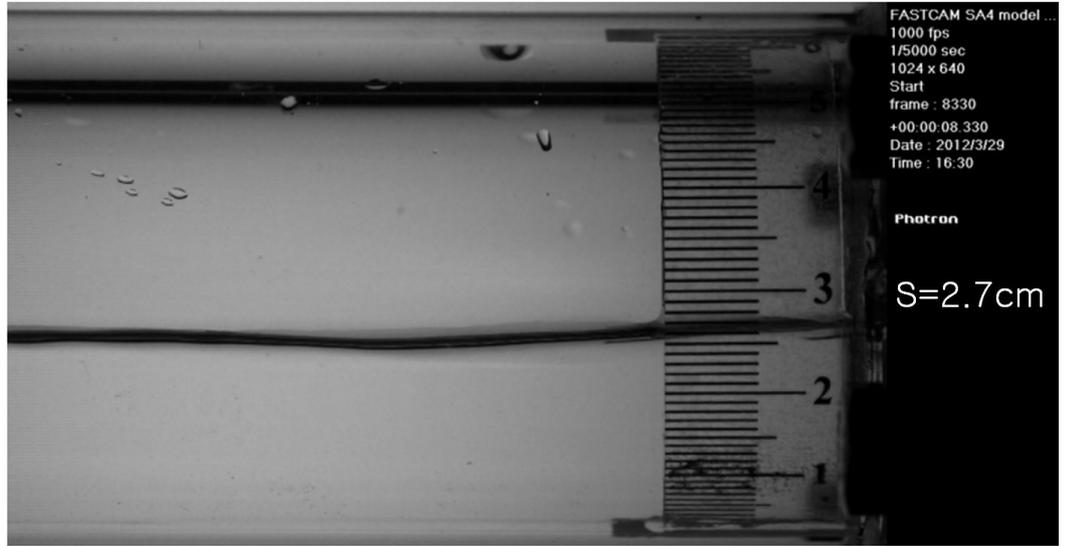
	High-speed camera	Sensor (Normalized signal)				
		$ I ^*$	$ Z ^*$	C^*	R^*	X^*
Normalized water level H^*	0.44 ± 0.005	0.44 ± 0.006	0.44 ± 0.006	0.41 ± 0.006	0.45 ± 0.005	0.41 ± 0.006

(d) $j_l = 0.09 \text{ m/s}$, $j_g = 1.5 \text{ m/s}$



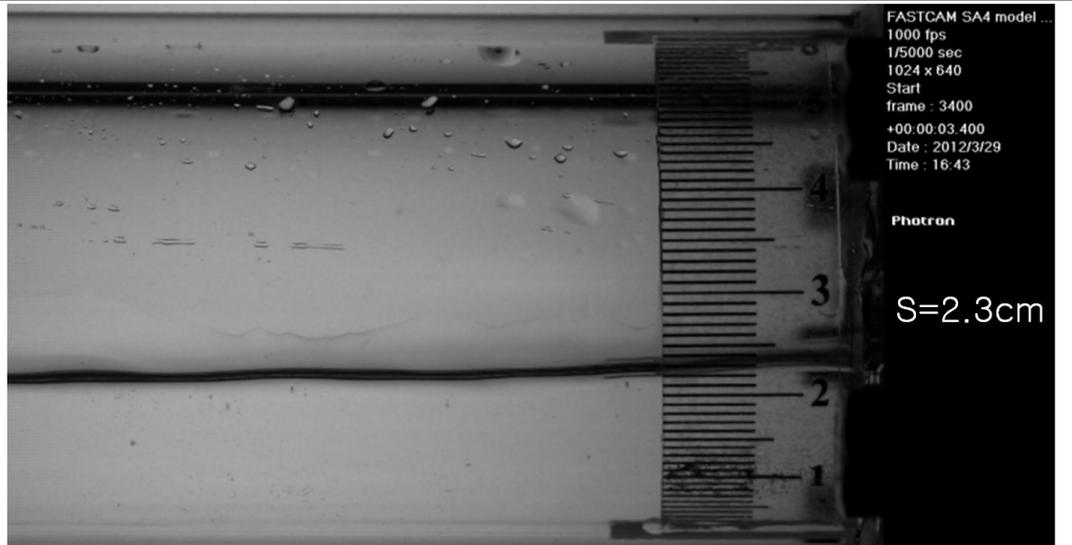
	High-speed camera	Sensor (Normalized signal)				
		$ I ^*$	$ Z ^*$	C^*	R^*	X^*
Normalized water level H^*	0.40 ± 0.007	0.40 ± 0.008	0.39 ± 0.007	0.37 ± 0.008	0.41 ± 0.007	0.37 ± 0.008

(e) $j_l = 0.09 \text{ m/s}$, $j_g = 2 \text{ m/s}$



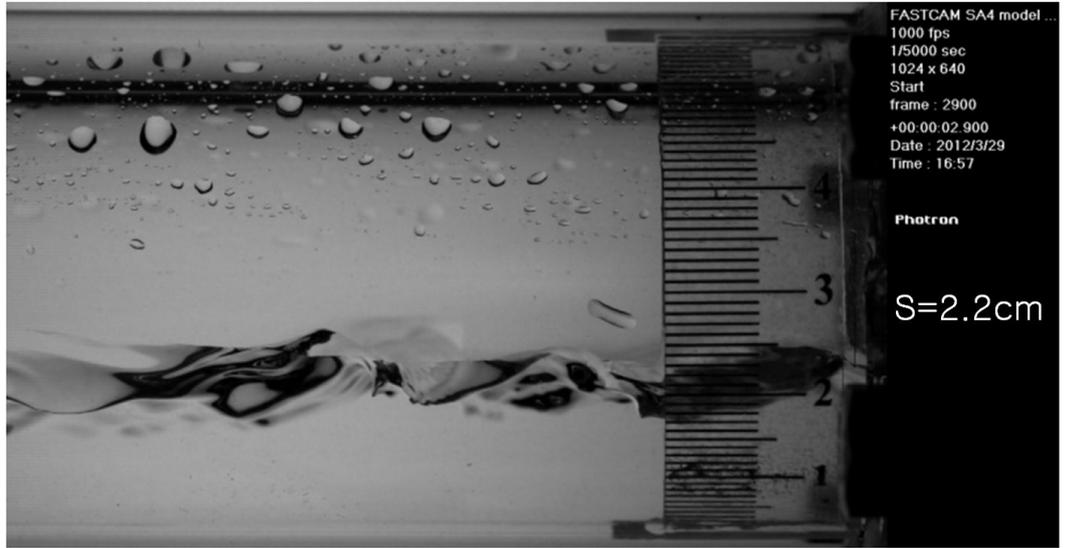
	High-speed camera	Sensor (Normalized signal)				
		$ I ^*$	$ Z ^*$	C^*	R^*	X^*
Normalized water level H^*	0.38 ± 0.008	0.39 ± 0.003	0.38 ± 0.003	0.38 ± 0.002	0.39 ± 0.003	0.38 ± 0.003

(f) $j_l = 0.09 \text{ m/s}$, $j_g = 4 \text{ m/s}$



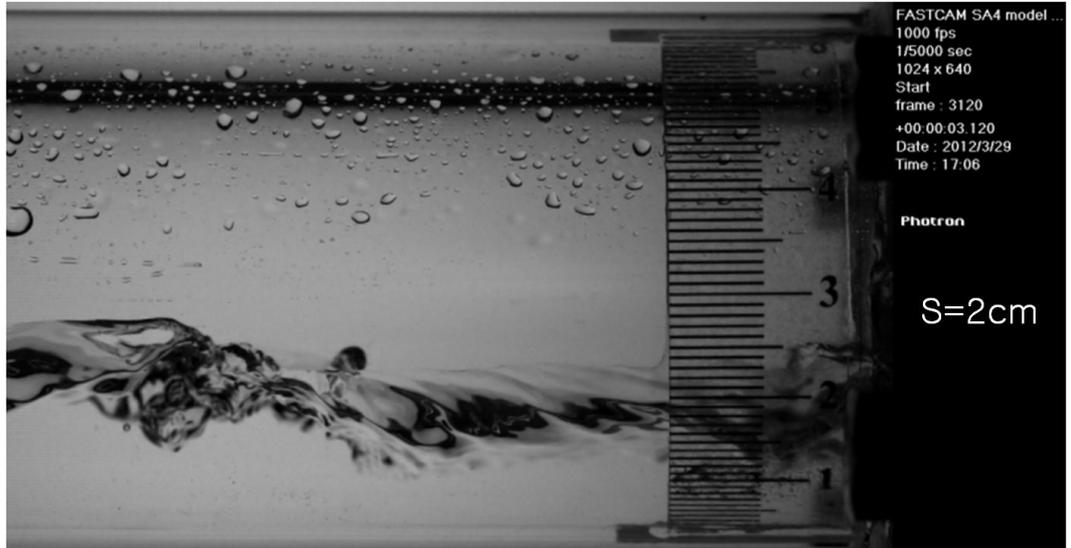
	High-speed camera	Sensor (Normalized signal)				
		$ I ^*$	$ Z ^*$	C^*	R^*	X^*
Normalized water level H^*	0.30 ± 0.012	0.3 ± 0.007	0.29 ± 0.007	0.29 ± 0.006	0.3 ± 0.007	0.28 ± 0.007

(g) $j_l = 0.09 \text{ m/s}$, $j_g = 6 \text{ m/s}$



	High-speed camera	Sensor (Normalized signal)				
		$ I ^*$	$ Z ^*$	C^*	R^*	X^*
Normalized water level H^*	0.27 ± 0.017	0.27 ± 0.010	0.26 ± 0.008	0.26 ± 0.008	0.27 ± 0.009	0.25 ± 0.012

(h) $j_l = 0.09 \text{ m/s}$, $j_g = 8 \text{ m/s}$



	High-speed camera	Sensor (Normalized signal)				
		$ I ^*$	$ Z ^*$	C^*	R^*	X^*
Normalized water level H^*	0.23 ± 0.014	0.23 ± 0.016	0.22 ± 0.016	0.22 ± 0.017	0.23 ± 0.012	0.2 ± 0.015

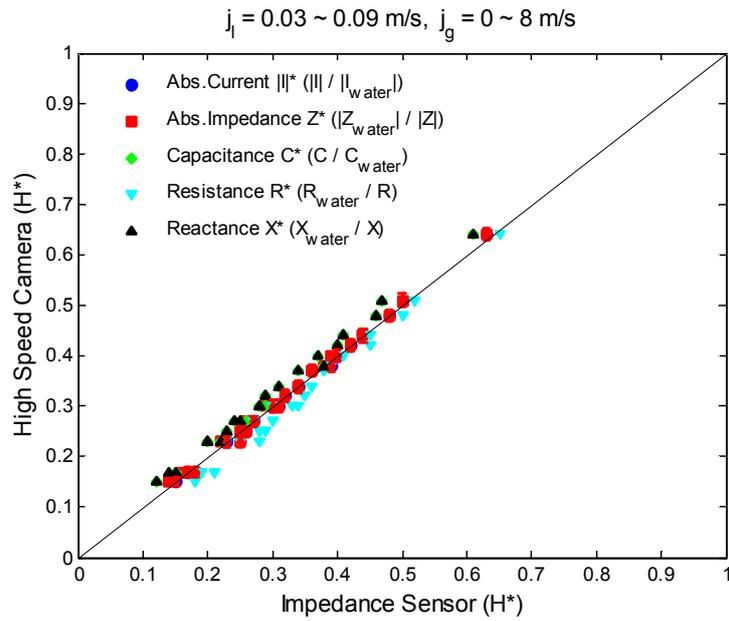


Fig. 39. Comparison of water level measurement between ring-type impedance sensor and high-speed camera

위에 보이는 Fig. 39는 표에 작성된 모든 결과를 그래프로 나타낸 것으로서 x축은 제작 센서를 통해 측정된 무차원화 수위이며 y축은 고속카메라 가시화를 통해 측정된 무차원화 수위이다. 대체적으로 잘 일치함을 볼 수 있다.

다음 Fig. 40~44는 각각의 전기 신호로 구분해 나타낸 그래프로 절대 전류와 절대 임피던스 신호 측정을 통해 판별한 수위 결과가 고속카메라 촬영을 통해 얻은 결과와 가장 잘 일치함을 알 수 있다. 여기서 오차막대는 앞서 설명한 고속카메라 가시화 측정과 센서 측정의 무차원화 수위 합성 표준 불확도를 나타낸다. 각 유동 조건에 따른 수위 측정 결과로서 공기의 겹보기 속도는 0~8m/s로 변화시키고, 물의 겹보기 속도가 0.03m/s 일 때 형성된 수위는 약 0.37부터 0.15로 공기 겹보기 속도가 증가함에 따라 감소함을 보였다. 물의 겹보기 속도가 0.06m/s 일 때는 0.51~0.17, 0.09m/s 일 때는 0.64~0.23으로 형성되었다. 이 결과 중 고속카메라와 차이를 보이는 신호는 정적 실험 부분에서 설명한 주변 계측기 및 조명등의 자기장과 도체 등에 의한 환경적 영향으로 판단된다.

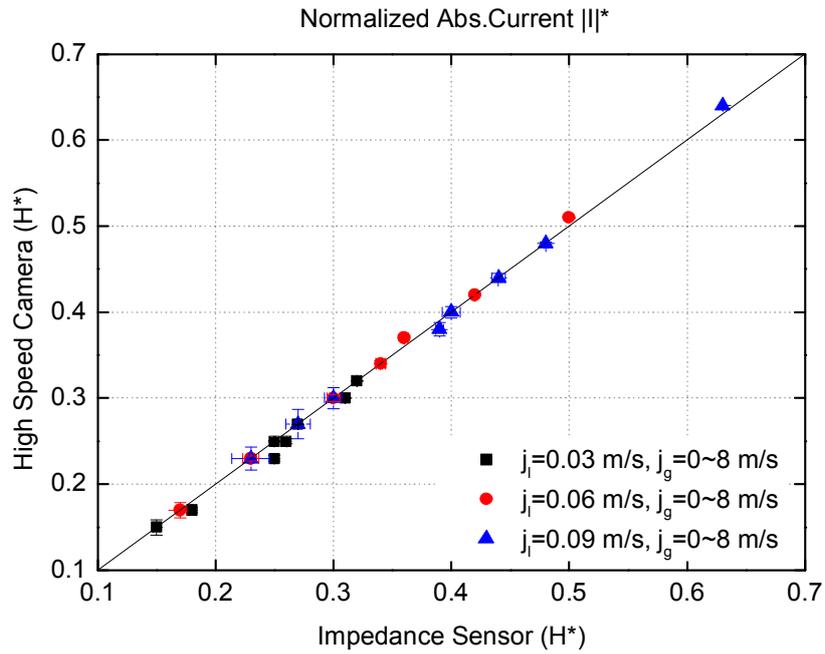


Fig. 40. Comparison of water level measurement between ring-type impedance sensor and high-speed camera (absolute current)

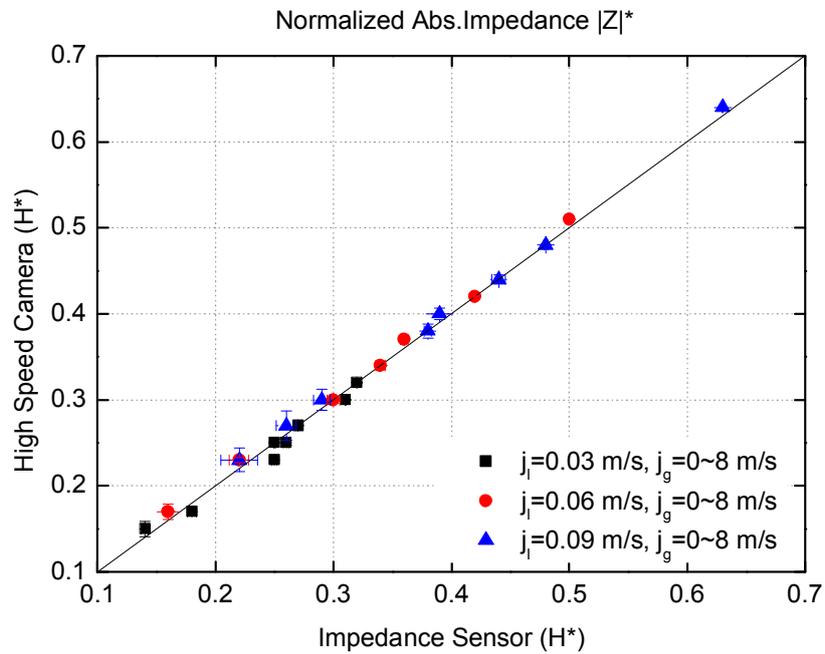


Fig. 41. Comparison of water level measurement between ring-type impedance sensor and high-speed camera (absolute impedance)

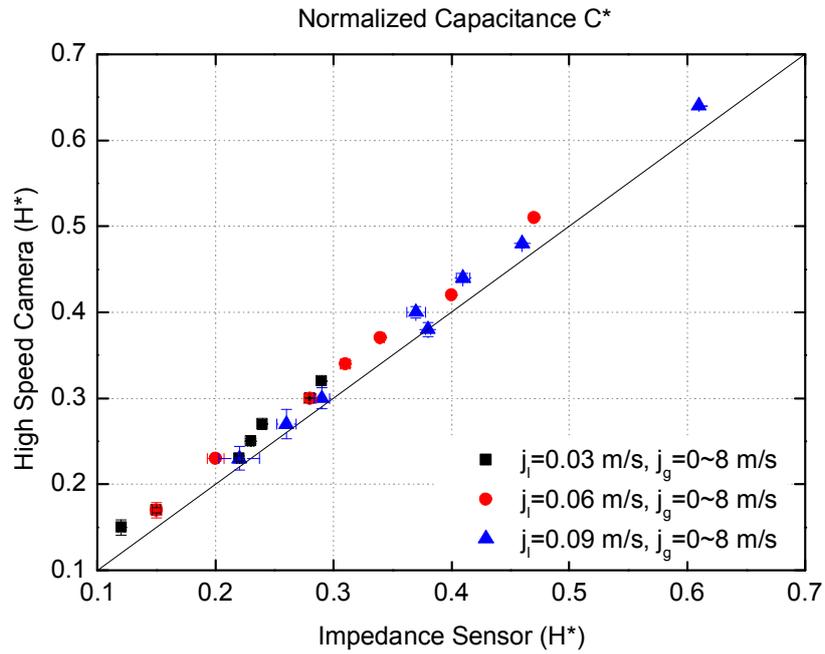


Fig. 42. Comparison of water level measurement between ring-type impedance sensor and high-speed camera (capacitance)

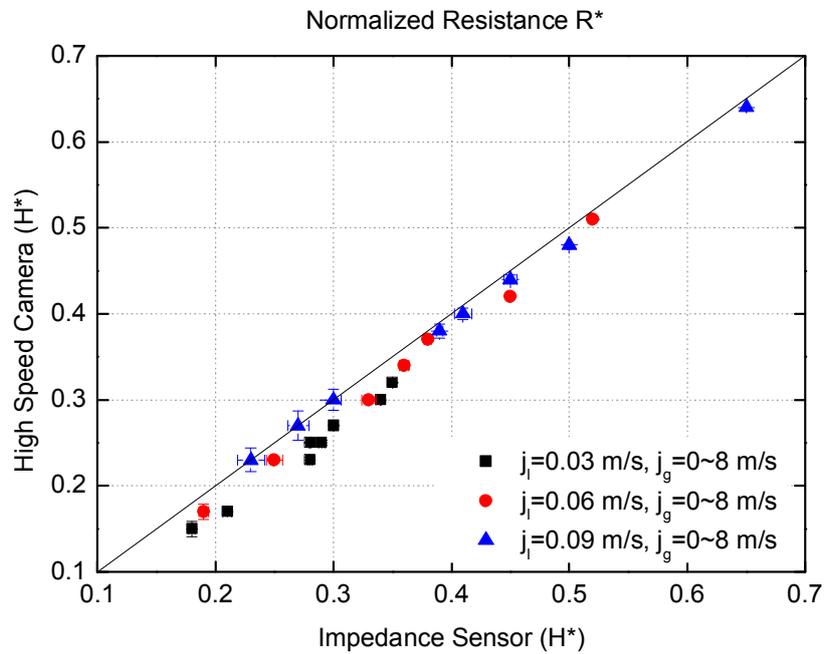


Fig. 43. Comparison of water level measurement between ring-type impedance sensor and high-speed camera (resistance)

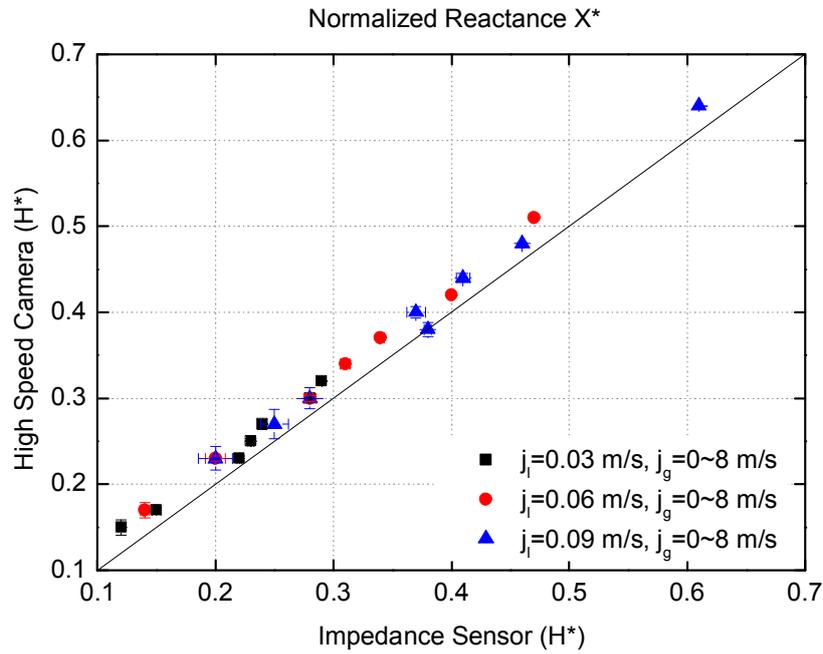


Fig. 44. Comparison of water level measurement between ring-type impedance sensor and high-speed camera (reactance)

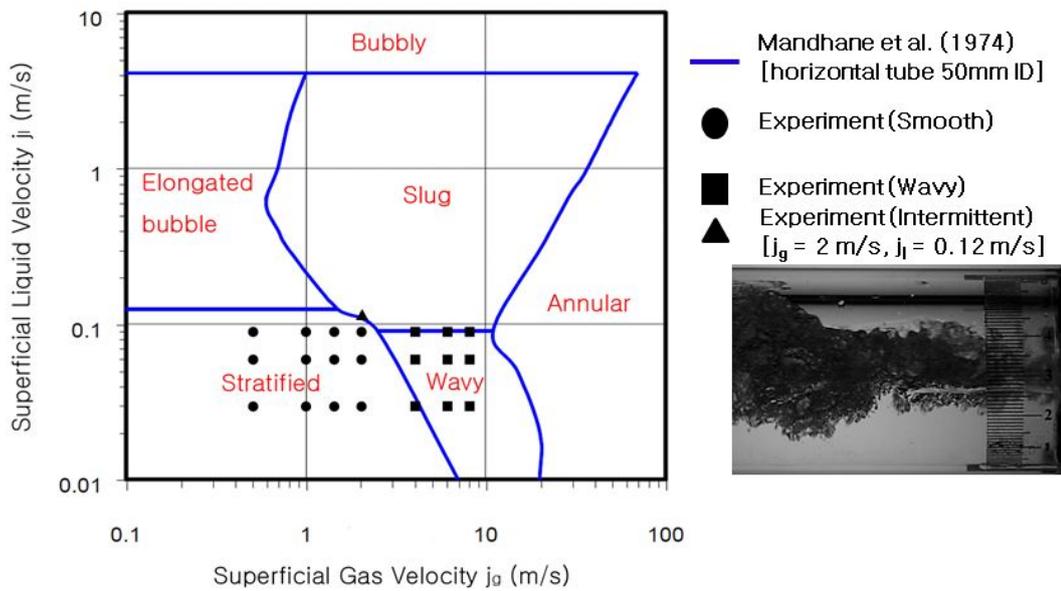


Fig. 45. Comparison between observed flow regimes and Mandhane map

Fig. 69는 추가적으로 가시화한 영상을 바탕으로 이전 실험조건 부분에서 설명한 Mandhane의 유동양식 선도와 비교한 결과이다. 파란색의 실선이 Mandhane이 실험을 통해 얻은 유동양식 선도이며 각각의 심볼은 본 연구의 가시화를 통해 유동 양식을 판별한 결과로 동그라미는 smooth flow를 나타내며, 네모는 wavy flow를 나타낸다. 삼각형은 intermittent flow로서 이에 대한 유체 겉보기 속도와 가시화 영상을 우측에 나타내었다. 비교 결과 이전 연구 결과와 잘 일치함을 보였다.

V. 결 론

기포율 또는 수위를 감시하는 것은 압력강하 및 열전달 계산, 시스템 설계 등을 위해 중요하다. 따라서 방사선, 초음파, 광학 등 많은 기법들이 연구되고 있다. 수위 측정을 위해 일반적으로 probe level meter 또는 ultrasonic level meter를 사용한다. 그러나 탐침형 수위계는 탐침 방식으로 인해 유동장 교란이 발생하며, 초음파 수위계는 유체 계면이 복잡할 경우 수위 측정에 문제를 일으킬 수 있다. 따라서 본 연구는 구성 및 원리가 간단하고 유동장 교란이 없도록 설계가 가능한 임피던스 기법을 이용 하였다.

성층류의 수위 측정을 위해 링 타입 임피던스 센서를 선형에 가까운 신호가 측정되도록 설계 하였다. 결정된 구조는 전극 폭과 파이프 내경의 비 W_e/D 가 0.25이고 전극 사이 간극의 폭과 파이프 내경의 비 W_g/D 가 0.2이다. 내경 4cm의 실제 수평 유로 규격으로 환산하게 되면 전극은 1cm, 간극은 0.8cm 이다. 이 규격을 토대로 실제 링 타입 임피던스 센서를 제작하였다. 제작 센서의 사용을 위해 참조값(lookup table)을 수치 계산을 통해 산출 하였다. 우선 정적 실험을 통해 참조값의 타당성을 검증 하였고, 실시간 수위 측정을 위한 시스템을 구성하여 실제 수평 물-공기 이상 유동 실험 설비에 적용 하였다. 고속카메라 가시화를 통해 얻은 수위와 비교한 결과 커패시턴스와 레지스턴스, 리액턴스 신호를 이용한 수위 결과는 자기장 등 환경적 요인에 의해 최대 0.05의 수위 오차를 보였다. 전류와 절대 임피던스 신호 측정을 통해 얻은 수위가 가장 잘 일치하였으며, 수위 오차는 최대 0.01로 만족스런 결과를 얻었다. 추가적으로 온도 보정 기법이 적용 되면 각종 산업 현장의 배관 내 적용 할 수 있을 것이라 본다.

참 고 문 헌

Agilent Technologies, 2001, "4284A Precision LCR Meter Operation Manual."
(<http://www.agilent.com>)

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. Multiphase Flow*, Vol. 14, pp. 777~785.

Asali, J. C., Hanratty, T. J., and Andreussi, P., 1985, "Interfacial Drag and Film Height for Vertical Annular Flow," *AIChE J.*, Vol. 31, pp. 895~902.

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.

Chakraborty, S., Keller, E., Tlley, J., Srivastav, A., Ray, A., and Kim, S. J., 2009, "Void Fraction Measurement in Two-Phase Flow Processes Via Symbolic Dynamic Filtering of Ultrasonic Signals," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 20, pp. 6.

COMSOLAB, 2008, "AC/DC Module Reference Guide," (<http://www.comsol.com>).

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, pp. 903.

Devia, F., Fossa, M., 2003, "Design and Optimisation of Impedance Probes for Void Fraction Measurements," *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 14, 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*, Vol. 9, pp. 103~109.

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.

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.

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, pp. 794.

곽두영, 2009, "컴퓨터 기반의 제어와 계측 LabVIEW 8.6(한글판)," 도서출판 Ohm사.

손혜영, 2009, "LabVIEW의 정석-기본편," INFINITY BOOKS.

감사의 글

열수력 연구실에 들어왔던 학부생 시절이 엇그제 같은데 벌써 4년 반이란 시간이 흘러 작은 결실을 마무리 지었습니다. 부족한 저에게 너무도 많은 분들의 관심과 도움이 있었습니다. 이 자리를 빌려 감사의 마음을 전하러 합니다.

본 논문을 마칠 수 있도록 학부에서 석사 과정까지 바쁘신 중에도 많은 가르침과 도움을 주신 김신 지도교수님께 머리 숙여 깊은 감사를 드립니다. 제자들에게 연구할 환경을 조성해 주시기 위한 교수님의 헌신과 열정은 잊지 않겠습니다. 바쁘신 와중에도 보잘 것 없는 제 논문 심사를 위해 시간을 내셔서 도움을 주신 정범진 교수님과, 논문이 잘 마무리 될 수 있도록 조언을 아끼지 않으신 김경연 교수님과 김봉석 박사님, 좋은 연구를 할 수 있도록 이상 유동 실험 설비 제작에 도움을 주신 부산대 윤병조 교수님과 한국 원자력 연구원의 강경호 박사님 이하 여러 박사님들, 그리고 김복득 선생님, 성진정공, 미래와 도전에 감사의 말씀을 전합니다. 그리고 저를 위해 많은 도움을 준 우리 연구실 식구인 보안이형, 민석이형, 영준이형, 윤정이, 룡리, 멀타자 그리고 학부생들에게도 고마움의 마음을 전합니다. 또한 행정적으로 굳은 일을 기꺼이 해주신 송혜령, 고은별 선생님께도 감사드립니다. 이외에 석사과정을 무사히 마칠 수 있도록 도움을 준 에너지공학과 선배님들과 조교 선생님, 후배들, 우리 동기들에게도 감사의 말을 전합니다.

끝으로 저를 건강하게 길러주시고 믿음으로 응원해 주신 아버지, 어머니, 형을 위해 항상 양보를 해야 했던 동생 성대, 그리고 아무리 힘들어도 저에게 큰 힘이 되어준 우리 가족 성희, 준우에게 사랑하고 고맙단 말을 전하고 싶습니다. 이제야 작은 산 하나를 넘었다 생각합니다. 더 큰 산을 넘기 위한 디딤판이 될 이 논문을 사랑하는 나의 가족에게 바칩니다.