

碩士學位論文

환상공간 이상유동장에서의
전기 임피던스 단층촬영법을
이용한 기포 계면 추정



濟州大學校 大學院

에너지 工學科

李 正 成

2008年 8月

환상공간 이상유동장에서의
전기 임피던스 단층촬영법을
이용한 기포 계면 추정

指導教授 金 信

李 正 成

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2008年 6月

李正成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

2008年 6月

Bubble boundary estimation
in an annulus two-phase flow
using electrical impedance tomography

Jeong Seong Lee
(Supervised by professor Sin Kim)

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

2008. 6.

This thesis has been examined and approved.

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

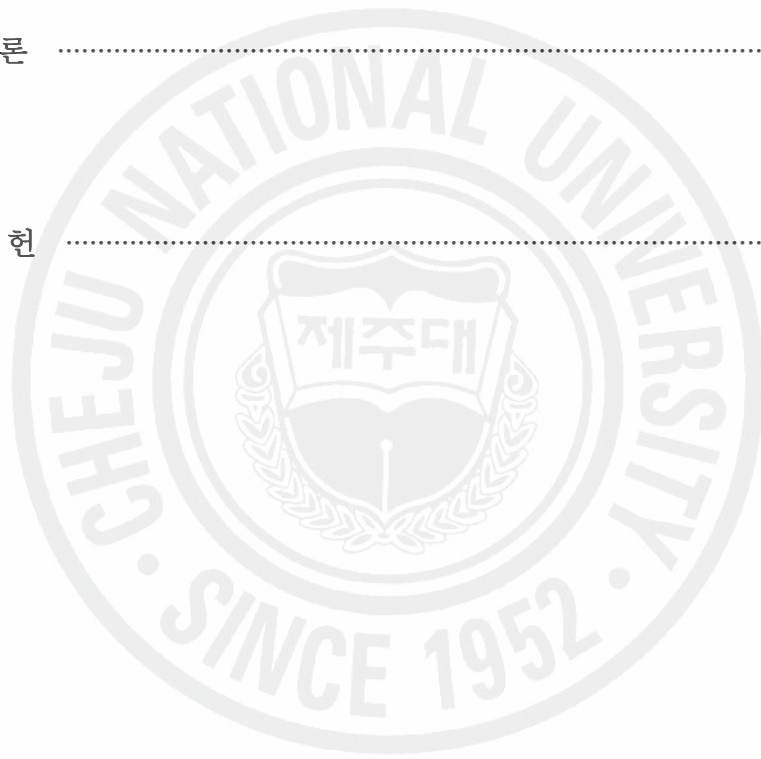
.....
Date

Department of Nuclear & Energy Engineering
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

LIST OF FIGURES	iii
LIST OF TABLES	iv
SUMMARY	v
I. 서 론	1
II. 수학적 공식화	5
1. 정문제	5
2. 계면 표현	9
3. 영상복원 알고리즘	12
1) Unscented Kalman filter	12
III. 실험 방법	15
1. 실험장치	15
1) 펜텀	15
2) 전기신호 입력방법	17
3) 내부전극	19

IV. 영상복원 결과 및 고찰	20
1. 내부전극을 이용하지 않은 환상공간 이상유동 모사 실험	22
2. 내부전극을 이용한 환상공간 이상유동 모사 실험	24
V. 결 론	27
참 고 문 헌	28



LIST OF FIGURES

Fig. 1. Concept of electrical impedance tomography	2
Fig. 2. Forward problem vs. inverse problem	2
Fig. 3. Fourier coefficient to underlying conductivity profiles	11
Fig. 4. An example of unscented transform for mean and covariance propagation	14
Fig. 5. Diagram of measurement system	15
Fig. 6. Cross section of the experiment phantom	16
Fig. 7. Experiment phantom	16
Fig. 8. Current patterns	18
Fig. 9. Internal electrodes	19
Fig. 10. Mesh of experiment phantom with internal electrodes	20
Fig. 11. Evolution model for experiment simulations	21
Fig. 12. Reconstructed boundaries for the laboratory experiment without internal electrodes	23
Fig. 13. RMSE comparison for laboratory experiment without internal electrodes	24
Fig. 14. Reconstructed boundaries for the laboratory experiment with internal electrodes	25
Fig. 15. RMSE comparison for laboratory experiment with internal electrodes	26

LIST OF TABLES

Table 1. Parameters used in simulations for experiment without internal electrodes	22
Table 2. Parameters used in simulations for experiment with internal electrodes	24



SUMMARY

For the visualization of the phase boundary in an annulus two-phase flows, the electrical impedance tomography (EIT) technique is introduced. In EIT, a set of predetermined electrical currents is injected through the electrodes placed on the boundary of the flow passage and the induced electrical potentials are measured on the electrode. With the relationship between the injected currents and the induced voltages, the electrical conductivity distribution across the flow domain is estimated through the image reconstruction algorithm. In this, the conductivity distribution corresponds to the phase distribution.

In the application of EIT to two-phase flows where there are only two conductivity values, the conductivity distribution estimation problem can be transformed into the boundary estimation problem. This paper considers a bubble boundary estimation with EIT in an annulus two-phase flows. And in many industrial cases there are a priori known internal structures inside the vessels which could be used as internal electrodes in tomographical imaging. In this paper internal electrodes were considered in electrical impedance tomography.

As the image reconstruction algorithm, the unscented Kalman filter (UKF) is adopted since from the control theory it is reported that the UKF shows better performance than the extended Kalman filter (EKF) that has been commonly used. The UKF algorithm was formulated to be incorporated into the image reconstruction algorithm for the present problem. Also, phantom experiments have been conducted to evaluate the improvement by UKF.

I. 서론

원자력발전소의 열수력 시스템을 비롯한 많은 공학적 시스템에서 이상유동은 일반적인 현상으로, 효율적인 시스템 설계와 운용, 그리고 해석을 위해서는 이상유동장에 대한 이해가 필수적이다. 원자로 열수력 계통의 열수력 설계 및 안전해석에 필수적인 이상유동장 해석에 대한 기존의 방법론 중 일부는 유동장 구조에 대한 상세정보를 얻는데 부적합하거나 유동장을 교란함으로써 실험 정보의 불확실성을 증가시키는 단점이 있다. 또한 다른 부류의 기법들은 상대적으로 고가의 장비에 의존하면서도 현재로서는 빠른 시간이 과정을 경험하는 원자로 이상유동장에 적용하기에 데이터 취득 속도가 느리다는 문제점을 안고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 제안된 방법이 전기 임피던스 단층촬영법(electrical impedance tomography: EIT)이다.

EIT는 기존의 X선 컴퓨터 단층촬영법(X-ray CT), 자기공명 영상법(MRI) 등이 가진 동적 영상복원(dynamic imaging)문제를 해결하기 위해 1989년 웹스터(Webster)가 처음으로 제안한 기법으로 물체 외부에 전극을 부착하고 그 전극으로 전류를 주입하여 얻은 전압 데이터를 이용하여 물체 내부의 저항률 분포(resistivity distribution)를 찾는 기법이다. EIT 시스템 구현시에 하드웨어 비용이 비교적 저렴하고 비파괴적인 방법으로 측정 대상물에 대한 임피던스 추정이 가능하므로, 화공학, 지질학 및 재료 공학 등에서 모니터링 도구로 주목받아 왔다.

다음 Figure 1.은 EIT 시스템의 개략도로 나타내고 있다. EIT 시스템은 크게 두 가지 부분으로 구성되어 있다. 대상물체 표면의 전극으로 적절한 전기 신호(교류 전류)를 주입하고 경계면에서 유기되는 전기신호(전압)를 측정하여 저장하는 하드웨어부와 경계면에서 측정된 전기신호를 데이터로 이용하여 물체 내부의 저항률 분포(resistivity distribution)를 추정하는 영상 복원 알고리즘(image reconstruction algorithm)으로 구성된다. 따라서 EIT 시스템의 기본 원리는 전기 전도도, 유전율과 같은 다른 전기적 특성을 갖는 물체 주위에 특수하게 제작된 다수의 전극을 배치하고 생성된 전류를 주입하여 이에 유기되는 전압을 물체 경

계면에서 측정된 후 영상 복원 알고리즘을 이용하여 물체 내부의 미지의 전기적 특성 분포를 찾아내고 영상으로 복원하는 것이다.

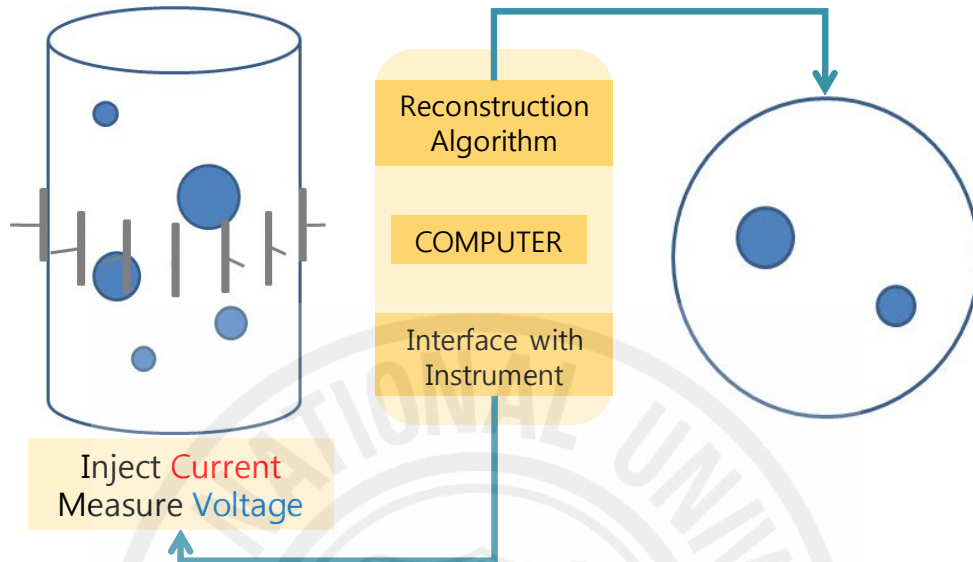


Figure 1. Concept of electrical impedance tomography.

EIT의 영상 복원 과정은 두 가지 계산 과정으로 이루어진다. 첫 번째 과정에서는 물체의 경계면에서 다수의 전극을 통하여 전류를 주입하고 저항률 분포의 함수로써 경계면에 유기되는 전압을 구한다. 이를 정문제(forward problem)라고 한다. 이는 Neumann형의 경계조건을 갖는 일반화된 Laplace 방정식으로 기수로 디며, 그 해석적인 해를 구하기가 매우 어려우므로 수치적 방법인 유한 요소법 (finite element method: FEM), 경계요소법(boundary element method: BEM), 유한 차분법(finite difference method: FDM) 등으로 근사해를 계산한다. FDM에서는 Taylor 전개를 사용하여 편미분방정식을 연립 대수 방정식으로 근사하고, 격자점에서 근사해를 얻는다. FDM은 개념이 간단하고 수치해법적으로 구현하기 쉬우나 복잡한 경계나 기하학적 형태를 구현하는데 한계가 있고 수렴성을 높이기 위하여 격자를 많이 사용해야 한다는 단점이 있다. BEM은 불균질 영역의 수가 그리 많지 않은 bioelectric 문제에 적합하다. BEM은 관심 영역의 경계에서의 정보만을 이용하므로 문제의 공간 차원을 1차원으로 줄일 수 있고, 전체 영역에 대하여 정의된 편미분 방정식을 경계에서만 정의되는 적분 방정식으로 변환한다.

BEM에서는 불균질 영역의 경계만이 이산화되므로 FEM에서 보다 격자 생성이 훨씬 쉬우나 불균질성이 큰 문제에서는 적용하기 곤란하다는 단점이 있다. FEM은 복잡한 기하학적 형태와 경계조건을 갖는 편미분 방정식을 푸는데 사용되어 온 방법이다. 따라서 본 논문에서는 FEM을 정문제의 해법으로 사용하였다.

두 번째 과정에서는 역으로 주입 전류와 경계면에 유기된 전압값을 이용하여 표적의 저항률 분포를 추정하고 그 표적의 영상을 복원하는데, 이를 역문제(inverse problem)라고 한다. EIT에서는 표적의 초기 저항률 값을 가정하여 정문제와 역문제의 반복연산을 통하여 이를 개선하고 계산된 경계면의 전압값이 실제 물체의 경계면의 전압 값 허용오차 범위 내에 수렴할 때의 저항률 값으로 최종 영상을 복원한다. 그러나 역문제를 해결하는 과정에서 부정치성(ill-posedness) 특성 때문에 종종 만족스럽지 못한 결과를 초래한다. 이는 실제 EIT의 영상 복원 시 비선형 측정 함수의 선형화에 따른 모델링 오차, 측정 전압에 포함된 잡음 등의 복원 영상에 큰 영향을 주기 때문이다. 이러한 부정치성 문제를 해결하기 위해 다양한 정규화(regularization) 방법을 제시해 왔으며, 현재까지 논의의 대상이 되고 있다. Akaike(1974)는 Hessian 행렬의 매우 작은 고유치들을 소거하면서 상태수(condition number)를 줄이는 방법을 사용했으며 Murai 등(1985)은 SVD(singleular value decomposition)법을 사용했다. 최근에 Cohen-Bacrie 등(1997)은 variance uniformizion constraint를 이용한 다른 정규화법을 제안했으면 Vauhkonen 등(1996, 1998)은 Tikhonov 정규화법과 subspace 정규화법을 사용하여 부분적으로 좋은 결과를 얻었다.

본 논문에서는, 상태방정식과 측정방정식으로 구성되는 동적모델에 기초하여, 시간에 따라 변하는 저항률 분포를 온라인으로 추정하기 위해 unscented 칼만 필터(unscented Kalman filter: UKF)를 이용한 전기 임피던스 단층촬영법의 영상복원 알고리즘을 제안하였다. 또한 이상유동의 가시화를 효과적으로 표현하기 위하여 상 분포(phase distribution) 대신 상 경계면(phase boundary)을 직접 추정하는 계면 추정 알고리즘(boundary estimation algorithm)을 이용하여 최종영상을 복원하였다.

많은 공학적 시스템에서 원통형의 관 또는 탱크 내부에서의 유동이 일반적이다. 본 논문에서 사용되는 팬텀(phantom)이라는 실험장치는 원통형으로 제작되

있으며, 유동에 경계에 전류를 주입하거나 전압을 측정하기 용이하도록 원주방향으로 전극이 설치되어 있다. 또한, 유동장 내부가 알려진 경우에는 내부 구조물을 전극으로 사용하면 더 많은 자료를 수집할 수 있으므로 공간 해상도가 높아진다. 많은 경우의 원자로심은 봉다발 구조를 가지고 있으며 그 기하학적 구조는 원통형으로 이미 알려져 있다. 봉다발 구조 유동장에서는 기존의 탐침식 방법에 의한 이상유동장 측정은 그 접근성이 매우 제한적이어서 측정이 쉽지 않지만 EIT 기법은 구조물 자체를 전극으로 사용함으로써 접근 제한의 문제를 해소할 수 있다. 본 논문에서는 연료봉 형상의 봉에 4개의 내부전극을 설치하여 실험을 수행하였고, 내부전극을 사용한 경우의 복원된 영상과 내부전극을 사용하지 않은 영상의 공간 해상도를 비교하였고, 제안된 영상복원 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 이상유동장에서의 기포 거동을 모사한 시나리오에 따른 실험데이터를 가지고 UKF를 이용한 영상복원 결과와 비선형 시스템에서 적용하는 대표적인 필터인 확장 칼만 필터(extended Kalman filter: EKF)의 영상복원 결과를 비교 분석하였다.

II. 수학적 공식화

1. 정문제(forward problem)

EIT의 영상화 문제는 기본적으로 정문제(forward problem)와 역문제(inverse problem) 두 단계로 구성된다. 정문제의 단계에서는, 미리 가정된 또는 계산된 전기적 물성치들을 이용하여 Maxwell 방정식으로부터 대상체 내부 및 경계에서의 전위(electric potential)을 구한다. 그리고 역문제 단계에서는, 경계면에서 측정된 전위와 계산된 전위의 차이가 최고제곱(least-square)의 관점에서 최소화 될 수 있도록 적절한 방법을 통해 전기적 물성치를 조절하며, 이러한 과정은 원하는 수렴 정도를 만족할 때까지 반복된다.

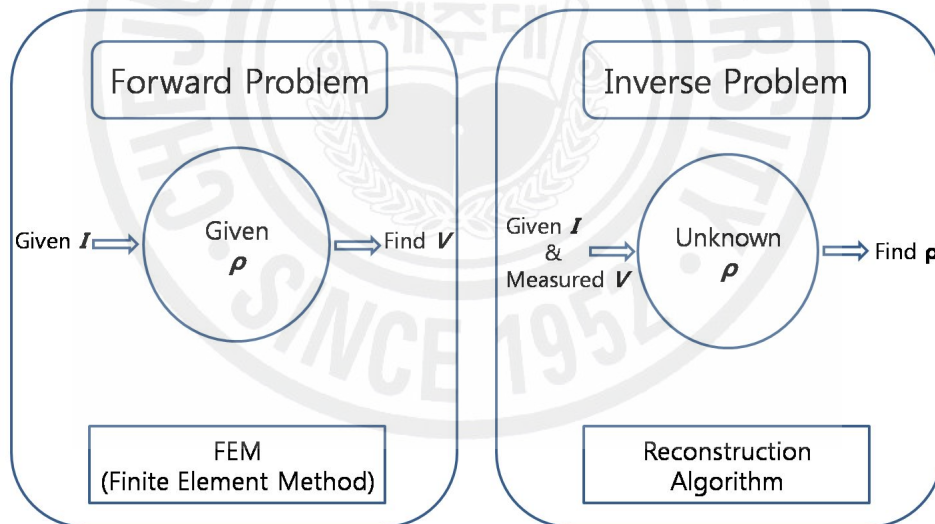


Fig. 2. Forward problem vs. inverse problem

물체의 경계면에 여러 개의 전극을 통해 전류를 주입하고 이미 알고 있는 저항률 분포의 함수로써 경계면에 유기되는 전압은 Maxwell 방정식으로부터 유도되는, 다음과 같은 neumann 형의 경계 조건을 갖는 비선형 Laplace 방정식으로 기술되며 본 논문에서는 전극의 shunting 효과와 전극과 내부와의 접촉 저항

(contact impedance)을 모두 고려한 완전 전극 모델(complete electrode model)을 사용하였다.

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho} \nabla u \right) = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (1)$$

$$u + z_l \frac{1}{\rho} \frac{\partial u}{\partial \nu} = U_l \quad \text{on } e_l, l=1, 2, \dots, L \quad (2)$$

$$\int_{e_l} \frac{1}{\rho} \frac{\partial u}{\partial \nu} dS = I_l \quad l=1, 2, \dots, L \quad (3)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial u}{\partial \nu} = 0 \quad \text{on } \partial\Omega \setminus \bigcup_{l=1}^L e_l \quad (4)$$

여기서 Ω , $\partial\Omega$, ρ , e_l , z_l , U_l , ν , L 은 각각 물체의 내부 영역, 물체의 경계면, 내부 저항, l 번째 전극, l 번째 전극에서의 접촉 저항, l 번째 전극에서의 측정 전압, 법선 벡터, 전극 수이다. 위의 조건에 부가하여, 해의 존재성과 유일성을 보장하기 위하여 위의 경계 조건에 키르히호프의 법칙(Kirchhoff's law)을 만족하는 다음과 같은 주입 전류와 측정 전압에 대한 조건을 부가한다.

$$\sum_{l=1}^L I_l = 0 \quad (5)$$

$$\sum_{l=1}^L U_l = 0 \quad (6)$$

저항률 분포, 즉, 역문제를 해결하기 위해서는 물리적 모델에 대한 정문제의 해가 필요한데, 대부분의 실제 상황에서는 식 (1)~(4)의 경계 조건을 갖는 비선형 편미분 방정식의 해석적인 해를 구하기가 매우 어려우므로 수치적 방법을 도입해야 한다. 가장 널리 사용되고 있는 수치적 방법들로는 유한 요소법(FEM), 경계 요소법, 유한 차분법 등이 있으며, 본 논문에서는 다른 방법들보다 실행 가능한 방법인 FEM을 사용하여 정문제의 해를 계산하였다.

FEM에서는 계산 영역 Ω 를 매우 작은 삼각형 요소로 세분하고 각 요소내의

저항률 값이 일정하다고 가정하여, 내부 전압 U 를 다음과 같이 근사한다.

$$u \approx u^h(x, y) = \sum_{i=1}^L \alpha_i \Phi_i(x, y) \quad (7)$$

여기서 N 은 총 node 수, Φ_i 는 i 번째 node에서는 1이고 나머지 node에서는 0인 기저함수(basis function), α_i 는 i 번째 node에서 전압이다. 식(6)을 만족시키기 위하여 전극에서의 측정 전압 U 를 다음과 같이 근사 한다.

$$U \approx U^h = \sum_{j=1}^{L-1} \beta_j n_j \quad (8)$$

여기서

$$n_1 = [1, -1, 0, \dots, 0]^T \quad (9)$$

$$n_2 = [1, 0, -1, 0, \dots, 0]^T \quad (10)$$

$$n_{L-1} = [1, 0, 0, 0, \dots, -1]^T \quad (11)$$

이다. u 와 U 에 대한 weighting function을 v 와 V 라 하면, 이 문제에 대한 variational form은 다음과 같다.

$$B_s((u, U), (v, V)) = \sum_{l=1}^L I_l V_l \quad (12)$$

여기서 B_s 는 다음과 같이 정의되는 variational form이다.

$$B_s((u, U), (v, V)) = \int_{\Omega} \sigma \nabla u \cdot \nabla v dx + \sum_{l=1}^L \frac{1}{z_l} \int_{e_l} (u - U_l)(v - V_l) ds \quad (13)$$

v와 V에 대한 기저 함수를 u와 U에 대한 기저 함수와 같다고 두는 Galerkin법을 사용하면 위의 미분 방정식은 다음과 같은 연립 대수 방정식으로 근사 된다.

$$Ab = \tilde{I} \quad (14)$$

여기서

$$A = \begin{pmatrix} B & C \\ C^T & D \end{pmatrix} \quad b = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} \quad \tilde{I} = \begin{pmatrix} \delta \\ \zeta \end{pmatrix} \quad (15)$$

기저함수들 Φ_i 와 n_j 를 식 10의 variational form에 대입하고 적분하여 얻어지는 행렬들 B, C, D는 다음과 같이 주어진다.

$$B(i, j) = \int_{\Omega} \sigma \nabla \Phi_i \cdot \nabla \Phi_j d\Omega + \sum_{l=1}^L \frac{1}{z_l} \int_{e_l} \Phi_i \Phi_j dS \quad i, j = 1, 2, \dots, N_n \quad (16)$$

$$C(i, j) = - \left(\frac{1}{z_1} \int_{e_1} \Phi_i dS - \frac{1}{z_{j+1}} \int_{e_{j+1}} \Phi_i dS \right) \quad i = 1, 2, \dots, N_n, j = 1, 2, \dots, L-1 \quad (17)$$

$$D(i, j) = \begin{cases} \frac{|e_1|}{z_1}, & i \neq j \\ \frac{|e_1|}{z_1} + \frac{|e_{j+1}|}{z_{j+1}} & i = j \end{cases} \quad i, j = 1, 2, \dots, L-1 \quad (18)$$

여기서 $|e_j|$ 는 전극 j 의 너비이다.

2. 계면 표현(boundary expression)

EIT(electrical impedance tomography)의 영상 복원 과정은 정문제와 역문제 두 가지 계산 과정으로 이루어진다. 정문제(forward problem) 단계에서는 물체의 경계면에서 여러 개의 전극을 통하여 전류를 주입하고 저항률 분포의 함수로써 경계면에 유기되는 전압을 구한다. 이는 Neumann 형의 경계 조건을 갖는 비선형 Laplace 방정식으로 기술되며 그 해석적인 해를 구하기 매우 어려우므로 수치적 방법인 유한 요소법(finite element method: FEM)을 이용하여 근사해를 구하게 된다. 역문제(inverse problem) 단계에서는 역으로 주입 전류와 경계면의 유기된 전압값을 이용하여 표적의 저항률 분포를 추정하고 그 표적의 영상을 복원한다. EIT에서는 표적의 초기 저항률 값을 가정하여 정문제와 역문제의 반복 연산을 통하여 이를 개선하고, 계산된 경계면의 전압값이 실제 대상의 경계면의 전압값 허용오차 범위 내에 수렴할 때 저항률값으로 최종 영상을 복원하게 된다.

정문제를 해결하는 과정에서 저항률의 분포는 표적 내에 고정된 요소(element)에 의해 계산되어진다. 각각의 요소에 의해 추정되는 임피던스의 분포는 이웃하는 요소에 영향을 주게 되어 복원되는 영상이 퍼지는 효과가 발생한다.

따라서 물체와 배경의 저항률 값을 알고 있을 경우, 표적의 임피던스 분포를 찾아내기 보다는 표적의 외형에 관심을 가지는 경계 추정 문제(boundary estimation problem)를 이용하면 영역의 경계에 내포하고 있는 적분 방정식을 장방정식(field equation)으로 변환시킴으로써 수치적인 문제의 차원을 줄이게 된다.

액체-기체의 환상공간 이상유동장에서는 유동장안의 기포는 외경계가 단혀있고 형상 또한 거의 원형 혹은 타원형을 이루고 있으므로, 대상물내의 표적의 외경계가 완만하다고 가정하였다. 표적의 외경계는 다음과 같은 형태로 근사할 수 있다.

$$C_l(s) = \begin{pmatrix} x_l(s) \\ y_l(s) \end{pmatrix} = \sum_{n=1}^{N_0} \begin{pmatrix} \bar{y}_n^x \Theta_n^x(s) \\ \bar{y}_n^y \Theta_n^y(s) \end{pmatrix} \quad (19)$$

여기서, $C_l(s) (l=1,2,\dots,S)$ 은 l 번째 표적의 경계이고, S 는 표적의 수, $\theta_n(s)$ 는 주기적 미분가능 기저함수(periodic and differentiable basis function), N_θ 는 기저함수의 수이다. 기저함수의 형태는 다음과 같다.

$$\theta_1^a(s)=1 \tag{20}$$

$$\theta_n^x(s)=\sin\left(2\pi\frac{n}{2}s\right), \quad n=2,4,6,\dots\text{even} \tag{21}$$

$$\theta_n^y(s)=\cos\left(2\pi\frac{(n-1)}{2}s\right), \quad n=3,5,7,\dots\text{odd} \tag{22}$$

이상유동장내의 기포의 경계면은 거의 원형이므로 위의 식은 몇 개의 항만으로 해를 근사할 수 있다. 경계는 형상 계수(shape coefficient)의 벡터 γ 로 구성되며 다음과 같다.

$$\gamma=\left(\gamma_1^{x_1}, \dots, \gamma_{N_\theta}^{x_1}, \gamma_1^{y_1}, \dots, \gamma_{N_\theta}^{y_1}, \dots, \gamma_1^{x_s}, \dots, \gamma_{N_\theta}^{x_s}, \gamma_1^{y_s}, \dots, \gamma_{N_\theta}^{y_s}\right)^T \tag{23}$$

여기서, $\gamma \in \mathbf{R}^{2SN_\theta \times 1}$ 이다.

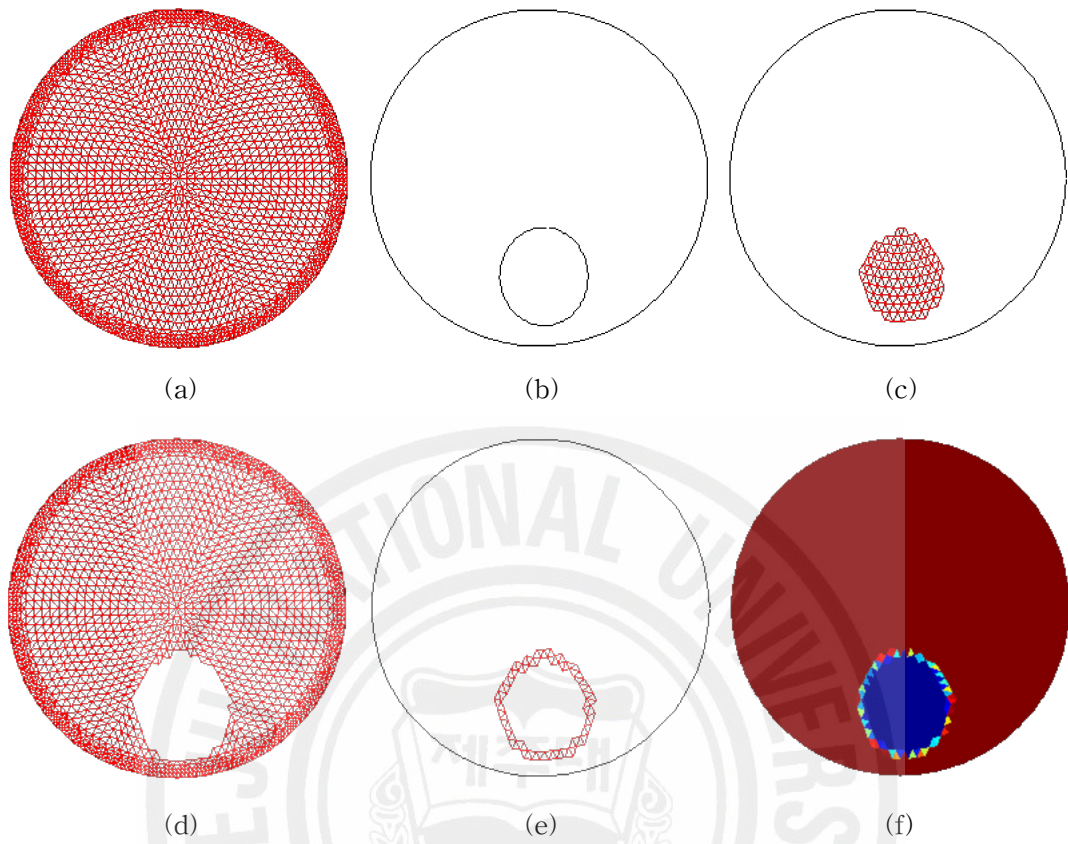


Fig. 3. Fourier coefficient to underlying conductivity profiles: (a) FEM discretization of the domain; (b) boundary represented by Fourier coefficient; (c) mesh elements belonging to target are assigned σ_j ; (d) mesh elements belonging to the background are assigned σ_j ; (e) mesh elements lying on the interface are assigned area average conductivity values; and (f) final conductivity values at the end of assignment.

3. 영상복원 알고리즘

1) Unscented 칼만 필터(unscented Kalman filter)

EKF(extended Kalman filter)는 비선형 시스템에서 적용하는 대표적인 필터이다. EKF는 추정 상태값의 공분산 행렬을 시간 전파할 때 비선형 모델을 선형화하여 계산한다. 자코비안(Jacobian)을 계산해야 하기 때문에 계산량이 많아 실제 시스템에 적용하기 어렵다는 문제점이 있다. UKF는 EKF의 단점을 보완하기 위해 제안된 비선형 필터이다. UKF의 특징은 공분산 행렬을 구할 때 EKF와는 달리 비선형모델을 선형화하지 않는다. 대신에 상태벡터에 대한 sigma point를 선정하고, 각각의 sigma point에 대한 비선형 모델을 통해 시간 전파한 결과를 사용하여 구한 표본 평균과 표본 공분산 행렬을 사용하여 UT(Unscented Transformation)를 수행한다. UKF는 자코비안(jacobian)을 구하지 않아도 되므로 EKF 보다 계산상 이점이 있다. 또한, UT를 통한 공분산 행렬의 전파는 확률 분포의 왜곡이 없으므로 EKF 보다 정확하고 안정성이 뛰어나다는 장점이 있다. EIT의 동적모델을 구성하는 상태방정식과 측정 방정식은 다음과 같다.

$$\mathbb{Y}_k = I \mathbb{Y}_{k-1} + \omega_{k-1} \quad (24)$$

$$U_k = h_k(\mathbb{Y}_k) + v_k \quad (25)$$

여기서, $\omega_k \in \mathbf{R}^{M \times 1}$ 와 $v_k \in \mathbf{R}^{L \times 1}$ 는 각각 $Q = E[\omega_k \omega_k^T]$ 와 $R = E[v_k v_k^T]$ 같은 공분산을 갖는 백색 가우시안(white Gaussian) 잡음이라 가정한다. $h_k(\mathbb{Y}_k)$ 는 정문제로 구한 경계면의 전압이다. UT를 이용하여 UKF를 구성하는 과정을 정리하면 다음과 같다.

(1) 초기화

$$\widehat{\mathbb{Y}}_0 = E[\mathbb{Y}_0] \quad (26)$$

$$P_0 = E[(\mathbb{Y}_0 - \widehat{\mathbb{Y}}_0)(\mathbb{Y}_0 - \widehat{\mathbb{Y}}_0)^T] \quad (27)$$

$$\widehat{\mathbb{Y}}_0^a = \mathbf{E}[\mathbb{Y}^a] = [\widehat{\mathbb{Y}}_0^T \ 0 \ 0]^T \quad (28)$$

$$(29)$$

(2) Sigma point 계산

$$X_{\mathbb{H}k-1}^a = \begin{bmatrix} \widehat{\mathbb{Y}}_{k-1^r} & \widehat{\mathbb{Y}}_{k-1^r} + \sqrt{(M+\lambda)P_{k-1}^r} & \widehat{\mathbb{Y}}_{k-1^r} - \sqrt{(M+\lambda)P_{k-1}^r} \end{bmatrix} \quad (30)$$

(3) 시간 갱신 단계

$$X_{\mathbb{H}k-1}^y = I \cdot X_{\mathbb{H}k-1}^x + X_{k-1}^\omega \quad (31)$$

$$\widehat{\mathbb{Y}}_k^- = \sum_{i=0}^{2M} W_i^{(m)} X_{i, \mathbb{H}k-1}^y \quad (32)$$

$$P_k^- = \sum_{i=0}^{2M} W_i^{(c)} [X_{i, \mathbb{H}k-1} - \widehat{\mathbb{Y}}_k^-][X_{i, \mathbb{H}k-1} - \widehat{\mathbb{Y}}_k^-]^T \quad (33)$$

$$\Psi_{\mathbb{H}k-1} = h_k(X_{\mathbb{H}k-1}^y) + X_{k-1}^\omega \quad (34)$$

$$\widehat{U}_k^- = \sum_{i=0}^{2M} W_i^{(m)} \Psi_{i, \mathbb{H}k-1} \quad (35)$$

(4) 측정 갱신 단계

$$P_{\widetilde{U}_k \widetilde{U}_k} = \sum_{i=0}^{2M} W_i^{(c)} [\Psi_{i, \mathbb{H}k-1} - \widehat{U}_k^-][\Psi_{i, \mathbb{H}k-1} - \widehat{U}_k^-]^T \quad (36)$$

$$P_{\widetilde{Y}_k \widetilde{U}_k} = \sum_{i=0}^{2M} W_i^{(c)} [X_{i, \mathbb{H}k-1} - \widehat{\mathbb{Y}}_k^-][X_{i, \mathbb{H}k-1} - \widehat{\mathbb{Y}}_k^-]^T \quad (37)$$

$$K_k = P_{\widetilde{Y}_k \widetilde{U}_k} P_{\widetilde{U}_k \widetilde{U}_k}^{-1} \quad (38)$$

$$\widehat{\mathbb{Y}}_k = \widehat{\mathbb{Y}}_k^- + K_k(\overline{U}_k - \widehat{U}_k^-) \quad (39)$$

$$P_k = P_k^- - K_k P_{\widetilde{U}_k \widetilde{U}_k} K_k^T \quad (40)$$

여기서 $\gamma^a = [\gamma^T \ \omega^T \ v^T]^T$, $X^a = [(X^x)^T (X^w)^T (X^v)^T]^T$, $\lambda = a^2(M+\kappa) - M$ 는 composite scaling parameter이고, a 는 sigma point의 spread로 정의된다. κ 는 이차 스케일링 파라미터이고 β 는 γ 분포의 incorporate prior knowledge로 사용된다. weights W_i 는 다음과 같이 주어진다.

$$W_0^{(m)} = \lambda / (M + \lambda) \quad (41)$$

$$W_0^{(c)} = \lambda / (M + \lambda) + (1 - a^2 + \beta) \quad (42)$$

$$W_i^{(m)} = W_i^{(c)} = 1 / \{2(M + \lambda)\}, \quad i = 1, \dots, 2M \quad (43)$$

여기서 $M = 2N + L$, N 은 Fourier coefficients의 차원이고 L 은 전극수이다.

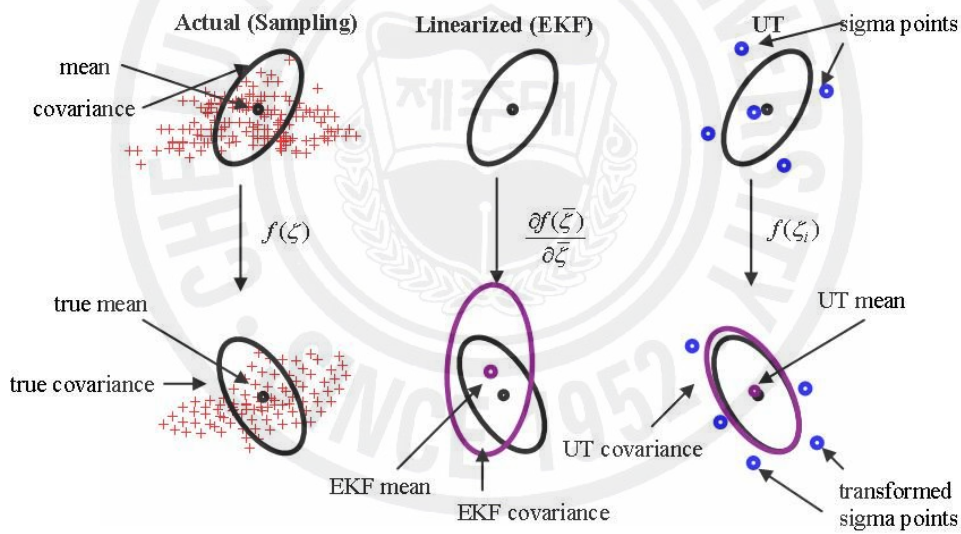


Fig. 4. An example of unscented transform for mean and covariance propagation: a) actual; (b) first-order linearization (EKF); and (c) unscented transform.

Ⅲ. 실험방법

1. 실험장치

실험장치는 다음 Fig. 5와 같이 구성되어 있다. 팬텀(phantom)에 Agilent 4284A를 이용하여 전류를 주입하고, Agilent 34870A로 모든 전극의 전압값을 측정후 GPIB 통신을 이용하여 PC로 측정값을 저장한다. 데이터 수집은 Agilent VEE를 이용하여 제작한 데이터 수집 프로그램을 이용하였다.

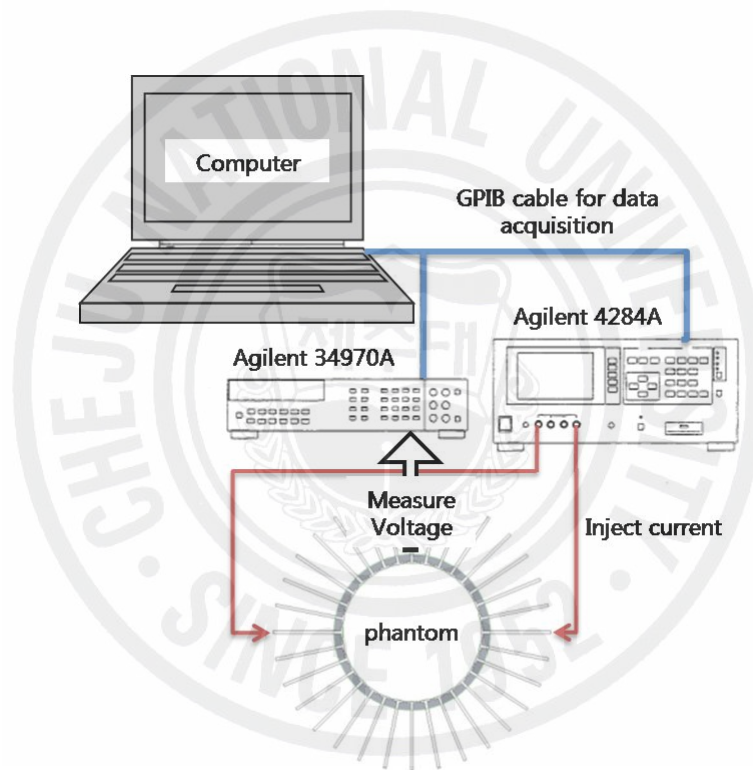


Fig. 5. Diagram of measurement system.

1) 팬텀(phantom)

팬텀의 높이는 330mm이고, 내경 80mm의 실린더 모양으로 재질은 아크릴로 되어 있다. 전극은 팬텀 내에 삽입되어 있어 팬텀내의 전해질과 접촉이 되어 있으며, 전극의 높이는 200mm, 너비는 6mm이고 총 전극수는 32개이다. 본 실험에서 사용된 전극의 재질은 stainless steel로 11.25° 간격으로 팬텀 내면에 균일하

게 설치되어져 있다. 팬텀에 사용되는 전극은 유동장과 접촉하기 때문에 접촉 임피던스(contact impedance)를 최소화하기 위해 전극 표면을 매끄럽게 하여 전도도가 최대한 보장되도록 설계하였다. 그리고 팬텀 내부로 돌출되지 않도록 전극의 크기에 맞게 내부 편에 홈을 파서 전극간의 영향을 최소화하고 불필요한 부분이 유동장에 노출되지 않도록 하였다. 다음 Fig. 6.과 Fig. 7.은 팬텀의 단면과 실제 모습이다.

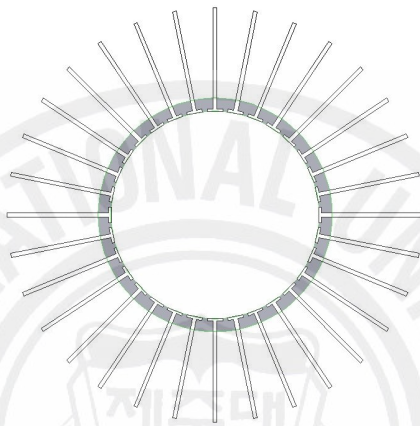


Fig. 6. Cross section of the experiment phantom.

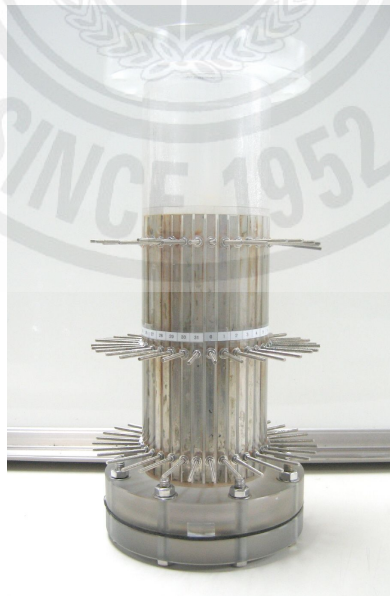


Fig. 7. Experiment phantom.

2) 전기신호 입력방법

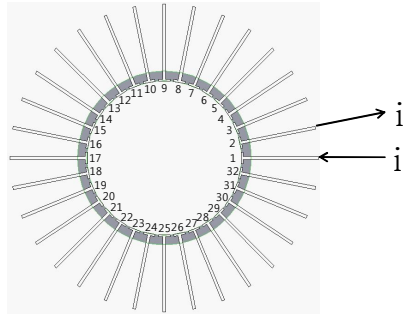
팬텀에 전류를 주입하는 장치로는 Agilent사 4284A precision LCR meter를 이용하였다. 이 장치는 원래 정밀소자의 검사에 쓰이는 장치이지만 저주파수 영역에서 고주파수 영역까지 입력전류의 주파수를 조절하면서 일정한 전류를 흘려 보내주거나 일정한 전위차를 발생시킬 수 있는 기능을 이용하여 측정 시스템의 전류원으로 사용하였다.

전류를 입력하는 방법에는 neighboring method, opposite method, cross method, multi-reference method 및 adaptive method 등이 있다. 이 중 neighboring method는 현재 가장 많이 사용되는 방법이다. 이 방법은 이웃하는 두 전극을 통해 전류를 주입하고, 전류가 주입되는 전극쌍을 제외한 모든 전극의 전압을 측정하고, 전류주입을 모든 쌍에 대하여 반복하는 방법이다. 하지만, neighboring method에서 전류 분포는 매우 불균질하며, 주입되는 전류의 대부분이 시스템의 경계를 통하여 흐르게 되므로 경계면 근처에서 저항률 변화에 따른 민감도는 좋으나 중심에서의 저항률의 변화에 대해서는 민감도가 떨어진다.

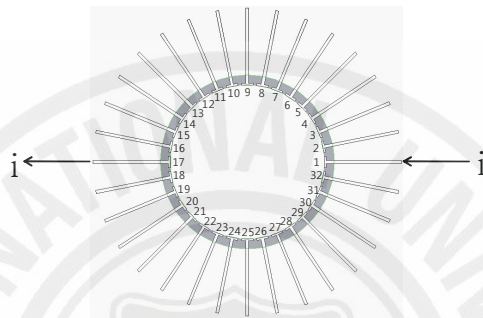
Opposite method(대면방식)에서는 전류가 서로 대칭인 두 전극을 통하여 주입되고, 전압은 모든 전극의 전압을 측정하고, 전류주입을 모든 쌍에 대하여 반복하는 방법이다. 이 방법은 전류밀도가 균일하여 민감도가 좋다. 특히 시스템 중심에서의 민감도가 우수하다.

multi-reference method에서는 하나의 기준 전극을 제외한 나머지 전극에 전극 수만큼의 전류원을 이용하여 동시에 전류가 주입되며 기준 전극에 대한 전위차를 모든 전극에 대해 동시에 측정하고, 기준 전극을 바꾸면서 측정을 반복한다. 주입 전류의 크기를 적절히 선택하면 대체로 균일한 전류 분포를 제공할 수 있으므로 좋은 민감도를 얻을 수 있다.

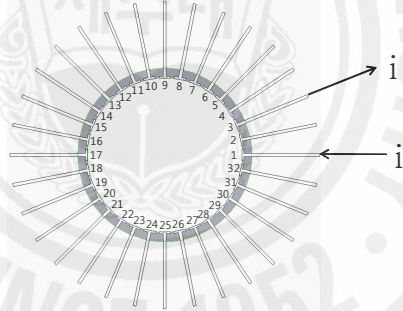
Adaptive method에서는 원하는 전류 분포를 얻기 위해 동시에 모든 전극을 통해 적절한 크기의 전류를 주입한다. 따라서 이 방법을 optimal current method라고도 한다. 각 전극에 총 주입 전류를 '0'이 되도록 하는 조건을 만족하면서 일정한 범위 내의 크기를 갖는 전류가 주입된다. 보통은 적합한 주입 전류 패턴을 미리 정하고 데이터 수집 과정 동안에 패턴이 변하지 않는 경우가 편리함 때문에 주로 사용된다.



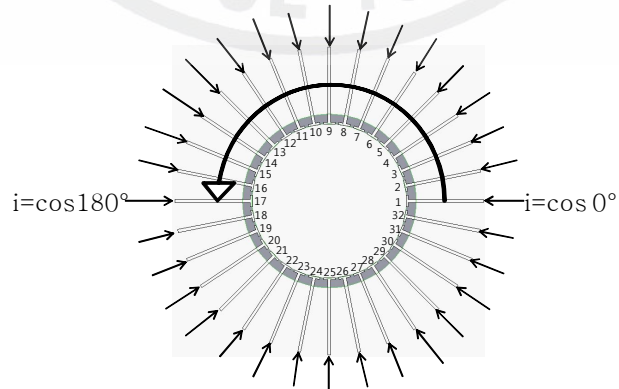
(a) neighboring method



(b) opposite method



(c) reference method



(d) adaptive method

Fig. 8. Current patterns.

본 논문에서는 이상의 방법 중 시스템 중심에서의 민감도가 좋고 일정한 크기의 전류를 이용하여 비교적 쉽게 실험을 수행할 수 있는 opposite method를 선택하였다. 그리고 팬텀의 내부 경계면에 부착된 32개의 전극과 4개의 내부 전극에서 전압값을 수집하기 위해서 Agilent사의 34970A data acquisition unit을 이용하였다.

3) 내부전극

많은 경우의 원자로심은 봉다발 구조를 가지고 있으며 그 기하학적 구조는 원통형으로 이미 알려져 있다. 봉다발 구조 유동장에서는 기존의 탐침식 방법에 의한 이상유동장 측정은 그 접근성이 매우 제한적이어서 측정이 쉽지 않지만 EIT 기법은 구조물 자체를 탐침으로 전극으로 사용함으로써 접근 제한의 문제를 해소할 수 있다. 이러한 효과를 검증하기 위하여 Fig. 9와 같은 연료봉 형상의 봉에 4개의 내부전극이 균일한 간격으로 부착된 전극봉을 제작하였다.



Fig. 9. Internal electrodes.

IV. 영상복원 결과 및 고찰

본 장에서는 제안된 영상복원 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 환상공간 유도장을 모사한 실험 데이터를 이용한 시나리오에 따른 unscented 칼만 필터(unscented Kalman filter: UKF)를 이용한 영상복원 결과와 비선형 시스템에서 적용하는 대표적인 필터인 확장 칼만 필터(extended Kalman filter: EKF)의 영상복원 결과를 비교 분석하였다. 또한 내부 전극의 성능을 평가하기 위해 내부 전극을 이용한 경우 영상복원 결과와 내부 전극의 정보를 포함하여 복원한 영상을 비교한다. 실험에 사용된 팬텀(phantom)의 직경 및 전극의 크기, 위치와 동일한 메쉬(mesh)를 오픈 소스인 QMG(Quick Mesh Generator) 2.0을 이용하여 다음 Fig. 10.과 같이 생성하였다. 외부 경계면에 32개의 전극과 내부구조물에 4개의 전극이 설치되어 있음을 확인할 수 있다.

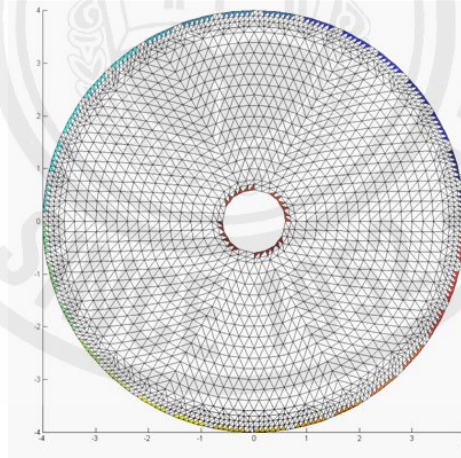


Fig. 10. Mesh of experiment phantom with internal electrodes.

제안된 영상복원 알고리즘의 성능을 객관적으로 평가하기 위하여 실제 표적의 계면과 추정된 계면의 $RMSE_{v_k}$ 를 다음의 식과 같이 정의하였다.

$$RMSE_{y_k} = \frac{\|y_{estimated,k} - y_{true,k}\|}{\|y_{true,k}\|} \quad (44)$$

내부 전극과 제안된 영상복원 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 Fig. 11.와 같이 팬텀 좌측에 직경 5mm인 기포가 발생하여 시계방향으로 점차 크기가 커지면서 이동하는 환상공간 이상유동장을 모사한 실험을 수행하였다. 표적은 8회에 걸쳐 이동하며 각 frame에 대해 6개의 전류패턴을 이용하였다. 목표물내의 표적의 저항률 값은 10^{10} (Ωcm)이며, 배경(background)의 저항률 값은 0.003 (Ωcm)이다.

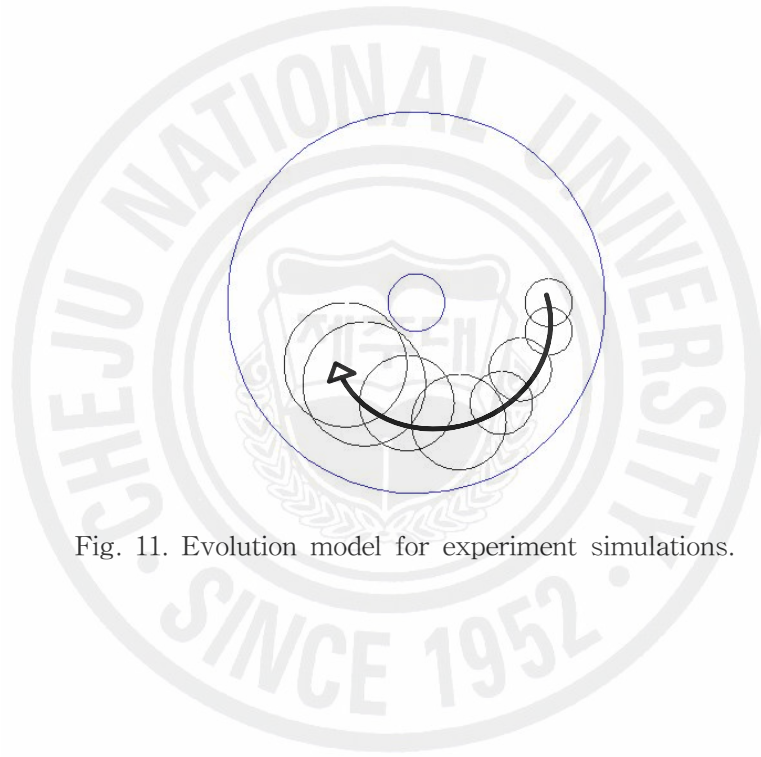


Fig. 11. Evolution model for experiment simulations.

1. 내부전극을 이용하지 않은 실험 영상복원 결과

내부전극의 정보를 이용하지 않은 실험과 이용한 실험을 비교하기 위하여 기하학적 동일하게 내부전극을 설치된 상태에서 실험을 수행하였다. 내부전극의 정보란 내부전극에서 얻은 전압값을 의미한다. 내부전극을 이용하지 않을 때는 경계면의 전압값만을 이용하여 영상복원시 외부전극 부근의 해상도는 좋으나 중심부의 해상도는 떨어진다. 이러한 문제를 해결하기 내부에 구조물이 있는 경우 그 구조물 자체를 이용하여 전압값을 측정하게 되면 중심부의 해상도를 극대화 할 수 있다는 장점이 있다. 이번 절에서는 기하학적으로는 구조물이 있으나 내부전극의 전압값을 이용하지 않았을 때 영상복원 결과를 확인한다. 다음 table 1.에서 역문제 추정단계에서 사용된 파라미터들의 값을 확인할 수 있다.

Table 1. Parameters used in simulations for experiment without internal electrodes.

Parameters	extended Kalman filter	unscented Kalman Filter
Q	$0.01 I_{\Lambda}$	$0.01 I_{\Lambda}$
R	$1 \times 10^2 I_L$	$7 \times 10^1 I_L$
P_0	$0.01 I_{\Lambda}$	$0.1 I_{\Lambda}$
γ	0.1	-
α	-	0.1
β	-	2
κ	-	0

Fig. 12.에서 UKF에 의해 영상복원된 계면(dashed line)과 EKF에 의한 계면(dotted line)과 실제 표적의 계면(solid line)을 같이 표현하여 직접적으로 영상복원 알고리즘의 성능을 비교할 수 있다. 내부전극의 전압값을 이용하지 않을 때는 표적의 위치와 크기를 정확히 복원하지 못한다. 하지만 UKF에 의해 복원된 계면추정능력이 EKF의 추정능력에 비해 양호함을 확인할 수 있다.

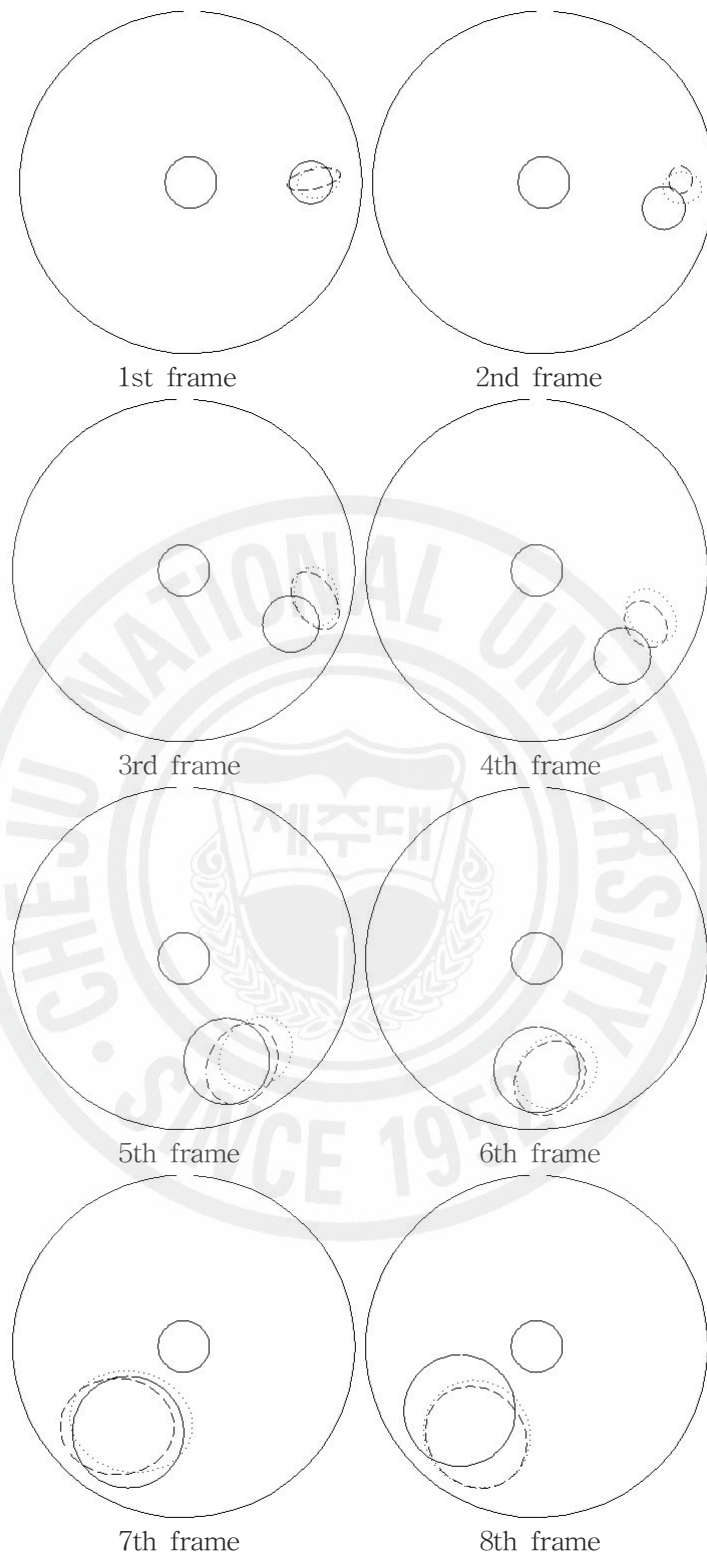


Fig. 12. Reconstructed boundaries for the laboratory experiment without internal electrodes. Solid line, dotted line and dashed line represent the true boundary, boundary estimated by EKF, and boundary estimated by UKF, respectively.

UKF와 EKF의 $RMSE_{y_k}$ 를 전류패턴에 대한 그래프로 Fig. 13.에 나타내었다. $RMSE_{y_k}$ 는 시간 k 스텝에서의 실제 표적과 추정된 표적을 비교하는데 효과적이다. $RMSE$ 의 비교에서도 UKF가 EKF에 비해 실제 표적의 위치를 평가한다고 판단할 수 있다.

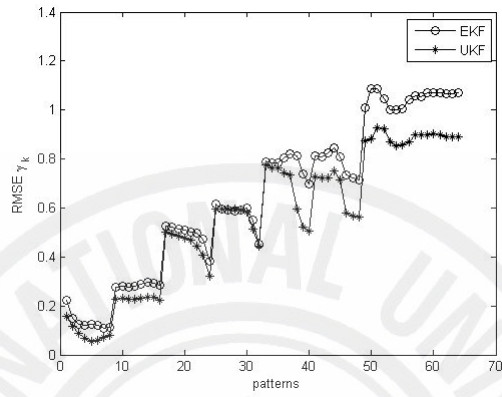


Fig. 13. RMSE comparison for laboratory experiment without internal electrodes.

2. 내부전극을 이용한 환상공간 이상유동 모사 실험

내부전극의 전압값을 이용하였을 때는 4개의 전극을 추가로 사용하므로 1 frame 당 36개의 전압값이 계산에 사용되므로 계산량은 다소 늘어난다.

Table 2. Parameters used in simulations for experiment with internal electrodes.

Parameters	EKF	UKF
Q	$0.01 I_{\Lambda}$	$0.01 I_{\Lambda}$
R	$1 \times 10^2 I_L$	$8 \times 10^1 I_L$
P_0	$0.01 I_{\Lambda}$	$0.1 I_{\Lambda}$
γ	0.1	-
α	-	0.1
β	-	2
κ	-	0

UKF에 의해 영상복원된 계면(dashed line)과 EKF에 의한 계면(dotted line)과 실제 표적의 계면(solid line)을 같이 표현하여 직접적으로 영상복원 알고리즘의 성능을 비교할 수 있다. UKF에 의해 복원된 계면추정능력이 EKF에 비해 실제 표적의 위치 및 크기와 보다 정확하게 표현한다. 특히, 목표물의 위치와 크기가 갑자기 변하는 시나리오임에도 불구하고 UKF는 표적의 위치와 크기를 거의 정확하게 추정하는 것을 확인할 수 있다. 또한 내부전극의 전압값을 이용하지 않았을 때와 비교하여 영상복원의 질이 상당히 향상되었다. UKF와 EKF의 $RMSE_{y_k}$ 를 전류패턴에 대한 그래프로 Fig. 15.에 나타내었고 내부전극의 전압값을 사용하였을 때 최대 $RMSE_{y_k}$ 값이 내부전극의 전압값을 사용하였을 때보다 EKF와 UKF의 모든 경우에 2 배 감소하였다. 이는 영상복원 알고리즘에 관계없이 내부전극의 전압값을 사용하였을 때 영상복원 성능이 향상됨을 의미한다.

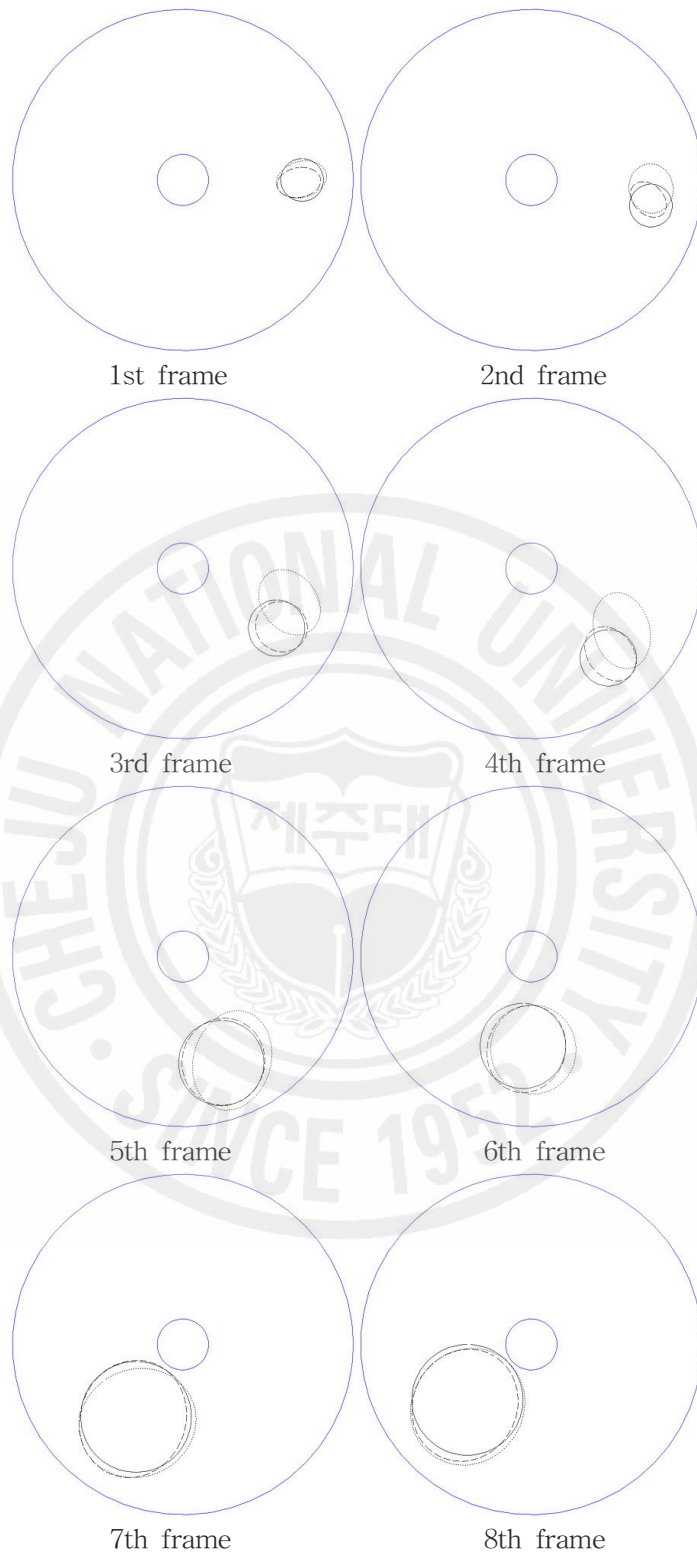


Fig. 14. Reconstructed boundaries for the laboratory experiment with internal electrodes. Solid line, dotted line and dashed line represent the true boundary, boundary estimated by EKF, and boundary estimated by UKF, respectively.

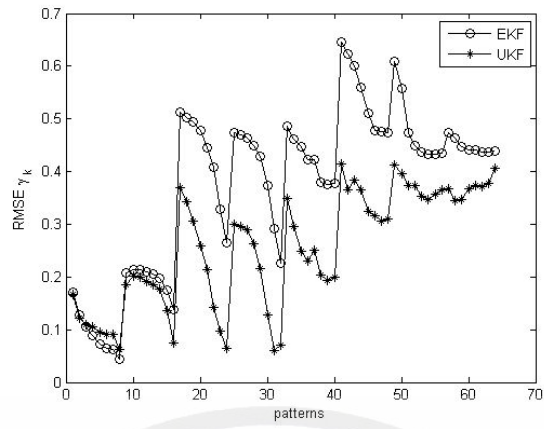
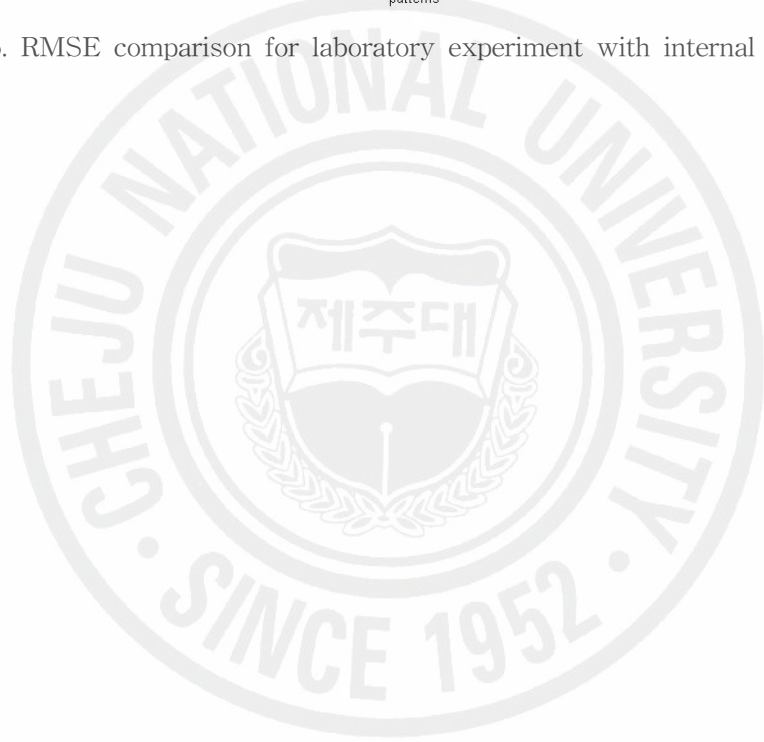


Fig. 15. RMSE comparison for laboratory experiment with internal electrodes.



V. 결 론

본 논문에서는, 표적 내부의 저항률의 비선형 함수로써 기술되는 비선형 함수로써 기술되는 경계면의 측정전압을 반복연산 과정에서 갱신되는 추정 저항률 값에 대하여 선형화하여 얻은 측정방정식과 random walk 모델을 이용하여 구한 상태방정식으로 구성되는 동적 모델을 근거로, 시간에 따라 변하는 저항률 분포를 추정하기 위해 unscented 칼만 필터(unscented Kalman filter: UKF)를 제안하였다. 또한 이상유동의 가시화를 효과적으로 표현하기 위하여 상 분포(phase distribution) 대신 상 경계면(phase boundary)을 직접 추정하는 계면 추정 알고리즘(boundary estimation algorithm)을 적용하였다.

기존의 EIT 실험에서는 경계면의 전압값을 이용하므로 중심부의 해상도가 저하되었다. 이를 해결하기 위해 4개의 전극을 포함하는 내부전극봉을 제작하였고 전극에 유기된 전압값을 사용하였을 때와 그렇지 않을 때의 결과를 비교하였다.

제안된 영상복원 알고리즘의 성능과 내부전극의 영향을 검증하기 위해 이상 유동장에서의 기포 거동을 모사한 시나리오를 상정하여 32개의 외부전극과 4개의 내부전극을 갖는 원통형 팬텀(phantom)에 대한 실험을 수행하였고, UKF를 이용한 영상복원 결과와 비선형 시스템에서 적용하는 대표적인 필터인 확장 칼만 필터(extended Kalman filter: EKF)의 영상복원 결과를 비교 분석하였다.

내부전극의 전압값을 이용하였을 때는 표적의 위치와 크기를 정확하게 복원하는데 비해 내부 전극의 전압값을 이용하지 않을 때는 복원능력이 떨어짐을 확인하였다. 하지만 이 경우에도 EKF에 비해 UKF의 복원능력이 뛰어나다.

본 논문에서 제안한 UKF 영상복원 알고리즘은 EKF의 영상복원 알고리즘에 비해, 계산량은 증가하지만 시간에 따라 급변하는 동적 표적에 대한 영상복원 능력이 우수함을 확인하였다.

참 고 문 헌

Bar-Shalom Y and Li X R (1993) "Estimation and Tracking: Principles, Techniques and software" MA: Artech House

Blom H A P and Bar-Shalom Y (1998) "The Interacting Multiple Model Algorithm for Systems with Markovian Switching Coefficients" IEEE Trans. Autom. Control 33 780-3

Butler J E and Bonnecaze R T (2000) "Inverse method for imaging a free surface using electrical impedance tomography" Chem. Eng. Sci. 55 1193-204

Chung E T, Chan T F and Tai X C (2005) "Electrical impedance tomography using level set representation and total variational regularization" J. Comput. Phys. 205 357-72

Gisser D C, Isaacson D, and Newell J C 1988 Theory and performance of adaptive current tomography system Clinical Physics and hysiological Meas. 9 35-42

Gladden L F, and Alexander P 1996 Application of nuclear magnetic resonance imaging in process engineering Meas. Sci. Technol. 7 423-435

Han D K and Prosperetti A 1999 A shape decomposition technique in electrical impedance tomography J. Comput. Phys. 155 75-95

Holand F A and Bragg R 1995 Fluid Flow for Chemical Engineers (London: Edward Arnold Publisher)

Isaacson D 1986 Distinguishability of conductivities by electric current computed tomography IEEE Trans. Medical Imaging M1-5 91-95

Jones O C, Lin J T, Ovacik L and Shu H 1993 Impedance imaging relative to gas-liquid systems Nucl. Eng. Des. 141 159-176

Julier S J, and Uhlmann J K 1997 A New Extension of the Kalman Filter to nonlinear Systems. In The Proceedings of AeroSense: The 11th International Symposium on Aerospace/Defense Sensing, Simulation and Controls, Multi Sensor Fusion, Tracking and Resource Management II, SPIE.

Julier S J, and Uhlmann J K 2004 Unscented filtering and nonlinear estimation Proceedings of the IEEE 92(3) 2004

Jeon H J, Kim J H, Choi B Y, Kim K Y, Kim M C, and Kim S 2005 Electrical Impedance Imaging of Binary Mixtures with Boundary Estimation Approach Based on Multilayer Neural Network IEEE Sensors Journal 5(2) 313-319

Kim K Y, Kim B S, Kim M C, Lee Y J, Vauhkonen M 2001 Image reconstruction in time-varying electrical impedance tomography based on the extended Kalman filter Meas. Sci. Technol. 12 1-8

Kim B S, Kim M C, Kim S, and Kim K Y 2004a Nonstationary electrical impedance tomography with the IMM scheme Meas. Sci. Technol. 15 2113-2123

Kim M C, Kim K Y, and Kim S 2005 Improvement of impedance imaging for two-phase systems with boundary estimation approach in electrical impedance tomography The Canadian Journal of Chemical Engineering 83 55-63

Kim K Y, Kim B S, Kim M C, Kim S, Isaacson D, and Newell J C 2004b Dynamic electrical impedance imaging with the interacting multiple model scheme *Physiol. Meas.* 26 S217-S233

Kim M C, Kim S, and Kim K Y 2004c Estimation of phase boundaries in two-phase systems by electrical impedance tomography technique *J. Ind. Eng. Chem.* 10 710-716

Kim B S, Ijaz U Z, Kim J H, Kim M C, Kim and Kim K Y 2007a Nonstationary phase boundary estimation in electrical impedance tomography based on the interacting multiple model scheme *Meas. Sci. Technol.* 18 62-70

Kim J H, Kang B C, Choi B Y, Kim M C, Kim S, and Kim K Y 2006a Phase boundary estimation in electrical resistance tomography with weighted multilayer neural networks *IEEE Transactions on Magnetics* 42(4) 1191-1194

Kim M C, Kim S, Kim K Y, Seo K H, Jeon H J, Kim J H and Choi B Y 2006b Estimation of phase boundary by front points method in electrical impedance tomography *Inverse Problems Sci. Eng.* 14 455-66

Kim J H, Kang B C, Lee S H, Choi B Y, Kim M C, Kim B S, Ijaz U Z, Kim K Y and Kim S 2006c Phase boundary estimation in electrical resistance tomography with weighted multi-layered neural networks and front point approach *Meas. Sci. Technol.* 17 2731-2739

Kim S, Ijaz U Z, Khambampati A K, Kim K Y, Kim M C, and Chung S I 2007b Moving interfacial boundary estimation in stratified flow of two immiscible liquids using electrical resistance tomography *Meas. Sci. Technol.*

18 1257–1269

Kolehmainen V, Arridge S R, Lionheart W R B, Vauhkonen M and Kaipio J P 1999 Recovery of region boundaries of piecewise constant coefficients of elliptic PDE from boundary data *Inverse Problems* 15 1375–91

Kolda T G, Lewis R M and Torczon V 2003 Optimization by direct search: new perspectives on some classical and modern methods *SIAM REVIEW*, 45(3) 385–482

Kortschak B and Brandstetter B 2005 A FEM-BEM approach using level-sets in electrical capacitance tomography *COMPEL* 24 591–605

Kwon O, Yoon J R, Seo J K and Woo E J 2003 Estimation of Anomaly Location and Size using Electrical Impedance Tomography *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 50(1) 2003

Lionheart W R B 2004 EIT reconstruction algorithms: pitfalls, challenges and recent developments *Physiol. Meas.* 23 125–42

Newell J C, Gisser D C, and Isaacson D 1988 An electric current tomograph *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 35 823–833

Perry R H, Green D W, and Maloney J O 1997 *Perry's Chemical Engineers Handbook* (New York: McGraw-Hill)

Shollenberger K A, Torczynski J R, Adkin D R, O'hern TJ, and Jackson N B 1997 Gamma-densitometry tomography of gas holdup spatial distribution and industrial-scale bubble column *Chem. Eng. Sci.* 52 2037–2048

Somersalo E, Cheney M and Isaacson D 1992 Existence and uniqueness for electrode models for electric current computed tomography SIAM Journal on Applied Mathematics 52 1023-1040

Tossavainen O-P, Kolehmainen V and Vauhkonen M 2006a Free-surface and admittivity estimation in electrical impedance tomography Int. J. Numer. Meth. Eng. 66 1991-2013

Tossavainen O P, Vauhkonen M, Kolehmainen V and Kim K Y 2006b Tracking of moving interfaces in sedimentation processes using electrical impedance tomography Chemical Engineering Journal 61 7717-7729

Tossavainen O-P, Vauhkonen M, Heikkinen L M and Savolainen T 2004 Estimating shape and free surfaces with electrical impedance tomography Meas. Sci. Technol. 15 1402-1411

Tossavainen O-P, Vauhkonen M, and Kolehmainen V 2007 A three-dimensional shape estimation approach for tracking of phase interfaces in sedimentation process using electrical impedance tomography Meas. Sci. Technol. 18 1413-1424

Van der Merwe R, and Wan E R 2001 The square-root unscented Kalman filter for state and parameter estimation In The Proceedings of ICASSIP'01: 2001 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Salt Lake City, UT, USA

Vauhkonen M 1997 Electrical impedance tomography and prior information PhD Thesis University of Kuopio, Finland

Vauhkonen M, Vad?sz D, Karjalainen P, Somersalo E and Kaipio J P 1998a Tikhonov regularization and prior information in electrical impedance tomography IEEE Transactions on Medical Imaging 17 285-293

Vauhkonen M, Karjalainen P A, and Kaipio J P 1998b A Kalman filter approach applied to the tracking of fast movements of organ boundaries in electrical impedance tomography Proc. 20th Ann. Int. Conf. IEEE

Vauhkonen M, Lionhart W R B, Heikkinen L M, Vauhkonen P J and Kaipio J P 2001 A MATLAB package for the EIDORS project to reconstruct two-dimensional EIT images Physiol. Meas. 22 107-111

Webster J G 1990 Electrical Impedance Tomography (Bristol: Hilger)

Xu L, Han Y, Xu L A, and Yang J 1997 Application of ultrasonic tomography to monitoring gas/liquid flow Chem. Eng. Sci. 52 2171-2183

Yorkey T J, Webster J G, and Tompkins W J 1988 Comparing reconstruction algorithms for electrical impedance tomography IEEE Trans. Biomed. Eng. 34 843-852

감사의 글

무엇인가 완전히 익히기에는 짧은, 그렇지만 지식의 미천함을 자각하기엔 충분했던 2년이란 시간이 흘러, 어느덧 감사의 글을 적을 때가 되었습니다. 지금까지 논문을 쓰면서 많은 분들의 도움이 있었습니다. 이제 논문을 정리하면서 그동안 격려해주시고 도움을 베풀어주신 많은 분들께 감사의 인사를 드리고자 합니다.

먼저, 연구와 강의로 바쁘신 가운데도 논문이 완성되기까지 인도해 주시고 연구방향에 대하여 넓은 안목으로 키워주시며 지도해주신 김신 교수님께 진심으로 깊은 감사를 드립니다. 또한 바쁘신 중에도 따뜻한 관심과 조언을 아끼지 않으신 정범진 교수님과 김경연 교수님께도 정말 감사를 드립니다.

입학에서부터 논문이 완성되기까지 2년이란 배움의 여정이 힘들지 않고 즐거울 수 있게 같이 해준 연구실 식구들 영주누나, 경진형, 덕지형, 희철형, 재철형, 순일, 민기, 윤석, 미희, 경현, 재영, 우경, 성용, 윤정이, 그리고 제주대학교 에너지공학과 멋쟁이 대학원생들 승진, 용호, 찬주, 덕원이형, 봉진이형, 지훈형, 준호형, 민국, 민우, 향민, 성식에게도 진심으로 감사드립니다. 시간이 지날수록 점차 각자의 생활 속에서 바쁘겠지만, 같이 했던 즐거운 기억들과 함께 서로에게 힘이 되어 주는 우정 변치 않았으면 합니다.

끝으로, 지금까지 하늘에서 저를 항상 굽어보시면서 지켜주시는 힘이 되어주신 아버님, 변함없는 믿음과 사랑으로 저를 응원해주신 사랑하는 어머님, 정신적 지주인 형, 그리고 새 식구가 되신 형수님 모두에게 이루 말할 수 없는 감사의 마음을 전합니다. 그리고 항상 바쁘다는 핑계로 잘 챙겨주지 못한 저에게 진심어린 격려를 해주고 항상 곁에서 큰 힘이 되어준 먼정이에게 감사와 사랑의 마음을 전하고 싶습니다. 저에게 격려해주시고 도움을 베풀어주신 많은 분들의 이름 하나 하나를 되새기지 못함을 죄송하게 생각 하며, 졸업 후 사회로 나가 어느 곳에서 무엇을 하던, 인생의 선배로서 그리고 친구로서 많은 관심과 애정을 가지고 저를 지켜 봐주셨던 모든 분들께 부끄럽지 않은 모습으로 훗날 다시 뵈 수 있도록 어디서든 최선을 다하겠습니다.