

전기적 임피던스 단층 촬영 기법을 이용한 이상 유동 가시화

김민찬[†] · 김경연* · 이현주** · 김 신** · 이윤준** · 김세훈***

제주대학교 화학공학과, *전자공학과, **에너지공학과

***강릉대학교 세라믹공학과

(2001년 3월 20일 접수, 2001년 8월 14일 채택)

Two Phase Flow Visualization by Employing Electrical Impedance Tomography Technique

Min Chan Kim[†], Kyung Youn Kim*, Heon Ju Lee**, Sin Kim**, Yoon Joon Lee** and Saehoon Kim***

Department of Chemical Engineering, *Department of Electronic Engineering,

**Department of Nuclear and Energy Engineering, Cheju National University, Cheju 690-756, Korea

***Department of Ceramic Engineering, Kangnung National University, Kangnung, Kwangwon-do 210-702, Korea

(Received 20 March 2001; accepted 14 August 2001)

요 약

이상 유동 가시화를 위한 전기적 임피던스 단층 촬영(Electrical Impedance Tomography; EIT) 측정 장치와 영상 복원 알고리즘을 개발하였다. EIT 측정 장치는 전류 생성부와 전압 측정부로 구성되고, 영상 복원 알고리즘은 정 문제와 역 문제로 이루어진다. 정 문제를 해석하기 위하여 유한 요소법이 사용되었고, 역 문제를 풀기 위하여 반복적인 regularized Newton-Raphson을 사용하였다. 측정 장치에 의해 측정된 실험결과와 영상 복원 알고리즘을 결합하여, 타당한 단층 촬영 영상을 얻을 수 있었다.

Abstract – The electrical impedance tomography(EIT) measurement system and image reconstruction algorithm are developed for the visualization of two-phase flow. EIT measurement system is composed of current generation and voltage measurement parts. The image reconstruction algorithm is composed of forward and inverse problems. The finite element method (FEM) is employed in forward problem and the regularized Newton-Raphson iterative method is used in inverse problem. By combining the experimental results measured by our measurement system and image reconstruction algorithm, reasonable tomographic images are obtained.

Key words: Electrical Impedance Tomography, Two Phase Flow Visualization, Complete Electrode Model, Finite Element Method

1. 서 론

이상 흐름(two-phase flow)은 기-액 접촉이 일어나는 다양한 화공 장치, 상 변화가 발생하는 열 교환 장치 등에서 공정의 성능에 중요한 역할을 한다. 따라서 이상 흐름에서의 상 분포를 결정하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다. 최근에는 2상 또는 다상 유동에서 유동장을 교란하지 않으면서 유동장에 대한 정보를 얻기 위하여 Laser Doppler Velocimetry (LDV)와 Particle Image Velocimetry(PIV), 전기적 단층 촬영(Electrical Tomography, ET) 등 다양한 기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

전기적 임피던스 단층 촬영(Electrical impedance tomography; EIT)은 기존의 X-ray 단층 촬영(Computerized Tomography; CT)이나 자기 공명 단층 촬영(Magnetic Resonance Imaging; MRI)에 비하여 매우 안전

하며, 화상 복원 시간이 다른 단층 촬영 기법에 비하여 아주 짧은 장점이 있어 의공학 분야[1,2] 뿐만 아니라 연속상이 전기를 통할 수 있는 액체인 경우의 액-액 혼합[3], 고-액 혼합[4], 하이드로싸이클론(hydrocyclone) [5] 등의 분야에서 EIT에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 EIT 기법의 장점을 이용하여 이상 흐름에서의 상 분포의 가시화를 시도하고자 한다.

2. EIT의 기본 원리

EIT는 측정하고자 하는 계에 약한 전류를 흘려주고 계의 경계면의 여러 위치에서 전압을 측정하여 물체 내부의 저항 분포를 예측하여 물체 내부의 단층 영상을 얻는 기술이다. EIT 시스템은 Fig. 1에 보여지는 바와 같이 신호를 입력하고 측정하는 하드웨어부와 측정된 전압을 이용하여 표적의 저항률 분포를 계산하는 영상 복원 알고리즘으로 구성된다. 경계면에서 측정된 전압을 이용하여 계의 내부 저항 분포를 얻는 영

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: mckim@cheju.cheju.ac.kr

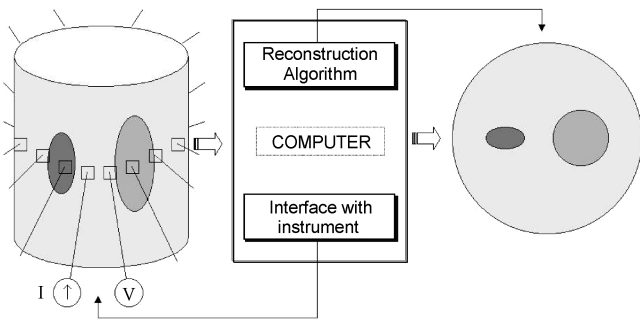


Fig. 1. Schematic diagram of EIT image reconstruction system.

상 복원 알고리즘은 계의 경계면에서 여러 개의 전극을 통해 전류를 주입하고 내부 저항 분포의 함수로 경계면에 유겨되는 전압을 계산하는 정 문제(forward problem)와 역으로 경계면에 유겨된 전압 값을 이용하여 계 내부의 저항 분포를 추정하고 계의 영상을 복원하는 역 문제로 이루어진다. EIT의 영상 복원 문제는 수학적으로는 비선형 잘못 제시된 (ill-posed) 역 문제(inverse problem)로 알려져 있다. 정 문제와 역 문제에 대한 자세한 설명은 아래에 주어진다.

2-1. 정 문제

계의 경계면에 여러 개의 전극을 통해 전류를 주입하고 이미 알고 있는 저항 분포의 함수로써 경계면에 유겨되는 전압은 다음과 같이 Neumann 형의 경계조건을 갖는 비선형 Laplace 방정식으로 기술되며, 본 연구에서는 전극과 내부와의 접촉 저항(contact impedance)을 고려한 완전 전극 모델(complete electrode model)을 고려하였다.

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

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

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

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

여기서 u, ρ, z_l, U_l, v, L 은 각각 내부 노드의 전압, 내부 저항, 전극과 내부와의 접촉 저항, 전극에서의 전압, 법선 벡터, 전극 수이다. 위의 조건에 부가하여, 해의 존재성과 유일성을 보장하기 위하여 다음과 같은 주입 전류와 측정 전압에 대한 조건을 부가한다.

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

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

식 (1)-(6)으로 주어지는 방정식의 해석적인 해는 구하기가 매우 어려우므로, 수치적 방법인 유한 요소법(Finite Element Method; FEM), 유한 차분법(Finite Difference Method; FDM), 경계 요소법(Boundary Element Method; BEM) 등이 사용되고 있으며, 본 연구에서는 FEM을 사용하여 해를 구하고 있다. FEM에서는 계산 영역 Ω 를 매우 작은 요소로 세분화하고 각 요소내의 저항 값이 일정하다고 가정하여, 내부 노드의 전압 u 를 다음과 같이 계산한다.

$$Y u = c \quad (7)$$

여기서, stiffness matrix $Y \in \mathbb{R}^{M \times M}$ 는 내부 저항 분포의 함수로 희박 행렬

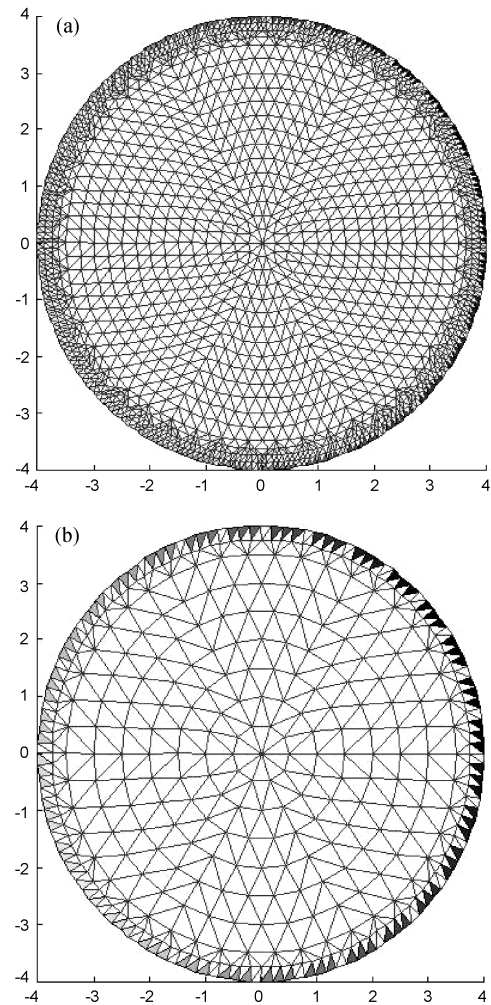


Fig. 2. FEM meshes.

(a) mesh used in forward problem, (b) mesh used in inverse problem.

(sparse matrix)이다. 따라서 위의 대수 방정식을 효과적으로 풀기 위해서는 희박 행렬 해법이 필요하다. $c \in \mathbb{R}^{M \times 1}$ 는 force vector로 주입 전류 패턴(pattern)의 함수이고, M 은 사용한 메쉬의 총 노드수이다. 행렬 Y 와 벡터 c 의 구조는 Vauhkonen[6]에 자세히 주어져 있다. 본 연구에서는 정 문제를 풀기 위해 Fig. 2(a)와 같이 3,104개의 요소(N)와 1,681개의 노드(M)를 갖는 FEM 메쉬를 사용하였고, 역 문제를 풀기 위해 Fig. 2(b)와 같이 776개의 요소(N)와 453개의 노드(M)를 갖는 FEM 메쉬를 사용하였다. 그림에서 주어진 메쉬에서 색이 칠해진 요소는 전극과 접하는 요소를 나타낸다. Fig. 2와 같이 정 문제에서 사용된 메쉬와 역 문제에서 사용된 메쉬가 다른 것은 주어진 방정식을 가능한 정확하게 풀기 위해서는 정밀한 메쉬가 필요하지만, 한정된 정보를 가지고 각 요소에서 저항값을 예측해야 하는 역 문제에서는 정밀한 메쉬를 사용하면 영상 복원의 질이 나빠지기 때문이다.

2-2. 역 문제

계의 경계면에 전극을 통해 주입한 전류 패턴과 경계면의 전극에 유겨되는 전압값을 이용하여 내부의 저항률을 추정하는 과정을 역 문제라 한다. 정적 영상복원 알고리즘에는 주로 Backprojection, Perturbation 법, Double constraint법, Newton-Raphson법 등이 있다. Yorkey 등[7]은 이들 복원 알고리즘들을 비교 분석한 결과 Newton-Raphson법이 다른 알고리즘에 비해 수렴 속도(convergence rate), 잔류 오차(residual error)

등의 측면에서 비교적 좋은 성능을 나타냄을 발표하였다. 그러나, Newton-Raphson법은 비선형 특성의 선형화에 따른 모델링 오차(modeling error), 및 Hessian 행렬의 비정치성(ill-posedness) 때문에 만족스러운 영상을 얻기가 쉽지 않다. 특히, Hessian 행렬의 비정치성은 역 행렬 계산 시 부정확한 결과를 야기시켜 영상복원의 성능을 저하시킨다. 이러한 문제를 완화하기 위하여 본 연구에서는 다음과 같이 주어지는 목적함수

$$\Phi(\rho) = \frac{1}{2}[V(\rho) - U]^T[V(\rho) - U] + \frac{1}{2}\alpha(R\rho)^T(R\rho) \quad (8)$$

을 최소화하는 저항 분포 ρ 를 찾는 regularized Newton-Raphson(rNR)법을 사용하였다. 여기서 $V(\rho) \in \mathcal{R}^{LP}$ 는 가정된 저항 분포 ρ 에서 FEM을 사용하여 P개의 모든 입력 전류 패턴에 대하여 전극에서 유기된 모든 계산 전압의 저장된 값이고, $U=[u_1, u_2, u_3, \dots, u_P]^T \in \mathcal{R}^{LP}$ 는 모든 전류 패턴에 대하여 전극에서 유기된 모든 측정 전압의 저장 값이며, $u_i=(u_i^1, u_i^2, \dots, u_i^L)^T \in \mathcal{R}^L$ 는 i번째 전류 입력 패턴에서 측정된 각 전극에서의 측정 전압이다. 한편, 식 (8)의 α 와 R은 각각 regularization 파라미터와 행렬이다. 따라서, 식 (8)로부터 반복적인 저항률 벡터의 증분은 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta \rho^k = \rho^{k+1} - \rho^k = -(H + \alpha R^T R)^{-1} \{J^T[V(\rho^k) - u] + \alpha R^T R \rho^k\} \quad (9)$$

여기서, Hessian 행렬 H와 Jacobian 행렬 J는 다음과 같이 정의된다.

$$H = J^T J, \text{ and } J = \frac{\partial V_i}{\partial \rho_j}, i = 1, 2, \dots, L \times P, j = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

Regularization 방법에는 계의 특성에 따라 여러 종류가 사용된다. 선형성이 강한 계에 대해서는 $R^T R = \text{diag}(J^T J)$ 로 두는 NOSER 알고리즘[8]과 $R^T R = I$ 로 두는 Levenberg-Marquardt 알고리즘[7]이 많이 사용된다. 본 연구에서는 Vauhkonen 등[6]에 의하여 비선형성이 강한 계에서 그 수렴성이 입증된 first order difference regularization 기법을 사용하였다.

3. EIT 시스템 구성

3-1. EIT 회로 구성

전체 EIT 시스템 회로의 블록 다이어그램이 Fig. 3에 주어지 있다. 컴퓨터와 디지털 컨트롤 보드(digital control board)를 연결하기 위해 범용 인터페이스 카드가 컴퓨터에 내장되어 있고 측정 장치에 대한 모든 제어와 데이터 입/출력은 인터페이스 카드를 통하여 이루어진다. A/D converter의 출력은 12 bits이지만 출력 데이터가 부호를 갖고 있으므로

실제 데이터는 11 bits 만이 유효하다.

각 채널에 대하여 개별적으로 전류 이득(current gain)을 조절할 수 있게 설계되어 있고 전류 출력(current output)과 전압 입력(voltage input) 케이블은 분리되어 쉴딩(shielding)된다. 발진기(oscillator)의 출력은 50 KHz 사인파로 고정되어 있으며 이 신호는 전체 회로에서 가장 중요한 신호 원으로 사용된다.

3-2. 전류 생성 및 전압 측정

전류 생성과 전압 측정을 위한 DAC 칩으로는 PM7645를 사용하였다. 이것은 전류 이득을 디지털 신호로 제어할 수 있게 해준다. 즉, 사인파 전압 신호의 진폭을 조정하여 전압-전류 변환 회로로 입력시킴으로써 최종 전류 신호를 가변시킨다. PM7645와 OP-amp(HA2625)로 이루어진 bipolar operation 회로는 입력되는 디지털 데이터 값에 따라서 진폭이 변화하며 경우에 따라 출력이 임의의 위상차를 갖게 설계되었다.

MUX(multiplexer) 회로의 역할은 32채널을 통해 측정된 전압 신호를 선택적으로 차동 증폭기(differential amplifier)에 연결시켜주는 것이다. 이 회로에서는 DG506, 즉, 16-channel CMOS analog multiplexer 두 개를 사용하였는데, 이 두 개의 칩이 32채널의 측정 신호를 스위칭하는데 사용된다. 이 MUX 회로의 사용에 있어서, 전류 이득이나 전압 이득이 결정된 경우에 측정을 원하는 두 채널만을 디지털 신호로 바꾸어 줌으로써 빠른 측정을 유도해 낼 수 있다.

차동 증폭기 회로는 MUX로부터 입력된 두 신호를 증폭시킨다. 이 회로는 높은 증폭도를 갖는 차동 증폭기로 설계되지는 않았으나 높은 입력 임피던스를 가지고 각 채널에서 입력되는 신호에 대해 중간 회로에서 발생하는 여러 임피던스 성분에 의한 왜곡을 최소화할 수 있어 본 시스템에 사용되었다.

복조기(demodulator)에는 여러 가지가 있으나, 본 시스템에서는 AD630을 사용하여 측정된 신호를 정류된 신호로 바꾸어 준다. 측정된 신호가 증폭기를 거쳐 AD630으로 입력되기 이전에 디지털 신호에 의해 진폭을 조절할 수 있도록 PM7645의 single operation을 사용한다. 측정된 신호 V_p (peak voltage)가 6 V 이상이면 정류된 신호가 측정범위를 넘어서 잘리게 되므로 PM7645를 이용하여 진폭을 조절해 준다.

필터(filter)로는 four-pole Bessel filter를 사용하였다. Bessel filter는 다른 필터에 비해 스텝 응답 시간(step response time)이 매우 짧기 때문에 고속 측정이 요구되는 본 시스템에 사용하였다. 본 시스템에 사용한 Bessel filter의 스텝 응답시간은 약 400 μ s 정도이다. 가장 빠른 응답 시간을 위한 f_c (corner frequency)는 100 KHz이지만 리플(ripple)이 100 KHz

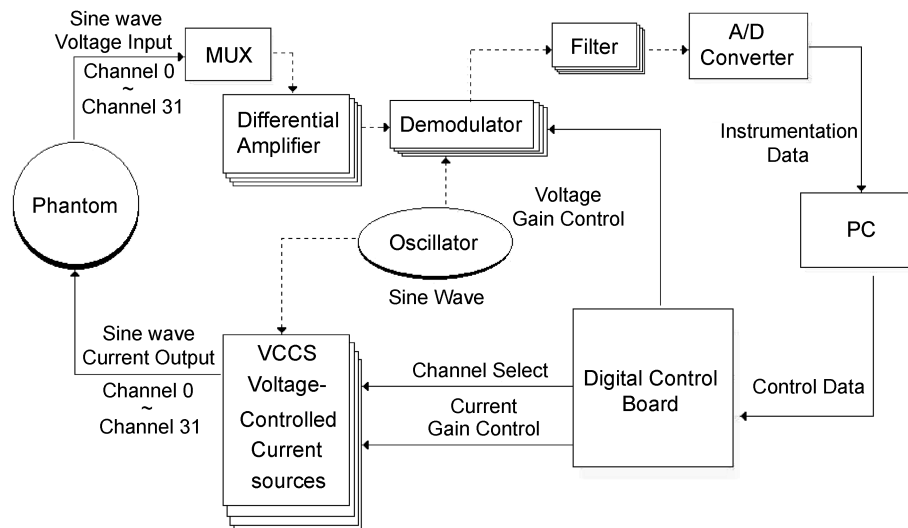


Fig. 3. Block diagram of EIT system.

이므로 복조기의 회로에서는 좀더 낮은 f_c 를 갖도록 설계되었다. 이는 컴퓨터의 비디오 펄스와 같은 다른 소스들로 인한 에러를 방지하기 위한 것이다. 복조기 회로는 증폭도가 1이 되도록 설계되었으며 회로에 표기된 저항과 콘덴서의 값은 될 수 있으면 정확히 일치시켜야 한다. 필터 회로는 아날로그 회로의 최종 출력단에 있으므로 여기서의 작은 오차는 전체 시스템의 오차가 되기 때문에 주의를 요해야 한다.

A/D 변환기(converter)로 사용된 AD574A는 35 μ s의 최대 변환 시간을 갖는 12-bit A/D 변환기로서 디지털 제어 신호에 의해 쉽게 bipolar 또는 unipolar operation이 가능하고 입력되는 아날로그 신호의 최대치는 10 V와 5 V 중에서 선택할 수 있게 된 칩이다.

3-3. Phantom과 전극 구성

본 실험에서는 원통형 phantom을 사용하였다. Phantom의 높이는 330 mm이고, 내경이 80 mm의 실린더 모양으로 재질은 플라스틱으로 되어 있다. 전극은 phantom 내에 삽입이 되어 있어 phantom 내의 전해질과 접촉이 되어 있으며, 전극의 길이는 200 mm이고 너비는 6 mm이다. 본 실험에서 사용된 전극의 재질은 stainless steel로 11.25° 간격으로 phantom 내면에 균일하게 설치되어져 있다.

EIT에 사용되는 전극은 유동장과 접촉하기 때문에 접촉 저항을 최소화하기 위해 전극 표면을 매끄럽게 하여 전도도가 최대한 보장되도록 설계하였다. 그리고 phantom 내부로 돌출되지 않도록 전극의 크기에 맞게 phantom 내부 홈을 파서 전극간의 영향을 최소화하고, 불필요한 부분이 유동장에 노출되지 않도록 설치하였다.

본 연구에서 사용되는 EIT 시스템의 데이터 취득 속도는 100 frames/s 정도이고, 주입하는 전류의 밀도의 최대치는 이고 측정되는 전압의 최대치는 0.5 V 정도이다. 즉 초당 100개 정도의 정적 영상을 얻을 수 있는 데이터를 취득할 수 있다. 따라서 유동장이 전기장에 노출되는 시간은 0.01초 정도이고 그때의 최대 전위차가 0.5 V 정도이다. 따라서 이 정도의 데이터 취득 속도와 전기장 이면 통상적인 화학공정에서 유동장을 가시화하는데 별 문제가 없을 것이다.

4. 실험결과

EIT의 영상 복원의 질은 내부의 저항 분포, 주입 전류 패턴, 측정 오차 등에 영향을 받게 된다. 본 연구에서 사용된 알고리즘의 정적 영상 복원 성능을 검증하기 위해, 전극 수 $L=32$ 개를 갖는 phantom 내에 농도가 0.15%인 소금물을 채우고, 직경이 10 mm와 30 mm인 플라스틱

막대의 저항체를 이용하여 여러 경우의 분산상을 만들었다. 본 연구에서 사용된 실험 장치의 입출력 시간이 수 ms 정도로 아주 짧으므로, 비록 고정된 플라스틱 막대를 사용하지만 액체 속을 이동하는 기포와 같은 효과를 낼 수 있을 것으로 가정하여 실험을 하였다. 본 실험에서 사용된 소금물의 저항률은 약 333 Ω cm로 측정되었다.

4-1. 주입 전류 패턴 및 전압 측정 방법

전류를 주입하고 전압을 측정하는 방법에는 neighboring method, cross method, opposite method, multireference method 및 adaptive method 등 여러 방법이 있다. 각 방법의 특성은 Webster[1]에 자세히 설명되어 있다. 본 연구에서는 이 방법들 중 내부 불균일성의 변별력이 가장 우수한 것으로 알려진 adaptive method(trigonometric method)를 사용하였다. 이 방법은 32개의 전극에 각기 상이한 전류를 주입하되 전체적으로 전류의 세기 분포를 삼각함수 꼴로 만드는 것이다.

본 연구에서 사용된 삼각함수형의 전류 패턴은 다음과 같다.

$$I_k(1) = \begin{cases} \cos(k\theta_1) & 1 = 1, \dots, 32, k = 1, \dots, 16 \\ \sin((k-16)\theta_1) & 1 = 1, \dots, 32, k = 17, \dots, 31 \end{cases} \quad (11)$$

여기서, $\theta_1 = 2\pi/32$ 이다.

4-2. 실험 데이터의 영상 복원 및 토의

본 연구에서 사용된 영상 복원 알고리즘의 성능을 다음과 같은 3가지 경우에 대하여 시험하였다. Case 1은 중심부에 직경이 30 mm인 한 개의 분산상(막대)이 존재하는 경우이고, Case 2는 직경이 30 mm인 한 개의 분산상이 경계면 근방에 위치하는 경우이며, Case 3은 직경이 10 mm인 두 개의 분산상 모두 경계면 근방에 위치하는 경우이다. 각 경우에서의 막대의 위치와 복원된 영상은 각각 Fig. 4-6에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, 연속상(소금물)의 저항률 값은 300 정도로 비교적 정확하게 복원되고 있고, 분산상(막대)의 중심이 어디에 존재하는 지는 확실하게 추정하고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 실험은 비교적 정밀하게 진행되었다고 할 수 있다. 하지만 상 경계에서는 복원된 저항률 분포의 질이 떨어짐을 알 수 있다. 이러한 현상은 EIT 영상 복원의 경우에서 다음과 같은 이유 때문에 항상 나타나는 현상이다. 즉, 본 연구에서 사용하는 32 전극 시스템에서 얻을 수 있는 독립적인 정보의 수는 ${}_{32}C_2 = (32 \times 31) / 2 = 496$ 개이지만 영상 복원에서 사용되는 요소(pixel)의 수는 776개이다. 따라서 각 요소에서의 저항값을 정확하게 정해주기에는 정보의 수가 훨씬 부족하게 되어 영상 복원의 질이 떨어지게 된다. 계의 경계에서 영상 복

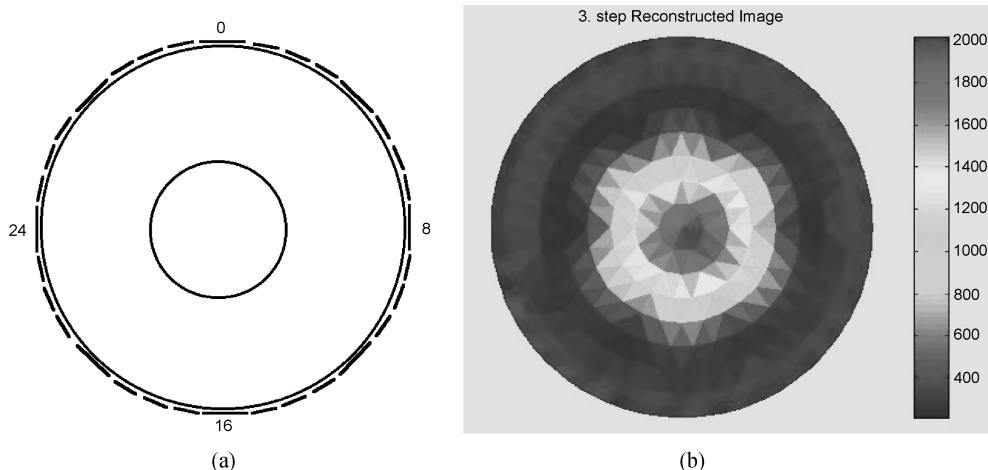


Fig. 4. Experimental condition and reconstructed image for Case 1.

(a) position of dispersed phase, (b) reconstructed impedance distribution.

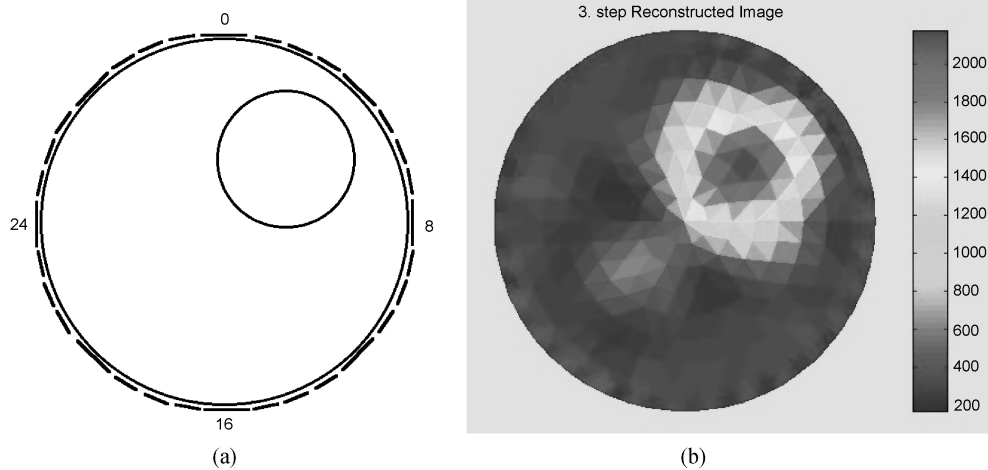


Fig. 5. Experimental condition and reconstructed image for Case 2.

(a) position of dispersed phase, (b) reconstructed impedance distribution.

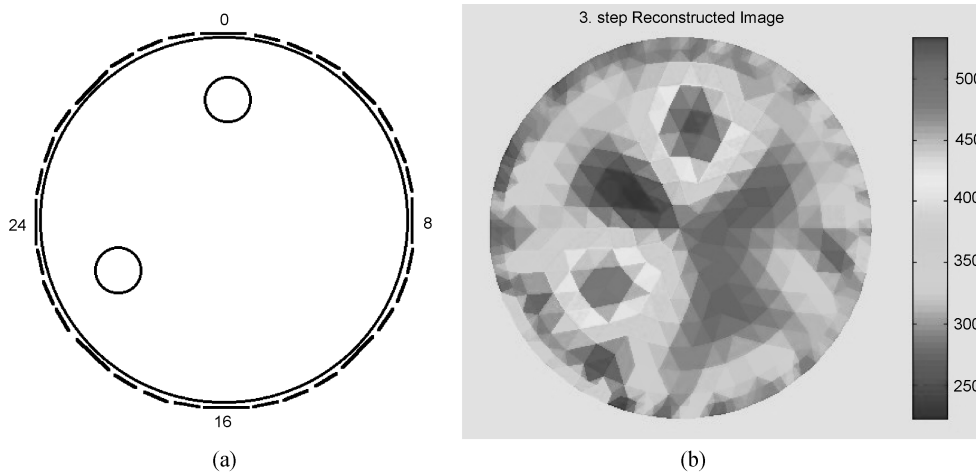


Fig. 6. Experimental condition and reconstructed image for Case 3.

(a) position of dispersed phase, (b) reconstructed impedance distribution.

원의 질이 특히 떨어지는 이유는 계의 경계에서의 불연속성 때문에 비선형성이 강하게 나타나고, 실제 실험에서의 상의 경계와 영상 복원에서의 요소들의 경계가 일치하지 않아서 한 요소가 두 상에 걸쳐서 존재하는 경우가 생기므로 상 경계에서의 영상 복원의 질이 나빠지게 된다.

5. 결 론

EIT 기법을 이용하여 이상 유동의 가시화를 위한 영상 복원 알고리즘을 개발하였고 특정한 신호 전류를 발생시키고 전압을 측정하는 회로들로 구성된 EIT 측정 시스템을 설계 제작하였다. 역 문제의 비정칙성 (ill-posedness) 문제를 완화하기 위한 first order difference regularization을 이용한 영상 복원 알고리즘과 내부 불균일성의 변별력이 우수한 삼각함수형 전류 패턴을 주입하는 EIT 시스템을 결합하여 이상 유동의 가시화 가능성을 검증하였다. 몇 가지 경우에 대해 실험결과를 이용하여 복원된 영상은 이상 유동의 분포를 비교적 잘 보여 주었으나 상 경계에서는 복원된 영상의 질이 떨어졌다.

감 사

이 연구는 과학기술부의 “이상 유동장 가시화를 위한 ET(Electrical

tomography) 기법 개발” 과제에 의해 지원되었습니다.

참고문헌

1. Webster, J. G. (Ed.): “Electrical Impedance Tomography,” Adam Hilger, Bristol, England(1990).
2. Newell, J. C., Gisser, D. G. and Isaacson, D.: *IEEE Trans. Biomedical Eng.*, **35**, 828(1987).
3. Li, L. and Wei, J.: *AIChE J.*, **45**, 1855(1999).
4. McKee, S. L.: Ph.D. Dissertation, UMIST, Manchester, England(1994).
5. Abdullah, M. Z.: Ph.D. Dissertation, UMIST, Manchester, England (1993).
6. Vauhkonen, M.: Ph.D. Dissertation, Kuopio University, Finland(1997).
7. Yorkey, T.J., Webster, J.G. and Tompkins, W.J.: *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, **34**, 843(1987).
8. Cheney, M., Isaacson, D., Newell, J. C., Simske S. and Goble, J.: *Int. J. Imag. Syst., Technol.*, **2**, 66(1990).