2000 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

정적 EIT 영상복원 시스템의 구현

Implementation of Static EIT Image Reconstruction System

김봉석, 현종관, 이보안, 김경연, 김민찬, 이헌주

제주대학교
제주도 제주시 아라1동 1번지

요약

EIT(Electrical impedance tomography) 시스템은 전기적 신호에 의해 미지의 물체 내부의 저항률 분포 및 표적을 추정하는데 사용되는 장치이다. 본 연구에서는 전류 발생 및 전압을 측정하는 회로들로 구성된 EIT 측정 시스템을 설계 제작하였다. 그리고, EIT 측정 시스템으로부터 얻은 측정 전압을 데이터로 사용하여 Regularized modified Newton-Raphson(rmNR) 알고리즘을 적용시켜, 내부의 표적을 추정하였다. 실제 제작된 EIT 측정 시스템의 실험 데이터를 이용한 rmNR의 영상복원 성능을 검증하였고 여러 경우에 대하여 만족스러운 결과를 얻었다.

Abstract

EIT(Electrical impedance tomography) system is one of instruments, which estimates the inner resistivity (impedance) distribution of the unknown object and targets by using electrical signal. In this study, we developed the EIT measurement system which was composed of current generation and voltage measurement circuits. By applying the regularized modified Newton-Raphson(rmNR) algorithm to the measured voltage from EIT system, we can get the reconstructed images in the cavity for various cases.

1. 서론

EIT(Electrical impedance tomography)는 시스템 구현 시에 하드웨어 비용이 비교적 저렴하고, 측정 대상물에 대한 비파괴(Nonintrusive) 특성을 가지고 있으므로 화공학, 지질학(geology) 및 재료공학 등에서 모니터링 도구로 주목받고 있다. 특히, X-ray 및 MRI 단층촬영법에 비해 아직 복원된 영상의 해상도는 떨어지지만, 인체에 대한 안정성이 뛰어나므로 의공학 분야의 보조장비로 사용되고 있으며 앞으로 그 이용범위가 확대될 것으로 판단된다[1]-[3].

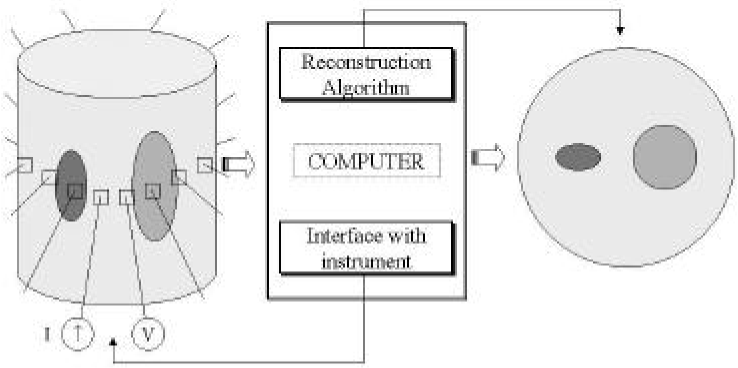


그림 1 EIT 영상복원 시스템의 개요

그림 1은 EIT의 영상복원(Image reconstruction) 시스템의 개요를 나타내고 있다. EIT 시스템은 크게 신호를 입력하고 측정하는 하드웨어부와 측정된 전압을 이용하여 표적의 저항률 분포를 계산하는 영상복원 알고리즘으로 구성된다. EIT의 영상복원 과정은 크게 두 가지 계산과정의

반복연산으로 이루어진다. 첫 번째 과정으로는, 표적의 경계면에서 여러 개의 전극을 통해 전류를 주입하고 저항률(Resistivity)의 함수로써 경계면에 유기되는 전압을 계산하는 순방향 문제(Forward problem)이다. 이는 Neumann 형의 경계조건을 갖는 비선형 Laplace 방정식으로 기술되며, 그 해석적(Analytical)인 해를 구하기가 매우 어려우므로 수치적(Numerical) 방법인 유한 요소법(Finite element method) 또는 경계 요소법(Boundary element method)으로 근사해를 구한다. 두 번째 과정으로는 역으로 경계면에 유기된 전압 값을 이용하여 표적 내부의 저항률 분포를 추정(Estimation)하고 표적의 영상을 복원하는데, 이를 역방향 문제 (Inverse problem)라고 한다.

그리고, EIT의 영상복원 방법으로, 지금까지 연구의 대부분을 차지하는 정적(Static) 복원 방법은 경계면에 주입한 모든 전류패턴(Current pattern)에 의해 유기된 모든 전압 값을 측정한 후 컴퓨터의 메모리에 저장하여 Off-line으로 저항률의 분포를 추정한다. 정적 복원 방법은 측정 정보가 풍부하므로 추정 정확도는 개선되지만, 다소 컴퓨터의 계산부담(Computational load)이 많아 영상복원이 느리고 실시간(Real-time) 복원은 불가능하다는 단점이 있다.

정적 영상복원 알고리즘에는 주로 Backprojection, Perturbation 법, Double constraint 법, Newton-Raphson 법 등이 있으며, 특히 Yorkey 등[4]은 이들 복원 알고리즘들을 비교 분석한 결과 modified Newton-Raphson(mNR) 법이 다른 알고리즘에 비해 수렴 속도(Convergence rate), 잔류오차(Residual error) 등의 측면에서 비교적 좋은 성능을 나타냄을 확인하였다.

그러나, 실제 상황에서 mNR 법은 비선형 특성의 선형화에 따른 모델링 오차(Modeling error), 및 Hessian 행렬의 Ill-posedness 특성들 때문에 만족스러운 영상을 얻기가 쉽지 않다. 특히, Hessian 행렬의 Ill-posedness는 역행렬 계산시 부정확한 결과를 야기시켜 영상복원의 성능을 저하시킨다. 이러한 문제를 완화하기 위하여 Regularization 기법을 사용한 Regularized mNR(rmNR) 알고리즘을 사용하였고, 본 실험을 위해 전류 발생 및 전압을 측정하는 회로들로 구성된 EIT 측정 시스템을 설계 제작하였으며, 이 시스템으로부터 측정된 전압 데이터를 rmNR 알고리즘에 적용시켜 몇 가지 경우에 대해 영상을 복원해 보았다.

2. 하드웨어 구성

2.1 EIT 회로 구성

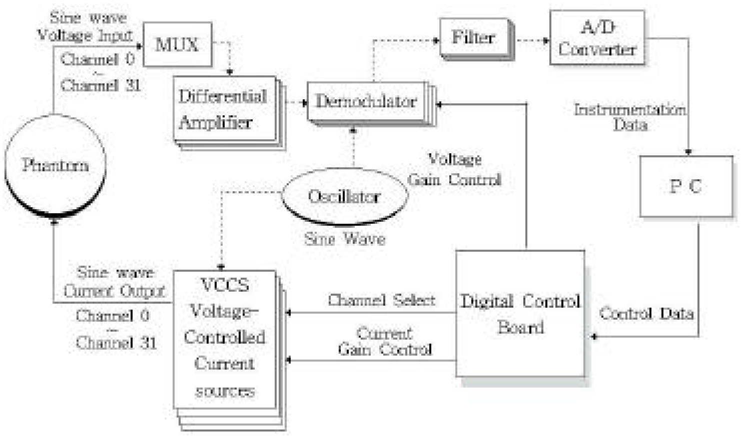


그림 2 EIT 시스템의 블록 다이어그램

그림 2는 전체 EIT 시스템 회로의 블록 다이어그램을 나타내고 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 50KHz 사인파로 고정되어 있으며 이 신호는 전체 회로에서 가장 중요한 신호원으로 사용된다. 본 실험에서는 미국 Wisconsin 주립대학에서 제작한 회로에서 발진기 회로 부분을 수정하여 시스템을 제작하고 실험을 하였다.

2.2 전류 생성(Current Generation) 및 전압 측정(Voltage Measurement)

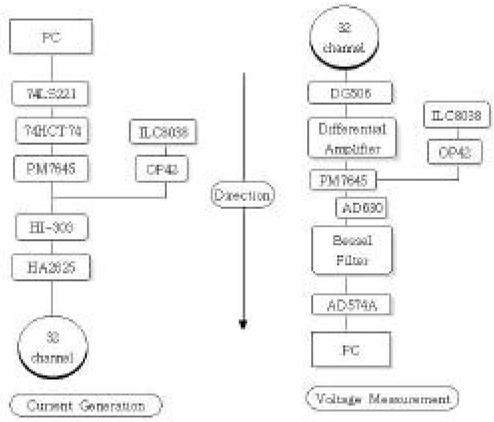


그림 3 전류 생성(Current generation) 과 전압 측정(Voltage measurement) 회로

그림 3은 전류 생성과 전압 측정을 위한 회로를 나타낸 것이다. DAC 칩으로는 PM7645를 사용하였다. 이것은 전류 이득을 디지털 신호로 제어할 수 있게끔 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 스위칭 하는데 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 6V 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 400μs 정도이다. 가장 빠른 응답 시간을 위한 f_c(Corner frequency)는 100KHz이지만 리플(Ripple)이 100KHz이므로 복조기의 회로에서는 좀더 낮은 f_c를 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 converter로 사용된 AD574A는 35μs의 최대 변환 시간을 갖는 12-bit A/D converter로서 디지털 제어 신호에 의해 쉽게 Bipolar 또는 Unipolar operation이 가능하고 입력되는 아날로그 신호의 최대치는 10V와 5V 중에서 선택할 수 있게 된 칩이다.

2.3 Phantom과 전극 구성

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

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

2.4.Control Software

실험 데이터를 측정하기 위한 알고리즘의 흐름도는 그림 4와 같다.

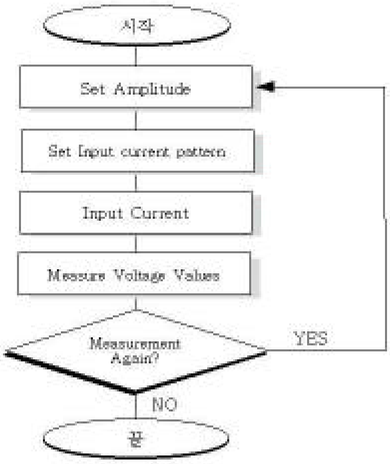


그림 4 Data acquisition을 위한 흐름도

Phantom 내부의 Impedance를 알아내기 위해서는 각각의 전극에 전류패턴을 이용해서 전류를 주입하고 전극을 통해 전압을 측정한다. 먼저 주입 전류의 진폭(Amplitude)을 결정하고 알맞는 전류패턴을 결정한 후, 그 전류패턴에 맞게 전류를 주입하고 전극을 통해 전압을 측정하면 된다. 이 때 측정되는 전압은 임의의 전극을 Ground로 잡아 측정을 한다.

3. EIT 복원 알고리즘(Reconstruction Algorithm)

3.1 순방향 문제(Forward Problem)

표적의 경계면에 여러 개의 전극을 통해 전류를 주입하고 이미 알고 있는 저항률의 함수로써 경계면에 유기되는 전압은 다음과 같이 Neumann 형의 경계조건을 갖는 비선형 Laplace 방정식으로 기술되며, 본 실험에서는 전극과 내부와의 접촉저항(Contact impedance)을 고려한 완전전극모델(Complete electrode model)을 고려하였다.

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

$$u + z_l \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial n} = U_l \quad \text{on } e_l,\ l=1, 2, \dots, L \tag{2}$$

$$\int_{e_l} \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial n} dS = I_l \quad l=1, 2, \dots, L \tag{3}$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial n} = 0 \quad \text{on } \partial\Omega \setminus \bigcup_{l=1}^{L} e_l \tag{4}$$

여기서 u, r, z_l, U_l, n, L은 각각 내부 노드전압, 내부 저항률, 전극과 내부와의 접촉저항, 전극에서의 전압, 법선 벡터, 전극 수이다. 위의 조건에 부가하여, 해의 존재성과 유일성을 보장하기 위하여 다음과 같은 주입 전류와 측정 전압에 대한 조건을 부가한다.

$$\sum_{l=1}^{L} I_l = 0 \tag{5}$$

$$\sum_{l=1}^{L} U_l = 0 \tag{6}$$

식 (1)-(4)의 Neumann 형의 경계조건을 갖는 비선형 Laplace 방정식의 해석적인 해는 구하기가 매우 어려우므로, 수치적 방법인 유한 요소법(FEM), 유한 차분법(Finite difference method), 경계요소법 등이 사용되고 있으며, 본 논문에서는 FEM을 사용하여 해를 구하고 있다. FEM에서는 계산 영역 Ω를 매우 작은 요소로 세분하고 각 요소내의 저항률 값이 일정하다고 가정하여, 내부의 노드전압 u를 다음과 같이 계산한다.

$$Yu = c \tag{7}$$

여기서, $Y \in \Re^{M \times M}$는 Stiffness matrix로 내부 저항률 분포의 함수이며, $c \in \Re^{M \times 1}$는 입력 주입 전류의 함수이고, M은 FEM의 총 노드수이다.

3.2 역방향 문제(Inverse Problem)

목표물의 경계면에 전극을 통해 주입한 전류패턴과 경계면의 전극에 유기되는 전압값을 이용하여 내부의 저항률을 추정하는 과정을 역방향 문제라고 하는데, 본 논문에서는 Regularized mNR(rmNR) 법을 사용하였다. 따라서, 표적 내부의 저항률이 변하지 않는 정적 영상을 복원하기 위하여, 다음과 같이 주어지는 목적함수

$$F(r) = \tfrac{1}{2}[V(r) - U]^T [V(r) - U] + \tfrac{1}{2} a (Rr)^T (Rr) \tag{8}$$

을 최소화하는 저항 분포 r를 찾는다. 여기서 $V(r) \in \Re^{LP}$는 가정된 저항 분포 r에서 FEM을 사용하여 P개의 모든 입력 전류 패턴에 대하여 전극에서 유기된 모든 계산 전압의 저장된 값이고, $U = [u_1, u_2, u_3, \ldots, u_P]^T \in \Re^{LP}$는 모든 전류패턴에 대하여 전극에서 유기된 모든 측정 전압의 저장 값이며, $u_i = (u_i^1, u_i^2, \ldots, u_i^L)^T \in \Re^L$는 i번째 전류 입력 패턴에서 측정된 각 전극에서의 측정 전압이다. 한편, 식 (8)의 a와 R은 각각 regularization 파라미터와 행렬이다. 따라서, 식 (8)로부터 반복적인 저항률 벡터의 증분은 다음과 같이 주어진다.

$$Dr^k = r^{k+1} - r^k = -(H + aR^T R)^{-1} \{ J^T [V(r^k) - u] + aR^T R r^k \} \tag{9}$$

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

$$H = J^T J, \text{ and } J = \frac{\partial V_i}{\partial r_j}, \quad i = 1, 2, \ldots, L \times P, j = 1, 2, \ldots, N \tag{10}$$

Rensselaer Polytechnic Institute의 NOSER 알고리즘[5]에서는 $R^T R = diag(J^T J)$로 두고, Levenberg-Marquardt 알고리즘에서는 $R^T R = I$ 로 두고 있다. 본 논문에서는 Vauhkonen 등[6]에 의하여 그 수렴성이 입증된 Subspace regularization 기법을 사용하였다.

4. 실험결과

rmNR 알고리즘의 정적 영상복원 성능을 검증하기 위해, 전극 수 L=32개를 갖는 Phantom 내에 농도가 0.15%인 소금물(NaCl)을 채우고, 직경이 10mm와 30mm인 플라스틱 봉의 저항체를 이용하여 여러 경우의 표적을 만들었다. 본 실험에서의 소금물의 저항률은 약 333 Ωcm로 측정되었다.

4.1 전류 패턴의 주입방법

전류 주입방법에 있어서 내부 불균일성의 변별력이 가장 우수한 것으로 알려진 Adaptive method (Trigonometric method)을 사용하였다. 이 방법은 32개의 전극에 각기 상이한 전류를 주입하되 전체적으로 전류의 세기 분포를 삼각함수 꼴로 만드는 것이다.

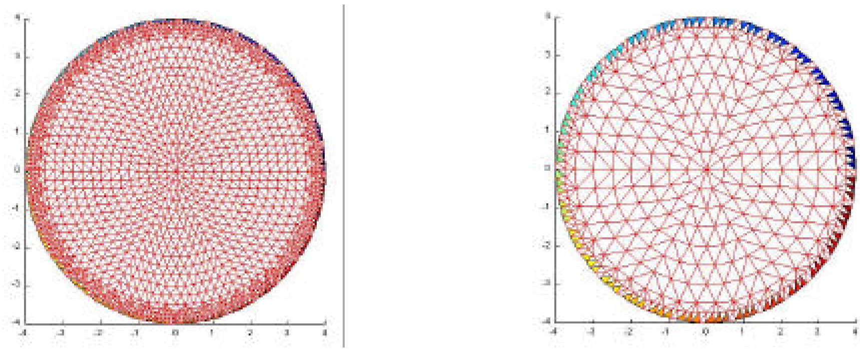
본 실험에서 사용된 Trigonometric 전류패턴은 다음과 같다.

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

여기서, $q_l = 2pl/32$ 이다.

4.2 실험 데이터의 시뮬레이션

rmNR 알고리즘의 정적 영상복원 성능을 다음과 같은 3가지 시나리오(scenario)로 설정하였다. Case 1은 중심부에 직경이 30mm인 한 개의 표적이 존재하는 경우이고, Case 2는 직경이 30mm인 한 개의 표적이 경계면 근방에 위치하는 경우이며, Case 3은 직경이 10mm인 두 개의 표적 모두 경계면 근방에 위치하는 경우이다. 이 때, Regularization 파라미터 a=0.001로 설정하였으며, 순방향 문제를 풀기 위해 그림 5(a)와 같이 3104개의 원소(N)와 1681개의 노드(M)를 갖는 FEM mesh를 사용하였고, 역방향 문제를 풀기 위해 그림 5(b)와 같이 776개의 원소(N)와 453개의 노드(M)를 갖는 FEM mesh를 사용하였다.



(a) 순방향 문제 해결을 위한 mesh (b) 역방향 문제 해결을 위한 mesh

그림 5 FEM mesh

(1) Case 1에 대한 영상복원 결과

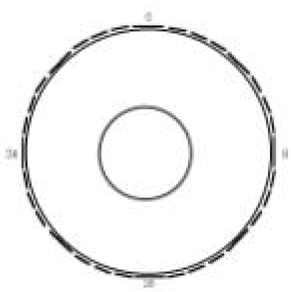
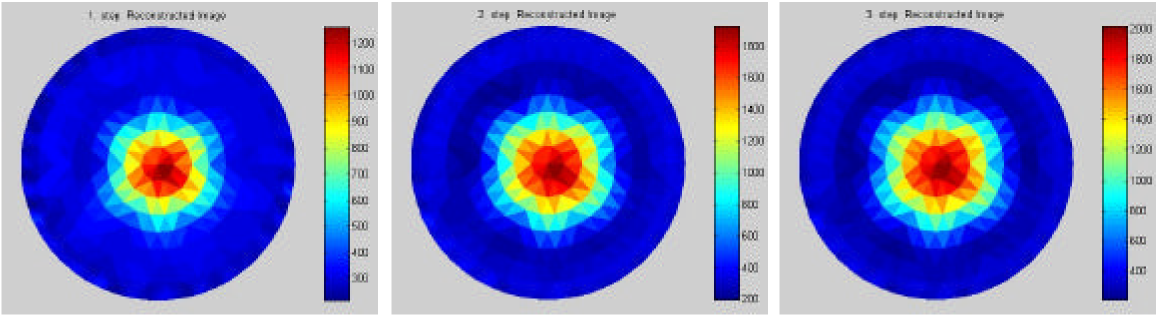


그림 6 중심부에 한 개의 표적이 존재하는 경우

그림 6은 중심부에 직경이 30mm인 한 개의 표적이 존재하는 경우이다. rmNR 알고리즘을 3번 반복연산(Iteration)한 결과, 그림 7의 복원 영상을 얻었다. 그림 7에서 알 수 있듯이, 표적이 어디에 존재하는 지를 확실하게 추정하고 있음을 확인할 수 있다.



(a) 1 step (b) 2 step (c) 3 step

그림 7 Case 1에 대한 복원 영상

(2) Case 2에 대한 영상복원 결과

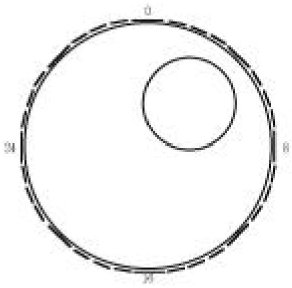
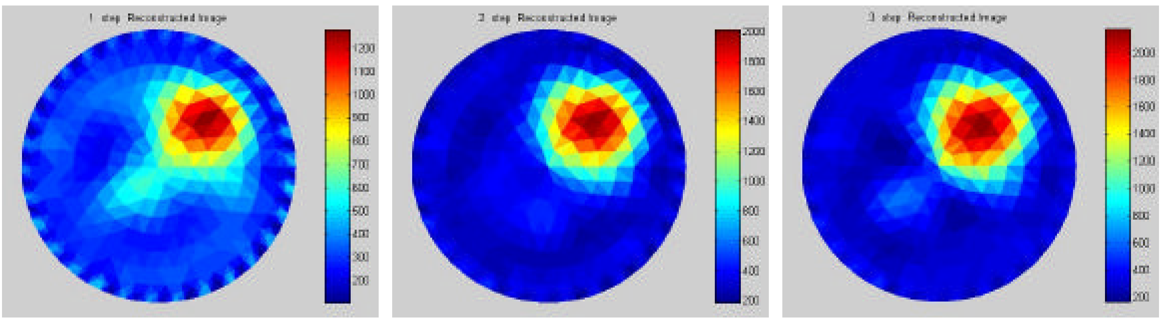


그림 8 한 개의 표적이 경계면 근방에 위치하는 경우

그림 8은 직경이 30mm인 한 개의 표적이 경계면 근방에 위치하는 경우이다. rmNR 알고리즘을 3번 반복연산(Iteration)한 결과, 그림 9의 복원 영상을 얻었다. 그림 9에서 알 수 있듯이, 표적이 어디에 존재하는 지를 확실하게 추정하고 있음을 확인할 수 있다.



(a) 1 step (b) 2 step (c) 3 step

그림 9 Case 2에 대한 복원 영상

(3) Case 3에 대한 영상복원 결과

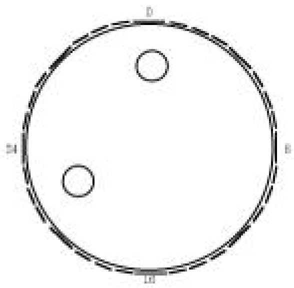
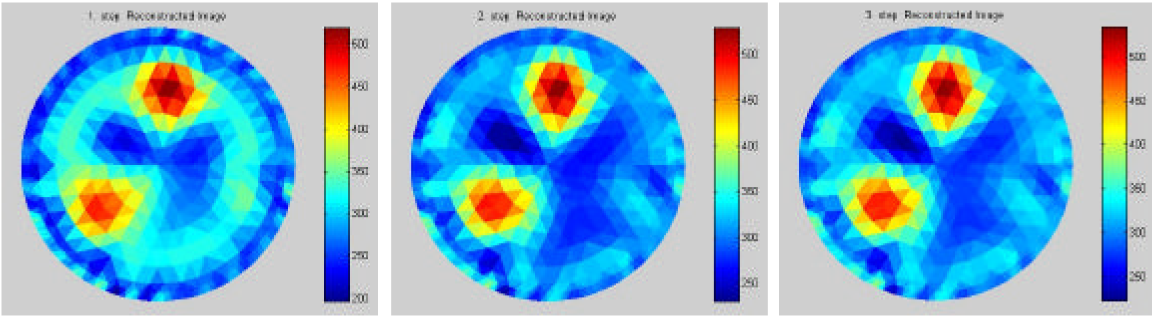


그림 10 두 개의 표적 모두 경계면 근방에 위치하는 경우

그림 10은 직경이 10mm인 두 개의 표적 모두 경계면 근방에 위치하는 경우이다. rmNR 알고리즘을 3번 반복연산(Iteration)한 결과, 그림 11의 복원 영상을 얻었다. 그림 11에서 알 수

있듯이, 표적이 어디에 존재하는 지를 확실하게 추정하고 있음을 확인할 수 있다.



(a) 1 step (b) 2 step (c) 3 step

그림 11 Case 3에 대한 복원 영상

5. 결론

특정한 신호 전류를 발생시키고 전압을 측정하는 회로들로 구성된 EIT 측정 시스템을 설계 제작하였다. 제작된 EIT 시스템에 주입시킬 전류 주입방법으로는 내부 불균일성의 변별력이 우수한 Adaptive method(Trigonometric method)을 사용하였고, 이에 유기되는 각 전극에서 의 전압을 측정하여 시뮬레이션에 이용하였다.

그리고, 영상복원을 위한 Ill-posedness 문제의 해결을 위해 rmNR 알고리즘을 사용하였다. 이 알고리즘을 이용한 정적 영상복원은 앞 절에서 확인한, 몇 가지 경우에 대해 본 실험에서 만족스러운 결과를 보였다.

따라서, 실제 제작된 EIT 측정 시스템의 실험 데이터를 이용한 rmNR의 영상복원 성능을 검증하였다.

Acknowledgements

이 연구는 한국 과학기술부에서 지원된 "이상유동장 가시화를 위한 ET(Electrical tomography) 기법 개발" 연구과제에 의해 지원되었다.

6.참고문헌

[1] Webster J. G., ed., Electrical Impedance Tomography, Adam Hilger, 1990
[2] Newell J. C., Gisser D. G., and Isaacson D., "An Electric Current Tomograph," IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. 35, No. 10, pp. 828-833, 1987
[3] Cheney M., Isaacson D., and Newell J. C., "Electrical Impedance Tomography," SIAM Review, Vol. 41, No. 1, pp. 85-101, 1999
[4] Yorkey T. J., Webster J. G., and Tompkins W. J., "Comparing Reconstruction Algorithms for Electrical Impedance Tomography," IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol.34, No.11, pp.843-852, 1987
[5] Cheney M., Isaacson D., Newell J. C., Simske S., and Goble J., "NOSER: An Algorithm for Solving the Inverse Conductivity Problem," Int. J. Imag. Syst., Technol., Vol. 2, pp. 66-75, 1990
[6] Vauhkonen M., Vadasz D., Karjalainen P. A., and Kaipio J. P., "Subspace Regularization Method for Electrical Impedance Tomography," 1st International Conference on Bioelectromagnetism, Tampere, Finland, pp. 9-13, 1999
[7] Owen C. Jones, ed., Development of an Electrical Impedance Computed Tomographic Two-Phase Flows Analyzer, 1998
[8] Shollenberger K. A., Torczynski J. R., Adkins D. R., O'Hernm T. J., and Jackson N. B., "Gamma-Densitometry Tomography of Gas Holdup Spatial Distribution in Industrial-Scale Bubble Columns," Chem. Eng. Sci. Vol. 52, pp. 2037-2048, 1997
[9] Ovacik L., Lin J-T., and Jones O. C., "Progress in Electrical Impedance Imaging of Binary Media : 1 : Analytical and Numerical Methods," 1997 OECD/CSNI Specialists Meeting on Advanced Instrumentation, Santa Babara, CA, pp. 17-20, 1997
[10] Woo E. J., Finite Element Method and Reconstruction Algorithms in Electrical Impedance Tomography, 1990

[11] Savolaine T., Kaipio J. P., Vauhkonen M., and Karjalainen P. A., "An EIT Measurement System for Experimental Use," University of Kuopio, Department of Applied Physics Report Series ISSN 0788-4672, Report No. 2/96, 1996
[12] 조경호, 김신, 이윤준, "전기임피던스 영상에 의한 2상 유동에서의 기분분포의 가시화," 한국원자력학회 '98 춘계학술발표회 논문집 Vol. (I), pp. 457-462, 1998