

주입전류 패턴에 따른 EIT 방광 모니터링 시스템의 성능분석

Performance analysis of EIT bladder monitoring system according to input current patterns

한 유 정*, Anil Kumar Khambampati, 김 경 연*★

You-Jung Han*, Anil Kumar Khambampati, Kyung-Youn Kim*★

Abstract

Current clinical methods for diagnosing urination disorder are invasive, expensive, and very inconvenient to perform continuous monitoring. EIT is a non-invasive technique that injects electrical current through an external electrodes and measures the induced voltage to visualize the internal electrical (impedance) characteristics, which makes it possible to monitor bladder conditions with low cost. The signal characteristics of the measured voltage data changes according to the current pattern injected through the electrode and affects reconstruction performance. In this paper, image reconstruction performance is compared and analyzed according to the injected current patterns to maximize the sensitivity to the variation of bladder size.

요 약

현재 배뇨 장애를 진단할 수 있는 대표적인 임상 방법들은 침습적이고 고가이며, 장시간 연속적인 모니터링을 수행하기에는 한계가 있다. EIT는 비침습적 방법으로 외부 전극을 통하여 전류를 주입하고 유기된 전압을 측정하여 내부 전기적(임피던스) 특성을 영상화 하는 기술로써, 저렴한 비용으로 방광의 상태를 모니터링 할 수 있는 유용한 기법이 될 수 있다. 전극을 통하여 주입된 전류 패턴에 따라 측정전압 데이터의 신호특성이 달라지고 영상 복원 성능에 영향을 미친다. 본 논문에서는 인체 하복부 부근에 위치한 방광의 크기 변화에 대한 민감도가 극대화될 수 있는 모델링을 위해 입력전류 패턴에 따른 영상 복원 성능을 분석하였다.

Key words : electrical impedance tomography, bladder monitoring, bladder size, input current pattern, adjacent pattern, opposite pattern, trigonometric pattern, reference pattern

* Faculty of Applied Energy System, Major of Electronic Engineering, JeJu National University

★ Corresponding author

E-mail : kyungyk@jejunu.ac.kr, Tel : +82-64-754-3664

※ Acknowledgment

This research was supported by the 2018 scientific promotion program funded by Jeju National University

Manuscript received Mar. 8, 2019; revised Mar. 22, 2019; accepted Mar. 25, 2019.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

배뇨 장애는 일상생활에 불편함을 초래할 뿐만 아니라 방광과 연결된 요관, 신우, 신장 등의 다른 장기로의 감염 위험을 높이고 합병증 등을 유발할 수 있다. 따라서, 배뇨 장애의 진단과 치료, 또는 수술 후의 환자를 간호하기 위해서는 현재의 방광 상태(요량 또는 방광크기)의 지속적 모니터링이 필요하다. 현재의 방광 상태, 즉 배뇨 장애를 진단할 수 있는 대표적인 임상 방법들은 요도를 통해 내시경 등을 방광 안으로 삽입하는 침습적 방법이다. 침습

적 방법은 방광 내에 직접 삽입하기 때문에 방광의 상태와 기능을 정확하게 진단할 수 있으나, 환자의 고통을 유발하며 방광수축, 상처, 감염과 같은 합병증을 유발할 수 있다. 비침습적인 방법에는 초음파 영상기법이 있으나 이는 고가이며, 연속적인 모니터링을 수행하기에는 어려움이 있다. 따라서 간편하고 저가이며 비침습적으로 현재의 방광 상태를 지속적으로 모니터링 할 수 있는 방법이 요구된다.^[1]

EIT는 비침습적인 방법으로, 외부 전극을 통하여 전류를 주입한 후 유기된 전압을 측정하여 내부 전기적(임피던스) 특성을 영상화 하는 기술로써, MRI 나 CT 등의 다른 단층촬영기법에 비해 공간해상도(spatial resolution)는 다소 떨어지지만 순간해상도(temporal resolution)가 우수하며, 지속적인 모니터링이 가능하고, 인체에 해가 없이 생체정보를 비교적 손쉽게 얻을 수 있으며 시스템 설계 비용이 저렴하다. 따라서 최근에 방광 상태를 추정하기 위해 EIT 시스템을 이용한 모니터링 기법개발에 대한 연구가 진행되고 있다.^[2]

인체 하복부의 2D 임피던스 영상 분포는 전극을 통하여 주입되는 전류 패턴에 따른 측정된 전압 데이터의 신호 세기에 의해 영향을 받으므로, 해상도를 개선하기 위하여 전류 주입 패턴에 따른 방광의 크기 추정 성능을 비교 분석할 필요가 있다.

본 논문에서는 인체 하복부 부근에 위치한 방광의 크기 변화에 대해 전류 민감도가 극대화될 수 있도록 인접방식(Adjacent method), 삼각함수방식 Trigonometric method), 대면방식(Opposite method), 기준방식(Reference method)의 네 가지 전류입력 패턴 변화에 따른 영상복원 성능을 비교하였다.

II. 본론

1. 정문제

EIT에서 물체내부의 전기적 도전율(electric conductivity, σ)을 복원하는 과정은 정문제(forward problem)와 역문제(inverse problem)의 두 가지 해법의 반복 연산으로 구성된다.^[2-3]

정문제는 물체내부의 도전율 분포를 알고 있는 경우에, 물체 경계면의 주입전류에 의하여 유기되는 경계면의 전압을 계산하는 과정으로써, 이는 맥스웰 방정식으로부터 유도되는 경계조건을 갖는

Laplace 방정식으로 기술된다. 일반적으로 그 해석적 해는 구하기가 어려우므로 FEM(finite element method), BEM(boundary element method) 등의 수치적 방법으로 구하며, 대부분의 연구에서 주로 FEM을 사용한다.

본 연구에서는 전극과 내부와의 접촉저항(contact impedance)을 고려한 완전전극모델(complete electrode model; CEM)이 사용되었다.

$$\nabla \cdot \sigma(p) \nabla u(p) = 0, p = (x, y) \in \Omega \quad (1)$$

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

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

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

여기서 p 는 저항률 분포, u 는 포텐셜, Ω 는 물체의 도메인 영역을 나타내며, z_l 은 l 번째 전극 e_l 의 접촉저항이고, ν 는 단위 법선벡터이다. U_l 는 l 번째 전극 e_l 에서의 전압이고, L 은 전체 전극의 수이다.^[4-5]

2. 전류주입패턴

EIT의 목적은 펜텀 외부에서 전기신호의 입·출력 관계를 통해 내부의 저항률 분포를 영상화 하는 것이다. 이를 위하여, 경계면의 전극을 통해 적절하게 설계된 전류를 인가한다. 전류의 인가방법은 인접(adjacent), 대면(opposite), 기준(reference) 및 삼각함수(trigonometric) 방법 등이 있다.

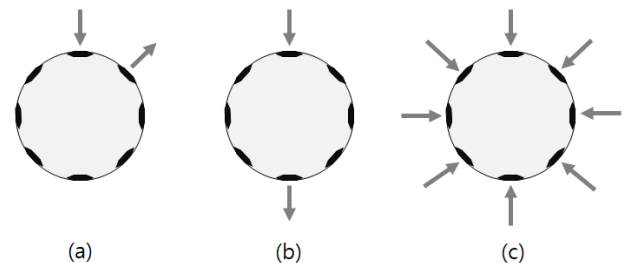


Fig. 1. Input current patterns. (a) adjacent pattern (b) opposite pattern (c) trigonometric pattern.

그림 1. 전류주입패턴. (a) 인접방법 (b) 대면방법 (c) 삼각함수방법

가) 인접 방법

인접 방법은 이웃하는 두 전극을 통해 전류를 주

입하고 전류를 주입하지 않는 전극에서 전압 데이터를 측정한다. 16전극 시스템에서 입력 전류패턴의 수는 16이고 각 패턴에 대하여 13개의 전압 데이터가 측정되므로 측정되는 전압데이터의 수는 $16 \times 13 = 208$ 개이고, 이 중 절반인 104개의 측정값만이 독립적인 값을 갖는다. 주입 전류의 대부분이 팬텀 경계 근처를 통해 흐르기 때문에 이 방법은 저항률의 변화가 경계면 근처에서 가장 민감한 특징을 가진다. 또한 이 방법은 측정 잡음이 존재하는 경우, 다른 전류입력패턴에 비해서 평균자승복원오차(Mean Squared Reconstruction Error)가 작다는 장점을 가지고 있다. 따라서 인접 방법은 EIT문제 중 측정오차에 민감한 문제에 가장 적합한 전류패턴이다.^[6]

나) 대면 방법

EIT에서 일반적으로 사용되는 대면 방법은 마주보는 두 전극을 통해 한쪽 방향으로 회전하며 전류주입이 이뤄지고 전압 측정은 전류인가 인접 전극을 통해 마주한 전극 사이에서 이루어지는 방식이다.

대면 방법에서 16개의 전극을 사용하면 $8 \times 13 = 104$ 개의 측정값을 얻을 수 있으며 그 중 72개만이 독립적인 값을 갖기 때문에 대면 방법은 동일한 수의 전극에 대해 적용될 수 있는, 즉 이용 가능한 전압데이터의 측정값이 인접 방법보다 적다는 단점을 가지고 있다.

앞서 말했던 것처럼 마주보는 두 전극을 통하여 전류를 주입하고 전류인가 인접 전극을 통해 마주한 전극 사이에서 전압 데이터를 측정하기 때문에 이 대면 방법은 도메인의 중앙부분에서의 감도가 매우 우수한 방법으로 알려져 있으며 전류가 이미징 된 물체를 통해 더 큰 균일성으로 이동하므로 인접 방법에 비해 대면 방법은 경계에서 전도도 변화에 덜 민감하다는 장점이 있다.^[6]

다) 삼각함수 방법

이 방법에서 전류는 모든 전극에 동시에 주입되고 전압은 모든 전극에서 동시에 측정된다.

삼각함수 방법에서는 경계 전위가 단일 접지 전극에 대해 측정되므로 16전극 EIT 시스템의 경우 15 가지 전압 측정을 생성한다. 결과적으로, 이 전류 주입 방법은 $8 \times 15 = 120$ 개의 독립 전압 데이터를 산출하는 8개의 서로 다른 전류 투영을 생성하게

된다.

이 방법의 단점은 전류 드라이버가 각 전극에 필요하며 알려지지 않은 접촉 임피던스가 영상복원에 영향을 미친다는 것이다.

하지만 삼각함수 방법은 EIT에서 내부 불균일성의 변별력이 가장 우수한 것으로 알려져 있다.^[6]

라) 교차 방법

교차 방법에서는 전류가 인접 전극뿐 아니라 멀리 떨어진 전극을 포함하여 모든 쌍에 인가되고, 전압은 전류가 인가되는 전극 이외의 전극을 기준으로 하여 모든 쌍에 대해 측정된다.

중심부의 감도는 인접방식과 같이 좋지 않지만, 전체 영역에 걸쳐 보다 나은 감도를 지니고 있다.

마) 적응 방법

이 방법은 모든 전극에 동시에 적절하게 크기가 조정된 전류를 인가하는 방식이다. 일반적으로 삼각함수(trigonometric function)의 한 주기에 해당하는 전류를 균등한 간격으로 전극에 인가하면 내부의 전장은 균일한 분포를 이룬다. 이에 대한 자세한 설명은 (다)부분에서 설명을 하였다.

바) 다기준 방법

이 방법에서는 한 개의 접지전극에 대하여 동시에 전류를 주입하고, 접지전극에 대하여 모든 전극에서 전압 측정이 이루어진다. 이 방식은 다소 균일한 전류 밀도 분포를 가지므로 감도가 증가하게 된다. 참고로 다기준 방식이 아닌 한 쌍의 전극만 전류를 주입하는 방법에서는 다른 전극은 개회로이다.

3. Gauss-Newton 알고리즘

일반적으로 EIT에서는 정적 영상복원 알고리즘 중 수렴속도(convergence rate), 잔류오차(residual error) 등의 측면에서 다른 알고리즘에 비하여 비교적 좋은 성능을 나타내는 것으로 알려진 Gauss-Newton 알고리즘을 주로 사용한다.^[7-8]

Gauss-Newton 알고리즘은 측정전압과 계산전압의 차이인 잔류오차(residual error)의 제곱의 합으로 정의되는 식(5)와 같은 목적함수를 설정한다.

이를 최소화하는 저항률 분포를 계산하는데, 이때 반복적 저항률 벡터의 증분은 식(6)과 같이 계산된다.

$$\Phi_r(\rho) = \frac{1}{2} (\|U - V(\rho)\|^2 + \alpha \|R\rho\|^2) \quad (5)$$

$$\Delta\rho_k = \rho_{k+1} - \rho_k = (H + \alpha R^T R)^{-1} \{J^T [U - V(\rho_k)] - \alpha R^T R \rho_k\} \quad (6)$$

여기서 $U \in R^{LK}$ 는 K 개의 모든 전류 패턴에 대하여 표면 전극(전극 수 : L)에서 측정된 1 프레임(frame) 동안의 측정 전압이며, $V(\rho) \in R^{LK}$ 는 저항률 분포 ρ 에서 FEM에 의해 계산된 표면 전극에서의 전압 값이다. α 와 $R \in R^{N \times N}$ 은 각각 조정인자(regularization parameter)와 조정행렬(regularization matrix)이다. 그리고 Hessian 행렬 H 와 Jacobian 행렬 $J \in R^{LK \times N}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$H = J^T J \quad (7)$$

$$J \equiv \frac{\partial V_i}{\partial \rho_j}, \quad i = 1, 2, \dots, L \times K, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

여기서 N 는 도메인 내부의 FEM 요소 수이며, ρ_j 는 j 번째 요소에서의 저항률 값이다.

Gauss-Newton 방법은 비선형 특성의 선형화에 따른 모델링 오차 및 Hessian 행렬의 비정칙성 때문에 만족스러운 영상을 얻기가 쉽지 않다. 특히 Hessian 행렬의 비정칙성은 역행렬 계산 시 부정확한 결과를 초래하여 영상 복원의 성능을 저하시키는데 이런 문제를 완화하기 위하여 다양한 조정방법이 연구되고 있다.

III. 모의실험

1. 성능 지표

본 논문에서는 객관적인 평가를 위해 영상 복원뿐만 아니라 추가적으로 다른 지표도 사용하였다. RMSE(root-mean square error)와 상관계수(Correlation Coefficient)를 사용하였으며 다음과 같은 식으로 정의할 수 있다.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{U - V(\hat{\rho})^T [U - V(\hat{\rho})]}{U^T U}} \quad (7)$$

$$\text{CC} = \frac{\sum_{i=1}^L (\rho_i - \bar{\rho})(\hat{\rho}_i - \bar{\hat{\rho}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^L (\rho_i - \bar{\rho})^2 \sum_{i=1}^L (\hat{\rho}_i - \bar{\hat{\rho}})^2}} \quad (8)$$

U 와 V 는 각각 측정전압과 계산전압이다. 그리

고 $\bar{\rho}$ 와 $\bar{\hat{\rho}}$ 는 실제 저항률과 추정된 저항률의 평균 값이다.

RMSE는 작을수록, CC는 1에 근접할수록 우수한 성능을 나타낸다.

2. 모의실험 결과

가. 모의실험 설정

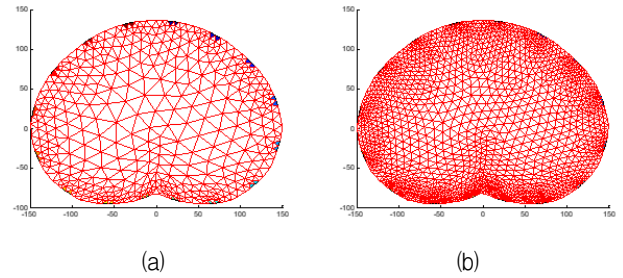


Fig. 2. Finite Element Mesh (a) Coarse mesh, (b) Fine mesh.

그림 2. 유한요소메쉬 (a) 성긴 메쉬, (b) 조밀한 메쉬

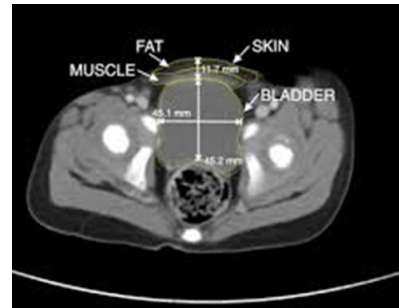


Fig. 3. Bladder CT image.

그림 3. 방광 CT 이미지

내부의 저항률 분포를 묘사하기 위해 정문제에서는 3220개의 원소를 갖는 조밀한 메쉬를 사용하여 전압 데이터를 계산 하였고, 역문제에서는 저항률 분포를 추정하기 위해 805개의 원소를 갖는 성긴 메쉬를 사용하였다.

전극의 수는 16개이며, 방광의 전도도는 0.001S/cm, 도메인 내부 배경의 전도도는 0.0017S/cm, 주변 조직의 전도도는 0.0012S/cm로 가정하였다.

그림 3에 나와있는 방광 CT 이미지를 바탕으로 타깃과 주변 조직을 시뮬레이션으로 구성하여 모의실험을 진행하였다. 영상 복원에 대한 성능을 테스트하기 위해 중간크기의 방광, 방광이 비어있는 경우, 방광이 차있는 경우인 세 가지 case를 설정하였고, 모든 경우에 1%의 상대 잡음(relative noise)을 첨가하였다.

나. 모의실험 결과

1) case1

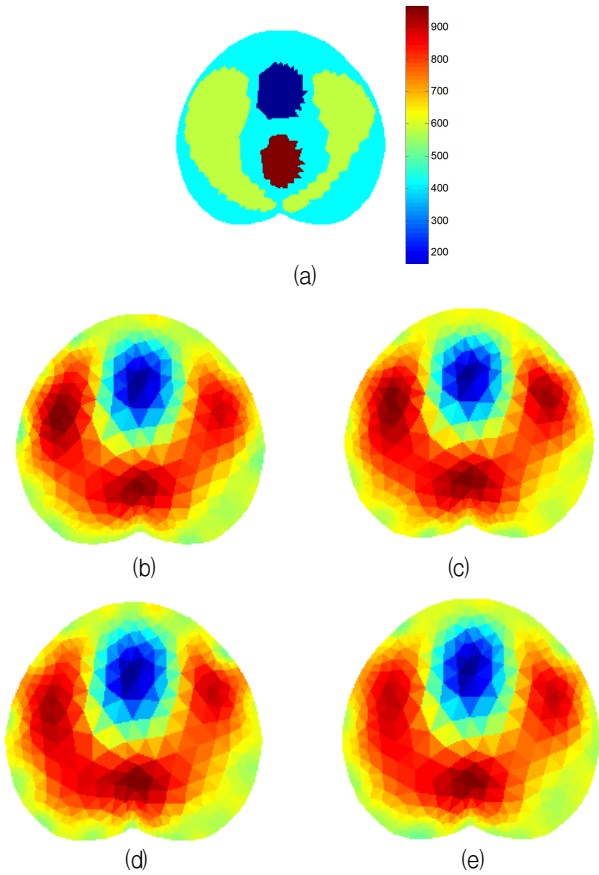
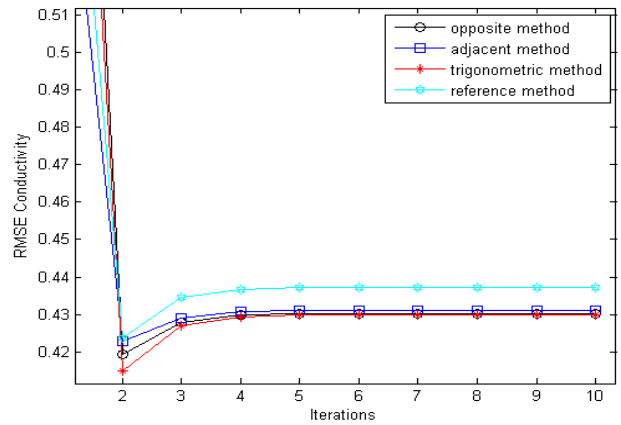


Fig. 4. Image for case 1 (a) true image, (b) restored image by opposite pattern, (c) restored image by adjacent pattern, (d) restored image by trigono-metric pattern, (e) restored image by reference pattern

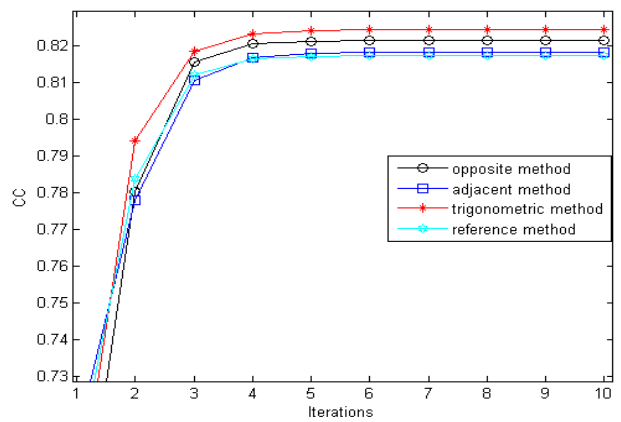
그림 4. case 1의 영상 (a) 원래 영상, (b) 대면 방법에 의해 복원된 영상, (c) 인접 방법에 의해 복원된 영상, (d) 삼각함수 방법에 의해 복원된 영상, (e) 기준 방법에 의해 복원된 영상

case1에서는 그림 4(a)와 같이 설정한 중간 크기의 방광을 대상으로 네 가지 전류 입력 패턴에 따른 복원 성능을 비교 하였다.

그림 4는 4가지 전류 패턴에 따른 Gauss Newton 알고리즘의 10번 반복 후의 복원 영상을 나타낸 것으로 (b)는 대면 방법을, (c)는 인접 방법, (d)는 삼각함수 방법 그리고 (e)는 기준 방법에 의한 복원 영상을 나타낸다. 복원된 영상만을 보았을 때는 주변조직의 전도도 차이만 약간 날뿐 방광에서는 네 가지 입력패턴에 따른 해상도 차이 비교가 어렵다. 따라서 앞서 설명한 성능 지표인 RMSE와 CC를 이용하여 성능 비교를 하였다.



(a)



(b)

Fig. 5. (a) RMSE, (b) Correlation coefficient.

그림 5. (a) 평균 제곱근 오차, (b) 상관계수

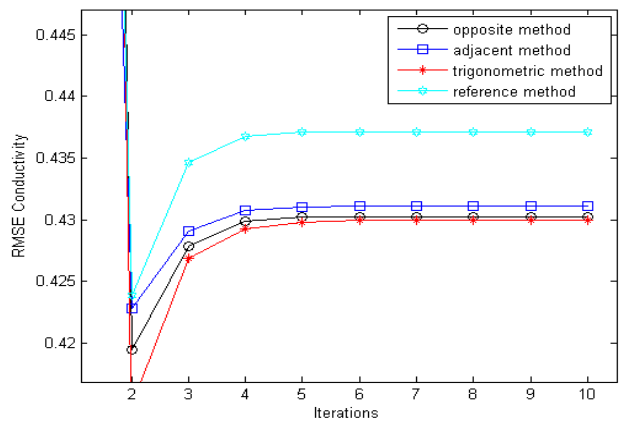


Fig. 6. Expanded RMSE figure.

그림 6. 확대시킨 평균 제곱근 오차

그림 5은 네 가지 경우의 전류패턴에 대한 영상 복원의 성능을 정확하게 평가하기 위해 반복연산에 따른 RMSE와 CC를 나타낸 것으로 (a)는 RMSE ,(b)는 CC를 나타내고 있다. 그림 6의 확대된 RMSE를 보았을 때 삼각함수 방법, 대면 방법,

인접 방법, 기준 방법 순으로 좋은 복원 성능을 가짐을 알 수 있다.

과도상태일 때, 인접 방법, 기준 방법이 복원 성능에 좋은 값을 보였던 반면 안정된 상태인 정상상태에 들어서며 삼각함수 방법, 대면 방법의 값이 좋은 복원 성능을 보였다.

이는 Correlation coefficient값에서도 마찬가지로이며, 그림 5(b)에서 확인 할 수 있다.

EIT에서 내부 불균일성의 변별력이 가장 우수한 것으로 알려진 삼각함수 방법이 방광의 영상복원 성능에도 가장 우수한 결과를 보임을 알 수 있다.

2) case2

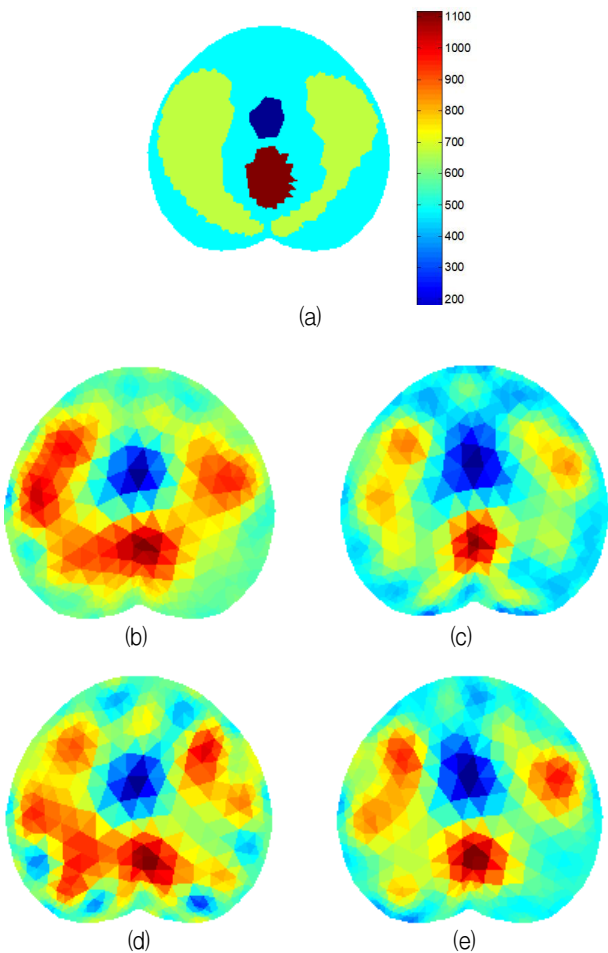


Fig. 7. Image for case 2 (a) true image, (b) restored image by opposite pattern, (c) restored image by adjacent pattern, (d) restored image by trigono-metric pattern, (e) restored image by reference pattern

그림 7. case 2의 영상 (a) 원래 영상, (b) 대면 방법에 의해 복원된 영상, (c) 인접 방법에 의해 복원된 영상, (d) 삼각함수 방법에 의해 복원된 영상, (e) 기준 방법에 의해 복원된 영상

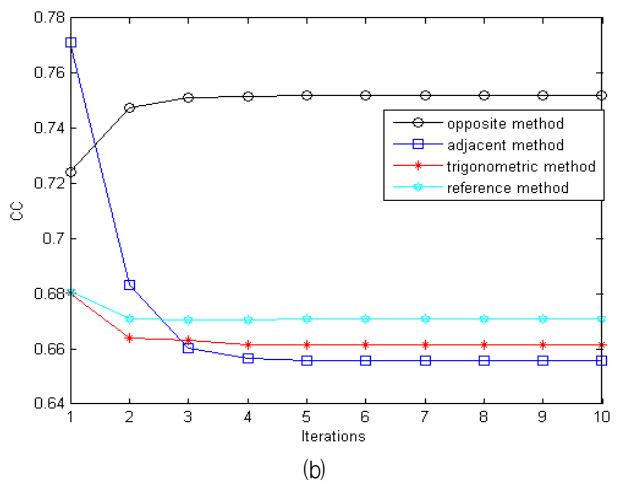
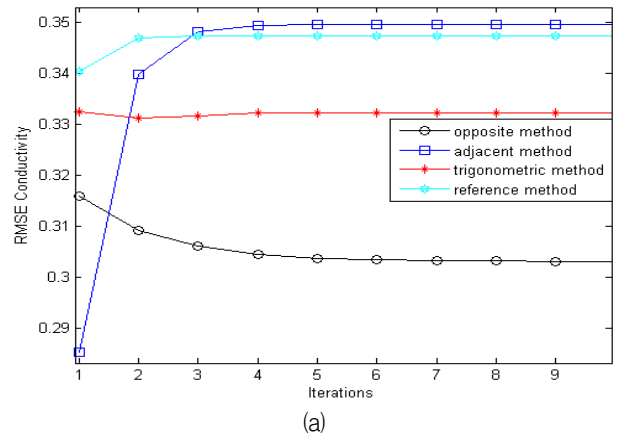


Fig. 8. (a) Small Bladder RMSE, (b) Small Bladder Correlation coefficient.

그림 8. (a) 방광이 비어있는 경우 평균 제곱근 오차, (b) 방광이 비어있는 경우 상관계수

case2에서는 방광이 비어있는 경우, 즉 그림 7(a)와 같이 작은 방광의 타깃을 설정 한 후 네 가지 전류 입력 패턴에 따른 복원 성능을 비교해 보았다.

그림 7(d)에 삼각함수 방법과 그림 7(e)에 기준 방법의 경우, 복원영상을 보면 주변조직(뼈와 근육)에 대한 표적의 경계가 모호하게 나타남을 볼 수 있고, 그림 7(c)에 인접 방법의 경우, 주변 조직에 대한 표적의 경계는 잡혔으나 복원된 방광의 크기가 생성한 표적보다 크게 복원됨을 알 수 있다. 그림 7(b)에 대면 방법의 경우, 주변조직과 방광에 대한 표적 모두 비교적 좋은 성능으로 복원되었다.

그림 8은 네 가지 경우의 전류패턴에 대한 영상 복원의 성능을 정확하게 평가하기 위해 반복연산에 따른 RMSE와 CC를 나타낸 것으로 (a)는 RMSE, (b)는 CC를 나타내고 있다.

앞서 설명한 복원 영상의 비교에서 나타나듯이

RMSE와 CC에서도 대면 방법의 값이 월등하게 좋은 것을 볼 수 있어 방광이 비어있는 경우에는 대면 방법이 가장 좋은 성능을 나타냄을 알 수 있다.

이는 대면 방법의 특성으로 설명이 가능하다. 이 전류주입방법은 마주보는 전극끼리 전류를 주입하고 전압을 측정하기 때문에, 도메인의 중앙부분에서의 감도가 매우 우수하다. 하지만 경계면에서, 특히나 소스와 싱크가 해당되는 전극에서의 감도는 가장 낮은 특징을 보인다.

따라서 방광이 비어있는 경우, 방광의 크기가 작아지며 도메인의 중앙 부분에 위치하게 되기 때문에 이 경우에는 대면 방법의 전류 주입패턴이 가장 우수한 성능을 보이게 된다.

3) case3

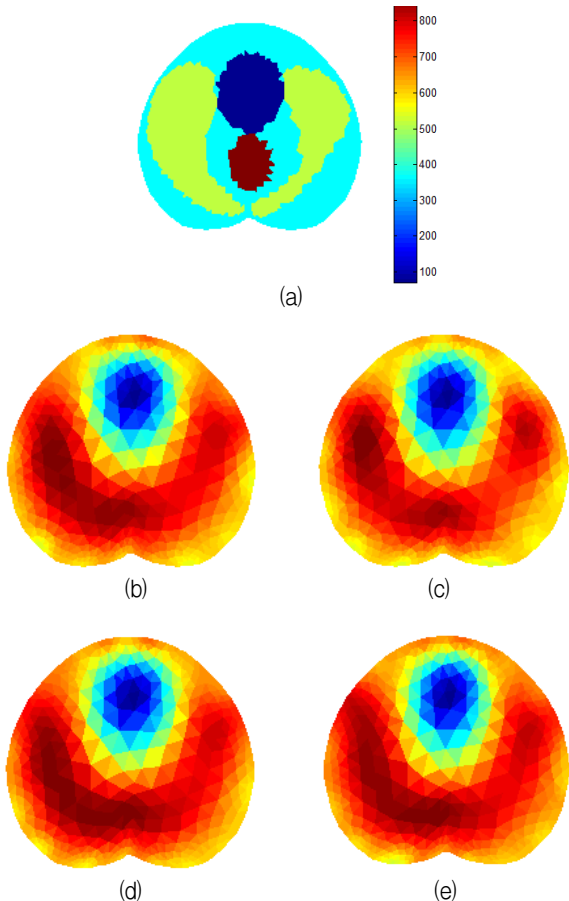
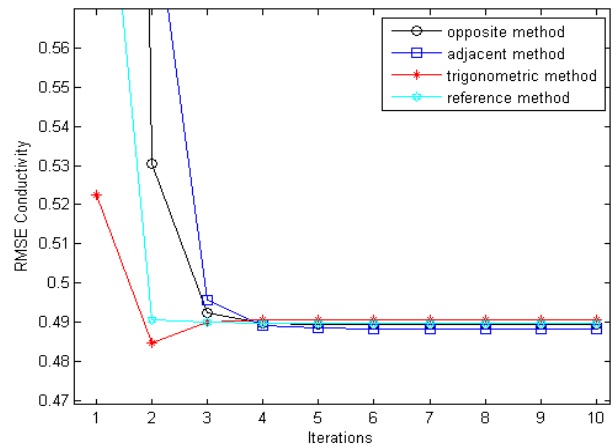
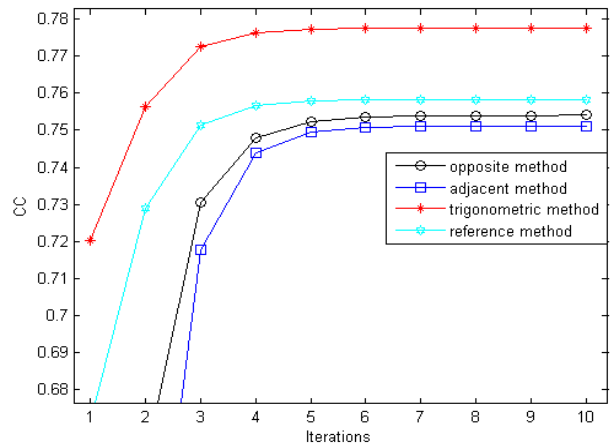


Fig. 9. Image for case 3 (a) true image, (b) restored image by opposite pattern, (c) restored image by adjacent pattern, (d) restored image by trigono-metric pattern, (e) restored image by reference pattern

그림 9. case 3의 영상 (a) 원래 영상, (b) 대면 방법에 의해 복원된 영상, (c) 인접 방법에 의해 복원된 영상, (d) 삼각함수 방법에 의해 복원된 영상, (e) 기준 방법에 의해 복원된 영상



(a)



(b)

Fig. 10. (a) Full Bladder RMSE, (b) Full Bladder Correlation coefficient.

그림 10. (a) 방광이 차있는 경우 평균 제곱근 오차, (b) 방광이 차있는 경우 상관계수

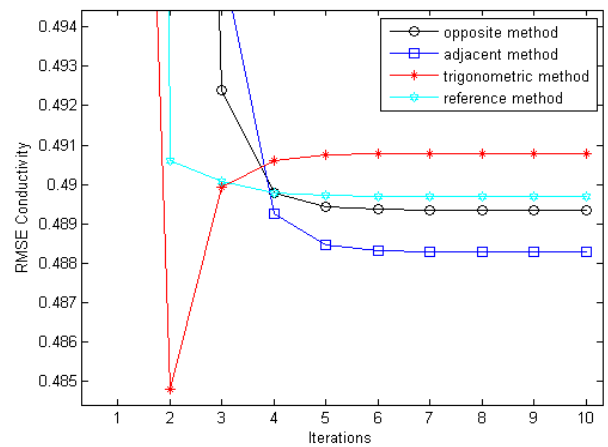


Fig. 11. Expanded RMSE figure.

그림 11. 확대시킨 평균 제곱근 오차

case3에서는 방광이 차있는 경우, 즉 그림 9(a)와 같이 보다 큰 방광의 타깃을 설정 한 후 네 가지 전

류 입력 패턴에 따른 복원 성능을 비교해 보았다.

복원 영상만을 보았을 때는 주변조직의 전도도 차이만 약간 날뿐 방광에서는 네 가지 입력패턴에 따른 해상도 차이 비교가 어렵다. 따라서 앞서 설명한 성능 지표인 RMSE와 CC를 이용하여 성능 비교를 하였다.

그림 10은 네 가지 경우의 전류패턴에 대한 영상 복원의 성능을 정확하게 평가하기 위해 반복연산에 따른 RMSE와 CC를 나타낸 것으로 (a)는 RMSE, (b)는 CC를 나타내고 있다.

그림 11은 확대된 RMSE를 나타낸다. 3, 4번째 반복을 지나며 CC의 성능 복원 결과와는 달리 삼각함수 방법이 가장 낮은 복원 성능 값을 가지고 인접 방법이 가장 높은 복원 성능 값을 가짐을 알 수 있는데 이 값들의 차는 0.0025로 큰 차이가 나지 않는다. 이에 따라 CC의 값을 살펴보면 과도상태에서 삼각함수 방법, 기준 방법, 대면 방법, 인접 방법 순으로 좋은 복원성능 값을 가지고, 정상상태에 들어가서도 과도상태와 마찬가지로 삼각함수 방법 가장 좋은 복원 성능 값을 가진다.

case1과 마찬가지로 내부 불균일성의 변별력이 가장 우수한 것으로 알려진 삼각함수 방법이 방광이 차있는 경우의 영상복원 성능에도 가장 우수한 결과를 보임을 알 수 있다.

IV. 결과

실제 CT 이미지를 바탕으로 하여 방광과 주변 조직을 기준으로 유한요소 해석법 모델을 설정하였으며, 4가지(삼각함수 방법, 기준 방법, 대면 방법, 인접 방법) 주입 전류패턴에 따른 EIT 복원 성능을 비교분석하였다.

방광의 크기에 따른 세 가지의 경우를 시뮬레이션 하였으며, 방광이 비어있는 경우(방광 크기가 작을 경우)에서는 복원된 영상과 RMSE 그리고 CC를 확인하였을 때 모두 대면 방법이 좋은 복원 성능을 보였다. 방광이 차있는 경우(방광크기가 큰 경우)와 방광 크기가 중간인 경우에는 복원영상만으로는 판별이 어려워 성능 지표인 RMSE와 CC를 확인해 보았을 때 내부 불균일성의 변별력이 가장 우수한 것으로 알려진 삼각함수 방법이 가장 좋은 성능을 보였다.

References

- [1] A. K. Khambampati, S. K. Konki, S. K. Sharma, Y. J. Han, K. Y. Kim, "A meshless method based on improved boundary distributed method for estimating of bladder size using electrical impedance tomography," in *International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC 2019)*, pp. 1-5, 2019.
- [2] J. G. Webster, *Electrical Impedance Tomography*, IOP Publishing Ltd, 1990.
- [3] D. S. Holder, *Electrical Impedance Tomography: Methods, History and Applications*, IOP Publishing Ltd, 2005.
- [4] M. Vauhkonen, *Electrical Impedance Tomography and prior information*, Ph.D. Thesis, University of Kuopio, Finland, 1997.
- [5] K. Y. Kim and B. S. Kim, "Regularized Modified Newton-Raphson Algorithm for Electrical Impedance Tomography Based on the Exponentially Weighted Least Square Criterion," *Journal of IEEE Korea Council*, Vol. 4, No. 2, pp. 77-84, 2000. DOI: 10.1109/TENCON.2000.893541
- [6] R. Harikumar, R. Prabu, S. Raghavan, "Electrical Impedance Tomography (EIT) and Its Medical Applications: A Review," *International Journal of Soft Computing and Engineering*, vol. 3, Issue. 4, pp. 193-198, 2013.
- [7] K. Y. Kim and B. S. Kim, "Regularized Modified Newton-Raphson Algorithm for Electrical Impedance Tomography Based on the Exponentially Weighted Least Square Criterion," *j.inst.Korean.electr.electron.eng*, vol. 4, no. 2, pp. 77-84, 2000. DOI: 10.1109/TENCON.2000.893541
- [8] S. I. Kang and K. Y. Kim, "Image Reconstruction Using Iterative Regularization Scheme Based on Residual Error in Electrical Impedance Tomography," *j.inst.Korean.electr.electron.eng*, vol. 18, no. 2, pp. 272-281, 2014.

BIOGRAPHY

You-Jung Han (Member)

2017 : BS degree in Electronic Engineering, Jeju National University.
 2017~presently : MS degree course in Electronic Engineering, Jeju National University.

Anil Kumar Khambampati (Member)

2003 : BS degree in Mechanical Engineering, Jawaharlal Nehru Technological University, India
 2006 : MS degree in Marine Instrumentation Engineering, Jeju National Universtiy.

2010 : PhD degree in Electronic Engineering, Jeju National Universtiy.

Kyung-Youn Kim (Member)

1983 : BS degree in Electronic Engineering, Kyungpook National University.
 1986 : MS degree in Electronic Engineering, Kyungpook National Universtiy.

1990~Present : Professor, Department of Electronic Engineering, Jeju National Unviersity.
 2017~2019 : Dean of Engineering College, Jeju National University