

〈 논문 〉

사각관 이상유동 분석을 위한 전기적 캐패시턴스 토모그래피 코드 개발

이 경 황* · 이 재 영†

(2004 년 8 월 13 일 접수, 2004 년 10 월 19 일 심사완료)

Development of an Electrical Capacitance Tomography Code for Analysis of Two-Phase Flow in the Rectangular Pipe

Kyoung Hwang Lee and Jae Young Lee

Key Words : Electrical Capacitance Tomography(전기적 캐패시턴스 토모그래피), Image Reconstruction(이미지 복원), Inverse Algorithm(역전사 알고리즘), Two-Phase Flow(이상유동)

Abstract

A computer code for Electrical Capacitance Tomography (ECT) is developed to sense the cross sectional phase distribution of two-phase flow in the rectangular pipe in which the tomography sensor furnished by the insulated wall, electrodes, and electric field screen. The computer code had two steps for the image reconstruction. In the forward projection step, the sensitivity matrix was constructed based on the electric field calculated by the finite difference method. In the backward projection step, the sensitivity matrix and the measured capacitances were used to reconstruct the cross sectional image. Several algorithms including LBP, TR, ITR, and PLI were employed to find the proper one for the two-phase flow analysis. Since the dielectric constant of the water in two-phase flow is sensitive to the thermal parameter such as, temperature and pressure, the developed code was evaluated to find their accuracy, speed of calculation, and sensitivity to the variation of the dielectric constant. It was found that the iterative methods are superior to the direct methods for the image reconstruction, and the PLI method was the best in the variation of the dielectric constants.

기호설명

$C, \Delta C$: 캐패시턴스, 캐패시턴스의 변화	M	: 측정 캐패시턴스의 개수
$C, \Delta C$: 캐패시턴스, 캐패시턴스의 변화 벡터	P	: 픽셀의 개수
C_{12}	: 1 번과 2 번 전극 사이의 캐패시턴스	Q	: 전하
$C(\epsilon)$: 유전율에 대한 캐패시턴스 함수	S	: 민감도 행렬
e	: 오차 벡터	V_{12}	: 1 번과 2 번 전극 사이의 전압차
f	: 함수	α	: 완화계수
g	: 정규화된 유전율 벡터	$\epsilon(x, y)$: 유전율 분포
\hat{g}	: 복원된 유전율 벡터	ϵ_{high}	: 높은 유전물질의 유전율
		ϵ_{low}	: 낮은 유전물질의 유전율
		$\Delta \epsilon$: 유전율의 변화 벡터
		λ	: 정규화 된 캐패시턴스 벡터
		μ	: 정규화 변수
		$\phi(x, y)$: 전압 포텐셜 분포
		$\rho(x, y)$: 전하 밀도 분포
		Γ	: 전극 표면

† 책임저자, 회원, 한동대학교 기계제어시스템공학부

E-mail : jylee7@handong.edu

TEL : (054)260-1392 FAX : (054)260-1392

* 한동대학교 대학원 기계제어시스템공학부

약어

ECT:	전기적 캐패시턴스 토모그래피
LBP:	선형 역전사
LFP:	선형전사
TR:	티크노프 정규화
ITR:	반복 티크노프 정규화
PLI:	프로젝티드 랜드웨버 반복

1. 서 론

공정계통의 설계와 운전을 위해 내부의 유동 특성을 직접 분석해 낼 필요가 점차 증대되고 있다. 다상 유동장(multi-phase flow field)에서 각상의 공간적 분포 정보를 알아내는 것은 공정 제어뿐만 아니라, 상의 경계면을 통해 전달되는 물질, 열, 모멘텀 전달의 정량화에 매우 필요하다. 특히 열 에너지 계통의 프로세스에서 많이 발생하는 이상 유동의 경우, 유동조건에 따른 다양한 유동 패턴을 해석을 위한 모델에서 유동패턴의 분류뿐만 아니라, 해당 유동패턴에서의 전달항의 규명과 입증에 많은 연구노력이 이루어졌다.⁽¹⁾ 이에 필요한 공간 분포와 형상정보를 도출하는데 컴퓨터 토모그래피(CT: computer tomography) 기술이 이용될 수 있다. 또한 3 차원 전산유체해석의 결과의 검증 개선에도 이 기술을 응용할 수 있다.

전통적으로 의료진단용으로 많이 사용되는 CT는 x -ray, γ -ray, 양양자 방출(Positron emission), 자기공명(Magnetic resonance)등을 이용한 방법이다. 이들은 높은 정밀도를 자랑하나, 장비의 규모, 가격, 방사선 차폐를 위한 고려사항등으로 인해, 산업 현장의 유동장의 공정감시 제어에 사용하는데는 많은 무리가 있다. 반면 전자장 정보, 음향장 정보, 광학적 정보를 이용한 토모그래피 기법이 활발히 연구되고 있는데, 이는 저가이면서 인체 위해요소가 적어 공정계통에 적용가능성이 높다.⁽²⁾

본 연구에서는 이중 캐패시턴스 토모그래피 기법을 이용하여, 사각관을 지나는 이상유동의 내부 기포분포 정보를 알아내는 것을 목적으로 코드를 개발하였다. 원자력 발전소의 핵연료 어셈블리에서의 이상유동의 실험적 분석을 하려 할 경우 이 기하구조는 적합하며, 최근들어 많은 연구가 진행 중인 마이크로 채널 유동에서는 원형채널보다는 사각채널이나 삼각 채널이 많아 본 연구에서는 사각관을 대상으로 하였다.

전자장 토모그래피 기법중 캐패시턴스 토모그래피는 Xie⁽⁶⁾에 의해 개발된 이후, 많은 개선이 이루어지고 있다. 기본적으로 캐패시턴스 토모그래피

는 유체관의 외부에 전극을 설치하는 장점을 갖고 있으며, 저준위 캐패시턴스 정보를 고속으로 획득해 내는 저가 회로의 개발로 인해 계통이 완성되었다.⁽³⁻⁵⁾ 이분야의 대부분의 연구는 재현된 이미지의 정밀도를 높이기 위한 알고리즘 개발에 집중되었다. 최초로 제시된 방법은 민감도 행렬을 근간으로 하여 만들어진 선형역전사(Linear Back Projection, LBP) 기법⁽⁶⁾이었고, 이와 관련한 변형은 필터를 쓰는 방법,⁽⁷⁾ 그리고 모델을 참조하는 방법 Hammer and Johansen⁽⁸⁾이 제시되었다. 또한 역문제(Inverse problem)를 푸는데 많이 쓰이는 티크노프 정규화(Tikhonov regularization)방법도 제시되었다. Peng, Lionheart^(9,10) 반복법을 통한 오차 감소를 시도한 연구는 Yang 에 의해 제시된 프로젝트드 랜드웨버 반복법 Projected Landweber iteration method⁽¹¹⁾이 있다. Yan 등은 티크노프 정규화 방법을 이용한 다변량 선형 회귀복원 Multiple Linear Regression Reconstruction, MLRR⁽¹²⁾을 만들었다. 뿐만 아니라 MLRR 과 PLI 를 조합한 방법등도 제시되어왔다[Jinchuang⁽¹³⁾].

이와 같이 캐패시턴스 토모그래피에 적용된 많은 종류의 역전사 알고리즘은 각기 저마다 우수성을 주장하고 있으나, 사각관 이상유동에 어떤 알고리즘이 우수한지를 정량적으로 평가한 것은 없다. 특히 이상유동이 다양한 유동 패턴을 보일 뿐만 아니라, 온도와 압력에 따라 유전율이 달라져서, 동일한 계통에서도 운전 조건에 따른 변화가 예측된다. 따라서 본연구는 사각관 이상유동 분석을 위한 캐패시턴스 토모그래피 이미지 전사 코드를 개발하고, 다양하게 제시된 알고리즘을 유전율의 변화에 따라 비교 평가하여 우수한 알고리즘을 선정함을 목표로 하여 수행되었다.

종래의 방법이 원형관 위주로 이루어져 있고, 주로 유한 요소법에 의한 전기장 해석 코드를 활용하였는데, 본연구에서는 사각관에서 유한 차분법을 이용한 전기장 해석코드를 만들고, 이를 통해 ECT 를 구현하였다.

2. ECT 시스템

캐패시턴스 토모그래피의 구성요소는 크게 캐패시턴스를 측정하고 여러 개의 전극판에서의 값을 순차적으로 저장 할 수 있게 해주는 스위칭부분을 포함한 하드웨어 부분과 측정된 캐패시턴스 값을 이용하여 이미지를 복원하는 소프트웨어 부분으로 나누어 진다. Fig. 1 에 나타난 바와 같이 사각관의 외부에 부착된 N 개의 전극판 사이에 순차적으로

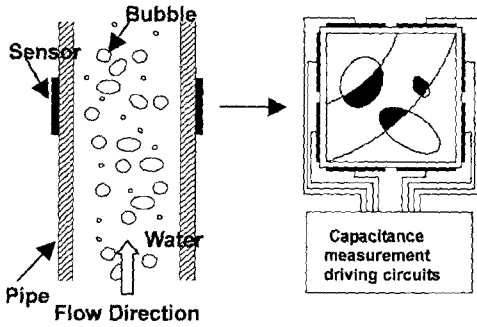


Fig. 1 Over view of capacitance tomography

전압을 걸어주면서 캐패시턴스를 측정하면, 모두 $N(N-1)/2$ 개의 측정값을 갖게되는데, 이를 이용하여 유전율의 분포를 역전사하여, 이를 토대로 이상유동의 분포를 알아낸다.

얻어진 $N(N-1)/2$ 개의 캐패시턴스 정보를 이용하여 단층 이미지를 역전사하기 위해서는 각 상황에 맞는 전기장의 계산이 필요하다. 유전율의 분포가 상정되었을 때, 그 전기장의 계산 결과가 측정된 캐패시턴스 값과 같을 때, 유전율의 분포는 실제 유전율의 분포와 일치할 것이다. 따라서 유전율 역산은 통상적인 역전사(inverse) 문제가 되고, 캐패시턴스의 측정치와 계산치 오차의 최소화 하는 최적화 문제가 된다.

이문제를 해결하기 위해 Fig. 2 에 나타난 바와 같은 순서에 따라 토모그래피 알고리즘을 구축한다. 그림에 나타난 바와 같이 크게 순방향 전사(forward projection)와 역방향 전사(backward projection)의 두단계로 구분이 된다. 순방향 전사는 주어진 유전율에서 각 전극의 캐패시턴스 값을 계산하는 단계이다. 이를 위해 전자장 해석을 위한 편미분 방정식을 유한 차분화 하여 사용할 수 있다. 본 연구에서 채택한 좀더 간편하고 빠른 방법은 민감도 행렬을 구성한 선형 순방향 전사(linear forward projection)를 한다. 역방향 전사(backward projection)는 계산된 캐패시턴스 값과 측정된 캐패시턴스 값의 차이를 최소화 하는 유전율의 분포를 계산해 내는 것이다.

2.1 사각관 ECT 전자장 해석을 위한 유한차분

본 연구에서 사용된 ECT 센서는 사각관의 외부에 8 개의 전극을 부착한 것이다. 외부로부터의 전자장 노이즈를 제거하기 위하여 Fig. 3 에 나타난 바와같이 스크린 전극판(screen electrode)을 고려하였고, 유전율의 변화에 대해 상대적으로 크게변하는 민감도 행렬을 생성하기 위해 벽면의 두께, 측정 전극판에서 스크린 전극판까지의 거리, 측정

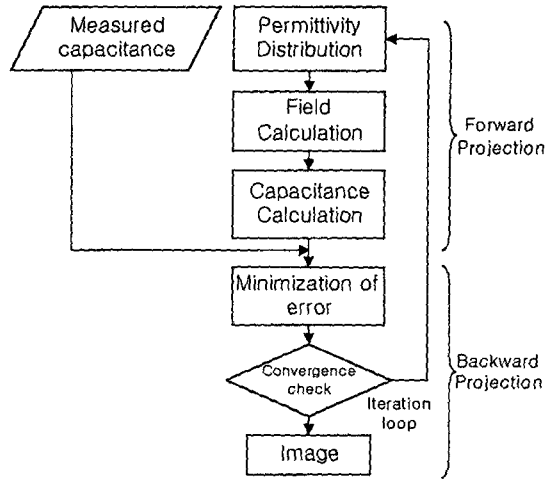


Fig. 2 The structure of the tomography image reconstruction algorithm

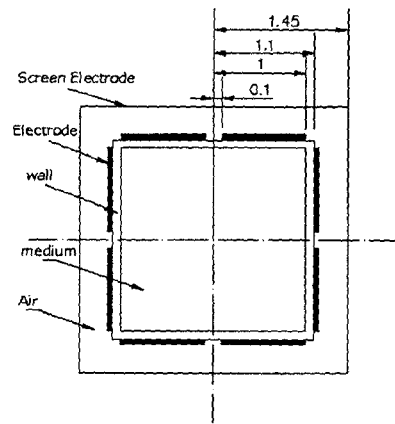


Fig. 3 Model of square ECT system

전극판 사이의 거리, 등을 고려하였다.

설계된 ECT 센서의 지배 방정식은 포이손(Poisson) 방정식이며, 센서 내부에서는 전하의 분포 $[\rho(x,y)]$ 가 0 인 라플라스(Laplace) 방정식이 된다.

$$\nabla \cdot [\epsilon(x,y)\nabla\phi] = -\rho(x,y) \tag{1}$$

모델링 된 ECT 센서의 지배방정식은 수치해석을 통해 해석된다. 본 연구에서는 유한차분법(FDM)을 이용하여 지배방정식을 해석하였다. 지배방정식을 중심차분 도식을 센서의 전체 영역에 적용하여 유도하였다. 스크린 전극판은 강제 경계 조건으로 0V 로 주어지며, 전압이 인가 되는 전극판은 5V, 나머지 전극판은 0V 의 강제 경계로 각각 주어 지게 된다. 또한 센서내부의 매질에 대해서 유전율(ϵ_r)의 값은 공기의 경우 1, 파이프 벽면

의 경우 플라스틱으로 가정하여, 2.3 으로 설정하였다. 전체 격자는 1600(40×40)개로 구성하였으며, 센서 내부는 400(20×20)의 격자로 구성하였다.

캐패시턴스의 계산은 대항하는 전극 사이에 축적된 전하량과 포텐셜 차이에 의해서 결정된다. 일례로 전극 1 과 전극 2 사이에 걸리는 캐패시턴스 C_{12} 는 다음과 같다. 이는 상기 유한 차분법에 의해 결정된 전자장 포텐셜값을 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$C_{12} = \frac{Q}{V_{12}} = \frac{\int \nabla \epsilon \nabla \phi dV}{\int \nabla \phi dV} \quad (2)$$

2.2 선형순방향전사

식 (2)에 나타난 캐패시턴스 값은 계산치로서, 이것과 실제 측정치 사이의 차이를 최소화 하는 유전율의 분포를 구하는 것이 이미지 역전사의 기본 전략이다. 그러나 식 (2)의 형태가 비선형적인 관계로, 이를 이용하여 역전사를 하는 것은 매우 많은 계산 노력을 요구한다. 이를 선형화 하면 계산 시간을 단축할 수 있으며, 역전사 기법이 단순해진다. 선형화를 위해, 식 (2)가 유전율과 전압 분포의 함수이나, 전압 분포 역시 유전율에 의해 영향을 받으므로, 이를 유전율의 비선형 함수로 식 (3)과 같이 가정한다.

$$C = C(\epsilon) \quad (3)$$

여기서 C 는 측정된 캐패시턴스이고 ϵ 는 유전율이다. 이 함수를 테일러(Taylor) 급수 전개하고, 유전율 변화가 작다는 가정하에 이차항 이상을 제거하면 식 (4)와 같은 선형식을 얻을 수 있다:

$$\Delta C = \frac{\partial C}{\partial \epsilon} \Delta \epsilon = S \Delta \epsilon \quad (4)$$

여기서 S 는 캐패시턴스의 유전율 변화에 따른 반응도를 나타내는 일종의 자코비안, $\partial C / \partial \epsilon$, 행렬로서 민감도 행렬(Sensitivity matrix)이라고 부른다.

식 (4)는 다음과 같이 정규화한 형태로 표현할 수 있는데 이를 선형 순방향 전사 (Linear forward projection, LFP)라고 부르며 다음과 같다.

$$\lambda = Sg \quad (5)$$

위에서 λ 는 정규화 된 캐패시턴스 벡터로서 다음과 같이 정의된다.

$$\lambda = \frac{C - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}} \quad (6)$$

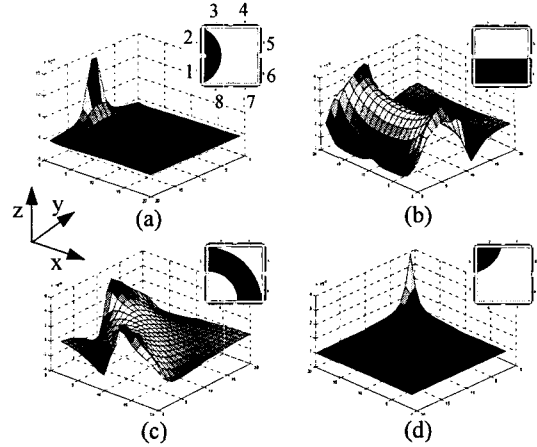


Fig. 4 Example of sensitivity matrix (a)1-2 electrode (b)1-6 electrode (c) 2-7 electrode (d) 2-3 electrode

또한 S 는 민감도 행렬이고, g 는 유전율 벡터로서 높은 유전물질에 대해서는 1 낮은 유전물질에 대해서는 0 으로 정규화 한다. 이러한 정의하에서 민감도 행렬을 구성하는데, 그림 4 에 나타난 바와 같다.

그림에서 x 축과 y 축은 토모그래피 평면을 나타내며, z 축은 민감도의 크기를 나타낸다. 전극 1 과 2 사이의 민감도 (a)는 전극 사이에서 침투형으로 민감도 분포가 보이며, 전극 1 번과 6 번 사이는 넓은 민감도 영역이 존재함을 알 수 있다. 또한 2 번과 7 번 사이의 민감도 (c)는 두 전극 사이에 적절한 영역을 비대칭적으로 분포하고 있다. 모서리의 경우 (d)는 역시 침투형태의 민감도 분포를 보여준다. 따라서 제작된 전자장 해석 코드가 유효하게 전자장을 묘사함을 알 수 있다

3. 역방향전사

역방향전사(Backward projection) 기법은 식 (5)에서 민감도 행렬인 S 의 역행렬이 존재하면 유전율의 분포 g 는 다음을 통해 얻을 수 있다.

$$g = S^{-1}\lambda \quad (7)$$

그러나 이러한 역행렬이 존재할 수 없는 조건이 될수있으므로 식 (5)에 측정오차와 근사과정에서 발생한 오차등이 가입된다고 보고 이를 최소화하기 위해 최소자승법을 사용한다. 오차의 제곱, $f(g)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$f(g) = \frac{1}{2} \|S \cdot g - \lambda\|^2 = \frac{1}{2} (g^T S^T S g - 2g^T S^T \lambda + \lambda^T \lambda) \quad (8)$$

이것의 최소조건은 미분을 통해 결정되어 다음과 같다.

$$\mathbf{S}^T(\mathbf{S}\mathbf{g} - \boldsymbol{\lambda}) = 0 \quad (9)$$

유전율 분포의 역전사는 $\mathbf{S}^T\mathbf{S}$ 의 역행렬이 존재할 때 다음과 같이 결정된다.

$$\hat{\mathbf{g}} = (\mathbf{S}^T\mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^T\boldsymbol{\lambda} \quad (10)$$

문제는 대부분의 경우, 이러한 역행렬이 존재하지 않는 ill-posed 조건이 된다는 것이고, 이를 극복하기 위해 다양한 알고리즘이 제시되었다.

3.1 선형 역전사

선형 역전사(Linear back projection, LBP) 방법은 Xie⁽⁶⁾에 의해 시도된 방법으로 식 (7) 대신에 민감도 행렬의 정규화된 전치 행렬 연산을 사용하여 다음과 같이 연산한다.

$$\hat{\mathbf{g}} = \frac{\mathbf{S}^T\boldsymbol{\lambda}}{\mathbf{S}^T\mathbf{u}_\lambda}, \quad \mathbf{u}_\lambda = [1, 1, \dots, 1] \quad (11)$$

위에서 \mathbf{S}^T 는 민감도 행렬의 전치 행렬이며, $\boldsymbol{\lambda}$ 는 정규화된 캐패시턴스 측정치이다. LBP 방법은 수학적으로 정확하지는 않고 높은 이미지 왜곡을 보이나 매우 빠른 결과를 보여 실시간 응용에 많이 사용된다.

3.2 티크노프 정규화

식 (10)의 $\mathbf{S}^T\mathbf{S}$ 의 역행렬이 존재하지 않는 ill-posed 문제를 해결하기 위해 티크노프 정규화(Tikhnov regularization, TR) 행렬을 가중하여 역행렬을 구한다.

$$\hat{\mathbf{g}} = (\mathbf{S}^T\mathbf{S} + \mu\mathbf{I})^{-1} \mathbf{S}^T\boldsymbol{\lambda} \quad (12)$$

위에서 \mathbf{I} 는 항등 행렬(identity matrix)이며, μ 는 정규화 변수(regularization parameter)이다. 이 방법은 μ 값에 크게 영향을 받는 특성이 있으며, μ 의 값은 수학적인 과정을 통해 최적화 하기도 하고, 실험적으로 결정 하기도 한다.

3.3 반복 티크노프 정규화법

Hansen⁽¹³⁾은 티크노프 정규화법에 있어 뉴턴 랩슨(Newton-Rhpson) 반복법을 적용한 반복티크노프정규화(Iterative tikhonov regularization, ITR)를 구현하였다. 식 (10)을 선형 전개하여, 예상되는 목

적값을 0으로 치환하는 방법으로 반복공식을 다음과 같이 구성한다.

$$\hat{\mathbf{g}}_{k+1} = \hat{\mathbf{g}}_k - (\mathbf{S}^T\mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^T(\mathbf{S}\hat{\mathbf{g}}_k - \boldsymbol{\lambda}) \quad (13)$$

역시 $\mathbf{S}^T\mathbf{S}$ 의 역행렬이 존재 하지 않으므로 티크노프 정규화를 통해 역행렬을 보장하면 다음과 같은 식이 된다.

$$\hat{\mathbf{g}}_{k+1} = \hat{\mathbf{g}}_k - (\mathbf{S}^T\mathbf{S} + \mu\mathbf{I})^{-1} \mathbf{S}^T(\mathbf{S}\hat{\mathbf{g}}_k - \boldsymbol{\lambda}) \quad (14)$$

여기서 k 는 반복 횟수(iteration number)이다.

3.4 랜드웨버전사반복법

1999년 Yang에 의해 ECT에 적용된, 랜드웨버 반복법(Projected landweber iteration, PLI)은 식 (8)이 항상 0이 되는 것이 아니라 실제 계산에서 어떤 값, $\nabla f(\hat{\mathbf{g}}_k)$, 을 갖는데, 그것은 오차의 감소 방향을 의미한다. 따라서 이 오차 감소 구배에 비례하는 정도의 개선을 해주면 반복과정에 수렴을 보장한다는 것이다. 즉

$$\hat{\mathbf{g}}_{k+1} = \hat{\mathbf{g}}_k - \alpha_k \nabla f(\hat{\mathbf{g}}_k) \quad (15)$$

여기서

$$\nabla f(\hat{\mathbf{g}}_k) = \mathbf{S}^T(\mathbf{S}\hat{\mathbf{g}}_k - \boldsymbol{\lambda}) \quad (16)$$

이다. 그러나 비례개선의 정도가 지나치면 발산의 우려가 있으므로, 식 (15)의 우변이 정규화 범위인 [0,1] 사이에 존재하도록 제한한다.

4. 결과 및 토의

본 장에서는 위에 제시된 기법들의 이상유동의 적용 가능성을 검토 하고자 했다. 고온 고압 상황에서 물-증기 이상유동은 대기압일 때와는 매우 다른 유전율을 갖는다. 즉 유전율이 온도와 압력에 따라 큰 변화를 갖는 상황에서 프로세스 토모그래피가 좋은 예측을 하는가를 검토하고자 했다. 이를 위해 LBP, TR, ITR, PLI 등의 4가지의 알고리즘에 대해 층류, 환형류 중심류(중심에 높은 유전율의 유동이 있는 경우)의 3개의 경우에 대해 수치적으로 모델링 하였다. LFP를 이용한 시뮬레이션을 통해 캐패시턴스의 값을 얻었으며, 이를 이용하여, 다양한 유전율에 대해 어떠한 특성을 가지는지 분석하였다. 복원이미지의 평가 지수는 이미지 오차, 캐패시턴스 유수(residual), 복원이미지와 원본이미지의 상관 관계 등이 있다. 본 연구에서는 원본이미지와 복원 이미지의 차이를 비교한

이미지 오차를 지수로 사용하였다. 반복알고리즘의 반복계산 중단조건으로는 캐패시턴스 유수를 사용하였으며, 각 정의는 다음과 같다.

$$\text{이미지 오차 : } \frac{\|\hat{g} - g\|}{\|g\|} \quad (17)$$

$$\text{캐패시턴스 유수 : } \frac{\|\lambda - Sg\|}{\|\lambda\|} \quad (18)$$

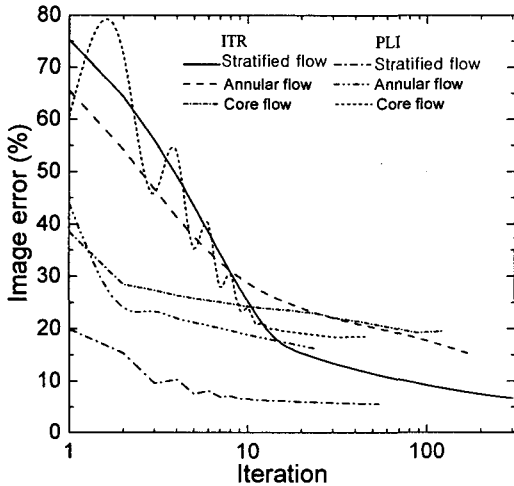


Fig. 5 Image error with iteration for PLI, ITR method

4.1 다양한 알고리즘의 성능평가

이상의 다양한 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 두 가지 평가 지수를 사용하였다. 실시간 적용을 위해서는 계산시간이 고려되어야 하며, 정확성을 위해서는 이미지 오차와 형태를 선정하였다. 비교의 기준을 위해 유전물질은 공기-물에 대하여 비교하였다. 시뮬레이션은 펜티엄 III 프로세스 1.13 GHz, RAM 512MB 의 컴퓨터로 수행하였다. LBP는 약 0.05 초 정도의 가장 빠른 복원능력을 모든 유동 패턴에 보여주었다. TR 은 LBP 보다 약 10 배 정도가 느린 0.6 초의 복원속도를 가진다. 반복알고리즘의 복원시간은 Fig. 3 에서와 같이 수렴조건에 따라 달라진다. ITR 의 각 반복계산당 소요시간은 약 0.5 초이며, PLI 의 각 반복계산당 소요시간은 약 0.06 초이다 따라서 반복법에서는 PLI 가 더 많은 반복을 허용해서 정밀도를 높여도 시간은 크게 늘어나지 않음을 알 수 있다.

다음은 이미지 복원 결과에 대한 질적 평가이다. Fig. 6 에서 볼 수 있듯이 반복법인 ITR 과 PLI 가 원본 이미지를 근접하게 묘사함을 알 수 있다. 특히 PLI 가 제일 우수한 이미지 복원을 했음을 알 수 있다. 반면 빠른 계산이 보장되는 LBP 나 TR 방법은 이미지의 경계가 많이 확산되어 흐려진 것을 확인 할 수 있다.

Original image	Reconstructed image					
	LBP	TR	ITR		PLI	
Stratified flow			Criterion 1	Criterion 2	Criterion 1	Criterion 2
Image error (%)	48.6	14.1	12.58	6.7	6.9	5.6
Annular flow						
Image error	51.7	25.6	26.6	15.4	24	16.3
Core flow						
Image error	36.0	35.4	25.5	19.5	19.6	18.6

Fig. 6 Reconstructed image for water ($\epsilon_r = 80$) and air ($\epsilon_r = 1$), criterion 1, 2 (defined 5%, 1% capacitance residual)

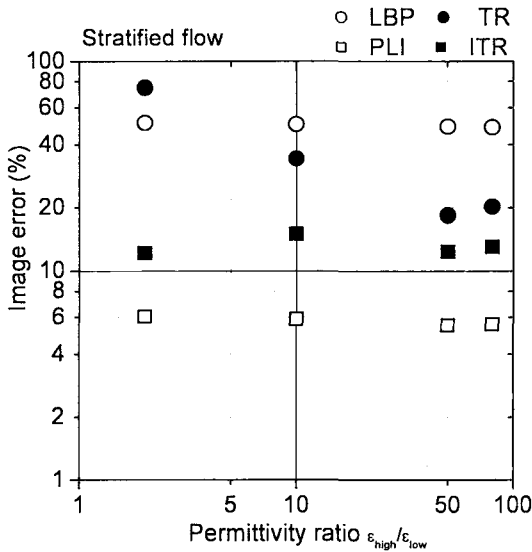


Fig. 7 Image error for changing permittivity(stratified flow)

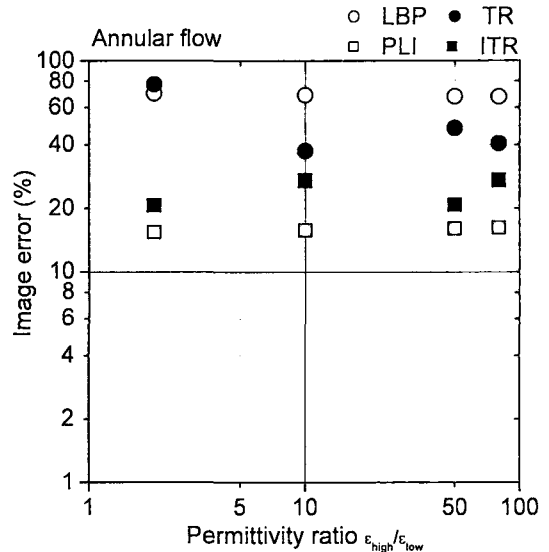


Fig. 8 Image error for changing permittivity(annular flow)

4.2 유전율 변화 효과에 대한 평가

다음은 유전율의 비율 변화에 대하여 각 알고리즘이 보이는 성능을 평가하였다. 평가에 사용한 유전율 비율은 2, 10, 50, 80으로서 비율은 높은 유전율을 낮은 유전율로 나눈 값이다.

층류 모델의 경우는 Fig. 7에 나타난 바와 같이, LBP는 50% 정도의 오차를 보이나, TR 방법은 오차가 70%에서 20%로 유전율 비율이 증가함에 따라 작아졌다. 반복법은 유전율 변화에 둔감하였으나, ITR은 7~15% 범위의 오차를 보였고, PLI는 5%내외의 오차를 보여 가장 우수한 성능을 보였다.

환형류 모델에서는 Fig. 8에서와 같이, LBP는 70% 정도의 오차를 보이나, TR 방법은 오차가 80%에서 40%로 유전율 비율이 증가함에 따라 작아졌다. 반복법은 유전율 변화에 둔감하였으나, ITR은 20~30% 범위의 오차를 보였고, PLI는 10%내외의 오차를 보여 가장 우수한 성능을 보였다.

중심류인 Fig. 9의 시뮬레이션 결과에서는 알고리즘이 유전율의 변화에 대해 크게 의존하지 않음을 확인할 수 있다. LBP는 약 45%의 오차 범위, TR 방법은 30~40%의 오차를 가짐을 알 수 있다.

중심류에서 역시 PLI의 경우 가장 적은 약 15%의 일정한 오차를 가짐을 알 수 있다. 이상의 검토 결과, 유전율 변화가 심한 이상유동의 분석에 적합한 알고리즘은 PLI임을 알 수 있고, 이에 대한 개선을 시도할 경우, PLI를 근간으로 하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

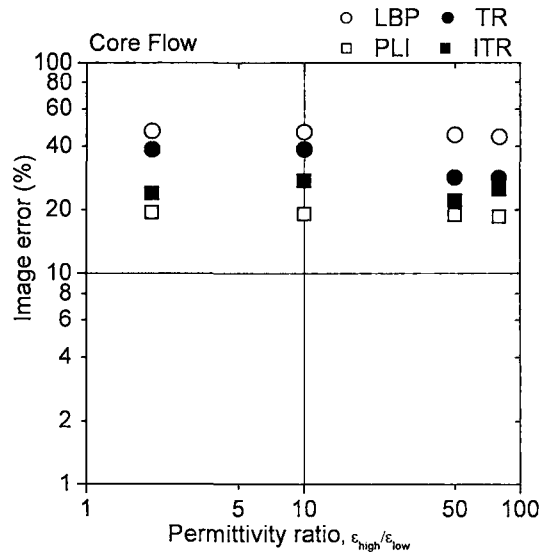


Fig. 9 Image error for changing permittivity(core flow)

5. 결론

본 연구에서는 사각관에서 이상유동이 있을 때 관 단면에 존재하는 상의 공간 분포를 각상의 유전율의 차이를 예측하는 전기장 정보중 캐패시턴스를 이용하여 재현하는 토모그래피 방법을 구현하였다. 이를 위해 센서전극, 노이즈 방지를 위한 스크린 전극, 사각관 벽, 유체를 묘사하는 유한 차분방식의 전기장 해석 코드를 개발하였고, 이로부터 각 전극사이의 민감도 행렬을 도출하여 선형 순방향 전사법을 구축하였다.

역방향 전사를 위해서는 기존에 제시된 대표적인 기법들중 선형역전사(LBP) 기법과 오차의 최소자승법에서 도출된 역전사 기법을 well-posed 화하기 위한 티크노프 정규화(TR) 기법을 구현하였다. 뿐만 아니라 반복계산법으로 뉴턴 랩슨 기법에 티크노프 정규화를 가미한 방법(ITR)과 랜드웨버 반복법(PLI)을 모두 구현하였다.

알고리즘의 평가를 위해, 이상적으로 정의된 유동이미지에 대하여 각 알고리즘을 적용하였고, 이미지 결과를 분석하되 유전율을 변화 시켜가며 이미지 복원 오차를 검토하였다. 그결과 모든 경우에 반복법이 이미지 재생 능력이 뛰어났고, 특히 PLI 법이 유전율 변화에 둔감하면서 이들 기법중 가장 낮은 오차를 나타내었다. 따라서 사각관 이상유동의 캐패시턴스 토모그래피 에는 PLI 기법을 채택함이 타당하다는 결론을 얻었다.

참고문헌

- (1) Lee, J.Y., Kim, N.S. and Ishii, M., 2003, "An Instantaneous Flow Regime Identification Using Probability Distribution Function and Feed Forward Neural Network," *Proc. 10th Int. Topical Meeting on Nuclear React or Thermal Hydraulics, Seoul, A00309*.
- (2) Williams, R.A. and Beck, M.S., 1995, "Process Tomography, Principles, Techniques & Applications," Butterworth-Heinemann Ltd.
- (3) Park, M.C. and Lee, J.Y., "Development of Capacitive Probe for Local Flow Parameter of Two Phase Flow," *KNS spring meeting, 2004, Gyung Ju, Korea*.
- (4) Huang, S.M., Xie, C.G., Thorn, R., Snowden, D. and Beck, M.S., 1992, "Design of Sensor Electronics for Electrical Capacitance Tomography," *IEE proc. G*, Vol. 139, pp. 83~88.
- (5) Yang, W.Q. and York, T.A., 1999, "New A.C. Based Capacitance Tomography System," *IEE Sci. Meas. Technol.* Vol. 146, pp. 47~53.
- (6) Xie, C.G., Huang, S.M., Hoyle, B.S., Thorn, R., Lenn, C., Snowden, D. and Beck, M.S., 1992, "Electrical Capacitance Tomography for Flow Imaging: System Model for Development of Image Reconstruction Algorithms and Design of Primary Sensors," *IEE Proc. G*, Vol. 139, pp. 89~98.
- (7) Mwambele, A.J., Isaksen and Johansen, G.A., 1997, "The Use of Entropic Thresholding Methods in Reconstruction of Capacitance Tomography Data," *Chem. Eng. Sci.* Vol. 52, pp. 2149~2159.
- (8) Hammer, E.A. and Johansen, G.A., 1997, "Process Tomography in the Oil Industry—State of the Art and Future Possibilities," *Meas. Control.* Vol. 30, pp. 212~216.
- (9) Peng, L.H., Merkus, H. and Scarlett, B., 2000, "Using Regularization Methods for Image Reconstruction of Electrical Capacitance Tomography," *Part. Part. Syst. Charact.*, Vol. 17, pp. 96~104.
- (10) Lionheart, W.R.B., 2001, "Reconstruction Algorithms for Permittivity and Conductivity Imaging," *Proc. 2nd world congr. On Industrial Process Tomography (Hannover, 2001)*, pp. 4~11.
- (11) Yang, W.Q., Spink, D.M., York, T.A. and McCann, H., 1999. "An Image-Reconstruction Algorithm Based on Landweber's Iteration Method for Electrical Capacitance Tomography," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 14, pp. 1065~1069.
- (12) Yan, H., Liu, L.J. Xu, H. and Shao F.Q., 2001, "Image Reconstruction in Electrical Capacitance Tomography Using Multiple Linear Regression and Regularization," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 12, pp. 575~581.
- (13) Jinchuang, Z., Wenli, F., Li, T. and Shi, W., 2002, "An Image Reconstruction Algorithm Based on a Revised Regularization Method for Electrical Capacitance Tomography," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 13, pp. 638~640.
- (14) Hanssen, P.C., 1998, "Rank-Deficient and Discrete Ill-posed Problems," Philadelphia, PA: SIAM.
- (15) Yang, W.Q. and Peng, L., 2003, "Image Reconstruction Algorithms for Electrical Capacitance Tomography," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 14, pp. R1~R13.
- (16) Yang, W.Q. and Liu, S., 1999, "Electrical Capacitance Tomography with a Square Sensor," *1st world congress on Industrial process tomography*, Session H1: Hardware, pp. 313~317.