

전기임피던스 영상에 의한 2상유동에서의 기포분포의 가시화

조경호 · 김신 · 이윤준
제주대학교

요 약

유동장에서의 기포거동 정보의 중요성 때문에 이를 정확히 측정하기 위한 실험방법이 여러 가지로 발전해 왔지만 아직까지도 기포분포에 대한 정확한 정보 추출에는 도달하지 못하고 있다. 본 연구에서는 원래 의공학분야에서 새로운 tomography 기술로 연구되고 있는 EIT(Electrical Impedance Tomography) 기술을 2상유동에서의 기포분포 측정방법 개발에 적용하기 위한 기초연구와 기포분포 가시화를 위한 전산실험을 수행하였다. 기포분포 가시화를 위해서는 EIT inverse problem solver로 많이 사용되는 iNR(improved Newton-Raphson) 계열의 EIT 영상복원 프로그램을 본 연구진이 유전알고리즘(Genetic Algorithm)과 fuzzy-based mesh grouping 방법을 추가하여 개선한 영상복원 프로그램을 사용하였다. 전산실험 결과 본 영상복원프로그램으로는 12×12의 분해능으로 모사되는 기포분포를 저항률 오차한도 ±1%의 신뢰도로 PC상에서 복원이 가능함을 확인하였다.

1. 서 론

원자로심에서의 비등을 허용하는 비등형 경수로뿐만 아니라 가압 경수로에서도 증기발생기 설계와 사고에 대비한 안전계통의 거동 해석을 위해서는 2상유동에 대한 충분한 이해가 필요하여 많은 연구가 수행되어 오고 있다. 2상유동은 유동현상 자체가 매우 복잡한데다 열전달에 의한 상변화를 수반하고 있기 때문에 수학적 모델링이 매우 어려워서 1차원적인 모델링이 주로 사용되고 있으며 원자로 안전해석 코드의 대부분은 실험적인 자료들의 fitting에 의존하는 1차원 모델을 채택하고 있다. 1차원 모델은 유동장의 형상 및 열수력학적 조건 등에 많은 영향을 받으므로 2상유동 현상 해석에 대한 신뢰도를 향상시키기 위해서는 equipment specific data에 대한 의존도가 낮은 다차원 모델을 개발할 필요성이 있다. 그러나 다차원 2상유동 모델을 개발하기 위해서는 2상유동 현상에 대한 다차원 정보가 필요한데 현재로서는 만족할 만한 측정기법이 개발되어 있지 않은 실정이므로 이에 대한 많은 연구가 요구되고 있다. 만일 기포 분포에 대한 정량적 정보 추출이 가능하게 된다면 현재 사용되고 있는 여러 경험식의 불확실성(uncertainty)이 크게 개선될 수 있을 것이다. 특히, 원전 열수력 계통의 설계 및 해석 코드를 국산화하기 위해서는 열수력 현상에 대한 깊은 이해와 충분한 양의 실험자료를 필요로 하며, 특히 2상유동 현상에 대한 수학적 모델 개발과 상관식 도출은 필수적인 요건으로 2상유동 현상에 대한 정확한 실험 자료의 생산과 신뢰성 있는 측정 기법의 개발을 필요로 한다.

이상과 같이 유동장에서의 기포거동에 대한 정보의 중요성 때문에 이를 측정하기 위한 실험방법이 여러 가지로 발전해 왔고, 측정 원리에 따라 크게 radioactive absorption and scattering 기법, impedance 기법^{1,2)}, volume 측정 기법, 광학적 기법^{3,4)}, 음향학적 기법 등 매우 다양한 방식이 제안되어 왔다. Probe를 사용하는 경우에는 conductivity probe, optical probe 등이 흔히 사용되고 있으며 유동장을 교란하지 않으면서 측정하는 방식으로는 방사선학적 또는 광학적 장비들이 많이 사용되고 있다. 특히 최근에는 LDV(Laser Doppler Velocimetry), PIV(Particle Image Velocimetry) 등의

광학 장비를 이용한 측정 기술 개발에 많은 노력이 기울여 지고 있는 추세이다.

그러나, 현재 사용되고 수행된 기포계수 측정기법 상의 문제점은 (1) probe를 유동장에 삽입하여 불가피하게 유동장을 교란하고 probe 주위의 국부정보만 추출 가능하거나, (2) 방사선 혹은 광학적 방법에서처럼 유동장 전체에 걸친 통계적 평균값에 대한 정보만을 얻을 수 있거나, (3) 유동 단면에 투사된 정보만 추출 가능하다는 등의 문제점을 갖고 있다.

본 연구에서는 최근 의공학 분야에서 새로운 tomography 기법으로 주목받고 있으며 본 연구진이 이미 기초 기술을 확보하고 있는 EIT(Electrical Impedance Tomography)⁵⁾ 기법을 이용하여 2상 유동장의 기포분포를 영상으로 복원하는 알고리즘에 대한 기초연구 결과를 소개하고자 한다. EIT 기술을 이용한 기포분포의 가시화연구는 RPI 대학과 Grenoble 연구소와 같은 외국의 일부 연구그룹을 중심으로 진행되어 그 가능성 타진에 주력하고 있는 새로운 연구분야이다²⁾. 그러나, 현재 이들이 사용하는 영상복원 알고리즘은 Wisconsin 대학에서 개발된 것⁶⁾을 거의 그대로 적용하는 수준에 머물고 있어, 세계적으로도 아직 개념개발 단계에 머무르고 있는 실정이다.

2. EIT(Electrical Impedance Tomography) 기법의 개요

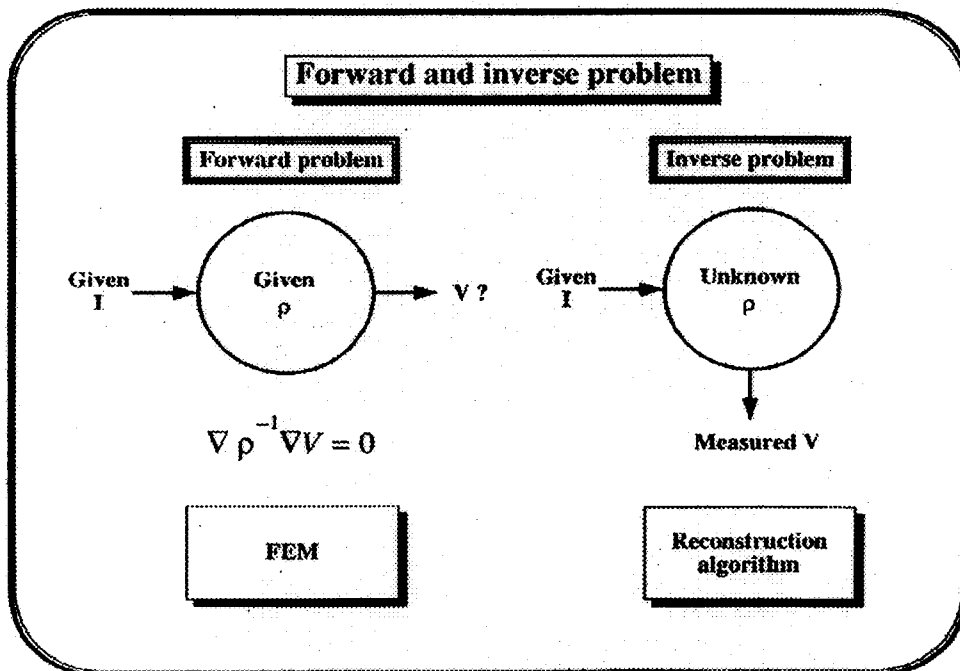


그림 1 EIT forward & inverse problem 개요

미국 Wisconsin 주립대학의 Webster^{5),6)} 박사에 의해서 처음 제안된 EIT 기술의 기본 원리는 그림 1에서와 같이 미지의 내부 저항률 분포를 갖는 물체 주위에 특수하게 제작된 전극을 여러 개 배치하고 적절하게 설계된 전류를 주입하여 이에 따른 인가전압을 물체 경계에서 측정한 후 이를 근거로 EIT의 저항률 복원 알고리즘에서 물체 내부의 미지의 저항률 분포를 재구성하는 기술이다. 그림 1에서 보는 바와 같이 내부 저항률 ρ 의 분포(resistivity distribution)가 다른 물체의 표면(혹은 경계)에 전류를 주입하면 이에 따른 물체표면에 인가되는 전압분포에도 차이가 발생되고 이러한 전압분포는 내부 저항률 분포에 따라 Laplace equation에 의해 일의적으로 결정된다.

EIT 기술은 다른 여러 인체측정 기술에 비해 상대적으로 매우 저렴한 hardware 장치 비용과 인

체에 거의 무해한 약한 전류 주입으로도 인체 내부 저항률, 유전률 등의 측정이 가능하기 때문에 일찍부터 의공학 분야에서 기존의 여러 가지의 인체정보 측정장치, 예컨대 CT (Computed Tomography), MRI(Magnetic Resonance Imaging), X-ray, PET(Photon Emission Tomography) 와 같은 고가 장비를 대체할 것으로 기대되는 차세대 단층촬영 기술로 더 많이 연구되고 있다.

내부 저항률 분포를 알고 Lapace equation에 따라 표면에서 인가되는 전압을 계산하는 문제를 forward problem이라 할 때, EIT에서의 저항률 복원 문제는 시스템의 비선형성과 ill-conditioning 현상 등이 수반되는 상당히 난해한 inverse problem에 해당한다^{6),7)}. 따라서, EIT 기술 구현의 핵심은 크게 나누어 (1) 고속의 강력한 EIT inverse problem solver의 개발과, (2) 정확한 EIT 측정기술로 대별할 수 있는데, 보통 전자를 위한 알고리즘을 EIT image (or resistivity) reconstruction algorithm - EIT 영상(혹은 저항률) 복원 알고리즘 - 이라고 한다. 현재까지의 동 분야 연구 결과로는 EIT 측정 기술분야의 어려움보다는 영상복원 분야에서 실용화에 필요한 수준의 분해능을 확보하는데 어려움이 크며, PC 상에서 구현 가능할 정도로 처리시간을 단축하는 문제가 가장 큰 난제로 남아있다.

3. EIT를 이용한 2상유동장에서의 기포분포 연구

2상유동장에서의 기포 분포 연구에 EIT 기법을 도입하면 일반적인 EIT 기술이 갖는 장점을 가질 수 있으며 상대적으로 고가의 장비인 LDV나 PIV에서는 복원이 어려운 유동방향과 수직인 단면에서의 기포 분포정보의 추출이 가능할 것으로 기대된다. 외국의 경우 EIT 의 일반적인 기술을 토대로 2상유동장에서의 기포 분포 연구가 최근 RPI 대학과 Grenoble 연구소 등에서 수행된 바 있으며 RPI 대학의 경우 phantom 수준의 연구에서 기포의 가시화가 가능함을 보인 바 있다²⁾. 그러나 영상복원 알고리즘의 한계성 등으로 그 활용 가능성은 확인되었으나, 2상유동 실험에 직접 적용하기에는 아직 해결해야 할 문제점이 많이 있다.

본 연구진은 GA(Genetic Algorithm, 유전알고리즘) 기법을 도입하여 EIT 기법의 성패에 중요한 관건인 영상복원 알고리즘의 강건성을 향상시키고, 퍼지기법을 도입한 적응적 요소 그룹화 방법을 개발하여 분해능 증가에 따른 영상복원 시간의 기하급수적 증가문제를 해결하고자 하였다⁸⁾⁻¹¹⁾. 이렇게 하여 본 연구진이 확보한 EIT 기반기술은 2상유동장에서의 기포분포 연구에 적용시킬 경우 RPI 대학이나 Grenoble 연구소에서 얻어낸 결과보다 훨씬 향상된 연구결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 이를 확인하기 위하여, 본 연구에서는 주로 기포분포의 2차원적 영상복원 알고리즘을 개발하여 그 적용 가능성을 전산실험을 통하여 검토하였다.

4. 전산실험 결과 및 검토

본 연구에서는 위에서 언급된 바와 같은 EIT 분야의 문제점을 해결하기 위하여 개발된 EIT 영상복원 알고리즘을 2상유동장의 기포분포 재구성에 적용하고자 하는 타당성 조사의 관점에서 다음과 같은 전산실험을 수행하였다.

그림 2는 본 연구에서 채택한 EIT를 이용한 기포분포 복원 알고리즘의 개념도이다. EIT 실험을 통하여 기포분포를 측정하여 얻어지는 정보는 유동단면의 경계에 인가되는 전압들이다. 이들 전압은 주입되는 전류의 패턴에 따라 일의적으로 결정되고, 적절한 FEM 모델이 존재할 경우는 EIT forward solver로도 정확히 계산될 수 있다.

우선, 기포분포를 12×12의 분해능으로 모사하는 FEM 모델을 생성한 후 forward solver를 이용하여 표면인가 전압을 계산하여 이를 측정된 전압정보로 대용한다. 이번 전산실험에서는 측정전압에 잡음이 전혀 없다고 가정하였다. EIT 영상재구성 알고리즘의 전산실험은 앞에서의 표면 인가전압 계산에 사용되었던 FEM 기포분포 모사모델을 저항률 오차한도 ±1%의 신뢰도로 PC상에서 역으로 재 추적해 내는 작업이다. 이때 사용되는 정보는 오로지 측정된 표면 인가전압 분포 뿐이다.

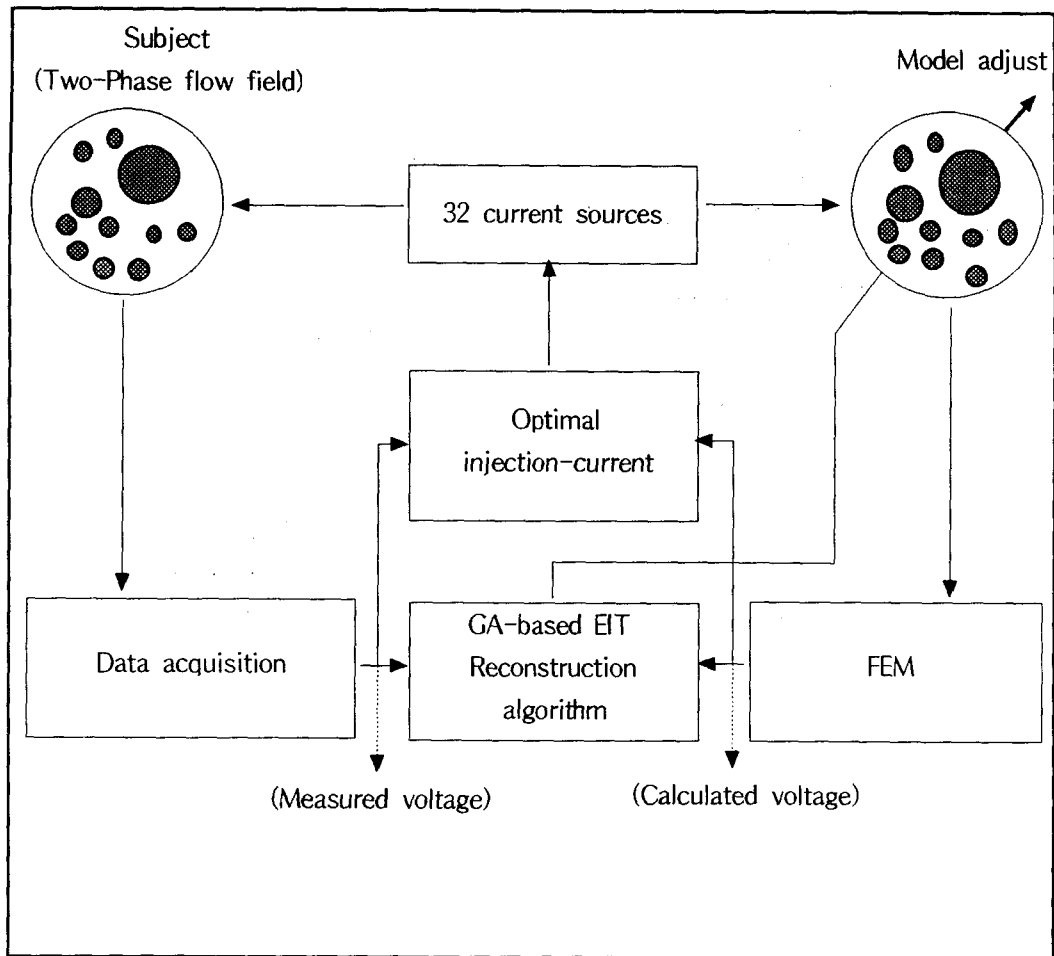


그림 2 GA-based EIT reconstruction algorithm 개념도

그림 3~4는 두가지 예에 대하여 본 기초연구에서 2상유동장의 2차원적 기포분포로 모사된 영상을 EIT 영상복원 알고리즘으로 재구성하는 과정을 보인 것이다.

이상의 전산실험을 통하여, 본 연구에서는 (1) 기존의 EIT 영상복원 기술면에서 가장 앞서 있다고 평가되는 Wisconsin 대학 Webster 교수 연구진이 개발한 영상복원 알고리즘의 문제점인 일점 탐색체계(one-point search)를 유전알고리즘(Genetic Algorithm)을 이용하여 다점-병렬 탐색체계(multi-point parallel search)로 개선하여 영상복원 알고리즘의 강건성을 확보하고, (2) fuzzy-based mesh grouping 방법을 고안하여 분해능 증가에 따른 처리시간의 급격한 증가 문제를 크게 완화시킬 수 있으며, (3) 이 방법의 2상유동장 기포분포 가시화에의 적용 가능성을 확인하였다. 특히, 본 연구에서 고안된 fuzzy-based mesh 그룹화 방법은 2상유동장에서와 같이 대표 저항률 값이 2가지인 경우는 커다란 수정 없이 그대로 적용될 수 있음이 확인되었다.

현재의 EIT 영상재구성프로그램을 2상유동장의 기포분포 가시화에 실용적으로 사용하기 위해서는 첫째, 기포분포의 3차원적 복원문제와 더불어 분해능 향상에 따르는 복원시간의 급격한 증가에 대처하는 방안의 마련과 둘째로, EIT 기포측정장치의 개발 및 실험을 통한 검증 등이 향후 과제로 남아있다.

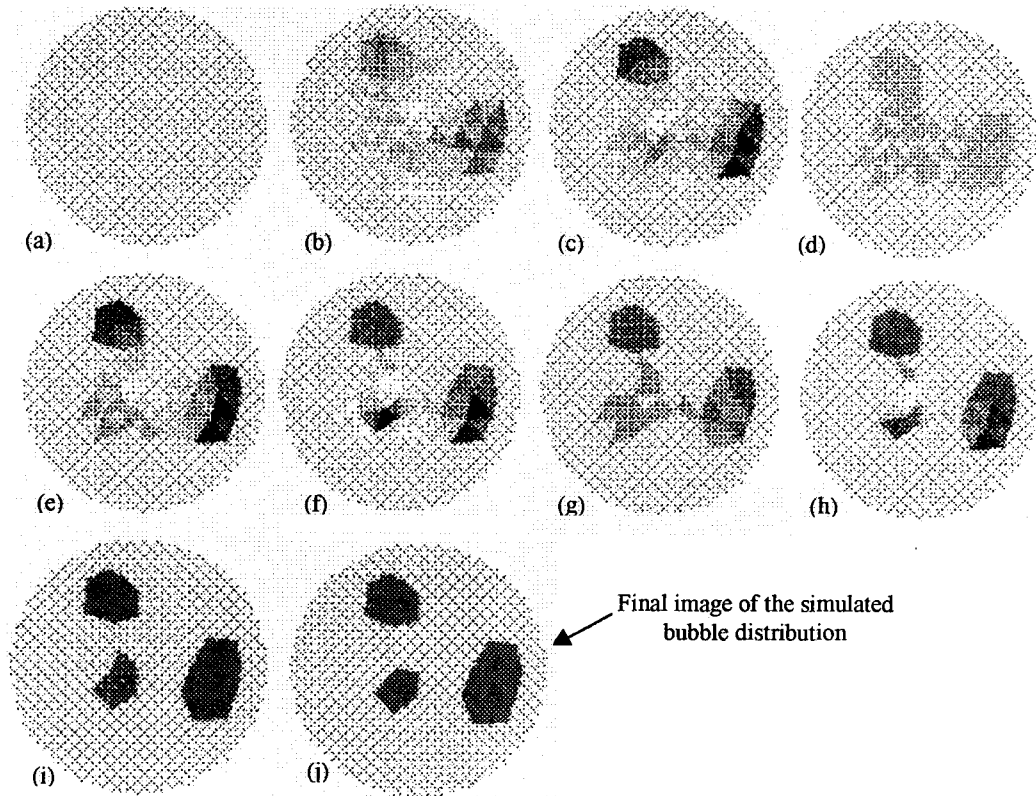


그림 3. EIT 영상복원 알고리즘으로 모사된 기포분포를 재구성하는 과정 (예제 1)

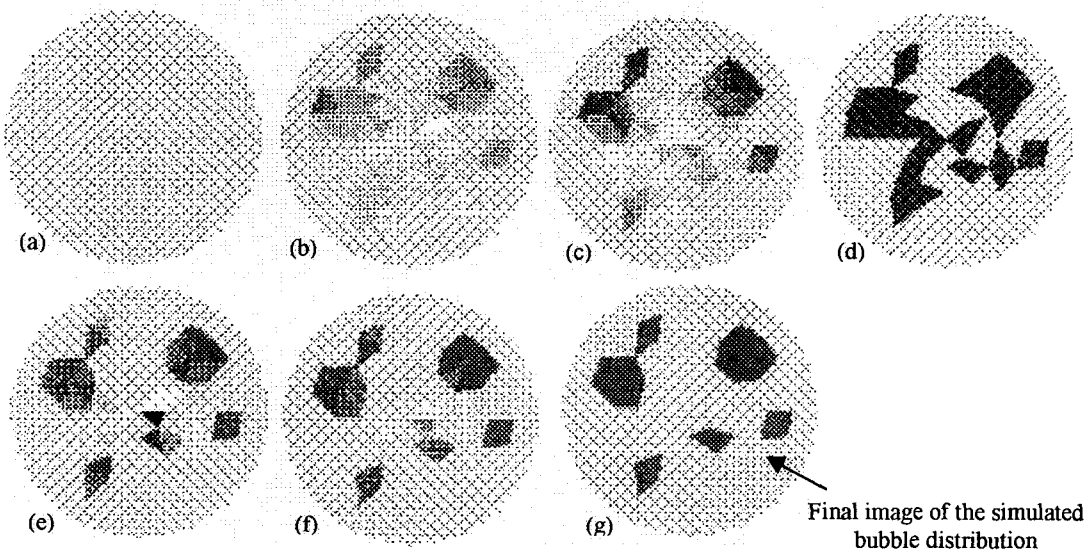


그림 4. EIT 영상복원 알고리즘으로 모사된 기포분포를 재구성하는 과정 (예제 2)

참고문헌

1. Avill R, Mangnall Y F, Bird N C, Brown B H, Barber D C, Seagar A D, Johnson A G and Read N W, 1987, "Applied potential tomography: A new non invasive technique for measuring gastric emptying Gastroenterology", 92, 10, 19-26
2. Ovacik L, Lin J T and Jones O C, 1997, "Progress in Electrical Impedance Imaging of Binary Media," 97 OECD/CSNI MTG on Advanced Instrumentation
3. Vassallo, P.F., Trabold, T.A., Moore, W.E., and Kirouac, G.J., 1993, "Measurement of Velocities in Gas-liquid Two-phase Flow using Laser Doppler Velocimetry," Experiments in Fluids, Vol. 15, 227-230.
4. Lichuan Gui, Ralph Lindken and Wolfgang Merzkirch, 1997 "Phase-Separated PIV Measurements of the Flow Around Systems of Bubbles rising in Water," 1997 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting, FEDSM97-3103, June 22 - 26
5. Webster J G (ed) 1990 Electrical Impedance Tomography (Bristol: Adam Hilger)
6. Woo, E J, 1990, Finite element method and reconstruction algorithms in electrical impedance tomography, PhD Thesis, Dept. of Electrical and Computer Eng., Univ. Wisconsin
7. Isaacson D, 1986, "Distinguishability of conductivities by electric current computed tomography," IEEE Trans. Medical Imaging, MI-5, 91-5
8. 조경호, 고성택, 고한석, 1996, "전기적 임피던스에 의한 컴퓨터 단층촬영 영상(EIT Image)의 재구성을 위한 새로운 방법의 제안 - 유전알고리즘과 뉴우튼-랩슨법을 이용한 복합방법 -, " 대한 전자공학회 논문집, 제 33권, B편, 제 4호, pp 91-100
9. 조경호, 우응제, 고성택, 1997, "Mesh 그룹화 방법을 이용한 EIT 정적영상 복원의 고속화," 대한 전자공학회 논문집, 제 34권, S편, 제 3호, pp 63-74
10. Kyung Ho Cho, E. Woo, and S. Ko, "Fast Static Image Reconstruction Using Adaptive Mesh Grouping Method in EIT," 19th Annual Conf. of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society, Oct. 30-Nov.2, 1997, Chicago
11. Kyung Ho Cho, E. Woo, and S. Ko, 1998, "An Adaptive Pixel Grouping Method using Fuzzy-Genetic Algorithm in Electrical Impedance Tomography"(submitted for the publication of IEEE)