

개선된 EIT 영상복원 알고리즘을 이용한 2상유동의 기포분포 가시화 연구

조 경 호* · 김 신*

A Study on the Bubble Visualization using the Improved EIT Image Reconstruction Algorithm

Kyung-Ho Cho* and Sin Kim*

ABSTRACT

A preliminary investigation is introduced to demonstrate the feasible potentials of the application of the EIT (electrical impedance tomography) to visualize the bubble distribution in two-phase flow. We expect the necessary experimental apparatus for the EIT bubble distribution measurement to be rather simple thus much cheaper than the other bubble motion measuring devices like the LDV(laser doppler velocimetry), PIV(particle image velocimetry) and optical probes. At the present stage, however, the EIT visualization of the bubble distribution takes too long time to be implemented practically. In this paper, an adaptive mesh grouping method based on fuzzy-GA is introduced to reduce the image reconstruction time. Sample reconstructed images by the proposed method are presented with discussion for several 'artificial' bubbles.

Key words : Bubble visualization, Two-phase flow, Electrical impedance tomography, Ill-posed inverse problem

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 때

문에 수학적인 모델링이 매우 어려워 1차원적인 모델링이 주로 사용되고 있으며 원자로 안전해석 코드 의 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

* 제주대학교 에너지공학과
Dept. of Nuclear and Energy Eng., Cheju Nat'l Univ.

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 기울여지고 있는 추세이다.

그러나, 현재 사용되고 수행된 기포계수 측정기법상의 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) 유동단면에 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 2상유동장의 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 연구

분야이다²⁾. 그러나, 현재 이들이 사용하는 영상복원 알고리즘은 Wisconsin 대학에서 개발된 것을 거의 그대로 적용하는 수준에 머물고 있어, 세계적으로도 아직 개념개발 단계에 머무르고 있는 실정이다.

II. Electrical Impedance Tomography

미국 Wisconsin 주립대학의 Webster^{5),6)} 박사에 의해서 처음 제안된 EIT 기술의 기본 원리는 Fig. 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. Fig. 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 Lapace equation에 의해 일의적으로 결정된다.

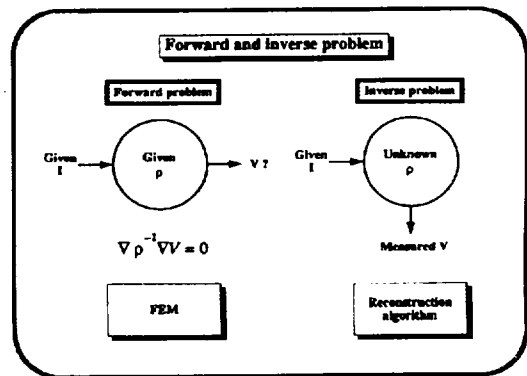


Fig. 1 EIT forward & inverse problem.

EIT 기술은 다른 여러 인체측정 기술에 비해 상대적으로 매우 저렴한 hardware 장치 비용과 인체에 거의 무해한 약한 전류 주입으로도 인체 내부 저항률, 유전률 등의 측정이 가능하기 때문에 일찍부터 의공학 분야에서 기존의 여러 가지의 인체정보 측정

장치, 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^{61,7)}. 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 측정기술분야의 어려움보다는 영상복원 분야에서 실용화에 필요한 수준의 분해능을 확보하는데 어려움이 크며, PC 상에서 구현 가능할 정도로 처리시간을 단축하는 문제가 가장 큰 난제로 남아 있다.

III. EIT를 이용한 2상유동장 기포분포 가시화 연구

Table 1은 EIT 기술을 이용한 기포계수 측정연구를 위한 EIT 기술구성요소 및 연구현황을 요약한 것이다. 2상유동장에서의 기포 분포 연구에 EIT 기법을 도입하면 일반적인 EIT 기술이 갖는 장점을 가질 수 있으며 상대적으로 고가의 장비인 LDV나 PIV에서는 복원이 어려운 유동방향과 수직한 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 이들 연구에서 사용하였던 영상복원 알고리즘은 Wisconsin 대학의 J. Webster 교수와 그 연구진들이 개발하였던 iNR(improved Newton-Raphson) 계열의 영상복원 알고리즘으로서^{5),6)}, 영상복원의 강건성면에서나 영상복원 시간면에서 개선의 여지를 갖고 있었던 알고리즘이었다. 따라서, 그들의 연구에서는 iNR 알고리즘의 한계성 등으로 그 활용 가능성은 확인되었으나, 2상유동 실험에 직접 적용하기에는 아직 해결해야 할 문제점이 많이 있음을 보였다.

본 연구진은 GA(Genetic Algorithm^{12),13)}, 유전알고리즘) 기법을 도입하여 EIT 기법의 성패에 중요한 관건인 영상복원 알고리즘의 강건성을 향상시키고, 퍼지기법을 도입한 적응적 요소 그룹화 방법을 개발하여 분해능 증가에 따른 영상복원 시간의 기하급수

Table 1 H/W & S/W technologies in EIT and its current status

	EIT experimental apparatus	EIT image reconstruction algorithm
tech. classification	hardware	software
role	data measurement	data processing, image reconstruction
main elements	electrodes(sensors), circuit, DAS	FEM modeler, forward/inverse solver,
tech. difficulty	open technology	ill-posed inverse problem
advantage/ disadvantage	non invasive, high speed measuring, low cost H/W, applicable to opaque liquid	low spacial resolution, takes too long time to reconstruct image
future works	micro sensor tech., noise minimization	more robust and fast algorithm
applications	medical, mechanical, chemical, geological ... fields	
research groups	2-phase flow application(Cheju National Univ.), medical application(Kunkook Univ.)	

적 증가문제를 해결하고자 하였다⁸⁾⁻¹¹⁾. 본 연구에서 사용한 적응적 요소 그룹화 방법을 간략히 소개하면 다음과 같다.

adaptive mesh grouping based on Fuzzy-GA

iNR 계열의 영상복원 알고리즘의 가장 큰 문제점은 영상의 분해능 증가에 따른 급격한 처리시간의 기하급수적인 증가에 있고, 이러한 문제가 현재의 EIT 기술의 상용화를 가로막고 있는 가장 큰 걸림돌이다. 그러나, iNR 영상복원 과정에서도 초기의 복원과정은, 설사 영상복원이 완료되지 않았더라도, 복원 대상 물체에 대한 개략적이지만 중요한 정보를 제공한다. 즉 iNR 영상복원의 초기 과정으로부터도 우리는 물체의 개략적인 위치정보 및 형상정보를 추측할 수 있다. 본 요소 그룹화 방법은 이에 착안하여 적절한 평가도구를 통하여 복원과정의 일부 요소들을 주기적으로 그룹화하여 복원알고리즘의 수렴성을 향상시키고 이와 더불어, 복원시간을 획기적으로 단축하고자 하는 목적으로 개발되었다.

요소 그룹화의 기본 사상은 일정 주기의 iNR iteration 결과를 본 연구진이 개발한 fuzzy-GA 그룹화 방법으로 평가하여, 요소별 저항값 및 수렴성향등이 유사한 요소들을 적응적으로 그룹화하는 데 있다.

유동장의 기포분포 가시화를 위하여 본 연구에서는 모든 요소들은 궁극적으로는 2 개의 미지의 저항물값 중에서 하나의 값을 갖는 것으로 가정한다. 그러나 영상복원이 완료되기 전에는 다음과 같은 세가지의 요소그룹이 공존하는 것으로 볼 수 있다. 즉, (1) 유동매질에 속한다고 평가되는 요소그룹(BaseGroup)과, (2) 기포에 속한다고 평가되는 요소그룹(ObjectGroup)과, (3) 이들 중의 어느 그룹에도 포함된다고 평가하기 어려운 미확정 요소그룹(AdjustGroup)이 혼재한다고 가정한다.

요소의 그룹화는 다음과 같은 두 단계를 거쳐 수행된다. 첫째로, 방금전까지 수행되었던 iNR 반복연산 과정을 GA로 분석하여 BaseGroup과 ObjectGroup에 속하는 요소들과 그들의 대표 저항값들을 계산한다. 두 번째 단계에서는 첫째 단계에서의 요소분류의 신뢰도를 향상시키기 위하여 fuzzy 기법에 의거하여

BaseGroup과 ObjectGroup에 속한 요소들을 재평가하고, 전체 요소의 그룹화 위상정보(topology data)를 수정한 뒤 기존의 iNR 반복법을 재기동한다. 위의 두단계에서 요소분류가 어려웠던 것들은 모두 미확정 요소 그룹으로 남아 다음의 iNR 단계 이후로 이들 요소의 그룹화가 연기된다. 이러한 방법으로 iNR → 요소그룹화 → iNR → 요소그룹화 ... 과정을 반복하면 할수록 iNR에서 처리되어야 할 미지수의 개수는 감소하고 그룹화된 요소들의 크기는 증가하여 동 분야에서 야기되어 왔던 ill-condition 현상을 수치해석적으로 극복할 수 있음을 기대할 수 있다. 참고문헌⁹⁾⁻¹¹⁾에 본 알고리즘의 상세한 구현 방법이 기술되어 있다.

이렇게 하여 본 연구진이 개발-확보한 EIT 기반 기술은 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.

IV. 기포분포 가시화 전산실험

본 연구에서는 위에서 언급된 바와 같은 iNR 계열의 EIT 영상복원 알고리즘의 문제점을 해결하기 위하여 개발-보완된 EIT 영상복원 알고리즘을 2상유동장의 기포분포 재구성에 적용하고자 하는 타당성 조사의 관점에서 다음과 같은 전산실험을 수행하였다. Fig. 2는 본 연구에서 채택한 EIT를 이용한 기포분포 복원 알고리즘의 개념도이다. 영상복원을 위한 알고리즘은 Wisconsin 대학의 iNR^{5),6)}을 알고리즘의 강건성 및 고속화를 위하여 본 연구진의 선행연구⁹⁾⁻¹¹⁾ 결과로 개선시킨 것을 사용하였다.

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 적절한 분해능으로 모사하는 FEM

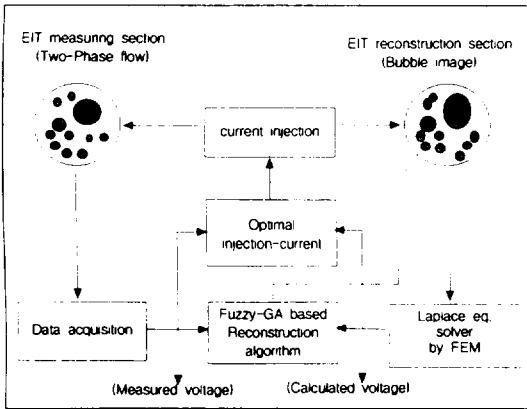


Fig. 2 Schematic diagram for the EIT bubble image reconstruction.

모델을 생성한 후 forward solver를 이용하여 표면인 가 전압을 계산하여 이를 측정된 전압정보로 대용한다. 이번 전산실험에서는 측정전압에 잡음이 전혀 없다고 가정하였다. EIT 영상재구성 알고리즘의 전산 실험은 앞에서의 표면 인가전압 계산에 사용되었던 FEM 기포분포 모사모델을 저장률 오차한도 $\pm 1\%$ 의 신뢰도로 PC상에서 역으로 재 추적해 내는 작업이다. 이때 사용되는 정보는 오로지 측정된 표면 인가 전압 분포 뿐이다.

Fig. 3은 112개의 요소로 모델링된 유동장과 본 전산실험을 위한 인공적인(artificial) 기포들을 보인다.

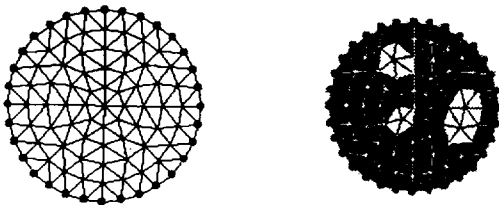


Fig. 3 Finite element mesh and FEM model for 'artificial' bubbles

Fig. 4는 요소그룹화 없이 기존의 iNR 법으로 Fig. 3의 기포분포를 복원하는 과정에서 얻어지는 영상들이다. 영상복원의 초기 몇번의 iteration으로도 기포분포의 개략적인 위치가 얻어짐을 알 수 있다. 그러나, 이 방법으로는 총 50번의 iteration으로도 수렴된 복원영

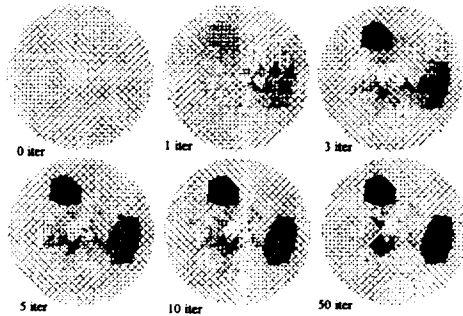


Fig. 4 Reconstructed bubble images by iNR without pixel grouping

상을 얻을 수 없었다. 이러한 현상은 기존의 iNR 계열의 EIT 영상복원 알고리즘에서 공통적으로 나타나는 문제점으로 영상복원의 강건성, 수렴성 및 복원시간 면에서 개선의 여지를 보여준다.

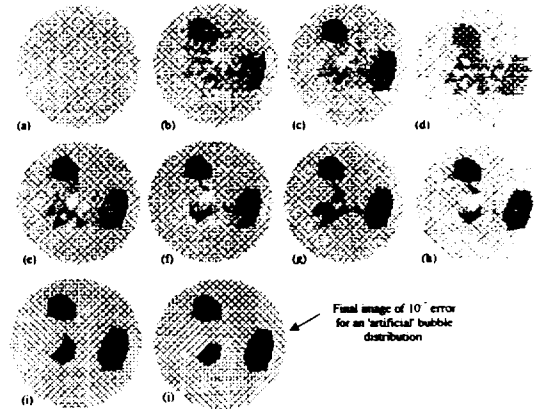


Fig. 5 Reconstructed bubble images by the proposed method (example 1)

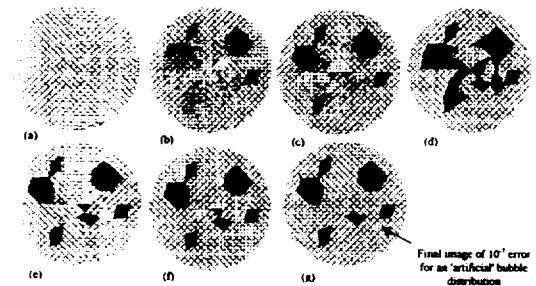


Fig. 6 Reconstructed bubble images by the proposed method (example 2)

Fig. 5. 6에서는 이러한 문제점이 본 연구진이 개발한 적응적 요소의 그룹화 방법으로 해결될 수 있음을 보이는 예이다. Fig. 5(c)까지는 Fig. 4에서와 마찬가지로 요소그룹화 없이 수행된 iNR 결과이다. Fig. 5(d)는 Fig. 5(c)까지의 iNR 결과를 토대로 요소그룹화가 수행된 후의 변화된 그룹화 토폴로지(grouping topology)를 보인다. Fig. 5(d)처럼 그룹화가 진전되면 iNR에서 처리되어야 할 미지수의 개수는 그만큼 줄어들어 Fig. 5(e),(f)에서 볼 수 있는 것처럼 다음 단계에서의 iNR의 수렴성이 향상된다. Fig. 5(g)는 이렇게 개선된 iNR 결과를 토대로 재분류된 그룹 토폴로지이다. 이에따라 미지수는 더욱 줄어들어 iNR 수렴성은 개선되어 Fig. 5(h)(i)와 같은 결과를 얻을 수 있다. Fig. 5(j)가 최종수렴된 기포분포 복원영상으로 소수점 이하 두자리까지 정확히 참값에 수렴된 영상이다.

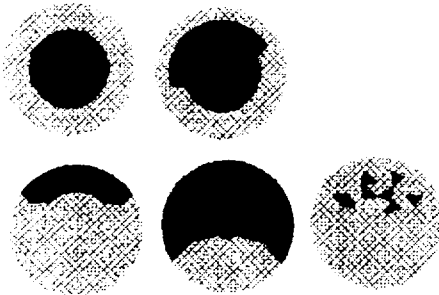


Fig. 7 Reconstructed bubble images by the proposed method (example 2)

Fig. 7은 본 연구에서 테스트된 인공적인 기포분포들로서 2상 유동장에서 흔히 볼 수 있는 기포분포들을 대표한다. 이들에 대한 기포분포 복원은 위의 Fig. 5, Fig. 6에서와 같은 방법으로 성공적으로 이루어질 수 있었다. 반면에 기존의 iNR 알고리즘은 이들 영상을 복원하는 데 있어 모두 실패하였다.

V. 결 론

이상의 전산실험을 통하여, 본 연구에서는 (1) 기존의 EIT 영상복원 기술면에서 가장 앞서 있다고 평

가되는 iNR 계열 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-GA 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-GA based mesh 그룹화 방법은 2상유동장에서와 같이 대표 저항률 값이 2가지인 경우는 커다란 수정 없이 그대로 적용될 수 있음이 확인되었다.

현재의 EIT 영상복원 프로그램을 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.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술부에서 지원하는 '98년도 원자력기초연구사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 재위께 심심한 감사를 드립니다.

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, pp. 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, pp. 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, pp. 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, pp. 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 -." *대한전자공학회 논문집*, 제 33권, B편, 제 4호, pp. 91-100
- 9) 조경호, 우응재, 고성택, 1997. "Mesh 그룹화 방법을 이용한 EIT 정적영상 복원의 고속화." *대한전자공학회 논문집*, 제 34권, S편, 제 3호, pp. 63-74
- 10) Kyung Ho Cho, E. Woo, and S. Ko, 1997 "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, 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)
- 12) D.E. Goldberg, 1989, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison Wesley
- 13) J.R. Koza, 1992. *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*, MIT Press