

이상 유동에서 영상 복원을 위한 EIT system 회로의 안정성 평가

이 보 안* · 현 중 관** · 이 현 주** · 김 신** · 김 경 연***

The Accuracy Evaluation of EIT System Circuit for the Image Reconstruction in Two Phase Flow

Bo-An Lee*, Jong-Kwan Hyun**, Heon-Ju Lee**, Sin Kim** and Kyung-Youn Kim***

ABSTRACT

The EIT(Electrical Impedance Tomography) system is one of the methods for tomography technologies. The EIT measurement is less expensive than other methods because the system is relatively simple and easy to construct compared to other methods. In this study, the real voltage values were compared to theoretical values. The rmse(root mean square error) of measured data was 2.99%. So that, this EIT system circuit was a accuracy circuit for a reconstruction algorithm.

Key words : EIT(Electrical Impedance Tomography), image reconstruction, two phase flow

1. 서 론

2상유동장에서의 기포 거동에 대한 정보의 중요성 때문에 이를 측정하기 위한 실험방법이 여러 가지로 시도되어 왔다.

2상유동장에서의 기포 거동을 측정하는 장비로는 크게 유동장을 교란하지 않는 방식과 유동장에 probe를 삽입하여 국부 정보를 얻어내는 방식이 있는데, 후자의 경우에는 유동장을 교란하며 국부 정보만을 얻

을 수 있다는 단점이 있다. 또한 다른 부류의 기법들은 상대적으로 고가의 장비에 의존하면서도 현재로서는 빠른 천이 과정을 경험하는 이상유동장에 적용하기에는 데이터 취득 속도가 느리다는 문제점을 안고 있다.

그러나 EIT(Electrical Impedance Tomography)기법은 이상유동장 실험에 적용하기에 적합한 다음 몇 가지 기본적인 특성들을 갖추고 있다. 첫째, 유동장을 교란하지 않음으로써 실험정보의 불확실성을 줄일 수 있어 최적의 설계에 필요한 이상유동장 구조 연구에 적합하다. 둘째, 데이터 취득 속도가 충분히 빨라 빠른 천이가 일어나는 곳에서도 적용이 가능하다^{1,2)}. 본 연구에서 데이터를 취득하고 모니터링 하는데 까지 걸린 시간은 0.3sec로 이상 유동장 해석에 큰 도움이 될 것이다³⁾. 셋째, 복잡한 구조물에서도 단순기하

* 제주대학교 대학원

Graduate School, Cheju Nat'l Univ.

** 제주대학교 에너지공학과

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

*** 제주대학교 전자공학과

Dept. of Electric and Electronic Eng., Cheju Nat'l Univ.

구조에서의 경우와 동일한 원리에 근거하여 작동되므로 타 기법에 비해 적용성이 뛰어나다. 넷째, 화공학, 지질학, 및 재료 공학 등에서 monitoring으로서도 응용이 가능하다.

EIT 기술의 기본 원리는 서로 다른 전기적 특성 (conductance, capacitance 등)을 갖는 물체 주변에 특수하게 제작된 전극을 여러 개 배치하고 적절하게 설계된 전류(또는 전압)를 주입(또는 인가)하여 이에 따른 전압(또는 전류)을 물체 경계에서 측정 한 후, 이를 바탕으로 전기적 특성 분포 복원 알고리즘(영상 복원 알고리즘이라 함)을 이용하여 물체 내부의 미지의 전기적 특성 분포를 재구성하는 것이다.

본 연구에서는 팬텀 내부에 저항체가 없을 때와 있을 때 경계에서 전압을 측정하고 이론치와 비교하여 시스템의 신뢰성을 확인하고, 저항체가 있을 때, 그리고 저항체의 위치와 크기가 변화할 때 각각의 경우에 대하여 경계에서 측정되는 전기적 신호와 측정속도를 확인하고 그 측정된 데이터로서 저항체의 위치 등을 확인해 봄으로써 이상유동장 내부의 구조를 규명할 수 있는지 그리고 EIT 시스템이 이상유동장 가시화에 응용될 수 있는지에 대하여 확인해 보았다.

II. EIT system 설계

2.1. EIT system 회로

Figure 1은 EIT (Electrical Impedance Tomography) 하드웨어 시스템의 전체 블록 다이어그램을 나타낸 것이다. 컴퓨터와 컨트롤 보드(Digital Control Board)를 연결하기 위해 범용 인터페이스 카드가 컴퓨터에 내장되어 있고 측정장치에 대한 모든 제어와 데이터의 입/출력은 인터페이스 카드를 통하여 이루어진다.

2.2. 팬텀과 전극

개발된 EIT 측정장치와 영상복원 알고리즘의 특성을 파악하고 성능을 검증하기 위해 다양한 형상의 phantom을 제작할 필요가 있다. 본 연구진은 정밀한 phantom을 제작하기 위해 아크릴을 수치제어 방식으로 가공하였다. 특히, 전극이 phantom 내부로 들출되지 않고 전극의 크기에 맞도록 phantom 내부 면에 홈을 파서 전극간의 영향을 최소화 할 수 있도록 배려하였다. 그리고 표면은 매끄럽게 가공하여 최대한의

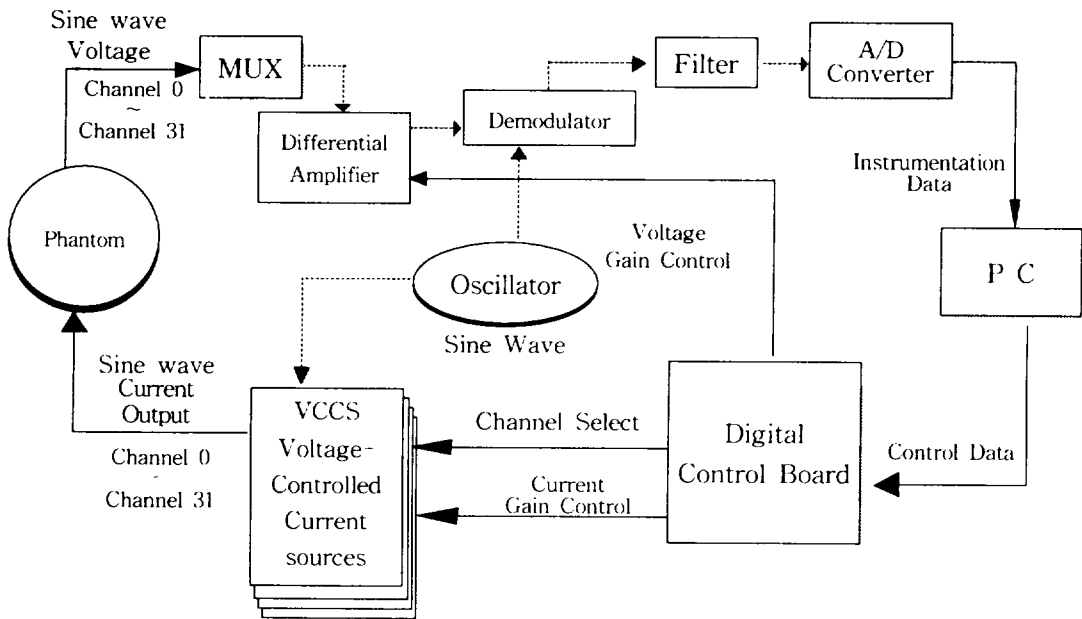


Fig. 1. Block diagram of EIT system.

투명도가 보장되도록 하였다.

32-channel phantom은 직경 80mm, 높이 300mm의 원통으로 제작되었으며, 위아래에 유동 회로와 연결될 수 있도록 플랜지를 설치하였다. 유동 회로 실험에 적용하려면 phantom 상단을 통해 단자를 뽑아 낼 수 없다. 따라서, phantom 옆면에 전극 단자를 뽑아 낼 수 있도록 구멍을 뚫고, 이 구멍을 통해 물이 새지 않도록 O-ring을 설치하였다. 이 때, 하나의 전극에 3개의 단자가 연결되도록 하였는데, 이 중 가운데 전극이 전류를 주입하고 전압을 측정하기 위한 전기 단자이고, 위아래의 것은 전극을 phantom 내에 정확히 고정시키기 위한 고정 단자이다. 전극은 SUS-316으로 제작하였으며, 폭 6mm, 길이 200mm, 두께 2mm의 크기로 제작하였다. 전극에는 중심과 중심으로부터 80mm 떨어진 위치 등, 모두 3곳에 볼트형 단자를 용접하였다.

2.3. 실험 측정 algorithm

실험 측정을 위한 알고리즘은 Fig. 2와 같다.

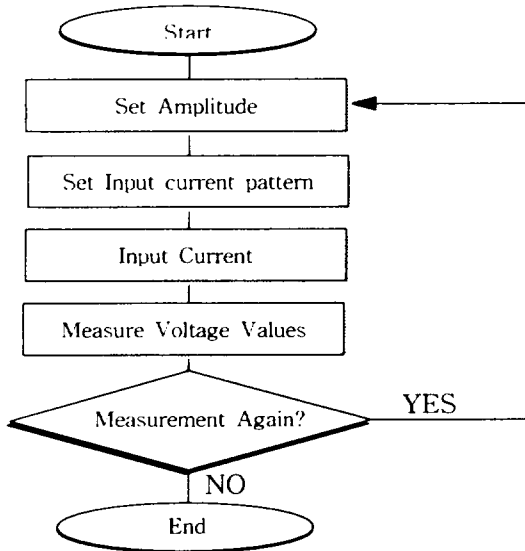


Fig. 2. The Flow-chart for Data Acquisition.

Phantom 내부의 Impedance를 알아내기 위해서는 각각의 전극에 알맞는 current pattern을 이용해서 전

류를 주입하고 측정 전극에서 전압을 측정한다. 이에 대한 순서도가 Fig. 2에 표현되었다. 이 때 측정되는 전압은 임의의 전극을 ground로 잡아 측정을 한다. 이 측정된 전압 data를 이용해서 inverse problem을 풀고 알고자 하는 내부의 임피던스 값을 구하였다.

III. 실험 및 고찰

아래의 수식은 본 실험에서 사용된 주입 current pattern이다.

$$\cos k\theta_l, \quad 1 \leq l \leq L, \quad 1 \leq k \leq \frac{L}{2} \quad (1)$$

$$\sin\left(k - \frac{L}{2}\right)\theta_l, \quad 1 \leq l \leq L, \quad \frac{L}{2} < k \leq L-1 \quad (2)$$

여기서 k는 주기, L은 전극 수, l은 각 전극 번호이다. 그리고 $\theta_l = 2\pi \times l/32$ 로 주어진다. 본 실험에서 수행된 소금물의 conductivity(ρ)는 1596 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이다.

3.1. 전류 주입

전류 이득을 2000으로 고정하고 phantom 내부로 들어가기 전 전류 pattern이 sine wave로 나오기를 멀티미터로 측정하여 확인하였다.

각 전극마다 $\sin(2\pi \times i/32)$ 로 전류를 주입시켰다.

Table 1. Current Value on each electrodes

(Unit : mA)

전극	0	1	2	3	4	5	6	7
전류	0	0.95	1.88	2.71	3.46	4.06	4.52	4.80
전극	8	9	10	11	12	13	14	15
전류	4.89	4.81	4.52	4.08	3.46	2.71	1.86	0.95
전극	16	17	18	19	20	21	22	23
전류	0.02	-0.96	-1.87	-2.71	-3.46	-4.07	-4.51	-4.80
전극	24	25	26	27	28	29	30	31
전류	-4.89	-4.80	-4.52	-4.07	-3.47	-2.72	-1.87	-0.96

모든 전극마다 주입되는 펄스 딜레이는 250 nS로 거의 순간적으로 모든 전극에 전류가 주입된다고 볼 수

있다. 그리고 $\sum_{i=1}^n I_i = 0$ 임을 실험적으로 알 수 있다.³⁾

3.2. 전압측정

전류를 주입하고 전압을 측정하기 위하여 별도의 프로그램을 시행하였다. 우선 전류가 $\sin(2\pi + j/32)$ 로 펄스내로 들어갈 때 최대 전류는 8번 전극으로 들어가게 되고 이때 측정되는 전압값이 최대가 된다. 따라서 0번 전극과 8번 전극으로 들어가는 케이블 사이에 100Ω의 저항을 연결하여 Gain을 측정하고 멀티미터(HP 3458A)를 이용하여 이 양단에 걸리는 전압을 반복하여 측정하여 평균을 구하였다. 이렇게 얻은 평균값을 기준으로 각각의 채널에서 측정되는 Gain값을 실제 전압 값으로 환산하였다.

Table 2는 전류가 $\sin(2\pi + j/32)$ 로 들어갈 때 측정된 전압 값이다. Table 2의 데이터에서 볼 수 있듯이 $\sum_{i=1}^n V_i = \delta v$ 으로 나타났으며, δv 는 실험오차로 최대 3.5% 이다. 그리고 주기 k값에 따라 진폭이 변함을 확인할 수 있다.

예를 들어 k=1일 때와 k=2일 때의 값을 비교하여 보면 진폭이 1/2로 준다. 즉 $A \propto \frac{1}{k}$ 을 만족한다. 여기서 A는 진폭이고, k는 주기이다.

Fig. 3은 저항체가 없을 때 k를 바꾸어 가면서 각 전극에서 측정된 실제 전압값들과 forward problem을 풀어 나온 이론값에 대한 비교를 나타낸 것이다. 가로축은 전극번호(L)이고 세로축은 측정된 전압(V)이다. 그래프에서 ●값들은 forward problem을 풀어 나

온 이론적인 값이고 × 표시의 값들은 실제 측정된 전압 값이다. Table 3은 phantom 내부에 저항체가 없을 때 각 주기마다 측정한 측정값과 이론값의 오차를 나타낸 것이다. 측정 데이터의 전체적인 오차를 구하기 위하여 다음과 같이 RMSE(root mean square error)를 정의하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{[U - V] \cdot [U - V]^T}{U \cdot U^T}}$$

3.2.1 저항체가 없을 경우 전압측정

Table 3. The error of voltages according to injection current pattern(without resistant).

Current pattern	RMSE (%)	Current pattern	RMSE (%)
cos θ	0.0718	sin θ	0.0856
cos 2θ	0.0063	sin 2θ	0.0207
cos 3θ	0.0128	sin 3θ	0.1170
cos 4θ	0.0401	sin 4θ	0.0623
cos 5θ	0.0497	sin 5θ	0.1093
cos 6θ	0.0728	sin 6θ	0.1971
cos 7θ	0.0916	sin 7θ	0.3013
cos 8θ	0.0953	sin 8θ	0.1393
cos 9θ	0.1218	sin 9θ	0.3943
cos 10θ	0.1082	sin 10θ	0.3160
cos 11θ	0.1447	sin 11θ	0.6041
cos 12θ	0.1491	sin 12θ	0.2753
cos 13θ	0.1643	sin 13θ	0.5817
cos 14θ	0.1578	sin 14θ	0.5114
cos 15θ	0.1900	sin 15θ	0.6306

Table 2. The voltage values (current pattern : sinθ)

전극번호	0	1	2	3	4	5	6	7
전압값(V)	0	0.07362	0.145237	0.211345	0.26994	0.316516	0.352074	0.37361
전극번호	8	9	10	11	12	13	14	15
전압값(V)	0.380621	0.372608	0.350071	0.315014	0.266936	0.210343	0.143234	0.074121
전극번호	16	17	18	19	20	21	22	23
전압값(V)	0	-0.07312	-0.14674	-0.21485	-0.27194	-0.32002	-0.35508	-0.37461
전극번호	24	25	26	27	28	29	30	31
전압값(V)	-0.38313	-0.37762	-0.35508	-0.31952	-0.27245	-0.21535	-0.14924	-0.07713

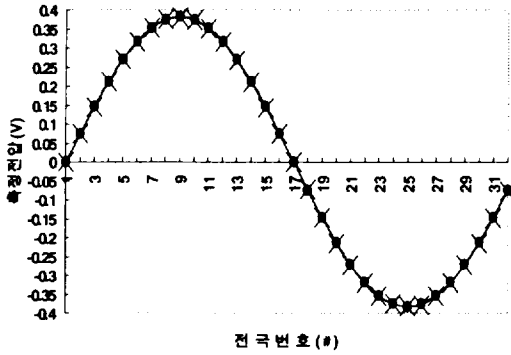


Fig. 3. Measured and theoretical value ($\sin \theta$).

위 그림과 표에서 보듯이 저항체가 없을 경우 최대 오차 정도가 0.6% 정도로 실험적인 전압 값과 이론적인 전압 값의 차이가 거의 없음을 알 수 있다.

3.2.2. 저항체(플라스틱 봉)가 center에 있을 경우 전압 측정

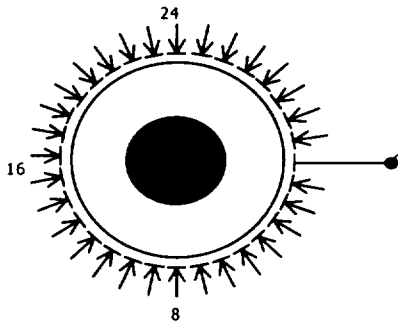


Fig. 4. Resistant(2cm diameter) located at the center.

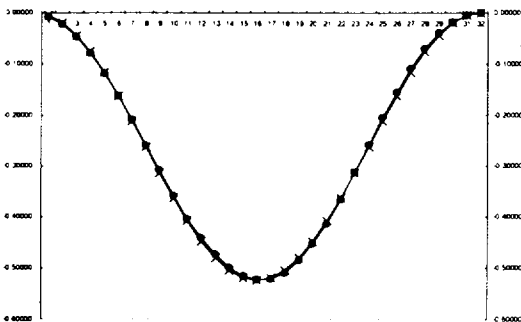


Fig. 5. Measured and theoretical value ($\cos \theta$).

Table 4. The error of voltages according to injection current pattern(resistant is situated center).

Current pattern	RMSE (%)	Current pattern	RMSE (%)
$\cos \theta$	0.5750	$\sin \theta$	0.8777
$\cos 2\theta$	1.4011	$\sin 2\theta$	1.0976
$\cos 3\theta$	0.9599	$\sin 3\theta$	2.2402
$\cos 4\theta$	1.5794	$\sin 4\theta$	1.2325
$\cos 5\theta$	6.4363	$\sin 5\theta$	1.7476
$\cos 6\theta$	2.3356	$\sin 6\theta$	1.9170
$\cos 7\theta$	2.2227	$\sin 7\theta$	3.2800
$\cos 8\theta$	1.9906	$\sin 8\theta$	2.3399
$\cos 9\theta$	3.2595	$\sin 9\theta$	3.8601
$\cos 10\theta$	3.4048	$\sin 10\theta$	2.7009
$\cos 11\theta$	3.5283	$\sin 11\theta$	5.6405
$\cos 12\theta$	3.2501	$\sin 12\theta$	4.0075
$\cos 13\theta$	3.6431	$\sin 13\theta$	4.7354
$\cos 14\theta$	3.5296	$\sin 14\theta$	5.2035
$\cos 15\theta$	2.9603	$\sin 15\theta$	7.7237

그림과 표에서 볼 수 있듯이 저항체가 중앙에 위치해 있을 때 측정된 전압 값과 뉴턴 랩슨(Newton-Raphson) 법에 의해 푼 FEM(finite element method) 수치해를 비교해 본 결과 rmse(root mean square error)값이 평균 2.99%로 측정 데이터의 신뢰성을 입증할 수 있다.

3.3. 영상복원 결과

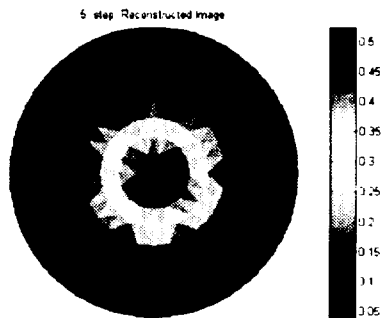


Fig. 6. Reconstructed image of a resistant (2cm) located at the center.

앞의 그림은 실제 측정된 값으로 영상복원 한 결과

이다⁴⁾. 그림에서 볼 수 있듯이 저항체의 크기와 위치를 거의 정확하게(RMSE : 0.0299) 모니터링 할 수 있었다.

IV. 결 론

EIT 기법 유동장을 교란하지 않으므로 비침투 측정의 특성을 가지고 있어 2상유동장 실험 정보의 불확실성을 줄일 수 있다. 또한 EIT system은 pentium 급의 PC에서도 쉽게 구성할 수 있으며 가격이 싸다는 장점을 가지고 있다. 특히, 유로 내부에 흐르는 저항체에 따라 그 측정값도 달라지기 때문에 내부 물질이 무엇인가를 예측할 수 있고, 저항체의 크기에 따라 측정값의 증폭도가 달라지기 때문에 저항체의 크기도 알 수 있다. 또한 저항체가 존재하는 전극 주위에서 데이터 파형이 왜곡되는 현상을 보이므로 저항체의 위치 역시 파악할 수 있음을 알 수 있었다.

본 연구에서는 2cm 직경의 플라스틱봉이 중앙에 있을 때와 없을 때 각각의 전류 패턴에 대한 전압값을 측정하였고, 오차를 계산하였다. 그 결과 있을 때와 없을 때의 오차가 각각 5%와 0.65%가 나왔고, 이 데이터를 이용해서 simulation 해 본 결과의 오차 역시 2%정도로 안정된 값을 보임을 알 수 있었다⁴⁾.

그리고 2개 이상의 저항체가 있을 때 영상복원한 결과의 오차가 0.1% 이하인 것으로 밝혀져, 기포가 여러 개가 존재하는 이상유동장에서도 본 시스템의 적용이 가능할 것으로 보인다⁴⁾.

Acknowledgements

이 연구는 과학기술부(MOST)에서 지원된 이상유동장 가시화를 위한 ET(Electrical Tomography) 기법 개발이라는 연구과제에서 지원되었다.

참고 문헌

- 1) Dickin, F. and Wang, M., 1993. Electrical Resistance Tomography for Process Application. Meas. Sci. Techno., 7, pp.247-260.
- 2) Xie, C. G., Reinecke, N., Beck, M. S., Mewews, D. and Williams, R. A., 1995. Electrical Tomography Techniques for Process Engineering Applications. Chem. Eng. J., 56, pp.127-133.
- 3) 현종관, 2000. 이상유동 영상복원을 위한 EIT 측정 시스템 구축. 제주대학교 석사학위 논문.
- 4) 김봉석, 2000. 확장 칼만 필터를 이용한 전기 임피던스 단층촬영법. 제주대학교 석사 학위 논문.