2000 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

EIT System 제작 및 특성에 관한 연구
The Study on a Development and Characteristics of EIT System

현종관, 이헌주, 이윤준, 김신, 이보안, 고성택, 한철규

제주대학교
제주도 제주시 아라1동 1번지

요약

EIT(Electrical Impedance Tomography) 시스템은 전기적 신호에 의해 이상유동장 내부의 구조를 규명하는 장치 중 하나이다. 본 연구에서는 전류신호 발생과 전압측정을 수행하는 EIT 시스템의 회로를 설계 제작하고 구성하여 그 특성을 조사하였다. 본 연구에서는 phantom 내부에 저항체가 없을 때 전압을 측정하여 forward problem의 해와 비교하였으며 저항체가 존재 할 때, 저항체의 위치가 변할 때 등 각각의 특성을 확인하였다. 이를 통해 제작된 EIT 시스템이 이상유동장 가시화에 사용될 수 있음을 확인했다.

Abstract

EIT(Electrical Impedance Tomography) system is one of instruments to show the inner construction of two-phase flow by electrical signal. In this study, we developed a circuit of EIT system, perform current signal generation and voltage measurement, and examined the characteristics. We measured voltages when resistance isn't in the phantom. And then, we compared with the result of forward problem. And found the characteristics when the resistance is in the phantom and a position of the resistance changes in the phantom. Through that, we verified that this EIT system be able to used reconstruct the inner construction of two-phase flow

1. 서론

열유동 시스템에서 이상유동은 일반적인 현상으로, 효율적인 시스템 설계와 운용, 그리고 해석을 위해서는 이상유동장에 대한 이해가 필수적이다. 이상유동장에서의 기포 거동을 측정하는 방법들은 유동장을 교란하지 않는 방식과, 유동장에 conductivity probe, optical probe 등을 삽입하는 방법이 있다[1]. 후자의 경우에는 응답시간이 매우 짧아 이상유동 난류 거동을 비롯한 국부 정보를 정밀하게 제공한다는 장점 이 있지만, 유동장을 교란하며 국부적인 정보만을 얻을 수 있는 단점이 있다. 유동장을 교란하지 않으면서 측정하는 방식으로는, 방사선 흡수 및 산란기법[2], laser 등을 이용한 광학적기법[1,3], 초음파기법 등 다양한 방법이 있다. 이중 방사선 흡수 및 산란 기법은 우수한 공간 분해능을 가지고 있으나 응답시간이 매우 길어 짧은 시간에 급격한 변화가 일어나는 경우에는 적용이 곤란하며 후자의 방법들은 비용이 많이드는 단점이 있다. 이에 비해 EIT(Electrical Impedance Tomography) 기법은 응답시간이 상대적으로 아주 짧으므로 공간 분해능을 향상시키면서 동시에 계산 시간을 줄일 수 있고 비용이 저렴하다는 점에서 타 방법보다 유리하다[1,4,5].

EIT 기술의 기본 원리는 미지의 내부 저항률 분포를 갖는 물체 주위에 특수하게 제작된 전극을 여러 개 배치하고 적절하게 설계된 전류를 주입하여 이에 따른 전압을 물체 경계에서 측정한 후 이 자

료를 사용하여 저항률 복원 알고리즘을 통해 물체 내부의 미지의 저항률 분포를 재구성하는 기술이다[1,5]. 내부에 다른 저항률을 갖는 부분이 포함된 물체의 표면(혹은 경계)에 전류를 주입하면 내부의 저항률 분포에 따라 전장의 분포가 결정되고, 이에 따라 경계면에서의 전압 또는 전류도 달라진다. 내부의 저항률 분포를 알고 경계면에서의 조건에 따라 유동장 전체에 걸친 전기장을 해석하는 문제를 forward problem이라 하며, 경계면에서의 전기장에 대한 정보만을 이용하여 유동장 내부의 전기적 특성 분포, 즉 각 상의 분포를 재구성 해내는 것을 inverse problem이라 한다.[1,5,6]

EIT에서 저항률 복원에 따른 기술 구현의 핵심은 크게 나누어 EIT inverse problem solver의 개발과 정확한 EIT 측정기술로 볼 수 있다. 이 중 EIT 측정기술은 EIT의 가장 기본이 되는 기술이다. 이는 실제 물리적 현상을 측정하는 것으로 측정의 정밀도에 따라 image reconstruction에 끼치는 영향이 달라진다[1,5,6,7].

EIT 측정 system은 전체를 제어하는 제어부, 제어된 형태의 전류를 발생시키는 신호발생부, 경계면에서의 전압을 측정하고 선별하는 측정부, 신호를 디지털화 해서 저장하는 저장부, 그리고 software 부분으로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 이러한 구성을 갖는 EIT system을 설계 제작하였고 Phantom 내부에 저항체가 없을 때 경계에서 전압을 측정하여 forward problem의 해와 오차를 비교하였으며 저항체의 존재 유무와 위치에 따라 본 시스템의 특성을 확인하였다.

2. EIT system

2.1 EIT 회로 구성

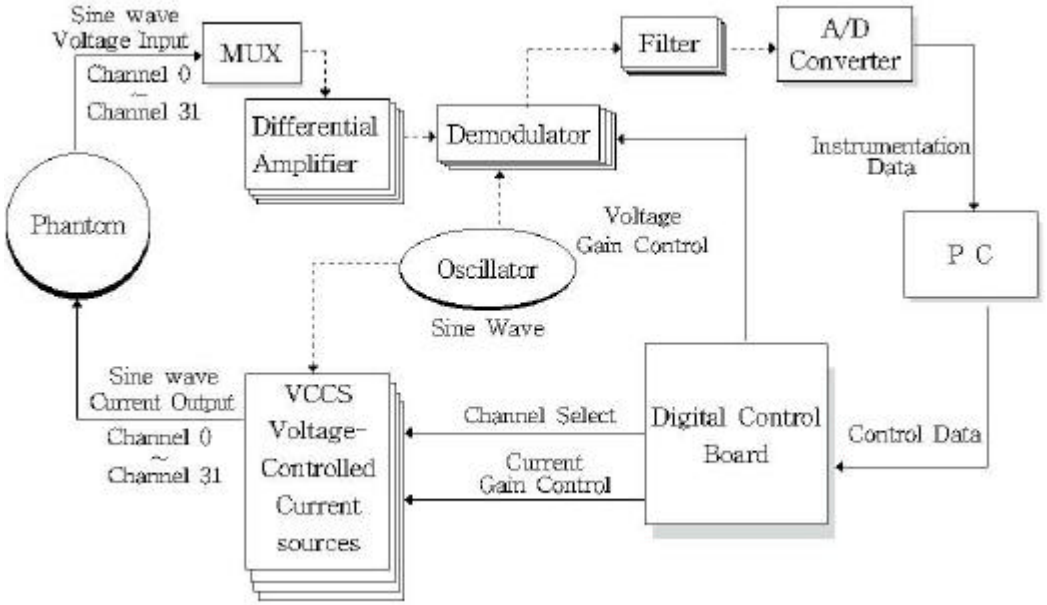

그림 2 - 1 EIT 시스템의 블록 다이어그램

전체 회로의 블록 다이어그램은 그림 2-1과 같다.

전체장치는 제어부, 신호발생부, 측정부, 저장부로 나눌 수 있다.

그림 2-1.에서 제어부는 Digital Control Board가 담당하며, 여기에 신호측정에 관련된 software가 부가된다. 신호발생부는 VCCS와 Osillator로 구성되며 측정부는 MUX, Differential Amplifier, Demodulator, Filter로 구성되고, 신호를 디지털화 하는 A/D Converter와 PC의 내부메모리로 구성된다.

제어부에 속하는 Digital Control Board는 32개 채널 중 하나를 선택하여 전류 이득(Current Gain)을

조정하고, 측정된 32개 전압신호 중 복조기(Demodulator)에 전달되는 하나의 신호를 선택하기 위하여 MUX가 사용되는데, MUX에서의 채널 선택 제어 신호를 발생한다. 그리고 복조기에 전달된 신호의 전압 이득(Voltage Gain)을 조정한다. Digital Control Board에서 전류 이득(current gain)을 조절하면 VCCS(Voltage-Controlled Current sources)와 Oscillator에서 제어된 형태의 전류를 발생시키게 된다.

Voltage-Controlled Current Source(VCCS)회로는 측정 대상물에 실제적으로 가해지는 사인파 전류 신호를 발생하는 회로로서 꼭같은 회로가 32개의 채널을 이루고 있다. PM7645를 사용하여 전류 이득을 디지털 신호로 제어할 수 있게 하였다. 즉 사인파 전압 신호의 진폭을 조정하여 전압-전류 변환 회로로 입력시킴으로 최종 전류 신호를 가변 시킨다. VCCS 회로는 Bipolar operation으로 동작한다. 'Bipolar operation' 회로는 입력되는 디지털 데이터 값에 따라서 진폭이 변화하며 경우에 따라서 출력이 180도 위상차를 갖게 설계되었다. VCCS 회로는 32개 채널에 대해 각각 같은 회로가 쓰이며 각 채널에서의 위상차는 전체 회로 오차의 중요한 요인이 됨으로 각 저항과 콘덴서 값의 오차를 최대한 축소하였다.

Oscillator 회로는 전체 시스템의 가장 중요한 신호원으로서 ILC8038과 콘덴서 저항, OP-Amp로 구성 하였으며 왜곡률을 최대한 줄이기 위해 설계된 사인파 발진회로 제작하였다. 발진 주파수는 $f_0=1/2\pi CR$로 결정되며 저항은 2개의 5kΩ 가변저항으로 미세 조정하게 되어 있다. 콘덴서는 주파수 특성이 좋은 70 pF을 사용했다. 발진기는 모두 적분회로로 구성되어 있기 때문에 OP-Amp에서 발생하는 고조파 왜곡을 적게 할 수 있다. 출력된 50KHz 사인파가 8개의 전류 신호 출력 보드에 공급될 때에는 OP-Amp를 사용한 버퍼를 각 보드에 추가하여 사용했다.

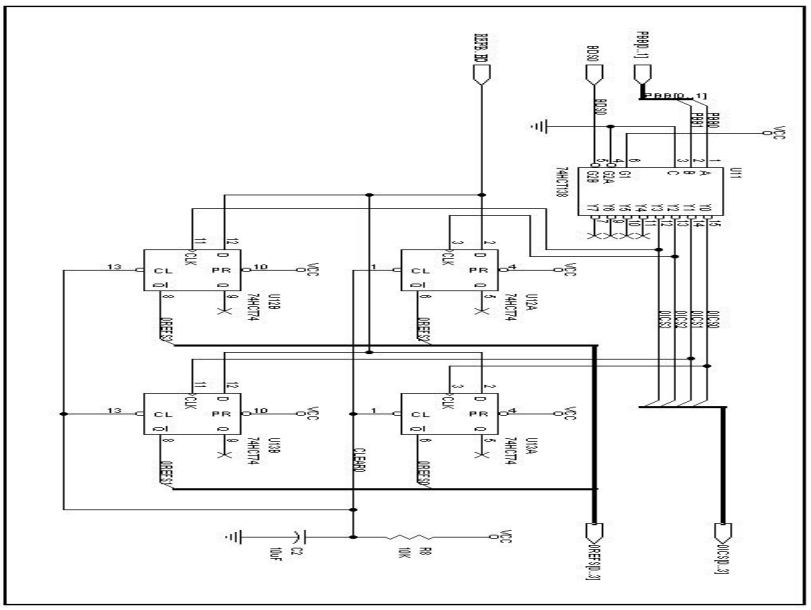

그림 2.2 VCCS(Voltage-Controlled Current Source) 보드 컨트롤

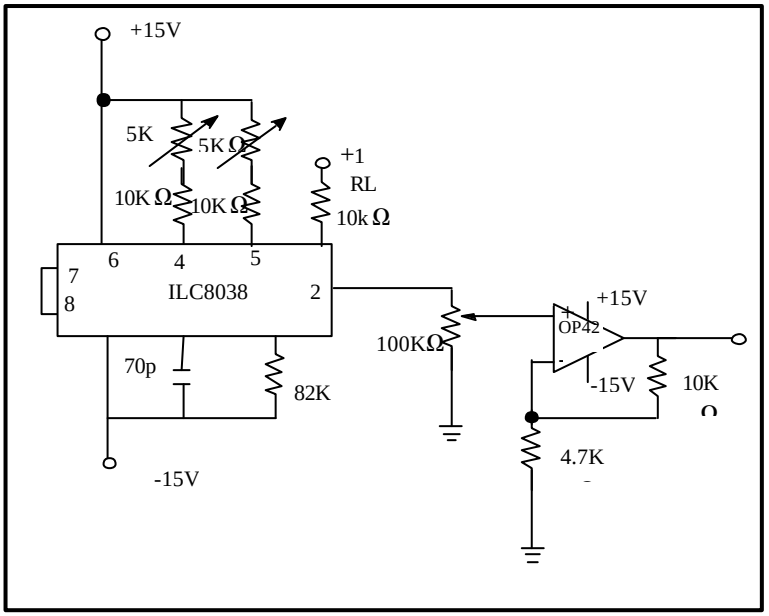

그림 2-3 발진기(Oscillator) 회로

차동증폭기(Differential Amplifier) 회로는 MUX로부터 입력된 두 신호를 증폭시키고, 높은 입력 임피던스를 가지고 각 채널에서 입력되는 신호에 대해 중간 회로에서 발생하는 여러 임피던스 성분에 의한 왜곡을 최소화할 수 있어 본 시스템에 사용되었다.

복조기(Demodulator)에는 여러 방법이 있으나 본 시스템에서는 AD630을 사용하여 측정된 신호를 정류된 신호로 바꾼다. 측정된 신호가 증폭기를 거쳐 AD630으로 입력되기 이전에 디지털 신호에 의해 진폭을 조절할 수 있도록 PM7645의 Single operation을 사용한다. 측정된 신호 Vp(peak voltage)가 6V 이상이면 정류된 신호가 측정범위를 넘어서 잘리므로 PM7645를 이용하여 진폭을 조절한다. 10nF 콘덴서는 많은 소자들을 경유하면서 생겼을지 모르는 DC 성분이나 Low-frequency noise를 제거한다.

Filter로는 스텝 응답 시간(Step response time)이 매우 짧은 Four-pole Bessel Filter를 사용하였다. 본 시스템에 사용한 Bessel filter의 스텝 응답시간은 400μS 정도이다. 가장 빠른 응답 시간을 위한 fc (Corner Frequency)는 100 KHz이지만 리플(Ripple)이 100 KHz이므로 복조기의 회로에서는 좀더 낮은 fc 를 갖도록 설계되었다. 이는 컴퓨터의 비디오 펄스와 같은 다른 소스들로 인한 에러를 방지하기 위한 것이다. 복조기 회로는 증폭도가 '1'이 되도록 설계되었으며 회로에 표기된 저항과 콘덴서의 값은 될 수 있으면 정확히 일치 시켜야 한다. 필터 회로는 아날로그 회로의 최종 출력단에 있으므로 여기서의 작은 오차는 전체 시스템의 오차에 큰 영향을 미칠 수 있다.

아날로그 신호를 디지털화 하는 A/D Converter의 출력은 12 bits 이지만 출력 데이터가 부호를 갖고 있으므로 실제 데이터는 11 bits 만이 유효하다. A/D Converter 회로는 Bipolar operation으로 동작하게 설정되어있다. 이는 VCCS 회로가 Bipolar operation으로 동작함으로 출력되는 DC 전압 신호가 극성을 갖기 때문이다. A/D Converter로 사용된 AD574A는 35 μS의 최대 변환 시간을 갖는 12-Bit A/D Converter로서 디지털 제어 신호에 의해 쉽게 Bipolar 또는 Unipolar operation이 가능하고 입력되는 아날로그 신호의 최대치는 10V와 5V 중에서 선택할 수 있게 된 칩이다.

출력되는 디지털 데이터 값은 극성을 가지므로 컴퓨터로 입력된 데이터는 변형되어 쓰여야 하며 표 2-1은 아날로그 신호의 입력에 따른 디지털 데이터 출력을 보여준다.

표 2-1 아날로그 신호의 입력에 따른 디지털 데이터 출력

Analog Input(Vp=±10V)	Digital Output												
	MSB												LSB
-10 V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
-4.88 mV	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
+4.88 mV	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
+9.995 V	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	

측정된 데이터를 저장하는 컴퓨터에는 컨트롤 보드(Digital Control Board)를 연결하기 위해 범용 인터페이스 카드가 컴퓨터에 내장되어 있고 측정장치에 대한 모든 제어와 데이터 입/출력은 인터페이스 카드를 통하여 이루어진다.

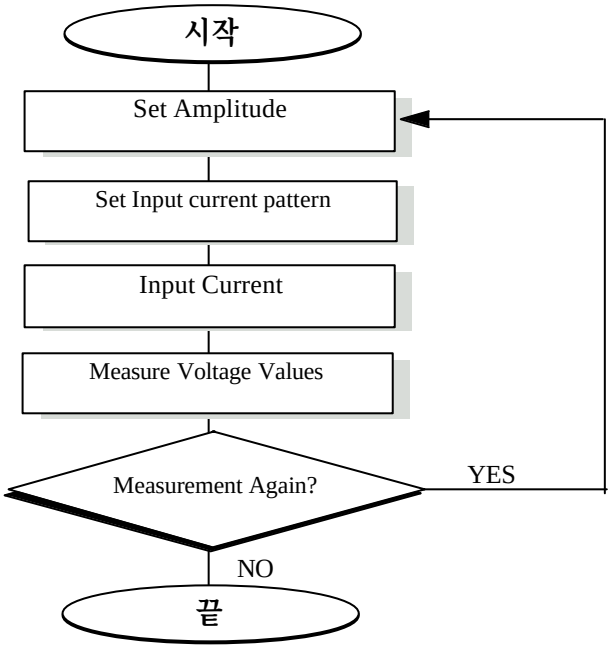

그림 2-4 Flow-chart for Data Acquisition

실험 데이터를 측정하기 위한 소프트웨어의 흐름도는 위의 그림 2-4와 같다. 먼저 주입 전류의 amplitude를 결정하고 알맞는 current pattern을 결정한 다음 그 current pattern에 맞게 전류를 주입하고 측정 전극을 통해 전압을 측정하게 된다. 이 때 측정되는 전압은 임의의 전극을 ground로 잡아 측정을 한다. 이 측정된 전압 data를 이용해서 inverse problem을 풀고 알고자 하는 내부의 임피던스 값을 구하였다.

2.2. Phantom과 전극 구성

영상복원 알고리즘의 특성을 파악하고 성능을 검증하기 위해서는 다양한 형상의 phantom을 제작할 필요가 있다. 본 연구에서는 원통형 phantom을 가지고 특성 및 성능을 파악하였다. phantom의 높이는 330mm이고, 내경이 80mm의 실린더 모양으로 재질은 플라스틱으로 되어 있다. phantom의 위 부분은

뚫여 있어 내부에 저항체를 넣을 수 있게 제작하였다. 그리고 phantom 아래쪽에는 모눈종이를 삽입하여 저항체의 위치를 정확하게 알 수 있게 하였다.

전극은 phantom내에 삽입이 되어 있어 phantom 내의 전해질과 접촉이 되어있으며 전극의 길이는 200mm이고 너비는 6mm이다. 본 실험에서 사용된 전극의 재질은 Stainless Steel로 11.25° 간격으로 균일하게 분포되어져 있다.

EIT에 사용되는 전극은 유동장과 접촉하기 때문에 접촉 impedance를 최소화하기 위해 전극 표면은 매끄럽게 하여 전도도가 최대한 보장되도록 설계를 하였다. 그리고 phantom 내부로 돌출되지 않도록 전극의 크기에 맞게 phantom 내부 편에 홈을 파서 전극간의 영향을 최소화하고, 불필요한 부분이 유동장에 노출되지 않도록 설치 하였다.

guard 전극을 이용하여 fringe field의 영향을 최소화시키는 형태로 실험도 수행하였다. 그 결과 전극이 길어가 전해질의 높이와 같게 하면 차이가 없다는 것을 알 수 있었다.

3. 실험 방법 및 실험 결과

본 연구에서는 phantom 내에 저항체가 없을 때와 1개의 저항체를 집어 넣었을 때, 그리고 두 개의 저항체를 집어넣었을 때의 상황을 설정하여 실험을 하였다. 저항체는 플라스틱 봉으로 되어 있으며 직경이 3cm와 2cm이다. 그리고 이 저항체의 전기전도율은 무한대에 가깝다.

펜텀 내에는 농도가 0.15%인 소금물(NaCl)로 채워져 있다. 그리고 본 시험에서 수행된 소금물의 저항률은 333 Ωcm, conductivity(ρ)는 0.003 $(\Omega cm)^{-1}$이다. conductivity는 온도와 소금물의 농도에 민감하므로 매 실험마다 온도와 전해질의 농도를 측정하여 동일한 실험환경에서 실험을 수행하였다.

3.1 전류 주입

전류주입에 있어서 내부 불균일성의 변별력이 가장 우수한 것으로 알려진 adaptive mode를 택하였다. 이 방법에서는 32개의 전극에 각기 상이한 전류를 주입하되 전체적으로 전류의 세기 분포가 삼각함수 꼴로 만드는 것이다.

아래의 수식은 본 실험에서 사용된 주입 current pattern이다.

$$\cos kq_i, \qquad 1 \le i \le L, \qquad 1 \le k \le \frac{L}{2} \qquad (1)$$

$$\sin\left(k - \frac{L}{2}\right)q_i, \quad 1 \le i \le L, \qquad \frac{L}{2} \langle k \le L - 1 \qquad (2)$$

여기서 k: 주기, L: 전극 수, i: 각 전극 번호이며, $q_i = 2p \times i/32$로 주어진다.

전류 이득을 2000으로 고정하고 phantom 내부로 들어가기 전 전류 pattern이 sine wave로 나오는가를 멀티미터(HP3458A)로 측정하여 확인하였다. 그림 3-1은 주입전류가 $\sin q_i$ 일때 펜텀 내부로 들어가는 전류파형을 측정한 값이다.

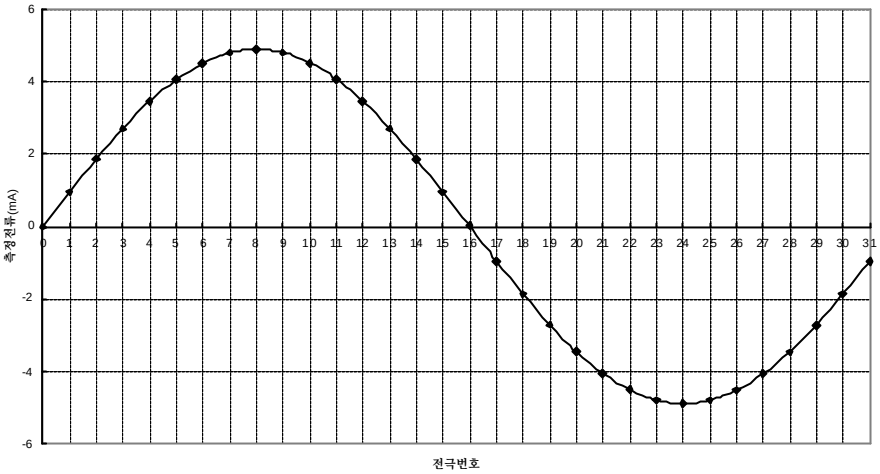

그림 3-1. 펜텀 내부로 들어가는 전류 파형

모든 전극마다 주입되는 펄스 딜레이는 250 nS**로** 80μS **이후에는 모든 전극에 동시에 전류주입이 이루어진다. 전류분포의 오차를 계산하여 본 결과** 0.2% **정도의 오차가 나왔다. 그리고 실험을 통하여** $\sum_{i=1}^{32} I_i = 0$ **임을 확인할 수 있었다.**

3.2. 전압측정

전류를 주입하고 전압을 측정하기 위하여 별도의 프로그램을 시행하였다.
우선 전류가 sin(2π*i/32)**로** phantom **내로 들어갈 때 최대 전류는** 8**번 전극으로 들어가게 되고 이때 측정되는 전압 값이 최대가 된다. 따라서** 0**번 전극과** 8**번 전극으로 들어가는 케이블 사이에** 100Ω**의 저항을 연결하여** Gain**을 측정하고 멀티미터(**HP 3458A**)를 이용하여 이 양단에 걸리는 전압을 반복하여 측정하여 평균을 구하였다. 이 나온 평균값을 기준으로 각각의 채널에서 측정되는** Gain**값을 실제 전압 값으로 환산하였다.**

전체 시스템의 데이터 취득속도는 0.3sec**로 데이터 측정은 거의 실시간으로 이루어졌으며** .NMR(Nuclear Magnetic Resonance)**과 초음파 단층촬영** X-ray CT**와 대등하거나 우수하다는 것을 알 수 있었다.**
표3-1**은 전류가** sin(2π*i/32)**로 들어갈 때 측정된** Gain **값과 전압 값이다.**

표 3-1. Current pattern**이** $\sin q_i$ **일 때 각 전극에 측정된** Gain**과 전압**

전극번호	0	1	2	3	4	5	6	7
Gain **값**	0	179	354	517	658	773	858	909
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
Gain **값**	925	905	850	765	648	511	348	184
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
Gain **값**	0	-178	-355	-518	-659	-773	-859	-909
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
Gain **값**	-930	-917	-862	-776	-662	-523	-362	-187
전압값(V)	-0.38313	-0.37762	-0.35508	-0.31952	-0.27245	-0.21535	-0.14924	-0.07713

위 실험 데이터에서 볼 수 있듯이 실험 오차를 생각해 본다면 모든 전극에서 측정된 전압 $\sum_{i=1}^{32} V_i = 0$ 이 나옴을 알 수 있다.

본 실험에서 k값을 변화 시켜보면서 실험을 해 본 결과 k값에 따라 $A \propto \frac{1}{k}$로 진폭이 변함을 확인할 수 있었다. 예를 들어 k=1일 때와 k=2일 때의 값을 비교하여 보면 진폭이 1/2로 준다. 여기서 A는 진폭이고, k는 주기이다.

아래의 그림 3-2는 저항체가 없을 때 주입 전류를 $\cos q_i$ 과 $\sin q_i$ 로 주입시켜 각 전극에서 측정된 실제 전압 값들을 spline 시키고 forward problem의 해와 같이 나타낸 것이다.

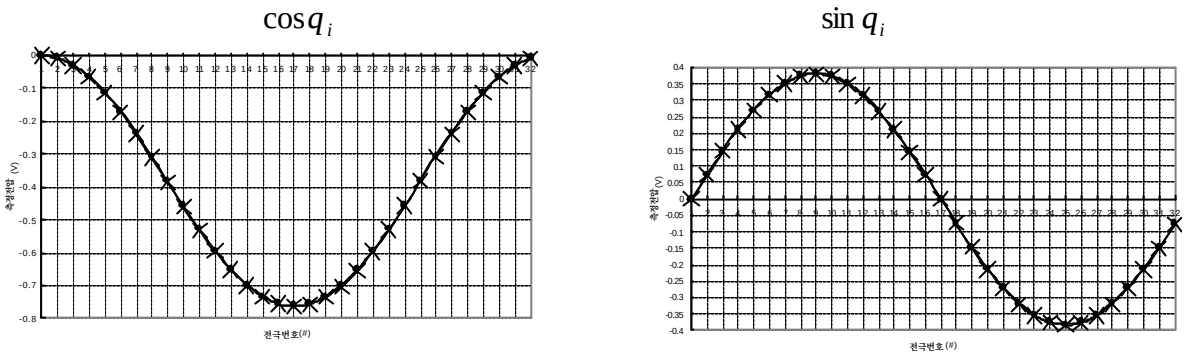

그림 3-2. 전류를 $\cos q_i$ 과 $\sin q_i$ 로 주입하였을 때 측정된 전압과 이론값

가로축은 전극번호(L)이고 세로축은 측정된 전압(V)이다. 그래프에서 ●값들은 forward problem을 풀어 나온 이론적인 값이고 × 표시의 값들은 실제 측정된 전압 값이다.

제작된 EIT 시스템으로 측정된값과 forward problem을 이용하여 푼 이론값을 비교한 결과 전류 주입 형태가 $\cos q_i$ 과 $\sin q_i$ (k=1)일 때 0.6%의 오차를 보였고 주기를 바꾸어 가면서 전류를 주입해 본 바 전체적인 시스템이 이론 치와 1% 이내의 오차를 보였다.

아래 그림은 본 실험에서 저항체의 위치에 따른 측정된 전압값을 그래프로 나타낸 것이다.

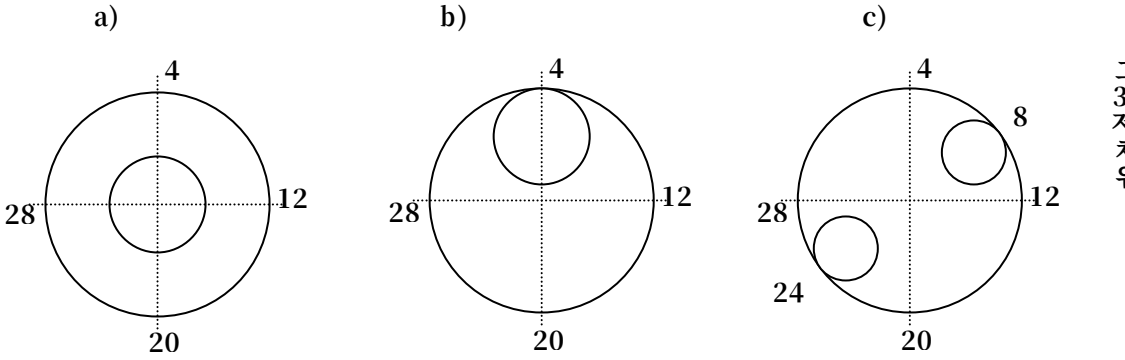

그림 3-3 저항체의 위치

$\cos kq_i$ (k = 1, 2, 3, 4)　　$\sin kq_i$ (k=1,2,3,4)

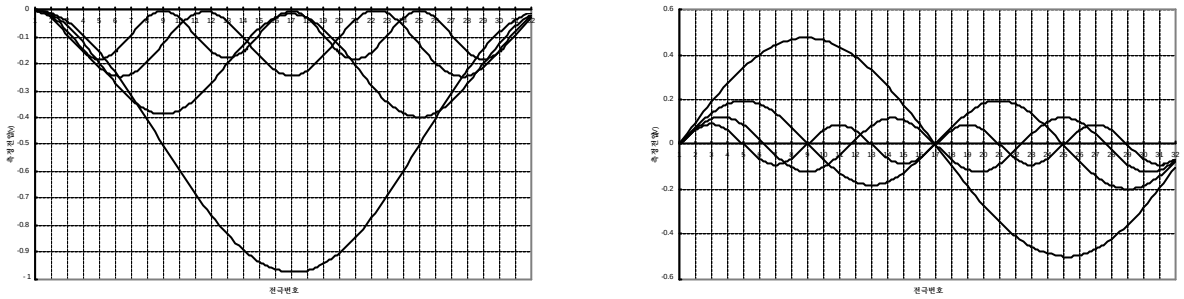

그림 3-4 저항체(직경 3cm)가 중앙에 있을 때 (3 - 3a 참조)

$\cos kq_i$ (k = 1, 2, 3, 4)　　$\sin kq_i$ (k=1,2,3,4)

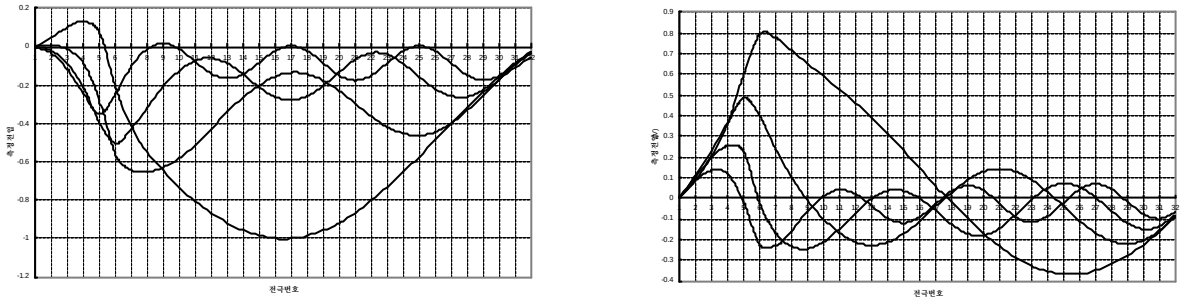

그림 3-5 저항체(직경 3cm)가 4번 전극에 있을 때 (3 - 3b 참조)

$\cos 3q_i$　　$\sin 3q_i$

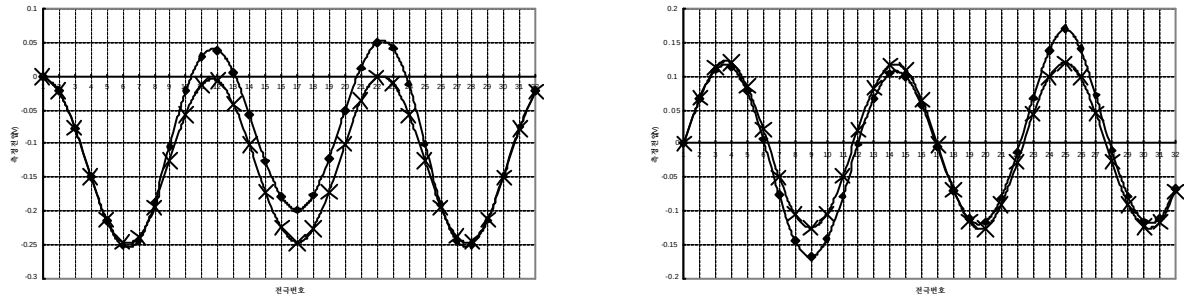

그림 3-6 2cm 저항체가 8번과 24번 전극 가까이에 있을 때와 저항체가 없을 때 비교(3 - 3참조)

위 그림 3-4는 Pattern 내부에 직경이 3cm인 플라스틱 봉 저항체를 중앙에 놓고 전류를 $\cos q_i$ 과 $\sin q_i$ 로 k=1에서 4까지 변화를 주면서 주입하였을 때 측정된 전압을 나타낸 것이다. 저항체가 가운데 있을 때에는 그래프의 왜곡 현상은 없으나 저항체가 없을 때 보다 1.3배 증폭이 되었음을 알 수 있었다.

그림 3-5는 3cm 플라스틱 봉 저항체를 각각 4번 전극 가까이에 있을 때에 측정된 전압 값이다. 저항체에 의하여 각 전극 주위에서 왜곡이 생기고 있음을 알 수 있다.

그림 3-6은 2cm의 플라스틱 봉 저항체를 8번 전극과 24번 전극 가까이에 가져갔을 때 측정된 전압과 저항체가 없을 때 측정한 전압을 비교한 것이다. 그래프에서 ● 표시의 값들은 저항체가 있을 때

측정된 전압 값이고 × 표시의 값들은 저항체가 없을 때 측정된 전압 값이다. 저항체가 있으므로 해서 저항체가 있는 전극과 그 주위의 전극에서 전압이 높게 측정되고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

제어부, 신호 발생부, 측정부, software 부분으로 이루어진 EIT 측정 시스템을 설계 제작하였고, 내부 불균일성의 변별력이 가장 우수한 것으로 알려진 adaptive mode로 전류 주입하여 그에 따른 각 전극에서 전압을 측정하였다. A/D Converter가 12bit 분해능을 갖고 있어서, 이 정도의 정밀도를 갖는 전압을 측정할 수 있었다.

펜텀 내부로 주입되는 전류의 분포는 0.2%의 오차를 보이고 있었으며, 펜텀 내부에 저항체가 없을 때 주입 전류 pattern이 $\cos q_i$ 과 $\sin q_i$ 로 하여 측정된 전압은 이론치와 비교하여 평균적인 오차가 0.6%정도로 나왔다. 또한 k값을 변화시키면서 측정했을 때의 전압의 평균오차도 1% 이내로 나타났다. 그리고, $\sum_{i=1}^{32} I_i = 0$, $\sum_{i=1}^{32} V_i = 0$ 임을 실험적으로 확인하였다.

펜텀 내부에 저항체가 있음으로 해서 그 저항체 주위에서 전압이 상승함을 확인하였다.

전체적인 데이터 취득속도는 0.3sec이고 위와 같은 오차와 분해능을 가지고 있어 이상유동장 가시화 응용에 사용 할 수 있음을 확인하였다.

Acknowledgements .
이 연구는 한국 과학기술부에서 지원된 "이상유동장 가시화를 위한 ET(Electrical Tomography) 기법 개발" 연구과제에 의해 지원되었다.

5. 참고문헌

[1] Webster J. G., ed., Electrical Impedance Tomography, Bristol, Adam Hilger, 1990

[2] Shollenberger, K.A., Torczynski, J.R., Adkins, D.R. O'Hernm T.J. and Jackson, N.B.,"Gamma-densitometry tomography of gas holdup spatial distribution in industrial-scale bubble columns," Chem. Eng. Sci. Vol 52, pp.2037-2048, 1997

[3] Ovacik, L. Lin, J-T.and Jones, O.C., "Progress in electrical impedance imaging of binary media : 1 : Analytical and numerical methods," 1997 OECD/CSNI Specialists Meeting on Advanced Instrumentation, Santa Babara, CA, pp.17-20, 1997

[4] 조경호, 김신, 이윤준, "전기임피던스 영상에 의한 2상유동에서의 기분분포의 가시화." 한국원자력학회 '98 춘계학술발표회 논문집 Vol.(I), pp.457-462, 1998

[5] Woo, Eung Je, Finite element Method and reconstruction algorithms in electrical impedance Tomography, 1990

[6] Owen C. Jones, ed., Development of an Electrical Impedance Computed Tomographic Two-Phase Flows Analyzer, 1998

[7] T. Savolaine, J.P. Kaipio, M. Vauhkonen, P.A. Karjalainen, "An EIT Measurement System for Experimental Use, University of Kuopio Department of Applied Physics Report Series ISSN 0788-4672, Report No. 2/96, 1996