

碩士學位論文

二相流動 映像復元을 위한
EIT 測定시스템 構築



제주대학교 중앙도서관
濟州大學校 大學院
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

에너지工學科

玄 宗 官

110.485

2000年 12月

二相流動 映像復元을 위한 EIT 測定시스템 構築

指導教授 金 信

玄 宗 官

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



2000年 12月
제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

玄宗官의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長

李 潤 俊



委 員

李 憲 周



委 員

千 院 基



濟州大學校 大學院

2000年 12月

**Development of a EIT Measurement System
for Image Reconstruction of Two-Phase Flow**

 **Jong-Kwan Hyun**
(Supervised by professor Sin Kim)

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING**

**DEPARTMENT OF NUCLEAR AND ENERGY ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY**

2000. 12.

목 차

LIST OF FIGURES	iii
LIST OF TABLES	v
Summary	vi
I. 서론	1
1. 연구배경	1
2. 연구목적	5
II. 이론적 배경	6
1. EIT 시스템의 개요	6
2. EIT의 영상복원	7
2.1 Forward problem	8
2.2 Inverse problem	11
III. 실험 장치 및 실험방법	13
1. EIT 회로	13
2. Phantom과 전극 구성	18
3. 실험장치	19
4. 실험방법	21
4.1 전류 주입	21
4.2 전압 측정	24

IV. 실험결과 및 분석	25
1. 저항체가 없을 때 이론값과 측정값의 비교	25
2. 저항체의 위치와 크기를 변화시키면서 전압 측정	32
3. 영상복원	39
V. 결론	41
1. EIT 측정시스템 설계·제작	41
2. 이상유동 가시화에 대한 실험	42
VI. 참고문헌	44
부록 A 측정데이터	48
부록 B 회로도	60



LIST OF FIGURES

Fig. 1. Comparison of Tomography Methods	4
Fig. 2.1. Concept of EIT System	6
Fig. 2.2. Outline of Image Reconstruction algorithm	7
Fig. 3.1. Block Diagram of EIT System	13
Fig. 3.2. Current Generation and Voltage Measurement	17
Fig. 3.3. Flow-chart for Data Acquisition	17
Fig. 3.4. Phantoms and Electrodes	19
Fig. 3.5. The EIT system	20
Fig. 3.6. Adaptive Method	21
Fig. 3.7. Injected Current pattern to inner phantom	23
Fig. 3.8(a). Measured and theoretical values ($\cos \theta \sim \cos 8 \theta$)	28
Fig. 3.8(b). Measured and theoretical values ($\cos 9 \theta \sim \cos 16 \theta$)	29
Fig. 3.9(a). Measured and theoretical values ($\sin \theta \sim \sin 8 \theta$)	30
Fig. 3.9(b). Measured and theoretical values ($\sin 9 \theta \sim \sin 15 \theta$)	31
Fig. 3.10(a). Resistant(3cm diameter) located at the center	33
Fig. 3.10(b). Measured data (cosine Injection current)	33
Fig. 3.10(c). Measured data (sine Injection current)	33
Fig. 3.11(a). The resistant(3cm) is situated on electrode 4.	34
Fig. 3.11(b). Measured data (cosine Injection current)	34
Fig. 3.11(c). Measured data (sine Injection current)	34
Fig. 3.12(a). The resistant(3cm) is situated on electrode 20	35
Fig. 3.12(b). Measured data (cosine Injection current)	35

Fig. 3.12(c). Measured data (sine Injection current)	35
Fig. 3.13(a). Measured Voltage according to resistant's size (Injection current : cosine, Position : center)	36
Fig. 3.13(b). Measured Voltage according to resistant's size (Injection current : sine, Position : center)	36
Fig. 3.14(a). Measured Voltage according to resistant's size (Injection current : cosine, Position : 4 electrode)	37
Fig. 3.14(b). Measured Voltage according to resistant's size (Injection current : sine, Position : 4 electrode)	37
Fig. 3.15(a). The position of the resistant(2cm)	38
Fig. 3.15(b). Measured Voltage with and without resistant (Injection current : $\cos 3\theta$)	38
Fig. 3.15(c). Measured Voltage with and without resistant (Injection current : $\sin 3\theta$)	38
Fig. 3.16. When the Resistant(3cm) is situated between number 4 electrode and center	39
Fig. 3.17. When the Resistant(3cm) is situated number 4 electrode	39
Fig. 3.18. When the Resistant(1cm) is situated number 4 electrode	40
Fig. 3.19. When the Resistant(3cm) is situated center	40
Fig. 3.20. When the Resistant(3cm) are situated 0 electrode and 20 electrode	40

LIST OF TABLES

Table 1. Comparison of Tomography Methods	4
Table 3.1. The Digital output according to Analog input	16
Table 3.2. Current value on each electrodes	23
Table 3.3. The error of voltage values according to injection current pattern(without resistant)	27



Summary

In the thermal-hydraulic system of a nuclear power plant as well as in many engineering areas, it is common to encounter the two-phase flow phenomenon. It is essential to understand the mechanism of the two-phase flow for the analysis and design of the relevant systems. To obtain the detail information on air bubbles moving in the two-phase flow many various experiments have been attempted. One of them is the EIT (Electrical Impedance Tomography) method, which is getting popular in recent days.

The EIT is less expensive than other methods because the system is relatively simple and easy to construct compared to other methods. Nowadays it becomes one of the reliable and efficient methods for estimating the inner structure of the given object and has a wide spectrum of applications in various fields. Especially, even though the spatial resolution of EIT is inferior to those of X-ray and MRI, its temporal resolution is excellent. And its small size and easiness to operate provides itself with the portability. For these reasons, the EIT is properly used in the medical field as an complementary equipment and its use will be expanded in the future.

The EIT technology in the area of nuclear energy is suitable for studying the two-phase flow which is necessary for designing the thermal hydraulic system because it can reduce the uncertainty of information. The EIT is also so fast to get the result data during the experiment that it is possible to apply it to the thermal hydraulic system in which the physical process is usually fast.

Although the EIT is apply to the complicated structure of rod bundle, its basic principles are the same as of the simple geometrical structure. The adaptation of EIT to the two-phase flow of complicated geometrical structure gives the superior results to those of other methods and it is possible to use it in the reactor thermal hydraulic system as a monitoring equipment.

However, even the application fields of the EIT are very wide and its effect is great, the study and adaptation of the EIT in many areas are still in the beginning step and it is necessary to develop the related technologies furthermore.

The basic points of the EIT technology can be described as below :

First, specially designed electrodes should be arranged around the object which has different electric feature. Second, some electrical signals are needed to be put in the proper manner. Third, according to those process, the electric voltage and electric current should be measured on the boundary line of the object. Actually, the EIT is the technology of finding the unknown inner resistance distributions of the object with the reconstruction algorithm.

In this study, the main topic was to design and manufacture the EIT measurement system and to measure the data acquisition time and the difference between each electrical signal. The measurement was made for the cases of : a) when there was no resistance, b) and there were resistances in the object, and c) when the locations of the resistances are changed.

Through these study, it can be concluded that the analysis of the two-phase flow can be made efficiently by the EIT method which visualizes the inner structure of the object.

I. 서론

1. 연구배경

이상유동이란 두 가지 상이 공존하는 유동으로 상경계 면에서 형상이 계속 변하고, 각 상에서 내부유동이 존재하는 특성이 있다. 이러한 이유로 해서 이상 유동의 해석적인 기술이 난해하다. 열수력 시스템을 비롯한 많은 공학적 시스템에서 이상유동은 일반적인 현상으로 효율적인 시스템의 설계와 운용, 그리고 해석을 위해서는 이상유동장에 대한 이해가 필수적이다. 이러한 이유로 해서 이상 유동장에서 기포 거동을 측정하기 위한 실험들이 여러 가지로 시도되고 있으며 최근 전기 임피던스 단층촬영법(Electrical Impedance Tomography;EIT)에 대한 연구가 세계적으로 이루어지고 있다.

기포 측정을 위한 단층촬영 방법의 개발은 3~40여년 전으로 거슬러 올라간다. 1950년대 단층촬영 방법의 제안으로 body scanner[단층(斷層) X선 투시 장치]의 유효성을 넓히는 계기가 되었으며 현대의학에 큰 역할을 하였다. 그 후 1970년대 들어 Swanson과 Henderson 등은 처음으로 Impedance 형상화를 제안하였고(Swanson. 1976, Henderson. 1976), Bergles(1969)와 Jones and Delhaye(1976), Hewitt(1997) 등은 다양한 측정기술을 소개하였다. 그리고 Henderson과 Webster는 impedance 측정 카메라를 설계하였다(Webster. 1978). 이후로 많은 연구자들이 다양한 재구성 알고리즘과 실험장치들을 제안하고 연구하였다. 70년대는 일반적으로 X-선이나 동위원소의 전리 방사선을 사용한 단층 촬영 응용에 대한 연구가 이루어졌으나 이는 많은 비용과 안정성의 제한 때문에 대부분 만족스러운 결과를 얻지는 못하였으며 방사에 기초한 방법들로 긴 방출 시간을 사용하였기 때문에 실시간으로 움직이는 유동계에서 동적인(dynamic) 측정을 할 수 없었다.

1980년대 중반에 들어 단층촬영 연구들은 현재의 tomography systems에 많

은 영향을 끼쳤다. 영국에 있는 UMIST(The University of Manchester Institute of Science and Technology)는 electrical capacitance tomography 프로젝트를 시작했고, 동시대에 미국의 Morgantown Energy Technology Center에서는 가스 유체로 된 지층의 기포분포를 측정하기 위해 capacitance tomography system을 제작하였다. 그리고 의공학자들은 EIT (Electrical Impedance Tomography)기법의 장점인 안정적이고 적은 비용으로 인간의 신체를 묘사할 수 있는 가능성을 이해하기 시작하여 의공학 분야에서 차세대 단층촬영 기법으로 EIT기법을 시도하였다.

영국의 Sheffield University Royal Hallamshire Hospital과 함께 한 여러 연구소에서는 EIT 연구에 빠른 진보를 이루었고 그 중 미국의 Rensselaer Polytechnic Institute가 주 역할을 담당하였다.

의학적인 EIT는 공간 내에 물체의 위치를 측정하려는 목적이 있고 이에 반해 process tomography는 운동의 속도와 위치 모두를 측정할 필요가 있어 1988년에 UMIST에서 전기적으로 전도성인 유체들을 포함하고 있는 용기를 형상화하기 위해 EIT 개발에 대한 연구가 시작되었다(Beck and Plaskowski, 1987). 또한 Yorkey 등은 실제 데이터를 가지고 여러 EIT 재구성 알고리즘의 수행능력을 비교하였다. 프랑스에서는 극초단파(microwave)를 이용한 이미지 형상화 기술의 개발을 주도하였다.

1990년까지 process tomography는 산업적 process design과 작동에 응용하는 데는 유용한 기술로써 충분한 것으로 인식되었다. 1992년부터는 ECAPT(European Concerted Action on Process Tomography)를 통해 청각적, 광학적, 방사 기술 그리고 자기 공명을 이용한 형상화와 같은 센서를 개발하는 많은 연구 사례들이 발표되었으며(Reinecke 등, 1998) EU의 지원을 받은 영국 등 8개국의 대학, 연구소, 기업체 등 31개 기관이 sensor 개발에 관한 교류를 위해 국제공동연구를 수행하고 있다(Brite-Euram, 1998). 1997년에는 비원형 경계에서 복합 전도율 분포에 대한 Electrical Impedance Tomography에 관한 연구가 수행되었다(Hemant Jain 등, 1997).

국내에서는 이상유동장 측정과 관련하여 유속, 유량, 수위 측정 등에 연구를 위해 서울대, 과학기술원, 포항공대, 한동대 등에서 연구를 수행하고 있으며 제주대학교에서는 1998년부터 ET 기법을 이용한 이상유동장 기포분포 가시화 연구를 하고 있다.

전기 임피던스 단층촬영법(Electrical Impedance Tomography)은 시스템 구현 시에 하드웨어 비용이 비교적 저렴하고, 측정 대상물에 대한 비파괴(noninvasive) 특성을 가지고 있어 화공학, 지질학(geology) 및 재료공학 등에서 모니터링 도구로 주목받고 있다. 특히, X-ray 및 MRI 단층촬영법에 비해 아직 복원된 영상의 공간해상도(spatial resolution)는 떨어지지만, 시간해상도(time resolution)가 뛰어나고 인체에 대한 안정성이 보장되므로 의공학 분야의 보조장비로 사용되고 있으며 앞으로 그 이용범위가 확대될 것이다.

Table 1.과 Fig. 1.은 단층촬영 기법들을 비교한 것이다.



Table 1. Comparison of Tomography Methods (Ovacik and Jones, 1998)

영상화 기법	비용(천\$)	측정 원리	물리적 특성	데이터 취득 속도
NMR	>1,000	전자기장	spin 이완 시간, 양성자 밀도	~sec
X-ray CT	1,000	X-ray 투과	X-ray 흡수	>sec
Gamma Densitometry	100	γ -ray 투과	γ -ray 흡수	~min
초음파 단층 촬영	10	반사 및 산란	acoustic impedance	~sec
ET	10	전류 및 전압	conductance, capacitance	~msec

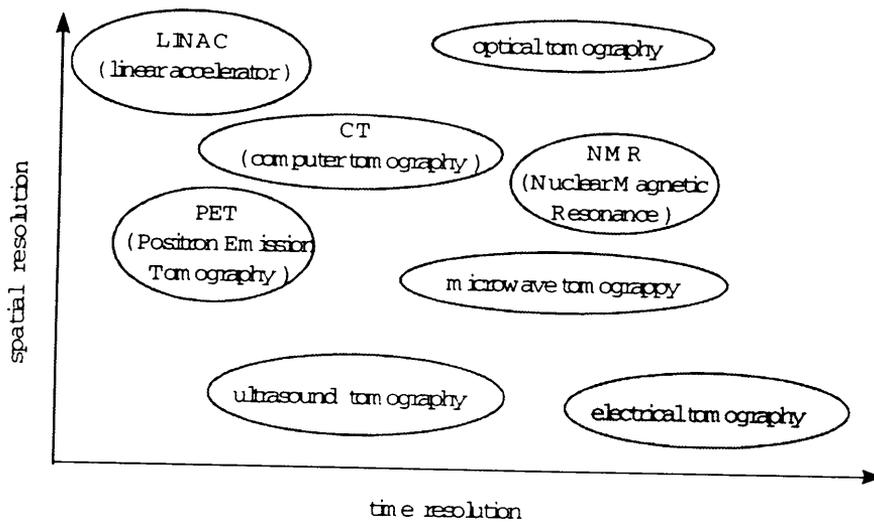


Fig. 1. Comparison of Tomography Methods

2. 연구목적

원자력 분야에서 EIT(Electrical Impedance Tomography)기법은 유동장을 교란하지 않고 실험정보의 불확실성을 줄일 수 있어 열수력 설계에 필요한 이상유동장 구조 연구에 적합하고 데이터 취득 속도가 빨라 빠른 천이 과정을 경험하는 원자로 열수력 현상에도 적용이 가능하다. 원자로심과 같이 복잡한 봉다발 구조에도 단순기하 구조에서의 경우와 동일한 원리에 근거하여 작동되므로 복잡한 기하구조를 갖는 원자로심 이상유동장에 적용성이 타 방법에 비해 뛰어나며 원자로 열수력 계통의 monitoring으로서도 응용이 가능하다.

그리고 원자로의 봉다발 구조에서는 탐침이 도달하지 못하는 지역이 존재한다거나 연료봉과 같이 방사선 등이 상대적으로 투과하기 힘든 장애물이 존재하므로 탐침법이나 X-선 tomography 기법 등이 적용이 힘든 반면 EIT기법은 기하구조에 대한 특별한 제한요건이 없어 원자로심 내에서 이상유동장 가시화를 할 수 있다. EIT기법은 이처럼 응용분야가 매우 광범위하고 파급효과가 큰 반면에 세계적으로 아직 개발 초기 단계에 놓여 있다.

만약 EIT 기술을 이용하여 꾸준한 연구와 노력이 이루어진다면 이상유동장에 대한 해석과 모델 개발에 필요한 이상유동장 정보를 생산하는데 신뢰성 있는 정보를 제공하여 열수력 설계 및 해석 코드 자립화에 상당한 기여를 하게 될 것이다.

본 연구에서는 이상유체 영상복원을 위한 EIT 측정시스템을 설계·제작하고 EIT 장점들을 실험을 통해 확인해 보고자 한다. 즉 팬텀 내부에 저항체가 없을 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. 이론적 배경

1. EIT 시스템의 개요

EIT 기술의 기본 원리는 Fig.2.1과 같이 미지의 내부 저항률 분포를 갖는 물체 주위에 특수하게 제작된 전극을 여러 개 배치하고 적절하게 설계된 전류를 주입하여 이에 따른 전압을 물체 경계에서 측정하고 이 자료를 사용하여 저항률 복원 알고리즘을 통해 물체 내부의 미지의 저항률 분포를 재구성하는 기술이다. 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.

EIT에서 저항률 복원에 따른 기술 구현의 핵심은 크게 나누어 EIT inverse problem solver의 개발과 정확한 EIT 측정기술로 볼 수 있다. 이 중 EIT 측정 기술은 실제 물리적 현상을 측정하고, 영상복원 알고리즘을 통하여 이상유동의 현상을 가시적으로 모사할 수 있게 하는 것으로써 EIT의 가장 기본이 되는 기술이다.

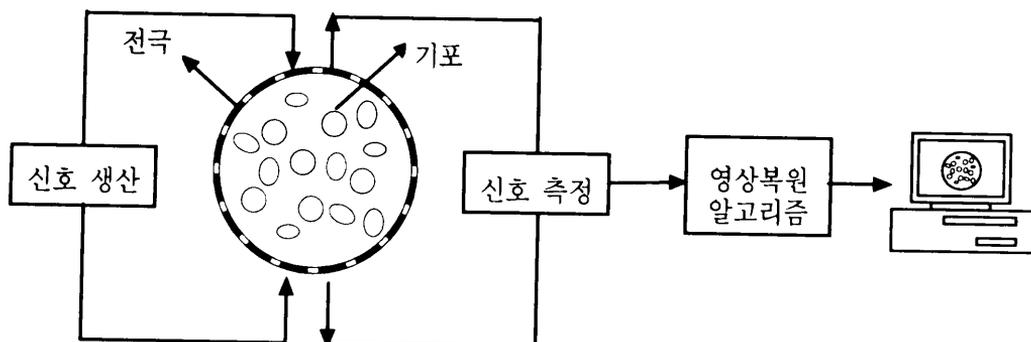


Fig. 2.1. Concept of EIT System

2. EIT의 영상복원

전기 임피던스 단층촬영법의 영상복원(image reconstruction) 과정은 크게 다음 두 가지 계산과정의 반복 연산으로 구성된다. 첫 번째 과정에서는, 표적의 경계면에서 여러 개의 전극을 통하여 전류를 주입하고 저항률(resistivity)의 함수로써 경계면에 유기 되는 전압을 구하며, 이를 정문제(forward problem)라고 한다. 이는 Neumann 형의 경계조건을 갖는 비선형 Laplace 방정식으로 기술되며, 그 해석적(analytical)인 해를 구하기가 매우 어려우므로 수치적(numerical) 방법인 유한 요소법(Finite Element Method; FEM) 또는 경계 요소법(Boundary Element Method; BEM)으로 근사해를 구한다. 두 번째 과정에서는 역으로 경계면에 유기된 전압 값을 이용하여 표적 내부의 저항률 분포를 추정하여 표적의 영상을 복원하는데, 이를 역문제(inverse problem)라고 한다.

Fig. 2.2는 영상복원을 위한 과정인 정문제와 역문제를 도식적으로 나타낸 것이다.

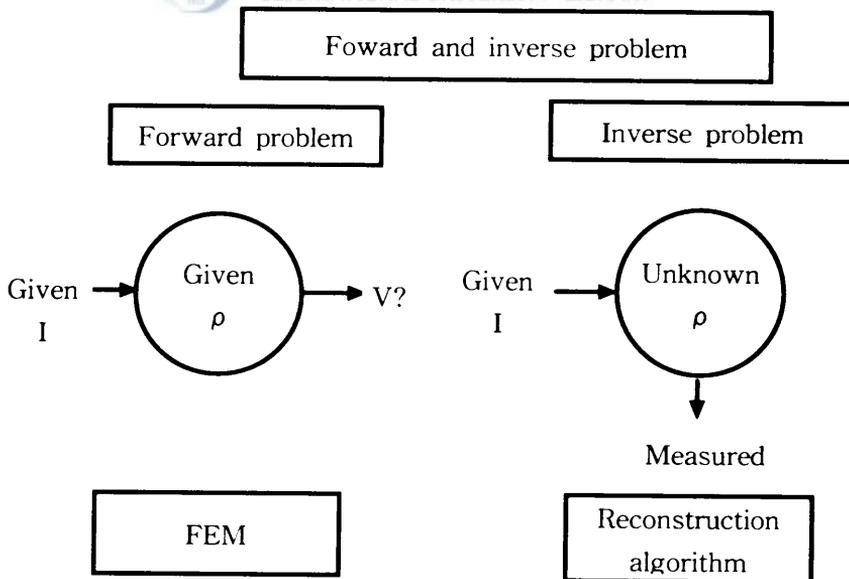


Fig. 2.2. Outline of Image Reconstruction algorithm

2.1 Forward problem

표적의 경계면에서 여러 개의 전극을 통하여 전류를 주입하고 이미 알고있는 저항률의 함수로써 경계면에 유기 되는 전압은 다음과 같이 Neumann 형의 경계조건을 갖는 비선형 Laplace 방정식으로 기술되며, 본 연구에서는 전극과 내부와의 접촉저항(contact impedance)을 고려한 완전전극모델(complete electrode model)을 사용하였다.

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho} \nabla u \right) = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (2-1)$$

$$u + z_l \frac{1}{\rho} \frac{\partial u}{\partial \nu} = U_l \quad \text{on } e_l, l=1,2,\dots,L \quad (2-2)$$

$$\int_{e_l} \frac{1}{\rho} \frac{\partial u}{\partial \nu} = I_l \quad l=1,2,\dots,L \quad (2-3)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial u}{\partial \nu} = 0 \quad \text{on } \partial\Omega \setminus \bigcup_{l=1}^L e_l \quad (2-4)$$

여기서 $u, \rho, z_l, U_l, \nu, L$ 은 각각 내부전압, 저항(impedance), 전극과 내부와의 접촉저항, 전극에서의 전압, 법선 벡터, 전극 수이다. 위의 조건에 부가하여, 해의 존재성과 유일성을 보장하기 위하여 다음과 같은 주입 전류와 측정 전압에 대한 조건을 부가한다.

$$\sum_{l=1}^L I_l = 0 \quad (2-5)$$

$$\sum_{l=1}^L U_l = 0 \quad (2-6)$$

위의 Neumann 형의 경계조건을 갖는 비선형 Laplace 방정식의 해석적(analytical)인 해는 구하기가 매우 어려우므로, 수치적(numerical) 방법인 유한요소법(finite element method;FEM), 유한 차분법(finite difference method;FDM),

경계 요소법(boundary element method;BEM)등이 사용되고 있으며, 본 연구에서는 FEM을 사용하였다. FEM에서는 계산 영역 Ω 를 매우 작은 요소로 세분하고 각 요소내의 저항률 값이 일정하다고 가정하여, 내부 전압 u 를 다음과 같이 나타낸다.

$$u \approx u^h = \sum_{i=1}^N a_i \phi_i \quad (2-7)$$

여기서 N 은 총 node 수, ϕ_i 는 i 번째 node에서는 1이고 나머지 node에서는 0인 기저함수(basis function), a_i 는 i 번째 node에서 전압이다. 식 (2-4)를 만족시키기 위하여 전극에서의 전압 U 를 다음과 같이 근사한다.



$$U \approx U^h = \sum_{j=1}^{L-1} \beta_j n_j \quad (2-8)$$

여기서 $n_1 = [1, -1, 0, \dots, 0]^T$, $n_2 = [1, 0, -1, 0, \dots, 0]^T$, ... 이다.

u 와 U 에 대한 weighting function을 v 와 V 라 하면, 이 문제에 대한 variational form은 다음과 같이 된다.

$$B_s((u, U), (v, V)) = \sum_{l=1}^L I_l V_L \quad (2-9)$$

여기서 B_s 는 다음과 같이 정의되는 variational form이다.

$$B_s((u, U), (v, V)) = \int_{\Omega} \frac{1}{\rho} \nabla u \cdot \nabla v dx + \sum_{l=1}^L \frac{1}{z_L} \int_{e_l} (u - U_l)(v - V_l) dS \quad (2-10)$$

v 와 V 에 대한 기저 함수를 u 와 U 에 대한 기저 함수와 같다고 두는

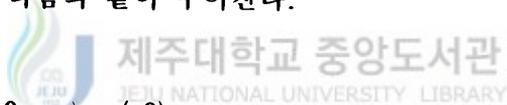
Galerkin법을 사용하면 위의 미분 방정식은 다음과 같은 연립 대수 방정식으로 근사된다.

$$Ab = f \quad (2-11)$$

여기서 $b = (\alpha, \beta)^T \in \mathbb{R}^{N \times L \times 1}$ 이고, stiffness matrix $A \in \mathbb{R}^{(Nn \times L \times 1) \times (Nn \times L \times 1)}$ 는 다음과 같이 주어지는 sparse matrix이며,

$$A = \begin{pmatrix} B & C \\ C^T & D \end{pmatrix} \quad (2-12)$$

force vector f 는 다음과 같이 주어진다.



$$f = \begin{pmatrix} 0 \\ \sum_{i=1}^L I(n_i)_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \lambda \end{pmatrix} \quad (2-13)$$

여기서 $0 = (0, 0, \dots, 0)^T \in \mathbb{R}^N$ 이고, $\lambda = (I_1 - I_2, I_1 - I_3, \dots, I_1 - I_L)^T \in \mathbb{R}^{N \times L \times 1}$ 이다.

기저 함수들 ϕ_i 와 n_j 를 식 (2-8)의 variational form에 대입하고 적분하여 얻어지는 행렬들 B, C, D 는 다음과 같이 주어진다.

$$B(i, j) = \int_{\Omega} \frac{1}{\rho} \nabla \phi_i \cdot \nabla \phi_j dx + \sum_{i=1}^L \frac{1}{z_i} \int_{e_i} \phi_i \phi_j dS, \quad i, j = 1, 2, \dots, N \quad (2-14)$$

$$C(i, j) = - \left(\frac{1}{z_1} \int_{e_1} \phi_i dS - \frac{1}{z_{j+1}} \int_{e_{j+1}} \phi_i dS \right),$$

$$i = 1, 2, \dots, N, \quad j = 1, 2, \dots, L-1 \quad (2-15)$$

$$D(i, j) = \sum_{l=1}^L \frac{1}{z_l} \int_{e_l} (n_i)(n_j) dS, \quad i, j = 1, 2, \dots, L-1 \quad (2-16)$$

따라서, 이제는 식 (2-9)의 모든 행렬과 벡터들이 계산되었으므로, $b = (\alpha, \beta)^T \in \mathbb{R}^{N \times L}$ 는 sparse matrix solver를 사용하여 구할 수 있고, 전극에서의 전압 U_i^h 는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{pmatrix} U_1^h \\ U_2^h \\ \vdots \\ U_L^h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{l=1}^{L-1} \beta_l \\ -\beta_1 \\ \vdots \\ -\beta_{L-1} \end{pmatrix} \quad (2-17)$$

2.2 Inverse problem



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

EIT 영상복원 알고리즘에서는 순간의 임피던스 분포를 그대로 영상화하는 정적 영상법(static imaging)과 시간적 변화를 영상화하는 동적 영상법(dynamic imaging)이 있다.

정적(static) 영상복원 알고리즘의 한 방법인 rmNR(regularized modified Newton-Raphson)은 표적 내부의 저항률이 변하지 않고 고정된 영상을 복원하기 위하여, 다음과 같이 주어지는 목적함수를 최소화하는 저항분포 ρ 를 찾는다.

$$\Phi(\rho) = \frac{1}{2} [V_M(\rho) - U_M]^T [V_M(\rho) - U_M] \quad (2-18)$$

여기서 $V_M(\rho) \in \mathbb{R}^{LP}$ 는 현재의 가정된 저항 분포 ρ 에서 FEM을 사용하여 P개의 모든 입력 전류 패턴에 대하여 계산된 전극에서 유기된 모든 전압의 저장된 값이고, $U_M = [v_1, v_2, v_3, \dots, v_P]^T \in \mathbb{R}^{LP}$ 는 모든 전류패턴에 대해 측정된 전

극에서 유기된 모든 전압의 저장 값이며, $v_i = (v_i^1, v_i^2, \dots, v_i^L)^T \in \mathbb{R}^L$ 는 i 번째 전류 입력 패턴에서 측정된 각 전극에서의 전압이다. 따라서 다음과 같은 조건을 만족하는 저항 분포를 찾는 것이 된다.

$$\Phi'(\rho) = [V_M'(\rho)]^T [V_M(\rho) - U_M] = 0 \quad (2-19)$$

Φ'' 은 Hessian 행렬이라 하는데 이 행렬은 최소 고유치와 최대 고유치의 비가 매우 크므로 비정치성(ill-posedness) 문제를 야기한다. 이러한 ill-posedness는 영상 복원 알고리즘의 성능을 떨어뜨리기 때문에, 이러한 문제를 완화하기 위하여 regularization 기법을 쓴다. Regularization 기법은 목적 함수를 다음과 같이 변환한다.

$$\Phi(\rho) = \frac{1}{2} [V_M(\rho) - U_M]^T [V_M(\rho) - U_M] + \frac{1}{2} \alpha (L\rho)^T (L\rho) \quad (2-20)$$

여기서 α 와 L 은 각각 regularization 인자(parameter)와 행렬이다. 위 식을 풀어 저항분포를 찾게 된다.

III. 실험 장치 및 실험방법

1. EIT 회로

전체 회로의 블록다이어그램은 Fig. 3.1과 같으며 전체장치는 제어부, 신호 발생부, 측정부, 저장부로 나눌 수 있다.

제어부는 디지털 컨트롤 보드(Digital Control Board)가 담당하며, 여기에 신호측정에 관련된 software가 부가된다. 신호발생부는 전압제어 전류원(Voltage-Controlled Current Source;VCCS)와 발진기(Oscillator)로 구성되며 측정부는 MUX(Multiplexer), 차동 증폭기(Differential Amplifier), 복조기(Demodulator), 필터(Filter)로 구성되고, 신호를 디지털화 하는 아날로그/디지털 변환기(A/D Converter)와 컴퓨터의 내부 메모리로 구성된다.

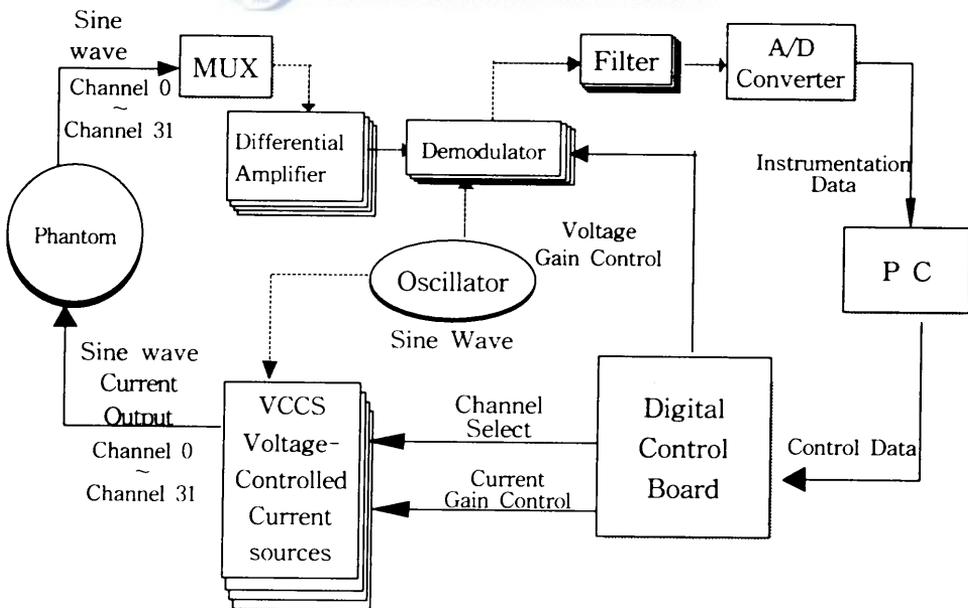


Fig. 3.1. Block Diagram of EIT System

제어부에 속하는 Digital Control Board는 32개 채널 중 하나를 선택하여 전류 이득(Current Gain)을 조정하고, 복조기에 전달된 신호의 전압 이득(Voltage Gain)을 조정한다. Digital Control Board에서 전류이득(Current Gain)을 조절하면 VCCS와 Oscillator에서 제어된 형태의 전류를 발생시키게 된다.

Voltage-Controlled Current Source(VCCS)회로는 측정 대상물에 실제적으로 가해지는 사인파 전류 신호를 발생하는 회로로서 똑같은 회로가 32개의 채널을 이루고 있다. PM7645를 사용하여 전류 이득(Current gain)을 디지털 신호로 제어할 수 있게 하였다. 즉 사인파 전압 신호의 진폭을 조정하여 전압-전류 변환 회로로 입력시킴으로 최종 전류 신호를 가변시킨다. VCCS회로는 PM7645와 OP-amp U2, U7으로(부록 B-5) 이루어져 입력되는 디지털 데이터 값에 따라서 진폭이 변화하며 경우에 따라서 출력이 임의의 위상차를 갖게 설계되었다. VCCS 회로는 32개 채널에 대해 각각 같은 회로가 쓰이며 각 채널에서의 위상차는 전체 회로 오차의 중요한 요인이 되므로 각 저항과 콘덴서 값의 오차를 최대한 축소하였다.

Oscillator 회로는 전체 시스템의 가장 중요한 신호원으로서 AD532JH와 콘덴서 저항, OP-Amp등으로 구성을 하였으며 왜곡률을 최대한 줄이기 위해 설계된 사인파 발진회로를 제작하였다. 발진 주파수는 $f_0=1/2\pi CR$ 로 결정되며 위 회로에서 저항은 3개의 50Ω 가변저항으로 미세 조정하게 되어 있으며 콘덴서는 주파수 특성이 좋은 1 nF의 폴리프로필렌 콘덴서를 사용했다. 그리고 50kHz 인 사인파가 8개의 전류 신호 출력 보드에 공급될 수 있게 하였다.

MUX(multiplexer)는 경계면에서의 전압을 측정하고 선별하는 측정부로서 32 채널을 통해 측정된 전압 신호를 차동 증폭기(Differential Amplifier)에 연결시켜주는 것이다. 이 회로에서는 DG506 칩을 사용하였는데, 이 칩이 32채널의 측정 신호를 스위칭 하는데 사용된다. 이 MUX 회로의 사용에 있어서 전류 이득이나 전압 이득이 결정된 경우 측정을 원하는 두 채널만을 디지털 신호로 바꾸어 줌으로써 빠른 측정을 유도해 낼 수 있다.

Differential Amplifier(차동 증폭기) 회로는 MUX로부터 입력된 두 신호를 증폭시킨다. 증폭도는 $1+2R_{10}/R_{13}$ 으로 설정하였고(부록 B-7) 필요에 따라서 R_{13} 을 조정하여 증폭도를 바꿀 수 있게 제작하였다. 차동 증폭기는 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 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 V_p (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 $400\mu S$ 정도이다. 가장 빠른 응답 시간을 위한 f_c (Corner Frequency)는 100 KHz이지만 리플(Ripple)이 100 KHz이므로 복조기의 회로에서는 좀더 낮은 f_c 를 갖도록 설계하였다. 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 일치시키도록 하였다. 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 $35\mu S$ 의 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 Table 3.1은 아날로그 신호의 입력에 따른 디지털 데이터 출력을 보여준다.

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.

본 실험에 사용된 회로들은 미국 Wisconsin 주립대학의 회로를 참조하여 회로를 설계 제작하였다.

실험 데이터를 측정하기 위한 소프트웨어의 구성은 먼저 주입 전류의 amplitude를 결정하고 알맞은 current pattern을 결정한 다음 그 current pattern에 맞게 전류를 주입하고 측정 전극을 통해 전압을 측정하면 된다. 이때 측정되는 전압은 임의의 전극을 ground로 잡아 측정을 한다. 이 측정된 전압 data를 이용해서 inverse problem을 풀고 알고자 하는 내부의 임피던스 값을 구하였다.

Fig. 3.2는 전류를 생성하고 전압을 측정하는 각 소자들의 연결관계이고 Fig. 3.3은 소프트웨어 흐름도를 나타낸 것이다.

Table 3.1. The Digital output according to Analog input

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

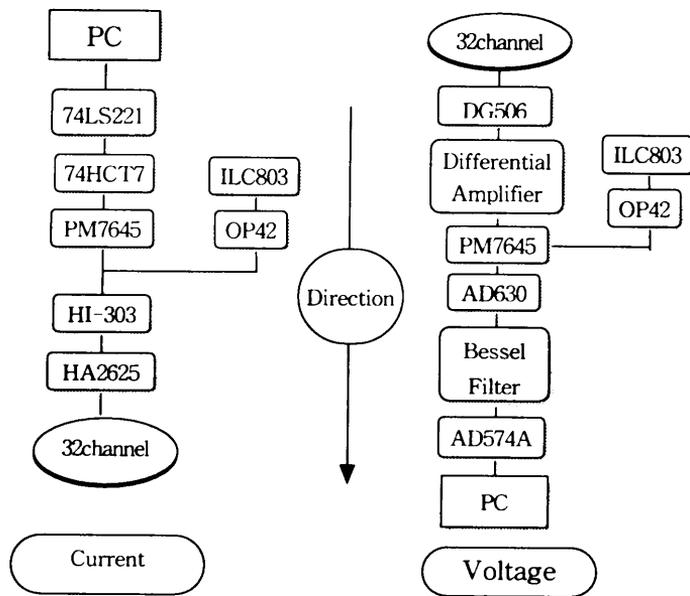


Fig. 3.2. Current Generation and Voltage Measurement

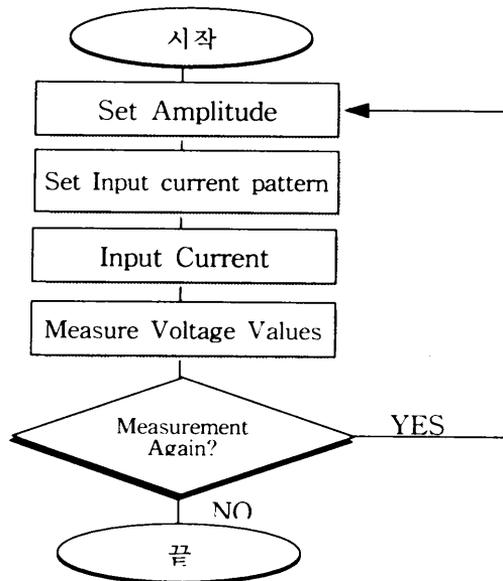


Fig. 3.3. Flow-chart for Data Acquisition

2. Phantom과 전극 구성

영상복원 알고리즘의 특성을 파악하고 성능을 검증하기 위해서는 다양한 형상의 phantom을 제작할 필요가 있다. 본 연구에서는 원통형에 대한 phantom을 가지고 특성 및 성능을 파악하였다. phantom의 높이는 330mm이고, 내경이 80mm의 실린더 모양으로 재질은 아크릴로 되어 있다. phantom의 위 부분은 뚫려 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 되어 있으며 전극의 길이는 200mm이고 너비는 6mm이다. 본 실험에서 사용된 전극의 재질은 Stainless Steel로 11.25° 간격으로 균일하게 분포시켰다.

아래의 사진은 실제 실험에 쓰인 phantom과 전극이다.

EIT에 사용되는 전극은 유동장과 접촉하기 때문에 접촉 impedance를 최소화하기 위해 phantom 내부로 돌출되지 않도록 전극의 크기에 맞게 팬텀 내부편에 홈을 파서 전극간의 영향을 최소화하고, 불필요한 부분이 유동장에 노출되지 않도록 설치하였다. 전극 표면은 매끄럽게 하여 투명도가 최대한 보장되도록 하였다. 이런 작업으로 전극의 측정오차를 최소화 하였다.

Fig. 3.4에서 오른쪽 phantom의 전극은 fringe field의 영향을 최소화 시키기 위하여 제작된 전극이다.

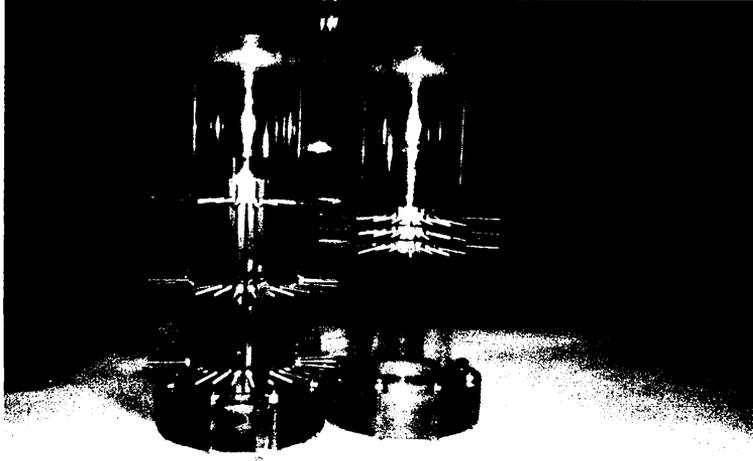


Fig. 3.4. Phantoms and Electrodes

3. 실험장치



이상유체 영상복원을 위한 EIT(Electrical Impedance Tomography) 측정 시스템을 Fig. 3.5와 같이 구성하였다.

Phantom 내에는 전해질 물질인 소금물로 채워져 있다. 이 소금물의 농도와 온도, 저항률, conductivity는 ORION 제품인 Conductivity Meter MODEL 115를 이용하여 측정한 결과 다음과 같이 얻었다.

- 소금물의 농도 : 0.15%
- 전해질의 저항률 : 333 Ωcm
- Conductivity : 0.003 (Ωcm)⁻¹
- 전해질의 온도 : 21.4 $^{\circ}\text{C}$

Conductivity는 온도와 소금물의 농도에 민감하므로 매 실험마다 온도와 전

해결의 농도를 측정하여 동일한 실험환경에서 실험을 수행하였다.

전압조절기(Power Supply)를 이용하여 회로에 들어가는 전압을 15V로 고정시켰고 신호 케이블을 이용하여 Phantom과 회로의 기판을 연결하였다.

컴퓨터와 Digital Control Board를 연결하기 위해 범용 인터페이스 카드를 컴퓨터에 내장하여 측정장치에 대한 모든 제어와 데이터 입·출력을 받을 수 있게 하였다. 또한 각 채널에 대하여 개별적으로 전류이득(Current Gain)을 조절할 수 있게 설계하였고 전류입력과 전압출력 케이블을 분리하여 쉴딩(Shielding) 하였다.

저항체는 직경이 3cm, 2cm, 1cm인 플라스틱 봉을 이용하였으며 이 저항체들의 전기전도율은 무한대에 가깝다.



Fig. 3.5. The EIT system

4. 실험방법

Phantom 내부로 들어가는 주입 전류는 내부 불균일성의 변별력이 가장 우수한 것으로 알려진 adaptive mode를 택하였고, phantom 내에 저항체가 없을 때와 1개의 저항체를 집어넣었을 때, 두 개의 저항체를 집어넣었을 때, 저항체의 위치를 바꾸었을 때, 그리고 저항체의 크기가 변화할 때 등 각각의 상황을 설정하여 경계에서의 전압을 측정하였다.

4.1 전류 주입

Adaptive mode는 동시에 32개의 전극을 통하여 각기 상이한 전류를 주입되 전체적으로 전류의 세기 분포를 삼각함수 꼴로 만들고 한 전극을 ground로 잡아 각 전극에서 기준 전극과 전압차를 얻는 방법으로 optimal current method라고 부르기도 한다. Gisser(Webster, 1990)가 제안한 이 방법은 각 전극에서 변별력이 월등하며 데이터 수집 능력이 좋아 본 실험에 사용하였다.

Fig. 3.6은 전류 주입 방법을 나타낸 것이다. 기준 전극을 0번으로 잡고 각 전극에 대하여 sine wave와 cosine wave로 각 전극을 통해 phantom 내부로 주입하였다.

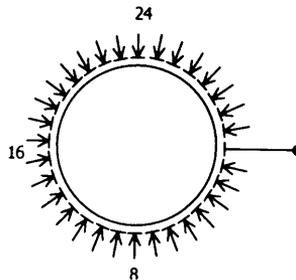


Fig. 3.6. Adaptive Method

다음 수식은 본 실험에서 사용된 주입 current pattern이다.

$$\cos k\theta_l, \quad 1 \leq l \leq L, \quad 1 \leq k \leq \frac{L}{2} \quad (4-1)$$

$$\sin\left(k - \frac{L}{2}\right)\theta_l, \quad 1 \leq l \leq L, \quad \frac{L}{2} < k \leq L-1 \quad (4-2)$$

여기서 k: 주기, L: 전극 수, l: 각 전극 번호이며, $\theta_l = 2\pi \times l/32$ 로 주어진다.

전류 이득(Current gain)을 2000으로 고정하고 phantom 내부로 들어가기 전 전류 pattern이 sine wave로 나오는가를 멀티미터(HP3458A)로 측정하여 확인하였다.

Table 3.2와 Fig. 3.7은 주입전류가 $\sin \theta_l$ 일 때 팬텀 내부로 들어가는 전류의 값과 파형을 측정한 값이다. 그림에서 실선은 이론적인 값이고, 점(●) 표시는 측정값이다.

모든 전극마다 주입되는 펄스 딜레이는 250 nS로 80 μ S 이후에는 모든 전극에 동시에 전류주입이 이루어지게 하드웨어를 구성하였다. 측정된 데이터를 가지고 전류분포의 오차를 계산하여 본 결과 0.2% 정도로 그 대칭성이 거의 정확하다고 할 수 있었고 실험을 통하여 $\sum_{l=1}^{32} I_l = 0$ 임을 확인할 수 있었다.

Table 3.2. Current value on each electrodes

(단위 : mA)

전극번호	0	1	2	3	4	5	6	7
전류	0	0.95	1.88	2.71	3.46	4.06	4.52	4.80
전극번호	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
전극번호	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
전극번호	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

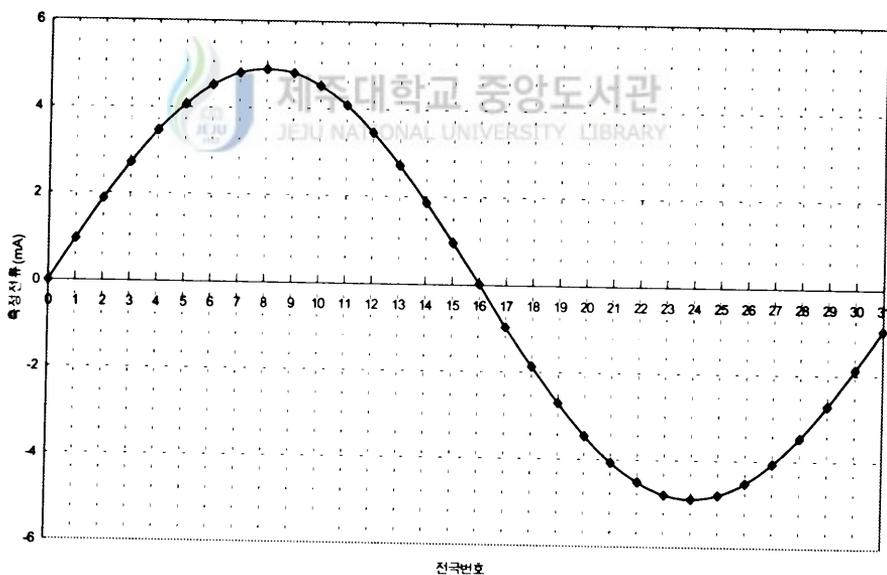


Fig. 3.7. Injected Current pattern to inner phantom

4.2 전압 측정

전류를 주입하고 전압을 측정하기 위하여 별도의 프로그램을 시행하였다. 우선 전류가 $\sin(2\pi \times i/32)$ 로 팬텀 내부로 들어갈 때 최대 전류는 8번 전극으로 들어가게 되고 이때 측정되는 전압값이 최대가 된다. 따라서 0번 전극과 8번 전극으로 들어가는 케이블 사이에 100Ω 의 저항을 연결하여 Gain을 측정하고 멀티미터(HP 3458A)를 이용하여 이 양단에 걸리는 전압을 반복하여 측정하여 평균을 구하였다. 이 나온 평균값을 기준으로 각각의 채널에서 측정되는 Gain 값을 실제 전압값으로 환산하였다.

그리고 나서 팬텀 내부에 전해질 물질인 0.15% 정도인 소금물을 채우고 실험을 수행하였다.

전압측정은 다음과 같은 과정으로 수행하였다.

- ① 저항체가 없을 때 전압측정.
- ② 측정된 전압값과 forward problem을 푼 해와 비교.
- ③ 저항체(직경 3cm, 플라스틱 봉)를 팬텀 내부 중앙에 놓고 전압 측정.
- ④ 저항체(직경 3cm, 플라스틱 봉)를 각 전극에 놓고 전압 측정.
- ⑤ 저항체의 크기를 달리하면서 ③,④과정을 반복.
- ⑥ 저항체(직경 2cm, 플라스틱 봉)가 두 개 있을 때 전압 측정.
- ⑦ 저항체(직경 1cm, 플라스틱 봉)를 팬텀 중앙과 각 전극에 놓고 전압 측정.

각 전압을 측정하여 저항체가 있을 때 전압값의 변화하는 정도를 판단하고 저항체의 위치와 크기를 파악해 보았다. 그리고 측정된 데이터를 가지고 영상복원 알고리즘을 돌려 저항체의 위치를 확인하여 본 시스템이 이상유동장 가시화에 응용이 가능하다는 것을 확인해 보았다.

IV. 실험결과 및 분석

1. 저항체가 없을 때 이론값과 측정값의 비교

팬텀 내부에 저항체가 없고 전해질 물질로만 채워져 있을 때 전압값을 측정하고 forward problem을 풀어 그 해와 비교하여 회로의 건전성과 전체적인 시스템 구성의 좋은 가를 확인하였다.

Fig. 3.8과 Fig. 3.9를 보면 sine 파형과 cosine 파형이 예곡이 된 것처럼 보인다. 이는 실제로 각 전극에서 측정되는 값들이 원래의 sine 파형에서의 최대값이 아닐 수 있기 때문에 발생된다.

최대값과 최소값이 측정되는 전극은 다음과 같이 계산 할 수 있다.

$\sin k\theta$ 인 경우 최대값이 측정되는 전극

$$\text{전극번호} = \frac{L \times (4n - 3)}{k \times 4} \quad (4-3)$$

$\sin k\theta$ 인 경우 최소값이 측정되는 전극

$$\text{전극번호} = \frac{L \times (4n - 1)}{k \times 4} \quad (4-4)$$

여기서 L은 전극번호, k는 주기, n은 자연수, 단 $4n-3 \leq 4k$

식 (4-3)과 (4-4)에 의하여 k=3인 경우 최대값이 측정되는 전극번호는 32/12번, (32×5)/12번, (32×9)/12번이고 최소값은 (32×3)/12번, (32×7)/12번, (32×11)/12번으로 그 값이 정수로 떨어지지 않는 것들이 있다. 이러한 이유로 해서 정확한 sine 파형이나 cosine 파형이 나오지 않게 된다.

측정 데이터의 전체적인 오차를 구하기 위하여 다음과 같이 RMSE(root mean square error)를 정의하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{[U-V] \cdot [U-V]^T}{U \cdot U^T}} \quad (4-5)$$

여기서 U는 FEM을 이용하여 구한 이론적인 값이고, V는 실제 측정된 값이다.

표3.3은 저항체가 팬텀 내부에 없을 때 RMSE를 이용하여 이론값과 실제 측정값의 오차를 나타낸 것이다.

이 오차범위를 보면 주입전류를 cosine pattern으로 하여 각 전극에서 측정된 전압은 실제 전압과 비교하여 전체적인 오차가 0.2% 이내이고, 주입전류를 sine pattern로 하면 전체적인 최대 오차가 0.65%이내임을 확인하였다. 오차범위가 모든 패턴의 경우 0.65%이내로써 전체적인 하드웨어 구성과 회로에 대한 견전성을 입증할 수가 있었으며 전체적인 시스템이 안정적이고 영상복원 알고리즘을 돌려서 그 상을 얻는데 충분히 만족할 만한 오차 범위이다. 그리고 본 시스템에 저장부로 사용된 펜티엄II급의 PC로 실측 데이터를 저장하고 모니터링 하는데 걸리는 시간은 0.3초이었다. 만약 더 성능이 우수한 PC를 사용하면 그 속도가 더욱 빠르리라 생각된다.

Table 3.3은 저항체가 없을 때 각 주입 패턴에 따라 측정된 전압과 이론값과의 오차를 나타낸 표이고, Fig. 3.8과 Fig. 3.9는 주입 전류 pattern에 따라 각 전극에서 측정된 전압과 이론값을 동시에 spline하여 나타낸 그래프이다. 이 그림에서 ●은 이론적인 값이고, ×은 실제 측정된 데이터를 나타낸 것이다.

그래프에서 측정된 전압값이 cosine 파형인 경우에는 기본적으로 설정해준 기준 전극이 0번이고 또한 0번 전극을 ground로 잡았기 때문에 측정 전압이 0이 나온 것이고 이 0번 전극과 각 전극의 상대적인 전압값을 나타낸 것이다.

Table 3.3. The error of voltage values according to injection current pattern(without resistant)

Current pattern	오차(%)	Current pattern	오차(%)
$\cos \theta$	0.0718	$\sin \theta$	0.0856
$\cos 2\theta$	0.0063	$\sin 2\theta$	0.0207
$\cos 3\theta$	0.0128	$\sin 3\theta$	0.1170
$\cos 4\theta$	0.0401	$\sin 4\theta$	0.0623
$\cos 5\theta$	0.0497	$\sin 5\theta$	0.1093
$\cos 6\theta$	0.0728	$\sin 6\theta$	0.1971
$\cos 7\theta$	0.0916	$\sin 7\theta$	0.3013
$\cos 8\theta$	0.0953	$\sin 8\theta$	0.1393
$\cos 9\theta$	0.1218	$\sin 9\theta$	0.3943
$\cos 10\theta$	0.1082	$\sin 10\theta$	0.3160
$\cos 11\theta$	0.1447	$\sin 11\theta$	0.6041
$\cos 12\theta$	0.1491	$\sin 12\theta$	0.2753
$\cos 13\theta$	0.1643	$\sin 13\theta$	0.5817
$\cos 14\theta$	0.1578	$\sin 14\theta$	0.5114
$\cos 15\theta$	0.1900	$\sin 15\theta$	0.6306
$\cos 16\theta$	0.1706		

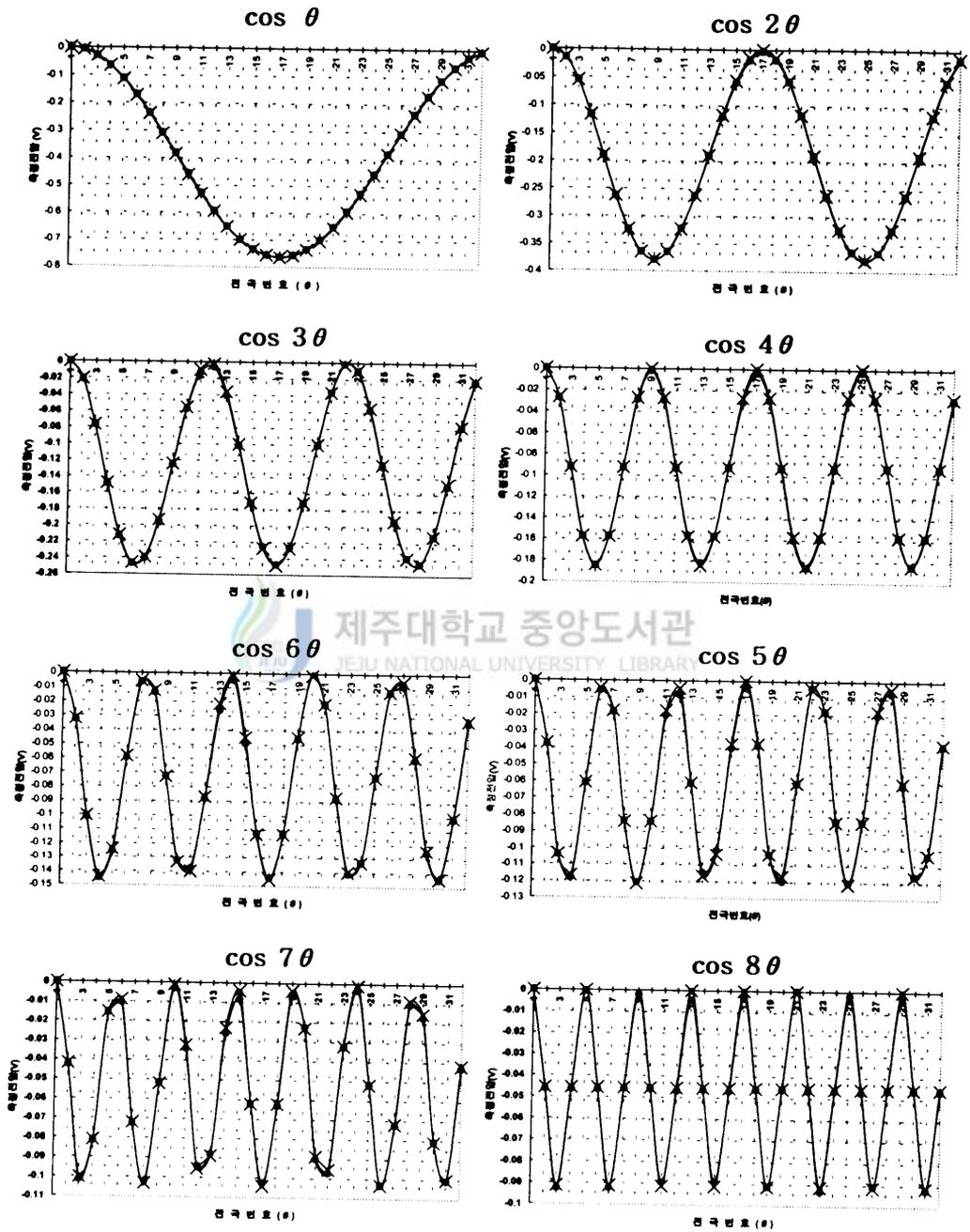


Fig. 3.8(a). Measured and theoretical values ($\cos \theta \sim \cos 8 \theta$)

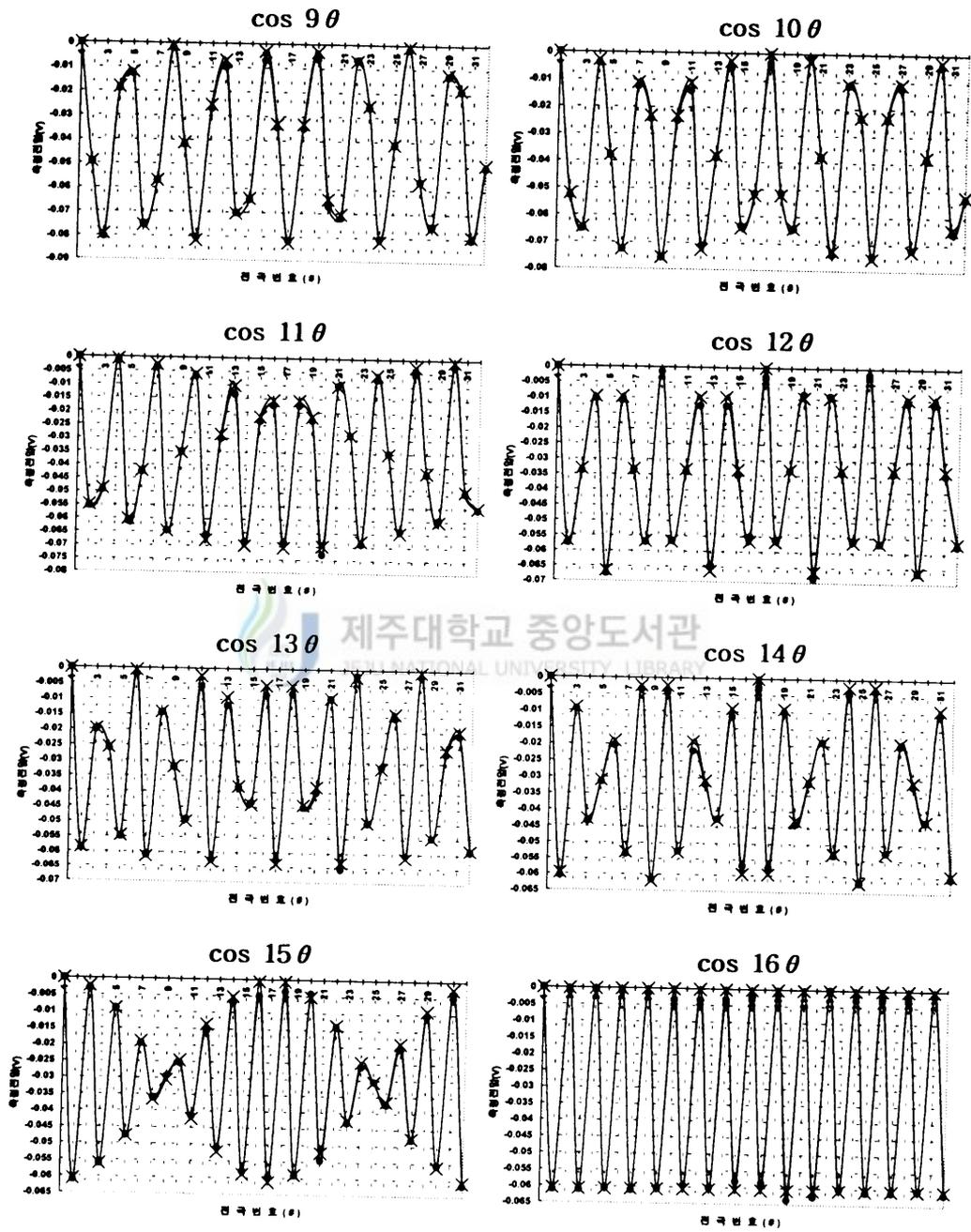


Fig. 3.8(b). Measured and theoretical values ($\cos 9\theta \sim \cos 16\theta$)

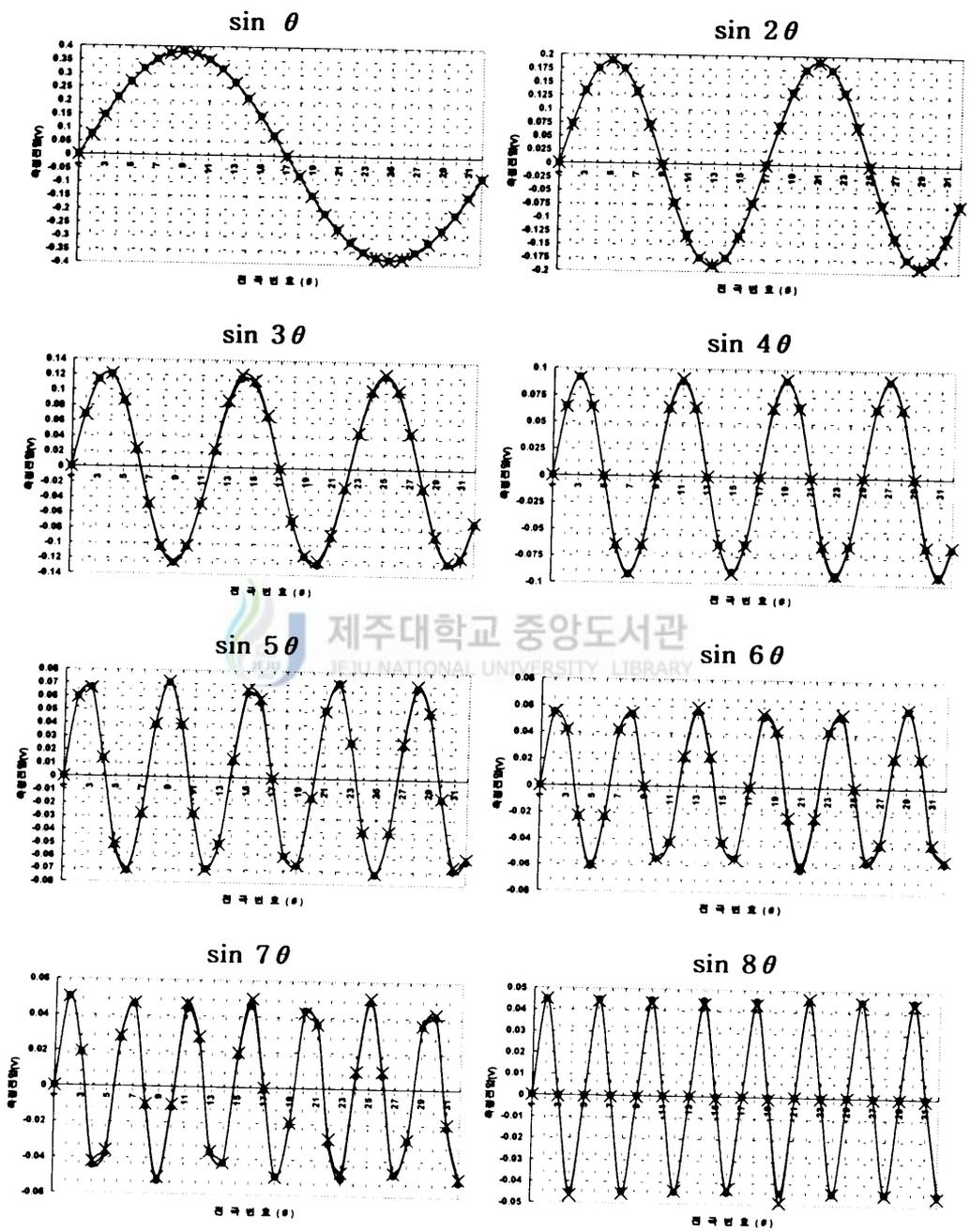


Fig. 3.9(a). Measured and theoretical values ($\sin \theta \sim \sin 8\theta$)

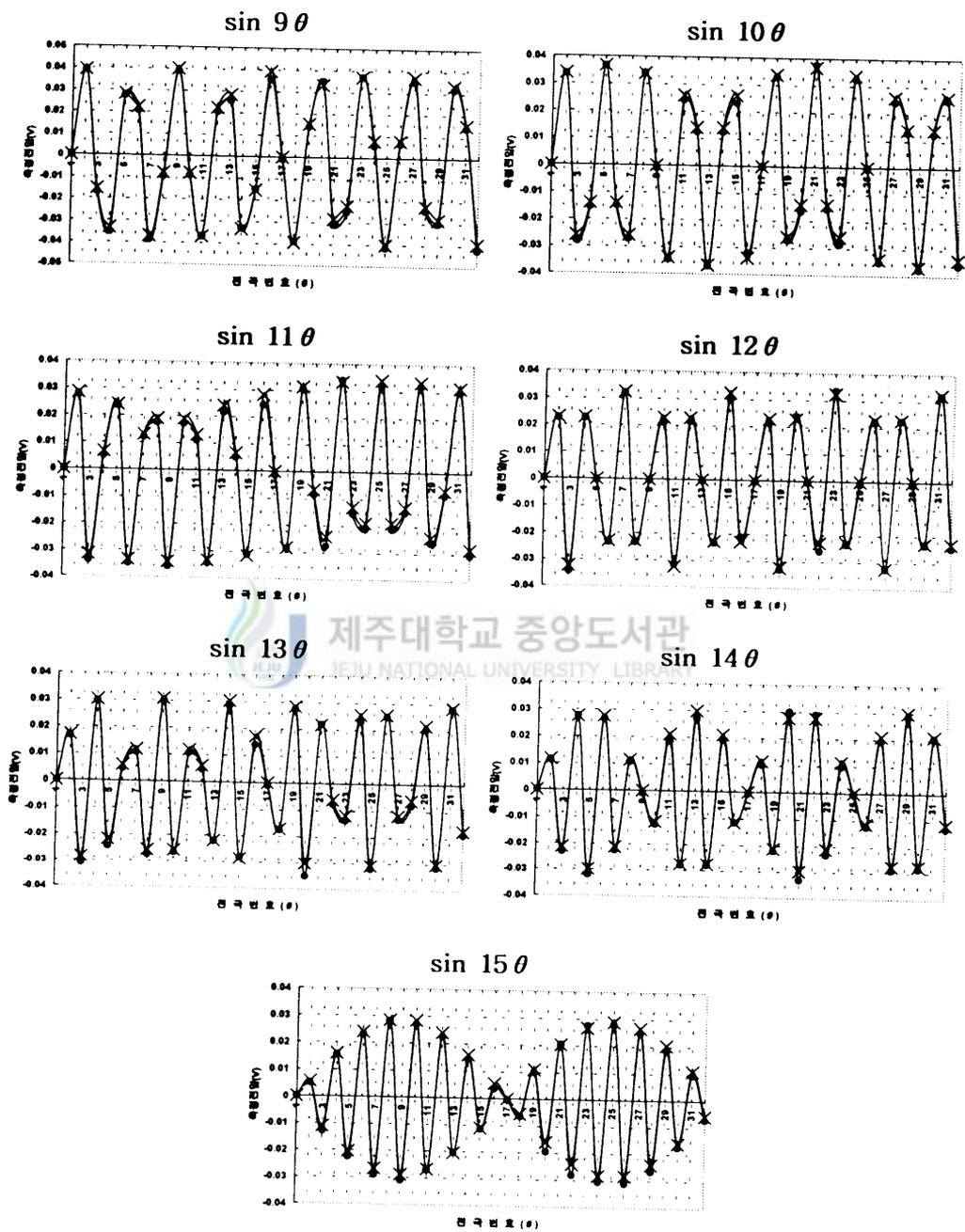


Fig. 3.9(b). Measured and theoretical values ($\sin 9\theta \sim \sin 15\theta$)

2. 저항체의 위치와 크기를 변화시키면서 전압 측정

직경이 3cm인 저항체를 펜텀 중앙과 전극 주위에 놓고 각 전극에 전류를 $\sin k\theta_i$ 와 $\cos k\theta_i$ 로 주입하여 경계에서 전압을 측정하였다. 이 실험을 통하여 저항체의 위치에 따라 전압값이 어떻게 변화하는지를 확인해 보았다.

아래의 그림과 그래프는 저항체의 위치를 나타낸 것이고 그 위치에 따라 측정된 전압을 그래프로 나타내었다. 그래프들은 모든 주기에 대하여 나타내면 육안으로 확인하기가 모호하여 그 파형을 편의상 주입전류의 주기가 6θ 까지만 표시하였다. 다른 주기에 대하여는 부록을 참고하기 바란다.

Fig. 3.10에서와 같이 저항체가 중앙에 있을 경우에는 측정된 파형이 왜곡이 없이 변화가 없는 것처럼 보이나 실제로 저항체가 없을 때보다 경계에서 측정된 값이 1.3배 가량 증가한 것이 나타났다.

그리고 Fig. 3.11에서 Fig. 3.12까지 그래프를 보면 저항체가 전극 주위에 있을 때는 저항체로 인하여 그 전극 주위에 왜곡 현상이 나타남을 알 수 있다.

Fig. 3.13에서 Fig. 3.14까지는 저항체가 없을 때와 저항체의 크기가 변할 때 같은 위치에서 측정된 전압값이 어떻게 변하는가를 확인하기 위하여 수행한 실험이다. 이 그래프들을 통하여 저항체의 크기에 따라 경계에서 측정되는 전압이 틀리게 나타남을 확인할 수 있다. 저항체가 없을 경우에는 경계에서 측정되는 전압이 가장 작고 저항체가 클수록 측정된 전압값이 커짐을 확인할 수 있다. 그림에서 확인이 가능하듯이 저항체가 작으면 작을수록 측정되는 전압이 저항체가 없을 때의 경우와 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3.15(a)와 (b)는 저항체가 둘 있을 때와 저항체가 없을 때 주입전류를 각각 $\cos 3\theta$ 와 $\sin 3\theta$ 로 하였을 때 경계에서 측정된 전압을 나타낸 그래프이다.

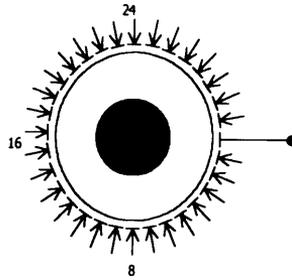


Fig. 3.10(a). Resistor(3cm diameter) located at the center

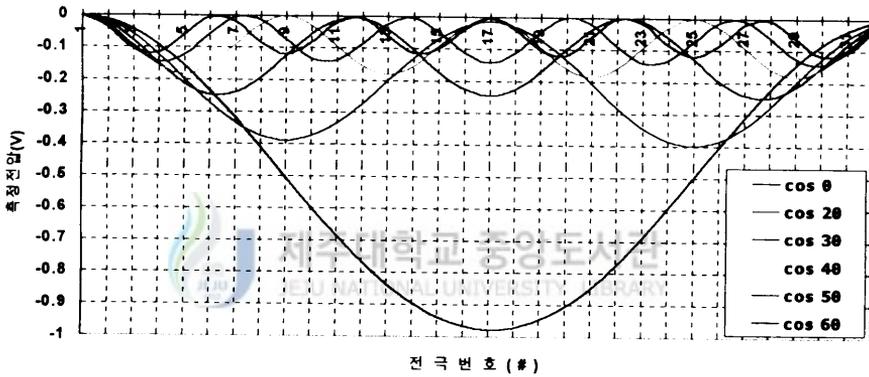


Fig. 3.10(b). Measured data (cosine Injection current)

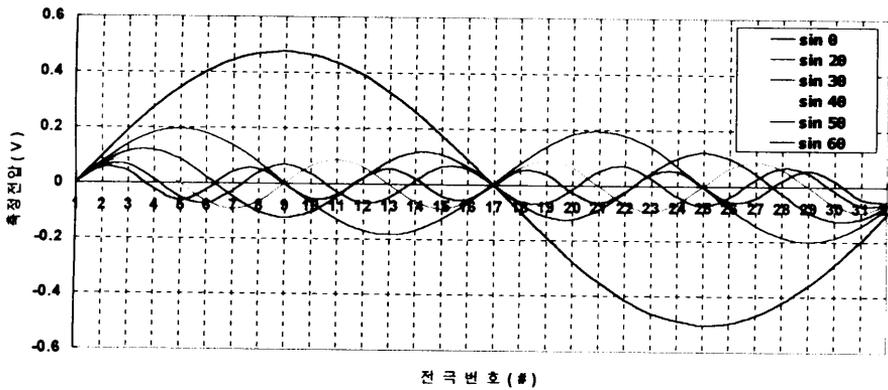


Fig. 3.10(c). Measured data (sine Injection current)

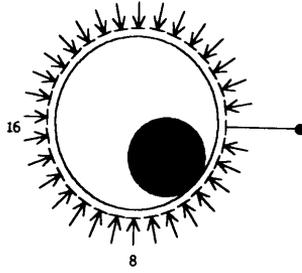


Fig. 3.11(a). The resistant(3cm) is situated on electrode 4.

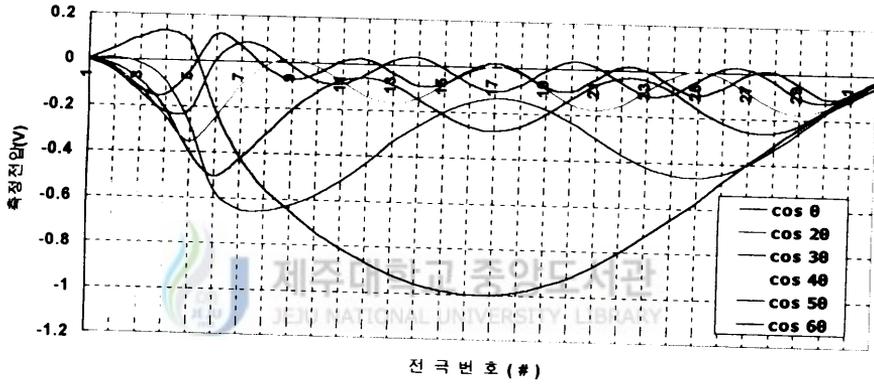


Fig. 3.11(b). Measured data (cosine Injection current)

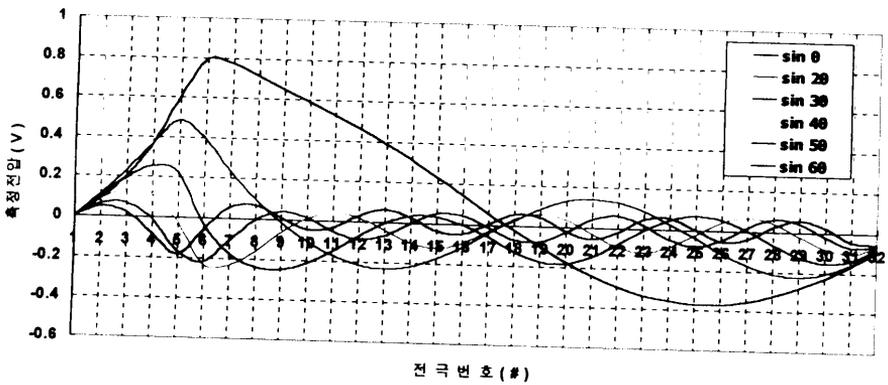


Fig. 3.11(c). Measured data (sine Injection current)

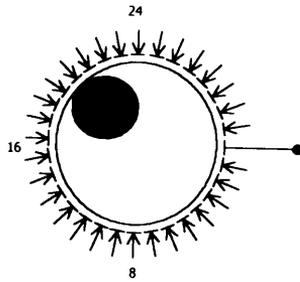


Fig. 3.12(a). The resistant(3cm) is situated on electrode 20

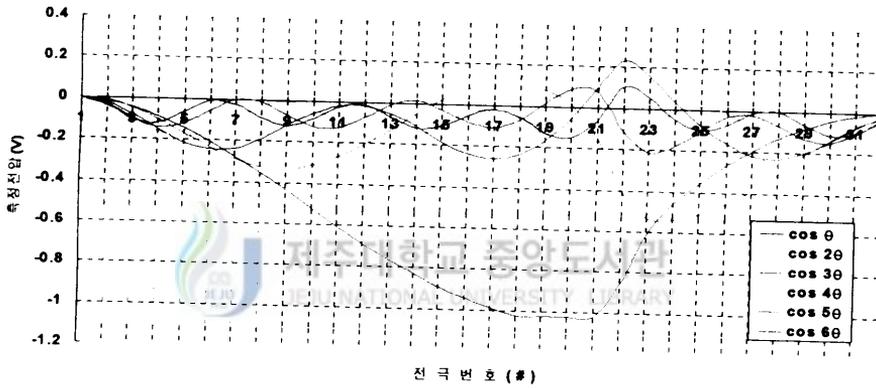


Fig. 3.12(b). Measured data (cosine Injection current)

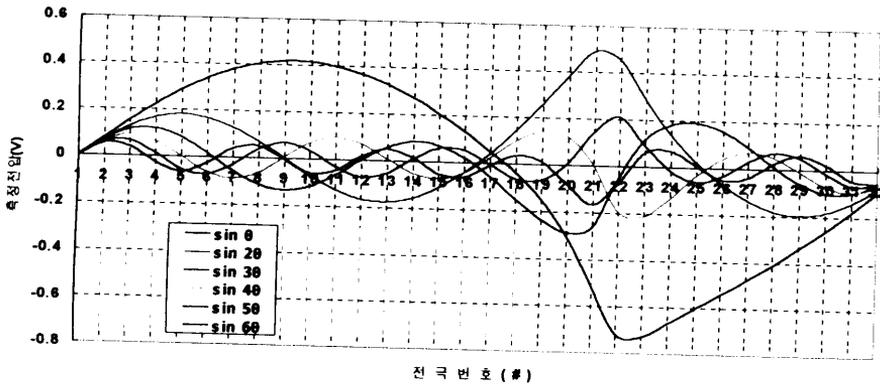


Fig. 3.12(c). Measured data (sine Injection current)

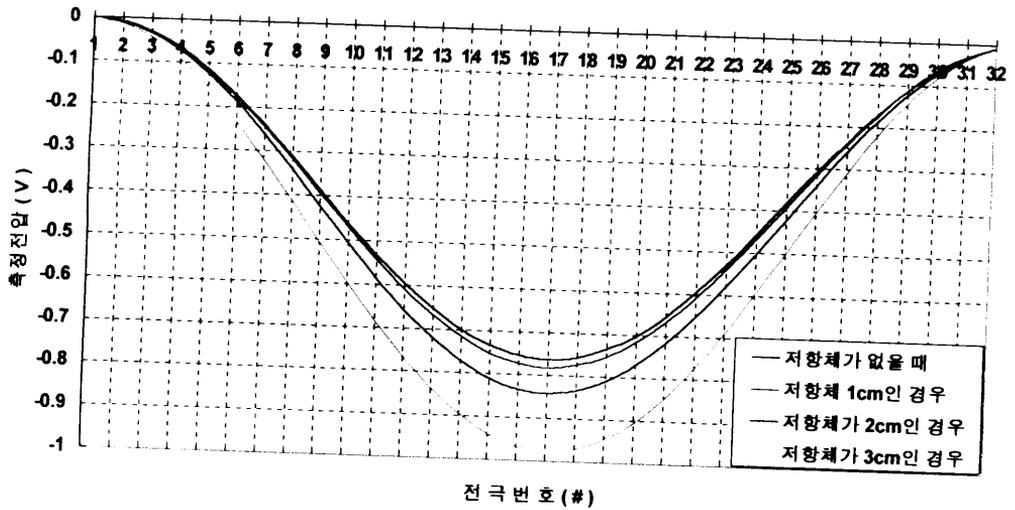


Fig. 3.13(a). Measured Voltage according to resistant's size
 (Injection current : cosine, Position : center)

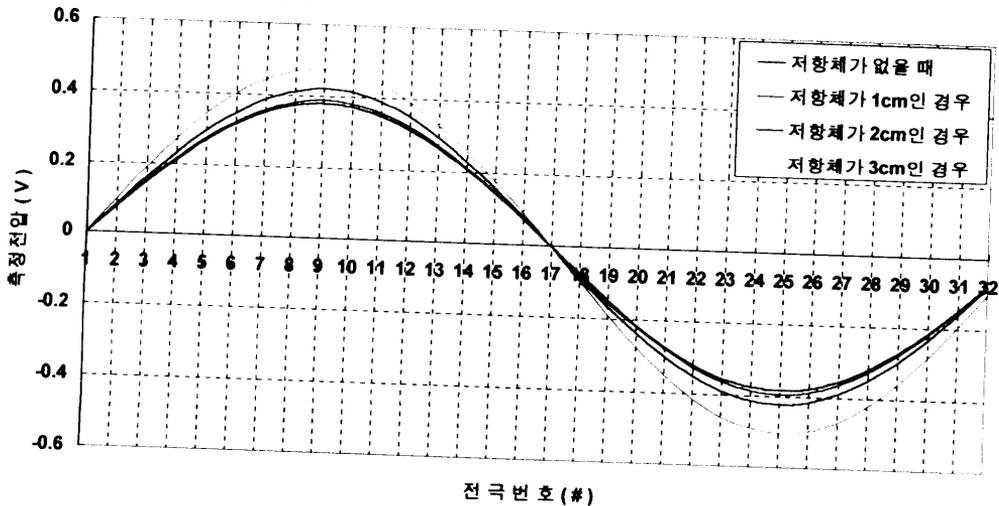


Fig. 3.13(b). Measured Voltage according to resistant's size
 (Injection current : sine, Position : center)

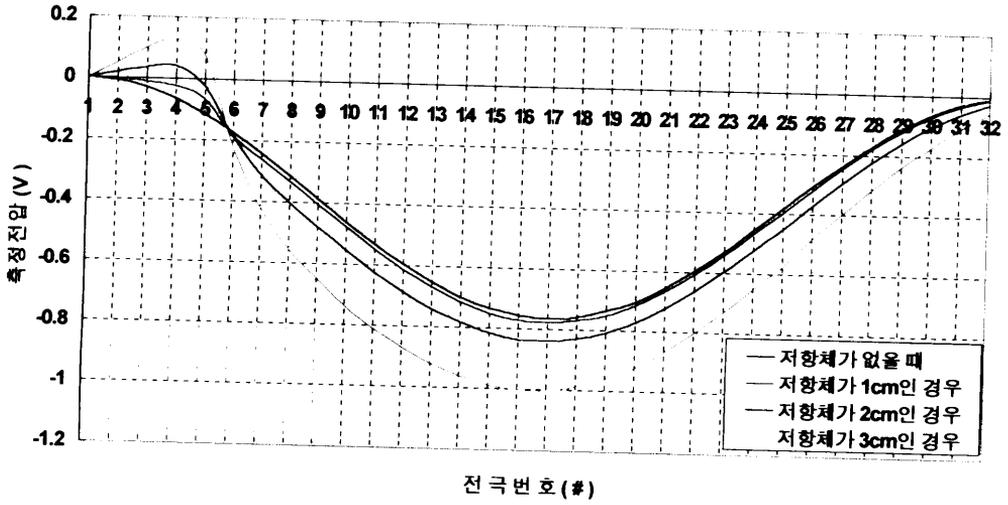


Fig. 3.14(a). Measured Voltage according to resistant's size
(Injection current : cosine, Position : 4 electrode)

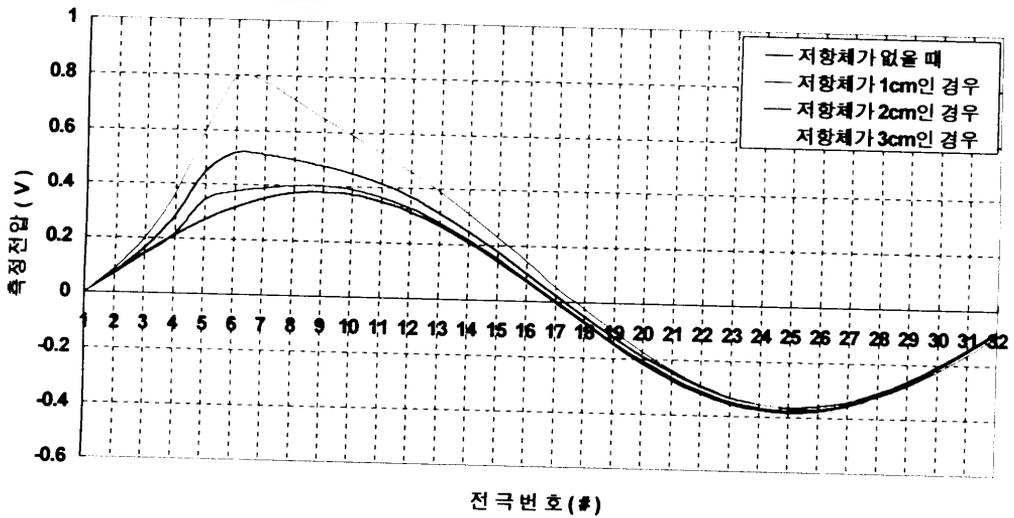


Fig. 3.14(a). Measured Voltage according to resistant's size
(Injection current : sine, Position : 4 electrode)

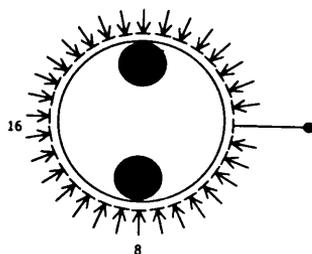


Fig. 3.15(a). The position of the resistant(2cm)

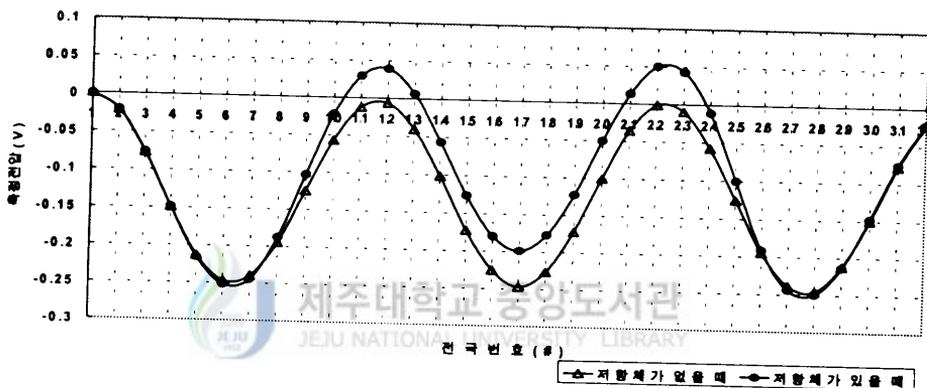


Fig. 3.15(b). Measured Voltage with and without resistant
(Injection current : $\cos 3\theta$)

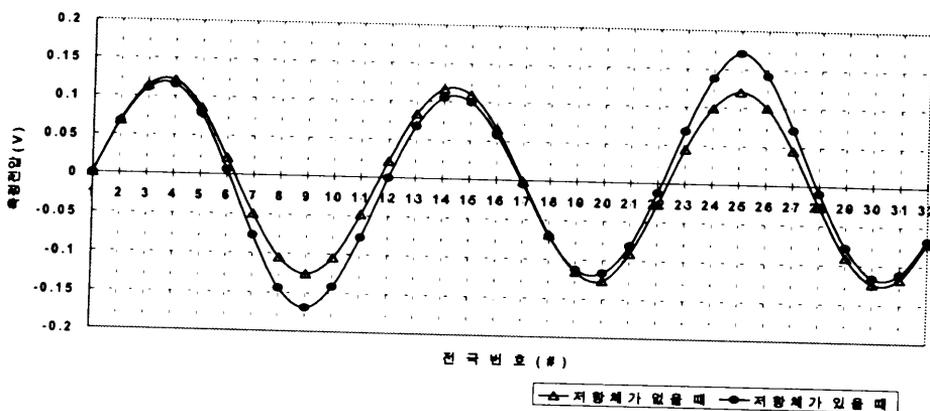


Fig. 3.15(c). Measured Voltage with and without resistant
(Injection current : $\sin 3\theta$)

3. 영상복원

Fig. 3.16에서 Fig. 3.20까지는 실제 데이터를 가지고 영상복원을 한 결과들을 나타낸 것이다. 본 연구는 하드웨어 팀과 소프트웨어 팀으로 나누어 수행하였으며 아래 영상복원 그림들은 소프트웨어 팀의 도움을 받아 실측데이터를 가지고 영상복원 한 결과들이다. 그림에서 볼 수 있듯이 저항체 주위에서 전장이 다르게 형성되어 저항체가 없을 때 보다 그 측정값들이 증폭이 되고 있음을 알 수 있다. 그리고 저항체의 위치를 정확하게 나타내 주고 있으며 그 크기도 가늠할 수 있게 복원이 되고 있음을 확인 할 수 있다.



Fig. 3.16. When the Resistant(3cm) is situated between number 4 electrode and center

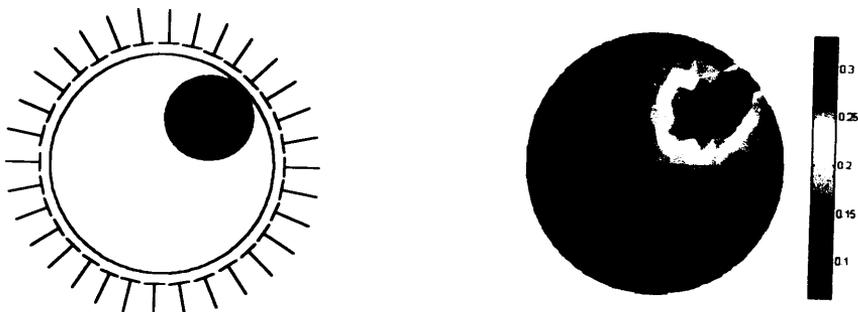


Fig. 3.17. When the Resistant(3cm) is situated number 4 electrode

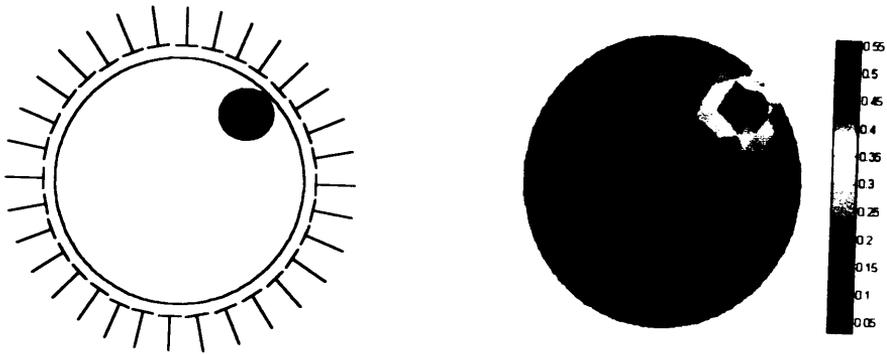


Fig. 3.18. When the Resistant(1cm) is situated number 4 electrode



Fig. 3.19. When the Resistant(3cm) is situated center

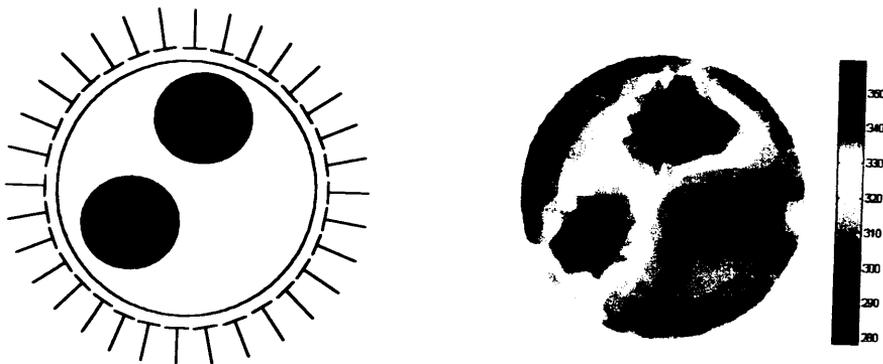


Fig. 3.20. When the Resistant(3cm) are situated 0 electrode and 20 electrode

V. 결론

본 연구에서는 이상유동 가시화를 위해 먼저 정적인 상태에서 2차원적인 실험을 수행하였다. 그러기 위해 우선 이상유체 영상복원을 위한 EIT 측정시스템을 설계·제작하고 펜텀 내에 저항체가 없을 때 FEM을 이용해 얻어진 이론치와 실제 경계에서 측정된 전압값과 비교를 하여 회로의 신뢰성과 전체적인 시스템의 성능을 확인해 보았다. 그리고 저항체가 있을 때, 저항체의 위치와 크기가 변화할 때 각각의 경우에 대해 전기적 신호가 달라지고 각 전극에서 측정되는 전압은 저항체로 인하여 왜곡이 생김을 확인할 수 있었다. 또한 측정된 데이터를 이용하여 영상복원 알고리즘 통해 얻어진 이미지와 실제 저항체의 위치를 비교하여 보았다.

1. EIT 측정시스템 설계·제작

제어부, 신호발생부, 측정부, 저장부로 이루어진 EIT 측정시스템을 설계·제작하였다. 제어부는 Digital Control Board가 담당하며, 여기에 신호측정에 관련된 software가 부가된다. 신호발생부는 VCCS와 Oscillator로 구성되며 측정부는 MUX, Differential Amplifier, Demodulator, Filter로 구성되고, 신호를 디지털화 하는 A/D Converter와 PC의 내부 메모리로 구성하였다. 각 부에 대하여 요약해 보면 다음과 같다.

●범용 인터페이스 카드

- PC와 Digital Control Board 연결
- 측정장치에 대한 모든 제어, 데이터 입·출력

● 제어부

• Digital Control Board

- Current gain 조절
- MUX에서의 채널 선택 제어 신호 발생
- Demodulator에 전달된 Voltage gain 조절

● 신호발생부

• VCCS (Voltage-Controlled Current Sources)

- 실제 가해지는 사인파 전류 신호 발생
- Current gain을 디지털 신호로 제어

• Oscillator

- 전체 시스템의 신호원 (50KHz)

● 측정부

• Differential Amplifier

- MUX로부터 입력된 두 신호를 증폭
- 각 회로에서 발생하는 임피던스 성분에 의한 왜곡을 최소화

• Demodulator

- 측정된 신호를 정류된 신호로 바꿈

• Filter

- 복조된 신호로부터 측정신호의 피크전압을 얻음

● 저장부

• A/D Converter

- 측정신호의 피크전압을 디지털로 바꿔 PC에 저장
- 분해능 12bit

2. 이상유동 가시화에 대한 실험

변별력이 우수한 것으로 알려진 adaptive mode로 전류를 주입하고 각 전극에서 전압을 측정하였다. 주입전류는 $\sin k\theta_i$ 와 $\cos k\theta_i$ 로 하였다.

각 전극으로 들어가는 전류 분포는 멀티미터(HP3458A)를 이용하여 측정하였고 오차는 0.2%를 보였다.

그리고 실험을 통하여 $\sum_{i=1}^{32} I_i = 0$ 와 $\sum_{i=1}^{32} V_i = 0$ 임을 확인하였다.

저항체가 없고 팬텀 내부에 전해질 물질로만 채워져 있을 때 각 전극에서 측정된 전압은 FEM을 이용하여 구한 이론값과 비교하여 주입전류를 cos패턴으로 한 경우는 측정된 전압의 전체적인 오차가 0.2% 이내이고, 주입전류를 sin패턴인 경우는 전체적인 최대 오차가 0.7% 이내로 측정데이터의 신빙성을 확인할 수 있었다. 만약 주파수를 50kHz가 아닌 더 작은 주파수로 하고 주입 전류를 크게 했다면 오차를 더욱 줄일 수 있고 더 좋은 결과가 얻어졌으리라 예상된다.

본 실험을 통하여 EIT 시스템은 유동장을 교란하지 않고 비파괴 특성을 가지고 있으며 측정오차가 위와 같이 작아 실험정보의 불확실성을 줄일 수 있어 열수력 설계에 필요한 이상유동장 구조 연구에 적합하고 데이터를 모니터링 하는데 걸리는 시간은 0.3sec로 이상유동장 해석에 큰 도움이 되리라 확신할 수 있었다.

또한 팬텀 내부에 저항체가 있는 경우는 그 저항체의 크기와 위치에 따라 전극 주위에서 전압이 상승함으로써 이 실제 데이터를 가지고 영상복원 알고리즘을 통해 알아본 바 그 저항체의 위치를 정확히 모니터링 할 수 있었으며 그 크기도 어느 정도인지를 가늠할 수 있었으며 또한 회로의 신뢰성을 재확인 할 수 있었다.

이러한 실험과 결과들을 통하여 EIT 시스템이 이상유동장 내부의 구조를 규명할 수 있으며 이상유동장 가시화에 응용될 수 있다는 것을 확인하였다.

VI. 참고문헌

- Barber D. C. and Brown B. H. 1984. Applied potential tomography, *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, 17. 723-33.
- Cheremisinoff, N. P. 1986, pp. 73-103. Instrumentation for Complex Fluid Flows, Technomic Publishing Inc., Lancaster, PA.
- Dickin, F. and Yang, M., 1996, "Electrical resistance tomography for process application." *Meas. Sci. Technol.* Vol. 7. pp. 247-260.
- Elkow, K. J. and Rezkalla, K. S. 1996, Void fraction measurements in gas-liquid flows using capacitance sensor, *Meas. Sci. Technol.* 7. pp. 1153-1163.
- Gisser D. G. Isaacson D. and Newell J. C. 1987. Current topics in impedance. imaging, *Clin. Phys. Physiol. Meas.*, 8 Suppl. A 39-46.
- Hemant Jain, David Isaacson, Peter M. Edic, and Jonathan C. Newell. 1997. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering.* 44(11).
- Henderson R. P. and Webster J. G. 1978. An impedance camera for spatially specific measurements of the thorax. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* BME-25 250-254.
- Hewitt, G. F. 1978. Measurement of Two Phase Flow Parameters, *Academic Press, London*, 182. pp. 57-60.
- Jones, O. C., and Delhaye, J. 1976. Transient and Statistical Measurement Techniques for Two-Phase Flows: A Critical Review, *International Journal of Multiphase flow*, 3, pp. 89-116.
- Jones, O. C., Lin, J. T., and Ovacik, L. 1992. Investigation of Electrical Impedance Imaging Relative to Two-Phase, Gas-Liquid Flows, *Chemical Engineering Communications*, 118. pp. 299-325.

- Kim Y and Webster J G and Tompkins W J 1983 Electrical impedance imaging of the thorax, *J. Microwave Power.* 18. pp. 245-257.
- Kyungho Cho and Sin Kim. 1999. Adaptive Mesh Grouping in Electrical Impedance Tomography for Bubble Visualization. *KSME International Journal.* 13(6). pp. 504~515.
- Maxwell, J., 1881, A Treatise on Electricity and Magnetism, Clarendon Press, Oxford, England.
- M S Beck and R A Williams. 1996. Process tomography: a European innovation and its applications. *Meas. Sci. Technol.* 7. pp. 215-224.
- Ovacik, L. Lin, J. - T. and Jones, O. C. 1997a, "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.
- Ovacik, L. Lin, J. - T. and Jones, O. C., 1997b, "Progress in electrical impedance imaging of binary media : 2 : Analytical and numerical methods," *1997 OECD/CSNI Specialists Meeting on Advanced Instrumentation, Santa Babara, CA*, pp. 17-20.
- Plaskowski, A., Beck, M. S., Thorn, R., and Dyakowski, T. 1995, Imaging Industrial Flows: Applications of Electrical Process Tomography, *Institute of Physics Publishing, Bristol, England*, pp. 127-141.
- S. L. Ceccio, D. L. George. 1996. A Review of Electrical Impedance Techniques for the Measurement of Multiphase Flows. *Journal of Fluids Engineering.*, 118. 391~399.
- Shollenberger, K. A., Torezynski, J. R., Adkins, D. R., O'Hernm, T. J. and Jackson, N. B. 1997, Gamma-densitometry tomography of gas holdup spatial distribution in industrial-scale bubble columns, *Chem. Eng. Sci.* 52. pp. 2037-2048.

- Wexler A., Fry B. and Neuman M. R. 1985. Impedance-computed tomography algorithm and system, *Appl. Optics*, 24. 3985-3992.
- Xie. C. G., Plaskowski, A., and Beck, M. S. 1989. 8-Electrode Capacitance System for Two-Component Flow Identification-Part 1: Tomographic Flow Imaging, *IEE Proceedings: Part A*. 136. pp. 173-183.
- Xie. C. G., Plaskowski, A., and Beck, M. S. 1989. 8-Electrode Capacitance System for Two-Component Flow Identification-Part 2: Tomographic Flow Imaging, *IEE Proceedings: Part A*. 136. pp. 184-190.
- Yorkey T. J. Webster J. G. and Tompkins W. J. 1987. Comparing reconstruction algorithm electrical impedance tomography, *IEEE Trans. Biomed. Eng. BME-34*. pp. 843-852.
- Woo, Eung Je. 1990. Finite element method and reconstruction algorithms in electrical impedance tomography, Ph.D., The University of Wisconsin - Madison,

부록A 측정데이터

A-1. 저항체가 없을 때 $\text{sink } \theta$, (단위: V)

주이저류 저크번호	$\text{sin } 0^\circ$	$\text{sin } 2^\circ$	$\text{sin } 4^\circ$	$\text{sin } 6^\circ$	$\text{sin } 8^\circ$	$\text{sin } 10^\circ$	$\text{sin } 11^\circ$	$\text{sin } 12^\circ$	$\text{sin } 13^\circ$	$\text{sin } 14^\circ$	$\text{sin } 15^\circ$
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1	0.0736	0.0716	0.0676	0.0646	0.0596	0.0551	0.0501	0.0451	0.0391	0.0336	0.0275
2	0.1452	0.1337	0.1137	0.0917	0.0666	0.0421	0.0185	-0.0005	-0.0170	-0.0280	-0.0341
3	0.2113	0.1743	0.1207	0.0566	0.0235	-0.0446	-0.0466	-0.0356	-0.0155	0.0366	0.0235
4	0.2699	0.1888	0.0856	0.0135	-0.0235	-0.0616	-0.0381	-0.0005	0.0275	0.0366	0.0235
5	0.3165	0.1728	0.0210	-0.0526	-0.0616	-0.0240	0.0265	0.0441	0.0205	0.0366	0.0235
6	0.3521	0.1327	-0.0501	-0.0927	-0.0290	0.0416	0.0461	-0.0005	-0.0391	-0.0270	0.0120
7	0.3736	0.0716	-0.1052	-0.0661	0.0386	0.0541	-0.1115	0.0461	0.0205	0.0366	0.0235
8	0.3806	-0.0015	-0.1257	-0.0010	0.0706	-0.0015	-0.0531	-0.0456	-0.0095	0.0341	0.0175
9	0.3701	-0.0736	-0.1047	0.0621	0.0381	-0.0551	-0.1200	0.0436	0.0090	-0.0341	-0.0361
10	0.3501	-0.1337	0.0486	0.0881	-0.0280	-0.0426	0.0436	0.0000	-0.0371	0.0240	0.0170
11	0.3150	-0.1738	0.0205	0.0626	-0.0701	0.0205	0.0260	0.0436	0.0000	0.0240	0.0110
12	0.2669	-0.1878	0.0826	-0.0010	0.0501	0.0561	-0.0366	0.0000	0.0255	0.0125	-0.0346
13	0.2103	-0.1738	0.1162	0.0641	0.0120	0.0205	-0.0426	0.0431	-0.0331	0.0125	-0.0005
14	0.1432	-0.1322	0.1092	0.0891	0.0631	0.0561	0.0175	0.0431	-0.0331	0.0125	0.0005
15	0.0741	-0.0726	0.0651	-0.0631	0.0561	-0.0541	0.0456	-0.0431	0.0356	-0.0321	0.0245
16	0.0000	-0.0015	-0.0015	-0.0005	-0.0010	-0.0010	0.0015	0.0000	-0.0010	0.0000	-0.0015
17	-0.0731	0.0691	-0.0691	0.0616	-0.0591	0.0521	-0.0496	0.0431	-0.0391	0.0331	-0.0285
18	-0.1467	0.1317	-0.1157	0.0891	-0.0666	0.0406	-0.0205	0.0010	0.0140	-0.0270	0.0331
19	-0.2149	0.1758	-0.1267	0.0656	-0.0155	-0.0260	0.0436	-0.0491	0.0351	-0.0165	0.0306
20	-0.2719	0.1888	-0.0911	-0.0010	0.0511	-0.0631	0.0356	0.0000	-0.0311	0.0376	-0.0085
21	-0.3200	0.1748	-0.0275	-0.0666	0.0716	-0.0255	-0.0311	0.0461	-0.0250	0.0376	-0.0275
22	-0.3551	0.1327	0.0446	-0.0937	0.0270	0.0416	-0.0506	-0.0005	0.0371	-0.0285	0.0341
23	-0.3746	0.0696	0.0987	-0.0646	-0.0406	0.0521	0.0075	-0.0446	0.0055	0.0326	-0.0135
24	-0.3831	-0.0020	0.1202	-0.0005	-0.0726	-0.0015	0.0486	0.0000	-0.0416	0.0055	0.0336
25	-0.3776	-0.0746	0.0997	0.0636	-0.0411	-0.0576	0.0075	0.0446	0.0000	0.0326	-0.0235
26	-0.3551	-0.1342	0.0451	0.0891	0.0245	-0.0436	-0.0481	-0.0005	0.0351	0.0240	-0.0321
27	-0.3195	-0.1753	-0.0265	0.0626	0.0681	0.0210	-0.0230	0.0451	0.0010	0.0321	-0.0321
28	-0.2724	-0.1908	-0.0906	-0.0020	0.0486	0.0581	0.0351	-0.0005	-0.0300	-0.0376	0.0250
29	-0.2154	-0.1773	-0.1237	0.0656	-0.0150	0.0215	0.0406	0.0436	0.0316	0.0125	-0.0085
30	-0.1492	-0.1367	-0.1172	-0.0932	-0.0691	-0.0441	-0.0215	-0.0010	0.0140	0.0250	0.0300
31	-0.0771	-0.0746	-0.0711	-0.0661	-0.0621	-0.0571	-0.0521	-0.0461	-0.0421	-0.0361	-0.0306

A-2. 저항체가 없을 때 $\cos k\theta$, (단위: V)

주어진 조건	$\cos \theta$	$\cos 2\theta$	$\cos 3\theta$	$\cos 4\theta$	$\cos 5\theta$	$\cos 6\theta$	$\cos 7\theta$	$\cos 8\theta$	$\cos 9\theta$	$\cos 10\theta$	$\cos 11\theta$	$\cos 12\theta$	$\cos 13\theta$	$\cos 14\theta$	$\cos 15\theta$	$\cos 16\theta$
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1	-0.0075	-0.0150	-0.0215	-0.0275	-0.0331	-0.0381	-0.0426	-0.0466	-0.0496	-0.0531	-0.0556	-0.0576	-0.0591	-0.0606	-0.0611	-0.0611
2	-0.0295	-0.0551	-0.0771	-0.0927	-0.1017	-0.1042	-0.1017	-0.0927	-0.0806	-0.0651	-0.0496	-0.0341	-0.0200	-0.0095	-0.0030	-0.0010
3	-0.0646	-0.1172	-0.1492	-0.1578	-0.1452	-0.1182	-0.0816	-0.0466	-0.0190	-0.0040	-0.0015	-0.0105	-0.0260	-0.0436	-0.0581	-0.0611
4	-0.1132	-0.1903	-0.2133	-0.1848	-0.1257	-0.0611	-0.0155	-0.0005	-0.0130	-0.0381	-0.0611	-0.0676	-0.0551	-0.0316	-0.0090	-0.0005
5	-0.1723	-0.2629	-0.2469	-0.1573	-0.0596	-0.0060	-0.0105	-0.0466	-0.0751	-0.0726	-0.0426	-0.0110	-0.0200	-0.0205	-0.0476	-0.0606
6	-0.2379	-0.3245	-0.2399	-0.0927	-0.0065	-0.0185	-0.0726	-0.0922	-0.0571	-0.0245	-0.0646	-0.0571	-0.0336	-0.0205	-0.0476	-0.0606
7	-0.3100	-0.3646	-0.1948	-0.0285	-0.0135	-0.0836	-0.1022	-0.0461	-0.0020	-0.0245	-0.0646	-0.0571	-0.0336	-0.0205	-0.0476	-0.0606
8	-0.3851	-0.3796	-0.1252	-0.0020	-0.0726	-0.1207	-0.0516	-0.0020	-0.0421	-0.0756	-0.0351	-0.0015	-0.0145	-0.0336	-0.0361	-0.0611
9	-0.4608	-0.3646	-0.0571	-0.0290	-0.1322	-0.0841	-0.0030	-0.0461	-0.0806	-0.0250	-0.0140	-0.0661	-0.0321	-0.0616	-0.0295	-0.0015
10	-0.5309	-0.3220	-0.0125	-0.0932	-0.1377	-0.0205	-0.0341	-0.0896	-0.0270	-0.0140	-0.0661	-0.0321	-0.0660	-0.0045	-0.0255	-0.0606
11	-0.5950	-0.2629	-0.0065	-0.1558	-0.0881	-0.0085	-0.0942	-0.0471	-0.0100	-0.0711	-0.0300	-0.0125	-0.0626	-0.0526	-0.0416	-0.0035
12	-0.6521	-0.1903	-0.0406	-0.1818	-0.0260	-0.0611	-0.0881	-0.0045	-0.0701	-0.0386	-0.0135	-0.0646	-0.0220	-0.0220	-0.0155	-0.0596
13	-0.6996	-0.1197	-0.1017	-0.1588	-0.0050	-0.1147	-0.0260	-0.0466	-0.0646	-0.0055	-0.0686	-0.0125	-0.0386	-0.0220	-0.0155	-0.0035
14	-0.7342	-0.0586	-0.1728	-0.0922	-0.0491	-0.1012	-0.0085	-0.0891	-0.0070	-0.0636	-0.0235	-0.0351	-0.0386	-0.0426	-0.0070	-0.0601
15	-0.7552	-0.0190	-0.2254	-0.0311	-0.1122	-0.0401	-0.0621	-0.0471	-0.0348	-0.0516	-0.0175	-0.0551	-0.0436	-0.0115	-0.0581	-0.0040
16	-0.7642	-0.0035	-0.2474	-0.0040	-0.1442	-0.0030	-0.1027	-0.0030	-0.0816	-0.0035	-0.0686	-0.0330	-0.0626	-0.0571	-0.0050	-0.0581
17	-0.7572	-0.0180	-0.2289	-0.0290	-0.1132	-0.0386	-0.0631	-0.0461	-0.0351	-0.0516	-0.0175	-0.0551	-0.0626	-0.0225	-0.0596	-0.0025
18	-0.7352	-0.0571	-0.1723	-0.0932	-0.0461	-0.1037	-0.0060	-0.0911	-0.0055	-0.0646	-0.0230	-0.0561	-0.0080	-0.0576	-0.0035	-0.0586
19	-0.7036	-0.1172	-0.1007	-0.1603	0.0005	-0.1197	-0.0225	-0.0461	-0.0671	-0.0015	-0.0731	-0.0336	-0.0451	-0.0100	-0.0591	-0.0015
20	-0.6556	-0.1903	-0.0361	-0.1863	-0.0215	-0.0611	-0.0901	0.0000	-0.0721	-0.0381	-0.0100	-0.0886	-0.0451	-0.0441	-0.0040	-0.0636
21	-0.5985	-0.2634	-0.0015	-0.1593	-0.0881	-0.0040	-0.0972	-0.0466	-0.0085	-0.0741	-0.0285	-0.0886	-0.0095	-0.0316	-0.0546	0.0005
22	-0.5304	-0.3245	-0.0100	-0.0937	-0.1412	-0.0180	-0.0326	-0.0932	-0.0260	-0.0115	-0.0691	-0.0090	-0.0626	-0.0190	-0.0440	-0.0626
23	-0.4572	-0.3631	-0.0576	-0.0300	-0.1332	-0.0631	-0.0035	-0.0466	-0.0806	-0.0235	-0.0075	-0.0341	-0.0200	-0.0536	-0.0431	0.0000
24	-0.3821	-0.3791	-0.1257	-0.0025	-0.0726	-0.1202	-0.0521	-0.0020	-0.0416	-0.0746	-0.0351	-0.0561	-0.0501	-0.0045	-0.0260	-0.0601
25	-0.3075	-0.3656	-0.1948	-0.0285	-0.0130	-0.0836	-0.1032	-0.0471	-0.0020	-0.0416	-0.0641	-0.0571	-0.0316	-0.0306	-0.0015	-0.0611
26	-0.2384	-0.3245	-0.2384	-0.0922	-0.0075	-0.0200	-0.0726	-0.0906	-0.0566	-0.0240	-0.0045	-0.0341	-0.0626	-0.0536	-0.0431	0.0000
27	-0.1718	-0.2629	-0.2459	-0.1578	-0.0070	-0.0070	-0.1005	-0.0461	-0.0751	-0.0721	-0.0426	-0.0596	-0.0666	-0.0526	-0.0205	-0.0025
28	-0.1132	-0.1903	-0.2123	-0.1843	-0.1257	-0.0621	-0.1010	-0.0020	-0.1190	-0.0386	-0.0596	-0.0666	-0.0546	-0.0321	-0.0105	-0.0611
29	-0.0656	-0.1187	-0.1502	-0.1583	-0.1447	-0.1162	-0.0806	-0.0461	-0.1130	-0.0045	-0.0225	-0.0115	-0.0270	-0.0431	-0.0105	-0.0020
30	-0.0300	-0.0566	-0.0781	-0.0932	-0.1017	-0.1042	-0.1007	-0.0922	-0.0806	-0.0656	-0.0496	-0.0346	-0.0210	-0.0105	-0.0035	-0.0015
31	-0.0085	-0.0160	-0.0225	-0.0285	-0.0341	-0.0386	-0.0431	-0.0466	-0.0506	-0.0531	-0.0556	-0.0576	-0.0591	-0.0606	-0.0616	-0.0616

A-3. 저항체가 중앙에 있을 때(3cm), 주입전류 sink θ , (단위: V)

주입전류 전극번호	sin θ	sin 2 θ	sin 3 θ	sin 4 θ	sin 5 θ	sin 6 θ	sin 7 θ	sin 8 θ	sin 9 θ	sin 10 θ	sin 11 θ	sin 12 θ	sin 13 θ	sin 14 θ	sin 15 θ
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1	0.0962	0.0746	0.0671	0.0636	0.0591	0.0546	0.0486	0.0441	0.0386	0.0331	0.0275	0.0225	0.0160	0.0100	0.0045
2	0.1883	0.1382	0.1137	0.0906	0.0661	0.0416	0.0185	-0.0005	-0.0170	-0.0275	-0.0336	-0.0396	-0.0460	-0.0520	-0.0580
3	0.2714	0.1808	0.1197	0.0641	0.0130	-0.0230	-0.0441	-0.0456	-0.0351	-0.0150	0.0050	0.0220	0.0290	0.0270	0.0150
4	0.3446	0.1963	0.0861	-0.0005	-0.0646	-0.0706	-0.0376	-0.0005	0.0275	0.0366	0.0235	-0.0005	-0.0240	-0.0321	-0.0225
5	0.4017	0.1808	0.0225	-0.0646	-0.0706	-0.0235	0.0260	0.0436	0.0205	-0.0145	-0.0346	0.0040	0.0265	0.0230	0.0100
6	0.4442	0.1402	-0.0481	-0.0917	-0.0280	0.0411	0.0456	-0.0005	0.0386	-0.0270	0.0115	-0.0235	0.0040	0.0265	0.0230
7	0.4688	0.0786	-0.1022	-0.0651	0.0381	0.0536	-0.0115	-0.0451	-0.0100	0.0331	0.0170	-0.0235	0.0105	-0.0225	-0.0290
8	0.4758	0.0040	-0.1227	-0.0005	0.0696	-0.0010	-0.0521	-0.0005	0.0386	-0.0270	0.0115	-0.0235	0.0105	0.0105	0.0275
9	0.4648	-0.0676	-0.1027	0.0626	0.0376	-0.0546	-0.0120	0.0431	-0.0085	-0.0336	-0.0356	-0.0005	0.0295	-0.0005	-0.0306
10	0.4357	-0.1277	-0.0476	0.0866	-0.0275	-0.0411	0.0426	0.0000	-0.0361	0.0240	0.0105	-0.0311	0.0100	0.0185	-0.0270
11	0.3916	-0.1683	0.0210	0.0616	-0.0886	0.0205	0.0250	-0.0431	0.0200	0.0125	-0.0331	0.0210	0.0040	-0.0275	0.0220
12	0.3305	-0.1818	0.0821	-0.0005	-0.0491	0.0551	-0.0361	-0.0005	0.0255	-0.0351	0.0220	-0.0005	0.0230	-0.0275	0.0220
13	0.2604	-0.1678	0.1152	0.0621	0.0120	0.0210	-0.0426	0.0421	-0.0326	0.0120	0.0055	-0.0230	0.0280	-0.0270	0.0205
14	0.1773	-0.1262	0.1082	-0.0876	0.0626	0.0416	0.0175	-0.0010	-0.0150	0.0230	-0.0306	0.0295	-0.0275	0.0270	0.0145
15	0.0906	-0.0676	0.0651	-0.0621	0.0566	-0.0531	0.0456	-0.0426	0.0356	-0.0321	0.0245	-0.0210	0.0145	-0.0110	0.0040
16	-0.0015	0.0045	-0.0010	-0.0005	-0.0010	-0.0010	-0.0010	0.0000	-0.0010	0.0000	-0.0010	0.0000	-0.0010	0.0000	-0.0005
17	-0.0942	0.0756	-0.0676	0.0611	-0.0581	0.0516	-0.0491	0.0426	-0.0381	0.0316	-0.0280	0.0295	-0.0275	-0.0110	0.0040
18	-0.1863	0.1382	-0.1132	0.0881	-0.0851	0.0391	-0.0200	0.0010	0.0140	-0.0265	0.0300	-0.0326	0.0275	0.0105	-0.0065
19	-0.2734	0.1828	-0.1237	0.0646	-0.0150	-0.0255	0.0431	-0.0481	0.0341	-0.0155	-0.0085	0.0240	-0.0336	0.0220	0.0100
20	-0.3486	0.1958	-0.0891	-0.0010	0.0506	-0.0626	0.0351	-0.0005	-0.0311	0.0371	-0.0260	0.0255	-0.0336	0.0295	-0.0195
21	-0.4122	0.1803	-0.0255	-0.0656	0.0706	-0.0250	-0.0311	0.0461	-0.0250	-0.0155	0.0336	-0.0255	-0.0075	-0.0326	0.0205
22	-0.4608	0.1372	0.0456	-0.0927	0.0270	0.0411	-0.0506	-0.0005	0.0376	-0.0280	-0.0155	0.0336	-0.0140	-0.0240	0.0280
23	-0.4878	0.0716	0.0992	-0.0636	-0.0376	0.0516	0.0075	-0.0446	0.0060	0.0321	-0.0205	-0.0230	0.0240	0.0100	-0.0295
24	-0.5023	-0.0025	0.1207	-0.0005	-0.0716	-0.0015	0.0481	-0.0005	-0.0411	-0.0005	0.0321	-0.0010	-0.0321	0.0000	-0.0275
25	-0.4958	-0.0786	0.1002	0.0636	-0.0406	-0.0566	0.0075	0.0441	0.0065	-0.0346	-0.0205	0.0215	0.0245	-0.0005	0.0275
26	-0.4693	-0.1412	0.0456	0.0881	0.0245	-0.0431	-0.0476	0.0000	0.0346	0.0245	-0.0145	-0.0321	0.0245	-0.0125	-0.0300
27	-0.4227	-0.1843	-0.0260	0.0621	0.0671	0.0205	-0.0295	-0.0446	-0.0235	0.0125	0.0316	0.0220	-0.0130	0.0190	0.0240
28	-0.3596	-0.1998	-0.0901	-0.0020	0.0476	0.0571	0.0341	0.0000	-0.0295	-0.0376	-0.0255	-0.0005	-0.0080	-0.0290	-0.0260
29	-0.2850	-0.1858	-0.1232	-0.0646	-0.0150	0.0215	0.0401	0.0431	0.0311	0.0120	-0.0085	-0.0235	-0.0311	-0.0280	0.0185
30	-0.1963	-0.1427	-0.1167	-0.0922	-0.0676	-0.0436	-0.0210	-0.0010	0.0135	0.0240	0.0300	0.0316	0.0275	0.0205	0.0100
31	-0.1012	-0.0786	-0.0711	-0.0656	-0.0616	-0.0561	-0.0516	-0.0461	-0.0411	-0.0356	-0.0300	-0.0240	-0.0185	-0.0125	-0.0070

A-4. 저항체가 중앙에 있을 때(3cm), 주입전류 $\cos k\theta$, (단위: V)

주입전류 점근번호	$\cos \theta$	$\cos 2\theta$	$\cos 3\theta$	$\cos 4\theta$	$\cos 5\theta$	$\cos 6\theta$	$\cos 7\theta$	$\cos 8\theta$	$\cos 9\theta$	$\cos 10\theta$	$\cos 11\theta$	$\cos 12\theta$	$\cos 13\theta$	$\cos 14\theta$	$\cos 15\theta$	$\cos 16\theta$
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1	-0.0125	-0.0155	-0.0210	-0.0270	-0.0326	-0.0376	-0.0421	-0.0466	-0.0501	-0.0526	-0.0551	-0.0571	-0.0581	-0.0596	-0.0606	-0.0606
2	-0.0426	-0.0571	-0.0766	-0.0917	-0.1007	-0.1032	-0.1002	-0.0917	-0.0801	-0.0651	-0.0491	-0.0336	-0.0205	-0.0100	-0.0030	-0.0010
3	-0.0917	-0.1202	-0.1477	-0.1558	-0.1437	-0.1162	-0.0806	-0.0466	-0.0195	-0.0040	-0.0020	-0.0115	-0.0285	-0.0436	-0.0561	-0.0606
4	-0.1553	-0.1968	-0.2113	-0.1828	-0.1237	-0.0606	-0.0155	-0.0010	-0.0125	-0.0376	-0.0601	-0.0671	-0.0551	-0.0316	-0.0095	-0.0015
5	-0.2319	-0.2699	-0.2449	-0.1558	-0.0591	-0.0065	-0.0100	-0.0456	-0.0746	-0.0716	-0.0426	-0.0115	-0.0020	-0.0200	-0.0471	-0.0601
6	-0.3165	-0.3325	-0.2389	-0.0917	-0.0060	-0.0180	-0.0711	-0.0917	-0.0566	-0.0120	-0.0030	-0.0341	-0.0606	-0.0531	-0.0190	-0.0015
7	-0.4082	-0.3736	-0.1938	-0.0285	-0.0130	-0.0826	-0.1012	-0.0461	-0.0200	-0.0240	-0.0636	-0.0566	-0.0145	-0.0035	-0.0361	-0.0611
8	-0.5028	-0.3886	-0.1257	-0.0020	-0.0726	-0.1197	-0.0506	-0.0020	-0.0406	-0.0746	-0.0346	-0.0020	-0.0311	-0.0616	-0.0295	-0.0025
9	-0.5950	-0.3741	-0.0576	-0.0285	-0.1312	-0.0831	-0.0030	-0.0461	-0.0801	-0.0245	-0.0070	-0.0556	-0.0486	-0.0045	-0.0245	-0.0601
10	-0.6831	-0.3330	-0.0145	-0.0922	-0.1367	-0.0205	-0.0331	-0.0881	-0.0285	-0.0130	-0.0651	-0.0336	-0.0050	-0.0516	-0.0406	-0.0035
11	-0.7637	-0.2734	-0.0075	-0.1538	-0.0866	-0.0075	-0.0922	-0.0461	-0.0100	-0.0701	-0.0285	-0.0115	-0.0606	-0.0205	-0.0150	-0.0591
12	-0.8349	-0.2003	-0.0411	-0.1788	-0.0245	-0.0606	-0.0856	-0.0035	-0.0686	-0.0376	-0.0125	-0.0636	-0.0110	-0.0316	-0.0496	-0.0035
13	-0.8935	-0.1302	-0.1012	-0.1543	-0.0050	-0.1127	-0.0255	-0.0466	-0.0636	-0.0050	-0.0671	-0.0120	-0.0376	-0.0426	-0.0070	-0.0591
14	-0.9380	-0.0686	-0.1718	-0.0906	-0.0476	-0.0997	-0.0080	-0.0876	-0.0070	-0.0621	-0.0225	-0.0336	-0.0431	-0.0115	-0.0556	-0.0035
15	-0.9651	-0.0295	-0.2239	-0.0306	-0.1107	-0.0396	-0.0611	-0.0461	-0.0341	-0.0511	-0.0170	-0.0546	-0.0085	-0.0561	-0.0040	-0.0576
16	-0.9771	-0.0145	-0.2454	-0.0040	-0.1422	-0.0035	-0.1007	-0.0035	-0.0806	-0.0030	-0.0676	-0.0025	-0.0626	-0.0020	-0.0596	-0.0030
17	-0.9706	-0.0290	-0.2254	-0.0290	-0.1117	-0.0381	-0.0626	-0.0458	-0.0346	-0.0511	-0.0170	-0.0551	-0.0080	-0.0581	-0.0035	-0.0586
18	-0.9455	-0.0701	-0.1708	-0.0922	-0.0458	-0.1012	-0.0060	-0.0901	-0.0050	-0.0636	-0.0225	-0.0331	-0.0446	-0.0095	-0.0591	-0.0015
19	-0.9065	-0.1307	-0.1002	-0.1578	0.0000	-0.1172	-0.0225	-0.0461	-0.0661	-0.0015	-0.0716	-0.0080	-0.0391	-0.0436	-0.0045	-0.0641
20	-0.8484	-0.2043	-0.0371	-0.1838	-0.0210	-0.0601	-0.0891	0.0000	-0.0716	-0.0381	-0.0095	-0.0080	-0.0095	-0.0311	-0.0536	0.0000
21	-0.7763	-0.2800	-0.0030	-0.1578	-0.0871	-0.0040	-0.0962	-0.0461	-0.0070	-0.0736	-0.0285	-0.0095	-0.0646	-0.0185	-0.0140	-0.0616
22	-0.6916	-0.3436	-0.0105	-0.0922	-0.1397	-0.0165	-0.0321	-0.0927	-0.0255	-0.0110	-0.0681	-0.0341	-0.0020	-0.0541	-0.0436	0.0005
23	-0.5990	-0.3831	-0.0596	-0.0295	-0.1302	-0.0821	-0.0035	-0.0461	-0.0796	-0.0240	-0.0075	-0.0561	-0.0496	-0.0045	-0.0255	-0.0596
24	-0.5013	-0.3987	-0.1267	-0.0020	-0.0721	-0.1187	-0.0516	-0.0025	-0.0411	-0.0746	-0.0346	-0.0020	-0.0316	-0.0611	-0.0306	-0.0020
25	-0.4042	-0.3836	-0.1958	-0.0280	-0.0130	-0.0826	-0.1022	-0.0466	-0.0015	-0.0245	-0.0636	-0.0566	-0.0316	-0.0611	-0.0306	-0.0020
26	-0.3120	-0.3416	-0.2384	-0.0911	-0.0075	-0.0200	-0.0721	-0.0901	-0.0561	-0.0125	-0.0500	-0.0341	-0.0496	-0.0040	-0.0200	-0.0030
27	-0.2229	-0.2765	-0.2459	-0.1548	-0.0596	-0.0070	-0.1010	-0.0461	-0.0741	-0.0716	-0.0421	-0.0110	-0.0596	-0.0200	-0.0481	-0.0606
28	-0.1447	-0.1998	-0.2123	-0.1823	-0.1242	-0.0611	-0.0715	-0.0020	-0.0135	-0.0376	-0.0596	-0.0656	-0.0541	-0.0316	-0.0105	-0.0025
29	-0.0826	-0.1257	-0.1507	-0.1583	-0.1432	-0.1152	-0.0801	-0.0461	-0.0195	-0.0050	-0.0025	-0.0115	-0.0265	-0.0436	-0.0551	-0.0601
30	-0.0366	-0.0601	-0.0786	-0.0922	-0.1007	-0.1027	-0.0992	-0.0911	-0.0791	-0.0646	-0.0491	-0.0341	-0.0210	-0.0100	-0.0035	-0.0015
31	-0.0090	-0.0170	-0.0225	-0.0280	-0.0341	-0.0386	-0.0431	-0.0461	-0.0501	-0.0526	-0.0551	-0.0576	-0.0591	-0.0596	-0.0606	-0.0611

A-5. 저항체가 4번 전극 가까이에 있을 때(3cm), 주입전류 sink θ , (단위: V)

주입전류 전극번호	sin θ	sin 2 θ	sin 3 θ	sin 4 θ	sin 5 θ	sin 6 θ	sin 7 θ	sin 8 θ	sin 9 θ	sin 10 θ	sin 11 θ	sin 12 θ	sin 13 θ	sin 14 θ	sin 15 θ
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1	0.0856	0.1087	0.1012	0.0846	0.0631	0.0486	0.0416	0.0406	0.0376	0.0351	0.0295	0.0230	0.0145	0.0085	0.0030
2	0.2018	0.2299	0.1923	0.1332	0.0691	0.0235	-0.0025	-0.0095	-0.0200	-0.0230	-0.0280	-0.0311	-0.0321	-0.0265	-0.0160
3	0.3636	0.3641	0.2544	0.1152	-0.0065	-0.0771	-0.0932	-0.0716	-0.0376	-0.0005	0.0220	0.0331	0.0300	0.0205	0.0095
4	0.5985	0.4848	0.2254	-0.0190	-0.1643	-0.1813	-0.1032	-0.0010	0.0786	0.1002	0.0626	-0.0010	-0.0586	-0.0796	-0.0546
5	0.7928	0.3987	-0.0265	-0.2259	-0.2169	-0.0601	0.0856	0.1082	0.0566	-0.0331	-0.0821	-0.0541	0.0095	0.0581	0.0521
6	0.7163	0.2394	-0.1708	-0.2314	-0.1092	0.0536	0.1032	0.0185	-0.0366	-0.0461	-0.0100	0.0260	0.0175	-0.0115	-0.0195
7	0.7152	0.1022	-0.2349	-0.1618	-0.0075	0.0701	0.0285	-0.0371	-0.0095	0.0220	0.0030	-0.0275	-0.0235	0.0175	0.0346
8	0.6506	-0.0125	-0.2459	-0.0621	0.0386	0.0110	-0.0220	0.0040	0.0391	-0.0075	-0.0471	-0.0035	0.0326	0.0040	-0.0245
9	0.5895	-0.1007	-0.2133	0.0080	0.0140	-0.0441	0.0130	0.0471	-0.0075	-0.0401	0.0070	-0.0190	-0.0240	-0.0075	0.0321
10	0.5274	-0.1683	-0.1492	0.0401	-0.0476	-0.0321	0.0646	0.0030	-0.0356	0.0185	0.0020	-0.0341	0.0120	0.0225	-0.0220
11	0.4623	-0.2128	-0.0721	0.0205	-0.0866	0.0280	0.0446	-0.0401	0.0215	0.0075	-0.0411	0.0185	0.0065	-0.0235	0.0260
12	0.3906	-0.2284	-0.0040	-0.0361	-0.0661	0.0631	-0.0185	0.0030	0.0265	-0.0396	0.0145	-0.0025	-0.0195	0.0300	-0.0170
13	0.3145	-0.2159	0.0351	-0.0967	-0.0025	0.0496	-0.0260	0.0451	-0.0316	0.0080	-0.0010	-0.0245	0.0300	-0.0240	0.0175
14	0.2309	-0.1743	0.0346	-0.1202	0.0496	-0.0346	0.0321	0.0015	-0.0140	0.0195	-0.0361	0.0280	-0.0255	0.0220	-0.0090
15	0.1472	-0.1152	-0.0020	-0.0927	0.0441	-0.0466	0.0581	-0.0391	0.0361	-0.0356	0.0195	-0.0230	0.0160	-0.0080	0.0070
16	0.0556	-0.0401	-0.0571	-0.0295	-0.0110	0.0050	0.0100	0.0025	0.0000	-0.0030	-0.0055	-0.0020	0.0000	0.0025	0.0015
17	-0.0195	0.0255	-0.1267	0.0326	-0.0686	0.0566	-0.0381	0.0451	-0.0381	0.0285	-0.0331	0.0195	-0.0165	0.0130	-0.0040
18	-0.0977	0.0856	-0.1728	0.0606	-0.0756	0.0451	-0.0090	0.0015	0.0150	-0.0300	0.0255	-0.0346	0.0290	-0.0195	0.0120
19	-0.1718	0.1287	-0.1823	0.0381	-0.0250	-0.0200	0.0536	-0.0451	0.0351	-0.0190	-0.0130	0.0220	-0.0326	0.0316	-0.0170
20	-0.2349	0.1422	-0.1462	-0.0270	0.0411	-0.0571	0.0456	0.0020	-0.0300	0.0346	-0.0316	-0.0020	0.0230	-0.0306	0.0225
21	-0.2885	0.1287	-0.0811	-0.0906	0.0616	-0.0200	-0.0205	0.0486	-0.0245	-0.0185	0.0300	-0.0265	-0.0060	0.0306	-0.0250
22	-0.3295	0.0891	-0.0080	-0.1172	0.0185	0.0461	-0.0416	0.0020	0.0386	-0.0311	-0.0195	0.0331	-0.0130	-0.0220	0.0306
23	-0.3536	0.0285	0.0471	-0.0866	-0.0481	0.0561	-0.0165	-0.0416	0.0060	0.0295	-0.0240	-0.0245	0.0245	0.0120	-0.0270
24	-0.3686	-0.0376	0.0711	-0.0235	-0.0796	0.0030	0.0566	0.0020	-0.0406	-0.0030	0.0285	-0.0020	-0.0311	0.0010	0.0290
25	-0.3681	-0.1117	0.0541	0.0421	-0.0481	-0.0526	0.0155	0.0461	0.0075	-0.0366	-0.0240	0.0205	0.0250	-0.0105	-0.0290
26	-0.3516	-0.1693	0.0030	0.0686	0.0175	-0.0396	-0.0396	0.0020	0.0351	0.0220	-0.0175	-0.0336	-0.0120	0.0210	0.0260
27	-0.3215	-0.2088	-0.0641	0.0441	0.0611	0.0235	-0.0225	-0.0426	-0.0230	0.0110	0.0285	0.0210	-0.0065	-0.0275	-0.0250
28	-0.2790	-0.2214	-0.1227	-0.0190	0.0426	0.0596	0.0396	0.0020	-0.0290	-0.0386	-0.0285	-0.0015	0.0205	0.0295	0.0195
29	-0.2269	-0.2038	-0.1502	-0.0771	-0.0190	0.0230	0.0451	0.0451	0.0316	0.0115	-0.0100	-0.0240	-0.0306	-0.0275	-0.0170
30	-0.1638	-0.1573	-0.1362	-0.1002	-0.0701	-0.0421	-0.0180	0.0005	0.0140	0.0240	0.0285	0.0311	0.0275	0.0205	0.0105
31	-0.0901	-0.0871	-0.0811	-0.0691	-0.0621	-0.0561	-0.0496	-0.0456	-0.0411	-0.0356	-0.0306	-0.0245	-0.0185	-0.0125	-0.0070

A-6. 저항체가 4번 전극 가까이에 있을 때(3cm), 주입전류 $\cos k \theta$, (단위: V)

주입전류	$\cos \theta$	$\cos 2\theta$	$\cos 3\theta$	$\cos 4\theta$	$\cos 5\theta$	$\cos 6\theta$	$\cos 7\theta$	$\cos 8\theta$	$\cos 9\theta$	$\cos 10\theta$	$\cos 11\theta$	$\cos 12\theta$	$\cos 13\theta$	$\cos 14\theta$	$\cos 15\theta$	$\cos 16\theta$
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1	0.0496	0.0085	-0.0210	-0.0346	-0.0461	-0.0456	-0.0446	-0.0461	-0.0466	-0.0506	-0.0546	-0.0571	-0.0591	-0.0596	-0.0596	-0.0596
2	0.0997	-0.0130	-0.0886	-0.1172	-0.1387	-0.1247	-0.1042	-0.0896	-0.0701	-0.0586	-0.0481	-0.0346	-0.0235	-0.0110	-0.0015	-0.0596
3	0.1302	-0.0876	-0.2093	-0.2429	-0.2234	-0.1497	-0.0771	-0.0306	0.0095	0.0130	0.0005	-0.0180	-0.0356	-0.0476	-0.0541	-0.0566
4	0.0781	-0.2765	-0.3971	-0.3546	-0.2154	-0.0451	0.0566	0.0751	0.0356	-0.0411	-0.1007	-0.1197	-0.0881	-0.0306	0.0225	0.0431
5	-0.2123	-0.5804	-0.5048	-0.2479	0.0020	0.1167	0.0671	-0.1287	-0.1242	-0.0531	0.0020	-0.0245	-0.0366	-0.0050	-0.0656	-0.0862
6	-0.4167	-0.6456	-0.4282	-0.1027	0.0826	0.0696	-0.0446	-0.1087	-0.0922	-0.0300	0.0020	-0.0230	0.0366	-0.0050	-0.0656	-0.0862
7	-0.5524	-0.6531	-0.3200	-0.0145	0.0621	-0.0235	-0.0886	-0.0541	-0.0240	-0.0361	-0.0610	-0.0506	-0.0045	-0.0010	-0.0416	-0.0711
8	-0.6456	-0.6280	-0.2083	0.0160	-0.0135	-0.0741	-0.0416	-0.0065	-0.0571	-0.0846	-0.0326	-0.0256	-0.0045	-0.0010	-0.0416	-0.0711
9	-0.7352	-0.5820	-0.1272	-0.0796	-0.0411	0.0210	-0.0947	-0.0481	-0.0947	-0.0331	-0.0055	-0.0516	-0.0411	-0.0020	-0.0285	-0.0681
10	-0.8068	-0.5158	-0.0731	-0.1407	-0.0411	0.0210	-0.0841	-0.0466	-0.0225	-0.0776	-0.0275	-0.0085	-0.0541	-0.0190	-0.0175	-0.0656
11	-0.8674	-0.4342	-0.0591	-0.1663	0.0190	-0.0351	-0.0786	-0.0045	-0.0806	-0.0431	-0.0115	-0.0601	-0.0050	-0.0295	-0.0526	-0.0100
12	-0.9185	-0.3386	-0.0876	-0.1447	-0.1432	0.0361	-0.0876	-0.0461	-0.0751	-0.0110	-0.0661	-0.0085	-0.0316	-0.0411	-0.0095	-0.0651
13	-0.9586	-0.2669	-0.1447	-0.1432	-0.0831	-0.0080	-0.0761	-0.0881	-0.0175	-0.0681	-0.0215	-0.0306	-0.0376	-0.0110	-0.0091	-0.0095
14	-0.9856	-0.2013	-0.2118	-0.0831	-0.0220	-0.0716	-0.0155	-0.0541	-0.0446	-0.0571	-0.0170	-0.0516	-0.0030	-0.0551	-0.0080	-0.0626
15	-1.0006	-0.1588	-0.2614	-0.0220	-0.0520	-0.0190	-0.0947	-0.0035	-0.0906	-0.0085	-0.0666	0.0000	-0.0566	-0.0015	-0.0616	-0.0075
16	-1.0016	-0.1352	-0.2805	0.0040	-0.1052	0.0190	-0.0947	-0.0035	-0.0906	-0.0085	-0.0666	0.0000	-0.0566	-0.0015	-0.0616	-0.0075
17	-0.9866	-0.1432	-0.2584	-0.0215	-0.0756	-0.0160	-0.0561	-0.0456	-0.0446	-0.0561	-0.0185	-0.0526	-0.0030	-0.0561	-0.0060	-0.0636
18	-0.9596	-0.1773	-0.2043	-0.0861	-0.1015	-0.0811	0.0000	-0.0901	-0.1050	-0.0681	-0.0220	-0.0306	-0.0396	-0.0085	-0.0606	-0.0060
19	-0.9220	-0.2309	-0.1322	-0.1512	0.0341	-0.0977	-0.1070	-0.0461	-0.0751	-0.0065	-0.0706	-0.0055	-0.0341	-0.0421	-0.0070	-0.0676
20	-0.8679	-0.2975	-0.0681	-0.1773	0.0120	-0.0416	-0.0836	0.0000	-0.0796	-0.0421	-0.0085	-0.0651	-0.0045	-0.0300	-0.0561	-0.0040
21	-0.8033	-0.3651	-0.0331	-0.1512	-0.0541	0.0145	-0.0906	-0.0456	-0.1050	-0.0776	-0.0295	-0.0070	-0.0601	-0.0180	-0.0160	-0.0661
22	-0.7312	-0.4207	-0.0401	-0.0866	-0.1082	0.0010	-0.0265	-0.0932	-0.0336	-0.1040	-0.0881	-0.0311	0.0030	-0.0531	-0.0456	-0.0661
23	-0.6531	-0.4532	-0.0881	-0.0235	-0.0987	-0.0651	0.0015	-0.0461	-0.0200	-0.0496	-0.0776	-0.0336	0.0010	-0.0265	-0.0601	-0.0631
24	-0.5759	-0.4643	-0.1593	0.0035	-0.0386	-0.1022	-0.0456	-0.0601	-0.0496	-0.0776	-0.0336	0.0010	-0.0265	-0.0601	-0.0631	-0.0631
25	-0.4833	-0.4452	-0.2194	-0.0225	0.0160	-0.0666	-0.0967	-0.0466	-0.0200	-0.0496	-0.0776	-0.0336	0.0010	-0.0265	-0.0601	-0.0631
26	-0.3992	-0.3997	-0.2574	-0.0861	0.0185	-0.0045	-0.0671	-0.0891	-0.0626	-0.0100	-0.0270	-0.0626	-0.0541	-0.0110	-0.0225	-0.0386
27	-0.3170	-0.3335	-0.2609	-0.1492	-0.0356	0.0070	-0.0065	-0.0461	-0.0801	-0.0746	-0.0416	-0.0586	-0.0511	-0.0220	-0.0060	-0.0661
28	-0.2389	-0.2594	-0.2244	-0.1763	-0.1032	-0.0471	-0.0135	-0.0015	-0.1800	-0.0406	-0.0586	-0.0646	-0.0511	-0.0311	-0.0125	-0.0045
29	-0.1718	-0.1718	-0.1593	-0.1512	-0.1252	-0.1042	-0.0766	-0.0456	-0.0235	-0.0070	-0.0020	-0.0095	-0.0245	-0.0426	-0.0566	-0.0621
30	-0.1092	-0.0952	-0.0846	-0.0881	-0.0871	-0.0942	-0.0967	-0.0906	-0.0821	-0.0661	-0.0486	-0.0321	-0.0190	-0.0100	-0.0045	-0.0035
31	-0.0536	-0.0386	-0.0260	-0.0250	-0.0250	-0.0331	-0.0411	-0.0461	-0.0511	-0.0536	-0.0551	-0.0566	-0.0581	-0.0596	-0.0611	-0.0621

A-7. 저항체가 20번 전극 가까이에 있을 때(3cm), 주입전류 sink θ , (단위: V)

주입전류 전극번호	sin θ	sin 2 θ	sin 3 θ	sin 4 θ	sin 5 θ	sin 6 θ	sin 7 θ	sin 8 θ	sin 9 θ	sin 10 θ	sin 11 θ	sin 12 θ	sin 13 θ	sin 14 θ	sin 15 θ
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1	0.0761	0.0671	0.0696	0.0641	0.0586	0.0536	0.0476	0.0436	0.0381	0.0331	0.0275	0.0220	0.160	0.0105	0.0040
2	0.1527	0.1272	0.1142	0.0917	0.0656	0.0401	0.0175	-0.0010	-0.0170	-0.0275	-0.0336	-0.0331	-0.0306	-0.0230	-0.0130
3	0.2239	0.1668	0.1192	0.0656	0.0130	-0.0245	-0.0441	-0.0461	-0.0356	-0.0195	0.0045	0.0220	0.0290	0.0265	0.0150
4	0.2875	0.1818	0.0836	0.0015	-0.0521	-0.0621	-0.0376	-0.0010	0.0270	0.0366	-0.0225	-0.0010	-0.0240	-0.0326	-0.0230
5	0.3396	0.1678	0.0180	-0.0611	-0.0711	-0.0250	0.0285	0.0426	0.0200	-0.0145	0.0316	-0.0235	0.0040	0.0250	0.0225
6	0.3806	0.1297	-0.0546	-0.0871	-0.0295	0.0391	0.0461	-0.0010	-0.0391	-0.0260	0.0110	0.0316	0.0100	-0.0235	-0.0290
7	0.4067	0.0711	-0.1107	-0.0601	0.0371	0.0516	-0.0100	-0.0456	-0.0095	0.0336	0.0165	-0.0235	0.0095	0.0095	0.0270
8	0.4192	0.0035	-0.1337	0.0040	0.0681	-0.0030	-0.0501	-0.0005	0.0381	0.0000	-0.0361	-0.0005	0.0295	-0.0020	-0.0311
9	0.4167	-0.0681	-0.1162	0.0691	0.0366	-0.0576	-0.0095	0.0426	-0.0090	-0.0331	0.0160	0.0220	-0.0260	-0.0130	0.0265
10	0.3992	-0.1257	-0.0641	0.0957	-0.0290	-0.0451	0.0456	-0.0010	-0.0371	0.0250	0.0100	-0.0311	0.0105	0.0175	-0.0265
11	0.3686	-0.1638	0.0010	0.0711	-0.0706	0.0160	0.0290	-0.0436	0.0190	0.0145	-0.0346	0.0210	0.0050	-0.0285	0.0225
12	0.3255	-0.1743	0.0576	0.0090	-0.0516	0.0501	-0.0316	-0.0010	0.0245	-0.0331	0.0200	-0.0005	-0.0205	0.0255	-0.0195
13	0.2724	-0.1563	0.0851	-0.0481	0.0095	0.0155	-0.0366	0.0416	-0.0336	0.0145	0.0040	-0.0220	0.0285	-0.0290	0.0155
14	0.2068	-0.1092	0.0716	-0.0696	0.0591	-0.0481	0.0240	-0.0020	-0.0160	0.0255	-0.0321	0.0300	-0.0265	0.0170	-0.0105
15	0.1357	-0.0411	0.0205	-0.0411	0.0531	-0.0601	0.0536	-0.0396	0.0341	-0.0285	0.0220	-0.0205	0.0160	-0.0130	0.0055
16	0.0501	0.0411	-0.0541	0.0235	-0.0045	-0.0090	0.0085	-0.0025	-0.0020	0.0030	-0.0035	0.0005	0.0000	-0.0025	0.0005
17	-0.0346	0.1447	-0.1492	0.0997	-0.0621	0.0366	-0.0336	0.0376	-0.0401	0.0376	-0.0326	0.0225	-0.0155	0.0055	-0.0045
18	-0.1482	0.2589	-0.2329	0.1422	-0.0656	0.0125	0.0050	-0.0085	0.0120	-0.0185	0.0240	-0.0306	0.0295	-0.0270	0.0125
19	-0.3020	0.3831	-0.2875	0.1227	-0.0656	0.0070	-0.0806	0.0876	-0.0661	0.0280	0.0010	-0.0210	0.0295	-0.0311	0.0145
20	-0.5098	0.4908	-0.2619	0.0055	0.1422	-0.1663	0.0886	0.0005	-0.0726	0.0831	-0.0481	-0.0030	0.0441	-0.0616	0.0386
21	-0.7167	0.4537	-0.0501	-0.1933	0.2103	-0.0696	-0.0836	0.1122	-0.0621	-0.0356	0.0796	-0.0576	-0.0160	0.0696	-0.0641
22	-0.7277	0.2860	0.1172	-0.2108	0.0917	0.0591	-0.0235	0.0130	0.0466	-0.0506	-0.0040	0.0366	-0.0240	-0.0185	0.0260
23	-0.6686	0.1387	0.1813	-0.1342	-0.0145	0.0691	-0.0235	-0.0426	0.0120	0.0235	-0.0150	-0.0230	0.0195	0.0135	-0.0336
24	-0.5035	0.0230	0.1913	-0.0341	-0.0601	0.0075	0.0280	-0.0010	-0.0381	-0.0040	0.0361	-0.0015	-0.0346	0.0010	0.0245
25	-0.5424	-0.0676	0.1578	0.0391	-0.0341	-0.0496	-0.0065	0.0436	0.0085	-0.0381	-0.0175	0.0215	-0.0215	-0.0110	-0.0331
26	-0.4793	-0.1347	0.0922	0.0711	0.0285	-0.0381	-0.0586	-0.0005	0.0356	0.0215	-0.0120	0.0215	-0.0145	0.0205	0.0225
27	-0.4112	-0.1803	0.0120	0.0501	0.0701	0.0240	-0.0381	-0.0446	-0.0225	0.0110	0.0341	0.0215	-0.0090	-0.0280	-0.0280
28	-0.3391	-0.1963	-0.0591	-0.0080	0.0496	0.0596	0.0275	0.0000	-0.0285	-0.0391	-0.0235	-0.0010	0.0190	0.0290	0.0175
29	-0.2634	-0.1823	-0.0987	-0.0696	-0.0135	0.0225	0.0351	0.0431	0.0316	0.0115	-0.0070	-0.0235	-0.0321	-0.0275	-0.0185
30	-0.1808	-0.1417	-0.0982	-0.0947	-0.0661	-0.0476	-0.0250	-0.0010	0.0140	0.0235	0.0311	0.0316	0.0270	0.0205	0.0090
31	-0.0942	-0.0786	-0.0601	-0.0671	-0.0606	-0.0561	-0.0536	-0.0456	-0.0411	-0.0356	-0.0295	-0.0240	-0.0190	-0.0125	-0.0075

A-8. 저항체가 20번 전극 가까이에 있을 때(3cm), 주입전류 $\cos k\theta$, (단위: V)

주입전류 전극번호	$\cos \theta$	$\cos 2\theta$	$\cos 3\theta$	$\cos 4\theta$	$\cos 5\theta$	$\cos 6\theta$	$\cos 7\theta$	$\cos 8\theta$	$\cos 9\theta$	$\cos 10\theta$	$\cos 11\theta$	$\cos 12\theta$	$\cos 13\theta$	$\cos 14\theta$	$\cos 15\theta$	$\cos 16\theta$
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1	-0.0160	-0.0090	-0.0220	-0.0285	-0.0316	-0.0386	-0.0421	-0.0461	-0.0496	-0.0521	-0.0546	-0.0566	-0.0581	-0.0596	-0.0601	-0.0606
2	-0.0431	-0.0436	-0.0781	-0.0942	-0.0982	-0.1042	-0.0997	-0.0911	-0.0796	-0.0646	-0.0486	-0.0336	-0.0205	-0.0095	-0.0030	-0.0005
3	-0.0856	-0.0992	-0.1492	-0.1573	-0.1402	-0.1172	-0.0811	-0.0461	-0.0200	-0.0035	-0.0015	-0.0105	-0.0260	-0.0426	-0.0561	-0.0601
4	-0.1397	-0.1653	-0.2128	-0.1843	-0.1197	-0.0621	-0.0160	-0.0005	-0.0135	-0.0381	-0.0596	-0.0666	-0.0541	-0.0311	-0.0095	-0.0005
5	-0.2058	-0.2334	-0.2454	-0.1578	-0.0546	-0.0085	-0.0105	-0.0461	-0.0756	-0.0716	-0.0421	-0.0110	-0.0020	-0.0200	-0.0471	-0.0596
6	-0.2715	-0.2895	-0.2394	-0.0957	-0.0015	-0.0220	-0.0716	-0.0906	-0.0581	-0.0115	-0.0035	-0.0341	-0.0606	-0.0526	-0.0195	-0.0010
7	-0.3546	-0.3245	-0.1928	-0.0321	-0.0085	-0.0866	-0.1017	-0.0456	-0.0035	-0.0235	-0.0631	-0.0566	-0.0140	-0.0361	-0.0596	
8	-0.4302	-0.3340	-0.1202	-0.0060	-0.0701	-0.1232	-0.0506	-0.0010	-0.0416	-0.0741	-0.0941	-0.0015	-0.0306	-0.0611	-0.0300	-0.0015
9	-0.5234	-0.3150	-0.0591	-0.0331	-0.1237	-0.0871	-0.0035	-0.0451	-0.0816	-0.0240	-0.0665	-0.0561	-0.0481	-0.0045	-0.0250	-0.0591
10	-0.6085	-0.2058	-0.0150	-0.1588	-0.0736	-0.0130	-0.0937	-0.0456	-0.0135	-0.0696	-0.0280	-0.0125	-0.0601	-0.0205	-0.0155	-0.0576
11	-0.7622	-0.1342	-0.0506	-0.1848	-0.0095	-0.0656	-0.0871	-0.0025	-0.0726	-0.0371	-0.0110	-0.0646	-0.0105	-0.0311	-0.0506	-0.0025
12	-0.8299	-0.0496	-0.1127	-0.1613	0.0130	-0.1202	-0.0270	-0.0446	-0.0686	-0.0045	-0.0656	-0.0130	-0.0366	-0.0421	-0.0080	-0.0576
13	-0.8895	0.0240	-0.1843	-0.0992	-0.0255	-0.1092	-0.0100	-0.0866	-0.0125	-0.0611	-0.0205	-0.0346	-0.0416	-0.0115	-0.0571	-0.0015
14	-0.9380	0.0756	-0.2374	-0.0416	-0.0836	-0.0511	-0.0631	-0.0451	-0.0411	-0.0496	-0.0150	-0.0561	-0.0070	-0.0561	-0.0060	-0.0551
15	-0.9856	0.1062	-0.2589	-0.0195	-0.1082	-0.0185	-0.1032	-0.0015	-0.0886	0.0000	-0.0646	-0.0050	-0.0596	-0.0020	-0.0611	0.0000
16	-1.0252	0.1082	-0.2354	-0.0516	-0.0676	-0.0576	-0.0651	-0.0431	-0.0451	-0.0476	-0.0140	-0.0586	-0.0055	-0.0571	-0.0060	-0.0551
17	-1.0252	0.0811	-0.1678	-0.1292	0.0160	-0.1282	-0.0115	-0.0841	-0.0205	-0.0581	-0.0185	-0.0366	-0.0421	-0.0095	-0.0611	0.0025
18	-1.0252	0.0105	-0.0556	-0.2439	0.0886	-0.1482	-0.0386	-0.0295	-0.0911	0.0075	-0.0651	-0.0175	-0.0331	-0.0446	-0.0085	-0.0571
19	-1.0252	-0.1432	0.0987	-0.3345	0.0766	-0.0601	-0.1507	0.0556	-0.1047	-0.0411	0.0195	-0.0967	0.0040	-0.0295	-0.0681	0.0190
20	-0.8599	-0.4077	0.2339	-0.2749	-0.1112	0.1057	-0.1798	-0.0476	0.0531	-0.1297	-0.0165	0.0225	-0.1097	-0.0050	0.0075	-0.0977
21	-0.6190	-0.5299	0.1598	-0.1047	-0.2118	0.0541	-0.0401	-0.1257	0.0055	-0.1020	-0.0841	-0.0265	-0.0020	-0.0601	-0.0411	0.0005
22	-0.4613	-0.5399	0.0371	-0.0105	-0.1798	-0.0491	0.0010	-0.0586	-0.0881	-0.0235	-0.0120	-0.0541	-0.0506	-0.0055	-0.0235	-0.0621
23	-0.3586	-0.5098	-0.0771	0.0180	-0.0992	-0.1007	-0.0476	-0.0080	-0.0351	-0.0746	-0.0361	-0.0005	-0.0331	-0.0616	-0.0285	-0.0040
24	-0.2659	-0.4608	-0.1623	-0.0130	-0.0316	-0.0711	-0.0992	-0.0491	0.0025	-0.0240	-0.0651	-0.0331	-0.0160	-0.0040	-0.0351	-0.0621
25	-0.1943	-0.3916	-0.2164	-0.0831	-0.0210	-0.0125	-0.0701	-0.0911	-0.0526	-0.0130	-0.0660	-0.0331	-0.0606	-0.0521	-0.0190	-0.0045
26	-0.1322	-0.3060	-0.2299	-0.1472	-0.0686	-0.0020	-0.0095	-0.0466	-0.0721	-0.0721	-0.0426	-0.0110	-0.0025	-0.0195	-0.0466	-0.0616
27	-0.0806	-0.2083	-0.2008	-0.1758	-0.1302	-0.0586	-0.0165	-0.0025	-0.0110	-0.0376	-0.0596	-0.0656	-0.0541	-0.0316	-0.0100	-0.0030
28	-0.0416	-0.1362	-0.1422	-0.1522	-0.1472	-0.1127	-0.0796	-0.0461	-0.0175	-0.0045	-0.0030	-0.0110	-0.0270	-0.0431	-0.0551	-0.0606
29	-0.0150	-0.0686	-0.0741	-0.0917	-0.1037	-0.1017	-0.0987	-0.0911	-0.0781	-0.0646	-0.0491	-0.0341	-0.0210	-0.0100	-0.0035	-0.0015
30	-0.0010	-0.0220	-0.0210	-0.0270	-0.0346	-0.0371	-0.0421	-0.0461	-0.0491	-0.0521	-0.0556	-0.0566	-0.0591	-0.0601	-0.0606	-0.0611

A-9. 저항체가 28번 전극 가까이 있을 때(3cm), 주입전류 sink θ , (단위: V)

주입전류 저크번호	sin θ	sin 2 θ	sin 3 θ	sin 4 θ	sin 5 θ	sin 6 θ	sin 7 θ	sin 8 θ	sin 9 θ	sin 10 θ	sin 11 θ	sin 12 θ	sin 13 θ	sin 14 θ	sin 15 θ
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1	0.0846	0.0826	0.0756	0.0651	0.0586	0.0531	0.0471	0.0436	0.0386	0.0336	0.0280	0.0220	0.0160	0.0105	0.0045
2	0.1583	0.1522	0.1292	0.0957	0.0661	0.0391	0.0145	-0.0020	-0.0165	-0.0270	-0.0326	-0.0331	-0.0311	-0.0230	-0.0135
3	0.2219	0.1988	0.1422	0.0726	0.0140	-0.0285	-0.0491	-0.0476	-0.0346	-0.0145	0.0065	0.0230	0.0285	0.0260	0.0140
4	0.2765	0.2179	0.1137	0.0125	-0.0506	-0.0651	-0.0436	-0.0025	0.0280	0.0376	0.0250	0.0000	-0.0255	-0.0331	-0.0240
5	0.3180	0.2053	0.0951	-0.0511	-0.0691	-0.0280	0.0190	0.0416	0.0210	-0.0130	-0.0321	-0.0230	0.0030	0.0250	0.0210
6	0.3496	0.1678	-0.0115	-0.0766	-0.0270	0.0356	0.0376	-0.0030	-0.0381	-0.0245	0.0140	0.0321	0.0090	-0.0240	-0.0306
7	0.3656	0.1087	-0.0621	-0.0486	0.0396	0.0476	-0.0195	-0.0471	-0.0090	0.0356	0.0200	-0.0225	-0.0285	0.0085	0.0260
8	0.3676	0.0356	-0.0791	0.0175	0.0721	-0.0080	-0.0606	-0.0025	0.0396	0.0025	-0.0326	0.0000	0.0275	-0.0030	-0.0326
9	0.3551	-0.0306	-0.0556	0.0801	0.0406	-0.0616	-0.0210	0.0411	-0.0075	-0.0311	0.0200	0.0225	-0.0280	-0.0140	0.0245
10	0.3275	-0.0871	0.0010	0.1057	-0.0250	-0.0491	0.0326	-0.0025	-0.0351	0.0270	0.0140	-0.0300	0.0080	0.0165	-0.0285
11	0.2875	-0.1247	0.0716	0.0811	-0.0656	0.0125	0.0145	-0.0456	0.0210	0.0160	-0.0300	0.0210	0.0025	-0.0300	0.0195
12	0.2344	-0.1367	0.1347	0.0200	-0.0466	0.0471	-0.0466	-0.0030	0.0265	-0.0321	0.0250	0.0000	-0.0230	0.0245	-0.0230
13	0.1728	-0.1222	0.1698	-0.0411	0.0150	0.0125	-0.0536	0.0396	-0.0316	0.0160	0.0095	-0.0220	0.0260	-0.0300	0.0120
14	0.1002	-0.0816	0.1643	-0.0656	0.0656	-0.0501	0.0055	-0.0035	-0.0130	0.0270	-0.0265	0.0306	-0.0295	0.0165	-0.0140
15	0.0260	-0.0240	0.1227	-0.0391	0.0591	-0.0616	0.0336	-0.0446	0.0371	-0.0275	0.0290	-0.0200	0.0120	-0.0135	0.0015
16	-0.0511	0.0431	0.0536	0.0230	0.0025	-0.0100	-0.0125	-0.0030	0.0000	0.0040	0.0030	0.0010	-0.0030	-0.0035	-0.0030
17	-0.1407	0.1172	-0.0020	0.0856	-0.0536	0.0411	-0.0626	0.0396	-0.0371	0.0366	-0.0235	0.0220	-0.0200	0.0070	-0.0095
18	-0.2289	0.1808	-0.0401	0.1147	-0.0606	0.0280	-0.0356	-0.0035	0.0160	-0.0220	0.0351	-0.0316	0.0245	-0.0250	0.0065
19	-0.3135	0.2254	-0.0441	0.0927	-0.0100	-0.0371	0.0260	-0.0501	0.0361	-0.0105	-0.0030	0.0245	-0.0371	0.0255	-0.0225
20	-0.3916	0.2389	-0.0020	0.0285	0.0566	-0.0751	0.0165	-0.0030	-0.0285	0.0431	-0.0200	0.0000	0.0185	-0.0366	0.0165
21	-0.4658	0.2234	0.0696	-0.0306	0.0776	-0.0391	-0.0516	0.0431	-0.0220	-0.0090	0.0411	-0.0245	-0.0110	0.0240	-0.0316
22	-0.5359	0.1788	0.1522	-0.0521	0.0356	0.0260	-0.0746	-0.0030	0.0411	-0.0220	-0.0075	0.0356	-0.0185	-0.0290	0.0235
23	-0.5985	0.1062	0.2179	-0.0140	-0.0290	0.0336	-0.0200	-0.0466	0.0100	0.0401	-0.0105	-0.0215	0.0185	0.0045	-0.0351
24	-0.6681	0.0150	0.2554	0.0596	-0.0561	-0.0215	0.0135	-0.0040	-0.0351	0.0085	0.0421	0.0005	-0.0376	-0.0065	0.0210
25	-0.7412	-0.1032	0.2489	0.1653	-0.0100	-0.0876	-0.0401	0.0391	0.0155	-0.0190	-0.0075	0.0230	0.0165	-0.0210	-0.0386
26	-0.8038	-0.2484	0.1848	0.2414	0.0952	-0.0746	-0.1202	-0.0185	0.0451	0.0531	0.0080	-0.0316	-0.0265	0.0070	0.0150
27	-0.8018	-0.4267	0.0150	0.2349	0.2209	0.0536	-0.1062	-0.1247	-0.0616	0.0446	0.0972	0.0611	-0.0225	-0.0791	-0.0721
28	-0.5504	-0.4623	-0.2239	0.0110	0.1432	0.1598	-0.0856	-0.0020	-0.0716	-0.0861	-0.0521	0.0010	0.0441	0.0596	0.0386
29	-0.3471	-0.3481	-0.2384	-0.1007	0.0115	0.0721	0.0786	0.0581	0.0240	-0.0050	-0.0225	-0.0285	-0.0275	-0.0205	-0.0125
30	-0.1963	-0.2234	-0.1843	-0.1217	-0.0636	-0.0225	-0.0030	0.0050	0.0120	0.0175	0.0245	0.0295	0.0240	0.0240	0.0120
31	-0.0876	-0.1097	-0.1012	-0.0816	-0.0616	-0.0481	-0.0446	-0.0431	-0.0416	-0.0381	-0.0326	-0.0245	-0.0175	-0.0110	-0.0060

A-10. 저항체가 28번 전극 가까이 있을 때(3cm), 주입전류 $\cos k \theta$,
(단위: V)

주입전류 저크번호	$\cos \theta$	$\cos 2\theta$	$\cos 3\theta$	$\cos 4\theta$	$\cos 5\theta$	$\cos 6\theta$	$\cos 7\theta$	$\cos 8\theta$	$\cos 9\theta$	$\cos 10\theta$	$\cos 11\theta$	$\cos 12\theta$	$\cos 13\theta$	$\cos 14\theta$	$\cos 15\theta$	$\cos 16\theta$
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1	-0.0476	-0.0311	-0.0220	-0.0230	-0.0250	-0.0341	-0.0421	-0.0466	-0.0511	-0.0531	-0.0541	-0.0556	-0.0576	-0.0596	-0.0606	-0.0611
2	-0.1007	-0.0861	-0.0786	-0.0851	-0.0876	-0.0967	-0.0992	-0.0917	-0.0821	-0.0656	-0.0481	-0.0316	-0.0185	-0.0095	-0.0040	-0.0025
3	-0.1613	-0.1603	-0.1517	-0.1471	-0.1262	-0.1072	-0.0796	-0.0476	-0.0240	-0.0060	0.0000	0.0085	0.0240	0.0421	0.0576	0.0621
4	-0.2304	-0.2489	-0.2179	-0.1738	-0.1027	-0.0491	-0.0150	-0.0015	-0.0175	-0.0401	-0.0586	-0.0651	-0.0521	-0.0306	-0.0105	-0.0030
5	-0.3075	-0.3205	-0.2524	-0.1457	-0.0356	0.0050	-0.0095	0.0466	-0.0801	-0.0741	-0.0401	-0.0015	-0.0341	-0.0190	-0.0486	-0.0621
6	-0.3881	-0.3861	-0.2494	-0.0826	0.0200	-0.0065	-0.0711	-0.0922	-0.0636	-0.0145	-0.0401	-0.0015	0.0010	-0.0190	-0.0486	-0.0621
7	-0.4743	-0.4302	-0.2083	-0.180	0.0165	-0.0701	-0.1007	-0.0471	-0.0095	-0.0265	-0.0611	-0.0316	-0.0571	-0.0210	-0.0400	-0.0400
8	-0.5679	-0.4492	-0.0761	-0.0175	-0.0816	-0.1037	-0.0060	-0.0030	-0.0496	-0.0771	-0.0316	0.0010	-0.0105	-0.0306	-0.0386	-0.0636
9	-0.6436	-0.4387	-0.0311	-0.0816	-0.1037	-0.0060	-0.0030	-0.0496	-0.0881	-0.0275	-0.0045	-0.0316	-0.0446	-0.0606	-0.0321	-0.0050
10	-0.7192	-0.4032	-0.0245	-0.1417	-0.0541	-0.0886	-0.0225	-0.0471	-0.0886	-0.0351	-0.0165	-0.0260	-0.0265	-0.0606	-0.0270	-0.0631
11	-0.7893	-0.3476	-0.0581	-0.1668	0.0085	-0.0451	-0.0962	-0.0891	-0.0160	-0.0406	-0.0095	-0.0085	-0.0331	-0.0421	-0.0095	-0.0636
12	-0.8519	-0.2815	-0.0581	-0.1412	0.0290	-0.0962	-0.0250	-0.0471	-0.0726	-0.0085	-0.0641	-0.0085	-0.0331	-0.0421	-0.0095	-0.0636
13	-0.9055	-0.2174	-0.1192	-0.1412	0.0290	-0.0962	-0.0250	-0.0471	-0.0726	-0.0085	-0.0641	-0.0085	-0.0331	-0.0421	-0.0095	-0.0636
14	-0.9470	-0.1628	-0.1898	-0.0791	-0.0125	-0.0826	-0.0075	-0.0891	-0.0160	-0.0661	-0.0200	-0.0306	-0.0386	-0.0110	-0.0586	-0.0080
15	-0.9731	-0.1292	-0.2424	-0.0170	-0.0741	-0.0220	-0.0606	-0.0481	-0.0436	-0.0551	-0.0140	-0.0516	-0.0336	-0.0110	-0.0586	-0.0080
16	-0.9891	-0.1192	-0.2649	0.0105	-0.1047	0.0150	-0.1002	-0.0445	-0.0901	-0.0065	-0.0646	0.0005	-0.0566	-0.0015	-0.0621	-0.0075
17	-0.9896	-0.1392	-0.2469	-0.0145	-0.0731	-0.0190	-0.0616	-0.0471	-0.0451	-0.0546	-0.0140	-0.0516	-0.0330	-0.0090	-0.0621	-0.0075
18	-0.9756	-0.1853	-0.1953	-0.0781	-0.0055	-0.0821	-0.0050	-0.0917	-0.0160	-0.0676	-0.0195	-0.0300	-0.0391	-0.0090	-0.0621	-0.0075
19	-0.9515	-0.3240	-0.0676	-0.1638	0.0230	-0.0401	-0.0967	-0.0481	-0.0771	-0.0060	-0.0676	-0.0050	-0.0336	-0.0421	-0.0085	-0.0691
20	-0.9115	-0.4237	-0.0381	-0.1362	-0.0396	0.0200	-0.0957	-0.0486	-0.0831	-0.0421	-0.0660	-0.0641	-0.0030	-0.0300	-0.0571	-0.0660
21	-0.8584	-0.5088	-0.0516	-0.0711	-0.0896	0.0105	-0.0316	-0.0967	-0.0195	-0.0781	-0.0240	-0.0055	-0.0576	-0.0175	-0.0686	-0.0686
22	-0.7968	-0.5769	-0.1107	-0.0015	-0.0736	-0.0506	-0.0040	-0.0967	-0.0386	-0.0150	-0.0646	-0.0295	-0.0060	-0.0541	-0.0481	-0.0660
23	-0.7207	-0.6280	-0.1948	0.0290	-0.0070	-0.0791	-0.0516	-0.1000	-0.0306	-0.0306	-0.0300	-0.0511	-0.0411	-0.0300	-0.0306	-0.0681
24	-0.6280	-0.6586	-0.3110	0.0005	0.0736	-0.0270	-0.1012	-0.0596	-0.0260	-0.0316	-0.0551	-0.0501	-0.0045	-0.0020	-0.0436	-0.0721
25	-0.5269	-0.6586	-0.3110	0.0005	0.0736	-0.0270	-0.1012	-0.0596	-0.0260	-0.0316	-0.0551	-0.0501	-0.0045	-0.0020	-0.0436	-0.0721
26	-0.3791	-0.6501	-0.4252	-0.0906	0.0987	0.0706	-0.0571	-0.1192	-0.0982	-0.0316	-0.0491	-0.0215	-0.0461	-0.0516	-0.0300	-0.0715
27	-0.1563	-0.5474	-0.5083	-0.2544	0.0100	0.1272	0.0701	-0.0506	-0.1467	-0.1342	-0.0491	0.0260	0.0516	-0.0010	-0.0771	-0.1152
28	0.0731	-0.2549	-0.3701	-0.3325	-0.2028	-0.0486	0.0446	0.0591	0.0225	-0.0411	-0.0917	-0.1052	-0.0771	-0.0306	0.0110	0.0255
29	0.1082	-0.0962	-0.2083	-0.2349	-0.2078	-0.1357	-0.0881	-0.0295	0.0030	0.0050	-0.0060	-0.0210	-0.0351	-0.0456	-0.0516	-0.0541
30	0.0831	-0.0240	-0.0932	-0.1152	-0.1327	-0.1172	-0.0982	-0.0861	-0.0696	-0.0601	-0.0501	-0.0356	-0.0240	-0.0110	-0.0020	0.0010
31	0.0426	0.0025	-0.0245	-0.0356	-0.0451	-0.0441	-0.0426	-0.0451	-0.0466	-0.0511	-0.0556	-0.0581	-0.0601	-0.0601	-0.0596	-0.0596

A-11. 저항체가 24번과 8번 전극 가까이에 있을 때(2cm), 주입전류 sink θ ,
(단위 : V)

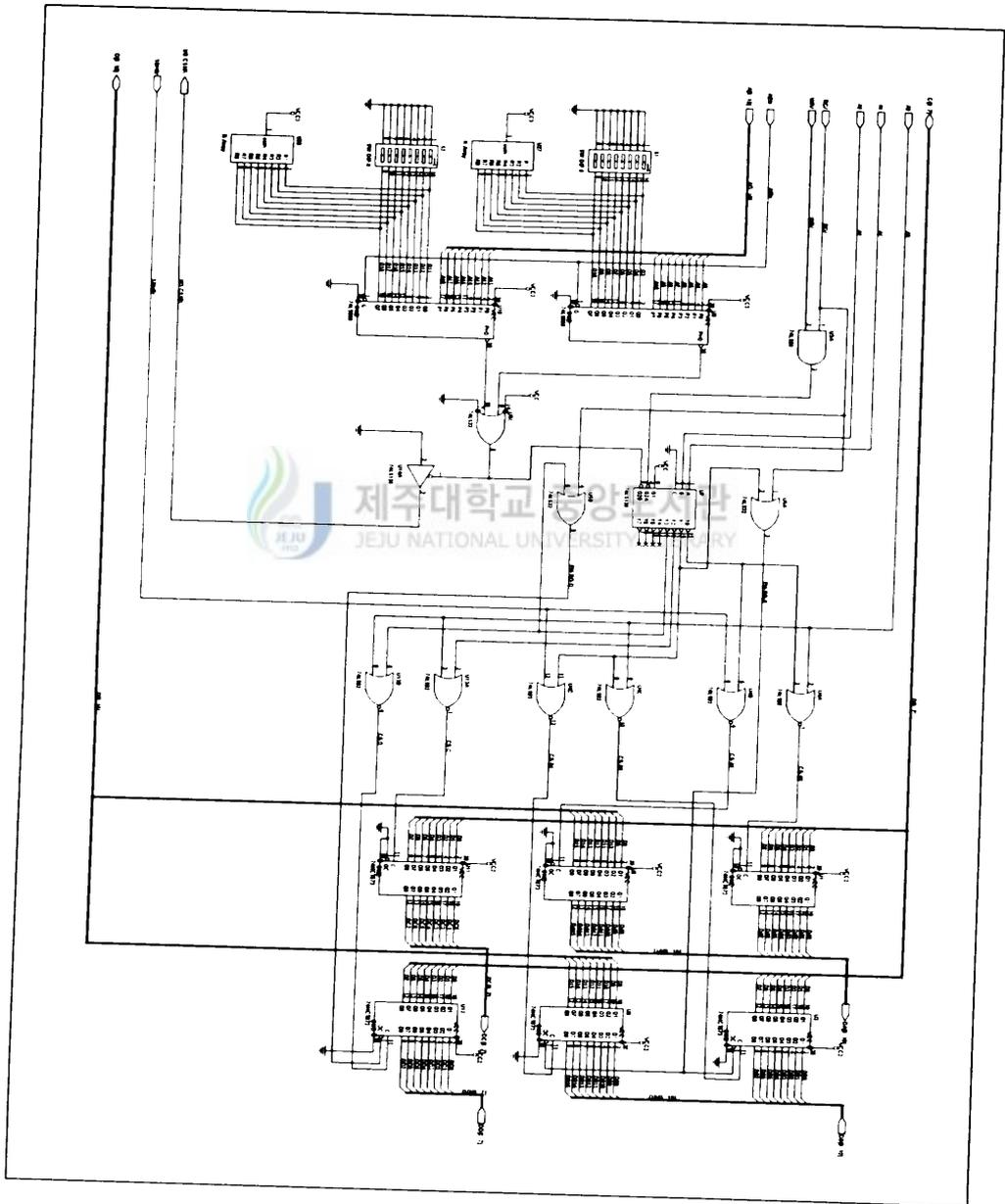
주입전류 전극번호	sin θ	sin 2 θ	sin 3 θ	sin 4 θ	sin 5 θ	sin 6 θ	sin 7 θ	sin 8 θ	sin 9 θ	sin 10 θ	sin 11 θ	sin 12 θ	sin 13 θ	sin 14 θ	sin 15 θ
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1	0.0826	0.0781	0.0666	0.0626	0.0586	0.0546	0.0486	0.0441	0.0381	0.0326	0.0270	0.0215	0.0155	0.0100	0.0040
2	0.1628	0.1457	0.1102	0.0871	0.0646	0.0421	0.0185	-0.0005	-0.0165	-0.0285	-0.0326	-0.0326	-0.0300	-0.0220	-0.0130
3	0.2419	0.1948	0.1152	0.0591	0.0125	-0.0220	-0.0431	-0.0456	-0.0356	-0.0155	0.0055	0.0225	0.0290	0.0265	0.0145
4	0.3195	0.2179	0.0781	-0.0070	-0.0526	-0.0591	-0.0371	-0.0005	0.0215	0.0371	0.0240	-0.0005	-0.0240	-0.0326	-0.0235
5	0.3946	0.2093	0.0060	-0.0781	-0.0711	-0.0195	0.0280	0.0446	0.0200	-0.0155	-0.0361	-0.0240	0.0045	0.0275	0.0235
6	0.4613	0.1683	-0.0771	-0.1082	-0.0250	0.0486	0.0471	-0.0015	-0.0406	-0.0285	0.0120	0.0336	0.0105	-0.0235	-0.0306
7	0.5033	0.0932	-0.1442	-0.0781	0.0491	0.0606	-0.0135	-0.0476	-0.0095	0.0346	0.0175	-0.0240	-0.0275	0.0110	0.0280
8	0.5103	0.0005	-0.1693	-0.0050	0.0851	0.0025	-0.0576	-0.0015	0.0411	0.0000	-0.0381	-0.0005	0.0311	0.0000	-0.0331
9	0.4823	-0.0871	-0.1417	0.0656	0.0506	-0.0561	-0.0150	0.0446	-0.0090	-0.0361	0.0175	0.0230	-0.0280	-0.0120	0.0285
10	0.4352	-0.1533	-0.0781	0.0937	-0.0200	-0.0431	0.0431	0.0000	-0.0381	0.0250	0.0115	-0.0331	0.0105	0.0210	-0.0290
11	0.3776	-0.1933	-0.0005	0.0666	-0.0651	0.0215	0.0245	-0.0451	0.0215	0.0130	-0.0356	0.0220	0.0045	-0.0290	0.0235
12	0.3130	-0.2033	0.0671	0.0015	-0.0466	0.0586	-0.0386	-0.0005	0.0275	-0.0376	0.0225	-0.0005	-0.0235	0.0295	-0.0225
13	0.2409	-0.1843	0.1047	-0.0631	0.1070	0.0220	-0.0446	0.0441	-0.0346	0.0135	0.0050	-0.0235	0.0230	-0.0285	0.0155
14	0.1643	-0.1387	0.0997	-0.0891	0.0671	-0.0416	0.0165	-0.0005	-0.0165	0.0250	-0.0326	0.0311	-0.0290	0.0200	-0.0120
15	0.0841	-0.0736	0.0576	-0.0636	0.0596	-0.0526	0.0456	-0.0436	0.0366	-0.0326	0.0255	-0.0225	0.0155	-0.0120	0.0045
16	0.0030	0.0015	-0.0050	-0.0025	0.0015	0.0000	-0.0010	-0.0005	-0.0005	-0.0005	0.0000	-0.0005	0.0000	-0.0005	0.0000
17	-0.0791	0.0776	-0.0706	0.0581	-0.0566	0.0531	-0.0501	0.0421	-0.0391	0.0321	-0.0280	0.0210	-0.0170	0.0095	-0.0065
18	-0.1588	0.1432	-0.1127	0.0826	-0.0641	0.0416	-0.0210	-0.0005	0.0125	-0.0250	0.0290	-0.0316	0.0265	-0.0215	0.0100
19	-0.2379	0.1898	-0.1167	0.0546	-0.0135	-0.0210	0.0386	-0.0436	0.0295	-0.0135	-0.0085	0.0210	-0.0300	0.0245	-0.0170
20	-0.3105	0.2113	-0.0811	-0.0075	0.0476	-0.0561	0.0336	-0.0015	-0.0295	0.0351	-0.0255	0.0000	0.0195	-0.0300	0.0185
21	-0.3806	0.2033	-0.0125	-0.0751	0.0661	-0.0190	-0.0295	0.0431	-0.0240	-0.0150	0.0321	-0.0235	-0.0075	0.0275	-0.0265
22	-0.4447	0.1653	0.0681	-0.1037	0.0195	0.0461	-0.0466	-0.0015	0.0341	-0.0260	-0.0150	0.0316	-0.0140	-0.0215	0.0260
23	-0.4998	0.0947	0.1377	-0.0746	-0.0541	0.0576	0.0125	-0.0466	0.0030	0.0341	-0.0200	-0.0240	0.0235	0.0105	-0.0300
24	-0.5289	-0.0010	0.1708	-0.0010	-0.0932	-0.0010	0.0586	-0.0005	-0.0476	-0.0005	0.0356	-0.0005	-0.0351	-0.0005	0.0300
25	-0.5058	-0.0982	0.1412	0.0751	-0.0551	-0.0616	0.0125	0.0471	0.0035	-0.0376	-0.0215	0.0230	0.0245	-0.0125	-0.0321
26	-0.4512	-0.1693	0.0716	0.1032	0.0185	-0.0486	-0.0471	0.0005	0.0341	0.0240	-0.0155	-0.0331	-0.0135	0.0205	0.0250
27	-0.3851	-0.2073	-0.0095	0.0731	0.0646	0.0165	-0.0290	-0.0436	-0.0240	0.0120	0.0306	0.0215	-0.0075	-0.0285	-0.0260
28	-0.3140	-0.2149	-0.0781	0.0050	0.0466	0.0536	0.0331	-0.0005	-0.0295	-0.0376	-0.0260	-0.0010	0.0195	0.0280	0.0185
29	-0.2419	-0.1938	-0.1162	-0.0591	-0.0160	0.0185	0.0396	0.0436	0.0311	0.0125	-0.0085	-0.0240	0.0311	-0.0285	-0.0180
30	-0.1638	-0.1467	-0.1112	-0.0876	-0.0676	-0.0446	-0.0215	-0.0015	0.0130	0.0240	0.0290	0.0311	0.0265	0.0195	0.0090
31	-0.0846	-0.0806	-0.0681	-0.0631	-0.0601	-0.0561	-0.0506	-0.0446	-0.0396	-0.0346	-0.0290	-0.0230	-0.0180	-0.0120	-0.0070

A-12. 저항체가 24번과 8번 전극 가까이에 있을 때(2cm), 주입전류 $\cos k\theta$,
(단위 : V)

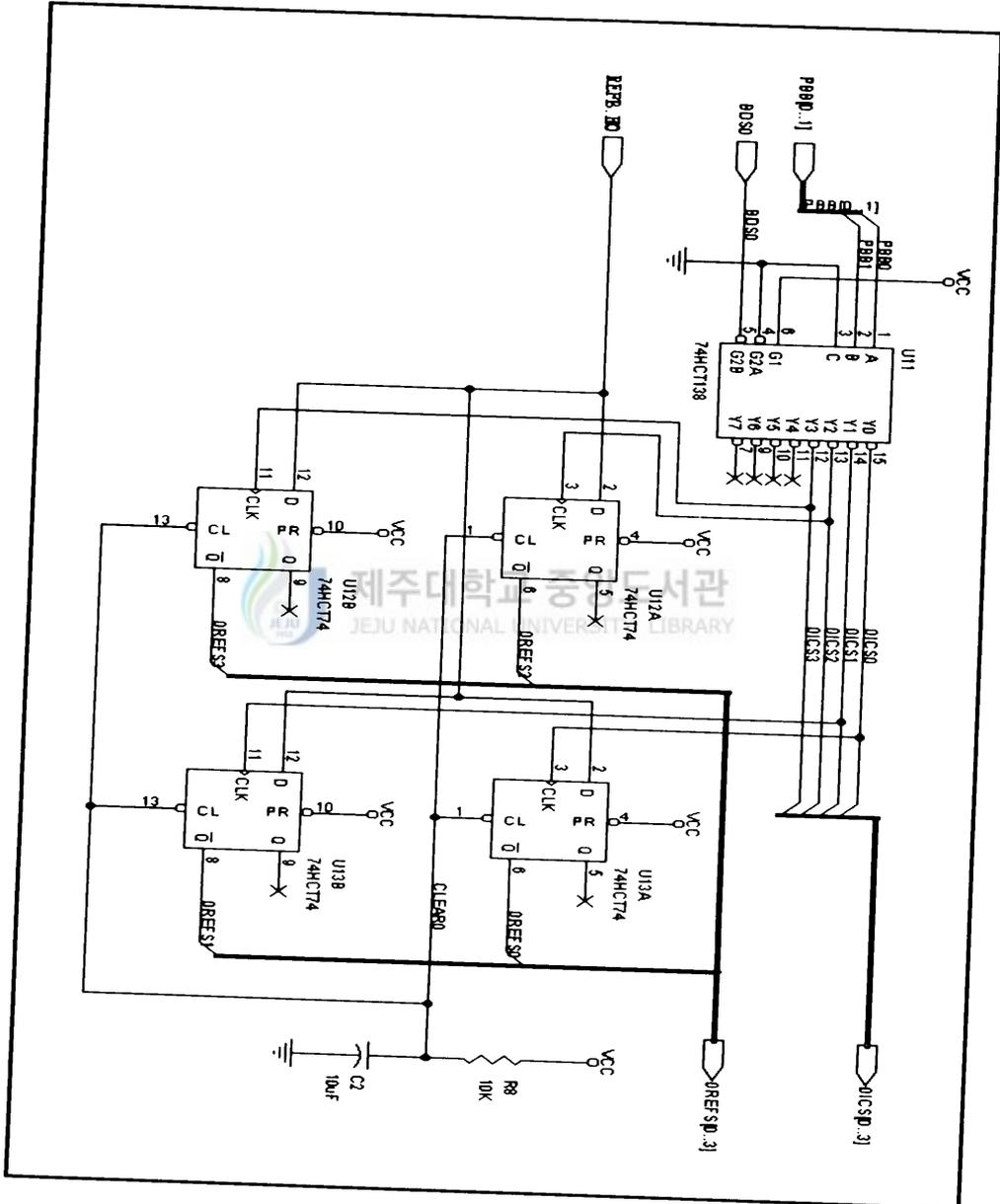
주입 전류	$\cos \theta$	$\cos 2\theta$	$\cos 3\theta$	$\cos 4\theta$	$\cos 5\theta$	$\cos 6\theta$	$\cos 7\theta$	$\cos 8\theta$	$\cos 9\theta$	$\cos 10\theta$	$\cos 11\theta$	$\cos 12\theta$	$\cos 13\theta$	$\cos 14\theta$	$\cos 15\theta$	$\cos 16\theta$
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1	-0.0050	-0.0145	-0.0210	-0.0285	-0.0321	-0.0366	-0.0411	-0.0451	-0.0486	-0.0511	-0.0536	-0.0561	-0.0571	-0.0581	-0.0586	-0.0596
2	-0.0230	-0.0566	-0.0766	-0.0886	-0.0982	-0.1002	-0.0972	-0.0891	-0.0776	-0.0631	-0.0481	-0.0331	-0.0200	-0.0100	-0.0030	-0.0010
3	-0.0556	-0.1227	-0.1492	-0.1543	-0.1402	-0.1132	-0.0768	-0.0446	-0.0180	-0.0030	-0.0010	-0.0095	-0.0250	-0.0421	-0.0551	-0.0596
4	-0.1027	-0.2028	-0.2519	-0.1813	-0.1202	-0.0586	-0.0140	0.0010	-0.0105	-0.0366	-0.0591	-0.0406	-0.0090	-0.0421	-0.0551	-0.0596
5	-0.1688	-0.2995	-0.2519	-0.1512	-0.0521	-0.0025	-0.0080	-0.0456	-0.0741	-0.0711	-0.0406	-0.0090	-0.0541	-0.0300	-0.0080	0.0005
6	-0.2564	-0.3696	-0.2449	-0.0811	0.0030	-0.0165	-0.0712	-0.0917	-0.0551	-0.0100	-0.0010	-0.0326	-0.0606	-0.0190	-0.0471	-0.0611
7	-0.3661	-0.4247	-0.1878	-0.0085	-0.0060	-0.0866	-0.1026	-0.0446	0.0010	-0.0225	-0.0631	-0.0561	-0.0130	-0.0200	-0.0356	-0.0606
8	-0.4848	-0.4427	-0.1037	0.0220	-0.0711	-0.1267	-0.1025	0.0030	-0.0381	-0.0761	-0.0336	0.0015	-0.0300	-0.0626	-0.0290	0.0005
9	-0.5970	-0.4177	-0.0220	-0.0085	-0.1372	-0.0871	0.0025	-0.0436	-0.0801	-0.0230	-0.0040	-0.0561	-0.0486	-0.0015	-0.0235	-0.0611
10	-0.6871	-0.3626	0.0295	-0.0786	-0.1452	-0.0205	-0.0285	-0.0886	-0.0245	-0.0110	-0.0661	-0.0326	-0.0015	-0.0185	-0.0506	-0.0010
11	-0.7617	-0.2900	0.0391	-0.1447	-0.0937	-0.0075	-0.0906	-0.0441	-0.0070	-0.0711	-0.0270	-0.0095	-0.0090	-0.0416	-0.0551	-0.0601
12	-0.8213	-0.2098	0.0065	-0.1728	-0.0295	-0.0601	-0.0846	0.0005	-0.0686	-0.0366	-0.0090	-0.0656	-0.0090	-0.0506	-0.0010	
13	-0.8689	-0.1317	-0.0571	-0.1472	-0.0105	-0.1152	-0.0200	-0.0446	-0.0631	-0.0030	-0.0676	-0.0095	-0.0376	-0.0416	-0.0055	-0.0601
14	-0.9040	-0.0691	-0.1267	-0.0841	-0.0536	-0.1017	-0.0015	-0.0881	-0.0040	-0.0621	-0.0215	-0.0321	-0.0436	-0.0090	-0.0571	-0.0015
15	-0.9245	-0.0270	-0.1798	-0.0230	-0.1192	-0.0381	-0.0576	-0.0441	-0.0331	-0.0501	-0.0160	-0.0541	-0.0070	-0.0561	-0.0030	-0.0581
16	-0.9325	-0.0125	-0.1988	0.0020	-0.1502	-0.0030	-0.0967	-0.0020	-0.0791	-0.0020	-0.0661	-0.0020	-0.0606	-0.0010	-0.0581	-0.0020
17	-0.9270	-0.0270	-0.1773	-0.0235	-0.1202	-0.0381	-0.0576	-0.0441	-0.0331	-0.0506	-0.0155	-0.0546	-0.0070	-0.0566	-0.0030	-0.0576
18	-0.9090	-0.0681	-0.1227	-0.0846	-0.0556	-0.1002	-0.0030	-0.0871	-0.0050	-0.0621	-0.0210	-0.0326	-0.0426	-0.0095	-0.0566	-0.0020
19	-0.8769	-0.1332	-0.0501	-0.1482	-0.0150	-0.1122	-0.0210	-0.0436	-0.0626	-0.0045	-0.0651	-0.0110	-0.0366	-0.0416	-0.0075	-0.0581
20	-0.8354	-0.2083	0.0130	-0.1733	-0.0336	-0.0606	-0.0816	-0.0015	-0.0691	-0.0371	-0.0105	-0.0641	-0.0095	-0.0300	-0.0501	-0.0606
21	-0.7798	-0.2920	0.0501	-0.1452	-0.0992	-0.0065	-0.0886	-0.0451	-0.0075	-0.0706	-0.0270	-0.0095	-0.0616	-0.0185	-0.0130	-0.0606
22	-0.7057	-0.3701	0.0431	-0.0766	-0.1517	-0.0220	-0.0260	-0.0886	-0.0255	-0.1110	-0.0651	-0.0326	-0.0481	-0.0130	-0.0411	-0.0015
23	-0.6025	-0.4337	-0.0110	-0.0020	-0.1422	-0.0917	0.0035	-0.0426	-0.0801	-0.0245	-0.0045	-0.0546	-0.0481	-0.0035	-0.0240	-0.0601
24	-0.4758	-0.4628	-0.1002	0.0336	-0.0741	-0.1342	-0.0486	0.0060	-0.0386	-0.0781	-0.0331	0.0030	-0.0300	-0.0631	-0.0290	0.0005
25	-0.3446	-0.4347	-0.1913	-0.0015	-0.0045	-0.0922	-0.1042	-0.0426	-0.0626	-0.0235	-0.0636	-0.0561	-0.0125	-0.0020	-0.0356	-0.0616
26	-0.2424	-0.3686	-0.2439	-0.0776	0.0025	-0.0215	-0.0726	-0.0886	-0.0531	-0.1110	-0.0030	-0.0326	-0.0591	-0.0516	-0.0185	-0.0020
27	-0.1668	-0.2880	-0.2499	-0.1467	-0.0521	-0.0070	-0.0110	-0.0446	-0.0716	-0.0701	-0.0411	-0.0105	-0.0015	-0.0185	-0.0481	-0.0596
28	-0.1082	-0.2038	-0.2138	-0.1758	-0.1172	-0.0596	-0.0160	-0.0010	-0.0115	-0.0366	-0.0581	-0.0641	-0.0536	-0.0311	-0.0095	-0.0025
29	-0.0631	-0.1237	-0.1482	-0.1512	-0.1382	-0.1137	-0.0791	-0.0446	-0.0175	-0.0030	-0.0015	-0.0100	-0.0255	-0.0421	-0.0551	-0.0596
30	-0.0285	-0.0581	-0.0761	-0.0871	-0.0972	-0.1007	-0.0972	-0.0886	-0.0771	-0.0621	-0.0476	-0.0326	-0.0205	-0.0100	-0.0035	-0.0020
31	-0.0075	-0.0160	-0.0215	-0.0265	-0.0321	-0.0371	-0.0416	-0.0451	-0.0481	-0.0511	-0.0536	-0.0556	-0.0561	-0.0581	-0.0586	-0.0591

부록 B 회로도

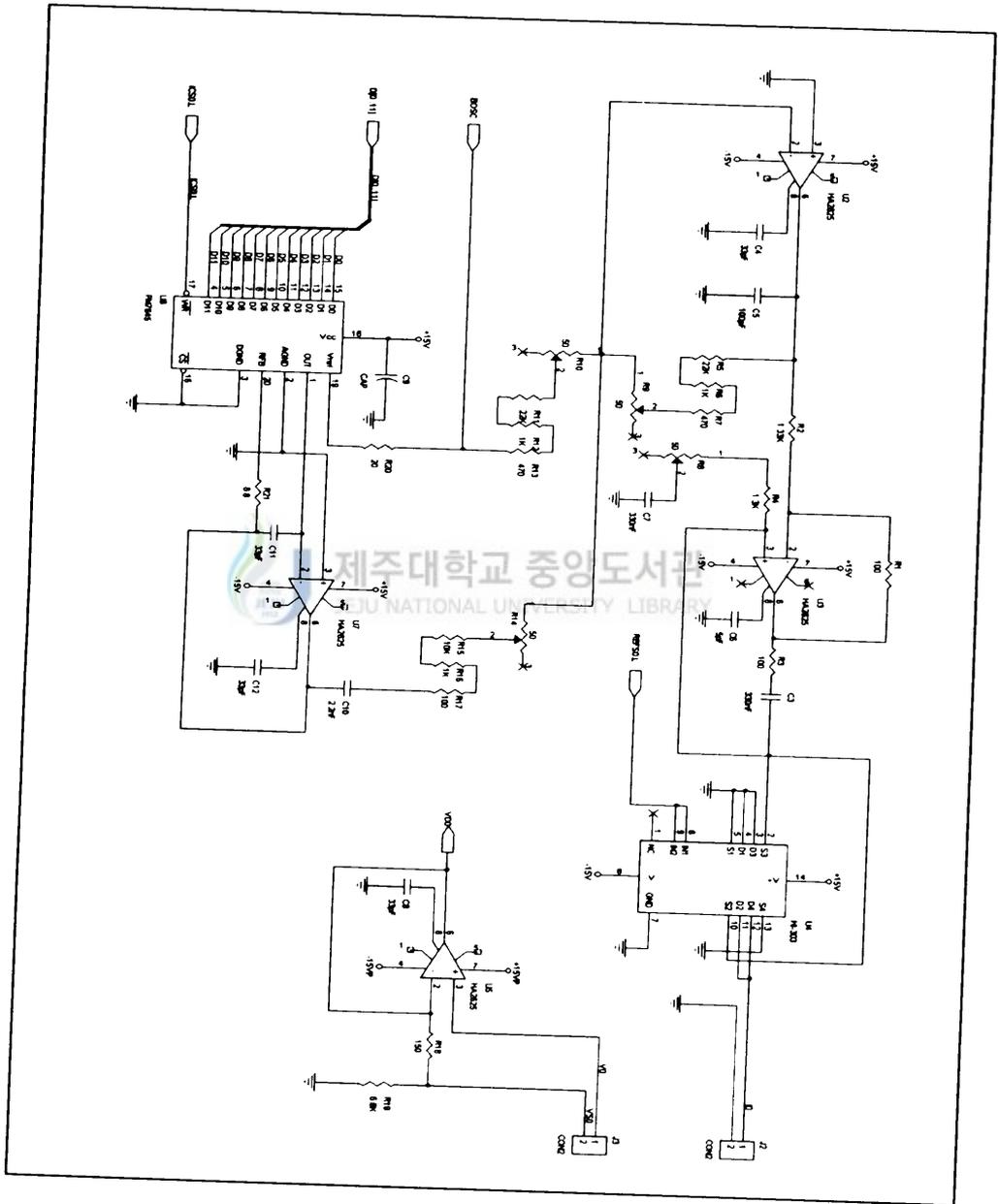
B-1. Interface Card



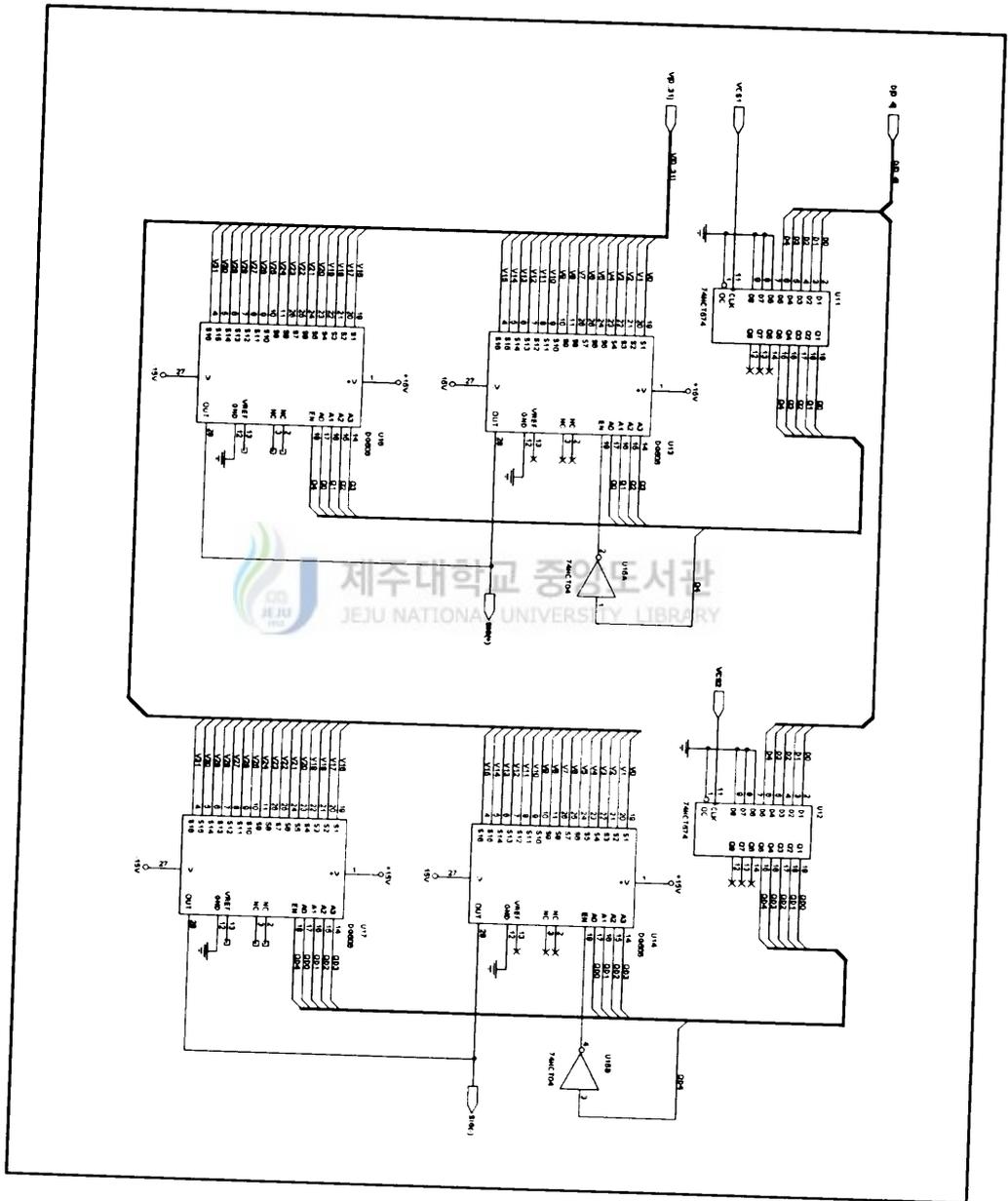
B-3. VCCS 보드 컨트롤 회로



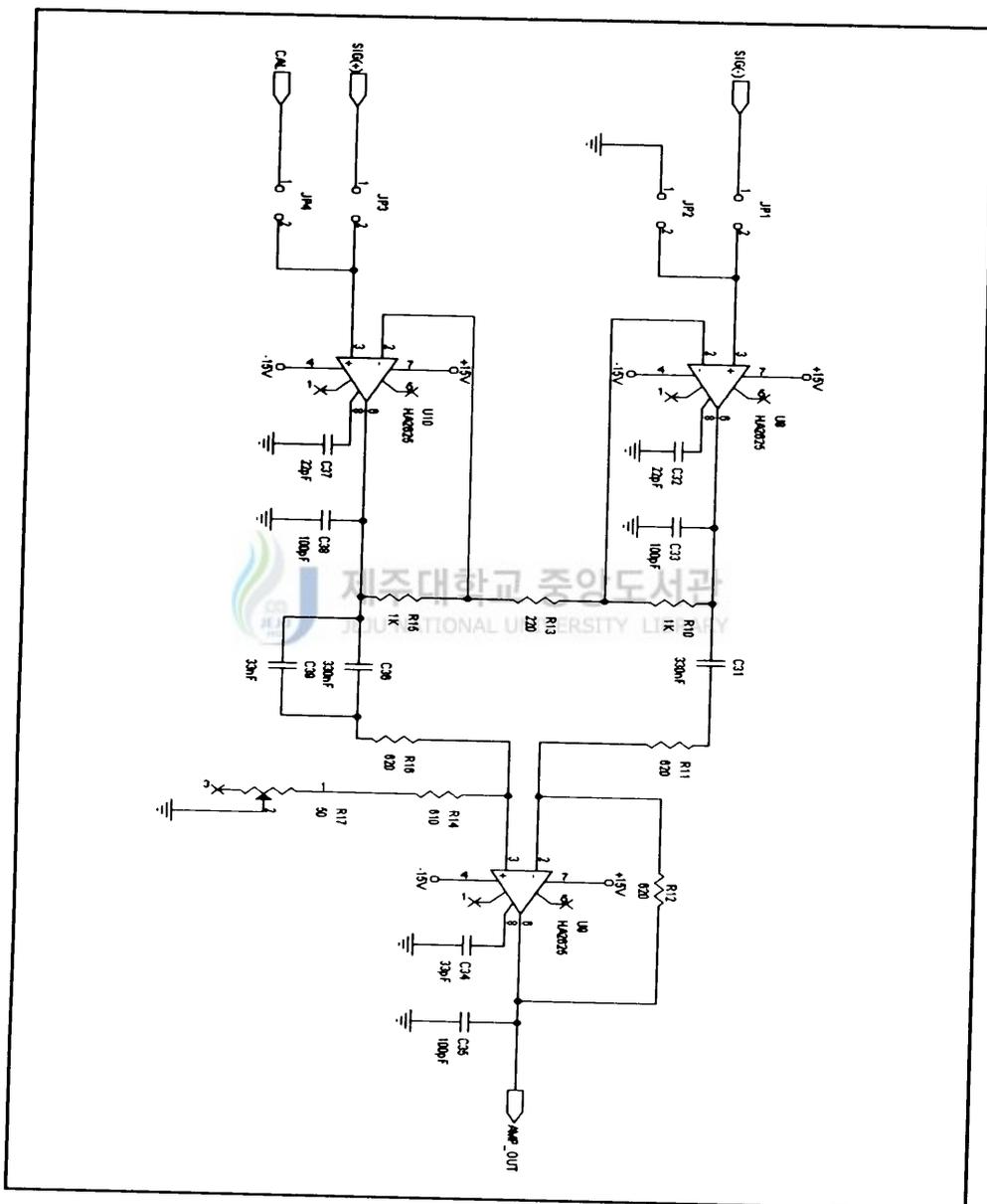
B-5. Voltage-Controlled Current Source(VCCS)



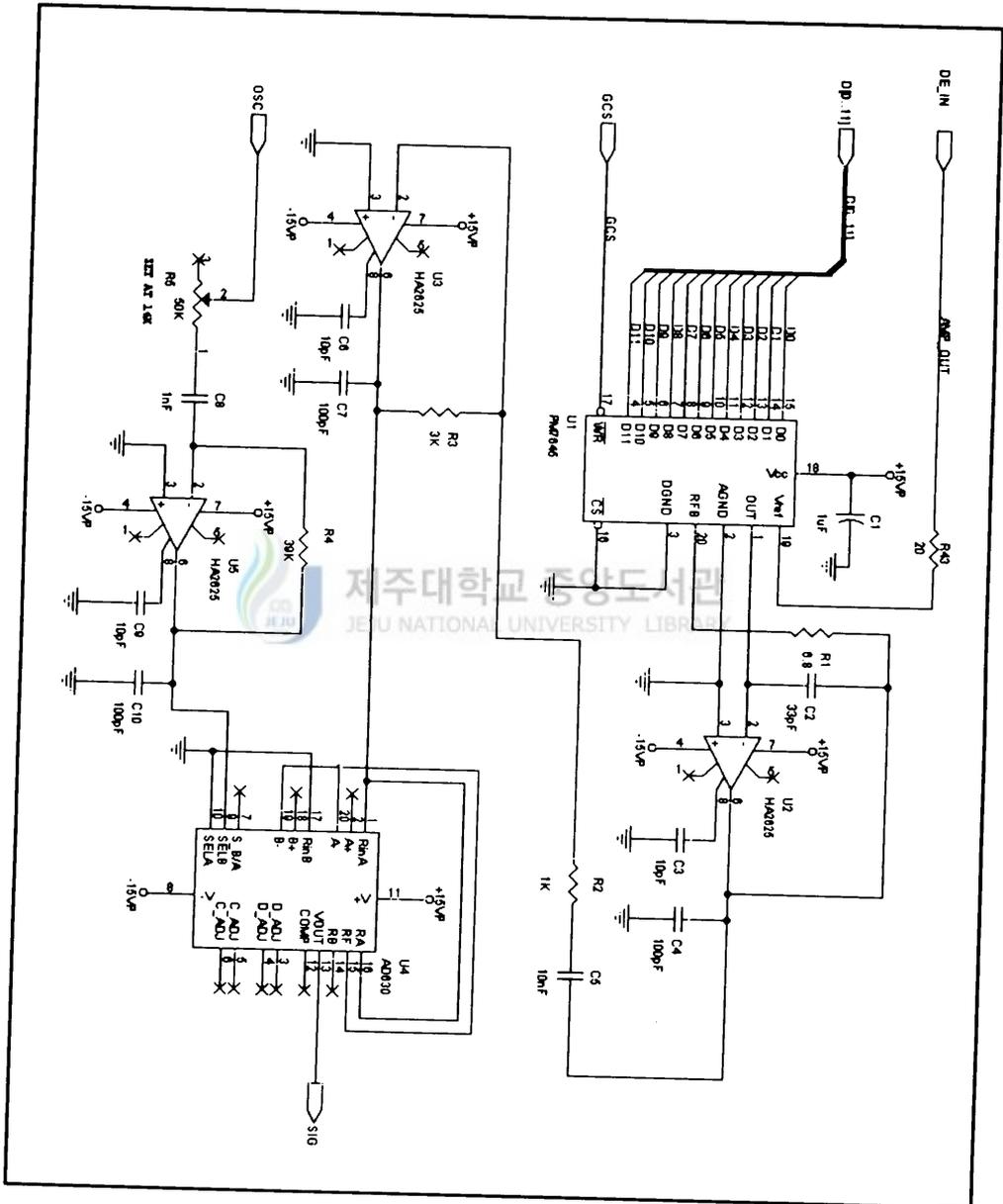
B-6. MUX(Multiplexer)



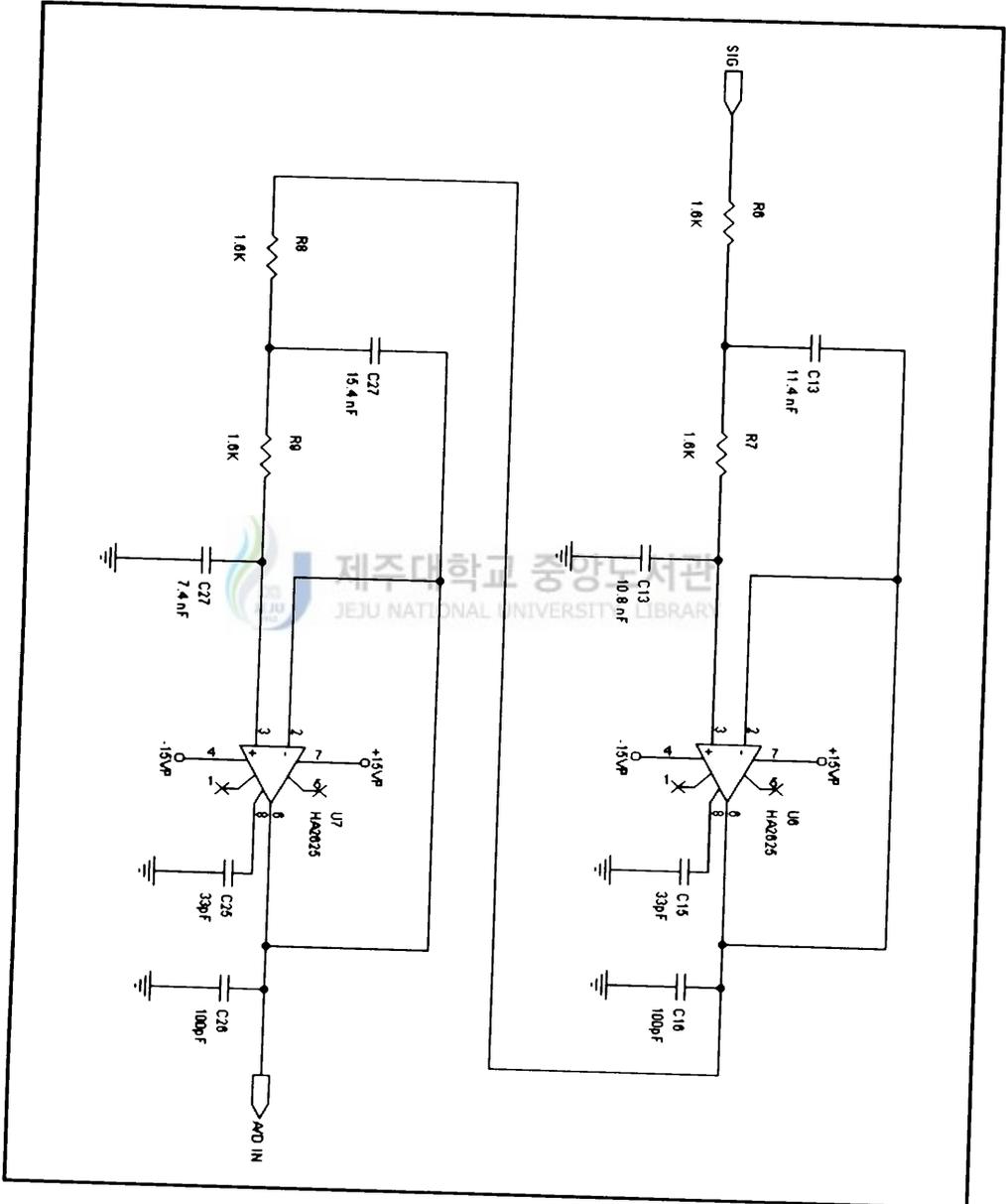
B-7. Differential Amplifier



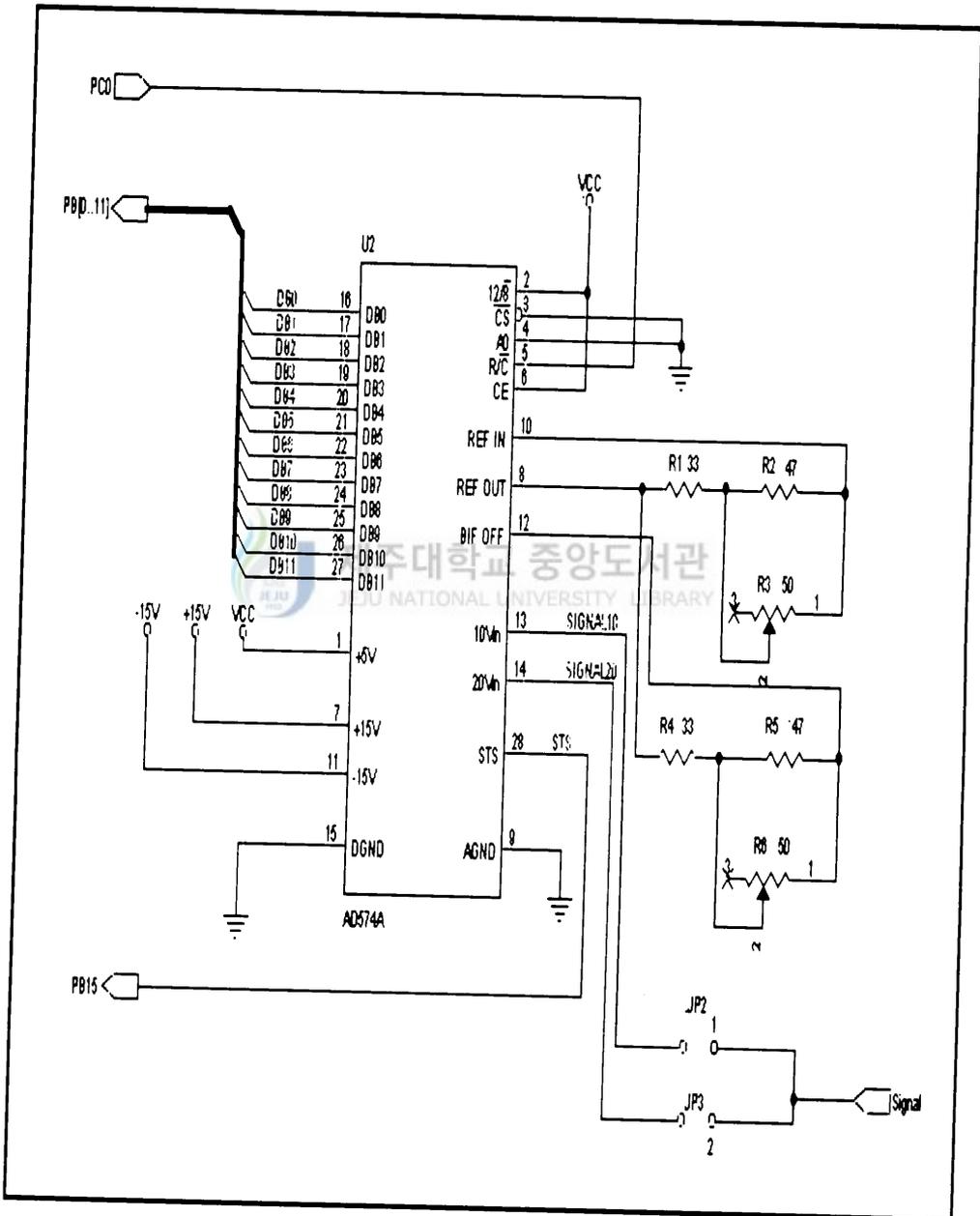
B-8. Demodulator



B-9. Filter



B-10. A/D Converter



감사의 글

학사 4년과 석사 2년을 마치면서 이 자그마한 결실을 맺게 되었습니다. 이 모든 것들이 저를 알고 어여뻐 여겨주신 분들의 덕분이 아닌가 생각하고 늘 감사해 하고 있습니다.

그간 6년이라는 시간이 흐르면서 힘들었던 일 기뻐던 일 모두 주마등처럼 스쳐 지나갑니다. 그 때는 왜 그렇게 힘들어했었는지 지금 이렇게 생각하는 걸 보면 저 또한 조금씩 커가고 있다는 것을 느끼고 있습니다.

항상 현실에 충실하자고 마음을 먹고 생활을 해 왔지만 지금 시점에서 뒤돌아보면 아쉬움이 앞섭니다. 아마도 이 아쉬움은 미래에 대한 꿈과 희망을 놓지 말라는 하늘의 뜻이 아닌가 생각해 봅니다.

그 동안 늘 고마움을 느끼면서도 이야기 못했던 학과 교수님들께 우선 고마운 마음을 전하고 싶습니다.

늘 아버님 같이 저를 돌보아주신 이윤준 교수님과, 이 글이 나오기까지 저를 밑에서부터 도와주신 이현주 교수님, 박제우 교수님, 천원기 교수님, 그리고 멀리서나마 끝까지 저를 돌봐주신 김신 교수님 고개 숙여 감사드립니다.

그리고 저에게 많은 도움이 되주신 공대 조교선생님들과 행정선생님, 실험을 함께 해준 보안이, 학과일 힘들어도 내색 없이 참아준 박숙희 선생, 우리학과 대학원생 및 선·후배님 모두에게 고마움을 전하고 싶습니다.

마지막으로 언 20년 동안 홀로 저를 돌봐 주신 어머님께 이 글을 올리고 싶습니다. 이 세상 그 누구보다 제가 존경하는 어머님 고맙습니다. 그리고 불평불만 없이 나를 지켜봐 준 사랑하는 현순아 고맙다. 용빈이에게 부끄럽지 않는 존재가 되도록 노력할게.