



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

다기능 접지분석장치의  
설계 및 제작

Design and Fabrication of a Multi-function Ground Analyzer



指導教授 吉 璟 碩

2009年 8月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

金 晁 局

本 論文을 朴贊容의 工學碩士 學位論文으로 認准함

委員長：工學博士 李 成 根 ①

委 員：工學博士 吉 暻 碩 ①

委 員：工學博士 張 樂 元 ①



2009年 8月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

金 晁 局

# 목 차

목 차 .....	i
그림 및 표 목차 .....	iii
Abstract .....	v
제 1 장 서 론 .....	1
1.1 연구배경 및 필요성 .....	1
1.2 연구목적 및 내용 .....	2
제 2 장 이 론 .....	3
2.1 접지파라미터 .....	3
2.1.1 대지저항률 .....	4
2.1.2 접지임피던스 .....	5
2.1.3 위험전압 .....	8
가. 접촉전압 .....	8
나. 보폭전압 .....	9
2.2 접지특성 분석 .....	10
2.2.1 대지저항률 특성 .....	10
가. 4전극법 .....	10
나. 다전극 측정 .....	12
2.2.2 접지임피던스 특성 .....	15
2.2.3 위험전압 특성 .....	17

가. 발판전극법 .....	17
나. 다전극법 .....	19
<b>제 3 장 설계 및 제작 .....</b>	<b>28</b>
3.1 하드웨어 구성 .....	28
3.2 소프트웨어 설계 .....	30
3.3 특성평가 .....	33
<b>제 4 장 측정 및 분석 .....</b>	<b>36</b>
4.1 대지저항률 .....	36
4.2 접지임피던스 .....	39
4.3 위험전압 .....	41
<b>제 5 장 결    론 .....</b>	<b>46</b>
<b>참 고 문 헌 .....</b>	<b>48</b>



## 그림 및 표 목차

### <그림목차>

그림 2.1	접지시스템의 구성	3
그림 2.2	물질의 저항률	5
그림 2.3	접지임피던스의 주파수특성	6
그림 2.4	봉상접지전극의 등가회로	7
그림 2.5	접촉전압의 정의	8
그림 2.6	보폭전압의 정의	9
그림 2.7	Wenner법의 구성	10
그림 2.8	기준전극의 위치	12
그림 2.9	불균등거리를 이용한 대지저항률 측정	14
그림 2.10	대전극을 이용한 대지저항률 측정	15
그림 2.11	저항구역과 전위분포	16
그림 2.12	전위강하법의 구성	17
그림 2.13	발판전극을 이용한 위험전압 측정	18
그림 2.14	접촉전압의 실험계	21
그림 2.15	보폭전압의 실험계	23
그림 2.16	봉전극을 이용한 접촉전압의 전위분포	25
그림 2.17	대전극을 이용한 위험전압 측정	26
그림 3.1	다기능 접지분석장치의 구성	28
그림 3.2	정현파 발생장치	28
그림 3.3	측정부의 구성	29
그림 3.4	시제작 다기능 접지분석장치	30
그림 3.5	소프트웨어의 구성	31
그림 3.6	BPF의 구성	32
그림 3.7	BPF의 적용	33

그림 4.1	보조극 주변의 대지저항률 .....	37
그림 4.2	측정 파형의 예 .....	37
그림 4.3	대지저항률의 측정 .....	38
그림 4.4	접지임피던스의 측정 .....	39
그림 4.5	위험전압의 측정 .....	41
그림 4.6	실험계의 구성 .....	42
그림 4.7	다전극을 이용한 위험전압의 측정결과 .....	43
그림 4.8	위험전압의 특성분석 .....	44

### <표목차>

표 2.1	기준전극의 위치에 따른 특성 .....	13
표 2.2	발판전극과 봉전극의 접촉전압 .....	22
표 2.3	인가전압에 대한 50 [cm] 봉전극의 특성 .....	23
표 2.4	발판전극과 봉전극을 이용한 보폭전압 .....	24
표 2.5	인가전압에 따른 보폭전압의 특성 .....	24
표 2.6	전극형상에 따른 전위분포와 전위경도 .....	27
표 3.1	실험장치의 사양 .....	34
표 3.2	1 [kΩ] (1/2[W])에 대한 측정결과 .....	34
표 3.3	1 [kΩ] (100[W])에 대한 측정결과 .....	35
표 4.1	평균 대지저항률 측정 .....	38
표 4.2	접지임피던스의 측정결과(7 [m]) .....	40
표 4.3	주파수 변화에 따른 접지임피던스(20 [m]) .....	40
표 4.4	위험전압의 측정결과 .....	43

# Design and Fabrication of a Multi-function Ground Analyzer

*by Hwang-kuk, Kim*

Department of Electrical and Electronics Engineering  
The Graduate School of Korea Maritime University  
Busan, Republic of Korea

## Abstract



Grounding systems dissipate fault currents into the ground and suppress ground potential rise (GPR). There are some parameters such as a ground impedance, a soil resistivity, a touch and a step voltage representing the performance of grounding systems.

In this thesis, the design and fabrication of a multi-function ground analyzer which analyzes the parameters was studied. The prototype analyzer consists of a variable frequency power source, 16-bit and 16-input analog-digital converter, a signal processor, 6-auxiliary electrodes, and software. The power source generates sine-wave voltage up to 300 [ $V_{\text{rms}}$ ], current up to 5 [A] and frequency ranging from 45 [Hz] to 500 [Hz]. The analyzer measures ground potential differences at up to 6-locations and calculates the parameters by



proposed algorithms. Comparative analysis with commercial device was carried out according to the IEEE Std. 80, 81 and IEC 60364-4-44 to evaluate the accuracy of the multi-function ground analyzer.

The multi-function ground analyzer calibrated the values of potential differences and applied current by using 1 [k $\Omega$ ] resistor and carried out characteristic evaluation.

From the measured data, the multi-function ground analyzer showed error within  $\pm 1$  [%] and measured the ground parameters.



# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구배경 및 필요성

오늘날 산업의 발달에 따른 전력수요의 급증으로 전력계통이 복잡화됨에 따라 뇌격이나 지락, 단락사고 등으로 발생하는 과도 및 고장전류에 의한 기기의 오동작, 파손 및 정보의 손실로 인해 경제적인 피해와 인체의 감전사고가 증가되고 있다<sup>[1]</sup>. 이러한 사고는 접지를 시설함으로써 과도 및 고장전류를 대지로 흘려 대지전위상승(ground potential rise)을 억제하여 인체의 감전이나 설비의 사고를 방지한다<sup>[2]</sup>.

접지성능의 주요 파라미터는 대지저항률(soil resistivity), 접지저항(ground resistance), 위험전압(risk voltage) 등이 있다. 접지시스템의 설계를 위해 대지저항률의 측정은 필수적이며, 접지성능은 접지저항과 위험전압으로 평가된다. 여기서 접지저항은 특정주파수 영역에 대한 접지임피던스를 고려해야 하며, 또한 위험전압은 접촉전압과 보폭전압으로 구분된다<sup>[3]</sup>. IEEE (Institute of electrical and electronics engineers)나 IEC (International electrotechnical commission) 등의 국제규격에서는 인체감전의 주요 요인인 접지저항과 위험전압에 대한 규정을 강화하고 있으나, 국내규정의 경우는 단순히 접지저항으로 평가되므로 포괄적인 접지시스템의 평가가 이루어지지 않고 있다. 따라서 위험전압 및 특성에 맞는 접지시스템의 구축 및 성능평가가 필요하다. 또한 측정장비는 대지저항률이나 접지저항의 단일기능의 장비로 접지 특성분석에 시간이 많이 소요되고, 국제기준도 빠르게 변화하고 있는 실정이므로, 종합적이고 국제규격에 맞는 접지시스템의 평가와 주요 접지파라미터에 대한 동시측정이 가능한 다기능 측정기의 개발이 필요하다.

## 1.2 연구목적 및 내용

접지시스템은 시공 후 실질적인 유지관리가 불가능하므로 설계단계부터 정확한 접지파라미터의 측정이 요구된다. 따라서 본 논문에서는 대지저항률, 접지임피던스, 위험전압을 측정할 수 있는 다기능 접지분석장치를 설계·제작하였다.

본 장치는 정현파 발생장치(sine wave power source, 0~300 [V<sub>rms</sub>], 5 [A], 45~500 [Hz]), 데이터 수집을 위한 DAQ 그리고 LabVIEW기반의 측정 프로그램으로 구성된다. 전위차(potential difference) 및 인가전류(applied current)의 정확한 측정을 위해 전원주파수 성분을 제외한 시험전원의 주파수 성분만 측정할 수 있도록 디지털 대역통과필터(band pass filter)를 적용하였다.

IEEE Std. 80 및 81의 실험계를 이용하여 대지저항률, 접지저항 및 위험전압을 측정하였으며 1 [kΩ] 무유도저항에 대한 교정실험결과, ± 1[%] 이내의 오차를 보였다.

## 제 2 장 이 론

### 2.1 접지파라미터

접지란 전기·전자·통신설비를 대지와 전기적으로 접속하는 것을 말하며, 기기를 대지에 접속하기 위한 터미널이 접지전극이다. 접지의 목적은 회로의 기준전위를 정하거나, 뇌격전류 또는 지락전류가 대지로 유입될 때 대지전위의 상승을 억제하여 인체의 감전(electric shock)이나 전기·전자통신기기의 사고를 방지하는 것이다. 접지계는 접지대상인 전기설비, 금속체와 대지를 접속하는 단자의 역할을 하는 접지극(ground electrode) 그리고 접지대상과 접지극을 연결시키는 접지선(ground conductor)으로 구성되며 이를 그림 2.1에 나타내었다<sup>[4]</sup>.

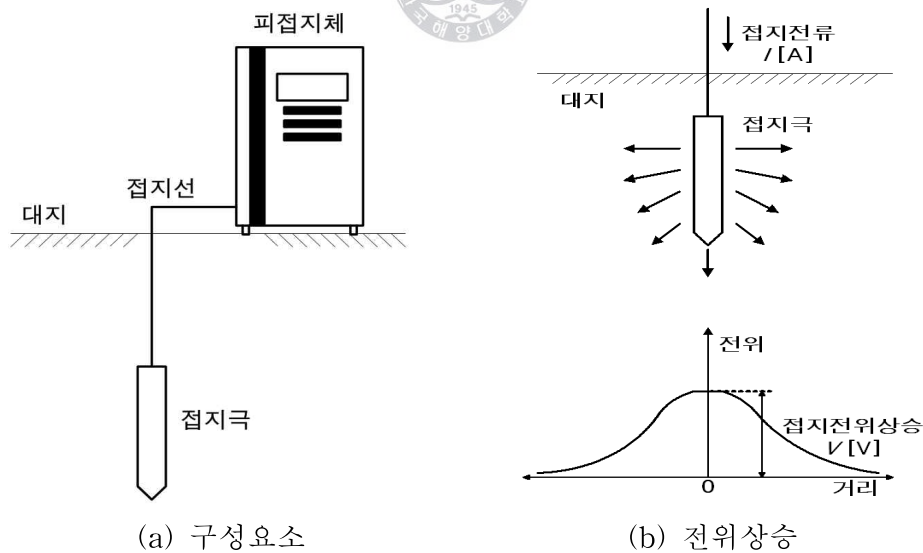


그림 2.1 접지시스템의 구성

Fig. 2.1 Configuration of the grounding system

피접지체로부터 접지선과 접지극을 통해 대지로 흐르는 전류를 접지전류라고 하며, 임의의 접지저항을 갖는 접지극에 접지전류가 흐르면 무한원점의 기준전위(remote reference potential : 0전위)에 따른 전위차가 발생하는데 이를 대지전위상승(ground potential rise)이라 한다<sup>[5],[6]</sup>.

이러한 접지의 성능을 나타내는 주요 파라미터에는 대지저항률, 접지임피던스 및 위험전압 등이 있다.

### 2.1.1 대지저항률

지표면 아래에 매설된 접지극을 통하여 대지로 유입되는 전류는 매설지점의 대지저항률에 따라 현저하게 변동된다. 대지저항률이 낮은 장소일수록 낮은 접지저항을 얻기 쉬우므로 접지의 설계와 시공에 있어서 접지전극 매설지점의 대지저항률과 지층의 구조를 알아내는 것은 대단히 중요하다. 대지저항률은 단면적이  $1[m^2]$ 이고, 길이가  $1[m]$ 인 토양의 전기저항으로 단위는  $[\Omega \cdot m]$ 로 정의된다<sup>[7]</sup>. 이러한 대지저항률은 항상 일정한 값을 가지는 것이 아니라 토양의 종류, 수분의 양, 온도, 토양에 분해되어 있는 화학물질의 종류와 농도에 따라 변동되며, 그림 2.2에서 나타낸 바와 같이 구성성분의 저항률에 따라 크게 달라진다<sup>[8],[9]</sup>. 대지의 전기적 특성을 고려하면 저항과 커패시터의 병렬구조인 등가회로로 나타낼 수 있다. 대지저항률의 분석은 이러한 환경 및 토양의 구조를 정확히 이해해야하나 실제 대지는 지층별로 토양이 다르고, 복잡한 다층구조로 구성되기 때문에 정확한 분석은 어렵다. IEEE Std. 80 및 81에서는 대지저항률  $\rho[\Omega \cdot m]$ 을 측정할 수 있는 여러가지 방법이 나타나 있으며, 그 중 4전극법을 많이 사용한다. 이렇게 측정된 대지저항률  $\rho[\Omega \cdot m]$ 과 거리  $a[m]$ 에 대한  $\rho-a$  곡선으로 대지의 구조를 분석할 수 있다.

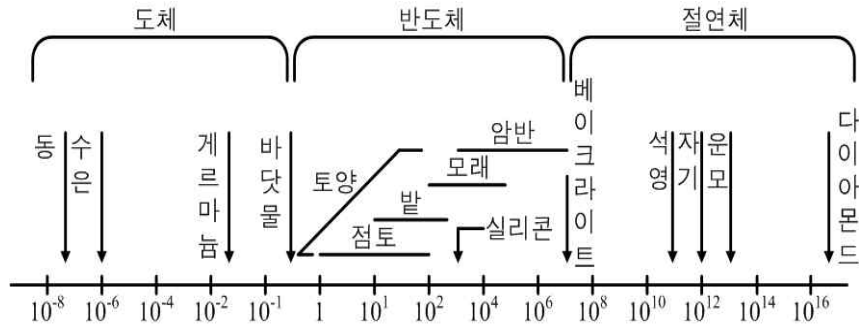


그림 2.2 물질의 저항률

Fig. 2.2 Resistivity of materials

### 2.1.2 접지임피던스

접지저항은 접지선, 접지전극의 도체저항, 접지전극과 토양사이의 접촉 저항, 접지전극 주위의 토양이 가지는 저항으로 나눌 수 있다. 이들 중 토양이 나타내는 저항 즉, 대지저항률은 접지저항의 90 [%]이상을 차지하는 중요한 요소이다. 일반적으로 접지저항은 다음과 같이 표현된다<sup>[10]</sup>.

$$R = \rho \times f \text{ } [\Omega] \quad (2.1)$$

여기서,  $\rho$  = 대지저항률 [ $\Omega \cdot m$ ]

$f$  = 전극의 형상과 치수에 의해 결정되는 함수

낮은 접지저항을 얻기 위해서는 대지저항률  $\rho$ 과 전극의 형상과 치수에 의해 결정되는 함수  $f$ 를 작게 하면 되지만, 대지저항률을 줄이는 것은 어렵기 때문에 전극의 형상이나 치수를 적절히 설계하여 접지저항을 낮춘다. 한편, 뇌격전류와 같이 급변하는 과도전류는 수 십 [kHz]이상의 주파수 성분을 가지며 이러한 전류가 접지계에 유입할 때는 접지특성이 비선

형적으로 나타나게 된다. 접지계를 통하여 과도전류  $I[A]$ 가 유입되면, 이로 인하여 접지극 주변의 대지에 전위상승  $V[V]$ 가 발생한다. 이 때 접지 임피던스는 접지저항과 마찬가지로 전위상승과 과도전류의 비로 정의되며 아래의 식 (2.2)와 같이 표현된다<sup>[11]</sup>.

$$Z_g = R_g + jX_g \quad [\Omega] \quad (2.2)$$

접지임피던스는 접지전극과 접지선의 인덕턴스  $L$ , 토양의 비유전율 및 접지전극과 토양의 접촉상태에 따른 커패시턴스  $C$ 에 의해 그림 2.3과 같이 저항성, 유도성, 용량성 특성을 가진다<sup>[12]</sup>.

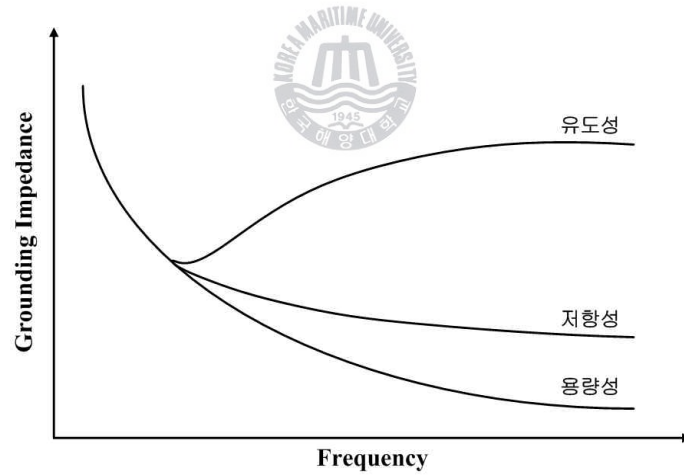


그림 2.3 접지임피던스의 주파수 특성

Fig. 2.3 Frequency characteristics of a ground impedance

일반적으로 사용하는 봉상접지극은 이론적 해석이 용이하므로 그림 2.4와 같이  $R-L-C$  집중정수회로를 이용하여 나타낼 수 있다<sup>[13]</sup>.

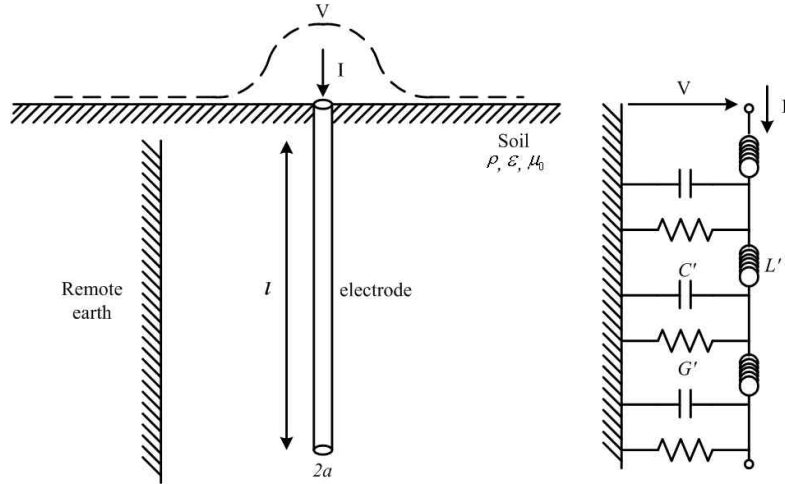


그림 2.4 봉상접지전극의 등가회로

Fig. 2.4 Equivalent circuit of a ground electrode

이때의 저항  $R$ , 인덕턴스  $L$  및 커패시턴스  $C$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>[14],[15]</sup>.

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \left( \ln \left( \frac{8 \cdot l}{2a} \right) - 1 \right) [\Omega] \quad (2.3)$$

$$L = 2 \cdot l \cdot \ln \left( \frac{4 \cdot l}{2a} \right) \cdot 10^{-7} [\text{H}] \quad (2.4)$$

$$C = \frac{\epsilon_r \cdot l}{18 \cdot \ln \left( \frac{4 \cdot l}{2a} \right)} \cdot 10^{-9} [\text{F}] \quad (2.5)$$

여기서,  $\epsilon_r$  = 토양의 유전상수



### 2.1.3 위험전압

#### 가. 접촉전압

고압전로에서 전기기기나 배선 등의 절연열화 또는 불량으로 인해 누전 사고가 일어나게 되면 지락 전류가 구조물을 통해 대지에 흘러 지표면의 전위가 상승하게 된다. 이때 인체가 이러한 구조물과 접촉하게 되면 접촉 지점과 대지표면 사이에는 전위차가 발생하게 되며 이로 인해 인체의 접촉 부위와 다른 신체 일부사이에 유기되는 전압을 접촉전압이라고 한다<sup>[16]</sup>. 접촉전압은 발과 대지의 접촉조건, 지표면 부근의 대지저항률 등에 의해 다르게 나타난다. 인체가 구조물에 접촉한 상태를 전기적 등가회로로 나타내면 그림 2.5와 같다. 한쪽 발과 대지의 접촉저항  $R_F$ , 구조물과 손사이의 접촉저항  $R_H$ , 인체저항  $R_B$ , 인체에 흐르는 전류를  $I_B$ 라고 하면 접촉전압  $V_T$ 는 다음 식으로 나타낼 수 있다<sup>[17]</sup>.

$$V_T = I_B \frac{(R_H + R_B + R_F)}{2} \text{ [V]} \quad (2.6)$$

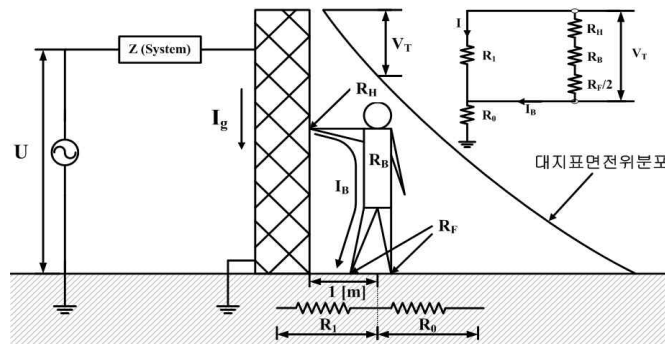


그림 2.5 접촉전압의 정의

Fig. 2.5 Definition of touch voltage

IEEE Std. 80에서는 접촉전압을 구조물과 대지 지표면 상의 1[m] 떨어진 지점사이의 전위차로 정의한다. 접촉전압을 측정하기 위한 파라미터로 인체저항, 체중, 한쪽 발에 대한 접촉저항  $R_F = 3.0 \rho_S [\Omega]$ 를 사용한다. 구조물과 접촉된 손의 저항은 그 크기가 매우 작기 때문에 무시될 수 있으며, 체중 70 [kg]에 대한 허용한계접촉전압  $V_{Ta}$ 는 다음과 같다<sup>[18]</sup>.

$$V_{Ta} = (1000 + 1.5 C_S \rho_S) \frac{0.157}{\sqrt{t}} = \frac{157 + 0.236 C_S \rho_S}{\sqrt{t}} \text{ [V]} \quad (2.7)$$

#### 나. 보폭전압

접지전극을 통하여 대지로 고장전류가 흐를 때 접지전극 주위의 지표면은 전위분포를 가지며, 그림 2.6에 나타낸 것과 같이 구조물 주위에 사람이 있게 되면 인체의 양발 사이에 전위차가 발생되는데 이를 보폭전압이라 하며 식 (2.8)과 같이 나타낼 수 있다<sup>[19]</sup>.

$$V_S = I_B (R_B + 2R_F) \text{ [V]} \quad (2.8)$$

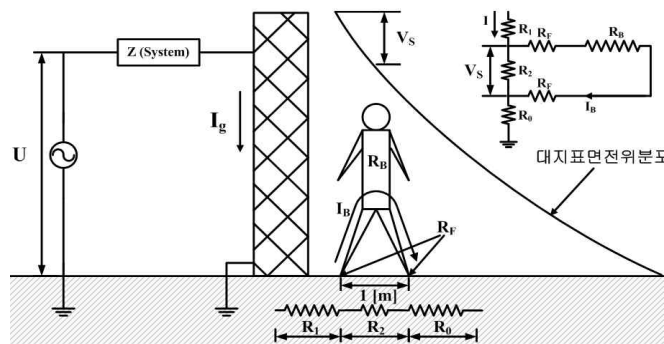


그림 2.6 보폭전압의 정의

Fig. 2.6 Definition of step voltage

IEEE Std. 81.2에서는 규정된 보폭전압을 인체가 서있는 상태에서 양발을 1 [m]간격으로 벌렸을 때 지표면 위 양발사이의 전위차로 정의하고 있으며, 체중 70 [kg]에 대한 허용한계보폭전압  $V_{Sa}$ 은 식 (2.9)와 같다.

$$V_{Sa} = (1000 + 6 C_S \rho_S) \frac{0.157}{\sqrt{t}} = \frac{157 + 0.942 C_S \rho_S}{\sqrt{t}} \text{ [V]} \quad (2.9)$$

## 2.2 접지특성 분석

### 2.2.1 대지저항률 특성

#### 가. 4전극법

대지저항률의 측정법은 2전극법, 4전극법, 접지저항계를 이용한 간이측정법 등이 사용되며, 이 중 가장 대표적으로 4전극법을 사용한다. 4전극법은 크게 Schlumberger법과 Wenner법으로 나눌 수 있으며, Schlumberger법은 내부의 2극이 외부의 2극에 가깝게 설치됨으로서 큰 전위차를 측정할 수 있어 측정영역이 커지더라도 적은 오차로 평균 대지저항률을 측정할 수 있는 방법이다. Wenner법은 그림 2.7과 같이 4개의 보조극 간의 거리를 동일하게 구성해야 한다<sup>[20],[21]</sup>.

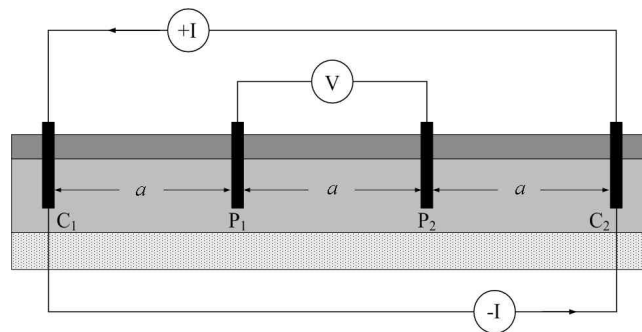


그림 2.7 Wenner법의 구성

Fig. 2.7 Configuration of Wenner's method

동일선상에 4개의 전극을 거리  $a$  [m]의 등간격으로 대지에 매설하고 시험전류  $I$  [A]를 전류인가전극  $C_1$ 과  $C_2$ 를 통해 인가한 후, 전위측정전극  $P_1$ 과  $P_2$ 의 전위차  $V$  [V]를 측정한다. 이 때 대지저항률  $\rho$  [ $\Omega \cdot m$ ]인 균일대지에 매설된 반구상의 전극  $C_1$ 에 유입하는 (+) 전류에 의한  $C_1$ 과  $P_1$ 극 사이의 전위차  $V_1$ 은

$$V_1 = \frac{\rho I}{2\pi a} \text{ [V]} \quad (2.10)$$

로 나타내며, 접지극  $C_1$ 과  $P_2$ 극 사이의 전위차  $V_2$ 는

$$V_2 = \frac{\rho I}{4\pi a} \text{ [V]} \quad (2.11)$$


따라서,  $P_1$ 과  $P_2$ 극 사이의 전위차  $V_A$ 는 식 (2.12)와 같다.

$$V_A = \frac{\rho I}{2\pi a} - \frac{\rho I}{4\pi a} = \frac{\rho I}{4\pi a} \text{ [V]} \quad (2.12)$$

또한, 동일한 방법으로 전극  $C_2$ 에 (-)전류가 유입될 때의 전위차  $V_B$ 는

$$V_B = \frac{\rho I}{4\pi a} \text{ [V]} \quad (2.13)$$

와 같으며 전극  $P_1$ 과  $P_2$ 사이에 발생하는 전위차는 식 (2.14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_A + V_B = \frac{\rho I}{2\pi a} \text{ [V]} \quad (2.14)$$

따라서, 식 (2.14)를 사용하면 등간격  $a$  [m]에 대한 평균 대지저항률은

$$\rho = 2\pi a R \text{ [\Omega} \cdot \text{m]} \quad (2.15)$$

로 나타낼 수 있다. Wenner법은 등간격으로 전극거리를 구성해야 하며, 측정영역이 커지면 전위측정전극 간의 거리에 따라 전위차 측정의 오차가 증가하는 점과 측정영역의 부분적인 분석이 어렵다는 단점이 있다<sup>[22]</sup>.

## 나. 다전극 측정

### 1) 기준전극의 위치

본 논문에서는 대지저항률을 측정하기에 앞서 기준전극의 매설위치를 선정하기 위해 그림 2.8과 같이 실험계를 구성하였다<sup>[23-25]</sup>. 여기서,  $P_{ref1}$ 의 위치는 E-C극간 거리의 50 [%]되는 지점이며,  $P_{ref2}$ 지점은 61.8 [%]되는 지점이다.

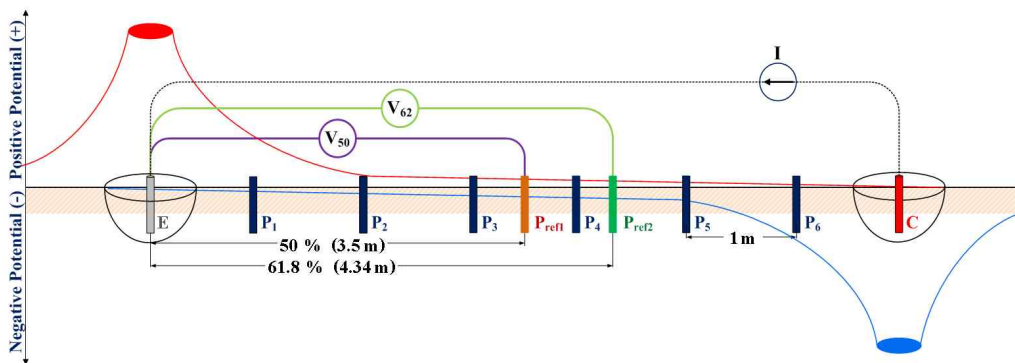


그림 2.8 기준전극의 위치

Fig. 2.8 Location of the reference electrode

표 2.1 기준전극의 위치에 따른 전위변화

Table 2.1 Changes of the potential difference depending on the location of the reference electrode

		50 [%]지점		
측정영역	전위차 [mV]	인가전류 [mA]	대지저항률 [ $\Omega \cdot m$ ]	
$P_1 \sim P_{ref1}$	764	34.2	161.23	
$P_2 \sim P_{ref1}$	296	34.2	179.73	
$P_3 \sim P_{ref1}$	83.6	34.2	185.22	
$P_{ref1} \sim P_4$	76.2	34.1	168.83	
$P_{ref1} \sim P_5$	149	34.1	61.78	
$P_{ref1} \sim P_6$	497	34.1	120.24	
		61.8 [%]지점		
측정영역	전위차 [mV]	인가전류 [mA]	대지저항률 [ $\Omega \cdot m$ ]	
$P_1 \sim P_{ref2}$	861	34.3	161.45	
$P_2 \sim P_{ref2}$	391	34.3	180.56	
$P_3 \sim P_{ref2}$	177	34.3	175.75	
$P_4 \sim P_{ref2}$	16.7	34.3	50.96	
$P_{ref2} \sim P_5$	57.2	34.3	67.13	
$P_{ref2} \sim P_6$	407	34.3	120.16	

실험결과, 61.8 [%] 지점에서 측정된 전위차는 16.7 [mV]이며 인가전류는 34.3 [mA]로 측정되었다. 이에 반해 50 [%]지점에서는 동일 인가전류에서 83.6 [mV]의 전위차가 측정되었으며, 50 [%] 지점인  $P_{ref1}$  영역은 대지저항률 측정에 오차를 발생시킬 수 있으므로 기준전극의 위치는 61.8 [%]지점에 매설되어야 할 것이다. 표 2.1에서  $P_3 \sim P_{ref1}$ 과  $P_{ref1} \sim P_4$  영역의 대지저항률 합 의 평균은  $P_3 \sim P_{ref2}$  영역과 근사하며,  $P_4 \sim P_{ref2}$ 와  $P_{ref2} \sim P_5$  영역의 대지저항률 합 의 평균은  $P_{ref1} \sim P_5$  영역과 같으므로 기준전극으로 분리된 영역의 평균값은 이전 영역의 대지저항률과 동일하다고 할 수 있다.

## 2) 개별적 대지저항률 측정

실제 대지는 지층별로 모양이 다르고, 복잡한 다층구조로 구성되기 때문에 정확한 대지저항률을 측정하기는 어렵다. 따라서 본 논문에서는 다층구조의 대지를 단층구조로 해석하기 위해 측정대지를 균일한 대지로 가정하고, ‘측정전류가 전극의 배치간격보다 더 깊은 영역을 통과할 수 없다’는 Gish와 Rooney 규칙을 적용하여 보조극 사이의 개별적 대지저항률과 측정영역에 대한 평균 대지저항률을 측정하였다<sup>[26]</sup>. 또한 기준전극의 위치 61.8 [%]에 의해 각 전극간의 거리가 불균등해지므로 이를 측정하기 위한 방법을 모의하였다.

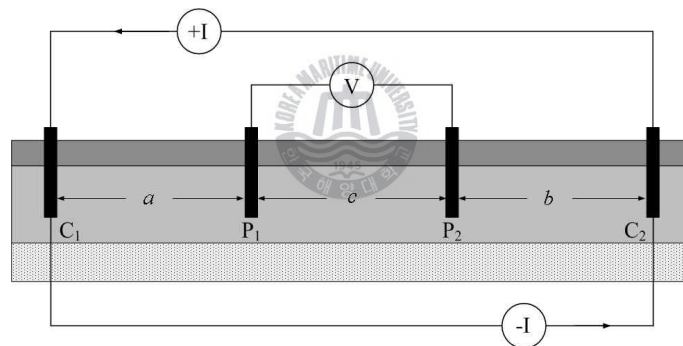


그림 2.9 불균등거리를 이용한 대지저항률의 측정

Fig. 2.9 Measurement of soil resistivity using different distances

앞서 설명한 그림 2.7에 대한 설명과 같이 그림 2.9에 대한 전극 P<sub>1</sub>과 P<sub>2</sub>사이의 전위차를 나타내면,

$$V = \frac{\rho I}{2\pi a} - \frac{\rho I}{2\pi(a+c)} \quad [\text{V}] \quad (2.16)$$

과 같으며 식 (2.16)을 대지저항률  $\rho$  [ $\Omega \cdot \text{m}$ ]로 나타내면 다음과 같다<sup>[27]</sup>.

$$\rho = \frac{2 \pi R}{\left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} - \frac{1}{b+c} - \frac{1}{a+c}\right)} [\Omega \cdot \text{m}] \quad (2.17)$$

이는 Wenner법과는 달리 전극간의 거리가 달라도 대지저항률 측정이 가능하기 때문에 각 전위보조극 사이의 대지저항률을 측정할 수 있다. 식 (2.17)은 측정영역에 대한 비등간격의 측정법으로써 Schlumberger법을 적용하면 그림 2.10과 같이 개별 대지저항률과 전체 대지저항률의 동시 측정이 가능하다.

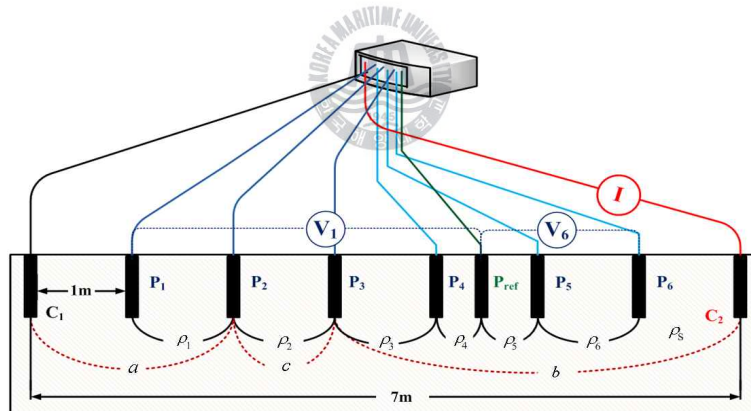


그림 2.10 다전극을 이용한 대지저항률 측정

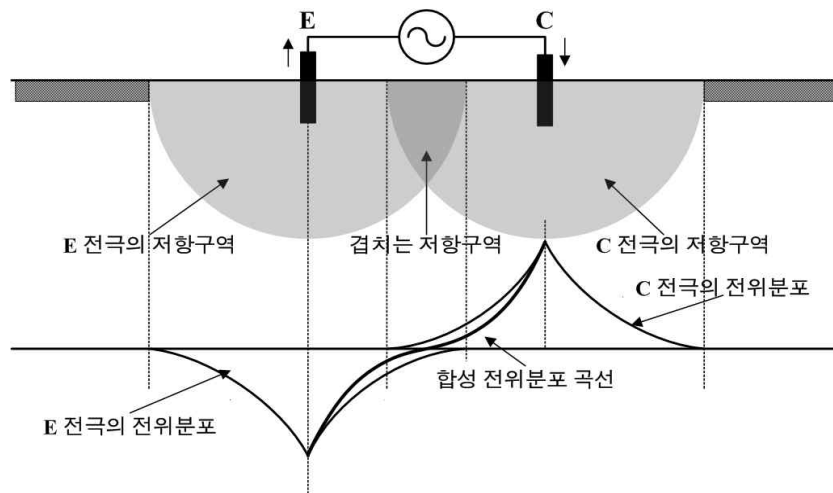
Fig. 2.10 Measurement of soil resistivity by multi-electrode

### 2.2.2 접지임피던스 특성

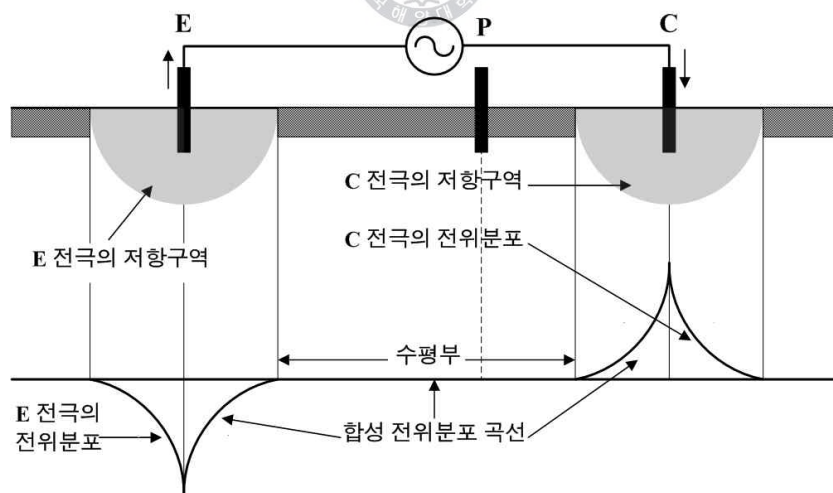
접지임피던스를 측정하는 방법에는 2전극법, 3전극법, 전위강하법이 있으며, 이 중 전위강하법은 다른 방법에 비해 정확도가 높아 가장 많이 사용되고 있다. 전위보조극 P는 접지극 E와 전류보조극 C사이의 전위차의



변동이 가장 적은 수평부에 매설한다.



(a) E-C극간의 거리가 가까울 경우



(b) E-C극간의 거리가 멀 경우

그림 2.11 저항구역과 전위분포

Fig. 2.11 Resistance area and potential distribution

설치된 C극에 전류가 유입되면 C극 주위의 대지는 (+) 전위로 상승하고 접지극 E 주위는 전류방향이 반대로서 (-) 전위로 상승이 발생된다. 그림 2.11(a)와 같이 접지극 E와 전류보조극 C의 거리가 가까우면 저항구역이 겹치는 부분이 발생되어 두 접지전극에 의한 전위분포곡선을 합성해도 중간에 수평부가 없어 올바른 전위측정이 어렵다<sup>[28]</sup>. 그림 2.11(b)와 같이 접지극 E와 전류보조극 C를 충분한 거리로 떨어뜨리면 저항구역이 서로 겹치지 않으므로 두 극은 서로 무관한 관계에 있으며 전위분포곡선의 수평 부분에 대한 전위측정이 가능하다.

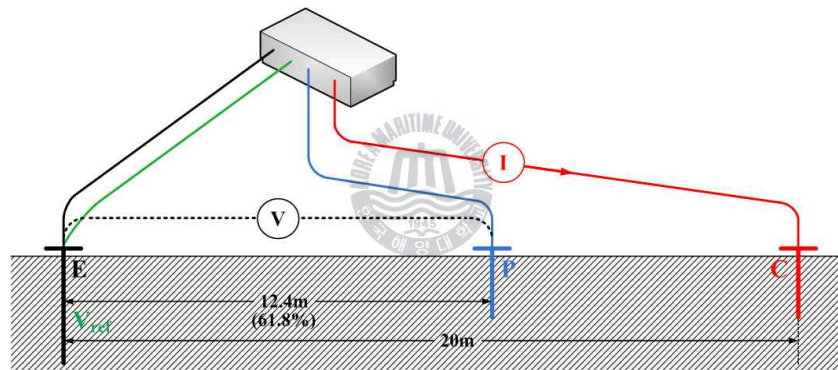


그림 2.12 전위강하법의 구성

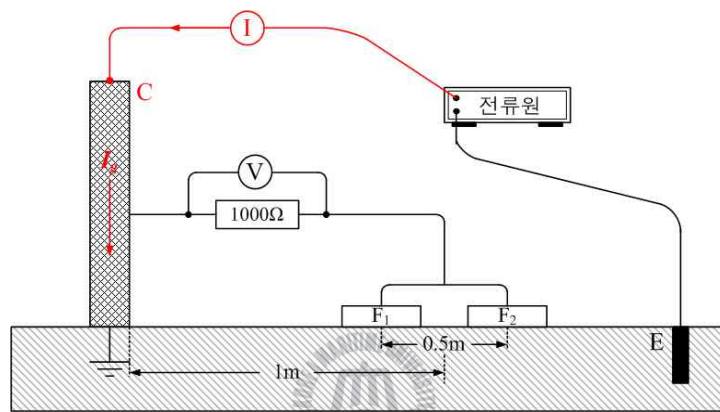
Fig. 2.12 Configuration of fall-of-potential method

### 2.2.3 위험전압 특성

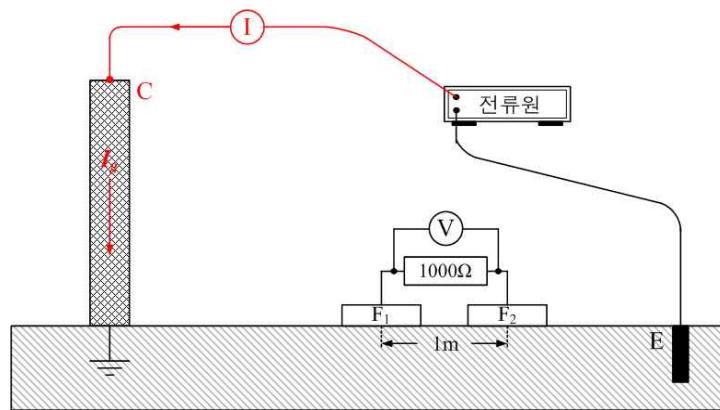
#### 가. 발판전극법

위험전압의 측정을 위한 실험계는 접지극 E와 전류보조극 C, 높이 1 [m]의 구조물 및 발판전극, 인체저항을 이용한 인체 모델법으로 그림 2.13 과 같이 구성된다. 고장전류가 구조물에 흐르는 경우를 가정하여 구조물 과 접지극 E을 연결하고, 전류보조극 C는 구조물에서 10 [m] 떨어진 지점

에 매설한다. 인체저항  $R_B$ 은 1 [k $\Omega$ ]의 탄소피막저항으로 전위차의 측정에 사용된다. 대지표면과 접촉하는 발판전극  $F_1$ 와  $F_2$ 는 성인의 평균 발표면적을 200 [cm<sup>2</sup>]로 가정하여 가로 20 [cm], 세로 10 [cm], 두께 1.5 [cm]의 직사각형 금속판을 사용하였다<sup>[29]</sup>.



(a) 접촉전압



(b) 보폭전압

그림 2.13 발판전극을 이용한 위험전압 측정

Fig. 2.13 Measurement of the risk voltage using footprint-electrode

## 나. 다전극법

### 1) 전위분포 비교

발판전극 대신 봉전극을 적용하기 위해서는 전위분포의 크기가 같아야 한다. 지락전류에 의한 지표면 발판전극과 봉전극의 전위분포를 표 2.6을 이용하여 나타낼 수 있다<sup>[30]</sup>. 발판전극의 전위분포는

$$V(x) = \frac{\rho I}{2\pi r} \sin^{-1} \frac{r}{x} \text{ [V]} \quad (2.18)$$

이며, 이를 대지저항률  $\rho$ 에 대한 식으로 변환하면 다음과 같다.

$$\rho = 6.28 \times r \times \sin^{-1} \frac{r}{x} \times R' \text{ [\Omega} \cdot \text{m]} \quad (2.19)$$

여기서  $r$  = 발판전극의 반지름 [cm]

$x$  = 전극에서 떨어진 지점 [m]

발판전극에서 1 [m] 떨어진 지점에 대한 전위분포는  $\rho = 3.604 R' \text{ [\Omega} \cdot \text{m]}$ 이며, 봉전극의 전위분포는

$$V(x) = \frac{\rho I}{2\pi kl} \ln \frac{1+\eta}{1-\eta} \text{ [V]} \quad (2.20)$$

이며, 대지저항률에 대한 식으로 나타내면 식 (2.21)과 같다.

$$\rho = 6.28 \times k \times h \times \ln \frac{1+\eta}{1-\eta} \times R \text{ [\Omega} \cdot \text{m]} \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } k &= \sqrt{1 - \left(\frac{r}{h}\right)^2} \\ \eta &= \sqrt{1 - \left(\frac{r^2 + \lambda}{h^2 + \lambda}\right)} \\ \lambda &= x^2 - r^2 \\ r &= \text{봉전극의 반지름 [mm]} \\ h &= \text{봉전극의 길이, [m]} \end{aligned}$$

거리 1 [m]에 대한 봉전극의 전위분포는  $\rho = 3.356 R [\Omega \cdot \text{m}]$ 로 나타낼 수 있다. 매설지점이 같으므로 대지저항률에 대한 두 전극의 전위분포가 같으려면 대지와 접촉하는 표면적에 대해  $R = R'$ 가 되어야한다. 따라서 발판전극의 표면적 200 [cm<sup>2</sup>]과 지름 12 [mm]의 봉전극의 대지에 접촉된 표면적이 같기 위해서는 봉전극의 매설깊이가 중요하다. 봉전극의 표면적 S는 매설된 기둥면적과 반구의 합으로 식 (2.23)을 이용하여 발판전극과 동일한 대지 표면적의 봉전극의 매설깊이 h를 계산하면 50 [cm]이다.

$$S = (2\pi \times r \times h) + (3\pi \times r^2) [\text{cm}^2] \quad (2.22)$$

## 2) 인체저항 ( $R_B$ )

그림 2.13에 나타낸 바와 같이 위험전압을 측정하기 위해서는 인체를 모의하기 위해 저항을 사용하며 시험전류의 크기에 따라 용량을 맞춰야하는 불편성을 지닌다. 하지만 본 논문에서 사용한 측정법은 이러한 인체저항을 사용하지 않고 인체에 가해지는 위험전압을 알 수 있다<sup>[31]</sup>.

$$V_T = \frac{V_{Tk}}{R_B}(R_{FT} + R_B) \text{ [V]}, R_{FT} = 1.5\rho_s \text{ [\Omega]} \quad (2.23)$$

$$V_S = \frac{V_{Sk}}{R_B}(R_{FS} + R_B) \text{ [V]}, R_{FS} = 6.0\rho_s \text{ [\Omega]} \quad (2.24)$$

여기서,  $R_F =$  발 저항 ( $3.0\rho$ ) [ $\Omega$ ]

$V_T, V_S =$  인체저항 없이 측정된 접촉 및 보폭전압 [V]

$V_{Tk}, V_{Sk} =$  인체저항으로 측정된 접촉 및 보폭전압 [V]

### 3) 적용실험

먼저 발판전극과 봉전극의 접촉전압에 대한 실험계는 1 [m]의 구조물과 발판전극, 발판전극과 전위차 비교를 위한 1 [m]길이의 봉전극 두 개 그리고 20 [cm]의 보조극을 사용한다. 구조물에서 10 [m] 떨어진 지점에 전류보조극 C를 매설하고 60 [V<sub>rms</sub>]를 인가하였다. 실험계의 대지저항률은 134 [ $\Omega \cdot m$ ]로서 식 (2.23)에 대해 인체저항 없이 측정된 접촉전압  $V_T$ 와 인체저항을 이용한 접촉전압  $V_{Tk}$ 를 비교하였다.

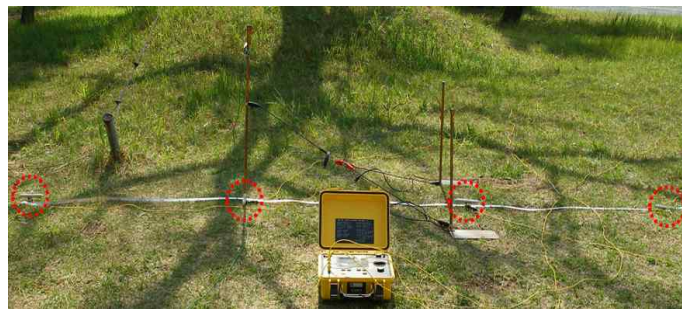


그림 2.14 접촉전압의 실험계

Fig. 2.14 Measurement system of the touch voltage

측정결과,  $V_T$ 는 두 전극이 거의 동일하나  $V_{T_k}$ 에 대해서는 발판전극과 봉전극이 달라지므로 식 (2.23)으로 연산된  $V_{T_k}'$ 에 대한 비교가 필요하다. 그 결과를 표 2.2에 나타내었다.

표 2.2 발판전극과 봉전극의 접촉전압

Table 2.2 The touch voltage of a footprint electrode and a rod

	발판전극	봉전극
$V_T$ [V]	25.224	25.120
$V_{T_k}$ [V]	16.288	19.60
$V_{T_k}'$ [V]	21.002	20.957
오차 [%]	28.95	6.923

$V_{T_k}$ 와 연산된  $V_{T_k}'$ 를 비교하면 봉전극 (6.923 [%])이 발판전극 (28.95 [%])보다 오차가 적음을 알 수 있다. 이는 IEEE Std. 80에서 규정하는 것과 같이 사람의 몸무게 (50 [kg], 70 [kg])만큼 발판전극을 눌러주지 않으면 대지표면의 접촉상태에 따라 오차가 크게 발생함을 나타낸다. 따라서 측정시 발판전극의 오차는 28.95 [%]보다 커질 수 있다. 반면에 봉전극의 경우는 대지에 매설되어 있으므로 위에서 누르는 힘과 대지표면의 접촉상태에 관계없이 일정한 측정이 가능하다. 따라서 위험전압 측정에서는 오차가 큰 발판전극보다는 봉전극을 사용하는 것이 더 효율적이다.

봉전극의 매설깊이 50 [cm]에 대해 인가전압의 변화시 나타나는 접촉전압을 측정하여 표 2.3에 나타내었다.

표 2.3 인가전압의 변화에 따른 50 [cm] 봉전극의 특성

Table 2.3 Characteristics of a 50 [cm] rod according to output voltage

인가전압 [V]	$V_T$ [V]	$V_{T_k}$ [V]	$V_{T_k}'$ [V]
40	15.83	13.20	13.18
50	21.12	16.895	17.59
60	25.16	20.09	20.95
100	42.743	34.00	35.59
120	51.93	41.38	43.24
150	65.134	52.18	54.233

발판전극과 봉전극을 사용하여 보폭전압 측정을 위한 실험계는 그림 2.15와 같이 구성되며, 이때의 대지저항률은  $72.8 [\Omega \cdot m]$ 이다. 그 외 측정 파라미터는 접촉전압 측정과 동일하게 적용하였다.



그림 2.15 보폭전압의 실험계

Fig. 2.15 Measurement system of the step voltage

발판전극과 봉전극의 인체저항  $R_B$ 의 유·무에 따른 보폭전압을 측정하고 식 (2.24)를 이용하여  $V_{S_k}$ 와  $V_{S_k}'$ 를 비교하면 표 2.4로 나타낼 수 있다.



표 2.4 발판전극과 봉전극을 이용한 보폭전압

Table 2.4 The step voltage using a footprint electrode and a rod

인가전압 [V]	발판전극 [mV]			봉전극 [mV]		
	$V_s$	$V_{sk}$	$V_{sk}'$	$V_s$	$V_{sk}$	$V_{sk}'$
40	642.4	242.3	447.1	766.6	546.7	533.6
50	823.3	285.5	573.0	1013.6	727.3	705.5

접촉전압에 비해 측정되는 위험전압의 크기는 작지만,  $V_{sk}$ 와  $V_{sk}'$ 를 비교하면 발판전극은 약 2배의 오차값을 나타내나 봉전극은 거의 동일한 값을 나타내므로 접촉전압 측정과 동일한 특성을 보인다.

표 2.5 인가전압에 따른 보폭전압의 특성

Table 2.5 Characteristics of step voltage according to output voltage

인가전압 [ $V_{rms}$ ]	$V_s$ [mV]	$V_{sk}$ [mV]	$V_{sk}'$ [mV]
40	766.6	546.7	533.6
50	1013.6	727.3	705.5
60	1229.3	883.3	855.6
70	1444.0	1034.0	1005.0
80	1655.0	1188.0	1151.9
90	1866.0	1339.3	1298.7
100	2077.2	1490.0	1445.7
110	2285.1	1636.0	1590.4
120	2497.2	1788.0	1738.0
130	2707.6	1943.0	1884.5
140	2917.0	2094.4	2030.2
150	3125.5	2248.4	2175.3

IEEE Std. 81.2에서 규정하는 접촉전압의 인체모델법은 그림 2.16과 같이 구조물과 두 발사이의 거리가 1 [m]이고 두 발사이의 거리가 0.5 [m]이므로 녹색 영역으로 표현가능하다. 이 영역을 피타고라스의 정리를 이용하면 구조물에서 각 발까지의 거리는 1.03 [m]이므로 구조물과 두발 사이의 거리는 구조물과 각 발 사이의 거리와 같다. 따라서, 대지저항률이 동일한 두 지점에 봉전극을 매설하고 접촉전압을 측정하였다.

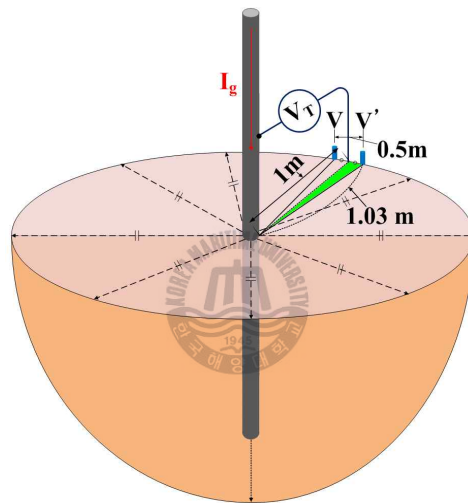


그림 2.16 봉전극을 이용한 접촉전압의 전위분포

Fig. 2.16 Potential distribution of the touch voltage using a rod

구조물에 40 [V<sub>rms</sub>]를 인가하여 구조물과 두발 사이의 전위차와 구조물과 두발사이의 중간지점에 대한 전위차를 측정하면 15.83 [V], 15.89 [V]로 동일하게 나타난다. 따라서 측정영역이 균일한 대지이고 등거리라면 봉전극을 하나만 사용해도 접촉전압의 측정이 가능하다. 하지만 보폭전압의 경우는 봉전극이 두 개 모두 필요하므로 접촉전압 측정시 사용되는 봉전극을 기준전극으로 사용하면 그림 2.17과 같이 접촉 및 보폭전압을 동시

에 측정할 수 있다. 본 논문에서 제작된 위험전압 측정시스템은 최대 6개의 전위차를 동시에 측정할 수 있기 때문에 접촉전압을 제외한 5개의 프로브를 이용하여 보폭전압의 여러 상황에 대해 분석이 가능하다.

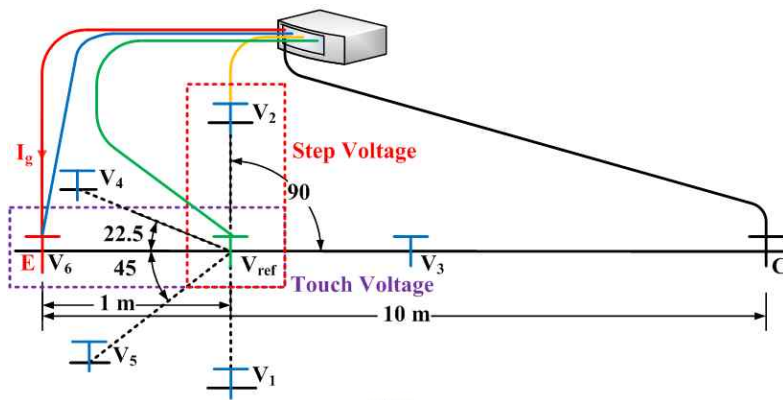
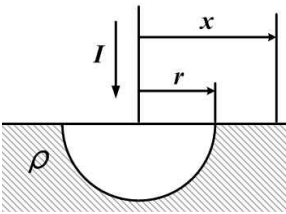
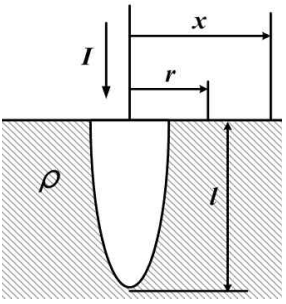
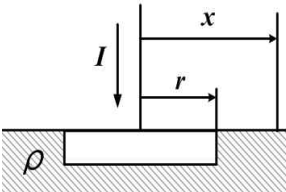


그림 2.17 다전극을 이용한 위험전압 측정

Fig. 2.17 The risk voltage measurement using multi-electrode

표 2.6 전극형상에 따른 전위분포와 전위경도

Table 2.6 Potential distribution and gradient by electrode types

전극형상	전위분포	전위경도
<p>반구상</p> 	$x > r$ $V(x) = \frac{\rho I}{2\pi x}$	$x > r$ $\left  \frac{dV(x)}{dx} \right  = \frac{\rho I}{2\pi x^2}$
<p>봉상</p> 	$x > r$ $V(x) = \frac{\rho I}{2\pi x} \ln \frac{1+\eta}{1-\eta}$ $k = \sqrt{1 - \left(\frac{r}{h}\right)^2}$ $\eta = \sqrt{1 - \left(\frac{r^2 + \lambda}{h^2 + \lambda}\right)}$ $\lambda = x^2 - r^2$	$x > r$ $\left  \frac{dV(x)}{dx} \right  = \frac{\rho I}{2\pi x \sqrt{x^2 - \lambda}}$ $\lambda = x^2 - r^2$
<p>판상</p> 	$x > r$ $V(x) = \frac{\rho I}{2\pi r} \sin^{-1} \frac{r}{x}$	$x > r$ $\left  \frac{dV(x)}{dx} \right  = \frac{\rho I}{2\pi x \sqrt{x^2 - r^2}}$

## 제 3 장 설계 및 제작

### 3.1 하드웨어의 구성

다기능 접지분석장치의 H/W는 그림 3.1과 같이 전원부(PART I), 측정부(PART II), 제어 및 연산부(PART III)로 구성된다.

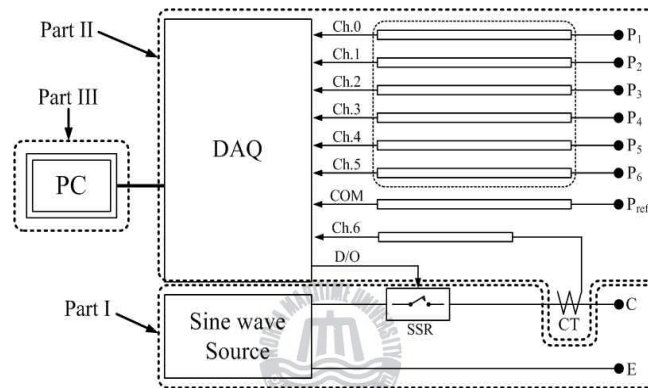


그림 3.1 다기능 접지분석장치의 구성

Fig. 3.1 Configuration of a multi-function ground analyzer

전원부의 정현파 발생장치는 최대 300 [V<sub>rms</sub>], 5 [A]의 출력과 45~500 [Hz]의 주파수범위를 가지며 0.1 [V], 0.1 [Hz]단위로 제어가 가능하다.



그림 3.2 정현파 발생장치

Fig. 3.2 The sin-wave power source

그림 3.3은 측정부를 나타낸다. DAQ(400 [kS/s], 16 bit, 16 input)는 전위 보조극(P<sub>1</sub>~P<sub>6</sub>)에서 6개의 전압신호와 변류기(0.1 [V/A], 40 [Hz]~1 [kHz](± 1 [%]))에서 인가전류의 데이터를 취득하며 SSR (Solid State Relay)을 출력단자에 연결하여 장치를 측정시퀀스에 맞게 제어하도록 구성하였다.

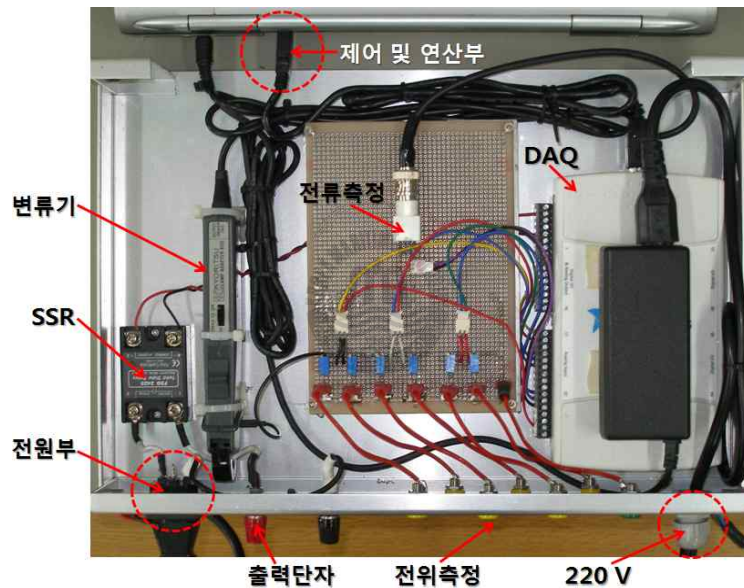


그림 3.3 측정부의 구성

Fig. 3.3 Configuration of measurement part

마지막으로 제어 및 연산부는 PC를 이용하여 LabVIEW 기반의 소프트웨어를 구동시키고 연산된 측정값을 화면에 나타낸다. 그림 3.4에 시제작된 다기능 접지분석장치를 나타내었다.

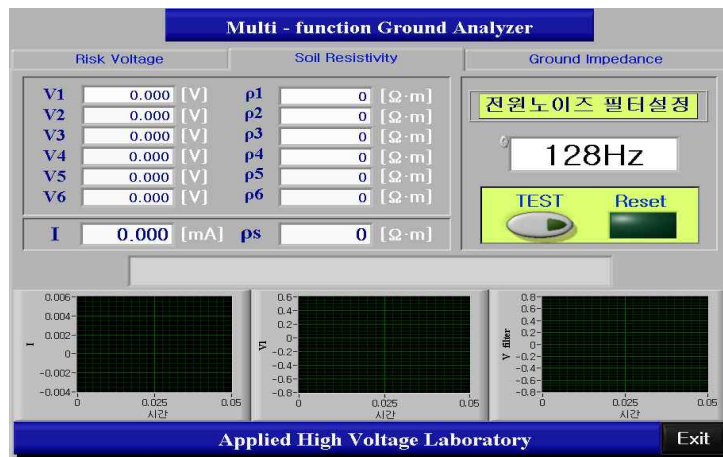


그림 3.4 시제작 다기능 접지분석장치

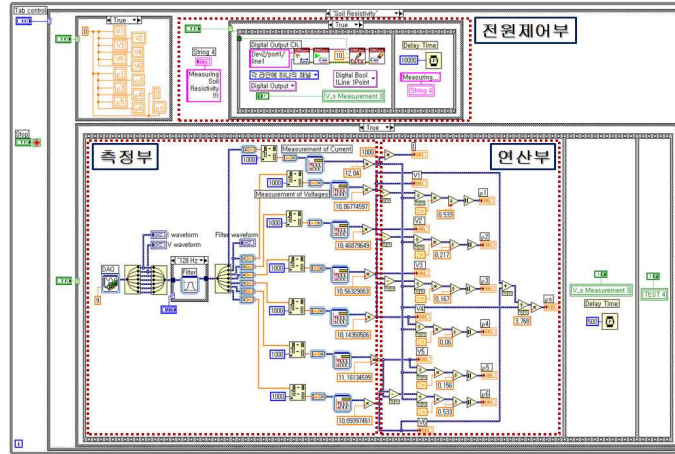
Fig. 3.4 The prototype multi-function ground analyzer

### 3.2 소프트웨어 설계

NI사의 LabVIEW로 제작된 소프트웨어는 측정화면과 프로그램 된 블록 다이어그램으로 구성되며 그림 3.5(b)와 같이 전원제어부, 전압 및 전류 측정부, 접지파라미터의 연산부로 나타낸다.



(a) 측정 프로그램의 예

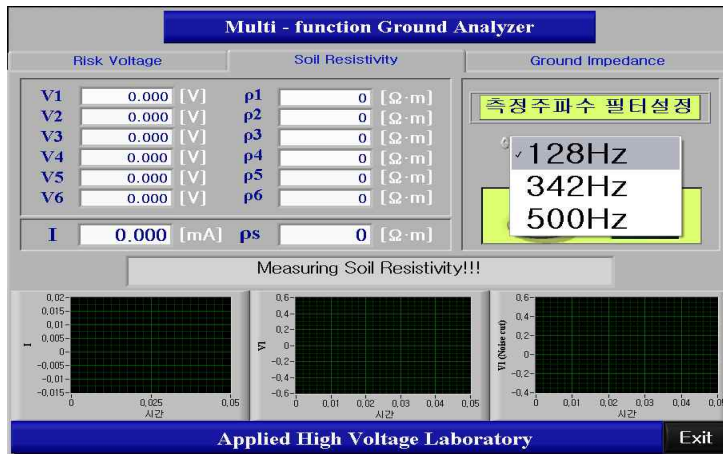


(b) 블록 다이어그램

그림 3.5 소프트웨어의 구성

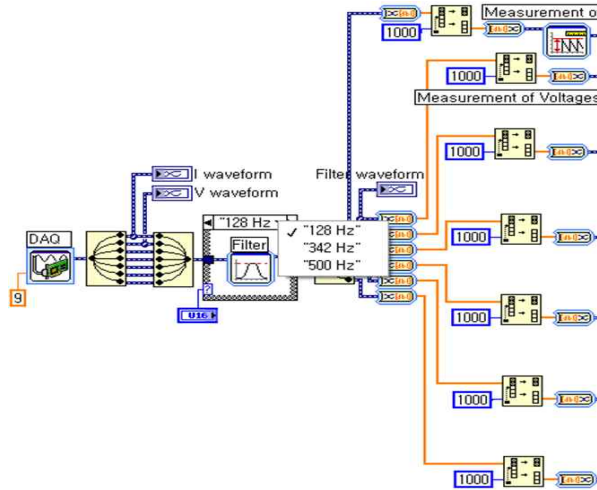
Fig. 3.5 The software configuration

설정화면을 통해 시험전원의 주파수를 128 [Hz], 342 [Hz], 500 [Hz]중에서 선택할 수 있도록 구성하였다.



(a) 측정 주파수 설정화면



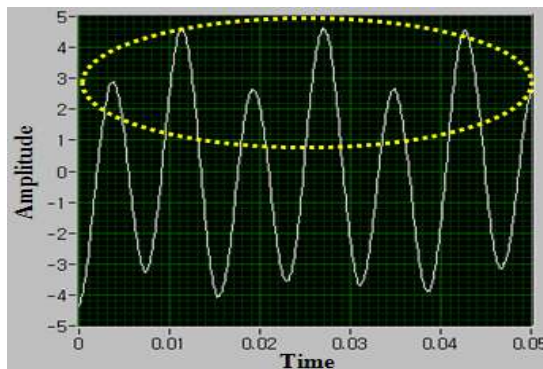


(b) 블록 다이어그램

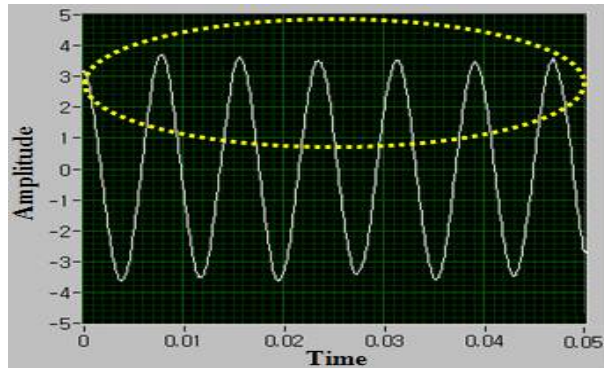
그림 3.6 BPF의 구성

Fig. 3.6 Configuration of the BPF

60 [Hz] 전원 노이즈에 의한 측정의 오차를 최소화하기 위하여 디지털 대역통과필터(Band Pass Filter)를 그림 3.6과 같이 적용하였다. 그림 3.7과 같이 BPF의 적용에 의해 60 [Hz]의 전원성분은 제거되고 시험주파수만을 검출되는 것을 알 수 있다.



(a) BPF 적용 전



(b) BPF 적용 후

그림 3.7 대역통과필터의 적용

Fig. 3.7 Application of the BPF



다기능 접지분석장치는 측정 데이터를 400 [kS/s]의 수평분해능으로 전송하며 측정 데이터는 설계한 프로그램에서 실효값으로 연산한다. 본 장치는 대지저항률과 접지임피던스 분석 시 측정시간을 10초로 설정하였고, 위험전압의 경우는 IEC 60364에 근거하여 3초 이내로 설정하였다.

### 3.3 특성평가

시제작된 다기능 접지분석장치에 정밀저항(1/2 [W], 1 [kΩ])과 무유도 저항(100 [W], 1 [kΩ])을 사용하여 특성평가를 수행하였으며, 실험에 사용된 장치의 사양은 표 3.1과 같다.

표 3.1 실험장치의 사양

Table 3.1 Specification of the experimental apparatus

항 목	모델명 및 특성	비 고
함수발생기	33220A 0.1 [Hz] ~ 20 [MHz]	Agilent사
전류 프로브	광대역변류기 1 [Hz] ~ 20 [MHz], 0.1 [V/A]	Pearson사
전압 프로브	P5200 DC ~ 100 [MHz]	Tektronix사
접지저항측정기	C.A 6470 16, 32 [V <sub>rms</sub> ], 45 [Hz] ~ 513 [Hz]	Chauvin arnouxs사
오실로스코프	DL 750 10 MS/s, 4 채널	Yokogawa사

함수발생기로 6개의 정밀저항에 6 [V<sub>p-p</sub>]를 인가하여 P<sub>1</sub>~P<sub>6</sub> 및 P<sub>ref</sub> 포트에 측정 데이터를 평가하였으며, 측정결과는 표 3.2와 같다.

표 3.2 1 [kΩ] (1/2 [W])에 대한 측정결과

Table 3.2 The measurement result using 1 [kΩ] (1/2 [W])

	Oscilloscope	Multi-function Ground Analyzer
P <sub>1</sub>	2.084	2.083
P <sub>2</sub>	1.732	1.732
P <sub>3</sub>	1.382	1.382
P <sub>4</sub>	1.036	1.035
P <sub>5</sub>	0.689	0.690
P <sub>6</sub>	0.345	0.345

또한, 무유도저항 (100 [W], 1 [kΩ])에 전압을 10~200 [V<sub>rms</sub>]로 인가시키면서 교정실험을 수행하였으며, 측정결과를 표 3.3에 나타내었다.

표 3.3 1 [kΩ] (100 [W])에 대한 측정결과

Table 3.3 The measurement result using 1 [kΩ] (100 [W])

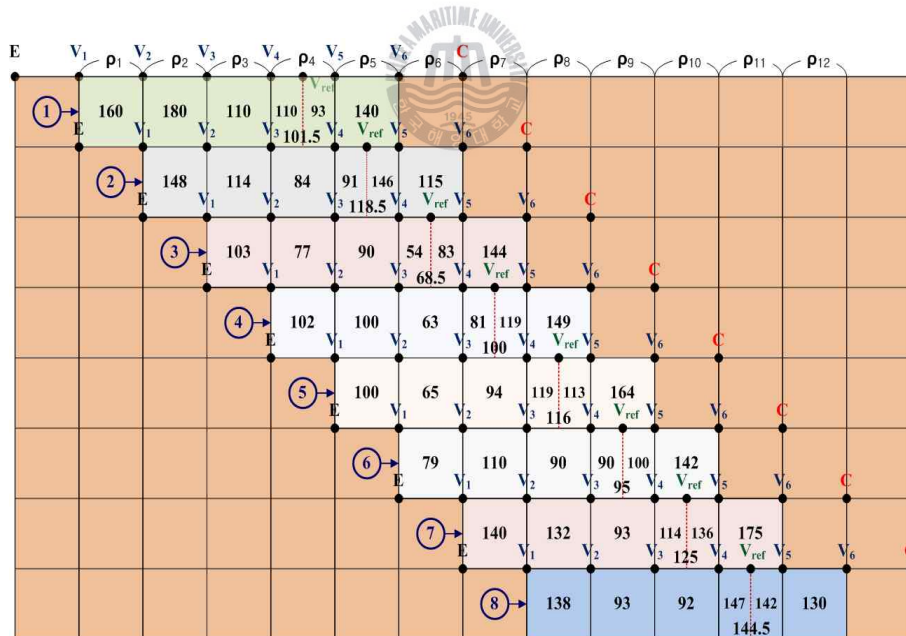
	Calibration					
	V [V]		I [mA]		R [Ω]	
인가전압[V]	OSC	MGA	OSC	MGA	OSC	MGA
10	9.10	9.10	9.08	9.08	1002.48	1002.48
40	39.08	39.11	39.00	39.01	1002.22	1002.78
80	81.10	81.08	80.90	80.91	1002.48	1002.10
100	100.20	100.095	100.00	99.892	1002.03	1002.03
120	120.33	120.34	120.00	120.22	1002.75	1002.83
140	140.26	140.39	140.25	140.27	1000.07	1000.86
160	160.84	160.72	160.60	160.59	1001.49	1000.81
200	200.90	200.83	200.60	200.61	1001.50	1001.10

## 제 4 장 측정 및 분석

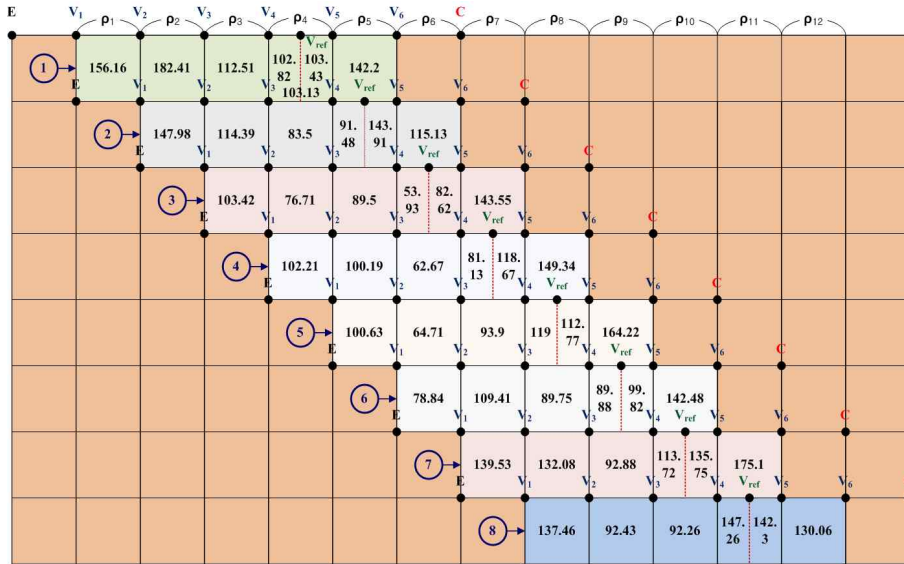
### 4.1 대지저항률

대지저항률을 측정하기 위해 실험계를 그림 4.1과 같이 구성하였으며, C극의 방향으로 1 [m] 간격으로 ①~⑧의 순서대로 옮겨가며 14 [m]에 대한 대지저항률을 측정하였다.

50 [V<sub>rms</sub>], 128 [Hz]의 실험전압을 인가하였으며 오실로스코프와 광대역 변류기, 차동프로브를 이용하여 동일한 실험계에서 비교측정을 수행하였다. 그림 4.2에 측정영역 ②에서의 측정파형을 나타내었다.



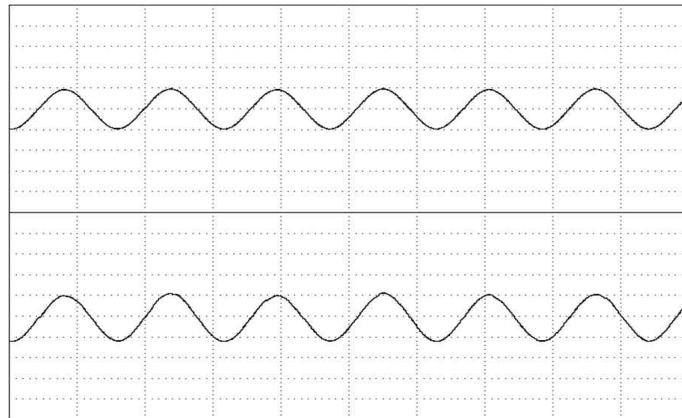
(a) 다기능 접지분석장치 측정



(b) 오실로스코프 측정

그림 4.1 보조극 주변의 대지저항률

Fig. 4.1 Soil resistivity around auxiliary electrodes



상 : 인가전류 [ 50 mA/div, 5 ms/div]

하 : 전위차 [ 2 V/div, 5 ms/div]

그림 4.2 측정파형의 예

Fig. 4.2 Typical waveform for soil resistivity

대지저항률 측정값은 오실로스코프와 비교하여 약  $\pm 2 [\Omega \cdot m]$ 의 편차를 나타내었다. 측정 ①과 ②의 중복되는 영역 ( $\rho_2$ )의 대지저항률이 다른 이유는 E-C극의 범위가 변화되면서 실험계를 구성하는 토양의 저항이 달라지기 때문이다. 측정영역 ①~⑧의  $\rho_S$ 를 합하여 평균 대지저항률  $\rho_A$ 을 구하면  $115 [\Omega \cdot m]$ 이며, 14 [m]의  $\rho_S$ 는  $118 [\Omega \cdot m]$ 로 측정되었다. 따라서 E-C극의 매설되는 위치가 같다면 중첩되는 영역의 대지저항률은 동일할 것으로 판단된다.

표 4.1 평균 대지저항률 측정

Table 4.1 Measurement of average soil resistivity

	14 [m]		7 [m]		
$\rho_S$	118 [ $\Omega \cdot m$ ]	측정①	140 [ $\Omega \cdot m$ ]	측정②	116 [ $\Omega \cdot m$ ]
		측정③	97 [ $\Omega \cdot m$ ]	측정④	103 [ $\Omega \cdot m$ ]
$\rho_A$	115 [ $\Omega \cdot m$ ]	측정⑤	108 [ $\Omega \cdot m$ ]	측정⑥	103 [ $\Omega \cdot m$ ]
		측정⑦	133 [ $\Omega \cdot m$ ]	측정⑧	120 [ $\Omega \cdot m$ ]

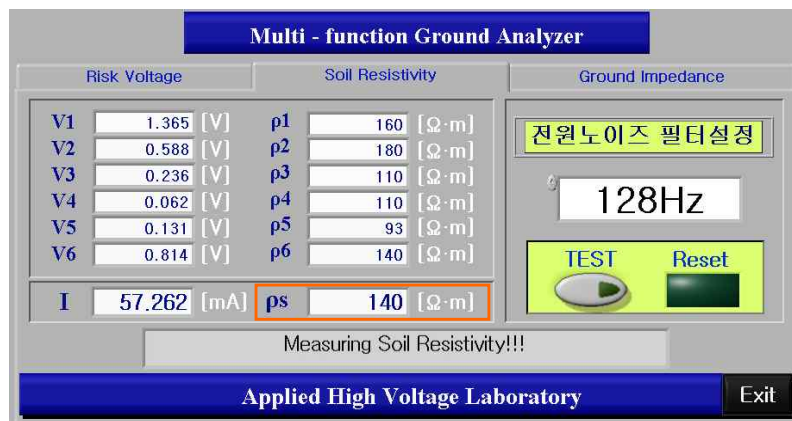
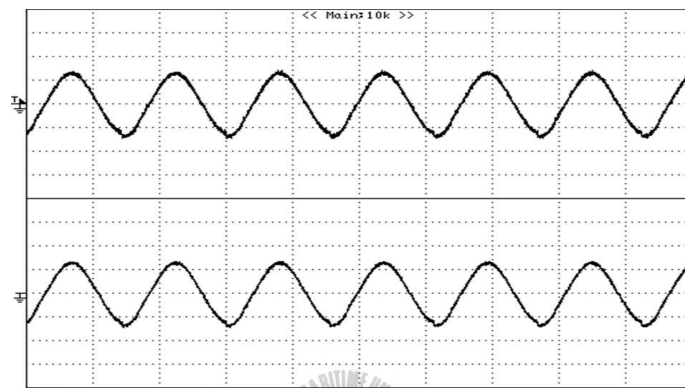


그림 4.3 대지저항률의 측정

Fig. 4.3 Measurement of soil resistivity

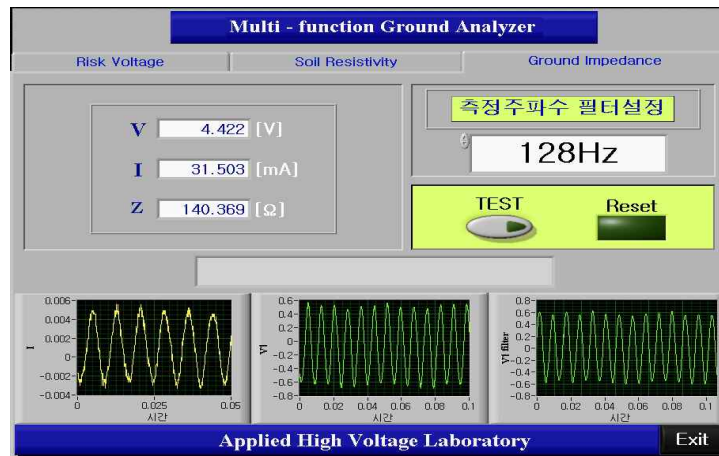
## 4.2 접지임피던스

접지극 E와 전류보조극 C의 거리는 7[m]로 하였으며 61.8[%]지점에 P극을 매설한 후 32 [V<sub>rms</sub>], 128 [Hz]을 인가하였다. 그림 4.4에 인가전류와 E-P<sub>1</sub>극간의 전위차를 측정된 파형과 측정화면의 예를 나타내었다.



상 : 인가전류 [ 35 mA/div, 5 ms/div]  
 하 : 전위차 [ 5 V/div, 5 ms/div]

(a) 측정파형의 예



(b) 측정화면의 예

그림 4.4 접지임피던스의 측정

Fig. 4.4 Measurement of ground impedance



상용화된 접지임피던스 측정장치 (C.A 6470, chauvin arnoux)와 오실로스코프 및 다기능 접지분석장치의 비교측정 결과를 표 4.2에 나타내었다.

표 4.2 접지임피던스의 측정결과(7 [m])

Table 4.2 Result of ground impedance measurement(7 [m])

	C.A 6470	Oscilloscope	Multi-function Ground Analyzer
V [V]	4.96	4.417	4.422
I [mA]	35.4	31.55	31.50
R [ $\Omega$ ]	140	140	140.4

측정거리 20 [m]에 대해 P<sub>1</sub>극을 12.4 [m]에 매설하고 주파수를 128 [Hz], 342 [Hz], 500 [Hz]로 변화시켜 접지임피던스를 측정하였다. 이 때의 대지 저항률은 115 [ $\Omega \cdot m$ ]이다. 표 4.3과 같이 측정주파수의 범위가 증가할수록 감소하는 용량성 특성을 나타낸다.

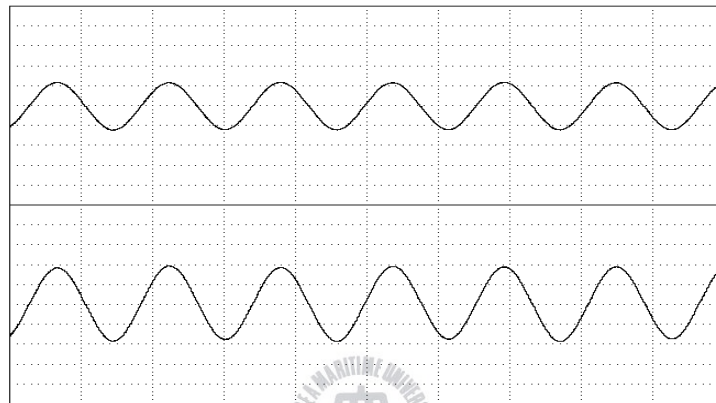
표 4.3 주파수 변화에 따른 접지임피던스(20 [m])

Table 4.3 Ground impedance as a function of frequency(20 [m])

Freq. [Hz]	C.A 6470			Oscilloscope			Multi-function Ground Analyzer		
	V [V]	I [mA]	R [ $\Omega$ ]	V [V]	I [mA]	R [ $\Omega$ ]	V [V]	I [mA]	R [ $\Omega$ ]
128	6.67	51.1	131	6.188	47.53	130.20	6.190	47.62	130.00
342	6.66	51.4	130	6.265	48.80	128.38	6.237	48.62	128.28
500	6.69	51.9	129	6.188	48.59	127.34	6.196	48.60	127.49

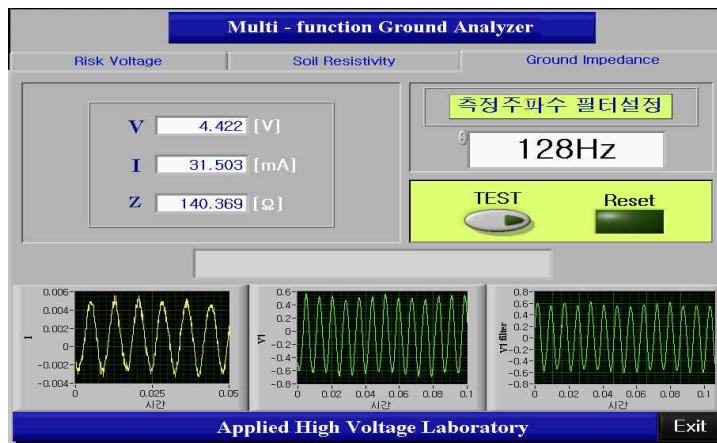
### 4.3 위험전압

고압계통의 지락고장에 기인하는 위험전압을 측정하기 위해 E-C극에 50~200 [V<sub>rms</sub>]를 적용하여 접촉 및 보폭전압을 동시에 측정하였다. 또한 오실로스코프의 측정값과 비교하여 성능평가를 하였다.



상 : 인가전류 [0.2 A/div, 5 ms/div]  
 하 : 전위차 [1 V/div, 5 ms/div]

(a) 측정파형의 예 (P<sub>5</sub>)



(b) 측정프로그램의 예

그림 4.5 위험전압의 측정

Fig. 4.5 Typical waveform of risk voltage

위험전압 측정에 앞서 접촉전압 및 보폭전압의 측정영역에 대한 대지 저항률을 측정하였으며 실험계의 구성을 그림 4.6에 나타내었다.

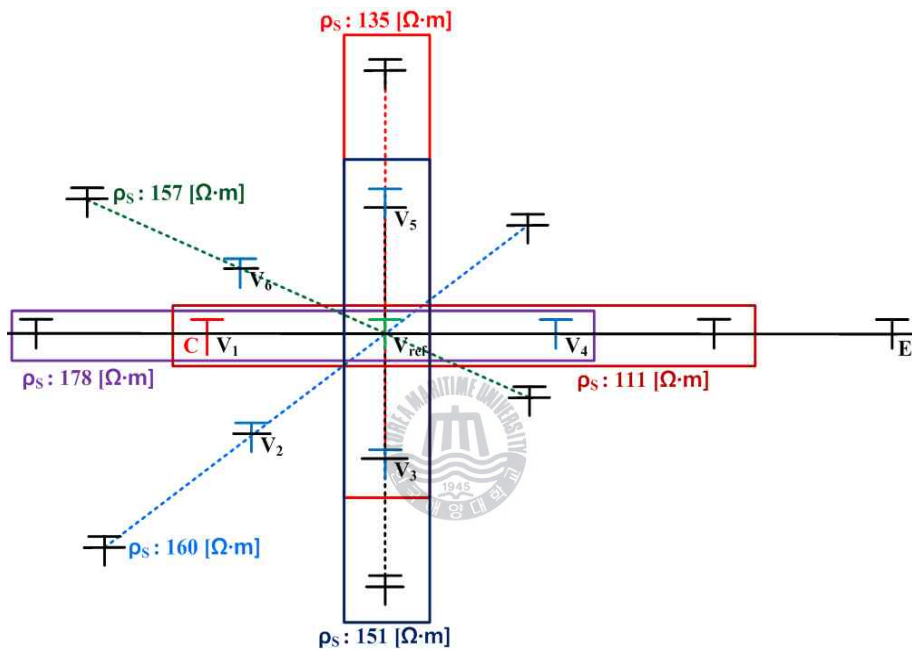


그림 4.6 실험계의 구성

Fig. 4.6 Configuration of the experimental system

전위차의 크기는 P<sub>1</sub>에서 측정된 접촉전압이 가장 크며, 보폭전압의 경우는 구조물과 가까울수록 그리고 E-C극에 평행할수록 커지는 현상을 나타낸다. 또한 오실로스코프의 측정결과와 비교하여 최대 2[%]의 편차를 나타내었다.

표 4.4 접촉전압의 측정결과

Table 4.4 Result of risk voltage measurement

	V <sub>1</sub> (touch)	V <sub>2</sub> (45°)	V <sub>3</sub> (90°)	V <sub>4</sub> (180°)	V <sub>5</sub> (270°)	V <sub>6</sub> (337.5°)
50 [V]	22.6 (22.4)	0.26 (0.26)	0.56 (0.55)	2.95 (2.94)	0.4 (0.39)	2.34 (2.34)
100 [V]	50.6 (50.2)	0.55 (0.54)	1.21 (1.2)	6.32 (6.31)	0.77 (0.76)	5.21 (5.19)
150 [V]	73.6 (73.4)	0.82 (0.81)	1.77 (1.76)	9.13 (9.11)	1.09 (1.07)	7.55 (7.54)
200 [V]	95.8 (95.6)	1.02 (1.0)	2.35 (2.33)	12.13 (12.1)	1.44 (1.42)	9.98 (10)

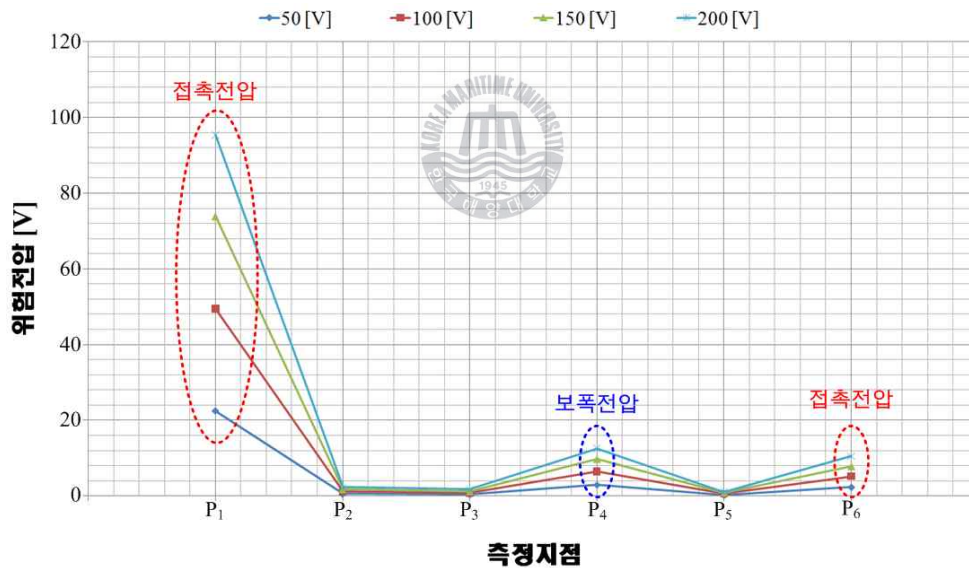
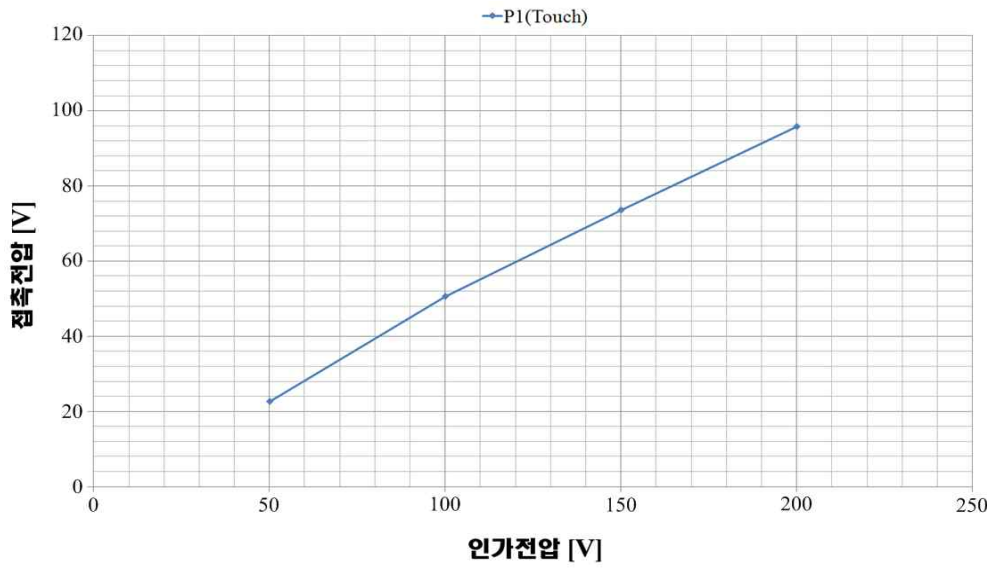


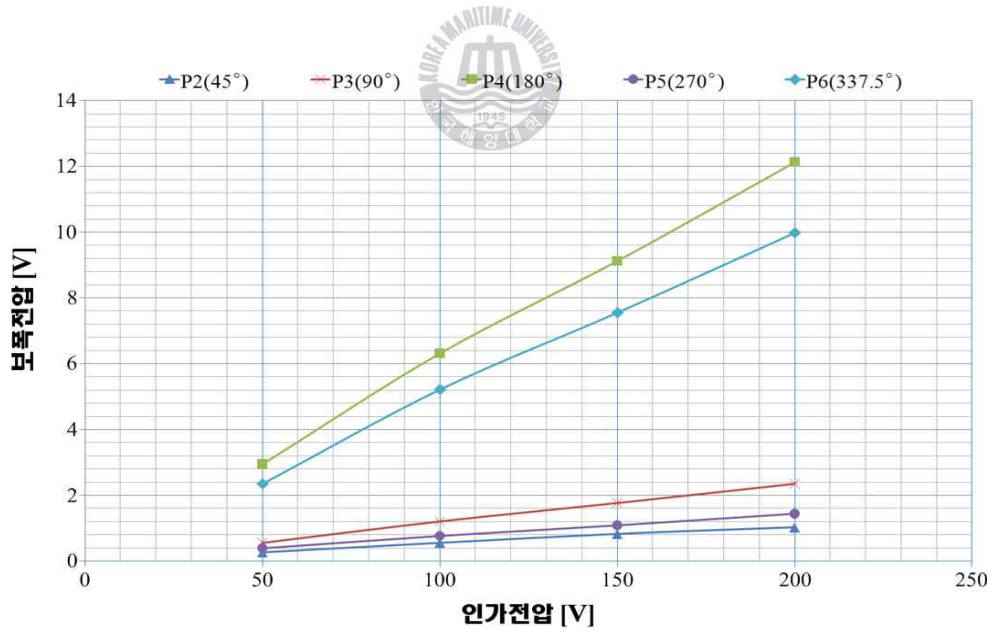
그림 4.7 다전극을 이용한 위험전압의 측정결과

Fig. 4.7 Result of risk voltage measurement by multi-electrode

측정된 접촉전압 및 보폭전압은 인체저항  $R_B$ 의 유·무에 상관없이 일정한 비율로 선형적인 특성을 나타내었다.



(a) 접촉전압



(b) 보폭전압

그림 4.8 위험전압의 특성분석

Fig. 4.8 Analysis of risk voltage

이 관계를 식 (4.1)로 나타내면,

$$V_r = V_k \frac{\text{실제고장전류}}{\text{측정인가전류}} [V] \quad (4.1)$$

여기서,  $V_r$  = 실제고장전류에 의한 위험전압 [V]

$V_k$  = 측정인가전류에 의한 위험전압 [V]

그러므로 대규모 접지시스템에 큰 측정전류를 직접 흘리지 않더라도 식 (4.1)로부터 접지시스템의 위험전압을 근사적으로 평가할 수 있을 것이다.



## 제 5 장 결 론

본 연구에서는 다전극을 이용하여 중요 접지파라미터인 대지저항률, 접지 임피던스, 위험전압을 분석하기 위한 다기능 접지분석장치를 설계 및 제작하였다. 또한, 다전극으로 접지파라미터를 분석하기 위한 이론을 다양한 실험을 통해 확립하였다. 본 분석장치를 이용하여 저항과 대지에서의 특성평가를 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 다기능 접지분석장치에 사용된 정현파 발생장치는 출력전압 0~300 [V<sub>rms</sub>], 주파수 45~500 [Hz]범위에서 0.1 [V] 및 0.1 [Hz] 단위로 제어 가능하다.
- 2) 인가전류 및 전위차 측정에는 DAQ(400 [kS/s], 16 bit, 16 input)를 사용하였으며 대지에 유입되는 전원노이즈를 제거하기 위해 디지털 대역통과필터를 적용하였다.
- 3) 1 [k $\Omega$ ] 무유도저항을 이용한 특성평가 결과, 다기능 접지분석장치는  $\pm 1$  [%]이내의 오차를 갖는다.
- 4) 대지저항률 측정은 비등간격에 대한 개별적 대지저항률 측정이 가능하므로 보조극의 위치 선정이 편리하며, Schlumberger법을 이용하여 평균 대지저항률을 동시에 분석할 수 있다.
- 5) 접지임피던스 측정은 IEEE Std. 81에 규정된 전위강하법을 사용하며, 오실로스코프와 측정값을 비교하면 약 2 [%]의 편차를 나타낸다.
- 6) 위험전압 측정에는 IEEE Std. 81의 인체모델법의 발판전극 대신 봉전극을 사용하였으며, 인체저항 없이 위험전압의 측정이 가능하며 다전극을 이용하여 접촉 및 보폭전압을 동시에 측정할 수 있다.

이상의 결론으로부터 다기능 접지분석장치는 전위차와 인가전류를 측정하여 대지저항률, 접지임피던스 및 위험전압을 분석할 수 있으며 오실로스코프와 측정값의 비교시 개별적 대지저항률 2[%]이내의 편차를 가진다.

본 장치를 이용하면 평균 대지저항률 및 개별 대지저항률을 동시에 측정할 수 있으며 접지임피던스 및 위험전압을 동시에 측정할 수 있어 효율적인 접지성능평가가 가능할 것으로 기대된다.





## 참 고 문 헌

- [1] Ronald P. O. Riley, "Electrical Grounding : Bringing Grounding Back to Earth", DELMAR, pp.40~43, 2002.
- [2] Chien-Hsing Lee, A. P. Sakis Meliopoulos, "A Comparison of IEC 479-1 and IEEE Std. 80 on Grounding Safety Criteria", Proc. Natl. Sci. Counc. ROC(A), Vol. 23, No. 5, pp.612~621, 1999.
- [3] 高橋 健彦, 金聖模, 李炯秀, "接地技術入門", オーム社, pp.203~218, 1997.
- [4] 문병두, "접지계통에서 임피던스와 위험전압의 주파수 의존에 관한 연구", 석사학위논문, 한국해양대학교 대학원, p.6, 2009.
- [5] IEEE Std. 80, "IEEE Guide for safety in AC Substation Grounding", p.5, 2000.
- [6] TTAS.KO-04.0041, "Measurements of Earth Resistivity", p.2, 2005.
- [7] IEEE Std 367, "IEEE Recommended Practice for Determining the Electric Power Station Ground Potential Rise and Induced Voltage From a Power Fault", p.2, 1996.
- [8] IEEE Std. 80, "IEEE Guide for safety in AC Substation Grounding", pp.51~52, 2000.
- [9] TTAS.KO-04.0041, "Measurements of Earth Resistivity", pp.3~4, 2005.
- [10] 김일권, "봉상접지극의 과도 임피던스 특성", 석사학위논문, 한국해양대학교 대학원, p.5, 2001.

- [11] TTAS.KO-04.0042, "Measurements of Ground Impedance", pp.1~2, 2005.
- [12] 이복희, 이승철, "접지의 핵심 기초 기술", 의제, pp.65~69, 2000.
- [13] S. BOURG, B. SACEPE, T. DEBU, "Deep earth electrodes in highly resistive ground: frequency behaviour", IEEE, pp.584~589, 1995.
- [14] M. Khalifa, "High Voltage Engineering ; Theory and Practice", Marcel Dekker, pp. 331~356, 1990.
- [15] M. Abdel-Salam, A. El-Morshedy et al., "High-Voltage Engineering", Marcel Dekker, pp. 419~428, 2000.
- [16] Mohamed Nayel, Jie Zhao, Jinliang He, Zongyuan Cai, Qi Wang, "Study of Step and Touch Voltages in resistive/Capacitive Ground due to Lightning Stroke", CEEM/Dalian, pp.56~60, 2006.
- [17] Giuseppe Parise, Umberto Grasselli, Roberto Iaconelli, "MEASUREMENTS OF TOUCH AND STEP VOLTAGES ADOPTING MULTI CURRENT AUXILIARY ELECTRODES", IEEE, pp.3187~3186, 2000.
- [18] IEEE Std. 80, "IEEE Guide for safety in AC Substation Grounding", pp.27~28, 2000.
- [19] IEC 61936-1, "Power installations exceeding 1 kV a.c. Part 1: Common rules", 2002.
- [20] 설동화, 장선권, "접지기술과 단체표준", 삼보, pp. 127~136, 2008.
- [21] J. Ma, F. P. Dawalibi, "STUDY OF INFLUENCE OF BURIED METALLIC STRUCTURES ON SOIL RESISTIVITY MEASUREMENTS", IEEE Transactions on power Delivery, Vol.

- 13, No. 2, pp. 356~365, 1998.
- [22] 엄주홍, 조성철, 이태형, 이복희, “심매설 접지봉의 위치결정을 위한 대지구조 분석방법들의 비교분석”, 조명·전기설비학회논문지, 제21권, 제7호, pp.37~45. 2007.
- [23] IEEE Std. 81, “IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System”, pp.19~23, 1983.
- [24] 井上一男, “接地抵抗測定における問題点”, 日本電氣設備學會誌, pp.878~898, 1990.
- [25] TTAS.KO-04.0041, “Measurements of Earth Resistivity”, p.5, 2005.
- [26] Gish. O., and Rooney. W., “Measurement of resistivity of large masses of undisturbed earth”, Terrestrial Magnetism & Atmospheric Electricity, Vol.30, pp.161~188. 1925.
- [27] TTAS.KO-04.0041, “Measurements of Earth Resistivity”, pp.5~6, 2005.
- [28] IEEE Std. 81, “IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System”, pp.11~16, 1983.
- [29] IEEE Std. 81.2, “IEEE Guide for safety in AC Substation Grounding”, p.52, 1991.
- [30] 양정재, “접지저항의 계절적 변동 및 지락에 의한 전위분포”, 석사학위논문, 인하대학교 대학원, P.15, 1998.
- [31] IEEE Std. 81.2, “IEEE Guide for safety in AC Substation Grounding”, p.55, 1991.