

# 대전극 대지저항률 측정시스템

## Soil Resistivity Measurement System using Multi-auxiliary Electrodes

김황국\*      최재성\*      장운용\*      박대원\*\*      길경석†  
Hwang-Kuk Kim    Jae-Sung Choi    Un-Yong Jang    Dae-Won Park    Gyung-Suk Kil

### ABSTRACT

This paper describes the design and fabrication of a soil resistivity measurement system using 9 auxiliary electrodes; 6 potential-, a reference-, a current-, and a ground- electrode. The measurement system is composed of a current source (300 [Vrms], 5 [A], Sine-wave, 45 ~ 500 [Hz]), a data acquisition (400 [kS/s], 16 bit, 16 Ch.), and an operating program based on a graphical software of National Instrument Co.

The proposed system is convenient for choosing the position of electrodes because the soil resistivity is calculated having no concern with the length and the spacing between electrodes.

## 1. 서 론

접지는 고장 또는 이상전류를 대지로 방출시켜 대지의 전위상승(Ground Potential Rise)을 억제함으로써 감전이나 설비의 사고를 방지하는 역할을 한다[1]. 현재 접지성능은 접지임피던스와 위험전압(접촉 및 보폭전압)등으로 평가되며 대지저항률에 영향을 받는다. 대지저항률은 대지가 구성하고 있는 물질에 대한 단위체적의 저항이며, 토양과 대지구조의 변화에 따라 특성이 달라지므로 접지를 시설하고자 하는 영역에 대한 분석은 매우 중요하다.

대지저항률 측정에는 일반적으로 정확도가 높은 4 전극법이 널리 사용되고 있으나 측정 전극간 거리와 보조극의 매설깊이에 따라 측정값의 변동이 크고, 측정영역별로 상세한 분석은 어렵다[2]. 이러한 경우, 측정 영역을 세분화하여 4 전극법으로 재측정이 필요하므로 비경제적이고, 극간거리에 따른 측정값의 오차가 커지게 된다. 따라서 본 논문에서는 보다 간편하고 정확하게 대지저항률을 분석하기 위해 9 개의 전극(6 전위극, 기준전극, 전류극 및 접지극)을 이용하는 대지저항률 측정시스템을 설계 및 제작하였다.

## 2. 이 론

### 2.1 기준전극의 위치

정확한 대지저항률 측정을 위해서는 기준전극(Vref)이 0 전위에 가장 근접하고 전위의 변동이 적은 지점에 매설되어야한다[5]. 그림 1(a)과 같이 E-C극의 50 [%] (Vref1)과 61.8 [%] (Vref2)지점을 기준전극 위치로 모의하여, 정현파전원장치(32 [Vrms], 128 [Hz])로 전압을 인가한 후 OSC로 전위차 및 인가전류를 측정하였다. 측정된 전위차는 [V4-Vref2] 영역이 16.7 [mV]으로 가장 0 전위에 가까우며 인가전류는 34.3 [mA]로 동일하다. 이에 반해 [V3-Vref1] 영역은 83.6 [mV]의 전위차가 측정되며, Vref1영역에서 인

† 책임저자 : 정희원, 한국해양대학교 전기전자공학부, 교수  
E-mail : kilgs@hhu.ac.kr

TEL : (051)410-4414 FAX : (051)403-1127

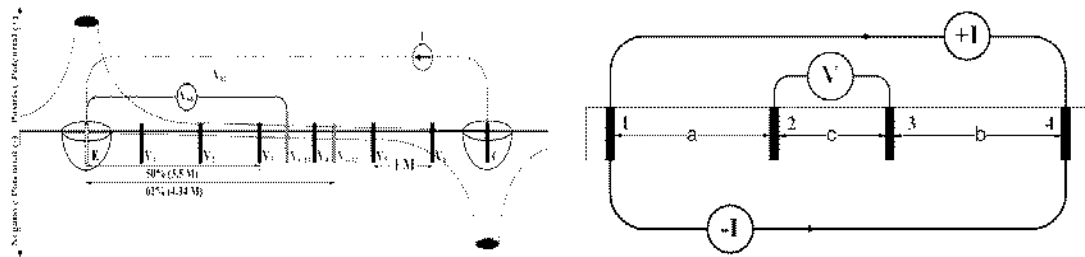
\* 정희원, 한국해양대학교 전기전자공학부, 석사과정

\*\* 정희원, 한국해양대학교 전기전자공학부, 박사과정

가전류가 변화되므로 대지저항률 측정값에 오차가 생기므로 기준전극의 위치는 B-C극의 61.8 [%]지점이 다. 표 1에서 [V3-Vref1] 과 [Vref1-V4] 영역의 대지저항률 합이 평균은 [V3-Vref2] 영역과 동일하며, [V4-Vref2]와 [Vref2-V5]의 대지저항률 합의 평균은 [Vref1-V5] 영역과 같다. 따라서 기준전극으로 분리된 영역의 평균값은 이전 영역의 대지저항률과 동일하다.

표 1. 기준전극의 위치에 따른 대지저항률

50[%]지점			
측정 영역	전위차[mV]	인가전류[mA]	대지저항률[Ω·m]
V <sub>1</sub> -V <sub>ref1</sub>	764	34.2	161.23
V <sub>2</sub> -V <sub>ref1</sub>	296	34.2	179.73
V <sub>3</sub> -V <sub>ref1</sub>	83.6	34.2	185.22
V <sub>ref1</sub> -V <sub>4</sub>	76.2	34.1	168.83
V <sub>ref1</sub> -V <sub>5</sub>	149	34.1	61.78
V <sub>ref1</sub> -V <sub>6</sub>	497	34.1	120.24
61.8[%]지점			
측정 영역	전위차[V]	인가전류[mA]	대지저항률[Ω·m]
V <sub>1</sub> -V <sub>ref2</sub>	861	34.3	161.45
V <sub>2</sub> -V <sub>ref2</sub>	391	34.3	180.56
V <sub>3</sub> -V <sub>ref2</sub>	177	34.3	175.75
V <sub>4</sub> -V <sub>ref2</sub>	16.7	34.3	50.96
V <sub>ref2</sub> -V <sub>5</sub>	57.2	34.3	67.13
V <sub>ref2</sub> -V <sub>6</sub>	407	34.3	120.16



(a) 대지전위분포와 기준전극의 위치 (b) 불균등간격의 전위차 측정  
그림 1. 보조극 주변의 대지저항률 측정법

## 2.2 보조극 주변의 대지저항률 측정

실제 대지는 지층별로 토양이 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 주변의 대지저항률과 평균대지저항률의 측정법을 모의하였다[3].

그림 1(b)의 실험계에 반구상의 전극을 매설하고 전류 I [A]가 유입되면 전극 주변의 대지에 방사형태로 유출된다. 이때 전극에서 거리 r [m] 지점에 떨어진 지점에 대한 전위차를 측정하면,

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} [V] \quad (1)$$

이다. 그림 4(a)의 전극 1, 2, 3, 4에 대해 극간의 거리가  $a \neq c \neq b$ 로 전극 1에 유입하는 전류 (+I)에 대해 식 (1)을 이용하여 전위차를 구하면,

$$V_{21} = \frac{\rho I}{2\pi a} [V], \quad V_{31} = \frac{\rho I}{2\pi(a+c)} [V] \quad (2)$$

이다. 따라서 전극 2와 3 사이의 전위차(VA)는

$$V_A = \frac{\rho I}{2\pi a} - \frac{\rho I}{2\pi(a+c)} [V] \quad (3)$$

반대로, 전극 4로부터 유출하는 전류 (-I)에 대해 같은 방법으로 계산하면,

$$V_B = \frac{\rho I}{2\pi b} - \frac{\rho I}{2\pi(b+c)} [V] \quad (4)$$

이다. 전극 2와 3 사이에 발생하는 전위차는  $V_A$ 와  $V_B$ 의 합으로 이를 대지저항률  $\rho$  [ $\Omega \cdot m$ ]로 나타내면 다음과 같다[4].

$$\rho = \frac{2\pi R}{\left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} - \frac{1}{b+c} - \frac{1}{a+c}\right)} [\Omega \cdot m] \quad (5)$$

여기서,  $R$  [ $\Omega$ ]은  $[V1-Vref2]$  영역에서  $[V2-Vref2]$  영역의 전위차를 뺀  $[V1-V2]$  영역의 전위차를 인가 전류와 나눈 값이다.

### 2.3 평균대지저항률 측정

평균대지저항률은 Schlumberger법을 이용하여 그림 2와 같이 실험계를 구성한다. 실험계의 중심에 가상의 0 점을 두고 E-0, 0-C의 거리( $a$  [m])와 E-C극에 가장 가까운  $[V2-V3]$  사이의 거리( $b$  [m])을 식 (6)에 대입하여 평균대지저항률을 측정한다. 이때,  $R$  [ $\Omega$ ]은  $[V2-Vref]$ 와  $[Vref-V3]$ 의 전위차 합에 대한 전류  $[A]$ 의 비로 나타낸다[6].

$$\rho_S = \pi \left( \frac{a^2}{b} - \frac{b}{4} \right) R [\Omega \cdot m] \quad (6)$$

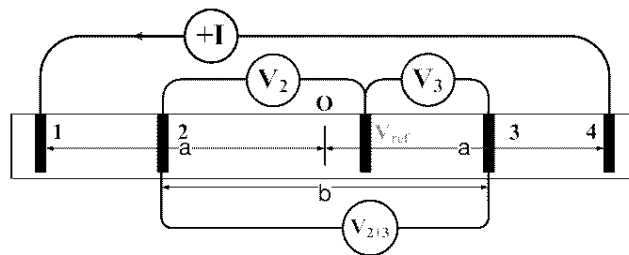


그림2. 평균대지저항률 측정법

## 3. 측정시스템의 설계 및 제작

### 3.1 하드웨어

대전극 대지저항률 측정시스템의 H/W는 그림 3과 같이 PART I, PART II, PART III로 구성된다. PART I에 사용되는 정현파 발생회로는 최대 300 [Vrms], 5 [A]의 출력과 45 ~ 500 [Hz]의 주파수범위를 가지며 0.1 [V], 0.1 [Hz]단위로 제어가 가능하다. PART II의 DAQ(400 [kS/s], 16bit, 16 Ch.)는 6 개의 전압 Port(Ch0~5)와 1 개의 변류기(Ch6)로부터 Data를 전송받고 디지털 형식으로 변환하여 PC에 전송한다. 출력전압의 제어를 위해 SSR(Solid State Relay)을 DAQ의 DIO(5 [V])에 연결하였다. PART III의 PC는 소프트웨어를 구동시키고 측정값을 화면에 나타내는 역할을 한다.

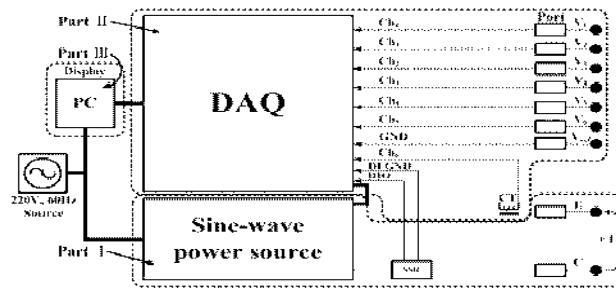
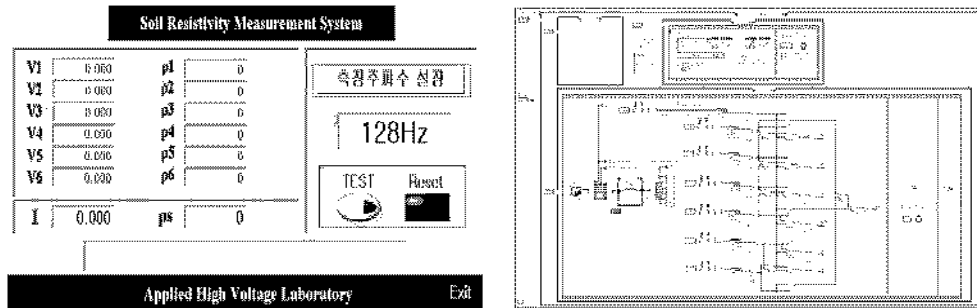


그림3. 하드웨어의 구성

### 3.2 소프트웨어

NI사의 LabVIEW를 사용하여 제작된 소프트웨어는 측정 Process, Data 가공, 연산으로 구성되며 PC에 설치된다. 그래픽 기반인 사용자 인터페이스는 터치스크린으로 작동된다. 측정 process는 10 초 동안 출력전압이 대지로 인가된다. 1 초 동안의 데이터를 측정하여 연산된 결과를 PC 화면에 나타낸다.

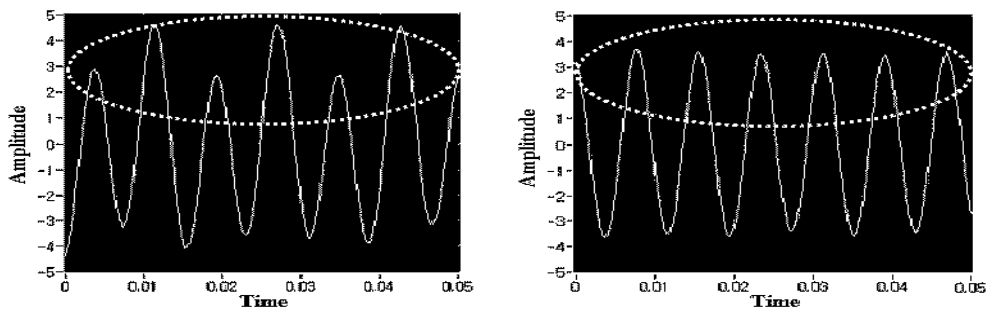


(a) 측정프로그램 화면

(b) 블록 다이어그램

그림4. 소프트웨어의 구성

전위차를 측정할 때, 전원노이즈(60 [Hz])의 유입에 의한 앨리어싱을 방지하기 위해 그림 5와 같이 BPF를 적용하였다. 사용자 인터페이스의 측정주파수(128 [Hz], 342 [Hz], 500 [Hz])를 선택함으로써 BPF의 주파수범위는 자동으로 조정된다.



(a) 128 [Hz]에 중첩된 60 [Hz]파형

(b) 60 [Hz]제거 파형

그림5. BPF의 적용

### 3.3 교정실험

1 [kΩ] 양단에 출력전압을 인가한 후 6개의 측정포트에 대한 교정실험을 하였다. 광대역변류기(1 [Hz] ~ 20 [MHz], 0.1 [V/A]), 차동프로브(P5200, DC ~ 20 [MHz])로 인가전류 및 전위차를 측정하고 OSC와 비교하면 다전극 대지저항을 측정시스템의 오차범위는 ± 1 [%] 이내이다.

표 1. 교정실험의 결과

OSC			
출력전압[V]	전위차[V]	인가전류[mA]	저항[Ω]
10	9.10	9.08	1002.48
40	39.08	39.00	1002.22
80	81.10	80.90	1002.48
100	100.20	100.00	1002.03
120	120.33	120.00	1002.75
140	140.26	140.25	1000.07
160	160.84	160.60	1001.49
200	200.90	200.60	1001.50

다전극 대지저항률 측정시스템			
출력전압[V]	전위차[V]	인가전류[mA]	저항[Ω]
10	9.10	9.08	1002.48
40	39.11	39.01	1002.78
80	81.08	80.91	1002.10
100	100.095	99.892	1002.03
120	120.34	120.22	1002.83
140	140.39	140.27	1000.86
160	160.72	160.59	1000.81
200	200.83	200.61	1001.10

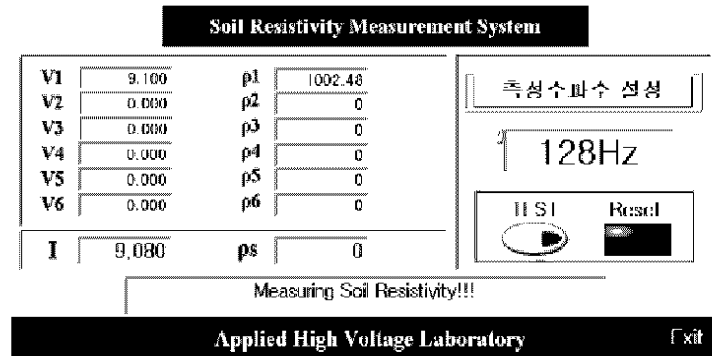


그림6. 교정실험의 예

#### 4. 측정 및 분석

##### 4.1 실험계의 구성

앞서 제안한 두 측정법을 이용하여 실험계를 구성하면 그림 7과 같다. 8 개의 전극을 등거리(1[m])로 설치하여 전위간섭을 최소화 시킨 후 실험계의 양끝 전극인 E, C극의 61.8 [%]지점에 기준전극을 배설한다. 제작된 다전극 대지저항률 측정시스템에 E와 C극을 연결하여 대지로 전압을 인가시킨다.

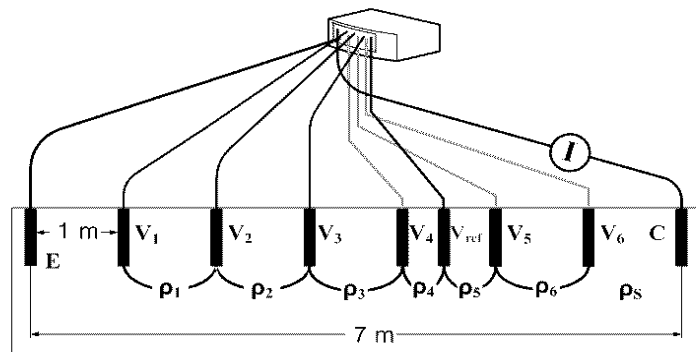
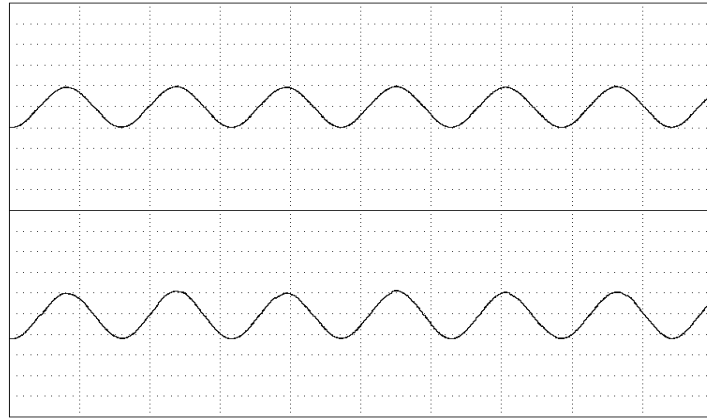


그림7. 실험계의 구성

## 4.2 성능평가

대지는 저항과 캐패시터의 병렬구조로서 토질의 종류에 따라 106 배 이상 달라지는 특성을 가지므로 실제 대지에서 성능평가가 필요하다[7]. 따라서 실험계(7 [m])를 C극의 방향으로 1 [m]씩 ①~⑧의 순서로 옮겨 총거리 14 [m]에 대한 대지저항률을 측정하였다. 출력전압(50 [Vrms], 128 [Hz])을 인가하고 정확도를 평가하기 위해 OSC와 비교하였다. 그림 8은 측정 ②에 대한  $\rho_1$ 의 측정파형이다.

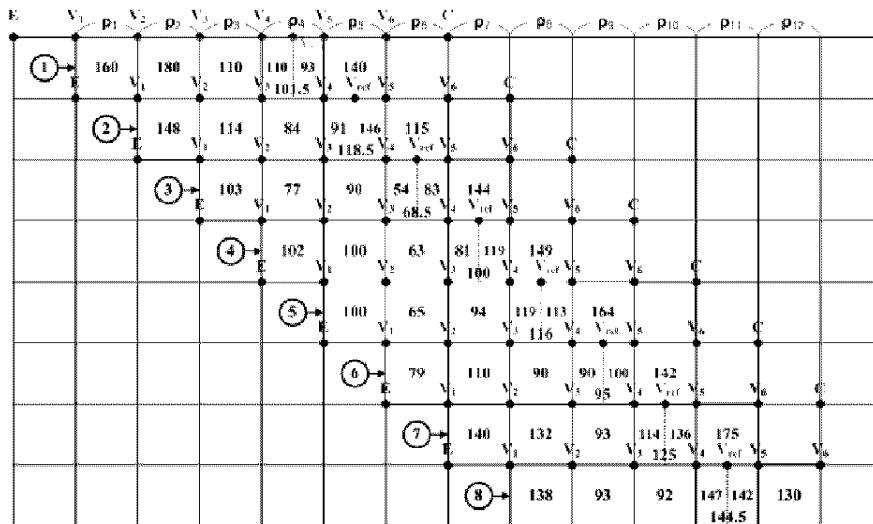


상: [ 50mA/div, 5ms/div ]

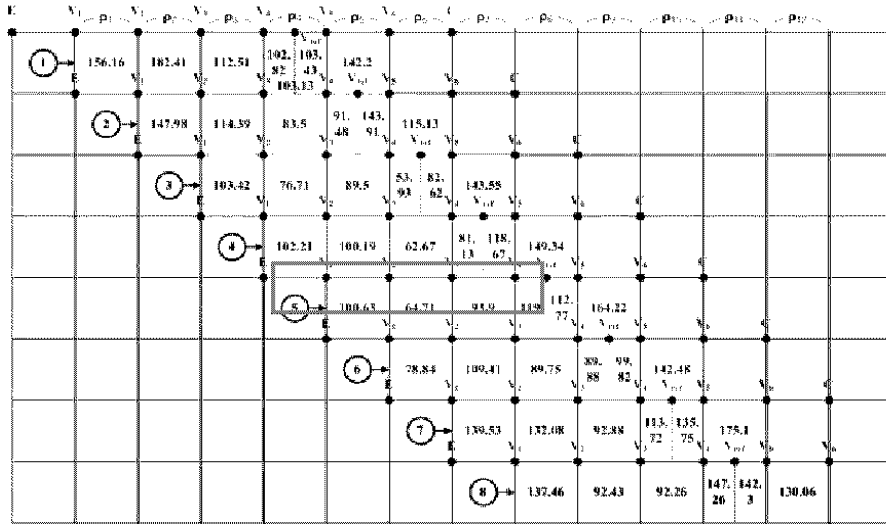
하: [ 2V/div, 5ms/div ]

그림 8. 대지에서의 출력파형 예

보조극의 주변 대지저항률 측정법을 이용하여 중첩되는 영역을 그림 9와 같이 나타내었다. 다전극 대지저항률 측정시스템의 대지저항률 측정값은 OSC보다 약  $\pm 2$  [ $\Omega \cdot m$ ]의 오차를 나타내었다. 측정 ①과 ②의 중첩되는 영역 ( $\rho_2$ )의 대지저항률이 다른 이유는 E-C극의 범위가 변화되면서 실험계를 구성하는 토양의 저항이 달라지기 때문이다. 이는 실험계에서 측정되는 인가전류의 변화로 알 수 있다. 측정 ①의 경우는 57.26 [mA]이며 측정 ②의 경우는 36.63 [mA]이다.



(a) 다전극 대지저항률 측정시스템



(b) OSC 측정

그림9. 보조극의 주변대지저항률 측정결과 비교

측정 ①~⑧의  $\rho S$ 를 합하여 평균값 ( $\rho A$ )을 구하면 115 [ $\Omega \cdot m$ ]이며, 14 [m]의  $\rho S$ 는 118 [ $\Omega \cdot m$ ]이다. 따라서 E-C극의 매설되는 위치가 같다면 2.1의 결과처럼 중첩되는 영역의 대지저항률은 동일하다.

표 3. 평균대지저항률 측정결과

	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 [ $\Omega \cdot m$ ]

**Soil Resistivity Measurement System**

V1	1.365	$\rho 1$	160	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">측정주파수 설정</div> <div style="font-size: 2em; font-weight: bold;">128Hz</div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 5px;"> <span>TEST</span> <span>Reset</span> </div>
V2	0.588	$\rho 2$	180	
V3	0.236	$\rho 3$	110	
V4	0.062	$\rho 4$	110	
V5	0.131	$\rho 5$	93	
V6	0.814	$\rho 6$	140	
I	57.262	$\rho s$	140	

Measuring Soil Resistivity!!!

Applied High Voltage Laboratory
Exit

그림10. 측정 ①에 대한 대지저항률 측정의 예

#### 4. 결 론

본 논문에서는 보조극의 주변 대지저항률과 전체 평균대지저항률을 동시에 측정할 수 있는 다전극 대지저항률 측정시스템을 설계·제작하고 1 [k $\Omega$ ]에 대한 교정실험 후 대지저항률에 대한 성능평가를 실시한 결과는 다음과 같다.

- (1) 측정시스템에 사용되는 정현파 발생회로는 출력 전압 0 ~ 300 [Vrms], 주파수 45 ~ 500 [Hz] 범위에서 0.1 [V] 및 0.1 [Hz] 단계로 정밀제어가 가능하다.
- (2) 인가전류 및 전위차는 DAQ (400 [kS/s], 16 bit, 16 Ch.)와 BPF를 거쳐 PC로 전송되며, 연산결과를 PC에 출력된다.
- (3) 본 논문에서 제안한 다전극 대지저항률 측정시스템은 전극의 길이와 간격에 무관하게 측정이 가능하므로 보조극의 위치 선정이 편리하며, 평균대지저항률과 보조극 주변의 대지저항률을 분석할 수 있는 특징이 있다.

### 감사의 글

본 연구는 지식경제부의 전력산업연구개발사업(R-2007-1-014-02)에 의해 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. Chien-Hsing Lee, A. P. Sakis Meliopoulos (1999), "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.
2. 엄주홍, 조성철, 이태형, 이복희 (2007), "심매설 접지봉의 위치결정을 위한 대지구조 분석 방법들의 비교분석" , 조명·전기설비학회논문지, 제21권, 제7호, pp.37-45.
3. Gish. O., and Rooney. W. (1925), "Measurement of resistivity of large masses of undisturbed earth" , Terrestrial Magnetism & Atmospheric Electricity, Vol.30, pp.161-188.
4. TTAS.KO-04.0041 (2005), "Measurement of Earth Resistivity" , 한국정보통신기술협회.
5. 高橋 健彦, 金聖模, 李炯秀 (1997), 接地技術入門, 오름社, pp.203-218.
6. IEEE Std 81 (1983), "IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity Ground Impedance, and Earth surface Potentials of a Ground system", pp.11-13.
7. IEEE Std 80 (1986), "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", pp.71-76.