

# 낙뢰 보호용 접지시스템 평가를 위한 고주파 접지임피던스 측정시스템의 설계 및 제작

길형준<sup>†</sup> · 송길목 · 김영석 · 김종민 · 김영진<sup>\*</sup>

전기안전연구원 · <sup>\*</sup>(주)오은씨엔아이

(2016. 4. 14. 접수 / 2016. 5. 4. 수정 / 2016. 5. 19. 채택)

## Design and Fabrication of High Frequency Ground Impedance Measuring System for Assessment of Grounding System for Lightning Protection

Hyoung-Jun Gil<sup>†</sup> · Kil-Mok Shong · Young-Seok Kim · Chong-Min Kim · Young-Jin Kim<sup>\*</sup>

Electrical Safety Research Institute

<sup>\*</sup>OEUN CNI

(Received April 14, 2016 / Revised May 4, 2016 / Accepted May 19, 2016)

**Abstract :** This paper describes the design and fabrication of high frequency ground impedance measuring system for assessment of grounding system for Lightning protection. The ground impedance measuring system has been designed and fabricated which makes it possible to assess the ground impedance by frequency ranges from 100 Hz to 1 MHz. The effective grounding systems having a very low impedance to electromagnetic disturbance such as lightning surges and noises in microelectronics and high-technology branches are strongly required. In order to analyze the dynamic characteristic of grounding system impedances in lightning and surge protection grounding systems, it is highly desirable to assess the ground impedances as a measure of performance of grounding system in which lightning and switching surge currents with fast rise time and high frequency flow. The measuring system is based on the variable frequency power supply and consists of signal circuit part, main control part, data acquisition and processing unit, and voltage and current probe system. The ground impedance measuring system can be used to assess grounding system during occurrence of lightning.

**Key Words :** high frequency, ground impedance, lightning protection, variable frequency power supply

### 1. 서론

접지시스템의 성능을 평가하는 방법으로는 접지저항을 측정하는 방법이 있으며, 접지저항 이외의 접촉 전압이나 보폭전압 등을 측정하여, 이러한 위험전압을 감소시키는 정도로 성능을 평가하는 방법이 있다. 이러한 방법 중 일반적으로 접지설비와 대지사이의 접촉이 양호한가 또는 양호하지 않은가를 접지저항으로 나타내는 방법이 많이 사용되고 있다. 접지저항은 상용 주파수 접지전류가 흐를 때 적용되며, 접지임피던스 차원의 고려는 뇌서지전류와 같이 높은 주파수 성분을 가지는 접지전류가 흐를 때 적용된다.

서지의 경우 높은 주파수 성분을 포함하기 때문에

접지를 통한 방출이나 유입, 선로를 통한 전달, 투과, 반사에 있어서 R, L, C를 포함하는 임피던스차원의 고려가 필요하다. 다시 말하면 서지에 대한 보호는 단순히 정상상태의 접지저항값의 저감으로는 효과적이지 못하다. 임피던스 차원의 고려는 이미 오래전부터 많이 연구가 되어져 왔으나, 아직도 정상상태의 접지저항값의 저감에 큰 관심을 기울이고 있을 뿐 과도상태의 접지임피던스에 대한 인식이 부족하다. 특히 뇌서지에 대한 시스템의 보호는 접지임피던스 차원에서 검토되어야 접지전극의 대지전위상승을 효과적으로 억제할 수 있다.

접지시스템이 소규모이거나 시설하는 장소의 대지 저항률이 큰 경우에 접지임피던스는 저항 성분이 큰

<sup>†</sup> Corresponding Author : Hyoung-Jun Gil, Tel : +82-63-716-2841, E-mail : fa523@kesco.or.kr  
Electrical Safety Research Institute, 12, Ogong-ro, Iseo-myeon, Wanju-gun, Jeollabuk-do 56365, Korea

값을 가지므로 접지저항측정기를 사용하여 측정한 접지저항이 접지임피던스와 거의 동일하다. 하지만 접지시스템의 규모가 크거나 접지저항이 대단히 작아서 상대적으로 리액턴스 성분이 큰 값을 가지는 경우에는 단순한 접지저항으로 접지시스템의 성능을 평가하는 방법은 정확성이 떨어진다. 접지전류가 뇌서지와 같이 빠른 상승시간을 가지는 높은 주파수 성분을 포함하는 경우에는 접지저항 보다는 접지임피던스를 측정하여 접지시스템의 리액턴스 성분을 분석한 후 성능평가의 지표로 하는 것이 바람직하다<sup>1-7)</sup>.

따라서, 본 논문에서는 본 논문에서는 뇌격전류 발생시 접지시스템을 평가하기 위해 고주파 접지임피던스 측정시스템이 설계 및 제작되었고 이를 통해 피뢰설비 진단에 활용하고자 한다.

## 2. 설계 및 제작

접지저항은 접지선에 흐르는 전류와 주파수에 의한 임피던스 영향을 무시한 순수 저항성분에 의한 성능 척도이며, 인덕턴스와 대지의 커패시턴스 성분을 포함한 것이 접지임피던스이다.

접지계를 통하여 지락전류  $I$ 가 유입되면, 접지전극 주변의 대지에 전위상승  $V$ 가 발생한다. 접지임피던스는 토양의 특성, 대지저항률, 온도, 습도, 접지전극의 모양과 접속상태 등 여러 가지 요인들이 복합적으로 작용하므로 등가회로 모델로 나타내기는 쉽지 않으나, 일반적인 가정을 통한 봉상 접지전극의 등가회로 모델은 Fig. 1과 같이 R-L-C 집중정수회로로 나타내며 접지임피던스는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다. 이 때 접지임피던스  $Z$ 는 전위상승과 접지전류의 비  $\frac{V}{I}$ 로 정의된다.

$$Z = R + jX = j\omega L + \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} \quad \Omega \quad (1)$$

여기서,  $Z$ : 접지임피던스,  $R$ : 저항성분,  $X$ : 리액턴스 성분이다. 식 (1)에서 접지임피던스는 저항, 인덕턴스, 커패시턴스, 주파수에 대한 함수이다. 접지계의 인덕턴스와 커패시턴스는 가능한 적게 설계하므로 수 kHz 이하의 저주파 영역에서 접지계에 미치는 영향이 작으나, 수 백 kHz의 고주파 영역에서는 큰 변화를 나타낸다<sup>8)</sup>.

고주파 접지임피던스 측정시스템은 100 Hz에서 1 MHz까지의 주파수를 증가시키면서 접지전극에 전류

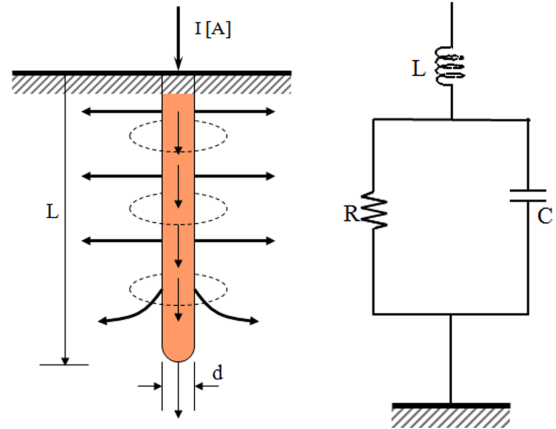


Fig. 1. Equivalent circuit of a ground rod.

를 주입하고 접지전극에 발생하는 전압을 측정하여 연산한다. 실제 현장에서 측정시에는 측정 리드선의 영향 등을 보상하고 접지계통에 나타날 수 있는 상용주파수 노이즈를 제거하는 기능이 포함되어야 한다. 측정시스템의 메인 신호처리부에서 유제입출력 장치로부터 측정 시작 신호를 수신하면 메인 신호처리장치는 신호 발생기에 설정된 시작주파수와 Peak 전압 신호발생을 활성화시킨다.

신호 발생기로부터 생성된 정현파 신호는 전류 증폭기와 전압 증폭기를 거쳐 접지전극에 인가되고 신호 안정화 시간 동안 출력을 유지시킨다.

접지전극에 인가된 전류와 이로 인해 발생하는 전압은 각각 증폭기와 필터를 거쳐 A/D 변환기에 인가되고 메인 신호처리장치는 샘플링 주기로 전압 신호파형과 전류 신호파형의 샘플링을 실시한다. 샘플링된 데이터는 메인 신호처리장치의 버퍼에 저장되고 전압  $V$ 와 전류  $I$ 로부터 임피던스  $Z$ 를 구할 수 있다.

측정대상인 접지시스템이 순수한 저항성분만 존재하면 측정되는 전류와 전압간에 위상차가 존재하지 않지만 실제 접지시스템에서는 L과 C성분이 존재하므로 위상차가 발생하게 된다.

전압값 0 위치의 시간을  $T_x$ , 전류값 0 위치의 시간을  $T_y$ , 주파수를  $f$ 라 할때 위상차  $\theta$ 는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\theta = 2\pi f(T_x - T_y) \quad (2)$$

이와 같이 위상차  $\theta$ 가 산출되면 이로부터 저항성 성분  $R$ 과 리액턴스 성분  $X$ 를 구할 수 있다.

$$R = Z \cos\theta \quad X = Z \sin\theta \quad (3)$$

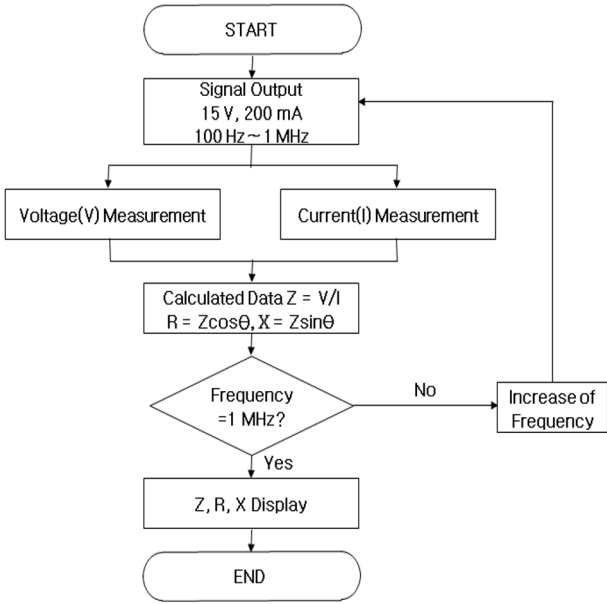


Fig. 2. Flowchart for the operation.

이와 같은 방법에 의해 측정시스템은 현재 측정 주파수에서 계산된  $Z, X, R$  측정값을 현재 주파수  $f$ 의 데이터로 저장하고 신호 발생기의 주파수를 증가시킨 뒤 위의 과정을 반복한다. 측정 최대주파수까지 측정을 마치면 신호 발생기를 비활성화 하고 각 주파수별  $Z, R, X$ 의 값을 출력장치에 표시하여 그래프로 나타낸다. 이상은 기본적인 접지임피던스 측정 방법으로 실제 연산에는 측정리드선의 인덕턴스에 대한 보상 및 필터와 증폭기에서 발생하는 위상지연에 대한 보상 등이 필요하다. Fig. 2에 측정 순서도를 나타내었다.

고주파 접지임피던스 측정시스템은 Fig. 3과 같이

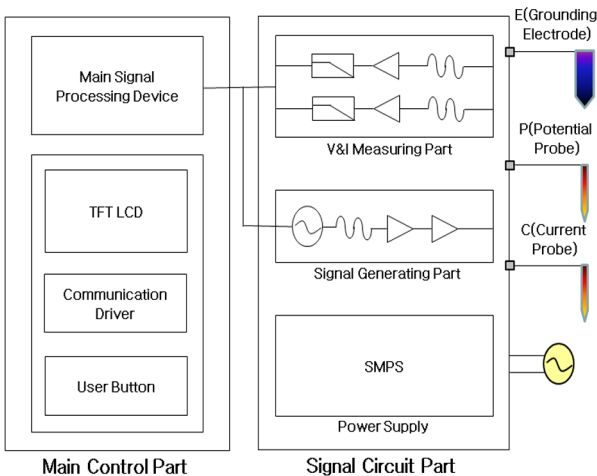


Fig. 3. Configuration of high frequency ground impedance measuring system.

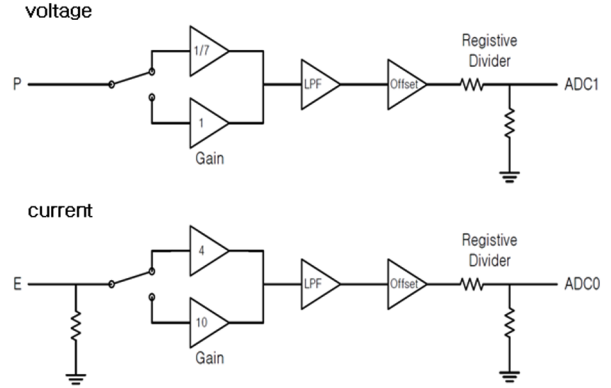


Fig. 4. Voltage and current measuring part.

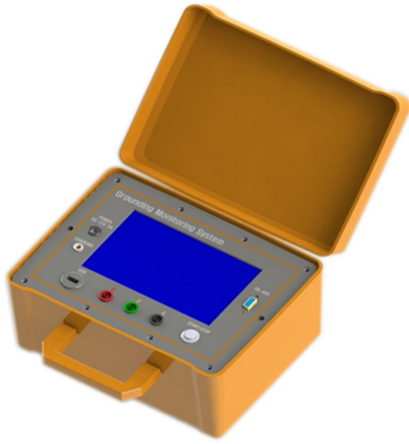
신호회로부와 주제어부로 구성된다. 신호회로부는 전압 및 전류 측정부, 신호 발생부, 파워서플라이 등으로 구성된다. 주제어부는 측정시스템을 제어하고 수집된 데이터로부터 접지임피던스를 연산하기 위한 분석 기능을 수행한다. 사용자로부터 측정 주파수 등의 기초 정보를 입력받고 측정된 결과를 그래프로 출력하는 기능을 수행한다.

접지임피던스를 계산하기 위한 전압 전류 측정부는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 저역통과필터와 증폭부로 구성되며 A/D 변환기에 전달하기 위해 측정된 전압의 게인을 조정하는 기능을 수행한다. 게인 조정을 위해서는 릴레이를 사용하여 게인을 조정 가능하도록 하였으며, 최대 1 MHz의 주파수대역을 측정하므로 1 MHz 이상의 노이즈 성분을 제거하기 위해 차단주파수가 10 MHz인 2차 저역통과필터를 사용하였다. 또한 게인에 따라 변동되는 Offset을 조정하기 위해 Op-amp 최종단에 Offset 조절을 위한 회로를 포함하였으며 요구되는 입력전압 범위가 작을 경우 전압 조정용 저항형 Divider를 사용하여 전압을 A/D 변환기의 입력사양에 맞게 조정할 수 있도록 구성하였다.

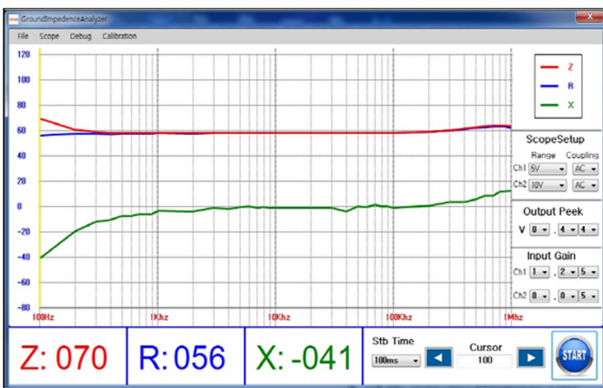
신호발생부는 접지시스템에 고주파 전류를 주입하기 위한 것으로 고주파의 정현파 전류를 발생할 수 있도록 구성하였다.

고주파 접지임피던스 측정시스템의 외형을 Fig. 5(a)에 나타내었고, Fig. 5(b)에 접지 임피던스 측정시스템 GUI 화면을 나타내었다. 또한 Table 1에 측정시스템의 주요 사양을 나타내었다.

프로그램은 측정전에 사용자로부터 전압 및 주파수 등의 정보를 입력받고 측정기를 제어하는 부분과 측정된 데이터로부터 접지임피던스를 연산하고 그래프로 출력하도록 구성하였다.



(a) Prototype



(b) GUI screen

Fig. 5. High frequency ground impedance measuring system.

Table 1. Specification of high frequency ground impedance measuring system

Item	Specification
Output voltage	±15 V
Output current	200 mA
Variable frequency range	100 Hz ~ 1 MHz
Sampling frequency	Max. 250 MHz

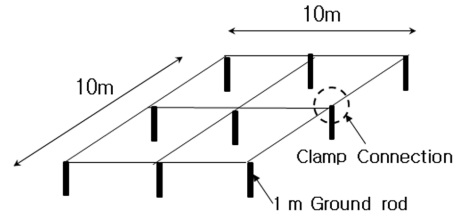
### 3. 결과 및 고찰

고주파 접지임피던스 측정시스템의 신뢰성 확보를 위해 정밀 무유도 저항에 의한 교정 실험이 수행되었다. 1, 2, 5, 10, 20, 100 Ω의 저항 시료가 사용되었고 각 시료에 대해 10회 측정후 평균값을 적용하여 오차율에 반영하였다. 측정 주파수는 128 Hz로 고정하여 측정하였으며, 측정결과 모든 시료에서 3% 이내의 오차율을 나타내었다. 이를 Table 2에 나타내었다.

또한 접지임피던스 측정시스템의 성능 검증을 위해 실제 대지에 접지시스템을 설치하여 실증 시험장을 조

Table 2. Error for resistance specimen

Resistance specimen[Ω]	Measuring resistance[Ω]	Error[%]
1	1.0	0
2	1.95	2.5
5	4.9	2
10	9.8	2
20	19.8	1
100	98.5	1.5



(a) Schematic diagram



(b) Photograph

Fig. 6. Schematic diagram and photograph of grounding system.

성하였다. 이는 측정시스템의 개발시 실험실에서는 정밀 소자로 측정대상물을 이용하였지만 실제 현장 상황을 반영을 위해 실증 실험이 수행되었다. 시험 대상인 접지전극으로는 메시와 봉상 접지전극이 조합된 접지전극을 설치하였다. Fig. 6에 설치된 접지전극 개략도와 현장 사진을 나타내었다.

피측정 접지전극은 깊이 0.75 m에 매설된 10×10 m 규모이고 나동선 50 mm<sup>2</sup>를 사용하였다. 또한 메시와 조합된 봉상 접지전극은 길이 1 m, 굵기 14 mm이다. 메시와 봉상 접지전극의 접속은 클램프를 사용하여 접속하였다. 접지전극에 전류를 주입하기 위한 리드선은 메시와 봉상 접지전극이 접속된 모든 부분에 50 mm<sup>2</sup> 굵기의 연선을 접속하였다.

접지임피던스를 측정하기 전에 실증시험장의 대지 특성을 파악하기 위해 상용 측정기(CA 6470, France)를 이용하여 Wenner의 4전극법으로 대지저항률을 측정하였다.



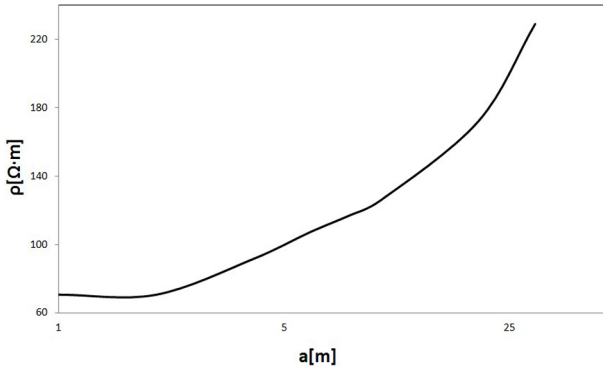


Fig. 7. Soil resistivity of testing ground.

측정결과 측정길이에 Fig. 7과 같이 측정 전극 간격을 1~30 m로 하였을 때, 117~229 Ω·m의 범위에서 측정되었으며 전형적인 2층 토양 구조의 특성을 나타내었다.

시제작된 접지임피던스 측정시스템의 검증 을 위해 기존의 상용 측정기와 비교 측정을 수행하였다.

저주파 대역의 접지저항은 측정용 보조전극의 배치를 일직선으로 하며, 과도상태인 접지임피던스는 측정용 리드선의 유도결합 방지를 위해 보조전극의 배치를 90°로 한다.

본 연구에서는 측정시스템 검증을 위해 우선 저주파 대역의 접지저항에 대한 측정을 수행하였다. 가장 대표적이고 널리 사용되는 전위강하법을 사용하였으며 전류보조전극을 시험 중인 접지전극 최대 치수의 최소 5배가 되도록 하였다. 또한 전위보조전극의 거리는 전류와 전위보조전극이 동일한 방향일 때 전류보조전극의 61.8% 거리로 선택되도록 하여 IEEE 표준에 적합하도록 하였다.<sup>9-10)</sup>

전류 주입 위치는 메시의 중심이며 전류보조전극의 거리는 75 m, 전위보조전극의 거리는 46.5 m가 되도록 하였다. 또한 측정방법은 5회 측정하여 이의 평균값을 취하였으며 상용 측정기의 오차는 ±1% 이내이었다. 인가 주파수는 128 Hz로 고정하였으며 측정방법을 Fig. 8에 나타내었다.

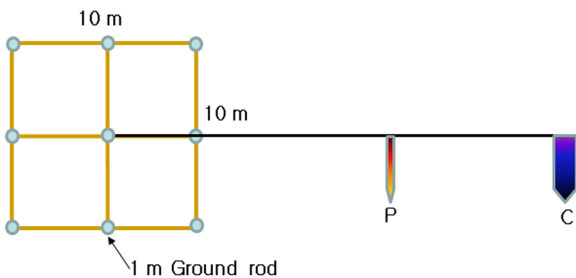


Fig. 8. Fall-of-potential method.

상용 측정기로 측정한 결과 접지저항은 4.77 Ω이었으며 시제작된 측정시스템은 4.87 Ω으로 유사한 결과를 나타내었다. 이는 100 Hz 부근의 저주파 전류를 주입하여 측정한 접지저항으로 상용 제품과 동등한 성능을 갖는 결과를 나타내고 있으며 회로설계방식이 현장에서 사용 가능함을 확인할 수 있었다.

접지전극에 고주파 전류 인가시 출력 신호의 감쇄가 발생할 수 있으므로 회로 개선을 통해 인가전류를 상향 조정할 필요가 있다. 향후 접지전극에 수 MHz까지 전류를 인가할 수 있는 전력증폭기와 파형 발생기가 조합된 장치를 사용하여 고주파 대역의 접지임피던스를 측정할 예정이며 이와 시제작된 측정시스템 측정값과의 비교를 통해 측정시스템의 신뢰성을 확보할 예정이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 접지전극에 뇌격전류 유입시 발생되는 고주파 접지임피던스의 평가가 가능한 고주파 접지임피던스 측정시스템의 설계 및 제작이 이루어졌으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

고주파 접지임피던스 측정시스템은 신호회로부와 주제어부로 구성되었다. 신호회로부는 전압 및 전류 측정부, 신호 발생부, 파워서플라이 등으로 구성되고, 주제어부는 측정시스템을 제어하고 수집된 데이터로부터 접지임피던스를 연산하기 위한 분석 기능을 수행한다. 전압과 전류의 위상차를 이용하여 임피던스, 저항성분, 리액턴스 성분이 그래프로 표현될 수 있도록 하였다.

고정밀 무유도 저항에 의한 교정평가에서 개발된 측정시스템의 최대 오차는 2.5%이었으며, 노이즈 성분 제거를 위한 필터가 적용되었다. 또한, 접지임피던스 측정시스템의 성능 검증을 위해 실제 대지에 접지시스템을 설치하여 실증 시험을 실시하였으며, 상용 측정기와 개발된 측정시스템의 상호 비교 결과 매우 근사한 측정값을 나타내어 저주파 전류 주입시 상용 제품과 동등한 성능을 갖는 것으로 나타났다. 따라서, 설계 및 제작된 측정시스템 회로설계방식이 현장에서 사용 가능함을 확인할 수 있었다. 본 측정시스템은 IEC 표준에 대응하여 임피던스, 저항, 리액턴스 성분 등의 해석이 가능하며, 피뢰설비 안전성 평가에 활용될 수 있다.

향후 고주파 대역의 접지임피던스 성능 평가가 이루어질 예정이며, 고주파 접지임피던스에 대한 평가방법을 관련 표준 조사, 현장 실험 및 분석 등을 통해 제시할 것이다.

## References

- 1) J. H. Bogensperger, J. Frei and S. Pack, "Resistance of Grounding Systems Stationary and Transient Behavior", Proc. 9th ISH Conf., pp.6715-1-4, 1995.
- 2) I. D. Lu, R. M. Shier, "Application of a Digital Signal Analyzer to the Measurement of Power System Ground Impedance", IEEE Trans. on PAS, Vol.100, No. 4, pp.1918-1922, 1981.
- 3) R. Kosztaluk, M. Loboda, D. Mukhedkar, "Experimental Study of Transient Ground Impedances", IEEE Trans. PAS, Vol.100, No.11, pp.4653-4660, 1981.
- 4) E. E. Oettle, "A New General Estimation Curve for Predicting the Impulse Impedance of Concentrated Earth Electrodes", IEEE Trans. PD, Vol.3, No.4, pp.2020-2029, 1988.
- 5) I. D. Lu, R. M. Shier, "Application of a Digital Signal Analyzer to the Measurement of Power System Ground Impedance", IEEE Trans. on PAS, Vol.100, No.4, pp.1918-1922, 1981.
- 6) A. D. Papalexopoulos, A. P. Meliopoulos, "Frequency Dependent Characteristics of Grounding System", IEEE Trans. on PAS, Vol.100, No.4, pp.1918-1922, 1981.
- 7) H. J. Gil, D. W. Kim, "Characteristics for Ground Impedance of Counterpoise according to Position of Auxiliary Probe and Frequency", J. Korean Soc. Saf., Vol.27, No.4, pp.33-37, 2012.
- 8) G. S. Kil, D. W. Park, U. Y. Jang, J. S. Han and H. J. Gil, "Design and Fabrication of a Wideband Ground Impedance Meter", J. KIEEME, Vol.23, No.10, pp.793-797, 2010.
- 9) IEEE Std 81-2012, "IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System", pp.5-30, 1991.
- 10) IEEE Std 81.2-1991, "IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems", pp.9-64, 1991.