

# 고주파수 영역에서 심매설 접지전극의 접지임피던스

(Ground impedance of deeply driven rod in high frequency domain)

이복희 · 이태형\* · 이수봉 · 정현욱 · 정동철

(Bok-Hee Lee · Tae-Hyung Lee · Su-Bong Lee · Hyun-Wook Jeong · Dong-Cheol Jeong)

## Abstract

A ground resistance is a good index of performance in a grounding system, but it does not reflect the performance in transient states. Recently long vertical ground rods in urban areas are often installed. But because of the inductance of long ground rods the ground impedance at high frequency might be greater than its resistance at low frequency. In this paper, a ground impedance of deeply driven ground rod has been measured in the frequency range from 10 kHz to 50 MHz. As a result, the ground impedances of a deeply driven ground rods are almost constant at the frequency range less than 100 kHz. However at high frequency the ground impedance showed the strong frequency dependance.

## 1. 서론

높은 주파수 성분의 접지전류에 대한 접지시스템의 응답특성 평가는 컴퓨터를 비롯한 제어장치, 통신설비 등이나 뇌임펄스, 개폐임펄스 등에 대한 보호를 목적으로 하는 접지에 있어서는 매우 중요한 요소이다. 높은 주파수 성분의 접지전류에 대한 접지시스템의 성능은 상용주파수에서와는 다르다. 접지저항이 낮은 경우 접지시스템의 규모가 커지게 되고 상대적으로 접지시스템의 리액턴스 성분이 증가하는 경우도 있어 접지전류의 주파수가 증가하거나 뇌서지와 같이 빠른 상승시간을 가지는 과도 전류가 유입할 경우에는 높은 접지전위가 발생할 수도 있다. 고주파수 영역의 접지임피던스는 저주파 대역의 접지성능만을 보여주는 접지저항과는 달리 과도상태 접지성능지수가 될 수도 있다.[1]

따라서 본 논문에서는 도심지나 낮은 접지저항이 요구되는 설비용 접지전극으로 많이 사용되고 있는 심매설 접지전극의 고주파수 영역에서의 접지임피던스 특성을 실험적으로 분석하였다. 즉, 주파수에 따른 접지임피던스의 변동특성에 대하여 기술하였다. 또한 접지전극이 매설된 장소의 대지저항을 측정을 통해 접지전극이 매설된 위치의 구조를 파악할 수 있었다.

## 2. 실험

본 실험에 사용한 측정대상의 접지전극은 30 m 길이

로 보링작업을 한 후 길이 9 m의 봉전극을 매설하고 접지저감제로 되메움하였다. 또한 접지전극 상부에서 2본의 100 mm<sup>2</sup> 나동연선으로 지표면까지 인출하였다. 실험대상 접지전극의 개략도를 그림 1에 나타내었다.

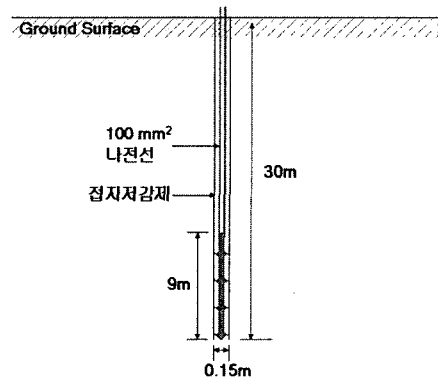


그림 1. 실험용 접지전극의 개략도  
Fig 1. Schematic diagram of the ground rod under test

심매설 접지전극에 대하여 고주파수 영역에서의 접지임피던스 특성을 분석하기 위한 실험의 측정회로를 그림 2에 나타내었다. 측정회로는 수정된 전위강하법을 이용하였으며, 전위보조전극(P)은 측정대상 접지전극(E)으로부터 약 60 m 떨어진 지점에 길이 1 m의 접지전극을 사용하여 시설하고, 전위보조전극과 반대쪽 180° 방향으로 약 60 m 지점에 전류보조전극을 시설하였다.

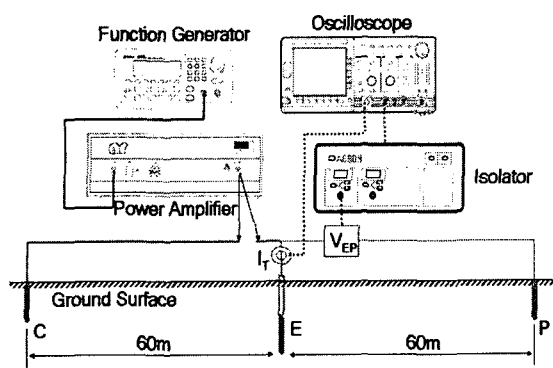


그림 2. 접지임피던스 측정회로  
Fig. 2. Circuit diagram for measurements of the ground impedance

전위강하법을 적용하여 접지저항을 측정하는 경우 전류 및 전위보조전극을 배치함에 있어서 피측정 전극과 전위보조전극, 전류보조전극을 일직선으로 설치하는 측정방법을 사용하게 되며, 전위보조전극을 설치하는 위치는 피측정 접지전극으로부터 전류보조전극 방향으로 전류보조전극이 이격된 거리의 61.8 %인 지점에 설치하는 것(61.8 % 법칙)이 타당하다. 하지만 고주파수 영역의 접지임피던스 측정에 있어서는 측정선 사이의 상호유도의 영향이 크게 나타나므로 인위적으로 전위보조전극을 90°의 각도로 배치하는 경우도 있다. 특히 전위강하법을 이용한 대형 접지임피던스 측정에서 유도결합의 영향에 의한 오차는 크게 나타난다. 상용주파수에서 접지임피던스가 1 Ω 이하인 경우에는 IEEE Std에서 유도결합의 영향을 고려할 것을 권고하고 있다.[2] 자기결합에 의한 상호유도작용이 접지임피던스 측정에 미치는 영향은 측정전류의 주파수가 증가할수록 커지게 되므로 높은 주파수에서 접지임피던스를 측정하는 경우에는 특히 주의하여야 한다.

유도결합에 의한 측정오차는 수식적인 보정이나 이론적 분석에 앞서서 측정방법을 적절히 선택하면 상당히 줄일 수가 있다. 즉, 유도결합은 전류인가 측정선과 전위상승 측정선 사이의 상호유도작용에 기인한 것이므로 상호유도작용이 최소가 되는 측정선 배치방법을 적용하면 된다. 측정선의 배치방법은 문헌[2]에 의거하여 보조전극의 배치와 이에 따른 측정선의 배치방법이 제안되었으며, 특히 접지저항이 매우 낮은 접지시스템에서 효과적인 것으로 기술하고 있다. 여러 문헌에서는 주로 공간상에 존재하는 유한도체에 대하여 수학적인 모델을 선정하고 유도결합의 영향을 분석하였다. 각각의 결과들은 유도결합의 영향을 예측하고 이를 이론적으로 저감시키기 위해 적절한 보조전극 시설위치를 제시하고 있다. 이에 반하여 참고문헌[2]는 실제의 접지임피던스 측정에서 발생하는 유도결합의 영향을 측정선 배치에 따라서 비교하여 제시하고 있다.

이론적으로 분석해 보면 전류보조전극 (C)과 전위보조전극(P)이 그림 3에서 보는 바와 같이 90°의 각도로 배치되고 측정선이 보조전극에 직선으로 접속되면 유도결합은 발생하지 않는다. 하지만 현장에서 접지임피던스를 측정할 때 보조전극들을 정확히 90°로 배치하기 힘든 경우도 있으며, 측정선을 포설하는 과정에서 곡선 부분이 존재하기도 한다. 측정용 보조전극이 90°보다 작은 각도로 배치된 경우에 측정전류 인가선과 전위측정선 사이의 유도결합에 의하여 측정되는 전위를 증가시키는 효과를 나타내게 되며, 접지임피던스는 실제의 값보다 큰 값으로 측정된다.

반대로 90°보다 크게 배치되는 경우에는 상호유도작용이 반대극성으로 작용하므로 접지임피던스의 값이 실제의 값보다 작게 측정된다. 유도작용이 접지임피던스 측정에 미치는 영향은 나란한 방향으로 측정선이 포설될 때 가장 크므로 보조전극과 측정선을 배치함에 있어서 그림 3과 같이 0~90°와 270~360°일 때보다는 90~270°의 범위가 측정정확도 향상에 효과적이다.[3]

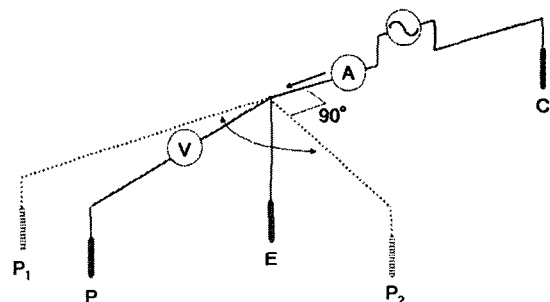


그림 3. 측정선의 배치에 따른 유도결합  
Fig. 3. Inductive coupling associated with arrangement of the test lead wire

심매설 접지전극의 접지임피던스를 측정하기 위해 입력신호원으로는 함수발생기(Function generator)에서 발생된 정현파 신호를 전력증폭기를 사용하여 증폭시켜 측정대상전극(E)과 전류보조전극(C)에 인가하였다. 인가전류는 10 kHz~50 MHz의 고주파수 영역까지 주파수를 가변시키면서 측정대상접지전극(E)과 전류보조전극(C) 사이에 인가하고, 측정대상전극(E)과 전위보조전극(P) 사이에 나타나는 전위상승은 Isolator를 거쳐 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 실험장소의 대지저항률의 분포

그림 4에 심매설 접지전극이 매설된 실험장소의 대지저항률 분포를 나타내었다. 이는 대지구조 해석장비에 내장된 대지저항률 측정법 중에서 Dipole-dipole 법을

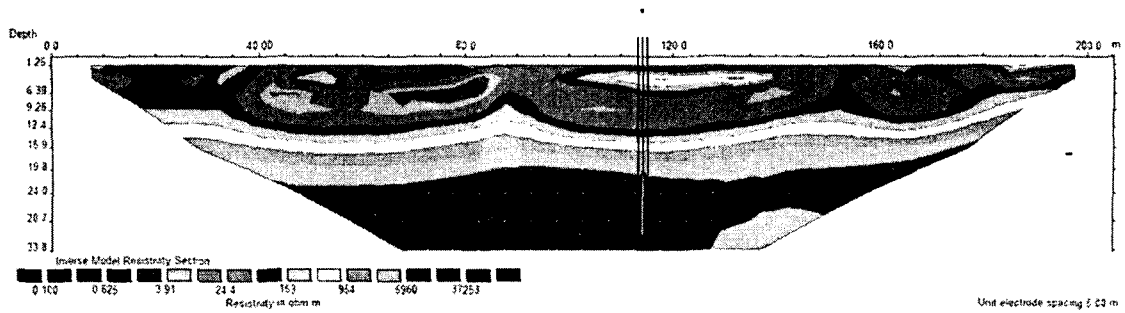
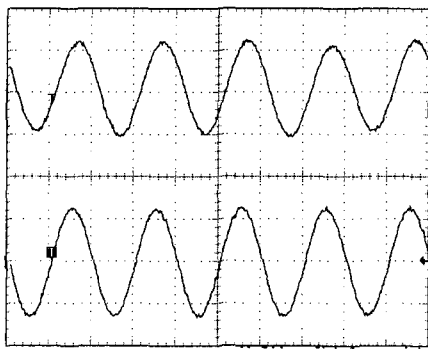


그림 4. 측정장소의 대지저항률 분포  
Fig. 4. Soil resistivity mapping at the test site

사용하여 측정된 데이터를 2D 변환프로그램을 통해 나타낸 그래프이다.[4] 그래프 상에서 심매설 접지전극이 매설된 위치는 측정선상에서 기준점으로부터 약 115 m 지점이다. 이 지점의 수직 대지구조는 약  $50 \Omega \cdot m$ 의 표토층을 통과하여 5 m 깊이에서는 약  $500 \Omega \cdot m$ , 10 m 깊이에서는 약  $20 \Omega \cdot m$ , 이후 깊이가 깊어질수록 수천  $\Omega \cdot m$ 로 대지저항률이 증가하는 다층대지로 이루어져 있다. 거시적으로 볼 때 대지의 구조는 약 20 m 깊이를 정점으로 상층부는 비교적 낮은 대지저항률을 보였으나 하층부는 매우 높은 대지저항률을 가지는 구조를 나타내고 있다.

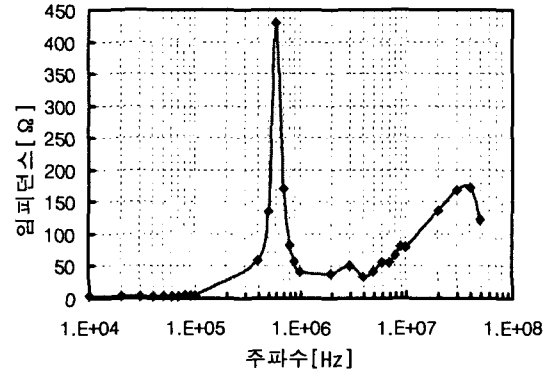
### 3.2 심매설 접지전극의 접지임피던스

심매설 접지전극의 주파수에 따른 접지임피던스 특성을 분석하기 위해 전류는 23 mA~1.3 A 범위에서 인가하였고, 그에 따른 전위상승은 3.7~10.1 V 범위에서 측정되었다. 1 MHz 주파수에서 피측정 접지전극에 인가된 인가전류와 검출된 전위상승 파형의 예를 그림 5에 나타내었다.

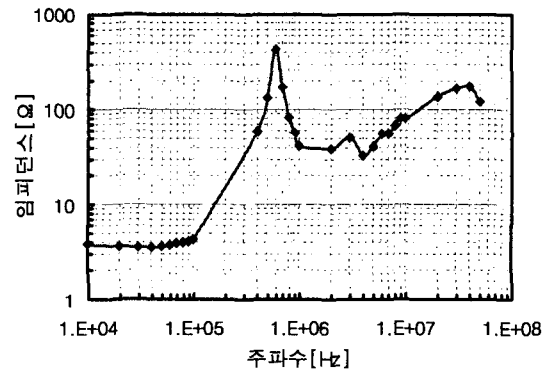


Ch1: 전위상승 [500 mV/div, 500 ns/div]  
Ch2: 인가전류 [100 mA/div, 500 ns/div]

그림 5. 1 MHz에서 측정된 인가전류와 전압 파형  
Fig.5. Waveforms of applied current and potential rise at 1 MHz



(a) 접지임피던스의 크기



(b) 접지임피던스의 크기

그림 6. 주파수에 따른 접지임피던스  
Fig 6. Ground impedance as a function of frequency

그림 6(a)는 주파수를 증가시키기에 따라 변화하는 접지임피던스를 접지전위상승과 인가전류 파형의 RMS값으로 연산하여 산출한 접지임피던스에 대한 결과 그래프이다. 10~100 kHz의 주파수 범위에서 접지임피던스는 3.8~4.3  $\Omega$  정도로 거의 일정하였으나 100 kHz를 지나면서 급격히 증가하기 시작하여 400~600 kHz에서는 59.3에서 429  $\Omega$ 으로 급격히 증가하였다. 이후 600 kHz를 넘어서면서 접지임피던스는 급격히 감소하며 1~30

MHz 주파수 대역에서는 다시 서서히 증가하는 양상을 보이다가 40 MHz를 넘어서면서 다시 감소하였다. 이러한 양상은 비교적 낮은 200 kHz 이하의 주파수에서는 인하도선과 접지전극의 인덕턴스의 영향으로 임피던스가 증가하다가 이후부터는 대지의 커패시턴스의 영향으로 접지임피던스가 감소하였다. 그 이상의 주파수에서는 접지전극의 인덕턴스와 대지의 정전용량의 영향으로 접지임피던스의 증가와 감소를 반복하는 진동성의 양상을 나타내었다.[5],[6]

[6] Power Systems Engineering Committee, "IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment", IEEE Std. 1100-1999, pp. 149~154

#### 4. 결 론

본 논문에서는 Dipole-dipole 법을 이용하여 접지전극이 시설된 대지저항률을 측정하였고, 전위강하법을 이용하여 고주파수 영역에서의 심매설 접지전극의 접지임피던스를 측정하고 특성을 분석한 바 다음과 같은 결론을 얻었다.

수십 kHz 이하 영역에서는 주파수에 대한 접지임피던스는 대부분 저항성분이지만 100~600 kHz 대역의 주파수에 대한 접지임피던스는 접지전극의 형상과 길이에 따라 차이는 있지만 대부분 자기인덕턴스에 의한 유도성분의 영향이 지배적으로 나타났다. 그러나 600 kHz 이상의 주파수를 넘어서면 대지의 커패시턴스의 영향으로 접지임피던스가 감소하였으며, 1 MHz 이상의 주파수에서는 진동성 양상을 가지는 것으로 나타났다.

이 논문은 산업자원부에서 시행하는 대학전력연구센터 육성·지원사업에 의해 작성되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Jong-kee Choi, Yong-ho Ahn, Sun-geun Goo, Kijun Park, Jin-yu Yoon, Gil-jo Jung, "Direct measurement of frequency domain impedance characteristics of grounding system", Power System Technology, 2002. Proceedings. PowerCon 2002. International Conference on , Vol. 4 , pp. 2218~2221
- [2] Power System Instrumentation and Measurements Committee, "IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems", IEEE Std 81.2-1991, pp. 9~13, 87~88
- [3] 이복희, 임주홍, 조성철, "측정선의 상호유도작용이 접지임피던스의 측정에 미치는 영향", 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회 논문집, pp.71~74, 2003
- [4] N. Harid, H. Griffiths and A. Haddad, K. Walker, "Soil resistivity mapping of non-homogeneous soils", Millpress, International Symposium on High Voltage Engineering, Vol. 13, pp. 518~521, 2003
- [5] 高橋健彦, "図解 接地システム入門", オーム社, 第1版, p. 106, 2001