

논문 2013-50-10-27

# 토양의 유전율 특성을 고려한 정보통신설비용 수평접지전극의 임피던스 계산

( Numerical Calculation for Impedance of Horizontal Ground Electrode  
for Information and Communication Facilities with Considering  
Characteristics of Permittivity in Soil )

안 창 환\*

( Chang-Hwan Ahn<sup>Ⓢ</sup> )

## 요 약

정보통신설비용 접지전극의 임피던스는 접지전극이 매설되어 있는 토양의 전기적 특성과 밀접한 관계가 있다. 특히 인가된 전계의 주파수에 따른 토양의 유전율과 도전율 특성이 접지전극의 임피던스에 직접적으로 영향을 준다. 접지전극의 임피던스를 계산할 수 있는 상용프로그램은 유전율과 도전율을 수정하여 시뮬레이션하는 것이 불가능하기 때문에 전자계 이론을 적용한 프로그램을 MATLAB으로 구현하였다. 토양의 유전율은 유전완화 모델인 디바이(Debye)식을 적용하였으며, 도전율은 실험에서 얻어진 수식을 다른 논문에서 인용하였다. 시뮬레이션 결과의 신뢰성을 확인하기 위해서 실험계를 구성하여 접지전극의 임피던스를 측정하고, 시뮬레이션 결과와 서로 비교하였다. 그 결과, 토양의 유전율과 도전율 특성을 고려한 본 논문 결과가 고려하지 않은 상용프로그램(NEC) 결과 보다 측정값과 더욱 잘 일치하는 것을 확인하였다.

## Abstract

An impedance of ground electrode for information and communication facilities has a significant relationship with the electrical characteristics of soil where the ground electrode is buried. Especially, the impedance of ground electrode is directly affected by the characteristics of permittivity and conductivity in soil as a function of a frequency of an applied electric field. The program based on the electromagnetic field model was developed in MATLAB. Because both permittivity and conductivity can not be modified in commercial programs. The permittivity of soil was applied with the Debye equation which is a model of dielectric relaxation. And the empirical equation of the conductivity in soil was quoted in other paper. In order to confirm the reliability of proposed program, the impedance measurement of ground electrode was carried out, which were compared with the results of simulation in commercial program. In result, it was confirmed that the impedance and phase different simulated by applying the characteristics of permittivity and conductivity in soil are in good agreement with the measured values than results of NEC.

**Keywords** : Permittivity of Soil, Debye Equation, Complex Conductivity, Method of Moment

\* 정회원, 인하공업전문대학 디지털전자과  
(Department of Digital Electronics, Inha Technical College)

Ⓢ Corresponding Author(E-mail: [aza@inhac.ac.kr](mailto:aza@inhac.ac.kr))

※ 이 논문은 2013학년도 인하공업전문대학 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.  
접수일자: 2013년8월26일, 수정완료일: 2013년9월25일

### I. 서 론

정보통신설비의 보호를 위한 피뢰시스템에서 접지시스템은 뇌격전류를 대지로 방류시키는 중요한 역할을 한다. 이 때 접지시스템의 저항은 뇌격전류의 방류효과와 직접적인 관련이 있다. 그래서 대부분의 접지시스템에 대한 성능 평가는 접지저항 값으로 이루어진다. 하지만 접지저항값만으로 접지시스템의 전기적 성능을 평가하는 것은 매우 제한적인 접근이다. 전원주파수의 전원에 대한 접지시스템의 성능은 저항값으로도 충분하지만, 뇌격전류나 전원시스템에서 발생하는 스위칭 서지와 같은 과도특성을 갖는 전류원에 대한 성능을 분석하는 데 한계가 있다. 이러한 문제점에 대한 해결방안으로 최근 들어 접지시스템의 성능평가가 임피던스의 범위에서 이루어지고 있다<sup>[1]</sup>.

접지시스템의 전기적 특성은 접지시스템이 매설되어 있는 위치의 토양의 유전율과 도전율과 밀접한 관련이 있다<sup>[2-3]</sup>. 토양은 대부분 다양한 종류의 물질로 이루어져 있는데, 흙과 흙 사이의 공기와 물도 포함된 복합적인 유전체이다. 이와 같이 다양한 유전특성을 갖는 물질들이 혼합되어 이루어진 토양이기 때문에 인가되는 전계의 주파수 범위에 따라 다양한 분극현상들이 나타난다. 특히 뇌격전류 범위 내에서는 계면분극(interfacial polarization)이 지배적으로 나타나게 되며, 분극현상에 의한 토양의 유전율과 도전율 특성이 접지전극의 임피던스를 분석할 때 반드시 고려되어야 한다.

정보통신 설비용 접지시스템의 성능평가는 임피던스 측정실험으로 이루어져야 가장 정확한 방법이지만, 공간상의 문제로 시뮬레이션이 많이 사용된다. 접지전극의 임피던스를 해석하는 방법은 크게 전송선로법<sup>[4]</sup>과 전자계법<sup>[5]</sup>이 있다. 전송선로법은 접지전극을 집중정수 혹은 분포정수로 해석하며, 대표적인 프로그램으로 EMTP가 있다. 전자계법은 안테나 이론을 이용하고 있으며, 전송선로 모델 보다 최소의 가정을 전제로 하기 있기 때문에 정확도가 더 높다. 대표적인 프로그램으로는 NEC가 있다. 하지만 두 시뮬레이션 방법 모두 토양의 유전율과 도전율 특성을 직접적으로 반영하기가 불가능하다는 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 뇌격전류 주파수 범위에서 토양의 유전율과 도전율 특성을 반영하여 보다 정확한 접지임피던스를 계산하고자 하였다. 전자계 모델에서 유

도된 포클링턴방정식에서 전류분포를 모멘트법으로 계산하는 프로그램을 MATLAB으로 구현하였다. 시뮬레이션 과정에서 토양의 유전율과 도전율 특성을 직접 적용하여 그 결과를 실험값과 NEC 결과와 비교하였다.

### II. 본 론

#### 1. 토양의 유전율과 도전율

토양은 장소에 따라 다양한 종류의 흙이나 돌로 이루어져 있다. 또한 흙과 돌 사이에는 공기나 수분이 포함되어 있어서 다양한 재질이 혼합되어 있는 혼합 유전체라고 할 수 있다. 이렇게 다양한 종류의 물질로 이루어진 유전체이기 때문에 인가 전계의 주파수에 따라 다양한 분극현상이 발생하게 된다. 유전율의 주파수 의존성에 대한 분극 메커니즘을 그림 1에 나타내었다. 주파수가 상대적으로 낮은 MHz 대역에서는 계면분극이 유전율 특성에 지배적이지만, 주파수가 증가할수록 분자, 혹은 원자의 분극에 의한 현상이 나타나는 것을 알 수 있다. 이와 같은 인가 전계에 의한 분극현상에 의해 확산과 흡수가 반복적으로 나타나게 되고, 결과적으로 유전율 특성을 결정짓게 된다.

유전율은 식 (1)의 복소유전율로 표현된다.

$$\epsilon^* = \epsilon - j \frac{\sigma}{\omega} = \epsilon' - j\epsilon'' \tag{1}$$

$\epsilon'$ 과  $\epsilon''$ 은 복소유전율의 실수부와 허수부를 각각 나타낸다.

물체의 유전율은 인가 전계의 주파수에 의해서 유전

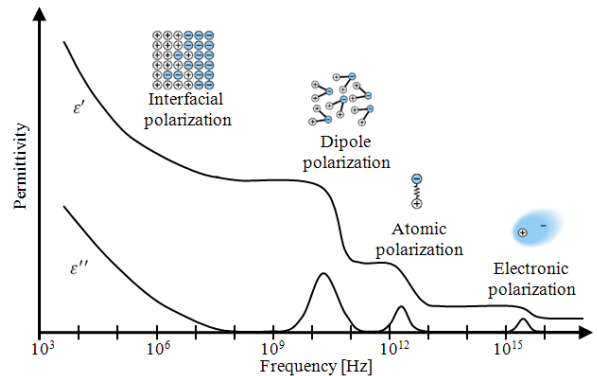


그림 1. 유전율의 주파수 의존성에 대한 분극 메커니즘  
Fig. 1. Polarization mechanisms to the frequency dependence of the permittivity.

분산(dielectric dispersion)과 유전 완화(dielectric relaxation)가 발생하게 된다. 유전 분산은 유전체의 유전율이 전계의 주파수에 의해 변화하는 현상으로 마이크로파와 자외선 범위에서 발생되기 때문에 뇌격전류의 주파수 범위(DC~4 MHz)에서는 해당되지 않는다<sup>[6]</sup>. 하지만 유전완화현상은 물질의 유전상수에서 순간적인 지연현상으로 분극현상에 의해 발생된다. 뇌격전류의 주파수 범위에서도 계면분극과 같은 현상이 발생되기 때문에 유전완화를 고려하여 토양의 유전율 특성을 적용해야한다.

유전완화에 대한 모델은 디바이(Debye)식을 적용하였다<sup>[7]</sup>.

$$\epsilon' = \epsilon_{\infty} + \frac{(\epsilon_s - \epsilon_{\infty})}{(1 + \omega^2 \tau^2)} \quad (2)$$

$$\epsilon'' = \frac{(\epsilon_s - \epsilon_{\infty})\omega\tau}{(1 + \omega^2 \tau^2)} \quad (3)$$

여기에서  $\omega$ 는 각주파수,  $\tau$ 는 완화시간을 나타내는 특성상수 그리고  $\epsilon_s, \epsilon_{\infty}$ 는 주파수가 0일 때와 무한대 일 때의 유전상수를 각각 나타낸다. 유전상수는 주파수와 온도 두 가지에 의존하는데, 본 논문에서는 주파수만을 변수로 고려하였다. 측정된 실험값에 대한 계절별 데이터를 갖고 있지 않기 때문에 온도 영향을 고려하지 않았다.

토양의 도전율 특성은 실험에 의해서 얻어진 수식을 인용하였다<sup>[3]</sup>.

$$\sigma(f) = [1 + (1.2 \times 10^{-6} \times \rho_0^{0.73})] \times [(f - 100)^{0.65}] \quad (4)$$

실험식에 얻어진 도전율 수식에서 최대 유효 주파수 범위는 4 MHz이다.

## 2. 수식 모델

접지극에서의 전류분포를 결정하기 위해 가장 첫 번째 단계는 수식 모델을 유도하는 것이다. 첫째로, 경계가 없는 대지에 대한 해를 구하는 것과 공기와 토양의 경계 효과를 고려하는 것이다. 수식 모델을 유도하기 전에 몇 가지 가정을 기본으로 한다. 대지는 동질(homogeneous) 물질로 이루어지며, 수평경계 면에 대해 반에 해당되는 영역을 차지한다. 접지극은 실린더

모양의 금속 도체로 만들어졌다고 가정하며, 가는 도선 근사를 도입한다. 즉, 도체 반지름에 대한 세그먼트 길이의 비는 1 보다 매우 작아야 한다<sup>[5]</sup>. 실제로 약 10배의 비율이 가는 도선 근사를 만족한다.

맥스웰방정식에서 안테나 이론에 많이 사용되는 포클링턴방정식을 유도할 수 있다. 접지극을 완전도체로 가정하여 입사전계는 산란전계와 부호만 반대로 동일한 값을 갖는다<sup>[8]</sup>.

맥스웰의 전자방정식은 스칼라전위( $\phi$ )와 벡터자위( $\mathbf{A}$ )로 표현이 가능하며, 이 둘은 전류의 함수이다. 전류  $\mathbf{I}(\mathbf{r}')$ 와 전하  $\sigma(\mathbf{r}')$ 에 의해 만들어지는 전극 표면의 한 점  $\mathbf{r}$ 에서의 산란 전계  $\mathbf{E}^s(\mathbf{r})$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{E}^s(\mathbf{r}) = -j\omega\mathbf{A}(\mathbf{r}) - \nabla\phi(\mathbf{r}) \quad (5)$$

손실 매질인 대지 속에서의 복소유전율로 식 (1)과 같이 표현되기 때문에 유전완화효과가 적용되지 않는다. 본 논문에서는 디바이식을 적용하여 유전완화효과를 고려한 유전율, 그리고 인용된 도전율 수식을 적용하였다.

가는 도선 근사를 통해서 식 (5)는 다음과 같은 포클링턴방정식으로 유도된다<sup>[8]</sup>.

$$E_z^i = \frac{j}{\omega\epsilon^*} \int_{-L/2}^{L/2} I_z(z') \left[ \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right] \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} dz' \quad (6)$$

여기에서  $r = \sqrt{(z - z')^2 + a^2}$  이다.

## 3. 전류분포 계산

접지전극의 임피던스를 구하기 위해서는 식 (6)의 전류분포를 알아야한다. 전류분포는 모멘트법을 통하여

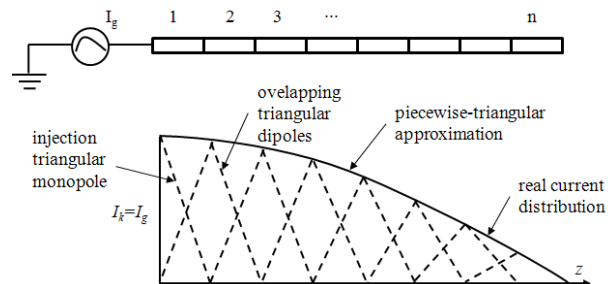


그림 2. 전류분포의 구분적 삼각 근사

Fig. 2. Piecewise-triangular approximation of current distribution.

계산이 가능하다. 전류분포는 식 (7)과 같이 기저함수와 계수의 곱으로 이루어진 유한개의 합으로 표현이 가능하다.

$$I \cong I_n = \sum_{i=1}^n a_i f_i \quad (7)$$

모멘트법은 기저함수와 가중함수의 선택에 따라 해의 정확도가 달라지는데, 본 논문에서는 기저함수와 가중함수가 삼각형함수(triangular function)로 동일한 켈러킨법을 적용하였다.

접지전극에 전류가 인가되었을 때 접지극에서의 전류분포를 그림 2에 나타내었다. 접지극의 한 쪽 끝에서 전류가 인가되기 때문에 모노폴로 구성된 삼각형 함수가 첫 번째 세그먼트에 적용되었다. 접지전극의 모든 세그먼트로부터의 영향을 고려할 때, 식 (6)은 다음과 같이 표현된다.

$$\sum_{i=1}^n [Z]_{ji} [I]_i = [V]_j \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

여기에서  $n$ 은 도체 세그먼트의 전체 수이며,  $[Z]_{ji}$ 는  $i$ 번째 세그먼트에 있는 소스에 의한  $j$ 번째 세그먼트의 관측점에서 상호임피던스(mutual impedance) 매트릭스를 나타낸다<sup>[9]</sup>. 따라서 전류분포는 상호임피던스의 역행렬만 계산하면 얻을 수 있게 된다. 접지전극이 대칭이기 때문에 토폴리츠(Toeplitz) 매트릭스를 이용하였다<sup>[5]</sup>.

이 모든 과정을 MATLAB을 이용하여 구현하였으며, 프로그램의 신뢰성은 상용프로그램과 비교를 통해 확인하였다.

#### 4. 실험

시뮬레이션 결과의 유효성을 확인하기 위해서 실제 접지전극의 임피던스를 측정하였다. IEEE Std. 81.2에 제시된 수정된 전위강하법을 사용하였다<sup>[10]</sup>. 전자유도에 의한 오차를 줄이기 위해서 전위보조전극과 전류보조전극을 90°로 설치하였다. 수평접지전극의 경우 전류보조전극과 전위보조전극을 90°로 배치하는 방법이 2가지가 있는데, 본 연구에서는 수평접지전극과 같은 선상에 전류보조전극을 설치하고 전위보조전극이 90°가 되도록 설치하여 도전유도의 영향을 줄였다.

실험에 사용된 수평 접지전극의 길이는 10 m와 50

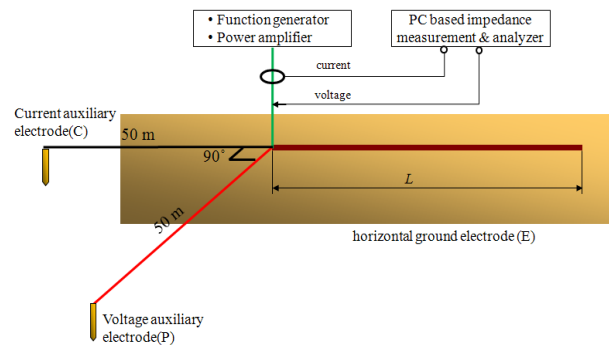


그림 3. 실험계의 구성도

Fig. 3. Configuration of the experimental setup.

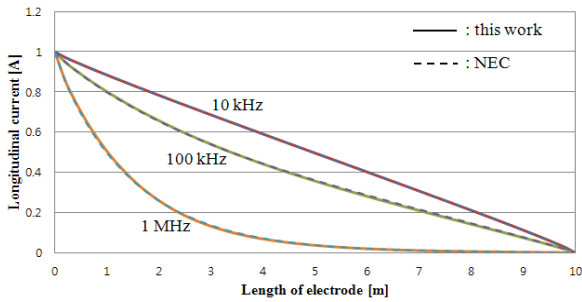
m이며, 반경은 5 mm이고, 매설깊이는 0.5 m이다. 인가하는 전류원은 함수발생기를 사용하였으며, 300 W용량의 증폭기를 사용하여 노이즈 영향을 최소화 하였다. 접지전극으로 흐르는 전류와 접지전극의 입력 측에서 측정된 전압은 100 MS/s 성능의 디지털타이저(NI 5112)를 사용하였다. 측정된 두 신호는 다른 주파수 성분에 대한 영향을 최소화하기 위해서 밴드패스 필터를 적용하였으며, 인가된 신호의 해석 주파수 범위는 인가된 주파수에서  $-f/4$ 에서  $+f/4$ 로 제한하였다. 전체 실험계의 구성도를 그림 3에 나타내었다.

### III. 결 과

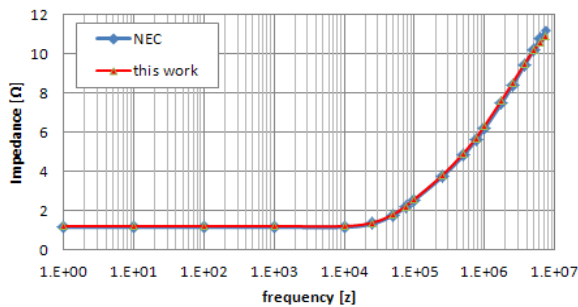
접지극의 임피던스를 계산하기 위해서 접지극의 각 세그먼트에서 전류분포를 계산하였다. 계산된 전류분포로부터 첫 번째 세그먼트에서의 전압을 구할 수가 있다. 인가된 전류가 1 A라고 가정하면, 그 때의 전압이 접지극의 임피던스가 된다.

10 m 수평접지전극에 대한 전류분포와 고조파임피던스를 계산하여 그림 4에 나타내었다. 수평접지전극이 매설된 토양의 대지저항률은  $10 \Omega \cdot \text{m}$ 로 가정하였으며, 전류분포는 인가되는 소스의 주파수가 10 kHz, 100 kHz, 1 MHz인 경우에 대해서 NEC 프로그램과 함께 각각 계산하였다. 약 10 MHz까지의 주파수 범위까지 임피던스를 계산하였다.

그림 4의 전류분포와 고조파임피던스 결과에서 NEC 프로그램의 결과와 본 연구의 결과와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 주파수가 1 MHz 이상인 경우 고조파 임피던스에서 약간의 차이가 발생하였는데, 이는 대지에 매설된 전극의 영상분에 대한 처리 방법의 차이에



(a) 전류분포



(b) 고조파임피던스

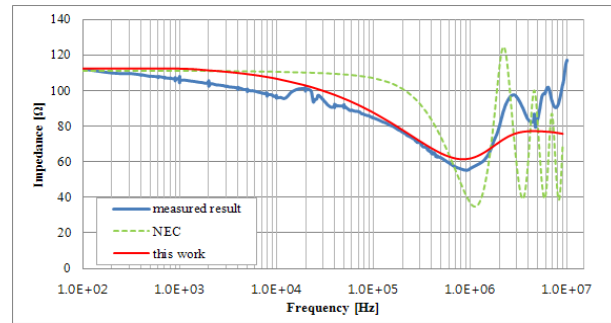
그림 4. 수평접지전극의 전류분포와 고조파임피던스(10 Ω · m)

Fig. 4. Current distribution and harmonic impedance of horizontal ground electrode (10 Ω · m).

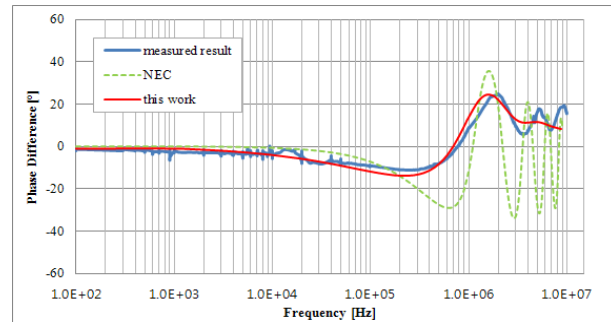
있다. NEC의 경우 영상분에 대한 계산은 좀머펠트(Sommerfeld)적분을 사용하였지만, 본 연구에서는 적용상의 편의와 계산시간의 단축을 위해서 수정된 영상법(modified image method)을 적용하였다<sup>[9]</sup>. 좀머펠트적분은 높은 주파수 성분을 고려할 때 꼭 필요하지만 뇌격전류와 같이 상대적으로 낮은 주파수 범위에서는 영상법으로도 충분한 결과를 얻을 수 있다.

디바이식의 유전율과 실험식에서 유도된 도전율을 적용하여 10 m 수평접지전극의 고조파임피던스와 위상차를 계산하였으며, 그 결과를 실험값과 비교하여 그림 5에 나타내었다. 10 m 수평접지전극이 매설되어 있는 토양의 측정된 평균 도전율은 0.0014 S/m이다.

토양의 유전율과 도전율 특성이 충분히 고려되지 않은 NEC 프로그램에서는 약 100 kHz까지 임피던스가 일정한 것을 알 수 있다. 또한 1 MHz 이상의 주파수 범위에서 접지전극의 인덕턴스 성분과 토양의 리액턴스 성분에 의해서 임피던스가 진동하는 현상이 발생하는 현상이 NEC 결과에 나타났다. 하지만 토양의 유전율과 도전율 특성을 고려한 경우 측정값과 유사한 결과를 보



(a) 고조파임피던스



(b) 위상차

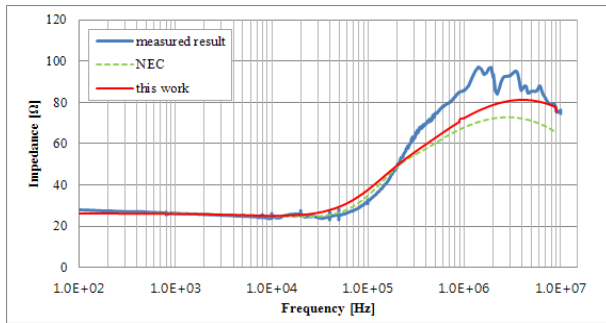
그림 5. 10 m 수평접지전극의 고조파임피던스와 위상차

Fig. 5. Harmonic impedance and phase difference of 10 m horizontal ground electrode.

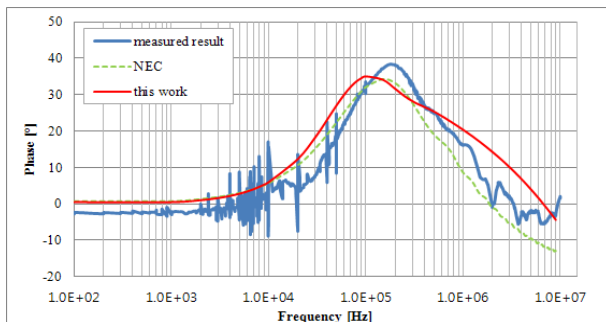
였다. 주파수가 약 500 kHz까지 임피던스가 점점 감소하는 현상이 측정값과 유사하게 나타났다. 주파수가 약 2 MHz 이상에서 측정값이 더 크게 나타난 이유는 접지극이 매설되어 있는 깊이까지의 연결선에 의한 인덕턴스 성분이 임피던스를 증가시킨 것으로 볼 수 있다. 인용된 도전율 수식의 유효 주파수 범위가 4 MHz이기 때문에 해당 주파수 범위에서는 측정값과 유사한 결과가 나타났다. 그림 5(b)의 위상차 결과 역시 유전율과 도전율을 고려한 경우가 측정값과 잘 일치하는 것을 확인하였다.

토양의 유전율과 도전율을 고려하여 50 m 수평접지전극의 고조파임피던스와 위상차를 계산하여, 그 결과를 그림 6에 나타내었다. 50 m 수평접지전극이 매설되어 있는 토양의 측정된 평균 도전율은 0.0018 S/m이다.

10 m의 접지전극과 동일하게 유전율과 도전율을 고려한 경우가 측정값과 더 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 접지극의 인출선을 고려하여 시뮬레이션을 수행한다면 인출선에 의한 인덕턴스성분이 추가되어 약 200 kHz 이상의 주파수 범위에서 임피던스가 증가될 것으



(a) 고조파임피던스



(b) 위상차

그림 6. 50 m 수평접지전극의 고조파임피던스와 위상차

Fig. 6. Harmonic impedance and phase difference of 50 m horizontal ground electrode.

로 예측된다. 50 m의 수평접지전극은 인덕턴스 성분이 크기 때문에 토양의 유전율과 도전율의 특성보다는 수평접지극의 인덕턴스 성분이 임피던스에 지배적인 영향을 준 것으로 나타났다.

10 m와 50 m 수평접지전극에 대한 고조파임피던스와 위상차를 비교해 본 결과 토양의 유전율 특성을 고려하여 시뮬레이션한 결과가 상용프로그램보다 실제 실험값과 일치하는 것을 확인하였다. 접지시스템의 정확한 고조파임피던스의 분석은 뇌격전류가 접지시스템에 들어왔을 때 발생하는 전위를 정확히 분석할 수 있다. 따라서 정확한 전위의 분석을 통해서 전기 및 전자기기의 임펄스 내전압을 결정하는 기초 자료로 활용이 가능하다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 토양의 유전율과 도전율 특성을 고려하여 정보통신설비용 수평접지전극의 임피던스를 계산하였다. 상용프로그램은 토양의 유전율과 도전율 특성

을 수정하여 적용할 수 없기 때문에 MATLAB을 이용하여 프로그램을 제작하였다. 전자계 이론을 바탕으로 하는 프로그램은 모멘트법을 적용하여 포클링턴방정식의 전류분포를 계산하였으며, 전류분포로부터 접지전극의 임피던스를 계산한다. 토양의 유전율은 디바이식을 적용하였으며, 도전율은 실험에 의해 얻어진 식을 인용하였다. 시뮬레이션 결과의 신뢰성을 확인하기 위해서 실제 접지전극의 고조파임피던스와 위상을 측정하여 시뮬레이션 결과와 서로 비교하였다. 그 결과, 토양의 유전율 특성과 도전율 특성을 반영한 경우가 실측값과 더욱 잘 일치하는 것을 확인하였다.

#### REFERENCES

- [1] ANSI/IEEE Std 81-1983, "IEEE Guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a ground system", pp.16~28, 1983.
- [2] ZC. Alex, J. Behari, "Complex dielectric permittivity of soil as function of frequency, moisture and texture", *Indian J Pure & Applied Physics* 34:319-323, 1996.
- [3] S. Visacro, R. Alipio, "Frequency dependence of soil parameters: Experimental Results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes", *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 27, No. 2, pp.927~935, 2012.
- [4] Y. Liu, M. Zitnik, R. Thottappillil, "An improved transmission line model of grounding system", *IEEE Trans. EMC*, Vol.43, No.3, pp.348~355, 2001.
- [5] L. Grcev, F. Dawalibi, "An electromagnetic model for transients in grounding systems", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol.5, No.4, pp.1773~1781, 1990.
- [6] IEC 62305-1, "Protection against lightning - Part 1: General principles", IEC TC 81, 2010.
- [7] P. Debye, "Scattering by an inhomogeneous solid", *Journal of Applied Physics*, Vol. 20, Issue:6, pp.518~525, 1949.
- [8] W. C. Gibson, "The method of moments in electromagnetics", Chapman & Hall/CRC, pp.33~79, 2008.
- [9] D. Poljak, V. Roje, "The integral equation method for ground wire input impedance", *Integral methods in science and engineering*, Vol. I, U.K., pp.139~143, 1997.

- [10] IEEE Std 81.2-1991, "IEEE Guide for measurement of impedance and safety characteristics of large, extended or interconnected grounding systems", pp. 10~16, 1991.

---

저 자 소 개



안 창 환(정회원)

1983년 원광대학교 공과대학  
전기공학과 학사 졸업

1991년 인하대학교 대학원  
전기공학과 석사 졸업

1999년 인하대학교 대학원  
전기공학과 박사 졸업.

2005년~현재 인하공업전문대학 디지털전자과  
교수.

<주관심분야 : EMI/EMC, 통신, 신호처리>