

수평으로 매설된 도선의 접지임피던스의 주파수의존성을 계산하는 기법

A Method of Computing the Frequency-Dependent Ground Impedance of Horizontally-buried Wires

조 성 철* · 이 복 희†
(Sung-Chul Cho · Bok-Hee Lee)

Abstract - The parameters of Debye's equation were applied to analyze the frequency-dependent ground impedance of horizontally-buried wires. We present a new method, based on Debye's equation, of analyzing the effect of polarization on frequency-dependent ground impedance. The frequency-dependent ground impedances of a horizontally-buried wire are directly measured and calculated by applying sinusoidal current in the frequency range of 100 Hz to 10 MHz. Also, the results obtained in this work were compared with the data calculated from empirical equations and commercial programs. A new methodology using the delta-gap source model is proposed in order to calculate frequency-dependent ground impedance when the ground current is injected at the middle-point of the horizontal ground electrode. The high frequency ground impedance of horizontal electrodes longer than 30 m is larger or equal to its low frequency ground resistance. Consequently, the frequency-dependent ground impedance simulated with the proposed method is in agreement with the experimental data, and the validity of the computational simulation approach is confirmed.

Key Words : Grounding system, Frequency-dependent ground impedance, Dielectric polarization, Debye's equation, Delta-gap source

1. 서 론

접지임피던스와 과도전위상승은 접지시스템의 성능을 평가하는데 사용되는 중요한 파라미터이다. 접지시스템에 뇌격이 입사할 때 접지시스템의 과도적인 전위상승을 측정하는 것은 용이하지 않기 때문에 접지임피던스의 주파수의존성은 고속푸리에변환을 활용한 시뮬레이션기법으로 해석되어 왔으며, 최근 접지임피던스를 정확하게 산출할 수 있는 실험적·수치해석적인 연구가 많이 이루어져 왔다[1-5].

토양의 저항률과 유전율의 주파수의존성은 접지시스템의 전위상승과 과도적 성능에 영향을 미치며, 이는 '접지임피던스의 주파수의존성'에 직접적으로 관련된다. 즉, 접지임피던스의 주파수의존성은 토양의 분극현상에 영향을 받으며, 지질분야에서 토양의 분극현상을 해석하는 많은 연구가 이루어져 왔다[6-8]. 접지임피던스의 주파수의존성을 해석할 수 있는 경험식이 문헌 [3,4]에 제시되었으나 이들 식은 정전계 상태에서 토양의 저항률과 유전율을 적용하여 도출되어 분극의 영향이 미약하다. 본 연구에서는

이러한 관점을 고려하여 접지임피던스에 대한 토양의 분극현상을 반영하여 해석하는 디바이식(Debye's equation)을 기반으로 하는 새로운 해석기법을 제안한다.

또한 수평 접지극의 접지임피던스를 평가할 때 고려해야 할 중요한 점은 접지전류의 입사점이다. 수평 접지극의 끝단에 접지전류를 입사시켜 접지임피던스를 해석하는 방법은 제안되었지만 [1,2,5] 실제로 피뢰시스템과 같이 뇌격전류가 수평 접지극의 중앙에 입사하는 경우를 해석한 연구는 거의 없다. 뇌격전류가 입사한 접지시스템의 과도특성에 크게 영향을 미치는 요소는 토양의 전기적 파라미터, 뇌격전류의 상승시간과 입사점, 토양의 분극현상 등이다[9].

본 논문에서는 접지시스템의 고주파 성능에 영향을 미치는 요인을 분석할 목적으로 수평 접지극의 중앙에 접지전류가 입사하는 경우 접지임피던스의 주파수의존성을 산출할 수 있는 미소갭 모델(delta-gap model)을 이용한 수치해석기법을 제안하였다. 미소갭 모델을 이용하여 산출한 접지전류가 대지로 분산되는 분포를 상용프로그램(CDEGS -HIFREQ module, version 2004, SES Technologies Ltd., Canada)로 계산한 결과와 비교·검토하였다. 뇌격전류의 주파수영역에서 토양의 저항률과 유전율을 파라미터로 하여 접지임피던스와 접지저항의 비로 나타난 규격화 접지임피던스(Z/R)를 산출하였다. 또한 접지전류의 입사점에 따른 접지임피던스의 주파수의존성에 대한 측정결과와 시뮬레이션결과를 비교하여 제안하는 수치해석기법의 정확성을 검토하였다.

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Inha University, Korea.
E-mail: bhlee@inha.ac.kr

* Electric Energy Conversion Research Division, Korea Electrical Engineering & Science Research Institute, Korea
Received : January 29, 2016; Accepted : April 8, 2016

2. 이론

2.1 접지임피던스의 주파수존성

접지임피던스의 주파수존성은 토양의 저항률 그리고 유전율과 밀접한 관련이 있으며, 접지극에 교류 전계가 입사되면 토양 입사 사이에서 분극이 일어난다. 토양의 유전분극은 외부에서 입사된 전계에 의한 전하의 변위로 일어난다[9]. 토양의 유전율은 복소수로 다음과 같이 표현된다.

$$\epsilon_r(\omega) = \epsilon_r'(\omega) - j\epsilon_r''(\omega) \quad (1)$$

여기에서 실수부 ϵ_r' 은 순수 분극의 척도를 나타내며, 허수부 ϵ_r'' 는 유전분극에 의한 에너지손실을 나타낸다[10]. 식 (1)에서와 같이 유전율은 입사되는 전계의 주파수와 밀접한 관계에 있는 것을 알 수 있다.

주요 분극메커니즘의 실효 주파수영역을 그림 1에 나타내었으며, 1 kHz ~ 10 MHz의 주파수 범위에서 유전율의 실수부와 허수부는 점차 감소한다. 피뢰설비에 입사하는 후속 뇌격전류의 전형적인 상승시간이 0.25 μ s로 대략 10 MHz 이내이며, 이 주파수영역에서는 주로 계면분극이다. 토양입자 사이의 계면에 전하가 축적되어 전위차를 형성하며, 토양의 분극이 활발해진다[11].

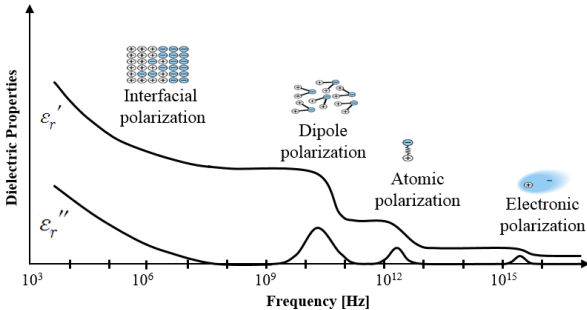


그림 1 주요 분극메커니즘의 실효 주파수영역

Fig. 1 Effective frequency ranges of major polarization mechanisms

지질학 분야에서 유전율의 특성을 분석할 때는 통상 Debye식을 적용한다[12]. 토양의 저항률은 저주파수에서의 저항률의 함수로 표현하며, 복소유전율을 나타내는 Debye식은 다음과 같다.

$$\epsilon' = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 - \omega^2 \tau^2} \quad (2.1)$$

$$\epsilon'' = \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty) \omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.2)$$

$$\rho = \rho_0 \left[1 - m_0 \left(1 - \frac{1}{1 + (j\omega\tau)^\beta} \right) \right] \quad (2.3)$$

여기서 ϵ_s 는 정적 유전율, ϵ_∞ 는 고주파 유전율, τ 는 완화시간, ρ_0 는 저주파수에서의 저항률, m_0 는 충전도(chargeability), β 는

토양입자의 크기에 의존하는 변수이다.

2.2 수평 접지극에서 전류분포

접지극의 반경이 입사전계의 과장보다 매우 작고 접지극의 길이가 반경보다 훨씬 큰 경우 수평 접지극은 근사적으로 가는 선 모델로 나타낼 수 있다[13]. 이 가정으로 접지극의 축을 따라 흐르는 선전류로 나타낼 수 있고 종단에서의 전류는 영(0)으로 된다. 토양은 저항률과 유전율로 특징지어지는 균질 인 반공간(half-space)으로 한다.

도선 안테나이론(wire antenna theory)과 수정된 영상법[2,14]에 따라 대지에 매설된 가는 선에 대한 전계적분방정식은 다음과 같다.

$$E_x^i = j\omega \frac{\mu}{4\pi} \int_0^L I(x') G(x, x') dx' - \frac{1}{j4\pi\omega\epsilon} \frac{\partial}{\partial x} \int_0^L \frac{\partial I(x')}{\partial x'} G(x, x') dx' \quad (3)$$

여기서 E_x^i 는 입사전계의 접선성분, $I(x')$ 는 도선 축을 따라 유도된 미지의 전류분포 그리고 $G(x, x')$ 는 전체 그린함수(Green's function)를 나타낸다[2].

$$G(x, x') = g_0(x, x') - R_{IM} g_i(x, x') \quad (4)$$

여기서 $g_0(x, x')$ 는 자유공간의 그린함수이다.

$$g_0(x, x') = \frac{e^{-jk_1 R_0}}{R_0} \quad (5)$$

여기서 $g_i(x, x')$ 는 영상이론으로부터 제거되며 다음과 같이 표현된다.

$$g_i(x, x') = \frac{e^{-jk_1 R_i}}{R_i} \quad (6)$$

여기서 R_0 와 R_i 는 각각 전류원에서 관측점 및 영상에서 관측점까지의 거리이다. 또한 k_1 는 지중에서의 전파정수를 나타내고, R_{IM} 는 수정된 영상법에서 도출된 계수이다[2].

$$R_{IM} = \frac{\epsilon_g - \epsilon_0}{\epsilon_g + \epsilon_0} \quad (7)$$

여기서 ϵ_g 는 손실이 있는 대지의 복소유전율이다.

$$\epsilon_g = \epsilon_r \epsilon_0 - j \frac{\sigma}{\omega} \quad (8)$$

여기서 ϵ_r 과 σ 는 각각 대지의 비유전율과 도전율이다.

그림 2에 매설된 수평 접지극의 개략을 나타내었으며, 접지극의 길이를 L , 반경을 a , 매설깊이를 d 로 나타내었다.

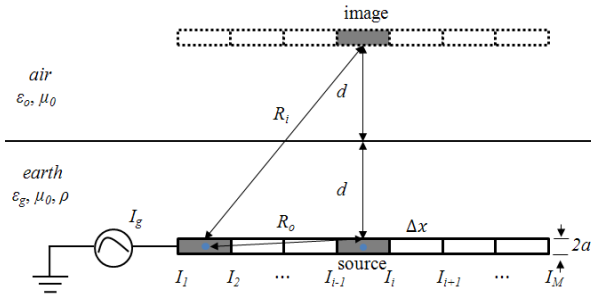


그림 2 대지에 매설된 수평 접지극의 해석모델의 개략
 Fig. 2 A schematic description of analysis model of a horizontal ground electrode located in the earth

전류분포는 모멘트법(moment of method)으로 얻어진 포클링턴 식(Pocklington's equation)의 해에 의해 정해진다[1]. 입사점에서 3각 모노폴의 전류는 전류발생기의 전류와 같다. 정현쌍극자(sinusoidal dipoles)의 수를 M 이라 할 때 정현모노폴의 전류는 $I_m = I_g$ 이며, 상응하는 행렬식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & z_{1M} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{M1} & z_{M2} & \dots & z_{MM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -z'_{1k} I_g \\ -z'_{2k} I_g \\ \vdots \\ -z'_{Mk} I_g \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서 Z_{ij} , $i, j = 1, 2, \dots, M$ 는 3각 쌍극자 M 사이의 상호임피던스이며, I_i , $i = 1, 2, \dots, M$ 는 3각 쌍극자의 미지의 전류이다. 또한 Z'_{ik} 는 k 로 나타낸 입사 3각 모노폴 사이의 상호임피던스이다. 접지극의 축을 따른 전류분포는 상호임피던스의 역행렬과 우변 항의 곱으로 산출된다. Z_{ij} 의 전체 요소는 수평 접지극이 선형이므로 토플리츠(toeplitz)행렬을 사용하여 계산할 수 있다[9]. Z_{ij} 의 단지 첫 번째 열에 대한 계산은 전체 계산시간을 단축시킨다.

2.3 미소갭 모델

수평 접지극의 접지임피던스는 전류의 입사점에 따라 변동될 수 있다. 지금까지는 주로 수평 접지극의 한 쪽 끝단에 접지전류가 입사되는 경우 접지임피던스의 주파수의존성에 대한 연구만 주로 이루어져 왔다[1,2]. 본 연구에서는 수평 접지극의 끝단과 중앙에 접지전류가 입사되는 경우 접지임피던스의 주파수의존성을 산출하는 기법을 제안하였다. 전류의 입사점에서 x 만큼 떨어진 위치에서의 전위는 다음과 같이 주어진다.

$$V^s(x) = -\frac{1}{j4\pi\omega\epsilon} \int_0^L \frac{\partial I(x')}{\partial x'} G(x, x') dx' \quad (10)$$

여기서 $G(x, x')$ 는 그린함수이다. 입사전류의 크기가 1 A일 때 전위는 수평 접지극의 임피던스로 된다.

접지전류가 수평 접지극의 중앙에 입사된 경우 접지임피던스의 주파수의존성은 그림 3(a)에 나타난 미소 갭 모델(delta-gap model)로 산출된다[13,14]. 미소 갭에 전류가 입사될 때 입사점

의 전위는 일정한 값 V_i 이며, 그 외 위치의 전위는 0으로 가정한다. 따라서 입사전계 E_x^i 또한 입사점에서만 일정하고 그 외의 위치에서는 0이 되므로 다음과 같이 표현된다.

$$E^i = \frac{V_0}{\Delta x} x \quad (11)$$

여기서 Δx 는 미소갭의 폭이고 V_0 는 항상 1로 한다.

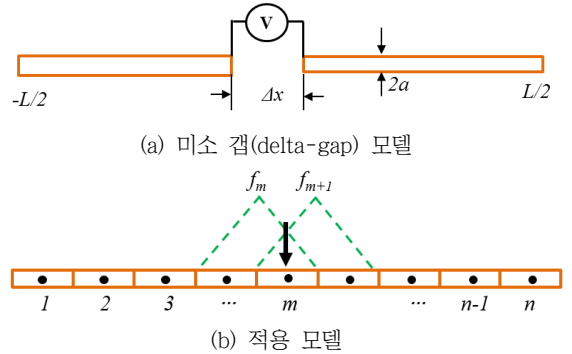


그림 3 미소 갭 모델과 적용

Fig. 3 Delta-gap model and its application

단지 중앙 세그먼트에서만 3각 쌍극자가 여기전압의 값을 가지며, 상응하는 행렬은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1N} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mN} \\ x_{m+11} & x_{m+12} & \dots & x_{m+1N} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{N1} & x_{N2} & \dots & x_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_m \\ I_{m+1} \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots \\ 0 \\ E_m \\ E_{m+1} \\ 0 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (12)$$

식 (12)의 우측 항이 중앙 세그먼트를 기준으로 양쪽에서만 전계가 존재하고 나머지는 영이 되는 것을 알 수 있다. 따라서 식 (12)의 해를 구하면 접지극의 전류분포를 구할 수 있다. 그 이후에 중앙 세그먼트의 전류값이 1이 되도록 만들어주고, 동일한 비율로 나머지 세그먼트의 전류값도 환산해 준다. 이것은 중앙에 입사되는 전류가 1 [A]가 되도록 만들어주는 것과 동일하며, 이때의 전류분포를 이용하여 접지극의 접지임피던스를 계산할 수 있게 된다.

3. 실험

본 연구에서 제안하는 접지임피던스의 주파수의존성을 해석하는 기법의 타당성을 확인하기 위한 일련의 실증실험을 수행하였다. 시험전류의 주파수에 따른 접지임피던스는 IEEE Std 81.2[15]에서 권장하는 전위보조극과 전류보조극을 각각 직각으로 배치하는 수정된 전위강하법을 적용하여 측정하였다. 전류보조극과 전위보조극은 각각 측정대상 접지극으로부터 150 m 떨어진 위치에 설치하였다. 길이 30 m, 50 m인 수평 접지극을 지표

면에서 0.5 m의 깊이에 매설하였으며, 접지임피던스는 PC기반의 접지임피던스분석기로 산출하였다[5]. 그림 4에 실험계의 개요를 나타내었으며, 시험용 정현파 전류는 주파수 대역이 80 MHz인 함수발생기와 주파수대역이 250 MHz인 전력증폭기를 이용하여 공급하였다.

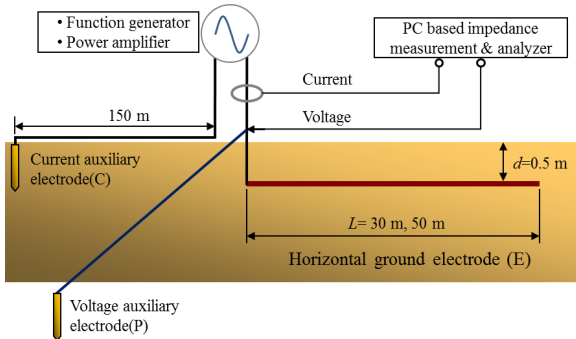


그림 4 실험계
Fig. 4 Experimental setup

수평 접지극을 설치하기 전에 실험장의 대지저항률을 측정하였으며[16], 측정 장소의 대지저항률의 평균값을 산출하여 Debye식의 저주파수 저항률(ρ_0)로 적용하였다. 길이 30 m와 50 m인 수평 접지극이 매설된 장소의 평균 대지저항률은 각각 $430 \Omega \cdot m$, $710 \Omega \cdot m$ 이었다.

4. 결과 및 고찰

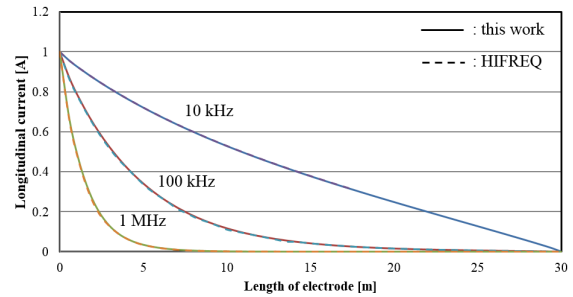
4.1 제안된 기법의 타당성 검토

측정대상의 접지극에 임펄스전류를 입사시켜 전위와 전류 파형을 측정 후 이들을 고속 푸리에변환하여 전위를 전류로 나누어 고주파 성분으로 접지임피던스의 주파수존성을 측정하기도 한다[17-19]. 그러나 본 연구에서 접지극에 정현파 전류를 직접 입사시켜 전위와 전류를 측정하여 접지임피던스를 산출하는 방법을 적용하였다. 이 방법은 수평 접지극에서 대지로 분산되는 종방향 전류분포를 시험전류의 주파수함수로 직접 측정하고 분석할 수 있는 장점이 있다. 또한 토양의 전기적 파라미터의 주파수의존성을 직접 시뮬레이션에 반영할 수가 있다.

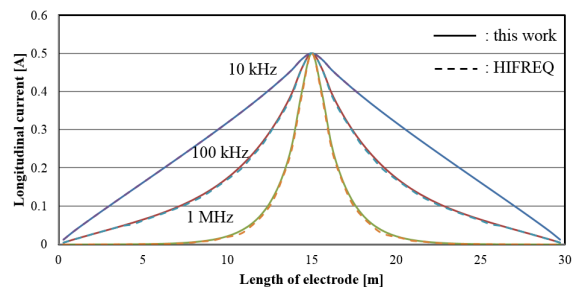
측정전류의 주파수에 따른 수평 접지극의 접지임피던스를 산출할 수 프로그램을 Matlab[5] (Version 7.4.0)을 기반으로 구현하였으며, 수평 접지극의 각 위치에서의 전류분포를 산출할 수도 있다.

제안한 시뮬레이션기법의 타당성을 확인하기 위해서 접지시스템의 전기적 특성을 분석하는 상용프로그램 CDEGS - HIFREQ 모듈로 계산한 결과와 비교하여 검토하였다. 토양의 저항률 $100 \Omega \cdot m$ 인 대지에 0.5 m의 깊이에 매설된 반경 10 mm, 길이 30 m인 수평 접지극의 전류분포를 주파수 10 kHz, 100 kHz, 1 MHz의 접지전류에 대하여 해석한 결과를 그림 5에 나타내었다.

상용 프로그램 CDEGS - HIFREQ 모듈로 계산한 결과와 거의 일치하여 제안한 시뮬레이션기법의 정확성이 양호한 것으로 판단하였다.



(a) 끝단 입사



(b) 중앙점 입사

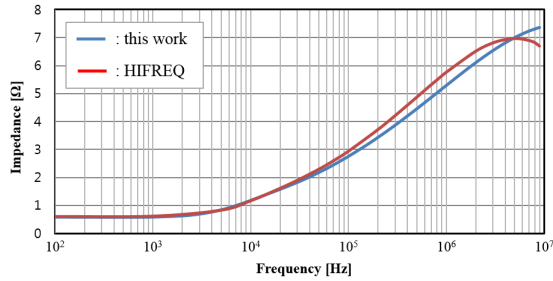
그림 5 접지전류의 주파수와 입사점을 파라미터로 하여 $100 \Omega \cdot m$ 의 대지에 매설된 길이 30 m인 수평 접지극의 종방향 전류분포의 비교

Fig. 5 Comparison of longitudinal current distributions of 30 m-long horizontal electrode buried in $100 \Omega \cdot m$ soil as parameters of the frequency and injection point of the ground current

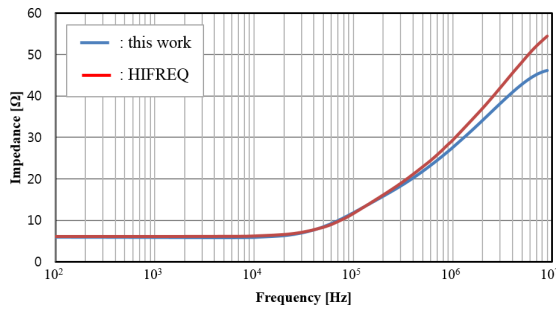
이들 결과로부터 입사전류의 주파수가 높아짐에 따라 입사점 근방에서 많은 양이 대지로 분산됨을 알 수 있다. 1 MHz 이상의 입사전류의 대부분은 수평 접지극의 5 m이내에서 대지로 방출됨을 알 수 있다.

또한 제안한 시뮬레이션기법과 상용 프로그램 HIFREQ모듈을 이용하여 뇌격전류의 주파수영역에서 수평 접지극의 접지임피던스의 주파수존성을 해석하였다. 대지저항률 10, 100, 1000 $\Omega \cdot m$ 인 장소에 매설된 길이 30 m인 수평 접지극의 주파수에 따른 접지임피던스의 해석결과를 그림 6에 나타내었다. 10 kHz 이하의 주파수에서 접지임피던스의 리액턴스성분은 무시할 수 있을 정도로 접지저항과 같았다. 그 이상의 주파수에서 유도성 효과에 의해 접지임피던스는 증가하였으며[16], 이러한 경향은 대지저항률이 작을수록 현저하였다. 즉, 리액턴스효과의 경향은 대지저항률이 작을수록 용량성 효과가 감소하므로 비교적 낮은 주파수에서도 현저한 것으로 판단된다. 제안한 시뮬레이션기법과 상용 프로그램 HIFREQ모듈을 이용하여 해석한 수평 접지극의 접지임피던스의 주파수존성은 비교적 잘 일치하였다. 그러나 약 100

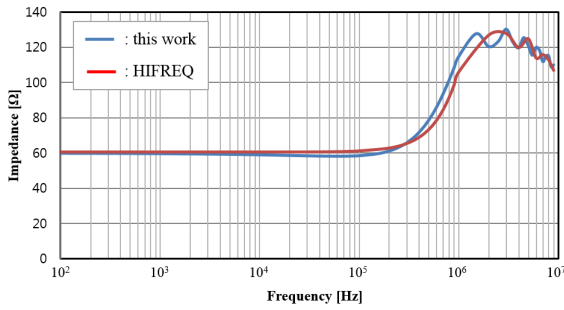
kHz이상의 주파수에서는 약간의 차이를 나타내었으며, 이는 해석에 반영된 토양의 전기적 파라미터의 주파수의존성의 영향인 것으로 생각된다.



(a) 대지저항률 : 10 Ω·m



(b) 대지저항률 : 100 Ω·m



(c) 대지저항률 : 1000 Ω·m

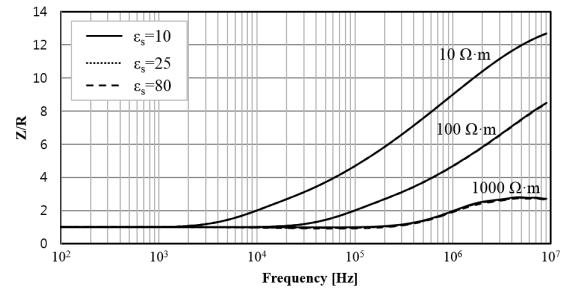
그림 6 대지저항률 (a) 10 Ω·m, (b) 100 Ω·m, and (c) 1000 Ω·m인 경우 길이 30 m인 수평 접지극의 접지임피던스의 주파수의존성

Fig. 6 Frequency-dependent ground impedances of 30 m-long horizontal electrode for (a) 10 Ω·m, (b) 100 Ω·m, and (c) 1000 Ω·m soil resistivity

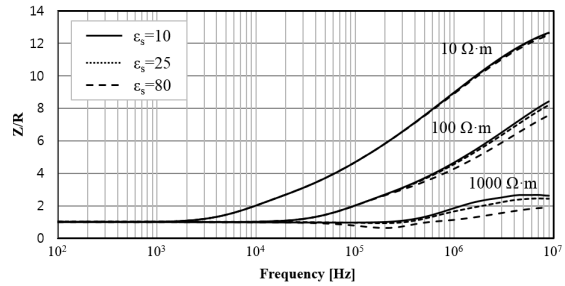
4.2 Debye식을 적용하여 해석한 접지임피던스

접지임피던스의 주파수의존성의 정확한 해석에 있어 디바이식 파라미터의 선정은 매우 중요하다. 대지를 침투하는 레이더는 주로 광물탐사에 이용하며, 대지를 침투하는 레이더에서 도출된 데이터는 토양의 성질을 나타내는 디바이식과 직접 관련되며, 변수 값은 다양한 지질 관련문헌을 기반으로 선정한다[8,20-23]. 디바이식의 주요 3가지 파라미터는 정적 유전율, 직류 저항률과 완화

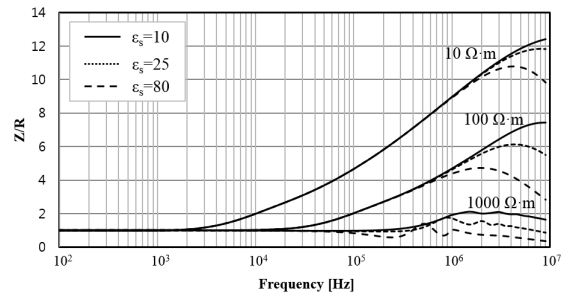
시간이다. 이들 파라미터는 토양의 종류, 수분함유량, 기공도, 온도 등 토양의 특성과 직접적으로 의존적이다. 특히 완화시간은 평균 이온의 변위길이의 제곱에 비례한다[24]. 완화시간은 수분함유량과 토양의 특성에 의존하므로 정확한 값을 결정하는 것은 매우 어렵다[25]. 따라서 완화시간은 전적으로 문헌으로부터 선정한다. 더불어 디바이식의 다른 파라미터는 100 Hz~10 MHz 주파수영역에서 접지임피던스에 거의 영향을 미치지 않으므로 $\epsilon_{\infty} = 4$, $m_0 = 0.005$, $\beta = 0.7$ 로 일정한 값으로 한다[12,23]. 저주파수 대지 저항률은 현장측정을 통하여 확보하며 정적 유전율은 모래질 토양에서는 10~25, 수분이 많은 경우 80으로 선정한다[20-24]. 토양의 저항률과 유전율의 주파수의존성에 대한 뇌격전류의 주파수 영역은 대략 10 Hz~4 MHz 범위로 한다[11].



(a) 완화시간 : 9.3 μs



(b) 완화시간 : 0.4 μs



(c) 완화시간 : 8 ns

그림 7 완화시간 $\tau=9.3 \mu s$, $\tau=0.4 \mu s$, $\tau=8 ns$ 에서 길이 30 m인 수평 접지극의 규격화 접지임피던스의 주파수의존성

Fig. 7 Normalized frequency-dependent ground impedance for 30 m-long horizontal ground electrode for relaxation times of $\tau=9.3 \mu s$, $\tau=0.4 \mu s$, and $\tau=8 ns$

일반적으로 접지임피던스의 주파수의존성을 평가할 때 주파수에 따른 접지임피던스와 접지저항의 비로 나타내는 규격화 접지임피던스 (Z/R)로 나타내면 해석결과의 비교에 있어 편리하다 [26]. 길이 30 m인 수평 접지극의 한 쪽 끝에 접지전류를 입사시켜 100 Hz ~ 10 MHz의 주파수범위에서 정적 유전율, 대지저항률과 완화시간을 파라미터로 하여 접지임피던스를 해석한 결과를 그림 7에 나타내었다. 완화시간은 문헌 [20], [25], [27]을 참고로 하여 9.3 μ s, 0.4 μ s와 8 ns로 선정하였다. 약 30 kHz 이하의 주파수에서 유전율의 영향은 거의 없었으며, 100 kHz 이상의 주파수에서 규격화 접지임피던스 Z/R 은 유전율이 증가함에 따라 감소하였다.

그림 7(a)에 나타난 것처럼 완화시간 $\tau=9.3 \mu$ s일 때 규격화 접지임피던스는 주파수범위 100 Hz~10 MHz에서 유전율의 영향은 거의 없으며, 단지 대지저항률에 따라 지배적으로 변동하였다. 이것은 완화시간 $\tau=9.3 \mu$ s서 유전율의 주파수의존성이 나타나지 않음을 의미한다. 그림 7(b)에서 처럼 완화시간 $\tau=0.4 \mu$ s일 때 규격화 접지임피던스는 대지저항률 10 $\Omega \cdot$ m에서는 유전율의 영향이 거의 없었으나 대지저항률 100, 1000 $\Omega \cdot$ m일 때 100 kHz 이상의 주파수에서 유전율의 영향이 나타나며, 대지저항률이 클수록 그리고 주파수가 높을수록 분극의 영향은 증가하였다. 토양의 저항률과 유전율은 높은 주파수에서 접지임피던스의 변동에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 대지저항률이 낮을수록 유도성 효과에 의해 규격화 접지임피던스 Z/R 이 1보다 커지는 현상이 나타나 주파수의존성이 큰 것을 알 수 있다.

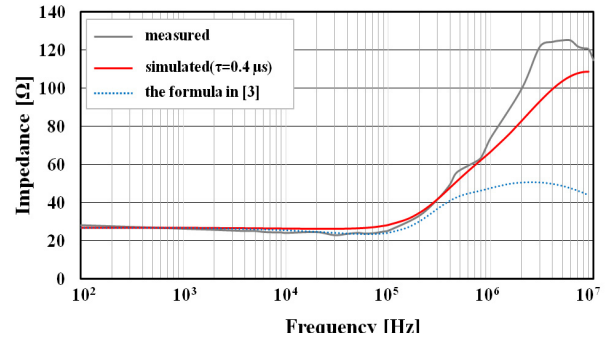
그림 7(c)에 나타난 바와 같이 완화시간 $\tau=8$ ns에서조차 1 MHz 이상의 주파수에서 유전율에 따라 접지임피던스가 변동하였다. 물의 완화시간은 대략 2.1~9.9 ns 정도로 [25], 수분이 많이 함유된 대지에 접지극이 매설된 경우 접지임피던스는 고주파수에서 낮아지는 것으로 판단된다. 이들 결과로부터 적절한 완화시간의 선정이 접지임피던스의 주파수의존성 해석에 중요한 요소로 볼 수 있다.

4.3 대지파라미터에 대한 경험식과 제안하는 기법으로 산출한 접지임피던스의 비교

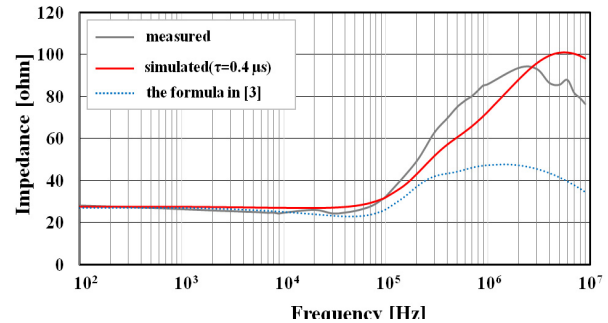
토양의 파라미터 값의 선정은 접지극의 접지임피던스의 주파수의존성에 대한 해석결과에 크게 영향을 미친다 [4, 26-27]. 본 연구에서 제안한 디바이식을 이용하는 해석기법으로 산출한 수평 접지극의 접지임피던스의 주파수의존성을 직류 저항률을 기반으로 하는 문헌 [3,4]에 제시된 대지파라미터에 대한 경험식을 적용하여 해석한 결과와 실측결과의 비교를 그림 8에 나타내었다. 길이 30 m인 수평 접지극은 평균저항률 430 $\Omega \cdot$ m인 대지에 그리고 길이 50 m인 수평 접지극은 평균저항률 710 $\Omega \cdot$ m인 대지에 매설되었다.

길이 30 m와 50 m인 수평 접지극의 접지임피던스는 주파수 100 kHz 이하에서는 거의 일정하다. 토양의 파라미터는 현장측정과 표본측정으로 도출하였다. 100 kHz 이상에서는 주파수와 더불어 접지임피던스가 증가하였으며, 이는 수평 접지극이 길기 때문에 유도성이 현저함을 의미한다. 100 kHz 이하의 주파수에서 본 연구에서 제안한 기법으로 해석한 결과는 실측결과 및 문헌

[3,4]의 경험식으로 산출한 결과가 모두 잘 일치하였으나 수 백 kHz 이상의 주파수에서는 편차가 발생하였다. 이는 해석에 적용한 토양의 파라미터의 주파수의존성이 다르기 때문에 일어난 것으로 본 연구에서의 해석결과는 문헌 [3]의 경험식으로 산출한 결과에 비하여 실측결과와 보다 잘 일치하는 경향을 나타내었다.



(a) 길이 30 m인 수평 접지극



(b) 길이 50 m인 수평 접지극

그림 8 제안한 기법과 경험식으로 산출한 접지임피던스의 비교
Fig. 8 Comparison of the ground impedances derived from the proposed method and the empirical formula

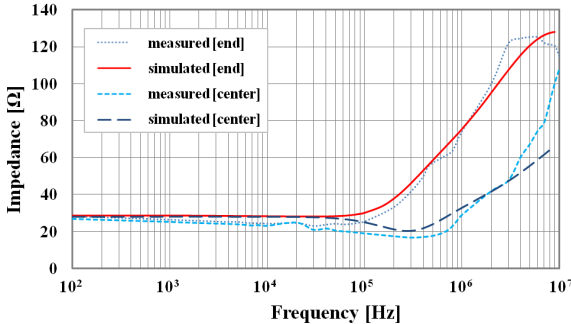
문헌 [3]의 경험식을 이용한 해석결과는 100 kHz 이상의 주파수에서 실측결과보다 상당히 작게 나타났으며, 이는 문헌 [3]의 경험식에 용량성 효과가 과도하게 반영된 것으로 볼 수 있다. 디바이식을 적용하는 접지임피던스의 해석기법이 보다 합리적인 것을 알 수 있다.

4.4 접지전류의 입사위치에 따른 접지임피던스의 비교

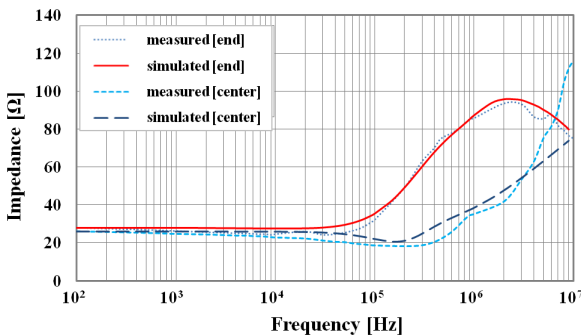
길이 30 m와 50 m인 수평 접지극의 끝단과 중앙에 접지전류를 입사시킨 경우 주파수에 따른 접지임피던스를 측정하고 해석한 결과와의 비교를 그림 9에 나타내었다. 약 30 kHz 이상의 주파수에서 중앙에 접지전류를 입사시킨 경우 접지임피던스가 작았으며, 주파수가 증가함에 따라 그 차이는 현저하게 나타났다. 그 이유는 고주파수영역에서 접지전류를 접지극의 중앙에 입사시키면 끝단에 입사시킨 경우에 비하여 길이가 1/2인 접지극 2개가 병렬로 접속된 것과 등가로 되어 유도성 효과가 줄어들기 때문이다.

고주파수영역에서는 유도성 효과가 지배적이었으며, 실측값과

해석한 결과는 비교적 잘 일치하였으나 약간의 차이를 보이고 있다. 이는 수평 접지극의 매설된 대지의 구조, 혼합된 토양의 종류, 입자의 크기, 습도 등 실제의 토양의 모든 조건을 시뮬레이션에 반영할 수 없기 때문인 것으로 판단된다. 약 3 MHz 이상의 주파수영역에서 완화시간 0.4 μ s는 너무 길어 용량성 효과의 약화로 시뮬레이션결과가 실측값보다 크게 나타난 것으로 보인다. 본 연구에서 제안한 디바이식을 이용한 접지임피던스의 해석기법의 유용성이 입증되었으며, 디바이식의 파라미터의 선정에 중요한 요소임이 밝혀졌다.



(a) 길이 30 m인 수평 접지극



(b) 길이 50 m인 수평 접지극

그림 9 접지전류의 입사점에 따른 접지임피던스의 주파수 의존성의 비교

Fig. 9 Comparison of frequency-dependent ground impedances as a function of the injection point of the ground current

5. 결 론

본 연구에서는 접지전류의 입사점에 따른 수평 접지극의 접지 임피던스의 주파수 의존성을 해석하는 새로운 시뮬레이션기법을 제안하였다. 제안한 접지임피던스의 해석프로그램으로 산출한 결과를 실측결과 및 상용 프로그램 CDEGS - HIFREQ 모듈로 분석한 결과와 비교하여 우수성을 확인하였다.

또한 제안한 접지임피던스의 시뮬레이션기법은 디바이식을 이용하여 토양에서의 분극현상을 반영하여 주파수 의존성을 해석하

며, 실제로 흔히 사용되는 접지전류가 수평 접지극의 중앙에 입사될 때의 접지임피던스를 해석할 수 있다. 또한 디바이식을 이용한 해석결과는 문헌 [3, 4]에 제시된 경험식을 이용한 시뮬레이션결과보다 실측값에 일치하였다. 길이 30 m와 50 m인 수평 접지극의 접지전류의 입사점에 따른 접지임피던스의 주파수 의존성의 시뮬레이션결과는 실측값과 비교적 잘 일치하였다. 약 100 kHz 이상의 주파수영역에서는 유도성 효과가 지배적이었으며, 접지극의 중앙에 접지전류를 입사시킨 경우 접지임피던스가 훨씬 작게 나타났다. 본 연구에서 제안한 접지임피던스의 해석기법은 접지시스템의 고주파 성능의 평가 및 설계에 활용될 것으로 기대된다.

References

- [1] L. D. Grcev, F. Dawalibi, "An electromagnetic model for transients in grounding systems", IEEE Trans. Power Del., Vol.5, No.4, 1990.
- [2] V. Doric, D. Poljak, V. Roje, "Transient analysis of the grounding electrode based on the wire antenna theory", Engineering Analysis with Boundary Elements, Vol. 28, pp.801-807, 2003.
- [3] S. Visacro, R. Alipio, "Frequency dependence of soil parameters: Experimental results, predicting formula and influence on the lightning response of ground electrodes", IEEE Trans. Power Del., Vol.27, No.2, pp.927-935, 2012.
- [4] R. Alipio and S. Visacro, "Frequency dependence of soil parameters: Effect on the Lightning Response of Grounding Electrodes", IEEE Trans. EMC, Vol.55, No.1, pp.132-139, Feb. 2013.
- [5] C. H. Ahn, S. C. Cho, B. H. Lee, "Numerical calculation for frequency-dependent grounding impedance of horizontal ground electrodes", Proc. 8th Asia-Pacific International Conference on Lightning, 2013.
- [6] K. S. Cole, R. H. Cole, "Dispersion and absorption in dielectrics I: Alternating current characteristics", The Journal of Chemical Physics, Vol.9, pp.341-351, 1941.
- [7] J. R. Wait, "Physical model for the complex resistivity of the earth", Electronics letters, Vol.23, No.19, 1987.
- [8] P. N. Sen, W. C. Chew, "The frequency dependent dielectric and conductivity response of sedimentary rocks", Journal of Microwave Power, Vol.18, No.1, 1983.
- [9] L. D. Grcev and M. Heimbach, "Frequency Dependent and Transient Characteristics of Substation Grounding Systems", IEEE Trans. Power Del., Vol.12, No.1, pp. 172-178, 1997.
- [10] S. Visacro, R. Alipio, M. H. M. Vale, and C. Pereira, "The Response of Grounding Electrodes to Lightning Currents: The Effect of Frequency-dependent Soil Resistivity and

Permittivity”, IEEE Trans. EMC, Vol.53, No.2, pp.401-406, 2011.

[11] J. C. Santamarina, “Soil behavior at the microscale: Particle forces”, Proc. Symp. Soil Behavior and Soft Ground Construction, in honor of Charles C. Ladd, MIT, Cambridge, pp.1-32, 2001.

[12] N. Liu, “Soil and site characterization using electromagnetic waves”, Ph. D, dissertation, Virginia Tech Univ., U.S.A., 2007.

[13] W. C. Gibson, The method of Moments in Electromagnetics, Chapman & Hall/CRC, pp. 33-79, 2008.

[14] C. A. Balanis, Antenna Theory Analysis and Design-Third Edition, Wiley-Interscience, pp.447-450, 2005.

[15] IEEE Std. 81.2-1991, “IEEE Guide for measurement of impedance and safety characteristics of large extended or interconnected grounding systems”, pp.9-17, 1991.

[16] J. H. Choi, B. H. Lee, “Frequency-dependent grounding impedance of the counterpoise based on the dispersed currents”, Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol.7, No.4, pp.589-595, 2012.

[17] M. Akbari, K. Sheshyekani, and M. R. Alemi, “The Effect of Frequency Dependence of Soil Electrical Parameters on the Lightning Performance of Grounding Systems”, IEEE Trans. EMC, Vol.55, No.4, pp.739-746, 2013.

[18] S. Visacro, M. B. Guimaraes and L. S. Araujo, Experimental impulse response of grounding grids”, Electric Power Systems Research, Vol. 94, pp. 92-98, 2013.

[19] L. Grcev, “Impulse Efficiency of Ground Electrodes”, IEEE Trans. PD., Vol. 24, No. 1, pp. 441-451, 2009.

[20] F. Roth, P. Genderen, M. Verhaegen, “Analysis of the influence of mine and soil properties on features extracted from GPR data”, Proc. SPIE4394, Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets VI, 2001.

[21] K. Klein, J. C. Santamarina, “Methods for broad-band dielectric permittivity measurements(Soil-water mixtures, 5 Hz to 1.3 GHz), Geotechnical Testing Journal, Vol.20, No.2, pp.168-178, 1997.

[22] J. H. Scott, “Electrical and magnetic properties of rock and soil”, United States Department of the Interior Geological Survey, 1983.

[23] D. P. Snowden, G. C. Morris, “Measurement of the dielectric constant of soil”, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol.NS-32, No.6, 1985.

[24] R. L. van Dam, B. Borchers, “Methods for prediction of soil dielectric properties: a review”, Proc. of the SPIE, Vol.5794, pp.188-197, 2005.

[25] K. Titov, A. Tarasov, Y. Ilyin, N. Seleznev, A. Boyd, “Relationship between induced polarization relaxation

time and hydraulic properties of sandstone”, Geophysical Journal International, Vol.180, pp.1095-1106, 2010.

[26] S. Visacro and G. Rosado, “Response of Grounding Electrodes to Impulsive Currents: An Experimental Evaluation”, IEEE Trans. EMC, Vol.51, No.1, pp.161-164, 2009.

[27] N. Wagner, K. Kupfer, E. Trinks, “A broadband dielectric spectroscopy of the relaxation behaviour of subsoil”, Proc. 7th ISEMA, pp.1-8, 2007.

저 자 소 개



조 성 철 (Sung-Chul Cho)

1977년 12월 16일생. 2003년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 2005년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2014년 8월 동 대학원 졸업(공학박사). 현재 기초전력연구원 전기에너지변환팀 팀장.



이 복 희 (Bok-Hee Lee)

1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1988~89년 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 1995년 호주 Queensland대학 방문교수. 1999년 Cincinnati대학 방문교수. 2010~11년 한국조명전기설비학회 회장. 현재 인하대 IT공대 전기공학과 교수.