

전자계 이론을 기반으로 한 수평접지전극의 접지임피던스 수치계산

(Numerical Calculation for Grounding Impedance of a Horizontal Ground Electrode Based on the Electromagnetic Field Theory)

이복희* · 조성철**

(Bok-Hee Lee · Sung-Chul Cho)

Abstract

This paper deals with the numerical method of calculating the frequency-dependent impedances of grounding electrodes. The proposed electromagnetic field approach is based on the solutions to Maxwell's equations obtained from the method of moment in the frequency domain. In order to evaluate the quality of the proposed simulation method, the frequency-dependent impedances of horizontally-buried ground electrodes were presented. The program for calculating the current distributions and impedances of grounding electrodes was implemented in MATLAB. The grounding impedances of two 10m and 50m long horizontal ground electrodes were measured and simulated in the frequency range from 100Hz to 10MHz for easy analysis and comparison. Also the simulated results were compared with those calculated from a sophisticated computer program CDEGS (HIFREQ module). As a result, the resultant results of frequency-dependent impedances obtained by using the numerical simulation method proposed in this work are in good agreement with experimental data. The validity of the approach techniques was confirmed.

Key Words : Grounding Impedance, Method of Moment, Pocklington's Equation, Galerkin' Method, Modified Image Method

1. 서 론

인체의 안전과 전기전자장비의 보호를 위해서 접지전극의 전기적 특성에 대한 정확한 분석이 요구되고 있다. 접지전극의 여러 전기적 특성 중에서 접지전극의 저항이 접지성능의 판단 지표로 사용되는 경우 접지 설계에 있어서 가장 중요한 것은 요구되는 접지저항을 만족시키는 것이다. 하지만 접지저항은 직류에 대한 특성만을 반영하기 때문에 뇌격전류와 스위칭

* 주저자 : 인하대학교 IT공대 전기공학부 교수
** 교신저자 : 기초전력연구원 선임연구원
* Main author : School of Electrical Engineering,
Inha University, Professor
** Corresponding author : Korea Electrical
Engineering & Science Research Institute
Tel : 02-885-9443, Fax : 02-883-0827
E-mail : canfeel@snu.ac.kr
접수일자 : 2013년 11월 11일
1차심사 : 2013년 11월 14일
심사완료 : 2013년 12월 17일

서지 등과 같은 과도전류원에 대한 접지전극의 성능을 알 수 없다는 한계를 갖고 있다. 전원 및 통신시스템에서 사고의 주요 원인으로 서지가 해당되기 때문에 접지전극의 전기적 특성이 접지임피던스의 차원에서 분석될 필요가 있다.

접지시스템의 접지임피던스를 분석하는 방법은 크게 실험과 시뮬레이션으로 나뉜다. 접지임피던스의 측정방법으로 전위강하법이 표준으로 제시되어 있다 [1]. 하지만 실측은 시간적, 공간적으로 제약이 따르기 때문에 접지임피던스에 대한 시뮬레이션이 많이 사용되고 있다. 해석적 시뮬레이션을 하는 방법에는 전송선로법(TLM)[2-4]과 전자계이론(EMF)[5-7]이 가장 많이 사용되고 있다. 뇌격전류의 경우 약 10MHz까지의 주파수 성분을 포함하고 있으며, 이렇게 높은 주파수 범위에서 회로이론 모델을 이용한 해석은 한계가 있기 때문에 전송선로법이 주로 사용되고 있다. 전송선로법은 접지전극을 전송선로로 간주하여 해석하는 방법이며, 전자계 해석법은 맥스웰방정식에서 유도된 전파방정식의 해를 구하여 필요한 성분을 계산하는 방법이다. 하지만 전송선로법은 접지전극의 길이가 긴 경우에 적합하며, TEM(transverse electromagnetic) 모드의 전자계를 전제로 하기 때문에 과도현상을 완벽히 구현하기에는 한계가 있다.

이에 반해 전자계 이론은 최소의 가정으로 전파방정식의 해를 산출하기 때문에 가장 정확한 방법으로 알려져 있으며, 안테나 및 인체에 대한 영향의 해석 등에 주로 사용하고 있다. 전자계 이론은 관련 수식의 물리적 의미에 대한 이해와 그 해석이 매우 어렵다는 단점으로 인하여 이를 적용하여 접지전극의 임피던스를 해석한 결과는 많지 않으며, 국내에서 수행된 경우는 거의 없다. 국내에서는 대부분 전자계이론을 이용한 상용 프로그램의 해석결과를 접지설계에 사용하고 있다. 접지성능의 분석에 가장 많이 사용되는 프로그램으로 CDEGS가 있다. 그러나 CDEGS 프로그램은 매우 복잡한 구성으로 되어 있어 세부 항목에 대한 정확한 이해 없이 프로그램을 사용한다면, 그 해석결과를 신뢰할 수 없게 된다. 또한 가장 많이 활용되는 접지임피던스의 해석이 매우 번거롭고, 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다. 따라서 전자계 이론을 기반으로 하

여 접지임피던스를 해석하는 방법에 대한 이해와 더 나아가 프로그램의 개발, 특히 접지전극의 접지임피던스를 효율적으로 분석할 수 있는 방법의 개발이 요구되고 있다.

본 논문에서는 전자계 이론을 기반으로 한 수평접지전극의 접지임피던스를 시뮬레이션하고, 이를 측정값과 비교하였다. 안테나이론을 기반으로 맥스웰방정식에서 포클링턴 방정식을 유도하였으며, 캘리킨법을 적용하여 접지전극에서의 전류분포와 이를 이용하여 접지임피던스를 산출하는 프로그램을 MATLAB으로 제작하였다. 프로그램의 신뢰성을 확인하기 위해서 상용 프로그램인 CDEGS HIFREQ의 해석 결과와 비교하였다. 또한 실제 매설되어있는 수평접지전극의 접지임피던스를 측정된 결과를 시뮬레이션 결과와 서로 비교하였다.

2. 이 론

맥스웰방정식은 스칼라전위(ϕ)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 산란전계 $\mathbf{E}^s(\mathbf{r})$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{E}^s(\mathbf{r}) = -j\omega\mathbf{A}(\mathbf{r}) - \nabla\phi(\mathbf{r}) \quad (1)$$

여기에서 가는선 근사법[8]을 적용하면 오직 벡터자위(\mathbf{A})의 축방향 성분만이 영이 아니기 때문에 다음과 같이 간략화 된다.

$$E_x^s = -j\omega A_x - \frac{\partial\phi}{\partial x} \quad (2)$$

여기에서 벡터자위와 스칼라전위는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$A_x = \frac{\mu}{4\pi} \int_0^L I(x') G(x, x') dx' \quad (3)$$

$$\phi(x) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_0^L q(x') G(x, x') dx' \quad (4)$$

여기에서 $\phi(x)$ 는 접지전극의 전하분포, $I(x')$ 는 접지전극의 전류분포 그리고 $G(x, x')$ 는 그린함수(Green function)를 나타낸다. 그림 1과 같이 접지전극은 대지에 위치하기 때문에 영상분의 영향을 고려해야 정확한 해석이 가능하다. 공기 중에 위치한 영상분을 고려한 정확한 해석은 쑤머펠트(Sommerfeld) 적분이 적용되어야 한다[9]. 하지만 본 논문에서는 분석하고자 하는 주파수 범위를 고려했을 때 쑤머펠트 적분을 적용한 방법보다 간단하며, 계산시간도 단축할 수 있는 영상법을 적용하였다[10]. 접지전극의 영상분을 고려한 그린함수는 식 (5)와 같다.

$$G(x, x') = g_0(x, x') - R_{TM}g_i(x, x') \quad (5)$$

여기에서 $g_0(x, x')$ 는 대지의 그린함수를 나타내며, $g_i(x, x')$ 는 영상분에 대한 그린함수로 다음과 같다.

$$g_0(x, x') = \frac{e^{-jk_1 R_0}}{R_0}, \quad g_i(x, x') = \frac{e^{-jk_2 R_i}}{R_i} \quad (6)$$

R_0 와 R_i 는 대지와 영상분의 전류원(current source)과 관측점 사이의 거리를, k_1 과 k_2 는 대지와 공기 중에서의 전파상수를 각각 나타낸다. $R_0 = \sqrt{(x-x')^2 + a^2}$, $R_i = \sqrt{(x-x')^2 + 4d^2}$ 이며, a 는 접지전극의 반경이고 d 는 매설깊이이다. 그리고 R_{TM} 은 전류원과 관측점이 대지에 위치한 경우의 수정된 영상법[10]에 의한 적용계수이다.

$$R_{TM} = \frac{\epsilon_{eff} - \epsilon_0}{\epsilon_{eff} + \epsilon_0} \quad (7)$$

이 때 ϵ_{eff} 는 대지의 유효유전율을 나타낸다.

전류에 대한 연속의 식과 식 (3), 식 (4)를 식 (2)에 대입하면 다음과 같다.

$$E_x^s = -jw \frac{\mu}{4\pi} \int_0^L I(x') G(x, x') dx' + \frac{1}{j4\pi w \epsilon} \frac{\partial}{\partial x} \int_0^L \frac{\partial I(x')}{\partial x'} G(x, x') dx' \quad (8)$$

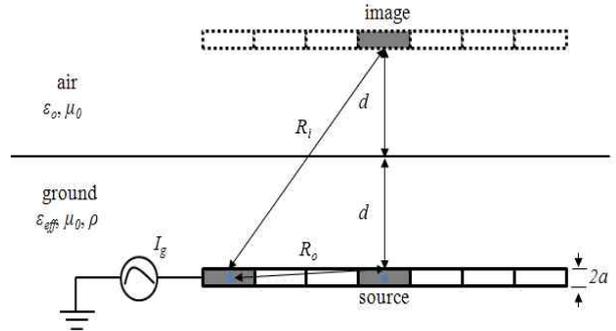


그림 1. 대지에 위치한 수평접지전극
Fig. 1. Horizontal ground electrode located in the ground

또한 접지전극을 완전도체라 가정하면 축방향 성분의 입사전계와 산란전계의 합은 식 (9)와 같이 영(0)이 된다.

$$E_x^s + E_x^i = 0 \quad (9)$$

따라서 식 (9)의 경계조건을 이용하면 입사전계 E_x^i 에 대한 다음과 같은 포클링턴 방정식(Pocklington's equation)이 유도된다[11].

$$E_x^i = jw \frac{\mu}{4\pi} \int_0^L I(x') G(x, x') dx' - \frac{1}{j4\pi w \epsilon} \frac{\partial}{\partial x} \int_0^L \frac{\partial I(x')}{\partial x'} G(x, x') dx' \quad (10)$$

접지전극의 임피던스를 구하기 위해서는 식 (10)에서 접지전극의 전류분포 $I_x(x')$ 를 구해야 한다.

식 (10)은 비제차(inhomogeneous) 형태의 방정식

$$L(I) = g \quad (11)$$

으로 표현이 가능하다[8]. 여기서 L 은 선형 연산자인 적분항과 미분항을 의미하며, g 는 입사전계로 소스(source)함수이고, I 는 구하고자 하는 각 위치에서의 전류밀도이다. 접지전극에서의 전류분포는 모멘트법으로 계산할 수 있다[12]. 본 논문에서는 삼각함수를 사용하는 기저함수와 가중함수가 같은 갤러킨법(Galerkin's method)을 적용하였다[13].

접지전극의 모든 세그먼트로부터의 영향을 고려할 때, 식 (11)은 다음과 같이 표현된다.

$$\sum_{i=1}^n [Z]_{ji} [I]_i = [V]_j \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

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[7]. 상호임피던스는 단지 접지전극의 형상, 주파수 그리고 토양의 특성에 의존하는 값이다.

삼각다이폴(triangular dipole)의 수가 M 개라 할 때 인가점의 삼각모노폴 전류는 $I_k = I_g$ 이고, 끝점의 전류는 영이 된다[13]. 이 때 식 (12)는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & z_{1M} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{M1} & z_{M2} & \dots & z_{MM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -z'_{1k} I_g \\ -z'_{2k} I_g \\ \vdots \\ -z'_{Mk} I_g \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기에서 z_{ij} , $i, j = 1, 2, \dots, M$ 은 M 번째 삼각다이폴간의 상호임피던스이며, I_i , $i = 1, 2, \dots, M$ 은 구하고자 하는 삼각다이폴 전류이다. 또한 z'_{ik} , $i = 1, 2, \dots, M$ 은 인가점의 삼각모노폴과 M 개의 삼각다이폴간의 상호임피던스이다. 상호임피던스 매트릭스의 역행렬을 구해서 우측항과 계산하면 접지전극의 전류분포를 구할 수 있다. 접지전극이 선형이므로 토플리츠(Toeplitz) 매트릭스를 이용하여 z_{ij} 의 전체 요소를 계산하였다[9]. 따라서 임피던스 매트릭스의 첫 번째 행만 계산하면 되므로 전체 계산 시간을 크게 단축할 수 있다. 접지전극 전체의 전류분포가 결정되면, 접지전극의 전압은 다음의 식으로 계산된다[14].

$$V^s(x) = -\frac{1}{j4\pi w \epsilon} \int_0^L \frac{\partial I(x')}{\partial x'} g(x, x') dx' \quad (14)$$

이 때 기저함수와 가중함수를 삼각함수로 사용했기 때문에 식 (14)에서 전류분포의 미분항은 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{\partial I(x')}{\partial x'} = I_i \frac{\partial f_i}{\partial x'} + I_{i+1} \frac{\partial f_{i+1}}{\partial x'} = \frac{I_{i+1} - I_i}{\Delta x} \quad (15)$$

따라서 식 (14)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V^s(x) = -\frac{1}{j4\pi w \epsilon} \sum_{i=1}^M \int_{x_i}^{x_{i+1}} \frac{I_{i+1} - I_i}{\Delta x} g(x, x') dx' \quad (16)$$

인가전류가 1A인 경우 식 (16)에서 첫 번째 세그먼트의 중앙에서 전압을 계산하게 되면, 그 전압은 접지전극의 입력임피던스가 된다.

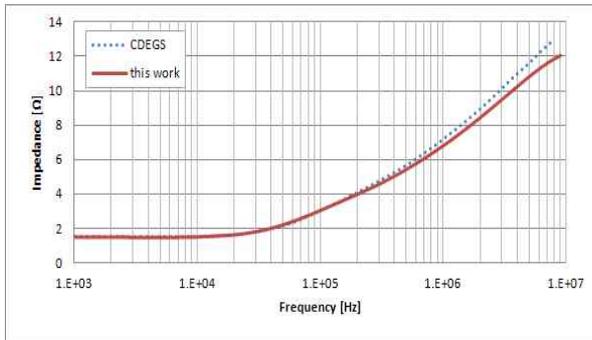
3. 결과 및 검토

3.1 접지임피던스의 주파수의존성 해석

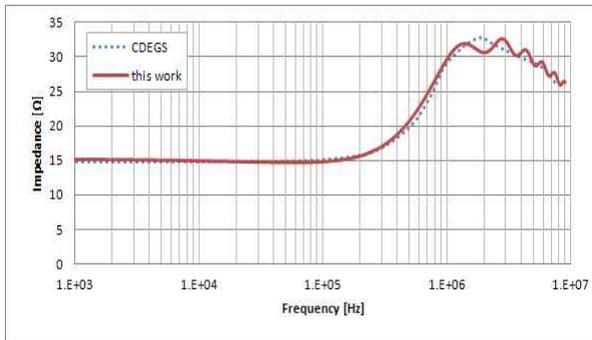
캘러킨법을 이용하여 산출한 포클링턴 방정식의 해를 기반으로 접지전극의 전류분포를 먼저 계산하고, 결정된 전류분포를 통해서 임피던스를 계산하는 프로그램을 MATLAB을 이용하여 제작하였다. 제작한 프로그램의 신뢰성을 확인하기 위해서 상용프로그램인 CDEGS HIFREQ으로 산출한 결과와 비교하였다. SES사의 CDEGS 프로그램은 현재 접지 해석 분야에서 가장 많이 사용되고 있는 프로그램이다. 시뮬레이션의 조건은 토양의 저항률이 10, 100, 1,000Ω·m인 경우에 대해서 접지전극의 임피던스를 각각 계산하였다. 접지전극은 길이 10m, 반지름 5mm이며, 매설깊이는 0.5m이다. 뇌격전류의 주파수 스펙트럼에 상응하는 주파수 영역까지 분석할 수 있도록 10MHz로 선정하였다. 대지저항률에 따른 접지전극의 임피던스를 본 연구에서 제작한 프로그램으로 시뮬레이션한 결과와 상용프로그램의 결과를 그림 2에 나타내었다. 상용프로그램은 접지전극의 첫 번째 세그먼트의 정중앙에서 임피던스를 계산하기 때문에 제작한 프로그램에서도 동일한 위치에서의 임피던스를 계산하였다.

본 연구에서 제안한 시뮬레이션방법과 상용프로그램을 이용하여 대지저항률을 파라미터로 산출한 접지 임피던스는 서로 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 대지 저항률이 10Ω·m인 경우 인가전류는 접지전극을 통

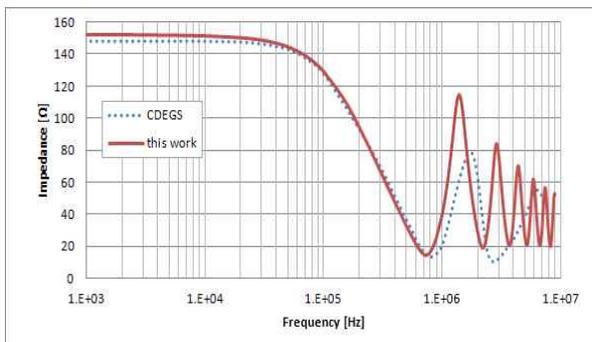
해 흐르는 동시에 상당부분 대지로 빠져나간다. 이 현상은 대지의 커패시티브 성분이 상대적으로 작아 $1/\sqrt{LC}$ 의 진동주파수가 작아져 분석하고자 하는 주파수 범위 내에서는 진동하는 현상 없이 접지전극의



(a) 대지저항률 10Ω · m



(b) 대지저항률 100Ω · m



(c) 대지저항률 1,000Ω · m

그림 2. 대지저항률을 파라미터로 산출한 길이 10m인 수평 접지전극의 임피던스의 주파수 의존성
Fig. 2. Frequency-dependent impedance of the 10m long horizontal ground electrode as a parameter of soil resistivity

인덕티브 성분에 의해서 임피던스가 증가하는 현상으로 나타났다. 이 현상은 두 시뮬레이션 결과가 거의 동일하게 나타났다. 하지만 약 700kHz 이상부터 시뮬레이션 결과값에서 차이가 나타나기 시작하였다. 그 이유는 포클링턴방정식에서 접지전극 세그먼트에서의 전류분포를 계산하는 방법과 접지전극의 영상분에 대한 해석 방법의 차이에 기인된 것으로 생각된다. 우선 상용프로그램은 점정합법[5,15]을 이용하였기 때문에 접지전극의 세그먼트 내에서 전류분포는 일정하다. 이것은 세그먼트의 크기가 일정 크기까지 작아지지 않는다면 높은 주파수 성분에 대한 전류분포가 세그먼트 내에서 일정하다는 것을 의미한다. 하지만 본 연구에서 제작한 프로그램에서는 삼각함수를 적용하였기 때문에 작은 세그먼트라 할지라도 전류분포가 달라진다[10]. 점정합법과 켈러킨법에 의한 시뮬레이션 결과의 정확도는 켈러킨법이 더 높다[12,13].

두 번째 이유는 접지전극의 영상분에 대한 해석방법의 차이에 있다. 접지전극의 영상분에 대한 정확한 해는 쯔머펠트 적분을 통해서 얻을 수 있다[16]. 상용프로그램에서는 이 방법을 적용하였다고 제시하고 있지만, 쯔머펠트 수식을 정확히 계산했는지 아니면 간단한 방법을 적용했는지는 확인할 수 없었다. 쯔머펠트의 적분은 수학적으로 복잡하게 이루어져 있으며, 계산시간도 매우 오래 걸리는 단점이 있기 때문에 본 논문에서는 수정된 영상법을 적용하였다[15]. 쯔머펠트 적분과 영상법에서의 차이는 약 1MHz 이상의 높은 주파수영역에서부터 발생하기 시작하며, 영상법을 적용하였을 때의 접지전극 전류분포가 더 크게 나타난다[17]. 따라서 주파수가 높은 영역에서 접지전극의 임피던스가 서로 정확히 일치하지는 않았다.

대지저항률이 100Ω · m와 1,000Ω · m인 경우에는 대지로 빠져나가는 전류는 상대적으로 적어서 반사파의 영향이 지속적으로 나타나는 특성을 보이고 있다. 그림 2 (b)의 경우 접지전극의 임피던스에 접지전극의 인덕턴스에 의한 유도성 특성이 주로 나타났다. 그림 2 (c)의 경우 약 100kHz부터 대지로 빠져나가는 전류의 크기가 증가하면서 대지의 용량성 특성이 접지전극의 임피던스에 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 1MHz 이상부터 진동되는 형상이 다르게 나타나는 이

유는 상용프로그램에 의한 계산결과의 데이터 수가 적기 때문이다. 상용프로그램에서 많은 주파수 성분 에 대한 임피던스를 계산하는 것은 매우 긴 시간이 소요되며, 계산 결과를 그래프로 표시하는 작업 시간 역시 오랜 시간이 걸린다. 하지만 본 연구에서 제안한 프로그램에서는 시뮬레이션과 동시에 그래프로 표시 하는 것이 가능하여 접지임피던스의 계산과 분석에 소요되는 시간을 줄일 수 있다.

3.2 측정결과와의 비교검토

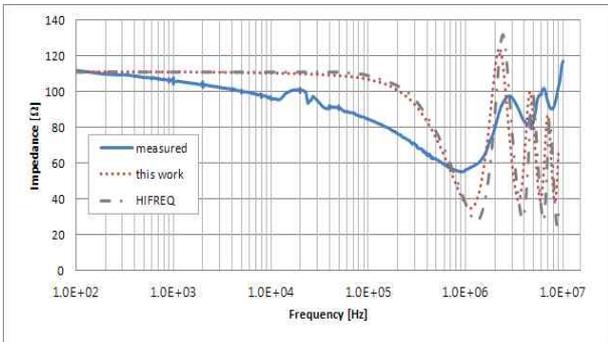
시뮬레이션 결과의 검증을 위해서 실제 접지전극의 접지임피던스를 측정하였다. IEEE Std. 81.2에 제시된 수정된 전위강하법을 사용하여 전자유도에 의한 오차를 줄이기 위해서 전위보조전극과 전류보조전극을 90°로 설치하였다. 수평접지전극의 경우 전류보조전극과 전위보조전극을 90°로 배치하는 방법이 2가지가 있는데, 본 연구에서는 수평접지전극과 같은 선상에 전류보조전극을 설치하고 전위보조전극이 90°가 되도록 설치하여 도전유도의 영향을 줄였다[18-19]. 실험에 사용된 수평 접지전극의 길이는 10m와 50m이며, 반경은 5mm이고 매설깊이는 0.5m이다. 접지전극에서 대지표면까지의 인출선은 접지전극과 동일한 반지름을 갖는 피복이 있는 전선을 사용하였다. 인가하는 전류원은 함수발생기를 사용하였으며, 300W 용량의 증폭기를 사용하여 인가 전원의 전력을 높였다. 접지전극으로 흐르는 전류와 접지전극의 입력 측에서 측정된 전압은 100MS/s의 성능을 갖춘 디지털저(NI 5112)를 사용하였다. 측정된 두 신호는 다른 주파수 성분 에 대한 영향을 최소화하기 위해 밴드패스(bandpass) 필터를 적용하였으며, 인가된 신호의 해석 주파수 범위는 인가된 주파수에서 $-f/4$ 에서 $+f/4$ 로 제한하였다. 시뮬레이션은 본 연구에서 제작한 프로그램과 상용프로그램으로 각각 실시하였으며, 인출선의 영향은 고려하지 않았다. 접지전극의 전체 세그먼트 수는 101개이며, 비유전율은 10으로 하였다. 길이 10m와 50m인 수평 접지전극이 매설되어 있는 주위의 대지구조를 분석하기 위해서 Wenner의 4전극법을 기반으로 하는 Syscal Pro를 사용하여 대지저항률을 측

정하였다[1]. 각각의 수평접지전극이 매설되어 있는 토양의 등가대지저항률은 각각 $730\Omega \cdot m$, $565\Omega \cdot m$ 이다[19].

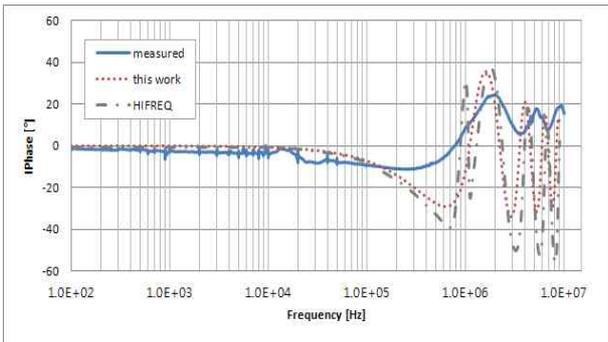
길이 10m인 수평 접지전극에 대한 임피던스와 위상을 그림 3에 나타내었다. 최초 시작되는 100Hz에서 접지임피던스는 111 Ω 으로 측정값과 시뮬레이션결과가 비슷하지만 주파수가 증가할수록 측정값과 시뮬레이션값에서 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 그 이유는 수평 접지전극이 매설된 대지가 동일 매질로 가정 한 시뮬레이션 조건과 비교했을 때, 실제 대지는 동일 매질이 아닌 다양한 대지저항률을 갖는 혼합 매질로 이루어졌기 때문이다. 약 1MHz를 기준으로 임피던스가 감소하다가 증가하는 현상은 측정값과 시뮬레이션 값에서 동시에 나타났다. 그리고 1MHz 이 후부터 임피던스가 진동하는 현상도 유사하게 나타났지만, 측정 결과의 진동주파수보다 시뮬레이션의 진동주파수가 더 큰 것을 확인할 수 있다. 진동주파수가 \sqrt{LC} 에 반비례하기 때문에 인출선의 인덕턴스가 포함된 측정 결과의 진동주파수가 더 작게 나타났다. 인출선을 포함한 접지전극의 인덕턴스 성분이 접지임피던스에 영향을 주기 시작하는 시점이 약 300kHz임을 그림 3 (b)의 위상에서도 알 수 있다. 그 이후에 측정결과에서는 토양의 종류에 따라 다른 커패시턴스와 접지전극의 인덕턴스가 인가된 주파수에 따라 진동하는 형태의 위상으로 나타났다. 측정결과는 인덕턴스가 크므로 유도성 영역에서 진동하는 현상을 보이지만, 시뮬레이션 결과에서는 커패시턴스 성분이 상대적으로 더 크게 나타났다. 두 시뮬레이션의 결과를 비교했을 때 큰 차이가 나타나지 않았지만, 주파수가 1MHz 근처에서 위상이 한 번 크게 진동하는 특이 현상이 상용프로그램의 계산결과에서 나타났다.

길이 50m인 수평 접지전극의 주파수에 따른 임피던스와 위상의 시뮬레이션결과와 측정결과와의 비교를 그림 4에 나타내었다. 길이 50m에 해당하는 인덕턴스에 의해서 진동주파수가 크게 줄어든 것을 알 수 있으며, 약 2kHz 이상의 주파수에서 유도성 특성이 지배적으로 나타나고 있음을 그림 4 (b)에서 확인할 수 있다. 길이 10m인 수평 접지전극의 특성과는 다르게 본 연구에서 제작한 프로그램으로 얻은 시뮬레이션결과와

상용프로그램에 의한 시뮬레이션결과는 약 50kHz 이하의 주파수 영역에서는 접지임피던스가 일치하였지만, 그 이상의 높은 주파수영역에서는 차이가 발생하였다. 위상에서는 약 10kHz에서부터 차이가 발생하면서 상용프로그램에 의한 결과의 위상이 300kHz에서부터 급격히 감소하는 것으로 나타났으며, 본 연구에서 제작한 프로그램을 이용한 시뮬레이션결과가 측정결과와 보다 잘 일치하는 것을 보여주고 있다.



(a) 임피던스



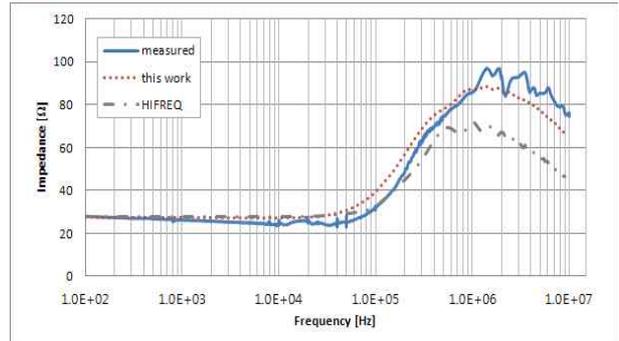
(b) 위상

그림 3. 길이 10m인 수평 접지전극의 임피던스와 위상에 대한 주파수의존성의 시뮬레이션결과와 측정결과와의 비교

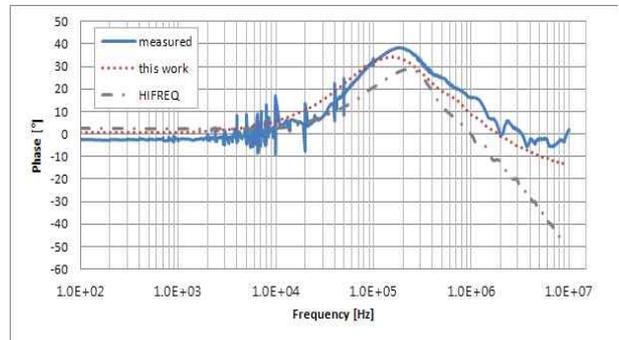
Fig. 3. Comparison between the simulated and measured results of frequency-dependent impedance and phase of the 10m long horizontal ground electrode

종합해 보면, 길이 10m와 50m인 수평 접지전극의 주파수에 따른 접지임피던스의 측정결과와 시뮬레이션결과를 비교해 볼 때 캘러킨법과 영상법을 적용하여 본 연구에서 제작한 프로그램의 시뮬레이션결과가

상용프로그램에 의한 결과보다 측정결과와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.



(a) 임피던스



(b) 위상

그림 4. 길이 50m인 수평 접지전극의 임피던스와 위상에 대한 주파수의존성의 시뮬레이션결과와 측정결과와의 비교

Fig. 4. Comparison between the simulated and measured results of frequency-dependent impedance and phase of the 50m long horizontal ground electrode

4. 결 론

본 논문은 전자계 이론을 기반으로 한 맥스웰방정식에서 포클링턴방정식을 유도하고, 모멘트법을 적용하여 접지전극의 전류분포와 임피던스를 MATLAB을 이용하여 해석하는 프로그램을 개발하여 수평 접지전극의 임피던스와 위상을 계산하였다. 접지전극 각 세그먼트에서의 전류분포는 삼각함수를 사용한 캘러킨법을 적용하여 산출하였으며, 접지전극의 영상분 계산에는 수정된 영상법을 적용하였다. 제안한 시뮬레이

선방법의 신뢰성을 확인하기 위해서 상용프로그램인 CDEGS HIFREQ에 의한 해석결과와 비교하였다. 본 연구에서 제작한 프로그램으로 해석한 수평 접지전극의 주파수에 따른 임피던스와 위상에 대한 결과는 상용프로그램 대부분 일치하였으며, 주파수가 높은 경우에 영상법의 계산방법에 따른 차이에 의해서 다소 차이가 발생하였다. 하지만 제안된 프로그램 결과가 상용프로그램의 해석결과보다 실측결과와 잘 일치하는 것을 확인하였다.

따라서 본 연구에서 개발한 접지임피던스의 주파수의존성을 해석하는 프로그램은 접지시스템의 접지임피던스 해석에 활용이 가능할 것으로 기대된다.

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] Y. Liu, M. Zitnik, R. Thottappillil, "An improved transmission line model of grounding system", IEEE Trans. on EMC, Vol.43, No.3, pp.348~355, 2001.

[3] G. Ala, M. L. Di Silverstre, "A simulation model for electromagnetic transients in lightning protection systems", IEEE Trans. on EMC, Vol.44, No.4, pp.539~554, 2003.

[4] M. I. Lorentzou, N. D. Hatziaargyriou, B. C. Papadias, "Time domain analysis of grounding electrodes impulse response", IEEE Trans. on Power Del., Vol.18, No.2, pp.517~524, 2003.

[5] L. Grcev, F. Dawalibi, "An electromagnetic model for transients in grounding systems", IEEE Trans. on Power Del., Vol.5, No.4, pp.1773~1781, 1990.

[6] L. D. Grcev, F. E. Menter, "Transient electromagnetic fields near large earthing systems", IEEE Trans. on Magnetics, Vol.32, No.3, pp.1525~1528, 1996.

[7] 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.

[8] R. F. Harrington, "Field computation by moment methods", Macmillan, New York, pp.1~21, 1968.

[9] L. Grcev, S. Grceva, "Comparison between exact and quasi-static methods for HF analysis of horizontal buried wires", IEEE Trans. on EMC, Vol.51, No.4, pp.1051~1054, 2009.

[10] T. Takashima, T. Nakae, and R. Ishibashi, "Calculation of complex fields in conducting media", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 15, pp. 1~7, 1980.

[11] L. D. Grcev, "Computation of transient voltages near complex caused by lightning currents", IEEE 1992 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp.393~400, 1992.

[12] A. T. Adams, "Method of moments applications. Volume I - An Introduction to the Method of Moments", Report RADC-TR-73-217, Syracuse University, pp.5~23, 1974.

[13] W. C. Gibson, "The method of moments in electromagnetics", Chapman & Hall/CRC, pp.33~79, 2008.

[14] D. Poljak, F. S. Rachidi, "Generalized form of telegrapher's equations for the electromagnetic field coupling to finite-length lines above a lossy ground", IEEE Trans. on EMC, Vol. 49, No.3, pp.689~697, 2007.

[15] F. Dawalibi, A. Selby, "Electromagnetic fields of energized conductors", IEEE Trans. on Power Del., Vol.8, No.3, pp.1275~1284, 1993.

[16] A. Banos, "Dipole Radiation in the Presence of a Conducting Half-Space", Oxford: Pergamon, 1966.

[17] A. Selby, F. P. Dawalibi, "Determination of current distribution in energized conductors for the computation of electromagnetic fields", IEEE Trans. on PD, Vol.9, No.2, pp.1069~1078, 1994.

[18] ANSI/IEEE Std 81.2-1991, "IEEE Guide for measurement of impedance and safety characteristics of large, extended or interconnected grounding systems", pp.19~30, 1991.

[19] MKE, "Developments of Optical Grounding Systems Considering Transient grounding impedance and EM", pp.146~163, 2011.

◇ 저자소개 ◇



이복희(李福熙)

1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 1995년 호주 Queensland대학 방문교수. 1999년 Cincinnati대학 방문교수. 현재 인하대 IT공대 전기공학부 교수. 본 학회 명예회장.

Tel : (032)860-7398

Fax : (032)863-5822

E-mail : bhlee@inha.ac.kr



조성철(趙成哲)

1977년 12월 16일생. 2003년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 2005년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정. 기초전력연구원 전력시험설비센터 선임 연구원.

Tel : (02)885-9443

Fax : (02)883-0827

E-mail : canfeel@snu.ac.kr