

다층 대지구조에서 수직 접지전극의 임계길이 산정

(Computation of the Critical Lengths of the Vertical Grounding Electrode
in Multi-Layered Soil Structures)

김기복* · 조정현 · 이복희

(Ki-Bok Kim · Jeong-Hyeon Joe · Bok-Hee Lee)

요 약

접지임피던스는 접지전극의 크기를 증가시켜도 낮아지지 않고, 토양의 특성과 주파수 조건에 따라 접지 임피던스가 최소값을 보이는 접지전극의 길이가 존재하며, 이 접지전극의 길이를 각 토양 특성과 주파수에 따른 임계길이라 한다. 본 논문에서는 대지구조의 조건을 고려하는 새로운 분포정수회로모델을 제안하였으며, 새로이 제안된 해석모델을 적용하여 MATLAB프로그램으로 수직접지전극의 임계길이와 접지임피던스를 해석하였다. 그 결과, 수직접지전극의 임계길이와 접지임피던스의 주파수의존성에 대한 대지구조의 영향이 크며, 접지시스템의 최적 설계를 위해서는 대지구조를 고려하는 것이 바람직한 것으로 밝혀졌다.

Abstract

The grounding impedance is not lowered by expanding the dimension of the grounding electrode, and the length of grounding electrode which shows the minimum value of the grounding impedance for each condition of frequency and soil characteristics is existent, and it is defined as Critical Length. In this paper, a new distributed parameter circuit model considering the condition of the multi-layered soil structures was proposed, and the grounding impedance and critical length of the vertical grounding electrode were analyzed by using the newly proposed simulation model and the MATLAB program. As a consequence, it was found that the effect of the soil structure on the frequency-dependent grounding impedance and critical length of the vertical grounding electrode is significant. It is desirable to consider the soil structure in optimal design of the grounding system.

Key Words : Frequency-Dependent Grounding Impedance, Critical Length, Multi-Layered Soil Structure, Distributed Parameter Circuit Model

* 주저자 : 인하대학교 대학원 전기공학과 박사과정

Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822

E-mail : kibok7@yahoo.co.kr

접수일자 : 2009년 12월 4일

1차심사 : 2009년 12월 14일

심사완료 : 2010년 1월 18일

1. 서 론

고주파성분을 포함한 뇌격, 개폐서지 등의 서지전류와 전자통신기기의 전자기장해(EMI)를 유발하는 고주파 이상전류에 대하여 접지전극은 주파수에 의존적인 상당히 복합적인 임피던스의 특성을 보인다[1-5]. 상용주파수와 같은 저주파수에서는 대지를 구성하는 토양의 저항성분이 접지성능에 지배적으로 영향을 미치지만, 고주파수에서는 접지저항과 더불어 접지전극의 인덕턴스와 토양의 커패시턴스에 의한 임피던스의 영향이 작용한다. 따라서 고주파 전류에 대한 접지전극의 성능은 접지임피던스로 평가하는 것이 바람직하다. 접지임피던스는 접지전극의 형상, 전류의 주파수, 토양의 특성에 영향을 받으며, 접지저항과는 달리 단순히 접지전극의 크기를 증가시킴으로써 낮출 수 없다[1].

접지전극의 접지임피던스는 전송선로 이론을 통해 구현된 분포정수회로모델로 해석할 수 있다[4-8]. 분포정수회로모델을 이용한 모의해석 결과에 따르면, 각 토양의 특성과 주파수에 따라 접지임피던스가 최소값을 보이는 접지전극의 길이가 존재하며, 이 최소값을 보이는 접지전극의 길이를 각 토양의 특성과 주파수에 대한 임계길이라고 정의한다[1].

기존의 분포정수회로모델은 균일한 저항률의 토양으로 구성된 단층 대지구조에 대하여 해석하였다[7-8]. 하지만 실제 대지는 각기 다른 저항률을 갖는 여러 층으로 구성되기 때문에 실험측정결과와 분포정수회로모델의 모의해석결과에 큰 차이가 발생하는 경우가 있다. 따라서 보다 정확한 해석을 위해서 접지전극이 시설된 장소의 대지구조를 고려해야 하며, 대지구조의 영향에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

본 논문에서는 대지구조를 고려할 수 있도록 분포정수회로모델을 수정한 해석기법[8]을 이용하여 수직접지전극의 길이에 따른 접지임피던스의 특성과 접지전극의 임계길이를 해석하였으며, 그 결과를 통해 대지구조의 영향을 분석하였다. 대지구조를 고려한 수직접지전극의 분포정수회로모델은 MATLAB 프로그램을 통해 구현하였으며, 구현된 모델을 이용하여 접지전극의 길이에 따른 접지임피던스의 특성과 접지전극

의 임계길이를 해석하고 그 결과를 검토하였다.

2. 모의해석 방법

2.1 대지구조 고려의 필요성

접지전극으로 유입된 서지나 고장전류는 매설된 접지전극을 따라 분산되는 누설전류의 형태로 대지로 방출되며[7-8], 접지전류의 분산특성은 전송선로 이론을 통하여 구현이 가능하다[4-8]. 상용주파수와 같이 낮은 주파수의 전류가 인가된 수직접지전극을 매우 작은 길이 dl 의 미소구간으로 나누어 생각해 보면, 그림 1 (a)와 같이 단일저항률의 대지에서는 각 미소구간을 통해 대지로 방류되는 전류가 모든 미소구간에서 동일하다. 그러나 그림 1 (b)와 같이 깊이에 따라 토양이 각기 다른 저항률을 갖는 다층 대지구조에서는 미소구간을 통해 방류되는 전류가 각 층 토양의 저항률에 따라 변하게 된다.

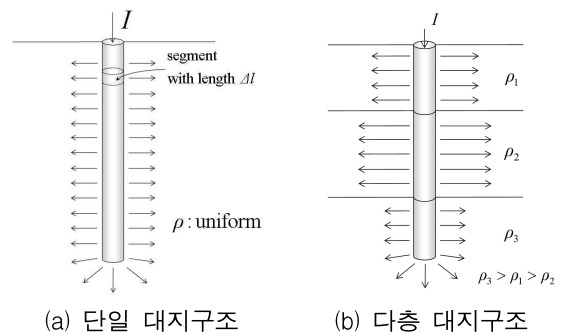


그림 1. 대지구조에 따른 상용주파전류의 흐름
Fig. 1. Flows of power frequency current in soil with different resistivity

2.2 분포회로정수의 산정

분포정수회로모델은 그림 2와 같이 접지전극을 이루는 도체의 저항(R)과 인덕턴스(L), 그리고 접지전극이 매설된 토양의 컨덕턴스(G)와 커패시턴스(C)를 분포회로정수로 표현하며, 분포회로정수와 전송선로의 전파방정식을 이용하여 접지전극의 접지임피던스를 산출한다[4-5].

접지전극 재료인 동의 저항률 $10^{-8}[\Omega \cdot m]$ 에 비해서 토양의 저항률은 $1 \sim 10^6[\Omega \cdot m]$ 으로 $10^8 \sim 10^{14}$ 배의 차이가 나기 때문에 접지시스템을 해석할 때 접지전극 자체의 저항(R)은 무시할 수 있다[9]. 따라서 접지저항(R_0)은 접지전극 주변의 토양의 저항률에 의해 결정되며[8], 토양의 저항률과 접지전극의 형상에 의해 식 (3)의 Tagg의 수직접지전극의 접지저항식과 같은 관계를 갖는다[10-11]. 분포정수회로모델에서 토양에 의한 단위길이당 컨덕턴스는 접지저항과 관련된 회로 정수이며, 식 (3)의 접지저항의 역수를 접지전극의 길이로 나누어 식 (4)과 같이 산정한다.

$$G = \frac{2\pi}{\rho \ln\left(\frac{4l}{d}\right)} \quad [U/m] \quad (4)$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0}{\ln\left(\frac{4l}{d}\right)} \quad [F/m] \quad (5)$$

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{4l}{d}\right) \quad [H/m] \quad (6)$$

여기서, l 은 수직접지전극의 길이, d 는 접지전극의 직경, ρ 는 토양의 저항률이다.

2.3 단층 대지에서 분포정수회로모델

수직접지전극에 대한 분포회로정수와 식 (7)과 (8)의 전송선로의 전파방정식[14]을 이용하여 접지전극의 전류 인가점에서 바라본 임피던스 즉, 접지임피던스를 식 (9)과 같이 산출한다. α 와 Z_c 는 각각 전파정수와 특성임피던스로 분포회로정수와 관계는 식 (10), (11)과 같으며, 접지전극의 끝단은 무부하로 가정한다 [1,15].

$$E_s = E_r \cosh(\alpha l) + I_r Z_c \sinh(\alpha l) \quad (7)$$

$$I_s = I_r \cosh(\alpha l) + \frac{E_r}{Z_c} \sinh(\alpha l) \quad (8)$$

$$Z = \frac{e^{2\alpha l} + 1}{e^{2\alpha l} - 1} Z_c \quad (9)$$

$$\alpha = \sqrt{j\omega L(G + j\omega C)} \quad (10)$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (11)$$

여기서, E_s, I_s 는 송전단 전압과 전류이며, E_r, I_r 은 수전단 전압과 전류이다.

2.4 대지구조를 고려한 분포정수회로모델

접지전극을 통해 대지로 방류되는 전류의 분산특성

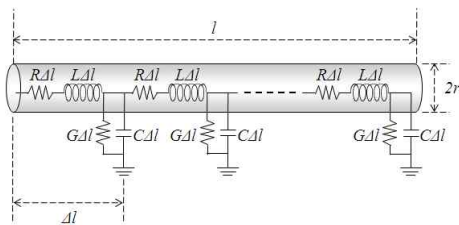


그림 2. 분포정수회로모델의 등가회로
Fig. 2. Equivalent circuit for the distributed parameter circuit model

전송선로 이론에 의하면 임의의 형태의 전송선로에 대하여 분포회로정수 G, C, L 은 식 (1)과 (2)와 같은 상관관계를 갖는다[12-13].

$$C/G = \epsilon_r \epsilon_0 \rho \quad (1)$$

$$LC = \mu_0 \epsilon_r \epsilon_0 \quad (2)$$

단, ϵ_r 은 토양의 비유전율, ϵ_0, μ_0 는 진공의 유전율과 투자율이다.

G, C, L 의 상관관계와 식 (4)와 같이 산정된 G 를 통하여, C 와 L 을 식 (5)와 (6)과 같이 산정할 수 있다 [13,14]. 수직접지전극에 대한 Tagg의 접지저항식은 식 (3)과 같으며, 수직접지전극의 분포회로정수는 식 (4)~(6)과 같이 계산된다[14].

$$R_0 = \frac{\rho \ln\left(\frac{4l}{d}\right)}{2\pi l} \quad [\Omega] \quad (3)$$

에 대지구조의 영향을 반영하기 위해서, 분포정수회로 모델을 전파방정식을 통해 수정한 해석기법을 이용하였다. 수직접지전극의 분포회로정수의 산정은 분포정수회로모델과 동일하며, 식 (7)과 (8)의 전송선로의 전파방정식을 통해 전류인가지점에서 바라본 임피던스 (Z_s)는 식 (16)과 같이 계산할 수 있다. 그림 3은 다층 대지구조(3 지층)에 설치된 접지전극의 전형적인 한 예를 보여준다. 그림 3의 왼쪽 끝부분이 수직접지전극의 하단 끝부분에 해당한다.

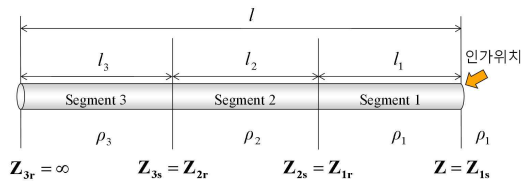


그림 3. 다층 대지에서 수직접지전극의 분포정수회로모델
Fig. 3. Distributed parameter circuit model of the vertical grounding electrode buried in multi-layered soil

본 연구에서 제안한 해석기법은 그림 3과 같이 접지전극이 매설된 대지의 각 층의 길이와 동일하게 접지전극을 나누어 각 segment의 전류인가지점에서 바라본 임피던스를 식 (12)를 통해 순차적으로 계산하는 방법으로 접지임피던스를 산출한다.

$$Z_s = \frac{E_s}{I_s} = \frac{Z_r \cosh(\alpha l) + Z_c \sinh(\alpha l)}{\cosh(\alpha l) + \frac{Z_r}{Z_c} \sinh(\alpha l)} \quad (12)$$

분포정수회로모델에서는 직선형 접지전극의 특성 구현을 위해 접지전극의 끝단을 개방상태로 가정한다. 따라서 segment 3의 Z_{3r} 은 무한대($Z_{3r} = \infty$)로 간주되며, segment 3의 전류인가지점에서 바라본 임피던스 Z_{3s} 는 식 (12)를 통해 계산될 수 있다. 그 결과는 식 (13)과 같으며 α_3 와 Z_{3c} 는 식 (10)와 (11)에 ρ 대신 ρ_3 를 대입하여 계산한다.

$$Z_{3s} = \frac{Z_{3c}}{\tanh(\alpha_3 l_3)} \quad (13)$$

Z_{3s} 는 segment 2의 수전단 측 임피던스로 간주될 수 있다($Z_{2r} = Z_{3s}$). 따라서 Z_{2r} 이 식 (13)을 통해 구해지므로, 위에 제안한 식 (12)를 이용하여 segment 2의 전류인가지점에서 바라본 임피던스 Z_{2s} 를 식 (14)과 같이 구할 수 있다.

$$Z_{2s} = \frac{Z_{3s} \cosh(\alpha_2 l_2) + Z_{2c} \sinh(\alpha_2 l_2)}{\cosh(\alpha_2 l_2) + \frac{Z_{3s}}{Z_{2c}} \sinh(\alpha_2 l_2)} \quad (14)$$

동일한 방법으로 segment 1의 Z_{1s} 는 식 (15)로 구할 수 있으며, Z_{1s} 는 접지전극 전체의 전류인가지점에서 바라본 임피던스이므로 접지전극 전체의 접지임피던스를 의미한다. 따라서 위의 과정을 통하여 식 (16)과 같이 접지임피던스를 산출할 수 있다.

$$Z_{1s} = \frac{Z_{2s} \cosh(\alpha_1 l_1) + Z_{1c} \sinh(\alpha_1 l_1)}{\cosh(\alpha_1 l_1) + \frac{Z_{2s}}{Z_{1c}} \sinh(\alpha_1 l_1)} \quad (15)$$

$$Z = Z_{1s} \quad (16)$$

3. 해석조건 및 측정방법

각 지층의 저항률이 다른 부지를 대상으로 다층 대지구조를 고려하여 해석하였으며, 이 부지에는 길이 48[m], 직경 54[mm]의 수직 접지전극을 시설하였다. 길이 48[m]의 수직 접지전극 주변의 대지구조를 대상으로 접지전극의 길이를 1[m]부터 1,000[m]까지 0.01[m] 간격으로 변화시키며 접지임피던스를 해석하였으며, 인가전류의 주파수는 10[kHz], 100[kHz], 1[MHz], 10[MHz]의 4가지 주파수에 대하여 해석하였다.

대지구조는 그림 4의 2차원의 토양의 저항률 측정결과를 토대로 그림 5와 같이 10개의 지층으로 나누었다. 그림 5에서 가장 왼쪽이 지표면이며, 오른쪽으로 갈수록 깊이가 더 깊은 지층을 나타낸다.

접지전극의 전위측정은 전자유도결합에 의한 영향을 최소화하기 위해 IEEE Std 81.2-1991에서 권고하는 전류보조전극을 전위보조극과 90[°] 각도를 이루게 배치하는 수정된 전위강하법을 적용하였으며, 도전유

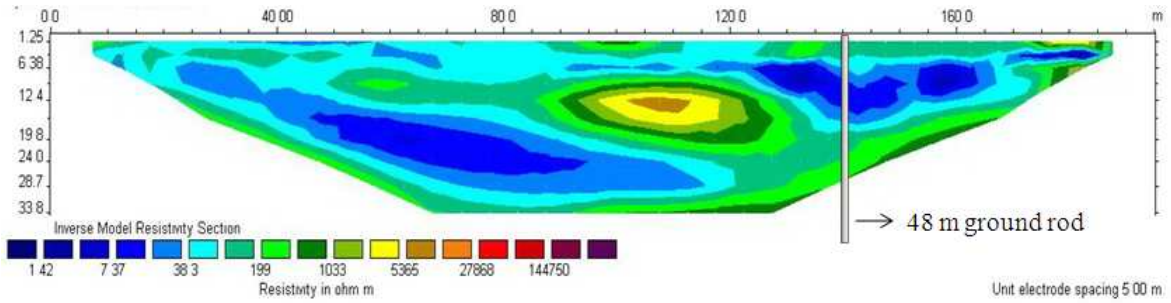


그림 4. 수직 접지전극이 설치된 시험장 토양의 저항률 분포
 Fig. 4. Profile of the soil resistivity mapping at the test site where the vertical grounding electrode was installed

2 m	3 m	4 m	5 m	3 m	4 m	3 m	4 m	5 m	15 m
$\rho_1 = 400$	$\rho_2 = 150$	$\rho_3 = 85$	$\rho_4 = 50$	$\rho_5 = 125$	$\rho_6 = 240$	$\rho_7 = 400$	$\rho_8 = 700$	$\rho_9 = 1100$	$\rho_{10} = 1500$

그림 5. 48[m] 수직 접지전극 주변의 단순화한 대지구조
 Fig. 5. Simplified soil structures surrounding the 48[m] vertical grounding electrode

도에 의한 오차를 5[%] 미만이 되도록 48[m] 수직 접지전극에 대하여 50[m]로 이격하였다[16]. 이 수정된 전위강하법을 이용하여 측정된 48[m] 수직 접지전극의 접지저항은 5.5[Ω]이며, 이 접지저항 측정값을 식 (3)을 통하여 역산한 토양의 겉보기 저항률은 203.6 [Ω · m]이다. 이 역산된 토양의 겉보기 저항률을 통해 단층 대지구조에 대하여 해석하였다.

토양의 비유전율은 측정이 불가능하기 때문에 단일 비유전율로 가정하였으며, 건조한 토양의 비유전율은 약 2~3이고 물의 비유전율이 대략 80 정도인 것을 고려하여 10~80의 범위의 비유전율에 대하여 해석하였다[12,17-18]. 본 논문에서는 단층 대지구조로 해석한 결과와의 비교·분석을 위하여 토양의 비유전율은 측정결과와 가장 유사한 결과를 보이는 비유전율 12로 설정하였다.

4. 결과 및 검토

4.1 접지전극의 길이에 따른 접지임피던스의 특성

접지전극의 임계길이 산정에 앞서 48[m] 수직접지전극이 시설된 위치의 대지구조를 고려하여 접지전극

길이(l)에 따른 접지임피던스를 해석한 결과를 단층 대지구조로 해석한 결과와 비교·분석하기 위하여 그림 6을 통하여 두 가지 해석결과와 측정결과를 나타내었다.

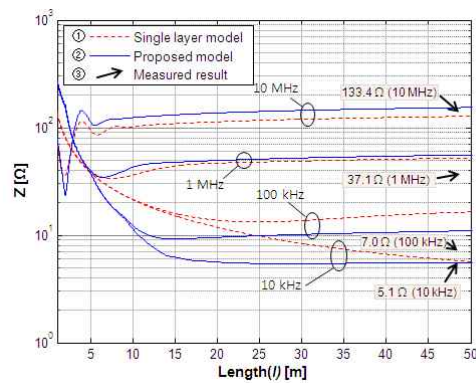


그림 6. 두 모델을 통해 해석한 접지전극의 길이에 따른 접지임피던스의 비교

Fig. 6. Comparison between the results simulated by two models for the grounding impedance as a function of the length of grounding electrode

다층 대지구조로 해석한 결과가 전반적으로 단층 대지구조로 해석한 결과보다 측정결과에 더 근접한 결과를 보여주는 것을 확인할 수 있다. 특히 100[kHz]의

다층 대지구조에서 수직 접지전극의 임계길이 산정

주파수에 대하여 단층 대지구조로 해석한 결과가 측정결과와 상당한 차이를 보이는 반면에, 다층 대지구조로 해석결과는 측정결과에 더 근접한 결과를 나타낸다. 다만, 다층 대지구조를 고려한 해석결과에서도 여전히 차이가 존재했으며, 이는 본 연구에 사용된 2차원의 토양의 저항률 측정보다 더 자세한 3차원적인 대지구조를 측정하고, 토양의 비유전율의 특성[17-18] 등을 반영함으로써 더 정확한 해석이 가능할 것이다.

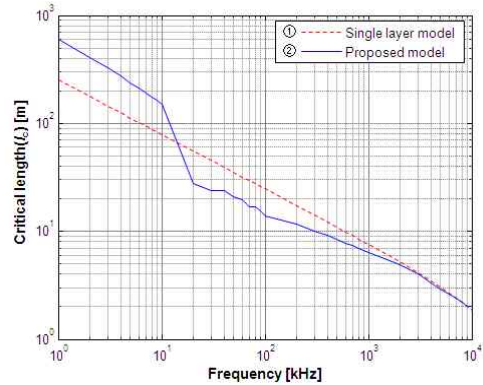
10[kHz], 100[kHz]의 주파수에 대한 접지임피던스의 길이에 따른 특성은 두 모델 사이에 상당히 큰 차이가 발생하였으며, 1[MHz], 10[MHz]의 주파수에 대한 해석결과도 차이를 보였다. 따라서 48[m] 수직 접지전극이 시설된 장소의 대지구조와 같이 지층간의 저항률의 변화가 큰 경우에는 다층 대지구조를 고려하여 해석할 필요가 있다고 판단된다.

4.2 대지구조를 고려한 임계길이 산정

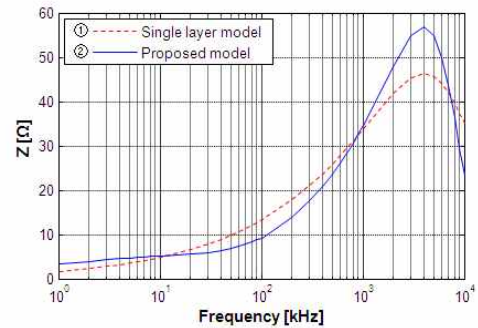
48[m] 수직 접지전극이 설치된 장소에서 다층 대지구조를 고려하여 임계길이(l_c)를 산정하였으며, 그 결과를 단층 대지구조로 산정한 결과와 함께 그림 7에 나타내었다. 그림 7 (a)는 각 대지구조에 대한 임계길이의 산정결과이며, 그림 7 (b)는 임계길이에서 접지임피던스의 주파수 의존성이다.

먼저 임계길이에 대한 결과를 보면 1~10[kHz]의 주파수 범위에서 다층 대지구조를 고려한 임계길이가 단층 대지구조에서 임계길이 보다 약 2배 정도 큰 값을 나타내었으며, 20[kHz]~1[MHz]의 주파수 범위에서는 다층 대지구조를 고려한 임계길이가 약 1.2~2배 정도 더 작은 값을 나타내었다. 그리고 임계길이에서 주파수에 따른 접지임피던스의 크기 또한 두 해석결과가 상당한 차이를 나타냈으며, 다층 대지구조를 고려하여 해석한 임계길이에서 접지임피던스의 크기가 1~10[kHz]의 주파수 범위에서는 다소 크게, 20~800[kHz]에서는 작게, 900[kHz]~7[MHz]에서는 다시 크게, 8[MHz] 이상의 주파수에서는 작게 나타나는 차이를 나타냈다. 본 연구결과와 같이 임계길이뿐만 아니라 임계길이에서 주파수에 대한 접지임피던스 또한

다층 대지구조를 고려한 결과가 단층 대지구조에서 해석한 결과와 차이를 보이기 때문에 정확한 임계길이 산정과 활용을 위해서 다층 대지구조를 고려할 필요가 있다고 판단된다.



(a) 임계길이



(b) 임계길이에서 접지임피던스

그림 7. 대지구조를 고려하여 해석한 결과의 비교
Fig. 7. Comparison between the results simulated by considering soil structures

4.3 임계길이의 대지구조의존성

그림 8에 나타낸 것과 같이 두 대지구조 모두 가장 깊은 최하부 지층을 제외한 각 지층의 깊이는 10[m]로 동일하게 하였으며, Case 1은 지표면으로부터 깊이가 깊어질수록 점점 각 지층의 저항률이 낮아지는 구조로 구성하였고, 반대로 Case 2는 지표면으로부터 깊이가 깊어질수록 점점 각 지층의 저항률이 높아지는 Case 1의 역순의 구조로 구성하였다.

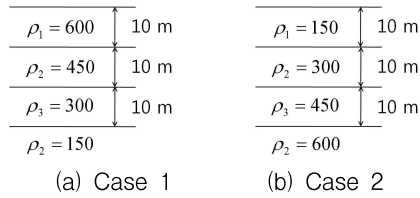
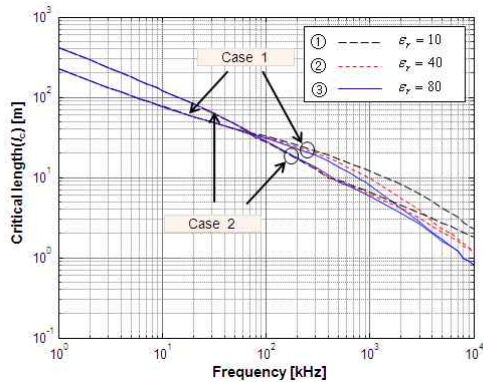
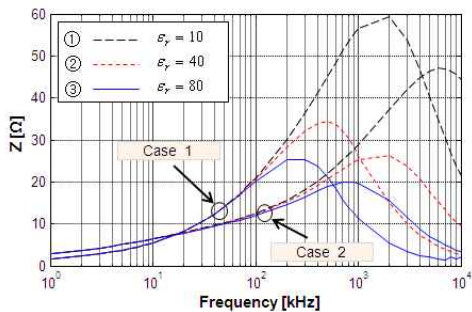


그림 8. 해석대상의 대지구조
Fig. 8. Soil structures to be simulated



(a) 임계길이



(b) 임계길이에서 접지임피던스

그림 9. 수직 접지전극의 임계길이와 접지임피던스의 주파수존성에 대한 대지구조의 영향
Fig. 9. Effect of soil structure on the frequency-dependent grounding impedance and critical length of the vertical grounding electrode

그림 8의 각 대지구조에 대한 임계길이(l_c)를 산정한 결과와 임계길이(l_c)에서 주파수에 따른 접지임피던스의 크기를 해석한 결과를 그림 9에 나타내었다. Case 1에 대한 해석결과가 Case 2에 대한 해석결과에 비하여 1~70[kHz]의 주파수범위에서는 약 1~2배 정도

짧은 임계길이를 보였으며, 80[kHz]~10[MHz]의 주파수범위에서 반대로 약 1~2배정도 긴 임계길이를 나타냈다.

그리고 임계길이에서 주파수에 대한 접지임피던스의 크기는 Case 1과 Case 2의 대지구조에 대한 해석 결과가 전체적으로 차이를 보이며, 특정 주파수범위에서는 Case 1에 대해 해석한 접지임피던스가 Case 2에 비해 상대적으로 컸다가 또 다른 주파수범위에서는 반대로 더 작은 접지임피던스의 크기를 나타내었다.

주파수에 대한 접지전극의 임계길이와 임계길이에서 접지임피던스의 크기는 Case 1과 Case 2 모두 주파수가 증가함에 따라 비유전율에 의한 영향이 커지는 결과를 나타냈다. 그리고 비유전율이 커질수록 주파수에 대한 임계길이와 임계길이에서 접지임피던스의 크기가 작아지는 특성을 나타내었다. 토양의 비유전율이 커지면 접지임피던스가 작아지므로 이에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 다층 대지구조를 고려하여 수직 접지전극의 임계길이와 임계길이에서 접지임피던스의 주파수존성에 대하여 해석하였으며, 그 결과를 측정결과와 비교·검토하였다. 48[m] 수직 접지전극이 시설된 장소에 대한 결보기 저항률을 적용한 단층 대지구조와 다층 대지구조를 고려한 분포정수회로모델을 통한 접지전극의 임계길이와 접지임피던스의 주파수존성은 다층 대지구조를 고려한 분포정수회로모델의 해석결과가 측정결과에 더 근접한 결과를 나타내었다.

따라서 수직형 심매설 접지전극의 시설 시 다층 대지구조를 고려할 필요가 있음을 확인하였으며, 대지구조를 고려함으로써 보다 정확한 임계길이 산정이 가능할 것으로 판단된다. 대지구조에 따라 접지전극의 임계길이와 접지임피던스가 변동하므로 과도접지임피던스와 고주파 성능이 요구되는 접지시스템의 설계에는 단순히 대지저항률만 반영할 것이 아니라 대지구조가 고려되어야 효율적으로 이루어질 수 있으며, 본 연구결과는 고주파용 접지시스템의 설계에 활용될 것이다.

본 연구는 지식경제부 지원에 의하여 한국전기안전공사
(과제번호 : R-2007-1-014)주관으로 수행된 과제임

References

- [1] M. E. Almeida and M. T. Correia de Barros, "Fundamental considerations on long ground electrodes design", Proc. 13th ISH, pp.241~244, 2003.
- [2] S. Visacro, "A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents", IEEE Trans. Power Delivery, Vol.22 no.1, pp.381~386, 2007.
- [3] L. Grcev, "Lightning Surge Characteristics of Earthing Electrodes," Proc. 29th ICLP, pp.5a-1-1~16, 2008.
- [4] M. I. Lorentzou, N. D. Hatzigryriou, and B. C. Papadias, "Time domain analysis of grounding electrodes impulse response," IEEE Trans. PowerDel., vol.18, no.2, pp.517~524, Apr. 2003.
- [5] S. Devgan and E. R. Whitehead, "Analytical models for distributed grounding systems," IEEE Trans., Vol.PAS-92, no.5, pp.1763~1770, 1973.
- [6] 이복희, "전력시스템공학", 인하대학교 출판부, pp.137~143, 2007.
- [7] S. Bourg, B. Sacepe, T. Debu, "Deep earth electrodes in highly resistive ground : frequency behaviour", IEEE International Symposium, pp.584~588, 1995.
- [8] Jeong-Hyeon Joe, Jong-Hyuk Choi, Jung-Chul Kim, Young-Chul Choi, Kang-Soo Lee, Young-Hwan Baek, and Bok-Hee Lee, "Simulation of frequency dependent impedance of ground rods in multi-layered soil", 6th Asia Lightning Protection Forum, pp.229~232, 2009.
- [9] 이복희, 이승철, "접지의 핵심 기초 기술", 도서출판 의제, pp.40, 67~68, 1999.
- [10] H. B. Dwight, "Calculation of Resistances to Ground", AIEE Transactions, vol.55, pp.1319~1328, Dec. 1936.
- [11] G. F. Tagg, B.Sc., Ph.D., M.I.E.E., F.Inst.P. "Earth Resistances," The Whitefriars Press Ltd., London and Tonbridge, pp.90~102, 1964.
- [12] William H. Hayt, John A. Buck, "Engineering Electromagnetics, sixth edition", McGraw-Hill, pp.183~186, 225~231, 442~448, 540~543, 2001.
- [13] Y. Liu, N. Theethayi, R. Thottappillil, "An Engineering Model for Transient Analysis of Grounding System Under Lightning Strikes: Nonuniform Transmission-Line Approach", IEEE Trans. Power Del., vol.20, no.2, Apr. 2005.
- [14] P. Llovera, J. Antonio L. A. Quijano, V. Fuster, "High frequency measurements of grounding impedance on resistive soils", Proc. 28th ICLP, Vol.1, pp.727~729, 2006.

- [15] M. I. Lorentzou and N. D. Hatzigryriou, "Transmission Line Modeling of Grounding Electrodes and Calculation of their Effective Length under Impulse Excitation", ICPST, paper no.IPST05-239, 2005.
- [16] IEEE Std 81.2-1991, "IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems", pp.9~22, 1991.
- [17] S. Visacro, W. L. F. Pinto, F. S. Almeida, M. H. Murta Vale, and G. Rosado, "Experimental Evaluation of Soil Parameter Behavior in the Frequency Range Associated to Lightning Currents", Proc. 29th ICLP. Vol.II, pp. 5c-2-1~5, 2008.
- [18] S. Visacro, "A Comprehensive Approach to the grounding response to lightning currents", IEEE Trans. Power Delivery, vol.22, pp.381~386, 2007.

◇ 저자소개 ◇



김기복(金基福)

1970년 9월 30일생. 2006년 2월 한밭대 공대 전기공학과 졸업. 2008년 2월 인하대 공학대학원 정보전기공학과 졸업(석사). 현재 인하대 대학원 전기공학과 박사과정.
Tel : (032)860-7398
Fax : (032)863-5822
E-mail : kibok7@yahoo.co.kr



조정현(曹正鉉)

1981년 8월 2일생. 2008년 2월 인하대 공대 전자공학과 졸업. 현재 인하대 대학원 전기공학과 석사과정.
Tel : (032)860-7398
Fax : (032)863-5822
E-mail : smilejoejh@naver.com



이복희(李福熙)

1954년 6월 29일생 1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 1995년 호주 Queensland대학 방문교수. 1999년 Cincinnati대학 방문교수. 현재 인하대 IT공대 전기공학부 교수. 본 학회 회장.

Tel : (032)860-7398
Fax : (032)863-5822
E-mail : bhlee@inha.ac.kr