

## 접지임피던스에 대한 접지봉 크기의 영향 분석

(The Analysis for the grounding impedance influenced by the ground rod's dimension)

이복희 · 조정현\* · 신희경 · 이강수 · 황등과 · 김정철

(Bok-Hee Lee · Jeong-Hyeon Joe · Hee-Kyung Shin · Kang-Soo Lee · Hoang Dang Khoa · Jung-Cheol Kim)

### Abstract

This paper presents a theoretical analysis for the grounding impedance influenced by the ground rod's dimension using the distributed parameter model. In this paper, EMTP and Matlab Program were used to simulate the distributed parameter model and to analyze the frequency-dependent characteristics of the ground rods. We compared two kinds of ground rods having different dimensions and the frequency-dependent characteristics of two ground rods were quite different from each other. It is estimated that these different characteristics are caused by the distributed parameters which are changed by the length of ground rod.

### 1. 서론

뇌서지가 접지봉에 인가되면 접지봉은 접지저항의 특성이 아닌 주파수에 따라 접지임피던스가 변하는 과도 특성을 보인다. 따라서 상승시간에 따른 서지의 등가주파수에 해당하는 높은 주파수 범위에서 접지봉의 임피던스 특성에 대한 고찰이 필요하며, 이러한 접지임피던스의 주파수 의존성을 이론적으로 해석하고 활용하기 위해 보다 정확한 모델이 필요하다. 본 논문에서는 보다 더 정확한 접지임피던스의 특성을 모의하기 위해 분포정수모델(Distributed parameter model)을 이용하여 분석하였다[1]. 본 논문에서는 EMTP와 matlab 프로그램을 이용하여 접지봉의 임피던스를 모의해석하였으며, 모의해석결과를 통해 접지봉의 크기에 따른 접지임피던스의 주파수 의존성을 이론적으로 분석하였다.

### 2. 본론

#### 2.1. 모의해석방법

접지봉의 분포정수모델을 구현하기 위해 접지봉의  $R$ ,  $L$ ,  $C$ 를 단위길이로 환산하여 그림 1의 등가회로를 구성하였다. 접지저항  $R$ 은 식 (1)과 같이 Tagg 식을 이용하였으며, 이 접지저항  $R$ 을 통한 접지봉의 단위길이당 분포회로정수  $G'$ ,  $C'$ ,  $L'$ 은 Rudenberg의 연구결과를 참고하여 식 (2)~(4)와 같이 환산하였다[2].

$$R = \frac{\rho \ln\left(\frac{4l}{d}\right)}{2\pi l} \quad [\Omega] \quad (1)$$

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

$$C' = \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0}{\ln\left(\frac{4l}{d}\right)} \quad [F/m] \quad (3)$$

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

단,  $l$ 은 접지봉의 길이,  $d$ 는 직경,  $\rho$ 는 대지의 저항률,  $\epsilon_r$ 은 대지의 비유전율,  $\epsilon_0$ ,  $\mu_0$ 는 진공의 유전율과 투자율이다.

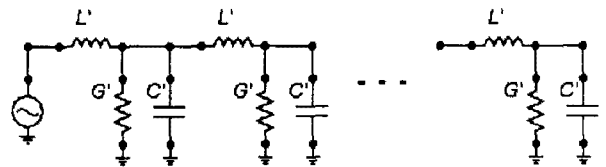


그림 1. 분포정수모델의 등가회로도  
Fig. 1. An equivalent circuit diagram of the distributed parameter model

$$\dot{E}_s = \dot{E}_r \cosh \alpha l + \dot{I}_r Z_0 \sinh \alpha l \quad (5)$$

$$\dot{I}_s = \dot{I}_r \cosh \alpha l + \frac{\dot{E}_r}{Z_0} \sinh \alpha l \quad (6)$$

$$\dot{Z} = \frac{\dot{E}_r}{\dot{I}_r} = \frac{e^{2\alpha l} + 1}{e^{2\alpha l} - 1} \dot{Z}_c \quad (7)$$

$$\alpha = \sqrt{j\omega L'(G' + j\omega C')} \quad (8)$$

$$\dot{Z}_c = \sqrt{\frac{j\omega L'}{G' + j\omega C'}} \quad (9)$$

식 (2)~(4)의 접지봉 분포회로정수와 식 (5)~(6)의 송전선로 전파방정식을 이용하여 접지봉의 전류 인가점에서 바라본 접지임피던스를 식 (7)과 같이 산출하였다 [3][4].  $\alpha$ 와  $Z_c$ 는 각각 전파정수와 특성임피던스로 분포회로정수와 관계는 식 (8), (9)와 같으며, 접지봉 끝단은 무부하상태( $I_r = 0$ ), 대지구조는 단일 대지저항률의 토양으로 가정하였다[4].

대지의 비유전율은 측정이 불가능하여 단일 비유전율로 가정하였으며, 건조 토양의 비유전율이 약 2~3이고 물의 비유전율이 대략 80 정도임을 고려하여, 10, 20, 40, 80의 네 가지 비유전율에 대하여 모의하였다[5].

접지봉의 크기에 따른 접지임피던스의 주파수 의존성의 차이를 비교하기 위해 길이 10 m, 직경 54 mm의 접지봉과 길이 1 m, 직경 15 mm의 두 접지봉에 대하여 분포정수모형을 모의하여 비교·분석하였다.

## 2.2. 모의해석결과

길이 10 m, 직경 54 mm의 접지봉의 경우엔 다른 연구에서 수행된 실제 측정된 결과와 본 논문의 분포정수모형 모의결과를 비교하였다[6]. 실제 측정된 상용주파수에서의 접지저항은 10.54  $\Omega$ 이고, 식 (1)에 의해 환산한 겹보기 대지저항률은 100  $\Omega \cdot m$ 이며, 이 값들을 통해 분포정수모형을 모의하였다. 측정결과와 모의결과는 그림 2와 같이 주파수가 증가함에 따라 약간 차이가 있으나 1 MHz까지 경향성이 동일하였다. 두 결과의 차이는 실제 대지구조가 단일 저항률이 아니라는 점과 측정상의 오차가 그 원인으로 판단된다. 그리고 모의해석결과에서 1 MHz까지는 비유전율에 대한 차이는 거의 없었다.

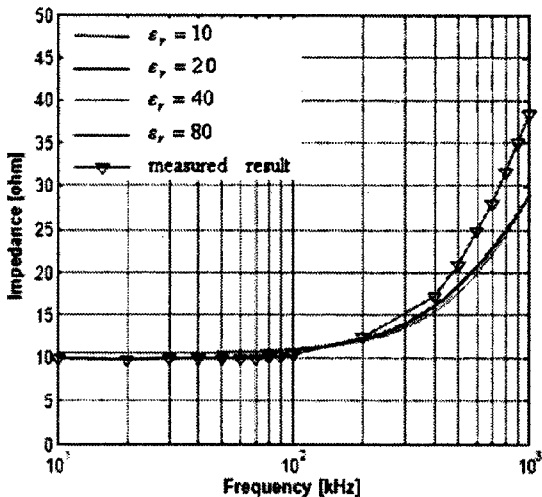
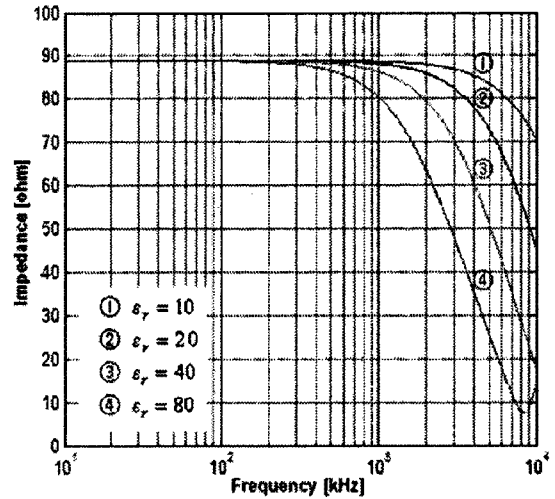
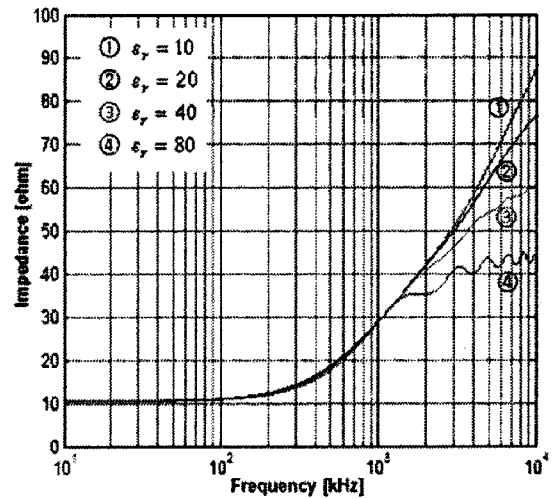


그림 2. 10 m 접지봉의 주파수 의존성에 대한 실제 측정결과와 접지임피던스의 모의결과  
Fig. 2. The measured and simulated results for the variable frequency-dependent grounding impedances of 10 m ground rod

이미 수행된 실제 측정결과에 의하면 2 m, 4 m의 길이가 짧은 접지봉에서는 주파수가 증가함에 따라 접지임피던스가 감소하고 16 m, 32 m의 길이가 긴 접지봉에서는 주파수가 증가함에 따라 접지임피던스가 증가하는 경향이 나타났으며, 분포정수모형의 모의결과 또한 동일한 경향을 보였다[7].



(a) 1 m 접지봉



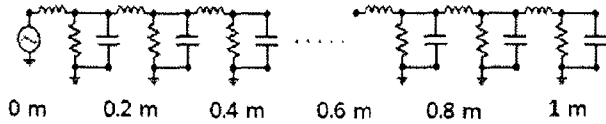
(b) 10 m 접지봉

그림 3. 접지봉 접지임피던스의 주파수 의존성 모의결과  
Fig. 3. The simulated results for the variable frequency-dependent grounding impedances of the ground rods

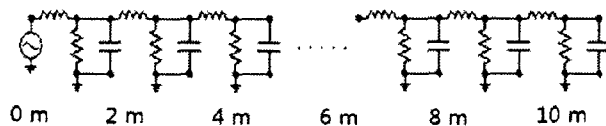
그림 3은 본 논문에서 1 m 접지봉과 10 m 접지봉의 주파수 의존성을 모의한 결과를 보여준다. 두 그래프를 비교해 보면 주파수가 증가함에 따라 두 접지봉이 반대의 특성을 나타냈다. 1 m 접지봉과 10 m 접지봉은 1 MHz까지 비유전율에 대하여 큰 차이가 없었으며, 주파수가 증가함에 따라 차이가 나타났다. 1 m 접지봉은 비유전율이 클수록 임피던스의 감소폭이 증가하였으며, 10 m 접지봉은 반대로 비유전율이 작을수록 임피던스의

감소폭이 증가하였다.

두 접지봉이 주파수에 따라 반대의 특성을 나타내는 원인을 이론적으로 분석하기 위해서 분포정수모델을 통해 각 주파수에 대하여 그림 4와 같이 접지봉의 상단에서부터 하단까지 6개의 위치에서의 전위를 모의하여 그 결과를 분석하였다. 전압은 모든 모의측정에 동일하게 10 kV<sub>p</sub>의 전압을 인가하였다.



(a) 1 m 접지봉의 전위 모의측정 위치



(b) 10 m 접지봉의 전위 모의측정 위치

그림 4. 접지봉의 전위 모의측정 위치

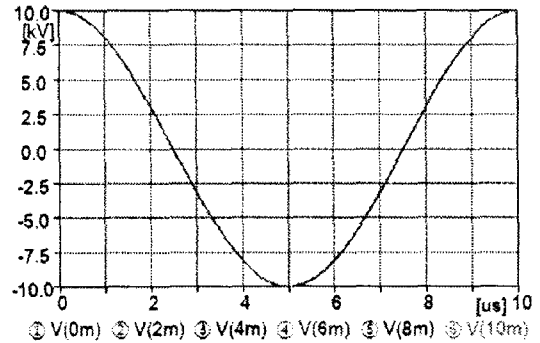
Fig. 4. The positions for the simulating measurement of the potentials of the ground rods

두 접지봉의 위치별 전위 모의결과는 그림 5와 6과 같으며, 각 접지봉의 (a), (b)의 그래프에 대한 설명은 다음과 같다.

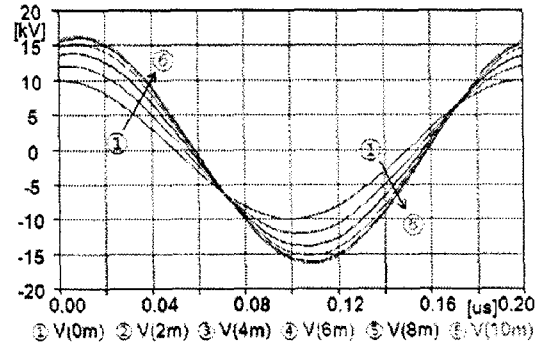
- 각 접지봉의 (a), (b) 그래프는 각 접지봉의 경향을 보여 주기 위해 선택된 주파수대역의 그래프이다.
- (a) 그래프 : 각 접지봉의 모든 위치에서 전위 파형이 동위상인 최대 주파수의 전위 파형을 도시하였다.
- (b) 그래프 : 주파수가 증가함에 따라 위치별 위상과 크기가 변하는 경향성을 뚜렷하게 보여 주는 주파수를 선정하여 그 주파수에서의 위치별 전위 파형을 도시하였다.

1 m 접지봉의 위치별 전위 모의결과는 그림 5와 같다. 상용주파수에서 100 kHz까지는 모든 위치에서 같은 위상과 크기를 보였으나, 5 MHz로 증가함에 따라 인가 지점에서 끝단으로 갈수록 위상이 점점 더 늦어졌고 크기는 증가하였다. 그리고 끝단으로 갈수록 위상이 늦어지고 크기가 감소하는 추세가 줄어들었다.

10 m 접지봉의 위치별 전위 모의결과는 그림 6과 같다. 상용주파수에서 10 kHz까지는 모든 위치에서 같은 위상과 크기를 보였으나, 1 MHz로 증가함에 따라 인가 지점에서 끝단으로 갈수록 1 m 접지봉의 경우와 동일하게 위상이 점점 더 늦어졌지만 크기가 1 m 접지봉과 반대로 감소하였다. 그리고 끝단으로 갈수록 위상이 늦어지고 크기가 감소하는 추세가 줄어들었다.



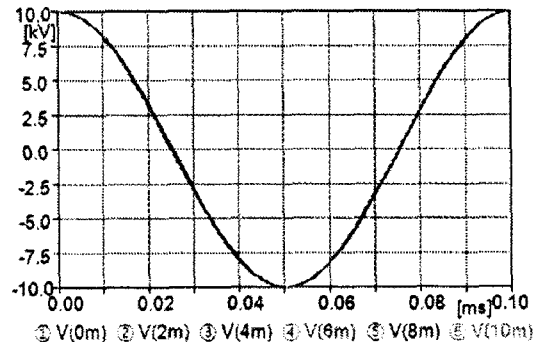
(a) 100 kHz 인가 시



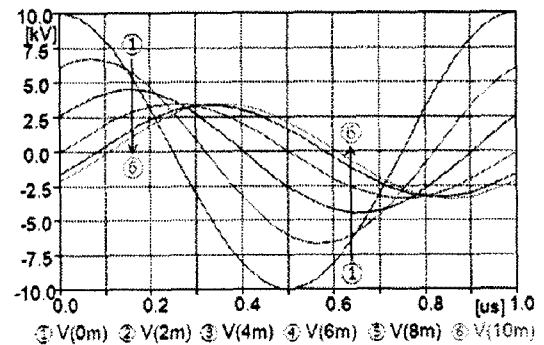
(b) 5 MHz 인가 시

그림 5. 1 m 접지봉의 위치별 전위 모의결과

Fig. 5. The simulated results of the potentials for each positions of 1 m ground rod



(a) 10 kHz 인가 시



(b) 1 MHz 인가 시

그림 6. 10 m 접지봉의 위치별 전위 모의결과

Fig. 6. The simulated results of the potentials for each positions of 10 m ground rod

### 2.3. 결과분석

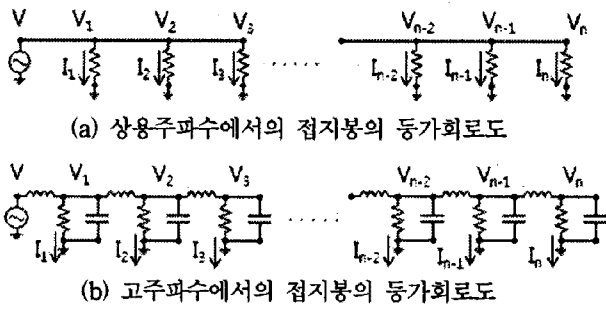


그림 7. 주파수별 접지봉 등가회로도  
Fig. 7. The equivalent circuit diagrams of the ground rod by frequencies

1 m 접지봉의 상용주파수에서의 등가회로는  $G'$ 에 비해  $L'$ 과  $C'$ 의 영향이 적기 때문에 그림 7(a)의 단순히 분포회로정수  $G'$ 로 이루어진 병렬구조가 된다. 하지만 고주파수에서는 접지봉의  $L'$ 과  $C'$ 의 영향을 무시할 수 없게 되므로 고주파수에서의 등가회로는 그림 7(b)와 같이 분포회로정수  $G'$ ,  $L'$ ,  $C'$ 으로 이루어진다.

상용주파수에서는 접지봉의 모든 위치에서 전위가 동일하여  $V = V_1 = V_2 = \dots = V_{n-1} = V_n$ 이므로 모든 위치에서 대지로 나가는 전류가 동일하다. 따라서 접지봉에 인가되는 총 전류  $I$ 는 식 (10)과 같다.

$$I = \sum_{k=1}^n I_k = nI_1 \quad (10)$$

하지만, 고주파수에서는  $L'$ 과  $C'$ 의 영향으로 인해 접지봉의 각 위치별 전압이 동일하지 않게 된다. 1 m 접지봉의 경우에는 고주파수의 전류가 인가될 때 접지봉의 인가지점에서 끝단으로 갈수록 전위가 상승하고, 이 전위상승에 의해 끝단으로 갈수록 대지로 방출되는 전류가 증가한다. 따라서 총 전류  $I$ 는 식 (11)과 같다.

$$I = \sum_{k=1}^n I_k > nI_1 \quad (11)$$

총 전류  $I$ 가 상용주파수일 때에 비해 증가하기 때문에 접지임피던스( $Z=V/I$ )는 감소하게 된다.

반대로 10 m 접지봉의 경우에는 고주파수의 전류가 인가될 때 접지봉의 끝단으로 갈수록 전위가 감소하고 이 전위감소에 의해 끝단으로 갈수록 대지로 방출되는 전류가 감소한다. 따라서 총 전류  $I$ 는 식 (12)와 같다.

$$I = \sum_{k=1}^n I_k < nI_1 \quad (12)$$

총 전류  $I$ 가 상용주파수일 때에 비해 감소하기 때문에 접지임피던스( $Z=V/I$ )는 증가하게 된다.

이러한 두 접지봉의 주파수 의존성의 차이는 접지봉의 길이에 의한 분포회로정수  $L'$ 과  $C'$ ,  $G'$ 의 차이에 의한 것으로 판단된다. 식 (2)~(4)를 보면 알 수 있듯이, 접지봉 길이가 감소하면  $L'$ 은 감소하고  $C'$ 과  $G'$ 은 증가

하게 된다. 이 분포회로정수의 변화에 의해 10 m 접지봉보다 1 m 접지봉이  $C'$ 의 영향이 더 증가하게 되어, 접지봉 끝단에서 송전선로의 페런티 현상과 같은 현상이 발생하는 것으로 판단된다. 모의해 본 결과, 접지봉 끝단으로 갈수록 전류가 전압보다 점점 더 앞서가는 결과를 보였고 이 앞선 전류에 의해 끝단의 전압이 상승하는 것으로 판단된다. 반대로 10 m 접지봉은 상대적으로  $L'$ 의 영향이 강하게 되므로 접지봉의  $L'$ 에 의한 유도전압에 의해 끝단으로 갈수록 전압이 감소하는 것으로 판단된다.

### 3. 결론

본 논문에서는 접지봉의 크기에 따른 접지임피던스의 특성변화를 이론적으로 분석하기 위해 분포정수모델을 모의하였다. 1 m와 10 m의 두 접지봉은 각 접지봉의 접지임피던스의 주파수 의존성이 서로 반대의 특성을 보였으며, 이는 접지봉 길이에 의한 분포회로정수의 변화에 그 원인이 있는 것으로 판단된다. 1 m 접지봉은 상대적으로  $C'$ 의 영향이 커져 접지임피던스가 감소하고, 10 m 접지봉은 반대로  $L'$ 의 영향이 커져 접지임피던스가 증가하는 것으로 판단된다. 이러한 접지봉의 크기에 따른 특성차이를 이용하여 접지시스템 설계시 서로 반대의 특성을 보이는 접지봉을 혼용하면 뇌서지와 같은 서지에 의한 접지임피던스의 상승을 저감시킬 수 있다고 판단되며, 이 부분에 대하여 보다 더 많은 연구가 필요하다.

### 참고 문헌

- [1] H. Griffiths, A. M. Davies, "Effective Length of earth electrodes under high frequency and transient conditions", 25th International Conference on Lightning Protection, pp.469~471, 2000.
- [2] M. I. Lorentzou, N. D. Hatzigrigoriou, "Transmission Line Modeling of Grounding Electrodes and Calculation of their Effective Length under Impulse Excitation", International Conference on Power Systems Transients(IPST '05) paper No. IPST05-239, 2005.
- [3] 이복희, "전력시스템공학", 인하대학교 출판부, pp137~143, 2007.
- [4] M. E. Almeida and M. T. Correia de Barros "Fundamental considerations on long ground electrodes design", 13th International Symposium on High Voltage Engineering, pp241~244, 2003.
- [5] William H. Hayt, John A. Buck, "Engineering Electromagnetics, sixth edition", McGraw-Hill IN
- [6] Tae-Ki Kim, Sung-Man Kang, Bok-Hee Lee, "Frequency Dependent Grounding Impedances of Deeply-driven Ground Rods", 5th Asia Lightning Protection Forum, pp.173~177, 2008.
- [7] Leonid Groev, "High-Frequency Performance of Ground Rods in Highly Resistive Soil", International Conference on Grounding and Earthing, pp.85~89, 2000.