

## Analysis of the Frequency Dependent Characteristics of Ground Impedance of a Ground Rod

李 福 熙\* · 嚴 柱 弘\*\*  
(Bok-Hee Lee · Ju-Hong Eom)

**Abstract** - This paper presents a systematic approach of measurement, modeling and analysis of grounding system impedance in the field of lightning protection system and intelligent power equipments. The measurement and analysis system of ground impedance is based on a computer aided technique. The magnitude and phase of ground impedance were determined by the novel measurement and analysis using the revised fall-of-potential method. The ground impedances of the ground rod of 50 m long are considerably dependent on the frequency. The ground impedance is mainly resistive in the frequency range of 3-20 kHz. At higher frequencies, the reactive components of the ground impedances are no longer negligible and the inductance of the ground rod was found to be the core factor deciding the ground impedance. Although the steady-state ground resistance of the ground rod of 50 m was less than that of the ground rod of 10 m, the ground impedances of the ground rod of 50 m over the frequency range of more than 60 kHz were much greater than those of the ground rod of 10 m. Furthermore, the equivalent circuit model based on the measured data was proposed, and the calculated results were in approximately agreement with the measured data.

**Key Words** : Ground rod, Ground resistance, Ground impedance, Ground potential rise, Revised fall-of-potential method, Frequency dependence of ground impedance, Lightning protection

### 1. 서 론

접지시스템의 성능은 접지저항을 측정하는 방법과 접지저항 이외의 접촉전압이나 보폭전압 등과 같은 위험전압을 측정하는 방법으로 평가한다. 전력설비에서는 접지전극과 대지 사이의 접속이 양호한지 또는 양호하지 않은지를 접지저항으로 나타내는 방법이 많이 사용되고 있다. 접지저항은 상용주파수 접지전류가 흐를 때 적용되며, 용도에 따라서는 접지시스템에 고장서지나 뇌서지전류와 같이 높은 주파수 성분을 가지는 전류가 흐르게 된다.[1-4]

접지시스템이 소규모이거나 시설하는 장소의 대지저항물이 큰 경우에 접지임피던스는 저항 성분이 큰 값을 가지므로 상용의 접지저항측정기로 측정한 접지저항과 거의 동일하다. 하지만 접지시스템의 규모가 크거나 접지저항이 대단히 작은 경우 접지전극 자체의 인덕턴스의 영향 때문에 단순한 접지저항으로 접지시스템의 성능을 평가하는 방법은 정확성이 떨어진다. 접지전류가 뇌서지와 같이 빠른 상승시간을 가지거나 고주파수 성분을 포함하는 경우에는 접지저항 보다는 접지임피던스를 접지시스템의 성능지표로 하는 것이 바람직하다.[5,6]

최근 접지전극을 시설할 수 있는 장소가 제한되는 도심지

건물의 접지전극으로 대형 봉상접지전극이 많이 사용되고 있다. 대형 봉상접지전극은 보링머신을 사용하여 깊게 굴토한 후 시설하므로 낮은 접지저항을 얻기 위해서 넓은 면적을 차지하지 않는다. 하지만 길이가 길어짐에 따라 높은 주파수에서 접지임피던스가 크게 변동할 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 뇌보호용 접지시스템에 적용될 수 있는 대형 봉상접지전극의 뇌서지와 같은 고주파 영역에서의 접지임피던스 특성을 분석하기 위해서 접지임피던스의 주파수의존성을 측정하고 분석하였다. 측정용 전원으로는 주파수 조정범위가 3~300 [kHz]인 가변주파수 인버터를 사용하였으며, 측정계는 측정전류인가선과 전위검출선의 전자유도작용에 의한 오차를 줄이기 위해서 전위보조전극과 전류보조전극이 피측정 접지전극의 양쪽 맞은 편에 위치시킨 수정된 전위강하법을 적용하였다. 또한 회로모델을 이용한 등가회로를 구성하여 봉상접지전극의 접지임피던스를 이론적으로 계산하고, 측정결과와 비교·검토하였다.

### 2. 실 험

#### 2.1. 수정된 전위강하법

대형 봉상접지전극시스템에 대하여 수정된 전위강하법(revised fall-of-potential method)을 이용한 접지임피던스의 측정회로를 그림 1에 나타내었다. 수정된 전위강하법은 피측정 접지전극을 중심으로 하여 전위보조전극과 전류보조전극을 반대 방향에 시설함으로써 측정선의 전자유도결합에 의한 오차를 줄일 수 있는 측정방법이다.

\* 正 會 員 : 仁荷大學 電子電氣工學部 教授 · 工博

\*\* 正 會 員 : 基礎電力工學共同研究院 研究員 · 工博

接受日字 : 2004年 4月 23日

最終完了 : 2004年 6月 29日

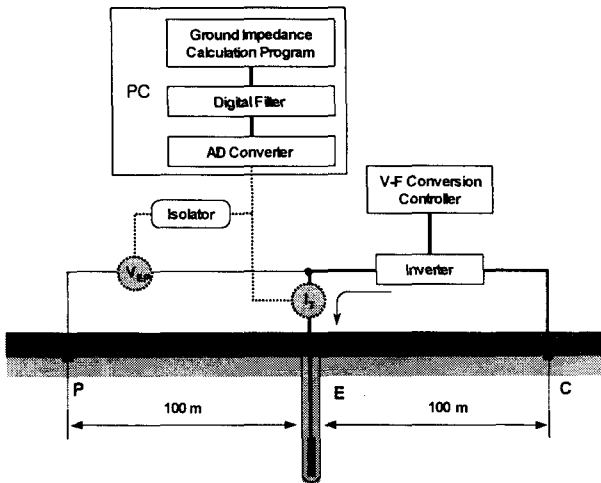


그림 1. 수정된 전위강하법을 이용한 접지임피던스의 측정회로  
 Fig. 1. Circuit for measuring the ground impedance using the revised fall-of potential method

전위보조전극으로는 측정대상의 접지전극으로부터 100 [m] 떨어진 지점에 길이 1 [m]의 접지전극을 사용하여 시설하였으며, 전류보조전극은 전위보조전극 반대 방향으로 100 [m] 지점에 봉상접지전극을 시설하여 사용하였다. 측정전류는 설정된 시간동안 주파수제어가 선형적으로 이루어지는 인버터를 사용하여 인가하였다. 측정전류의 주파수를 3~300 [kHz]의 범위에서 가변시키면서 측정대상인 접지전극(E)과 전류보조전극(C) 사이에 인가하여 기준전위전극인 전위보조전극(P)에 대한 피측정 접지전극의 전위상승을 검출하였다. 시험전류원, 측정장치의 특성에 대해서는 문헌 [7]에 상세하게 기술하였다.

### 2.2. 측정대상의 접지전극

측정대상의 접지전극의 형상과 시설조건을 그림 2에 나타내었으며, 직경 5 [cm], 길이 10 [m]의 동관을 접지전극으로 사용하였다.

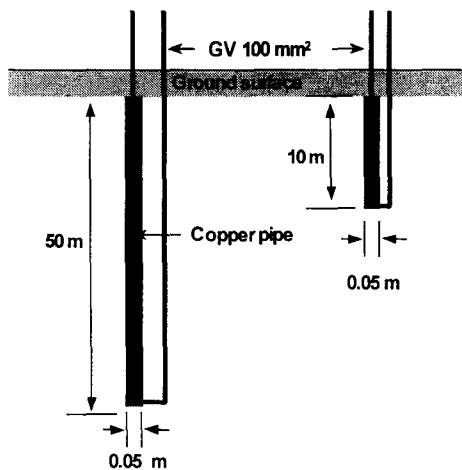


그림 2. 봉상접지전극의 설치  
 Fig. 2. Installations of the ground rods

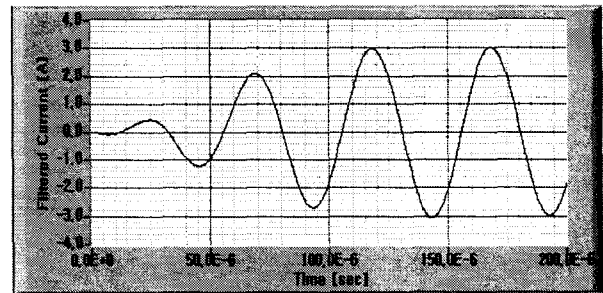
봉상접지전극의 접지임피던스의 주파수의존성 분석

봉상접지전극이 묻히는 깊이만큼 굴착한 후 봉상접지전극을 시설하고, GV전선을 지면 1 [m] 지점까지 접속한 후 되메움하였다. 인출용 GV전선은 100 [mm] 이며, 동봉과 인출용 GV전선은 볼트로 3지점에서 견고하게 접속하였다.

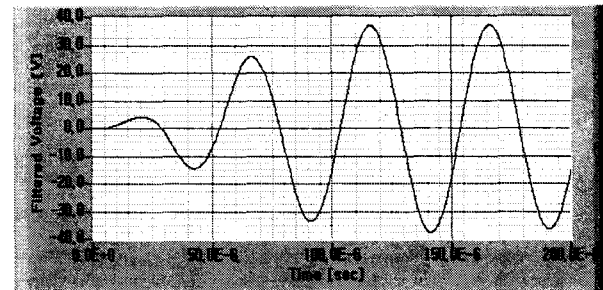
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 측정결과 및 검토

피측정 접지전극에 인가된 시험전류와 검출된 전위 파형을 A/D변환기로 디지털화시킨다. 이들 검출신호는 대역통과필터를 거쳐 그림 3과 같이 측정주파수의 기본파 성분만의 파형으로 된다. 그림 3에 나타낸 인가전류와 접지전극의 전위에 대한 기본주파수 파형의 신호로부터, 접지임피던스의 크기, 위상각, 저항성 성분, 리액턴스 성분 등을 산출한다.



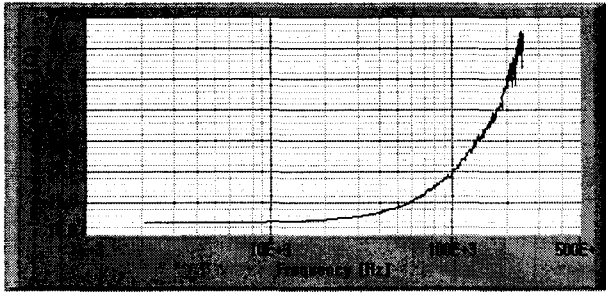
(a) 인가전류



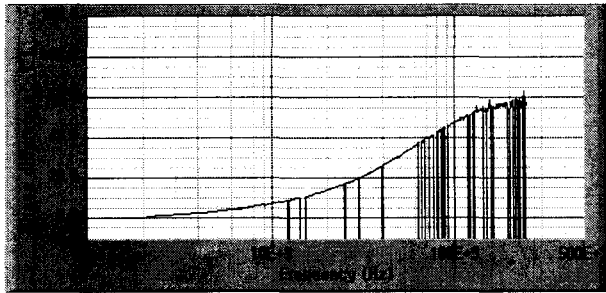
(b) 접지전위

그림 3. 인가전류와 전위의 기본주파수 파형의 예  
 Fig. 3. Examples of the fundamental frequency waveforms of the injected current and potential

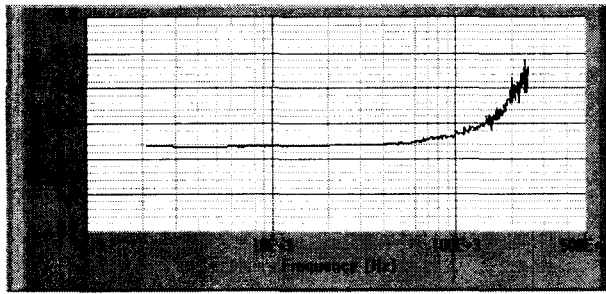
길이 10 [m]인 봉상접지전극의 접지임피던스를 주파수를 변화시켜 가면서 측정한 결과를 그림 4에 나타내었다. 그림 4 (a)는 주파수의 증가에 따라 변화하는 접지임피던스를 접지전위상승과 인가전류 파형의 amplitude(peak-to-peak)값으로 연산한 결과이다. 약 4 [kHz]의 주파수에서 접지임피던스는 11.9 [Ω]이며, 주파수의 증가함에 따라 증가하여 200 [kHz]에서는 34.2 [Ω]을 넘어서는 것으로 나타났다. 접지임피던스는 약 50 [kHz]를 넘어서면서 급격히 증가하며, 100 [kHz]에서는 정상상태 접지저항의 약 2배로 되었다. 접지임피던스의 위상그래프는 200 [kHz]에서 약 60 [°]에 가까운 값으로 근접하는 결과를 얻었다.



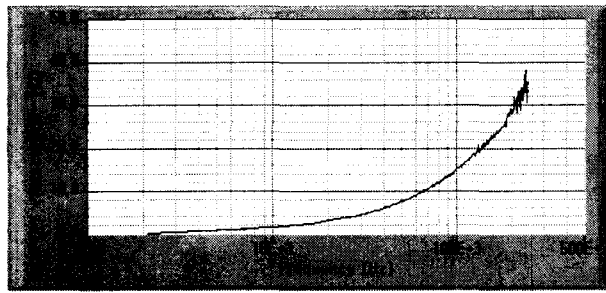
(a) 접지임피던스



(b) 위상각



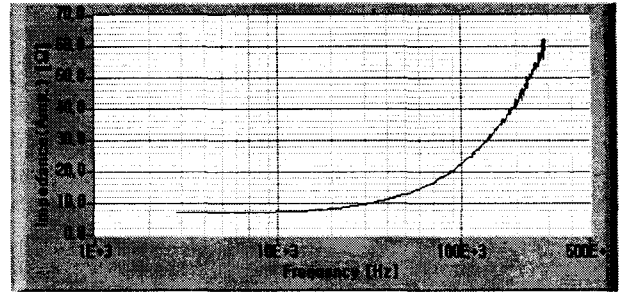
(c) 저항성 성분



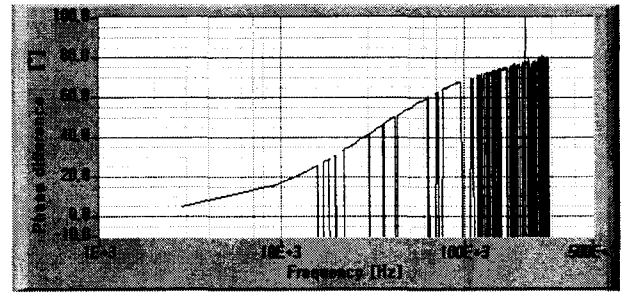
(d) 리액턴스 성분

그림 4. 길이 10 [m]인 봉상접지전극의 접지임피던스  
Fig. 4. Ground impedance of the ground rod of 10 m

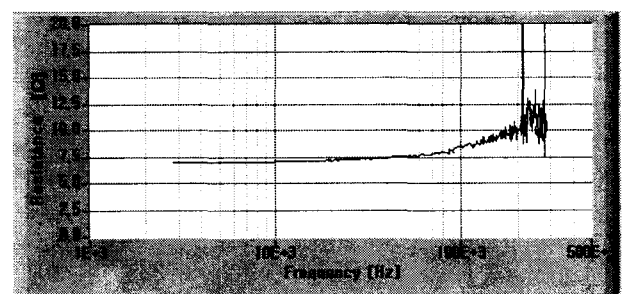
접지임피던스와 위상각에 대한 그래프로부터 저항 성분과 리액턴스 성분을 계산한 결과를 그림 4(c)와 (d)에 나타내었다. 저항 성분은 약 100 [kHz]를 넘어서면서 급격히 증가하는 양상을 보이며, 리액턴스 성분은 약 10 [kHz]에서부터 지속적으로 증가하고 있다. 길이 10 [m] 봉상접지전극에서는 약 80 [kHz]에서의 저항 성분과 리액턴스 성분은 비슷한 값을 가지며, 이후 주파수가 증가함에 따라 리액턴스 성분이 훨씬 커지는 것으로 나타났다.



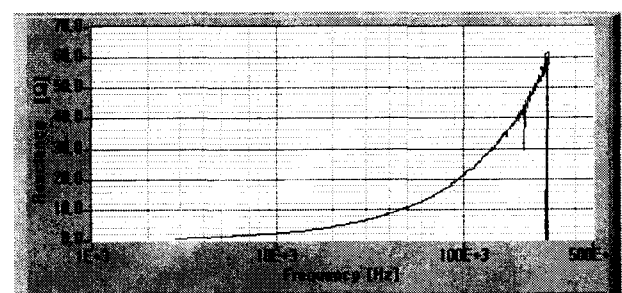
(a) 접지임피던스



(b) 위상각



(c) 저항성 성분



(d) 리액턴스 성분

그림 5. 50 [m] 봉상접지전극의 접지임피던스  
Fig. 5. Ground impedance of the ground rod of 50 m

길이 50 [m]인 봉상접지전극에 대하여 주파수를 변화시키면서 측정된 접지임피던스를 그림 5에 나타내었다. 봉상접지전극의 60 [Hz] 영역에서의 접지저항은 7.1 [Ω]으로 측정되었다. 상부에서 인출한 접지도선을 사용하여 측정된 접지임피던스를 그림 5(a)에 나타내었다. 접지임피던스의 크기는 주파수가 약 20 [kHz]를 넘어서면서 증가하기 시작하여 50 [kHz]에서 11.4 [Ω], 100 [kHz]에서는 23.5 [Ω]으로 측정되었다. 저항 성분과 리액턴스 성분이 같아지는 주파수는 약 40

[kHz]이다.

50 [m] 길이의 봉상접지전극의 접지임피던스는 길이 10 [m]의 것에 비해서 주파수의존성이 크게 나타났다. 다시 말해 50 [m] 접지전극의 접지임피던스는 10 [m]의 것에 비해 낮은 주파수에서는 훨씬 작으나 높은 주파수에서는 반대로 크게 나타났다. 약 60 [kHz]를 넘어서면서 접지임피던스의 크기는 50 [m] 봉상접지전극이 10 [m] 봉상접지전극에 비하여 더 커지는 양상을 보이고 있다. 10 [m] 길이의 봉상 접지전극에 비하여 전극의 길이가 5배 큰 구조로 되어 있으므로 접지전극의 인덕턴스 영향이 주파수가 증가함에 따라 지배적으로 나타났기 때문이다. 주파수에 따른 리액턴스 성분의 증가를 비교하면, 50 [m] 길이의 봉상접지전극이 10 [m] 길이의 봉상접지전극에 비하여 급격히 상승하고 있음을 알 수 있다. 접지저항 저감을 위하여 접지전극의 길이를 과도하게 증가시킬 경우 높은 주파수 영역에서 접지임피던스가 급격히 증가하는 이러한 특성은 뇌서지 보호용 접지전극에서 매우 불리하다. 봉상접지전극의 길이를 과도하게 길게 하면 정상상태 접지저항은 크게 저감되는 효과를 얻을 수 있지만 주파수가 증가함에 따라 오히려 접지임피던스가 커지게 되기 때문이다.

접지임피던스의 주파수 의존성은 많은 주목을 받고 있으나 측정 장치와 방법상의 어려움이 여전히 큰 문제로 남아 있다. 봉상접지전극에 대한 접지임피던스의 주파수 의존성을 요약하면 대체로 다음과 같다.

- ① 수 [kHz] 이하의 주파수에 대한 접지임피던스는 대부분 저항성이다.
- ② 수십 [kHz]를 넘는 주파수에 대한 접지임피던스는 접지전극의 형상과 길이에 따라 차이가 있지만 자기인덕턴스에 의해 유도성 경향이 지배적으로 나타난다.
- ③ 수 [kHz]를 넘는 주파수에 대한 접지임피던스는 용량성 리액턴스가 나타나기도 하는데 이러한 특성은 접지전극의 형상, 시공방법, 대지저항률에 따라 다르다.

### 3.2 봉상접지전극의 회로모델

접지임피던스는 대지저항률이 낮은 경우에는 주로 유도성으로 나타나지만 대지저항률이 100 [ $\Omega \cdot m$ ] 보다 큰 경우에는 용량성이 지배적으로 나타난다. 또한 접지임피던스의 주파수특성은 저항성, 용량성, 유도성으로 분류하고, 주파수의 증가에 따라 표피효과와 영향도 나타나게 된다. 접지임피던스의 주파수 의존성에 대한 이론적 분석기법으로 회로모델링을 적용하는 방법이 제안되어 있다.[8-10] 이 방법은 접지임피던스의 주파수 의존성을 실제의 특성에 가깝게 분석할 수 있으나 등가회로의 회로정수  $R, L, C$ 의 값을 결정하기가 매우 어렵다. 접지전극이 대지에 시공되고 전극과 토양의 접합면이 어떻게 형성되며, 전극 주위의 토양 특성과 사용한 접지도체의 특성 등이 중요한 변수로 작용한다. 이러한 파라미터들 중에서 대지저항률은 실제의 대지에서 측정하여 적용할 수 있지만 회로정수  $R, L, C$ 의 값들은 계산식에 의해서 얻는다.

계산식에 의한 회로정수의 결정은 접지전극의 정확한 기하학적 배치상태를 필요로 하며 오래된 접지시스템에서는 정확한 값의 계산이 어려운 경우도 있다. 등가회로의 회로정수를

계산하는 방법이 제시되고 있으나 최근의 경향은 특정모델전극에서 측정된 접지임피던스를 바탕으로 회로정수를 산출하는 방법이 사용되기도 한다.[11-14] 특정모델에서 산출한 접지시스템의 회로정수  $R, L, C$ 의 값들은 유사한 형태나 규모를 가지는 접지시스템에서 근사적으로 추정하여 사용할 수 있다. 하지만 이러한 분석방법에서도 대지와 접지도선의 표피효과와 대지저항률의 주파수 의존성에 대한 정확한 회로정수가 산출되어야만 정확한 결과를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 접지전극의 형상이 간단한 봉상접지전극에 대하여 접지임피던스 측정결과를 기초로 하여 봉상접지전극의 등가회로모델을 구성하고, 이 등가회로를 이용하여 이론적으로 해석한 결과를 실측결과와 비교하여 모델화의 정확도를 검토하였다. 측정된 결과와 해석결과를 비교적 근접하게 표현해 주는 봉상접지전극의 모델등가회로를 그림 6과 같이 구성하였다.

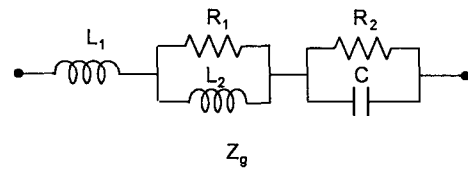


그림 6. 봉상접지전극의 등가회로  
Fig. 6. Equivalent circuit of a ground rod

등가회로의 구성에 있어 접지전극의 인덕턴스와 표피효과에 의한 접지전극의 저항 증가도 고려하였다. 또한 대지구조가 저항과 커패시터의 병렬 구조인 점을 감안하였다. 모델의 접지임피던스는 식 (1)과 같으며, 등가회로에 적용한 회로정수는 표 1에 나타낸 바와 같다.

$$Z_g = \frac{(\omega L_2)^2 R_1}{R_1^2 + (\omega L_2)^2} + \frac{R_2^2}{1 + (\omega C R_2)^2} + j \left( \omega L_1 + \frac{\omega L_2 R_1^2}{R_1^2 + (\omega L_2)^2} - \frac{\omega C R_2^2}{1 + (\omega C R_2)^2} \right) \quad [\Omega] \quad (1)$$

표 1에서 일반적인 토양의 비유전율  $\epsilon_r$ 은 대략 14 정도의 값을 가지며, 바닷물은 80, 도심지의 토양은 3 정도의 값을 가지는 것으로 보고되어 있다.[9,14,15]

봉상접지전극의  $L$ 과  $C$  값의 계산은 문헌 [9]과 [14]에 자세히 기술되어 있으며, 본 논문에서는 다음의 식 (2)와 식 (3)을 적용하였다. 인덕턴스  $L$ 은 그림 6에서  $L_1$ 과  $L_2$ 의 합성값이며, 접지임피던스를 계산할 때에는 접지전극의 규모에 따라  $L_1$ 과  $L_2$ 의 크기가 정해진다. 대지저항률  $\rho$ 와 접지저항  $R_2$ 의 값은 측정결과를 적용하였다.

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \left( \frac{l}{r} + \sqrt{1 + \left( \frac{l}{r} \right)^2} \right) + \frac{r}{l} - \sqrt{1 + \left( \frac{r}{l} \right)^2} \right) \quad [H] \quad (2)$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln\left(\frac{2l}{r} + \sqrt{1 + \left(\frac{2l}{r}\right)^2}\right) + \frac{r}{2l} - \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2l}\right)^2}} \quad [F] \quad (3)$$

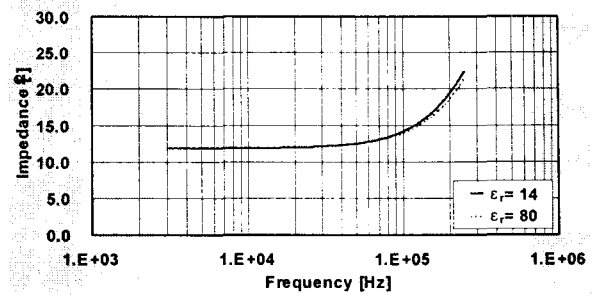
표 1. 본 해석에 적용한 회로정수

Table 1. Line constants used in this analysis

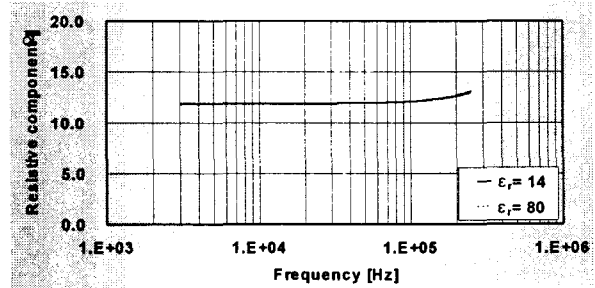
Ground rod of 10 m		Ground rod of 50 m	
10 [m]		50 [m]	
0.025 [m]		0.025 [m]	
1.26 × 10 <sup>-6</sup> [H/m]			
8.85 × 10 <sup>-12</sup> [F/m]			
14	80	14	80
80 [Ω · m]			
4.91 [μH]		45.69 [μH]	
100.0 [Ω]		500.0 [Ω]	
7.0 [μH]		30.0 [μH]	
11.9 [Ω]		7.1 [Ω]	
1.22 [nF]	6.97 [nF]	4.87 [nF]	27.83 [nF]

등가회로를 적용한 접지임피던스의 이론적 분석에서 주파수 의존성에 크게 기여하는 값은  $L$  이며,  $L$  의 정확한 계산이 이루어져야만 한다.  $C$  의 값은 일반적으로 수 nF 정도로 계산되어 무시할 수 있는 정도의 크기이나 접지임피던스의 용량성 특성을 결정하는 요소로 본 연구에서는 그 영향을 고려하였다. 접지임피던스의 주파수 의존성에 대한 수식적 분석에서 가장 어려운 부분이 접지전극의 계산된  $L$  값으로부터  $L_2$  값을 결정하는 것이다. 또한  $L_2$ 와 병렬로 접속되어 있는  $R_1$ 을 적절한 값으로 설정하여 주파수가 증가함에 따라 나타나는 접지도체와 대지의 표피효과를 실제의 측정값에 근접하게 표현해 주어야 한다. 접지임피던스의 수식적인 모델링은 그 사례가 매우 적고 또한 대지와 관련된 회로정수들이 복잡하므로 실제로 측정결과와 잘 일치하지는 않는다. 또한 측정결과를 바탕으로 모델링에 대한 회로정수를 역으로 결정하였으며, 등가회로를 적용하여 계산한 결과를 그림 7과 그림 8에 나타내었다.

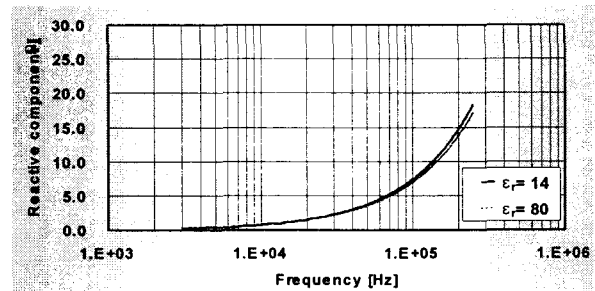
등가모델링에 의한 접지임피던스의 분석결과와 측정된 결과를 비교하여 볼 때 주목하여야 할 점은 다음과 같다.



(a) 접지임피던스



(b) 저항성 성분



(c) 리액턴스 성분

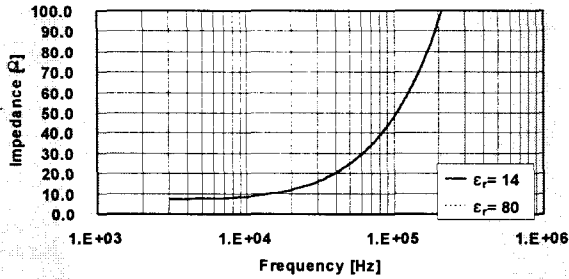
그림 7. 10 [m] 봉상접지전극의 접지임피던스 계산결과

Fig. 7. Calculated ground impedance of the ground rod of 10 m

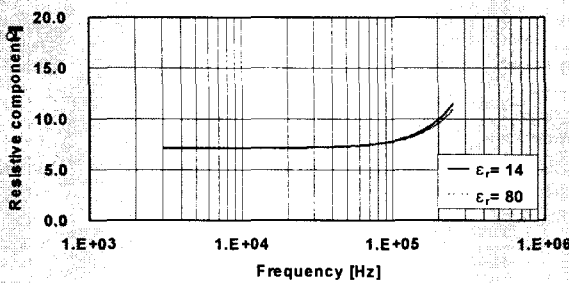
봉상접지전극의 길이가 길어짐에 따라 실측한 접지임피던스 크기에 비하여 계산된 접지임피던스의 크기가 훨씬 크게 나타났다. 이는 주로 계산된  $L$  값의 영향이 실제로 측정된 결과보다 커져서 나타나는 현상으로 50 [m] 봉상접지전극에서 200 [kHz] 주파수의 접지임피던스는 약 90 [Ω]을 넘는다. 그림 5에서 실제로 측정된 접지임피던스의 값이 약 40 [Ω]인 것과 비교할 때 약 2배 이상의 값을 가진다. 이러한 결과는 계산된  $L$  값이 과대하게 상정된 것으로 보인다.

또한 접지시스템의 가장 간단한 형태인 봉상접지전극의 경우에도 모델등가회로를 구성하는 쉽지 않으며, 접지전극의 형상과 규모에 따라 더 복잡해진다.[16] 결과적으로 대지파라미터를 이용하는 접지임피던스의 모델등가회로를 이용한 수치적 해석은 실제의 특성과 일치하지 않을 수 있다. 접지임피던스의 주파수 의존성을 이론적으로 분석하는 이러한 방법은 접지시스템의 설계단계에서 접지시스템의 특성에 대한 근사

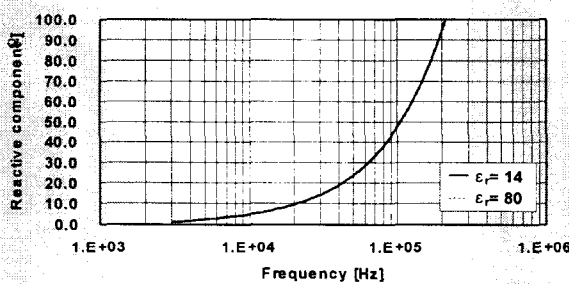
적인 예측을 위해서는 적용할 수 있지만 실제 접지시스템의 특성을 정확하게 평가하기에는 부족한 점이 많다. 현재의 기술수준에서는 실측방법이 보다 신뢰성이 있으며, 이론적 해석은 설계단계에서 참고적인 자료로 활용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 결론적으로 모델등가회로를 이용한 접지임피던스의 주파수에 따른 변화 특성은 개략적인 분석은 가능하지만 신뢰성이 비교적 낮으므로 가급적 실측을 통한 접지시스템의 성능평가가 합리적이다.



(a) 접지임피던스



(b) 저항성 성분



(c) 리액턴스 성분

그림 8. 50 [m] 봉상접지전극의 접지임피던스 계산결과  
 Fig. 8. Calculated ground impedance of the ground rod of 50 m

### 3. 결 론

본 연구에서는 접지전극의 형상이 간단한 봉상접지전극에 대하여 접지임피던스 측정결과와 이를 기초로 하여 모델등가회로를 제안하였다. 접지저항이 11.8 [Ω]과 7.1 [Ω]인 길이 10 [m]와 50 [m]인 봉상접지전극의 경우 주파수 100 [kHz]에

서 접지임피던스는 각각 20.1 [Ω]과 41.0 [Ω]으로 현저한 주파수의존성을 나타내었다. 길이 50 [m]인 봉상접지전극의 경우 정상상태 접지저항은 작지만 높은 주파수에서의 접지임피던스는 매우 증가하는 결과를 나타내었다. 즉, 접지임피던스는 약 10 [kHz] 이하의 주파수 영역에서 저항 성분이 주를 이루었으나 10 [kHz]를 넘어서면서 유도성 리액턴스의 특성이 주로 나타났다. 유도성 특성은 전극의 길이가 길수록 더욱 심하게 나타났다.

또한, 봉상접지전극에 대한 측정결과와 본 연구에서 제안하는 모델등가회로를 이용하여 해석한 결과는 수십 kHz이하의 주파수영역에서는 비교적 잘 일치하였으나 고주파 영역으로 갈수록 편차가 크게 나타났다. 결론적으로 본 연구결과 접지임피던스의 주파수의존성을 볼 때 고주파 성분을 함유하는 고장서지나 뇌서지에 의한 전위상승을 억제하기 위한 접지시스템의 성능은 주파수에 따른 접지임피던스의 특성으로 평가하는 것이 바람직하다.

### 감사의 글

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라구축지원사업의 지원에 의하여 수행된 연구결과입니다.

### 참 고 문 헌

- [1] I. D. Lu and R. M. Shier, "Application of a Digital Signal Analyzer to the Measurement of Power System Ground Impedance", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol.100, no. 4, pp.1918~1922, 1981.
- [2] A. D. Papalexopoulos and A. P. Meliopoulos, "Frequency Dependent Characteristics of Grounding System", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. PWRD-2, no.4, pp. 1073~1081, 1987.
- [3] J. H. Bogensperger, J. Frei and S. Pack, "Resistance of Grounding Systems Stationary and Transient Behavior", Proc. 9th International Symposium on High Voltage Engineering, pp. 6715-1~4, 1995.
- [4] 이복희, 이승철, 정보통신설비의 뇌보호, 인화대학교 출판부, pp. 197~202, 2004.
- [5] M. Mardiguan, Grounding and Bonding, Interference Control Technologies, Inc., pp.2-59~2-61, 1988.
- [6] 이복희, 이승철, 접지의 핵심기초기술, 도서출판 의제, pp. 65~69, 1999.
- [7] 이복희, 엄주홍, "가변주파수 인버터를 이용한 접지임피던스의 새로운 측정기법", 전기학회 논문지, vol.53C, no. 5, pp. 253~257, 2004.
- [8] A. Geri, "Behaviour of Grounding Systems Excited by High Impulse Currents: the Model and Its Validation", IEEE Transactions. on Power Delivery, vol. 14, no. 3, pp. 1008~1017, 1999.

- [9] S. Bourg, B. Sacepe and T. Debu, "Deep earth electrodes in highly resistive ground: frequency behaviour", in Proc. IEEE Int. Symp. EMC, pp.584~589, 1995.
- [10] M. Nayel, A. Ametani, Y. Baba, N. Nagaoka and S. Sekioka, "A study on a mutual grounding impedance and its transient characteristic", in Conf. Transmission and Distribution, Asia Pacific, IEEE/PES , vol. 2, pp.1270~1275, 2002.
- [11] M. I. Jambak and H. Ahmad, "Measurement of Grounding System Resistance Based on Ground High Frequency Behavior for Different Soil Type", Proc. TENCON 2000, vol. 3, pp. 207~211, 2000.
- [12] R. Verma and D. Mukhedkar, "Fundamental Considerations and Impulse Impedance of Groundings", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 100, no. 3, pp. 1023~1030, 1981.
- [13] R. Verma and D. Mukhedkar, "Impulse Impedance of Buried Ground Wire", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol.99, no.5, pp.2003~2007, 1980.
- [14] IEEE Std 80-1986, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, IEEE Inc, pp.277~284, 1986.
- [15] A. D. Papalexopoulos and A. P. Meliopoulos, "Frequency Dependent Characteristics of Grounding System", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 2, no. 4, pp. 1073~11081, 1987.
- [16] IEEE, IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power System, IEEE Std 142-1991, IEEE Inc, p. 186-189, 1991.

## 저 자 소 개



### 이 복 희 (李 福 熙)

1954년 6월 29일생. 1980년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1988~89년 동경 대학 생산기술연구소 객원연구원. 1995년 호주 Queensland대학 방문교수. 1999년 4월-2000년 2월 Cincinnati대학 방문교수. 현재 인하대 공대 전자전기공학부 교수.

Tel : (032) 860-7398

Fax : (032) 863-5822

E-mail : bhlee@inha.ac.kr



### 엄 주 홍 (嚴 柱 弘)

1972년 9월 5일생. 1998년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 2004년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2004년 현재 기초 전력연구원 연구원

Tel. (02) 871-6508

Fax. (02) 883-0827

E-mail : eommas@naver.com