한국조명·전기설비학회 2009 춘계학술대회 논문집 (2009. 5. 7 ~ 8)

모래의 수분함유량에 따른 비저항 및 비유전율의 주파수 의존성

(Frequency Dependent Resistivity and Relative Dielectric Constant with the Water Contents in Sand)

이복희 · 차응석 · 최종혁 · 최영철 · 유양우 · 안창환*
(Bok-Hee Lee · Eung-Suk Cha · Jong-Hyuk Choi · Young-Chul Choi · Yang-Woo Yoo · Chang-Hwan Ann*)
인하대학교 IT공대 전기공학부 · 인하공업전문대학 디지털 전자과*

Abstract

In order to evaluate the performance of a grounding system against lightning or fault currents including high frequency components, the grounding impedance should be considered rather than its ground resistance. Recently, some researches on the evaluation and modeling of the grounding impedances have been carried out, but the results have not been yet sufficient. This paper deals with the frequency dependence of the resistivity and relative dielectric constant of sand associated with water contents. As a result, the resistivity of sand is getting lower with increasing water content, and it is nearly independent on the frequency in the range of less than 1MHz, and is decreased over the frequency range of above 1MHz. Also, the relative dielectric constant is rapidly decreased with the frequency in the range of less than 10kHz, but it is nearly not dependent on the frequency over the frequency range of 10kHz. It was found from this work that the frequency dependance of resistivity and relative dielectric constant of soil should be considered in designing the grounding systems for protection against lightning or surges.

1. 서 론

뇌서지와 같이 수 MHz에 이르는 주파수성분을 포함하는 이상전류가 접지시스템에 침입하였을 때 접지시스템에 대한 안전성은 접지저항만으로 평가될 수 없다. 접지시스템에 대한 고주파 성능평가를 위해 접지임피던스의 개념이 요구되고 주파수 변화에 따른 성능평가가 이루어져야 한다[1]-[3]. 접지임피던스의 평가에 대한 많은 실험이 수행되었고, 접지임피던스를 산정하는 여러 가지 방법들이 제안되었지만 아직까지 접지임피던스를 일반화할 수 있는 평가 기법이나 모델링 기법 들이 부족한 실정이다. 접지임피던스에 관한 시뮬레이션은 EMTP나 Matlab과 같은 프로그램을 이용하여 수행되고 있으며, 접지임피던스에 대한 회로모델에 의하여 좌우된다. 이러한 회로모델을 제안하기 위해서는 임피던스성분을 구성하는 R, L, C, G값이 제안되어야 한다. 회로요소들은 접지극의 형태와 접지극이 시공되는 토양에 따라 변화하며 주로 토양의 비저항과 비유전율에 따라 결정된다. 현재까지 진행된 접지저항 및 접지임피던스의 모델링 기법들은 대부분 비저항 및 비유전율을 변화하지 않는 정수로 고정한 결과를 제시하였으나 실제 토양의 비유전율과 비저항은 주파수에 따라 그 특성이 변화한다[4][5]. 여러 주파수 성분을 고려해야 하는 접지임피던스를 평가하기 위해서 반드시 비유전율과 비저항에 대한 주파수의존성의 평가가 필요하다. 본 논문에서는 주파수 변화에 따른 접지임피던스의 성능 평가 및 모델링 기법에 고려되어야 하는 토양의 비저항 및 비유전율에 대한 실험결과를 제시하였다. 토양의 수분함유량에 따라 최대 10MHz까지 주파수를 변화시키며 토양의 비저항 및 비유전율을 평가하였다.

2. 실험

2.1 측정계의 구성 및 실험방법

본 논문에서는 모래의 수분함유량에 따른 비저항 및 비유전율의 주파수 특성을 분석하기 위해 그림 1과 같이 양쪽면에 전극이 부착된 아크릴 용기를 제작하였다. 이러한 용기는 ASTM G 57-95의 Wenner 4전극법을 이용한 토양의 저항률 측정방법에서 제안하고 있으며[6], 본 연구에서는 측정의 편리성을 위해 2전극법을 사용하고 측정전류의 크기를 최대한 크게 흘리기 위해 용기의 면적과 길이의 비를 위 규격과 다르게 제작하였다. 측정시 회로상에 인덕턴스 성분을 제거하기 위해 전극판에 전류를 직접인가하고 측정할 수 있도록 고안하

였다. 5kg의 모래에 1g단위까지 측정할 수 있는 전자저울을 이용하여 중량비에 따른 수분함유량을 변화시키고 실험대상 모래를 용기에 채운 후 4kg의 일정한 압력을 가한 후 주파수 변화에 따른 접지임피던스를 측정하였다.

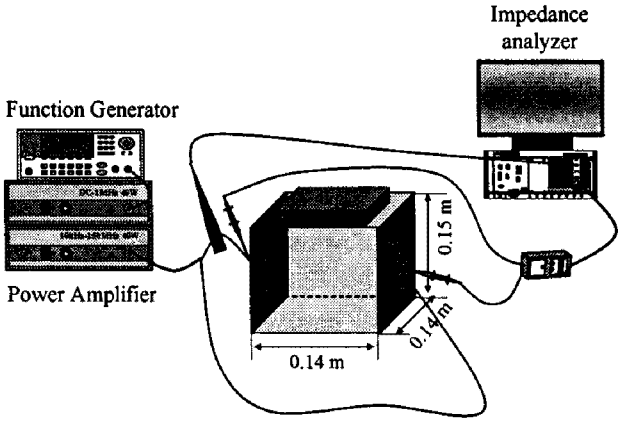


그림 1. 실험계의 구성
Fig. 1. Configuration for the experimental set up

80MHz까지 인가할 수 있는 함수발생기와 250 MHz까지의 주파수 대역을 갖는 전력증폭기를 이용하여 전류를 흘려주고, 전극 양단에 유도되는 전압과 전류를 70MHz까지 측정 가능한 차동프로브와 전류프로브를 사용하여 측정하였다. 측정된 신호의 분석은 100MS/s의 A/D변환기를 사용하여 디지털 신호로 변환하였으며, 변환된 신호들은 디지털 필터를 통과시킨 후 임피던스와 전류와 전압의 위상차를 산출하였다.

2.2 비저항 및 비유전율의 산출

그림 1의 용기내부의 등가회로는 인덕턴스 성분을 배제하였으며 그림 2와 같이 단순히 저항과 커패시터의 병렬회로로 나타낼 수 있다.

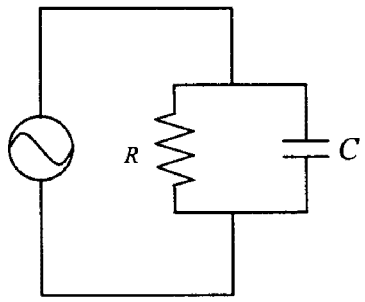


그림 2. 시험모델의 등가회로
Fig. 2. Equivalent circuit of the test model

그림 2의 RC병렬회로의 임피던스는 식 (1)과 같이 계산되며 실수부 성분과 허수부 성분으로 표현된다.

$$Z=\frac{R}{1+w^2R^2C^2}-j\frac{wR^2C}{1+w^2R^2C^2} \quad (1)$$

식 (1)의 임피던스의 실수부 성분(Re)과 허수부 성분(Im)은 실험을 통하여 얻은 임피던스와 전류와 전압의 위상차로부터 식 (2), (3)과 같이 계산될 수 있다.

$$Re=\frac{R}{1+w^2R^2C^2}=Z\cos\theta \quad (2)$$

$$Im=\frac{wR^2C}{1+w^2R^2C^2}=Z\sin\theta \quad (3)$$

실수부 성분과 허수부 성분은 저항과 커패시턴스로 이루어져 있으며, 식 (4), (6)과 같이 저항과 커패시턴스 값을 계산해 낼 수 있고, 용기의 면적과 길이를 알고 있기 때문에 토양의 비저항과 비유전율을 식 (5), (7)로 산출할 수 있다.

$$R=Re+\frac{Im^2}{Re}=\frac{Z^2}{Re} \quad (4)$$

$$\rho=\frac{AZ^2}{lR_e} \quad (5)$$

$$C=\frac{Im}{w(Re^2+Im^2)}=\frac{Im}{wZ^2} \quad (6)$$

$$\varepsilon_r=\frac{lI_m}{\varepsilon_0 A\omega Z^2} \quad (7)$$

3 결과 및 고찰

그림 1의 실험계를 이용하여 PC 기반 접지임피던스 분석기에 출력된 결과화면의 예를 그림 3에 나타내었다.

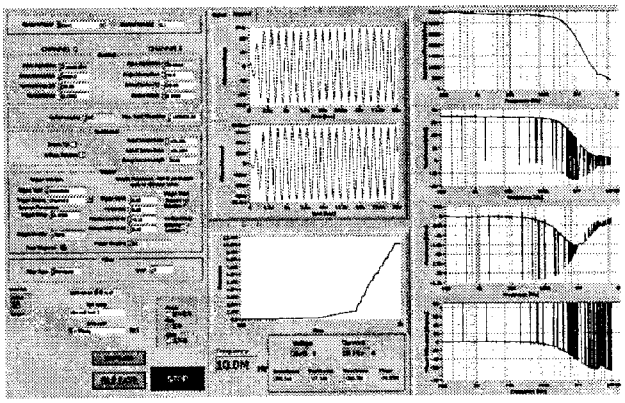
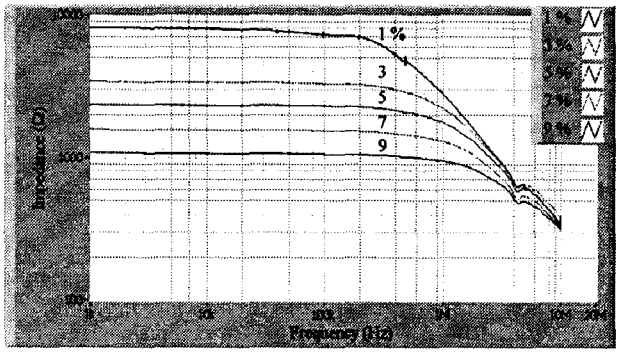


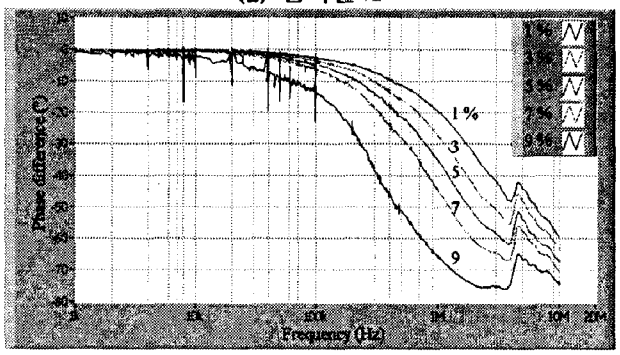
그림 3. 접지임피던스 분석화면의 예
Fig. 3. An example of the screen for analyzing the grounding impedance

접지임피던스 분석시스템은 측정된 전류와 전압의 파형과 주파수를 실시간으로 보여주며, 주파수 변화에 따른 접지임피던스, 위상차, 실수부성분 및 허수부성분의 값을 나타낸다.

그림 4는 토양의 수분함유량에 따른 측정된 접지임피던스와 위상차의 주파수 의존성을 나타낸다. 수분함유량이 1%인 경우 낮은 주파수에서 약 8,000Ω높은 임피던스를 나타내고 수분의 양이 증가함에 따라 임피던스가 감소하여 9%의 수분함유량에서 약 1,100Ω으로 약 8배 감소하는 것으로 나타났다.



(a) 임피던스



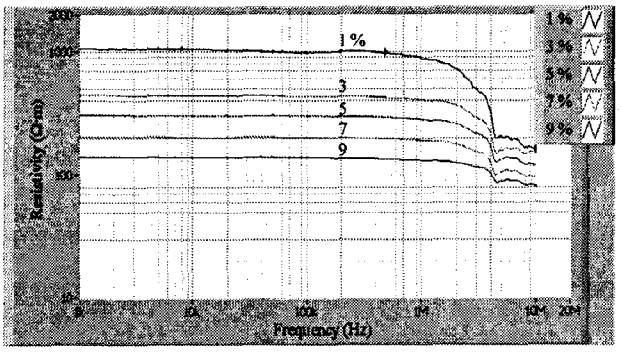
(b) 위상차

그림 4. 모래의 수분함유량에 따른 임피던스와 위상차의 주파수의존성

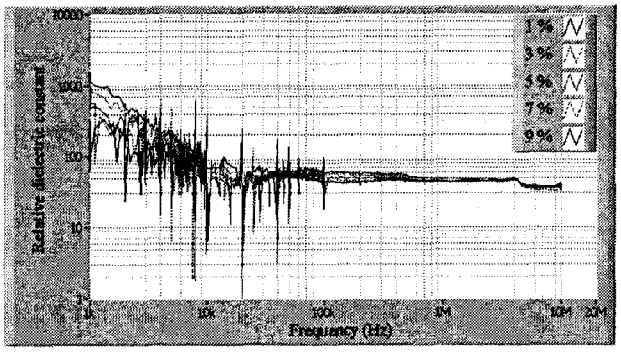
Fig. 4. Frequency-dependent impedance and phase difference of sand with water contents

주파수 증가에 따른 임피던스의 변화는 200kHz 이하의 주파수에서 크게 변화하지 않았으며, 200 kHz 이상의 주파수에서 주파수가 증가함에 따라 임피던스가 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 주파수에 따른 임피던스의 변화는 저주파수에서 높은 임피던스를 나타내는 1%에서 가장 크게 발생하였고 수분함유량이 클수록 그 감소폭이 작게 나타나, 결국 10MHz의 주파수에 이르러 모든 수분함유량에서 임피던스값이 약 300Ω으로 비슷한 결과를 나타내었다. 이러한 원인을 분석해 보면 그림 4 (b)의 위상차에 의한 해석이 가능해진다. 대부분의 수분함유량에서 10kHz이하의 주파수에서 위상차가 0°에 가깝고 변화가 거의 발생하지 않는 반면 100kHz보다 높은 주파수 영역에서 위상이 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 그림 2의 등가회로에서 10kHz이하의 주파수에서는 대부분의 전류가 저항을 통해서 흐르고, 100kHz이상의 주파수에서 리액턴스성분이 감소하여 커패시터를 통하여 전류가 흐르기 때문인 것으로 판단된다.

그림 4에서 얻어진 임피던스와 위상차의 측정결과를 식 (1)-(7)에 대입하여 얻은 수분함유량에 따른 비저항과 비유전율의 주파수의존성의 결과를 그림 5에 나타내었다. 비저항의 경우 임피던스의 추세와 달리 약 1MHz까지 주파수의존성은 나타나지 않았으며 1MHz이상의 주파수에서 약 4MHz까지 감소하며 그 이상의 주파수에서 다시 거의 일정한 값을 갖는 것으로 나타났다. 수분함유량이 1%인 경우 1MHz이하의 주파수에서 약 1,000Ω · m를 나타내었고, 1MHz이상의 주파수에서 급격히 감소하여 4MHz이상의 주파수에서 200Ω · m 이하의 값을 나타내었다. 수분함유량이 증가함에 따라 비저항이 감소하여 9%의 수분함유량의 경우 1MHz이하의 주파수에서 140Ω · m의 저항률을 나타내었고, 주파수가 상승함에 따라 80Ω · m까지 감소하는 것으로 나타났다. 1MHz이상의 주파수에서 수분함유량이 낮을수록 모래의 비저항의 주파수 의존성이 큰 것으로 나타났다.



(a) 비저항



(b) 비유전율

그림 5. 모래의 수분함유량에 따른 비저항 및 비유전율의 주파수의존성

Fig. 5. Frequency-dependent resistivity and relative dielectric constant of sand with water contents

그림 5 (b)의 비유전율의 경우 커패시턴스를 구하는 식 (5)에서 임피던스의 제곱과 주파수성분의 곱에 따라 100kHz이하의 주파수에서 작은 위상차의 노이즈 성분에서 변화를 나타내었다. 10kHz이하의 주파수에서 주파수가 증가함에 따라 비유전율은 감소하는 것으로 나타났으며 약 10kHz이상의 주파수에서 주파수의존성이 거의 나타나지 않는 것으로 분석된다. 비유전율은 수분함유량이 증가함에 따라 높게 나타났으나 수분함유량에 따른 차이는 비저항의 변화에 비해 매우 작게 나타났다.

4. 결 론

수분함유량 및 주파수 변화에 따른 모래의 비유전율 및 비저항을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

모래의 비저항은 1MHz이하의 주파수에서 크기의 변화가 거의 없는 것으로 나타났으며, 수분함유량이 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다.

주파수의 증가에 따른 비유전율은 10kHz이하에서 감소를 나타내었으며 10kHz이상의 주파수에서는 일정한 값을 유지하였고, 수분변화에 따른 비유전율의 차이는 비저항의 경우보다 작은 것으로 나타났다.

정확한 모델링 결과를 얻기 위한 과도접지임피던스의 모델링은 비유전율과 비저항의 주파수의존성을 고려해야 한다고 판단된다.

참 고 문 헌

[1] R. Kosztaluk, M. Loboda, D. Mukhedkar, "Experimental Study of Transient Ground Impedances", IEEE Trans. PAS, Vol.100, No.11, pp.4653-4660,1981.

[2] W. C. Hart and E. W. Malone, Lightning and Lightning Protection, Interference Control Technologies, Inc., Gainesville, Virginia, pp.3.67~3.76, 1988.

[3] T. Takahashi, "A Part of Grounding for Lightning Protection Technique", J. of the Institute of Electrical Installation Engineers of Japan, Vol.9, pp.671~676, 1989.

[4] Silverio Visacro, "A Comprehensive approach to the grounding response to lightning currents", IEEE Trans. PD, Vol.22, No. 1, pp.381-386, 2007.

[5] Silverio Visacro, G. Rosado "Response of grounding electrodes to impulsive currents: An experimental evaluation", IEEE Trans. EC, Vol.51, No. 1, pp.161-164, 2009.

[6] ASTM G57-95a, "Standard test method for field measurement of soil resistivity using the wenner four-electrode method".