

수분함유량에 따른 토양의 저항률 및 비유전율의 주파수의존성

(Frequency-Dependent Resistivity and Relative Dielectric Constant of Soil on Water Content)

최종혁* · 차응석 · 이복희

(Jong-Hyuk Choi · Eung-Suk Cha · Bok-Hee Lee)

요 약

고주파수성분을 포함하는 뇌격전류나 또는 고장전류에 대한 접지시스템의 성능을 평가하기 위해 접지저항보다는 접지임피던스에 대한 고려가 필요하다. 접지임피던스를 평가하기 위해서는 토양의 저항률과 비유전율의 주파수의존성이 규명되어야 한다. 본 논문은 3가지 다른 토양에 대하여 수분함유량에 따른 저항률과 비유전율의 주파수의존성을 나타낸다. 결론적으로 토양의 저항률은 수분함유량이 증가함에 따라서 작아지게 되고, 1[MHz]보다 낮은 주파수에서 거의 변화하지 않으며 1[MHz]이상의 주파수에서는 감소한다. 반면에 비유전율은 1[MHz]이하의 주파수에서 매우 급격하게 감소하며, 1[MHz]이상의 주파수에서는 거의 변화하지 않는 것으로 나타났다. 본 실험 결과로부터 낙뢰 또는 개폐서지에 대한 보호를 목적으로 하는 접지시스템의 설계시 토양의 저항률과 비유전율을 고려하는 것이 바람직한 것으로 밝혀졌다.

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 the steady state ground resistance. To evaluate the ground impedance, the frequency dependence of resistivity and relative dielectric constant of the soil have to be analyzed. This paper deals with the frequency dependence of the resistivity and relative dielectric constant of three types of soil on water content. As a result, the resistivity of soil is getting lower with increasing of water content. It is nearly independent of the frequency in the range less than 1[MHz], and is decreased over the frequency range above 1[MHz]. On the other hand, the relative dielectric constant is rapidly decreased with the frequency in the range less than 1[MHz], but it is nearly independent on the frequency over the range of 1[MHz]. It was found from the experiments that the frequency-dependant resistivity and relative dielectric constant of soil should be considered when designing the grounding systems for protection from lightning or switching surges.

Key Words : Soil resistivity, Relative dielectric constant, Lightning surges, Grounding impedance, Grounding systems

* 주저자 : 인하대학교 대학원 전기공학과 박사과정

Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822, E-mail : chjohy80@naver.com

접수일자 : 2009년 7월 31일, 1차심사 : 2009년 8월 12일, 심사완료 : 2009년 11월 10일

1. 서 론

뇌서지와 같이 수 [kHz]~수 [MHz]에 이르는 주파수 성분을 포함하는 이상전류가 접지시스템에 침입하였을 때 접지시스템의 안전성은 접지저항만으로 평가될 수 없다. 접지시스템의 고주파수에 대한 성능평가를 위해 접지임피던스의 개념이 요구되고 주파수 변화에 따른 성능평가가 이루어져야 한다[1]~[3]. 접지임피던스에 관한 모델링은 EMTP나 Matlab과 같은 프로그램을 이용하여 수행되고 있으며, 접지임피던스에 대한 회로모델에 의하여 좌우된다. 이러한 회로모델을 제안하기 위해서는 R , L , C , G 값이 결정되어야 한다. 회로요소들은 접지전극의 형태와 접지전극이 시공되는 토양에 따라 변화하며 주로 토양의 저항률과 비유전율에 따라 결정된다. 접지저항 및 접지임피던스의 모델링 기법들은 대부분 저항률 및 비유전율을 주파수변화에 따라 변화하지 않는 정수로 고정된 결과를 제시하였으나[4-5] 최근의 몇몇 문헌들에서 토양의 비유전율과 저항률이 주파수 의존한다는 점을 기술하였다[6-7]. 고주파수 성분을 고려해야 하는 접지임피던스를 평가하기 위해서 반드시 비유전율과 저항률에 대한 주파수의존성의 평가가 필요하다[8-9].

토양의 저항률에 대한 정보는 비교적 토양의 종류에 따라 정량적인 값들이 제시되어 있으나 제시된 값들은 낮은 주파수에서 측정된 결과이기 때문에 만약 측정 주파수에 따라 저항률이 변화하게 된다면 그 결과의 제시가 요구된다. 또한 토양의 비유전율의 경우 토양의 종류에 따른 상세한 값이 제시되지 못하였고 다른 물질들과 마찬가지로 대부분 수 [GHz] 단위에서 측정된 결과만이 제시되기 때문에 그러한 측정값을 수 [Hz]에서 수 [MHz]까지의 성능을 평가하는 피뢰설비용 접지임피던스의 모델링에 그대로 적용하는 것은 오차를 유발할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 피뢰설비용 접지시스템의 설계와 성능평가에 활용될 수 있는 토양의 저항률과 비유전율의 주파수의존성에 대한 데이터의 제공을 목적으로 뇌격전류의 주파수 범위에 대한 실험적 연구결과를 기술한다.

2. 실험계 구성 및 분석방법

2.1 실험계 구성 및 측정 방법

본 논문에서는 토양의 종류별 수분함유량에 따른 저항률 및 비유전율의 주파수 특성을 측정하기 위해 그림 1과 같이 양쪽면에 전극이 부착된 140×140×150[mm] 크기의 투명아크릴 용기를 제작하였다. ASTM G 57-95a에서는 아크릴 용기에 토양을 담아 Wenner 4전극법을 이용하여 토양의 저항률을 측정하는 방법을 제안하고 있으며, 저주파수에서 토양의 특성을 평가하는 방법을 기술하고 있다[10]. 본 연구에서는 측정의 편리성을 위해 2전극법을 사용하고 측정전류의 크기를 최대한 크게 흘리기 위해 용기의 면적과 길이의 비를 위의 규격에서 제안한 크기와 다르게 제작하였다. 측정회로를 간단한 RC병렬 회로로 구성하고 측정회로의 인덕턴스 성분을 최소화하기 위해 전극판에 전류를 직접 인가하고 전압과 전류를 측정할 수 있도록 고안하였다. 5[kg]의 토양에 1[g] 단위까지 측정할 수 있는 전자저울을 이용하여 중량비에 따른 수분함유량을 제어하였으며, 측정오차를 최소화하기 위해 용기 내부에 공극이 발생하지 않도록 토양을 조밀하게 채웠으며 일정한 압력을 유지하여 실험을 진행하였다.

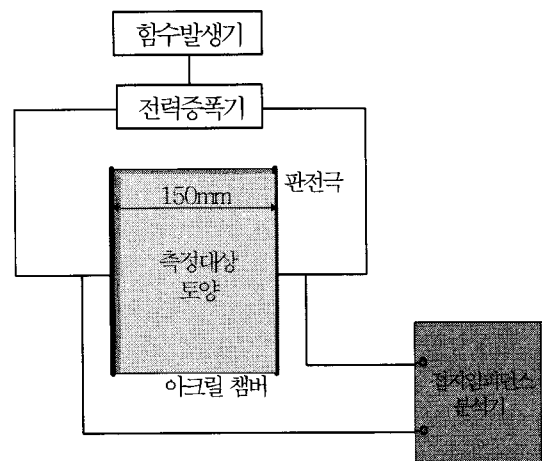


그림 1. 실험계의 개략도
Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup

수분함유량에 따른 토양의 저항률 및 비유전율의 주파수 의존성

토양이 채워진 측정계의 임피던스와 위상차를 측정하기 위해 80[MHz]까지 인가할 수 있는 함수발생기와 DC-250[MHz]까지의 주파수 대역을 갖는 전력증폭기를 이용하여 전류를 흘려주고, 전극 양단의 전압과 전류를 70[MHz]까지 측정할 수 있는 차동프로브와 전류프로브로 측정하였다. 실험에 사용된 측정기용 전원은 절연변압기를 이용하여 측정용 전원과 절연분리하였으며, 외부에서 발생하는 잡음과 외란의 영향을 최소화하였다. 측정된 신호의 분석은 100[MS/s]의 A/D변환기를 사용하여 디지털신호로 변환하였으며, 변환된 신호들은 디지털 필터를 통과시킨 후 측정하는 주파수의 전압과 전류의 정현파 성분을 추출하여 임피던스 및 전류와 전압의 위상차를 산출하였다. PC기반 프로그램을 이용하여 입력된 전압과 전류의 신호로부터 자동적으로 임피던스, 위상차, 실수부와 허수부가 측정되며, 차후 Labview 프로그램을 이용하여 주파수에 따른 저항률 및 비유전율을 분석하였다.

토양의 종류별 수분함유량에 따른 저항률 및 비유전율을 분석하기 위해 모래, 마사토, 황토의 3종류의 토양을 대상으로 하였으며, 표준채를 이용하여 실험대상 토양의 알갱이를 일정한 크기로 준비하였다. 각 토양의 포화수분함유량을 조사한 결과 모래, 마사토, 황토에서 각각 9[%], 25[%], 35[%]로 나타났다. 포화수분함유량까지 70[Ω·m]의 저항률을 갖는 수돗물을 첨가하여 수분함유량을 일정하게 증가시키며 실험을 진행하였으며, 실험이 진행되는 동안 온도에 의한 영향을 최소화하기 위해 실험실의 온도를 ASTM G 57-95a에서 제시하는 섭씨 20[°]로 유지하였다[10].

3.3 저항률 및 비유전율의 분석 기법

토양의 비유전율과 저항률을 분석하기 위해 제작된 아크릴 용기 내부의 전극계는 RC병렬회로에 L이 직렬로 연결된 회로로 나타내어지나[11-12], 본 연구에서는 전극에 전류를 직접 인가하고 전극 양단의 전압을 측정하여 인덕턴스 성분을 최소화하여 회로상에서 배제하였으며, 그림 2와 같이 단순히 저항과 커패시터의 병렬회로로 나타낼 수 있다.

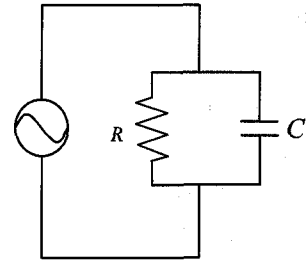


그림 2. 시료의 등가회로
Fig. 2. Equivalent circuit of the test sample

그림 2의 RC병렬회로의 임피던스는 식 (1)과 같이 계산되며, 실수부 성분(R_e)과 허수부 성분(I_m)으로 표현된다.

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

식 (1)의 임피던스의 실수부(R_e)와 허수부(I_m)는 실험을 통하여 얻은 임피던스와 전류와 전압의 위상차로부터 계산되며, 회로요소인 저항과 커패시턴스 값을 식 (2), (3)으로부터 계산할 수 있다.

$$R = R_e + \frac{I_m^2}{R_e} = \frac{Z^2}{R_e} \quad (2)$$

$$C = \frac{I_m}{\omega(R_e^2 + I_m^2)} = \frac{I_m}{\omega Z^2} \quad (3)$$

식 (2)와 (3)으로부터 용기의 면적과 길이를 알고 있기 때문에 토양의 저항률과 비유전율을 식 (4), (5)로 산출할 수 있다.

$$\rho = \frac{AZ^2}{lR_e} \quad (4)$$

$$\epsilon_r = \frac{U_m}{\epsilon_0 A \omega Z^2} \quad (5)$$

여기서, A는 전극의 면적, l은 전극간 거리이다.

3. 결과 및 고찰

PC 기반 접지임피던스 분석기에 출력된 결과화면의 예를 그림 3에 나타내었다.

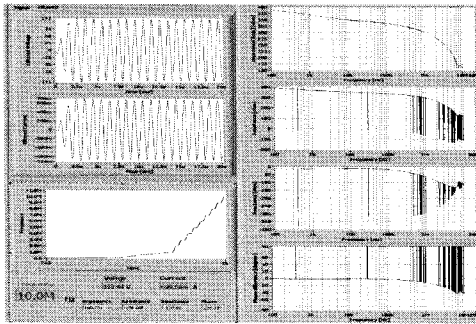


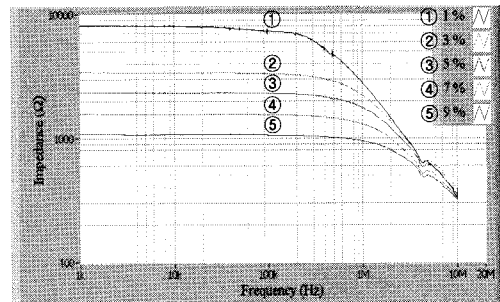
그림 3. 접지임피던스 분석기를 이용한 임피던스와 위상차, 실수부와 허수부 측정의 결과화면의 예
 Fig. 3. Examples of measured results for impedance, phase difference, real and imaginary parts using grounding impedance analyzer

그림 3의 왼쪽 3개의 파형은 임피던스 분석시스템의 디지털 필터를 통과하여 얻어진 전류와 전압의 파형과 측정된 전압과 전류파형의 주파수를 실시간으로 보여준다. 또한 오른쪽 4개의 파형은 위쪽에서부터 각각 임피던스, 실수부, 허수부와 전압과 전류의 위상차를 나타낸다. 실수부 및 허수부, 위상의 노이즈는 토양의 공극에 의한 전압과 전류의 위상차의 떨림으로 인하여 발생하는 것으로 판단된다.

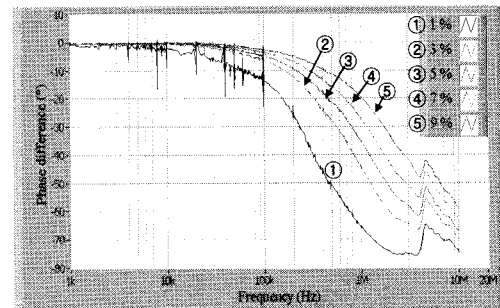
그림 4는 모래의 수분함유량에 따라 측정된 임피던스와 위상차의 주파수 의존성을 나타낸다. 수분함유량이 1[%]인 경우 낮은 주파수에서 약 8,000[Ω]의 큰 임피던스를 나타내고 수분의 양이 증가함에 따라 임피던스가 감소하여 9[%]의 수분함유량에서 약 1,100[Ω]으로 약 8배 감소하는 것으로 나타났다.

주파수 증가에 따른 임피던스의 변화는 200[kHz]이하의 주파수에서 크게 변화하지 않았으며, 200[kHz]이상의 주파수에서 주파수가 증가함에 따라 임피던스가 감소하는 것으로 나타났다. 주파수에 따른 임피던스의 변화는 저주파수에서 큰 임피던스를 나타내는 1[%]에서 가장 크게 발생하였고 수분함유량이 클수록 그 감소폭이 작게 나타나지만, 결국 10[MHz]의 주파수에 이르러 모든 수분함유량에서 임피던스가 약 300[Ω]으로 비슷한 결과를 나타내었다. 이러한 원인을 분석해 보면 그림 4 (b)의 위상차에 의한 해석이 가능해진다. 대부분의 수분함유량에서 10[kHz]이하의 주

파수에서 위상차가 0[°]에 가깝고 변화가 거의 발생하지 않는 반면 100[kHz]보다 높은 주파수 영역에서 위상이 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 그림 2의 등가회로에서 10[kHz]이하의 주파수에서는 대부분의 전류가 저항을 통해서 흐르고, 100[kHz]이상의 주파수에서 리액턴스성분이 감소하여 커패시터를 통하여 전류가 흐르기 때문인 것으로 판단된다.



(a) 임피던스



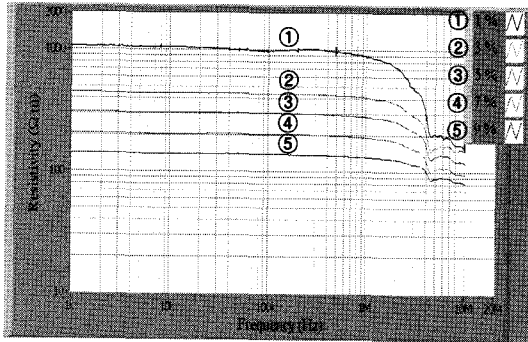
(b) 위상차

그림 4. 수분함유량에 따른 모래의 임피던스와 위상차의 주파수의존성
 Fig. 4. Frequency dependence of impedance and phase difference of sand on water content

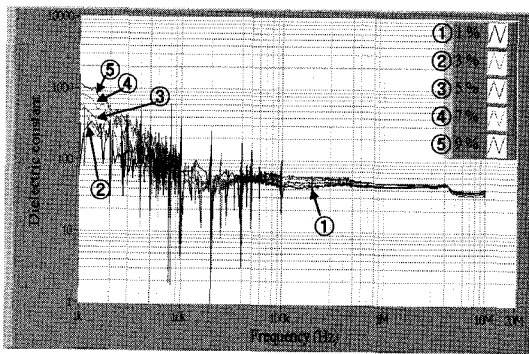
그림 4에 나타낸 임피던스와 위상차의 측정결과를 식 (1)~(5)에 대입하여 얻은 수분함유량에 따른 저항률과 비유전율의 주파수의존성을 그림 5에 나타내었다.

그림 5 (a)의 저항률의 경우 임피던스의 추세와 달리 약 1[MHz]까지 주파수의존성은 거의 나타나지 않았으며 1[MHz]이상의 주파수에서 약 4[MHz]까지 감소하며, 그 이상의 주파수에서 다시 거의 일정한 값을 갖는 것으로 나타났다. 수분함유량이 1[%]인 경우

수분함유량에 따른 토양의 저항 및 비유전율의 주파수의존성



(a) 저항률



(b) 비유전율

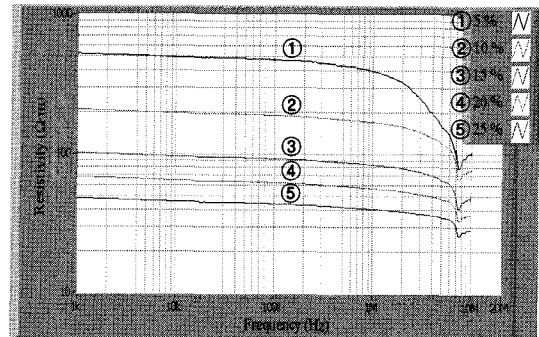
그림 5. 수분함유량에 따른 모래의 저항률과 비유전율의 주파수의존성

Fig. 5. Frequency dependence of resistivity and relative dielectric constant of sand on water content

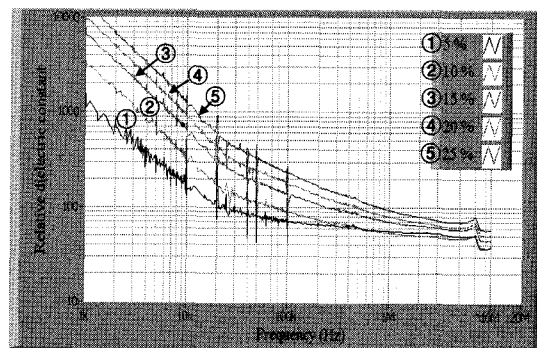
1[MHz]이하의 주파수에서 약 1,000[Ω·m]를 나타내었고, 1[MHz]이상의 주파수에서 급격히 감소하여 4[MHz]이상의 주파수에서 200[Ω·m] 이하의 값을 나타내었다. 수분함유량이 증가함에 따라 저항률이 감소하여 9[%]의 수분함유량의 경우 1[MHz]이하의 주파수에서 140[Ω·m]의 저항률을 나타내었고, 주파수가 상승함에 따라 80[Ω·m]까지 감소하는 것으로 나타났다. 1[MHz]이상의 주파수에서 수분함유량이 낮을수록 모래의 저항률의 주파수 의존성이 큰 것으로 나타났다. 그림 5 (b)의 비유전율의 경우 100[kHz]이하의 주파수에서 토양의 불균일한 입자사이에 존재하는 커패시턴스의 영향으로 비유전율이 크게 변화하는 것으로 판단된다. 10 [kHz]이하의 주파수에서 주파수가 증가함에 따라 비유전율은 감소하는 것으로

나타났으며 약 10[kHz]이상에서 주파수의존성이 거의 나타나지 않는 것으로 분석된다. 비유전율은 수분함유량이 증가함에 따라 높게 나타났으나 수분함유량에 따른 차이는 저항률의 변화에 비해 매우 작게 나타났다.

마사토의 저항률과 비유전율의 수분함유량에 따른 주파수의존성의 결과를 그림 6에 나타내었다. 마사토의 저항률은 1[MHz] 이상의 주파수에서 급격하게 감소하는 특성을 나타내었다. 1[kHz]에서 측정된 저항률의 경우 수분함유량이 가장 적은 5[%]의 수분함유량 조건에서 약 500[Ω·m]의 저항률을 나타내었고, 10[%]의 수분함유량에서 200[Ω·m], 20[%]의 수분함유량에서 70[Ω·m]로 수분함유량의 역수보다 더욱 크게 감소하는 것으로 나타났다.



(a) 저항률



(b) 비유전율

그림 6. 수분함유량에 따른 마사토의 저항률과 비유전율의 주파수의존성

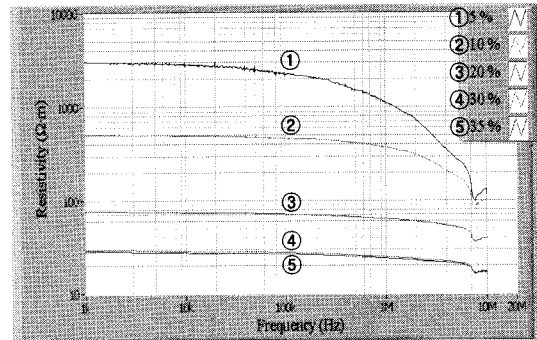
Fig. 6. Frequency dependence of resistivity and relative dielectric constants of silt on the water content

그림 6 (b)는 비유전율의 주파수 의존성을 나타내며, 수분함유량에 상관없이 주파수가 증가함에 따라 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 1[kHz]의 주파수에서 수분함유량이 5[%]인 경우 10,000이상의 매우 큰 값을 나타내었고, 25[%]의 포화수분함유량에서도 1,000이상의 값을 보이는 것으로 나타났다. 마사토의 비유전율에 대한 결과는 모래에 비하여 변동이 적으며 이러한 원인은 마사토의 입자의 크기가 매우 작고 일정한 성질로 인해 측정시 공극에 의한 영향이 없어 전류와 전압의 위상차의 흔들림이 적기 때문이라 판단된다. 비유전율은 1[MHz]까지 주파수가 상승함에 따라 급격하게 감소하여 1[MHz] 이상의 주파수에서 100이하의 값으로 감소하였다. 일반적으로 알려져 있는 토양의 비유전율은 10 이하의 값으로 나타내어지나, 이러한 값들은 순수 토양의 특성만으로 결정된 비유전율이며 수분이 함유됨에 따라 수분의 분극작용으로 유전특성이 크게 나타나 토양 자체의 비유전율보다 수분의 영향이 훨씬 크게 작용한 것으로 보인다.

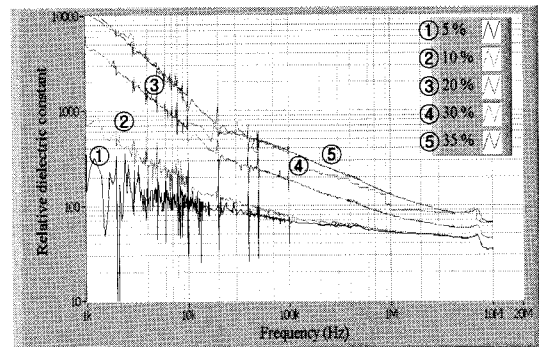
그림 7은 황토의 수분함유량에 따른 저항률과 비유전율의 주파수 특성을 나타낸다. 황토의 저항률의 경우 100[kHz]까지 주파수의존성은 나타나지 않았으며 1[MHz]이상의 주파수에서 약 7[MHz]까지 감소하는 것으로 나타났다. 수분함유량이 5[%]인 경우 100[kHz]이하의 주파수에서 약 3,000[Ω · m]를 나타내었고, 1[MHz]이상의 주파수에서 급격히 감소하여 7[MHz]이상의 주파수에서 약 100[Ω · m]를 나타내었다. 수분함유량이 증가함에 따라 저항률이 감소하여 35[%]의 수분함유량의 경우 1[MHz]이하의 주파수에서 30[Ω · m]의 저항률을 나타내었고, 주파수가 상승함에 따라 18[Ω · m]까지 감소하는 것으로 나타났다. 1[MHz]이상의 주파수에서 수분함유량이 많을수록 저항률의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다.

그림 7 (b)의 비유전율의 경우 100[kHz]이하의 주파수에서 작은 위상차의 변동에도 큰 변화를 나타내어 측정값이 크게 변동한다. 10[kHz]이하의 주파수에서 주파수가 증가함에 따라 비유전율은 감소하는 것으로 나타났으며, 약 10[kHz]이상의 주파수에서 주파수의존성이 거의 나타나지 않는 것으로 분석된다. 비유전율은 수분함유량이 증가함에 따라 높게 나타났으나

수분함유량에 따른 차이는 저항률의 변화에 비해 매우 작게 나타났다.



(a) 저항률



(b) 비유전율

그림 7. 수분함유량에 따른 황토의 저항률과 비유전율의 주파수의존성

Fig. 7. Frequency dependence of resistivity and relative dielectric constant of clay on the water content

3. 결 론

본 논문은 토양의 종류별 수분함유량에 따른 저항률 및 비유전율의 변화 및 그 추세를 측정하여 접지임피던스의 주파수의존성 평가시 반영될 수 있는 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- (1) 토양의 임피던스는 약 100[kHz]이상의 주파수에서 감소하는 것으로 나타났으며 이것은 위상차에서 확인되듯이 용량성 전류의 증가에 의한 것으로 판단된다.
- (2) 수분함유량이 증가할수록 저항률은 감소하는 반

면 비유전율은 수분함유량이 증가할수록 증가하는 것으로 나타났다.

- (3) 저항률의 주파수의존성은 1[MHz]이하의 주파수에서 거의 없는 반면, 비유전율은 주파수가 증가할수록 매우 급격하게 감소하고 주파수가 증가함에 따라 그 감소폭이 감소하여 약 7[MHz]이상의 주파수에서 일정한 값에 수렴하는 것으로 나타났다.
- (4) 뇌격전류의 주파수범위에서 토양의 저항률은 주파수의존성이 크지 않으나 비유전율은 상당히 큰 변화를 나타내기 때문에 접지임피던스를 평가할 때 반드시 이러한 주파수의존성이 반영되어야 하며, 본 연구에서 얻어진 결과는 접지임피던스의 모델링을 위한 유용한 자료로 활용될 것으로 기대된다.

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

References

- [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] M. E. Almeida and M. T. Correia de Barros, "Fundamental considerations on long ground electrodes design", 13th ISH, pp.241-244, 2003.
- [5] Leonid Greev, "High-frequency performance of ground rods in highly resistive soil", GROUND 2000 ICGE , pp.85-89, 2000.
- [6] S. Visacro, "A Comprehensive approach to the grounding response to lightning currents", IEEE Trans. PD, Vol.22, No. 1, pp.381-386, 2007.
- [7] S. Visacro, G. Rosado "Response of grounding electrodes to impulsive currents: An experimental evaluation", IEEE Trans. EC, Vol.51, No. 1, pp.161-164, 2009.

- [8] S. Visacro and C. Portela, "Soil permittivity and conductivity behavior on frequency range of transient phenomena in electric power systems", Proc. ISH-87, Germany, Aug. 1987.
- [9] C. Portela, "Measurement and modeling of soil electromagnetic behavior," presented at the IEEE Int. Symp. Electromagnetic Compatibility, Seattle, WA, pp.1004-1009, 1999.
- [10] ASTM G57-95a, "Standard test method for field measurement of soil resistivity using the wenner four-electrode method".
- [11] Anggoro, B.; Sinisuka, N.I.; Pakpahan, P.M, "The Influence of Resistivity and Dielectric Constant of Soil Which is Injected by Low to High Current Frequency", 8th ICPD, pp.912 - 915, June, 2006.
- [12] Anggoro, B.; Sinisuka, N.I.; Pakpahan, P.M "Resistivity and Dielectric Constant Characteristic of Soil If are Treated by Water, Salt and Carbon", 8th ICPD, pp.893 - 896, June 2006.

◆ 저자소개 ◆

최종혁(崔鍾赫)

1980년 5월 12일생. 2006년 2월 인하대 공대 전자공학과 졸업. 2008년 2월 동대학원 전기공학과졸업(석사). 현재 동대학원 전기공학과 박사과정.
Tel : (032)860-7398
Fax : (032)863-5822
E-mail : chjohy80@naver.com

차용석(車億碩)

1960년 6월 29일생. 1982년 2월 서울명지실업전문대학교 전기공학과 졸업. 2008년 인하대 대학원 정보전기공학과 졸업(석사).
Tel : (032)437-7756
Fax : (032)863-5822
E-mail : chaicea@icea.co.kr

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 인하대공대 전자전기공학부 교수.
본 학회 회장.
Tel : (032)860-7398
Fax : (032)863-5822
E-mail : bhlee@inha.ac.kr