

대지저항률에 따른 접지임피던스의 주파수 의존성

(Frequency Dependent Grounding Impedance As a Function of Soil Resistivity)

배성배 · 최종혁 · 박건훈 · 이복희

(Sung-Bae Bae · Jong-Hyuk Choi · Geon-Hun Park · Bok-Hee Lee)

인하대학교 IT공대 전기공학부

Abstract

A design criterion of grounding systems is commonly based on low frequency resistance in Korea. When lightning surges which have high frequency components are injected into the grounding system, the grounding impedance is greatly different from the static grounding resistance. This paper presents the grounding admittance and phase on the frequency range from 100 [Hz] to 15 [MHz] using water tank simulating the grounding system in different water resistivities. As a result, capacitive effect is dominant over the frequency of 100 [kHz] at the water resistivity of 1,000 [$\Omega \cdot m$]. On the other hand, the inductive characteristics appear at the low water resistivity. Consequently, dependence of grounding impedances on the frequency of injected current is strongly related to resistivity.

1. 서론

기존의 접지시스템은 시공 기준에 따라서 저주파수에서 측정된 하나의 저항값을 기준으로 설치되었다. 하지만, 접지로 침입하는 뇌서지나 개폐서지와 같은 이상전류들은 수 MHz 정도의 고주파 성분들을 포함하고 있다. 이러한 고주파 영역에서의 접지시스템의 성능은 정상상태의 저주파 영역과는 매우 다르며 단순히 접지의 저항값을 낮게 시공하는 것으로는 그 해답을 얻을 수 없다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 접지저항보다 R, L, C, G를 포함하는 접지임피던스가 정의되어야 하고 접지시스템의 고주파응답에 대한 평가가 수행되어야 한다.[1] 접지임피던스는 대지의 구조, 온도, 습도, 접지전극의 형상, 매설조건 등에 의해서 복잡한 특성을 나타내는데 대지구조에 대한 회로해석은 아직까지 명확하게 정립되지 못하였다.[2] 일반적으로 고주파 영역에서는 접지극의 길이에 따라 유도성 요소가 나타나는 것으로 알려져 있으나, 토양의 저항률과 인가주파수에 따라 용량성과 유도성 사이에 논란이 일고 있다.[3] 접지극의 임피던스는 뇌격동안 접지극의 특성을 파악하기 위해 측정되고 분석되지만, 실제 필드에서 고주파의 접지임피던스 측정은 수행하기 매우 복잡하고 분석하는데 큰 어려움이 따른다. 대지의 저항률과 주파수에 따른 접지임피던스의 가장 큰 차이는 유도성분과 용량성 성분이며, 만약 그것을 고려하지 않는다면 접지시스템의 성능을 보장할 수 없다.[4] 따라서 본

논문에서는 접지임피던스 특성을 파악하기 위해 대지를 모의하는 반구형 수조에 저항률이 크게 다른 물에 대하여 100 [Hz]에서 15 [MHz]의 주파수 범위에서 정현파 전압을 인가하였을 때 나타나는 임피던스특성을 파악하였다.

2. 본론

2.1 측정계의 구성 및 실험방법

본 논문에서는 대지저항률과 인가 주파수에 따른 접지임피던스의 특성을 파악하기 위하여 그림 1과 같이 대지를 모의하는 직경 110 [cm]를 갖는 반구형 수조의 중앙에 접지극을 모의하는 전극을 설치하였다.

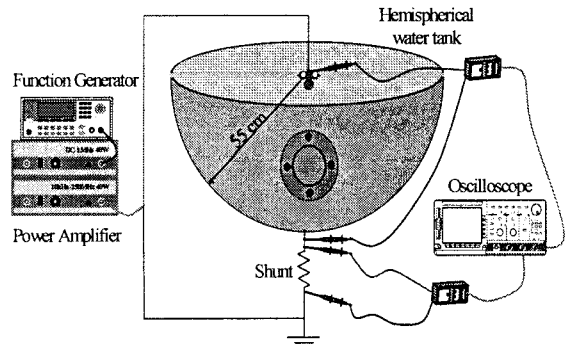


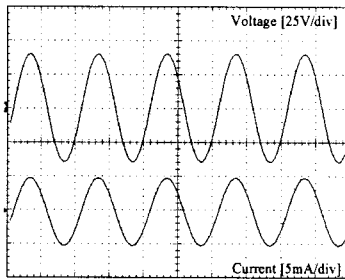
그림 1. 실험계 구성
Fig. 1. Configuration for experimental set up

주파수를 80 [MHz]까지 변환할 수 있는 함수발

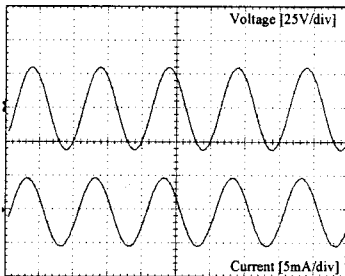
생기와 DC~1 [MHz], 40 [W]의 저대역 전력증폭기와 100 [kHz]~250 [MHz], 75 [W]의 고대역 전력증폭기를 병용하여 전극계에 주파수가 다른 일정한 크기의 정현파 전류를 흘려주었다. 전력증폭기의 변환은 크기와 위상 등의 변화가 발생하지 않는 100 [kHz]를 기준으로 하였으며 전류의 측정에는 55 [MHz]까지 유도성분이 나타나지 않는 1 [k Ω]의 분류기를 이용하여 측정하였다. 차동프로브를 사용하여 수조와 분류기 양단의 전압을 측정하였으며, 4 채널 500 [MHz]주파수 대역을 갖는 오실로스코프를 통하여 전류와 전압을 분석하였다. 접지극의 형상과 물의 저항률에 따른 접지임피던스의 변화를 분석하기 위해서 침전극과 반구형 접지극에 대하여 반복실험을 수행하였으며, 물의 저항률에 대한 측정에는 전기전도도측정기(CM-21P, TOA)를 사용하였다.

2.2 측정결과

함수발생기를 통하여 수조와 분류기 양단에 주파수가 다른 정현파 전압을 인가하였을 때 수조양단의 전압과 분류기를 통한 전류 파형의 예를 그림 2와 그림 3에 나타내었다.



(a) 100 Hz



(b) 100 kHz

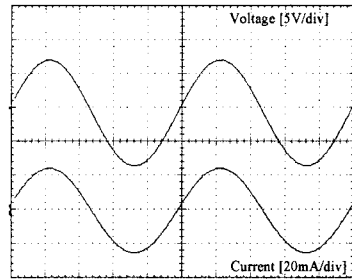
그림 2. 1,000 [$\Omega \cdot m$]에서 주파수에 따른 전압과 전류 파형의 예

Fig. 2. Examples of the voltage and current waveforms as a function of frequency at the water resistivity of 1,000 [$\Omega \cdot m$]

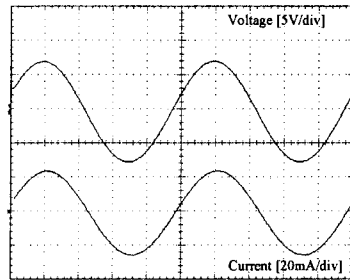
1,000 [$\Omega \cdot m$]의 물의 저항률에서 10 [mA]의 전류

를 일정하게 흘려줄 때, 그림 2의 (a)와 같이 100 [Hz]의 저주파영역에서는 전압과 전류의 위상차가 거의 나타나지 않으며 수조 양단에 약 80 [V]의 전압이 나타난다. 하지만 그림 2 (b)의 100 [kHz]의 고주파 영역에서는 같은 전류를 흘려주었을 때 전류의 위상이 전압에 비해 24° 앞서며 수조 양단의 전압이 60 [V]로 낮아진다.

1,000 [$\Omega \cdot m$]의 물의 저항률에서와 달리 그림 3의 50 [$\Omega \cdot m$]의 낮은 저항률에서는 인가된 전류의 크기가 증가하였음에도 불구하고 15 [V]정도로 낮아진 것을 확인 할 수 있으며, 저주파에서는 높은 저항률에서와 마찬가지로 전류와 전압이 동상을 이루나 100 [kHz]의 높은 주파수에서는 오히려 전류가 전압에 비하여 8° 정도 뒤지는 것으로 나타났다.



(a) 100 Hz



(b) 100 kHz

그림 3. 50 [$\Omega \cdot m$]에서 주파수에 따른 전압과 전류 파형의 예

Fig. 3. Examples of the voltage and current waveforms as a function of frequency at the water resistivity of 50 [$\Omega \cdot m$]

접지시스템의 등가회로모형을 그림 4에 나타내었다. 일반적인 접지시스템의 모델은 저항 R_1 과 대지의 커패시턴스 C 가 병렬로 구성된 것으로 가정되며 접지극의 길이가 길어지게 되면 인덕턴스 성분이 발생하게 된다.[5] 하지만 본 논문에서는 접지극이 소형의 구와 침으로 이루어져 인덕턴스 성분을 거의 무시할 수 있다. 저항과 커패시터의 병렬회로 밑단에 전류측정을 위한 1 [k Ω]의 분류기와 측정선의 인덕턴스 L 이 직렬로 연결된다.

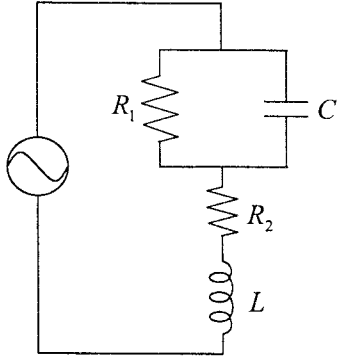


그림 4. 측정되는 접지시스템의 등가회로모델
Fig. 4. Equivalent circuit model of the measured grounding system

이러한 회로를 분석하기 위해서 여러 문헌들에서 임피던스와 위상을 고려하였지만[4], 본 논문에서는 대지의 고유모델인 RC병렬회로의 해석을 위해 식 (1)과 같이 어드미턴스를 고려하였으며 위상의 경우 진상을 +로, 지상을 -로 정의하였다. 즉, 위상은 전압을 기준으로 전류에 대하여 나타내었다.

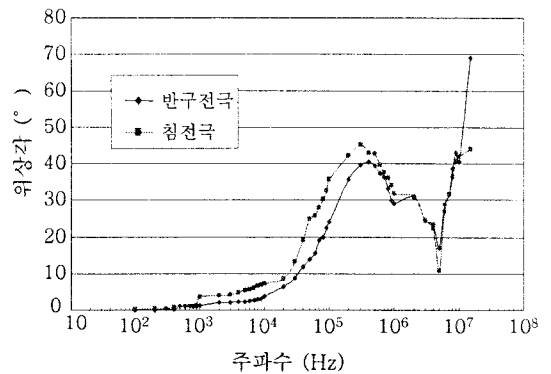
$$Y = \left| \frac{I}{V} \right| \angle \theta \quad (1)$$

그림 2와 3과 같이 측정된 전압과 전류 파형을 이용하여 주파수를 100 [Hz]에서 15 [MHz]까지 로그스케일 단위로 변환하여 측정된 전압과 전류의 위상차와 어드미턴스를 그림 5와 그림 6에 나타내었다.

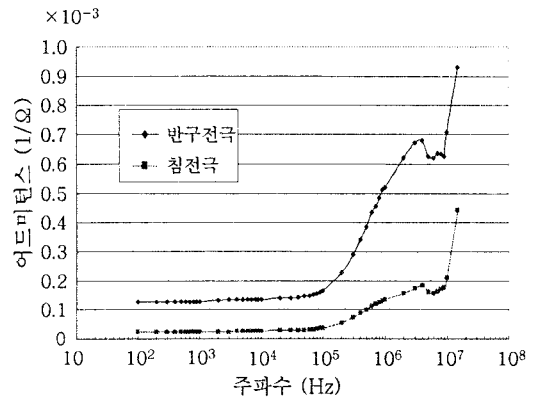
그림 5 (a)의 1,000 [$\Omega \cdot m$]의 저항률에서 침전극과 반구전극 모두 100 [Hz]에서 400 [kHz]까지 주파수가 상승함에 따라서 전극사이의 커패시턴스의 영향으로 인해 전류의 위상이 전압의 위상에 비해 점점 더 앞서는 것으로 나타났다. 그러나 500 [kHz]이상 5 [MHz]이하에서는 주파수가 높아질수록 위상이 다시 17° 정도까지 낮아지며 그 보다 높은 주파수에서는 다시 급격하게 상승하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 500 [kHz]이상에서는 측정선의 인덕턴스성분의 영향으로 인해 위상이 감소하며[6], 5 [MHz]이상의 매우 높은 주파수에서는 낮은 주파수 영역과 마찬가지로 용량성 성분이 나타나는 것으로 분석된다. 또한 대부분의 주파수 범위에서 침전극의 위상이 반구전극에 비하여 높게 나타났으며 이것은 침전극이 반구전극에 비하여 용량성 성분이 더 나타난다는 것을 보여준다. 반구형 전극의 경우 침전극보다 용량성 전류는 더

크지만 저항성분이 상대적으로 훨씬 작기 때문에 용량성 전류의 영향이 작으므로 위상차가 작은 것으로 볼 수 있다.

그림 5 (b)의 어드미턴스를 살펴보면 침전극과 반구전극 모두 주파수가 상승함에 따라서 증가하는 것으로 나타나며 이것은 역으로 주파수가 상승함에 따라서 접지임피던스가 감소하는 것을 의미한다. 그림 4의 회로모델에서 알 수 있듯이 접지시스템의 회로요소가 저항성분과 커패시턴스성분으로 구성되어 주파수가 상승함에 따라서 높은 저항에 비해서 리액턴스 성분이 작아지게 되어 전체적인 임피던스가 감소하는 것으로 분석된다.



(a) 주파수에 따른 위상변화



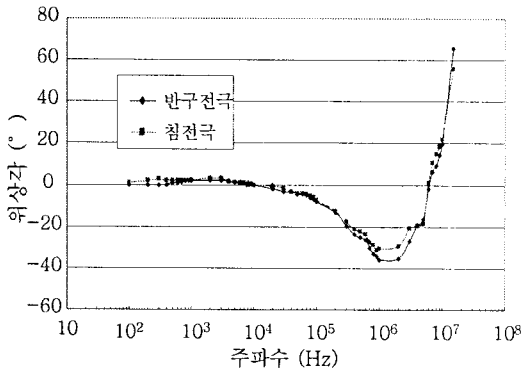
(b) 주파수에 따른 어드미턴스

그림 5 1,000 [$\Omega \cdot m$]에서 주파수에 따른 위상각과 어드미턴스

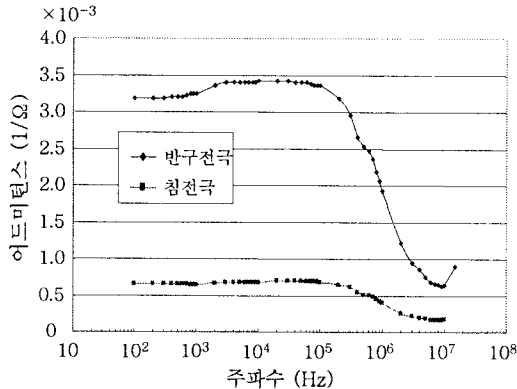
Fig. 5 Phase angle and admittance according to the applied frequency at the water resistivity of 1000 [$\Omega \cdot m$]

그림 6 (a)는 50 [$\Omega \cdot m$]에서의 위상각을 나타낸다. 50 [$\Omega \cdot m$]에서의 위상각은 1,000 [$\Omega \cdot m$]에서와 달리 주파수가 1 [MHz]까지 상승함에 따라서 전류가 전압에 비하여 35°까지 뒤지게 되어 접지시스템에 유도성 성분이 나타나고 1 [MHz]이상

에서 위상이 양의 값으로 증가하여 용량성 성분을 나타낸다. 그림 6 (b)의 어드미턴스의 경우도 100 [kHz]이하의 주파수에서는 1,000 [$\Omega \cdot m$]에 비하여 20배 이상의 값을 나타내나 100 [kHz] 이상에서 주파수가 증가함에 따라 급격하게 감소하는 특성을 보였다. 이것은 낮은 저항률에서는 저항이 감소하기 때문에 임피던스가 작게 나타나나 주파수가 상승함에 따라서 접지극의 유도성분이 증가하여 접지임피던스가 증가하는 결과가 나타난 것으로 분석된다.



(a) 주파수에 따른 위상변화



(b) 주파수에 따른 어드미턴스

그림 6 50 [$\Omega \cdot m$]에서 주파수에 따른 위상과 어드미턴스

Fig. 6 Phase angle and admittance according to the applied frequency at the water resistivity of 50 [$\Omega \cdot m$]

접지극의 형상에 따른 접지임피던스의 차이를 그림 5와 그림 6의 결과를 통하여 분석할 수 있다. 위상에 경우 저항률에 상관없이 침전극과 반구전극이 동일한 추세를 보이는 것으로 나타났으나, 어드미턴스의 경우에는 반구전극이 침전극에 비하여 크게 나타났다. 이것은 반구전극의 전극면적이 침전극에 비하여 크기 때문에 저항은 작아지게 되고

커패시턴스는 커지게 되어 임피던스가 침전극에 비해 전체적으로 작게 나타난다고 판단된다.

3. 결론

접지극의 주파수 의존성을 시뮬레이션 하기 위해서 반구형 수조에서 저항률과 접지극의 형상에 따른 접지임피던스를 분석하였다.

접지시스템은 RC병렬회로로 분석되며 접지극의 형상에 따른 측정에서는 반구전극이 침전극 보다 큰 면적으로 인해 낮은 임피던스를 나타내었고, 물의 저항률에 따른 측정에서는 접지극의 주파수 의존성이 현저하게 나타났다. 1,000 [$\Omega \cdot m$]의 저항률에서는 약 100 [kHz] 이하의 주파수에서 증류수의 저항 성분에 의해 임피던스가 크게 나타나나 주파수가 증가할수록 용량성 성분에 의해 임피던스가 감소되었다. 반면, 50 [$\Omega \cdot m$]의 낮은 저항률에서는 유도성 성분이 나타나며, 100 [kHz]이상의 주파수에서 접지임피던스가 급격히 증가하는 것으로 나타났다.

참고 문헌

- [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] T. Takahashi, T. Kawase, "Calculation of Earth Resistance for a Deep-driven rod in Multi-layer Earth Structure", IEEE Trans. on PD, Vol.6, No.2, pp.608-614, 1991.
- [3] J. B. Rakov, M. A. Uman, M. I. Fernandez, C. T. Mata, K.J. Rambo, M. V. Stapleton, R. R. Sutil, "Direct lightning strikes to the lightning protective system of a residential building: triggered lightning experiments", IEEE Trans. on PD, Vol.17, No.2, pp.575-586, 2002.
- [4] Pedro Llovera, Juan Antonio Lloiso, Alfredo Quijano, Vicente Fuster, "High frequency measurements of grounding impedance on resistive soils", 28th ICLP, Vol.1, pp.727-729, 2006.
- [5] M. Irfan Jambak, Hussein Ahmad, "Measurement of grounding system resistance based on ground high frequency behavior for different soil type", IEEE, TENCON 2000. Proceedings, Vol.3, pp.207-211, 2000.
- [6] M. A. Abdallah, "High frequency performance of an earthing system", 13th ISH, pp.201-205, 2003.
- [7] N. Mohamad Nor, "Characteristics of sodium chloride(NaCl) under DC, AC and impulse conditions", 8th International Conference on properties and applications of Dielectric Materials, pp.926-931, 2006.