

반구형 전극계에서 물의 저항률을 이용한 접지시스템의 등가회로 구성

(Make-up of Equivalent Circuit of Grounding System using Water Resistivity in Hemispherical Electrode System)

이복희* · 최중혁 · 배성배

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

요 약

현재 우리나라의 접지시스템의 설계기준은 낮은 주파수에서 측정된 저항값을 기반으로 한다. 고주파 성분을 포함하는 뇌서지가 접지시스템에 인가되면, 접지임피던스는 정상상태의 저항과 매우 다르게 된다. 이 논문은 접지시스템의 고주파 성능에 대한 물의 저항률의 영향을 파악하기 위하여 대지를 모의하는 수조를 이용하여 물의 저항률에 따른 어드미턴스의 주파수 의존성을 기술하였다. 500[Ω·m] 이상의 높은 물의 저항률에서 용량성 효과에 의해 주파수가 증가함에 따라 어드미턴스와 컨덕턴스가 증가하는 것으로 나타났다. 반면에, 500[Ω·m] 미만의 낮은 저항률에서는 유도성 효과에 의해 주파수가 증가함에 따라 어드미턴스와 컨덕턴스가 감소하는 것으로 나타났다. 또한 200[kHz]에서 5[MHz]에 이르는 주파수 범위에서 전류와 전압의 위상차가 증가하는 것으로 나타났다. 결론적으로, 접지시스템의 주파수 의존성은 대지의 저항률과 밀접한 관계가 있으며, 주파수와 대지저항률이 접지시스템의 성능에 미치는 영향에 대한 고려가 필요하다.

Abstract

A design criterion of grounding systems is commonly based on the ground resistance measured with low frequency 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. In order to investigate the effect of water resistivity on the high frequency performance of grounding systems, this paper presents the frequency-dependent admittance using water tank simulating the grounding system in different water resistivities. As a result, because of capacitive effect admittances and conductance are increased with increasing frequency in higher water resistivity of greater than 500[Ω·m]. On the other hand, admittances and conductances are decreased with increasing frequency due to inductive effect in lower water resistivity of less than 500[Ω·m]. The phase difference between the current and voltage increases in the range of 200[kHz] to 5[MHz]. Consequently, frequency-dependent performance of grounding systems is closely related to the soil resistivity, it is necessary to consider the effect of grounding system performance on the frequency and soil resistivity.

Key Words : Grounding System, Water Resistivity, Frequency-Dependent Impedance, Phase Difference, Admittance, Equivalent Circuit

* 주저자 : 인하대학교 공대 전자전기공학부 교수

Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822, E-mail : bhlee@inha.ac.kr

접수일자 : 2008년 6월 3일, 1차심사 : 2007년 6월 9일, 심사완료 : 2008년 7월 3일

1. 서 론

기존의 접지시스템은 전기설비기술기준에 따라서 저주파수에서 측정하는 저항값을 기준으로 설계/시공하였다. 하지만, 접지로 침입하는 고장서지를 비롯하여 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. 접지임피던스는 대지의 구조, 온도, 습도, 접지전극의 형상, 매질조건 등에 의해서 복잡한 특성을 나타내는데 대지구조에 대한 회로해석은 아직까지 명확하게 정립되지 못하였다[1-5]. 일반적으로 고주파 영역에서는 접지극의 길이에 따라 유도성 요소가 나타나는 것으로 알려져 있으나, 토양의 저항률과 인가주파수에 따라 용량성과 유도성 사이에 논란이 일고 있다[6-7].

접지극의 임피던스는 접지극의 과도적 특성을 파악하기 위해 측정되고 분석되지만, 실제 현장에서 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[8-9].

따라서 본 논문에서는 접지임피던스의 특성에 미치는 주된 요인인 인가전류의 주파수와 대지저항률에 착안하여 이들이 접지임피던스에 미치는 영향을 분석하기 위한 목적으로 모의실험에 대한 결과를 기술하였다. 심매설형 접지전극은 수매과 만나거나 수분이 많은 위치에 놓이는 것이 효과적이다. 대지저항률은 수분의 영향을 크게 받으며, 접지시스템의 특성에 지배적이며, 저항률의 조정과 일률적인 조건을 얻기 위해 물의 저항률에 따른 특성분석을 대상으로 하였다. 균등대지를 모의하는 반구형 수조를 이용하여 자연 대지의 저항률에 상응하는 저항률 10[Ω · m]에서 5,000[Ω · m]의 물을 대상으로 100[Hz]에서

15[MHz]의 주파수 범위에서 정현파 전압을 인가하였을 때 나타나는 인가전류와 전위의 위상차, 어드미턴스, 컨덕턴스, 서셉턴스 등 전기적 특성을 측정하고 분석하였다. 실험결과를 바탕으로 파괴설비 또는 통신설비용 접지시스템과 같이 고주파 전류가 유입되는 접지시스템의 설계와 시공에 고려하여야 할 요소에 대하여 검토하였다.

2. 실험계 구성 및 방법

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

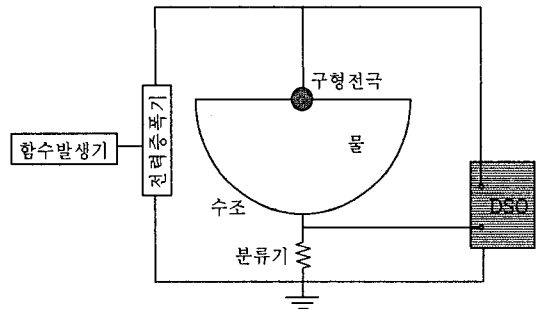


그림 1. 실험계의 개략도
Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup

주파수를 80[MHz]까지 변환할 수 있는 함수발생기, 대역폭 DC~1[MHz]이고 출력이 40[W]인 전력증폭기와 대역폭 10[kHz]~250[MHz]이며, 출력 75[W]인 전력증폭기를 병용하여 전극계에 주파수가 다른 일정한 크기의 정현파 전류를 흘려주었다. 전력증폭기의 변환은 크기와 위상 등의 변화가 발생하지 않는 100[kHz]를 기준으로 하였으며, 전류의 측정은 고역 차단주파수가 55[MHz]인 무유도성인 1[kΩ]의 분류기를 이용하여 측정하였다. 차동프로브를 사용하여 구형전극과 수조 사이의 전압, 그리고 분류기 양단의 전압을 측정하였으며, 파형은 4채널 500[MHz] 주파수 대역을 갖는 오실로스코우프로

관측하였다. 분류기 양단의 전압을 분류기의 저항으로 나누어 전류값을 산출하였다. 물의 저항률에 따른 어드미턴스의 변화를 분석하기 위해서 반구형 접지극에 대하여 반복실험을 수행하였으며, 물의 저항률은 전기전도도측정기(CM-21P, TOA)로 측정하였다. 광대역의 주파수범위에 대한 회로해석에는 병렬기반 회로해석방법이 편리하므로 접지시스템의 전기적 성능을 어드미턴스, 컨덕턴스, 서셉턴스 등으로 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 인가전류와 전압 파형

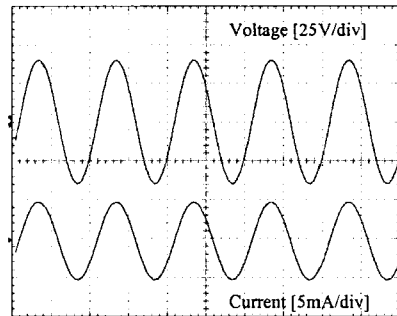
함수발생기를 통하여 수조와 분류기 양단에 주파수가 다른 정현파 전압을 인가하였을 때 수조 양단의 전압과 분류기를 통하여 검출한 전류 파형의 예를 그림 2에 나타내었다.

1,000[Ω · m]의 물의 저항률에서 10[mA]의 전류를 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. 이것은 높은 저항률에서는 저주파 영역에서 높은 저항성분으로 인해 전극 양단에 높은 전압이 인가되나 주파수가 높아짐에 따라 저항성분과 병렬 커패시턴스성분을 통해 앞선 전류가 흐르기 때문인 것으로 분석된다.

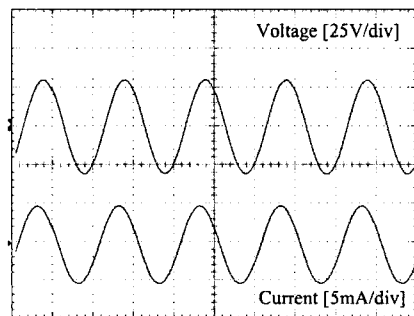
3.2 어드미턴스의 위상차

본 논문에서는 인가전류가 전압에 비해서 앞서는(진상) 위상각을 +로 정의하고, 전류가 뒤진 위상각을 -로 정의하였으며, 대지의 고유모델인 R-C병렬 회로를 이용하여 식 (1)과 같이 회로의 위상각과 어드미턴스를 분석하였다[10].

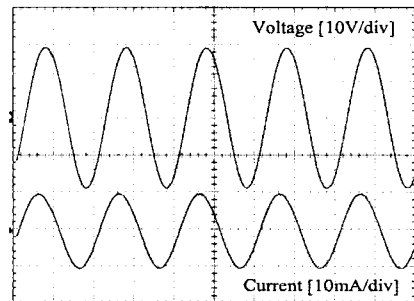
$$Y = | -\frac{I}{V} | \angle \theta \quad (1)$$



(a) 100[Hz]



(b) 100[kHz]



(c) 1[MHz]

그림 2. 1,000[Ω · m]에서 주파수에 따른 전압과 전류파형의 예

Fig. 2. Examples of the voltage and current waveforms as a function of frequency at the water resistivity of 1,000[Ω · m]

인가전류의 주파수를 변화시켜 측정된 전압과 전류의 위상차를 그림 3에 나타내었다.

500[Ω · m] 이상의 저항률에서는 인가전류의 주파수가 증가함에 따라서 전류의 위상이 전압에 비하여 앞서는 진상전류가 흐르는 것으로 측정되었으며,

100[Ω·m] 이하의 저항률에서는 약 2[MHz] 이하에서 지상전류가 흐르는 것으로 나타났다. 물의 저항률 5,000[Ω·m]에서는 100[Hz]에서 200[kHz]까지 주파수가 증가함에 따라서 진상전류가 흐르고 위상차가 증가하는 것으로 나타나며, 저항률이 낮아질수록 더 높은 주파수까지 위상차가 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 특성은 저항률이 큰 경우 물의 커패시턴스의 영향에 의해 발생하는 것으로 분석된다.

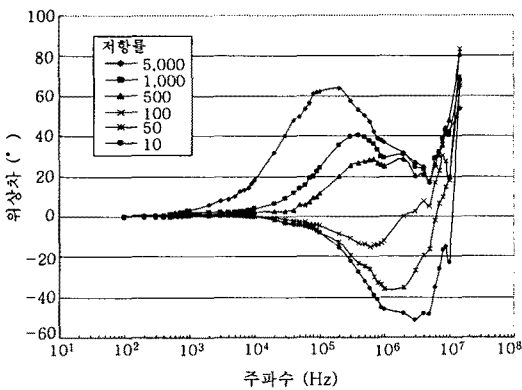


그림 3. 어드미턴스의 위상차의 주파수 의존성
Fig. 3. Frequency-dependant phase difference for admittance

이렇게 앞선 위상은 그 정점을 지나 약 5[MHz]까지 감소하게 되며 그 이후 급격하게 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 정점주파수를 지나 5[MHz]까지 측정선과 전극 등에 의한 인덕턴스의 영향이 나타나게 되며 그 이상의 주파수에서는 다시 용량성 효과가 나타나는 것으로 분석된다[11]. 반면에 100[Ω·m] 이하의 낮은 저항률에서는 수 [MHz]까지 주파수가 증가함에 따라서 전류가 전압에 뒤지는 지상전류가 흐르고 위상차가 증가하는 추세를 나타낸다. 이것은 낮은 저항률의 경우 주파수가 증가함에 따라서 유도성 특성이 크게 나타나고 주파수 증가에 따라 위상이 크게 뒤지는 결과를 나타낸다. 이렇게 증가한 위상차는 높은 저항률에서와 마찬가지로 약 5[MHz]의 주파수를 기점으로 급격하게 감소하여 용량성 특성을 보인다.

3.3 어드미턴스의 주파수 의존성

주파수를 변화시키면서 측정한 어드미턴스를 물의 저항률을 파라미터로 하여 그림 4에 나타내었다. 어드미턴스는 측정된 전류파형의 최대값을 전압파형의 최대값으로 나누어 산출하였으며, 그 역수는 임피던스를 나타낸다.

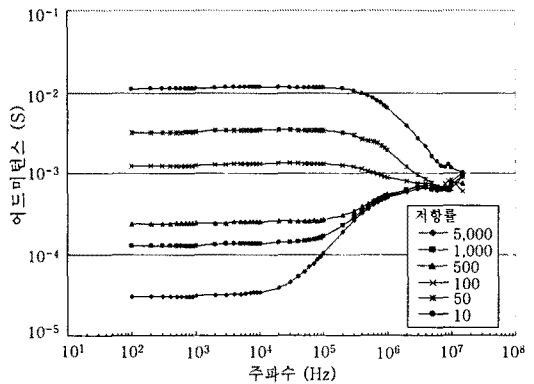


그림 4. 어드미턴스의 주파수 의존성
Fig. 4. Frequency-dependant admittance

500[Ω·m] 이상의 저항률에서는 약 100[kHz] 이전까지 어드미턴스는 일정한 값을 나타내나 그 이후에 주파수가 증가함에 따라서 증가하며, 이러한 증가는 물의 저항률이 클수록 낮은 주파수에서 시작되며 더욱 뚜렷하게 나타났다. 반면에 100[Ω·m] 이하의 낮은 저항률에서는 100[kHz] 이후에 주파수가 증가하면 어드미턴스가 감소하며 저항률이 낮을수록 감소폭이 큰 것으로 나타났다. 이러한 특성은 500[Ω·m] 이상의 저항률에서는 물의 높은 저항률로 인해 저주파에서의 저항이 크게 작용하여 어드미턴가 작게 나타나지만, 100[kHz] 이상의 주파수에서는 위상차에서 알 수 있듯이 용량성 특성으로 인해 주파수가 증가함에 따라 어드미턴스가 커지는 특성을 나타낸다. 이에 반하여 100[Ω·m] 이하의 저항률에서는 낮은 저항률로 저주파 영역의 어드미턴스는 크지만 주파수가 증가함에 따라 유도성 성분의 증가로 인해 어드미턴스가 급격하게 감소하는 것으로 분석된다.

3.3.1 컨덕턴스의 주파수 의존성

접지시스템은 전기적 특성을 나타내는 파라미터를 분리하여 분석하기 위해 어드미턴스 위상각을 기초로 식 (2)과 같이 컨덕턴스를 계산하였다.

$$G = \left| \frac{I}{V} \right| \cdot \cos\theta \quad (2)$$

식 (2)를 사용하여 계산한 컨덕턴스의 값을 각 저항률별로 주파수에 따른 추세를 그림 5에 나타내었다. 컨덕턴스의 경우 그림 4의 어드미턴스와 비슷한 경향을 나타내었다. 일반적으로 선형 소자의 경우 저항과 컨덕턴스의 경우는 주파수에 따라 변화하지 않는 것으로 여겨지나 본 논문에서는 수백 [kHz] 이상의 주파수에서 각기 다른 특성을 나타내었고 기존의 접지를 대상으로 한 논문에서도 주파수가 상승하면서 저항이 증가하는 결과들이 발표되었다[12-13]. 이러한 실험결과로 미루어 보아 주파수에 의한 비선형성 특성을 나타내는 저항성분의 변화 요인에 대한 더욱 심도 깊은 연구가 요구된다.

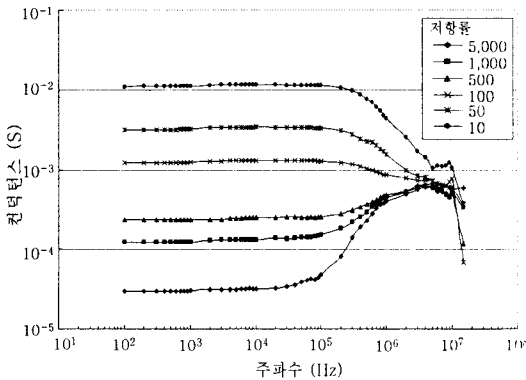


그림 5. 컨덕턴스의 주파수 의존성
Fig. 5. Frequency-dependant conductance

3.3.2 서셉턴스의 주파수 의존성

접지임피던스의 주파수 의존성은 수백 [kHz] 이상의 고주파영역에서 크게 변화하기 때문에 주파수에 따른 리액턴스 또는 서셉턴스 성분의 분석이 이루어져야 한다. 따라서 어드미턴스의 위상차를 이용하여 식 (3)과 같이 서셉턴스를 계산하였다.

$$B = \left| \frac{I}{V} \right| \cdot \sin\theta \quad (3)$$

각 저항률별 주파수의 변화에 따른 서셉턴스를 그림 6에 나타내었으며, 양의 값은 전류가 전압에 앞선 진상전류가 흘러 용량성 특성을 나타내고 음의 값은 지상전류로 인한 유도성 특성의 결과로 분석된다. 500[Ω·m] 이상의 저항률에서는 주파수가 증가함에 따라 약간 상승하는 것으로 나타나며 저항률에 따라 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 반면 100[Ω·m] 이하의 저항률에서는 약 5[MHz]까지 감소하며, 5[MHz] 이상의 주파수에서는 다시 급격히 상승하여 결국 500[Ω·m] 이상의 저항률의 결과에 수렴하는 것으로 나타났다. 이것을 리액턴스 성분으로 바꾸어 생각하면 500[Ω·m] 이상의 저항률에서는 용량성 특성이 나타나서 리액턴스가 증가하나 저항률에 따른 차이는 나타나지 않고, 반면 100[Ω·m] 이하의 저항률에서는 10[kHz] 이상의 주파수에서 유도성 성분이 나타나고 급격하게 증가하여 접지임피던스를 상승시키는 주요 요인이 된다는 것으로 해석된다.

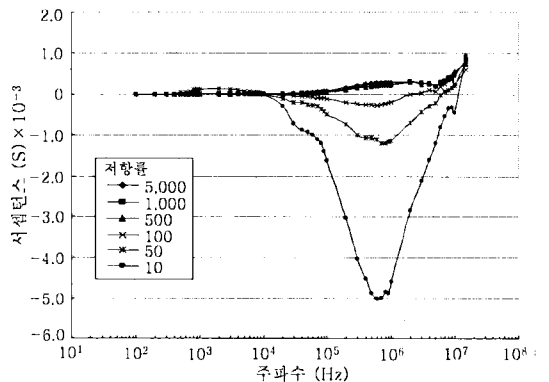


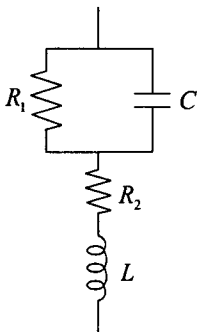
그림 6. 서셉턴스의 주파수 의존성
Fig. 6. Frequency-dependant susceptance

3.4 등가회로

측정된 결과를 바탕으로 인가 주파수에 따른 본 연구에 적용한 실험계의 전기적 특성은 물의 저항률에 따라 크게 두 가지 등가회로로 표현될 수 있다. 500[Ω·m] 이상의 높은 저항률에서 실험계는 그림

반구형 전극계에서 물의 저항률을 이용한 접지시스템의 등가회로 구성

7에 나타낸 바와 같이 저항성분과 커패시턴스가 병렬 연결된 회로로 구현되고 분류기와 리드선의 저항 성분과 리드선의 인덕턴스성분이 직렬 연결된 회로로 등가화시킬 수 있다. 반면에 100[Ω·m] 이하의 낮은 저항률에서는 대부분의 전류가 저항성분으로 흐르기 때문에 커패시턴스는 무시되며 접지극과 리드선의 인덕턴스성분이 결합된 R-L 직렬회로로 구성된다고 볼 수 있다. 이러한 실험결과는 실제 대지에 시공된 접지시스템에서 대지저항률에 따라 나타내는 특성이라고 볼 수 있다. 접지시스템의 고주파수 영역에서의 특성은 높은 저항률에서는 접지시스템은 대지의 저항률과 커패시턴스를 주성분으로 R-C 병렬회로로 구성되며 접지전극과 인하도선 등에 따른 직렬 인덕턴스성분이 포함된 회로로 분석된다. 또한 낮은 저항률에서는 대지의 저항률과 접지전극계의 인덕턴스성분을 주된 성분으로 하는 회로로 등가화시킬 수 있으며, 이는 실제 접지시스템의 설계에 반영될 것으로 기대된다.



(a) 높은 저항률에서의 등가회로



(b) 낮은 저항률에서의 등가회로

그림 7. 저항률에 따른 전극계의 등가회로
Fig. 7. Equivalent circuit of electrode system according to water resistivity

4. 결 론

본 논문은 대지에 설치된 접지시스템을 모델링하기 위하여 반구형 수조에 반구형 전극을 설치하여 물의 저항률과 인가 주파수에 따른 어드미턴스와 위상차 등을 측정하고, 이들 결과를 바탕으로 접지시스템의 등가회로를 제안하는 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 10[kHz] 이상의 주파수에서 접지시스템은 전 반적으로 500[Ω·m] 이상의 저항률에서는 용량성 특성, 그리고 100[Ω·m] 이하의 저항률에서는 유도성 특성으로 나타났다.
- (2) 인가주파수를 증가시키에 따라 어드미턴스는 500[Ω·m] 이상의 저항률에서는 증가하고, 100[Ω·m] 이하의 저항률에서는 감소하는 경향이며, 10[MHz]의 주파수에서는 일정한 값으로 수렴하는 것으로 나타났다.
- (3) 100[kHz] 이상의 주파수에서 접지시스템의 어드미턴스의 변화는 주로 주파수 의존성을 가지는 서셉턴스의 영향으로 일어난다.
- (4) 접지시스템의 등가모델은 저항률에 따라 크게 두 가지 형태로 분석되었으며, 고주파수의 전류가 유입되는 접지시스템의 설계에는 대지저항률과 접지전극의 구조와 배치를 고려한 고주파 성능이 반영되어야 할 것으로 판단된다.

이 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음.

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] 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] 이복희, 이승철, "접지의 핵심 기호 기술", 의재, pp.40-44, 1999.
- [4] J. Laot, "Generation and Measurement of Fast Transient Overvoltages with Special Reference to Disconnector Operation in GIS", CIGRE, No. 33-86, 1986.

- [5] 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.
- [6] J. B. Rakov, M. A. Uman, M. I. Fernandez, C. T. Mata, K.J. Rambo, M. V. Stapleton, and 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.
- [7] R. Cadecott, D.G. Kasten, "Scale Model Studies of Station Grounding Grids", IEEE Trans. PAS., Vol.102, No.3, pp.558-566, 1975.
- [8] F. Dawalibi, D. Mukedkar, "Optimum Design of Substation Grounding in a Earth Structure : Part I-Analytical Study", IEEE Trans. PAS., Vol.94, No.2, pp.252-261, 1975.
- [9] Pedro Llovera, Juan Antonio Lliso, Alfredo Quijano, Vicente Fuster, "High frequency measurements of grounding impedance on resistive soils", Proc. 28th ICLP, Vol.1, pp.727-729, 2006.
- [10] M. Irfan Jambak, Hussein Ahmad, "Measurement of grounding system resistance based on ground high frequency behavior for different soil type", IEEE, Tencon 2000. Proc., Vol.3, pp.207-211, 2000.
- [11] M. A. Abdallah, "High frequency performance of an earthing system", Proc. 13th ISH, pp.201-205, 2003.
- [12] 이복희, 이동운, 엄주홍, 김교운, "접지그리드의 접지임피던스의 주파수 의존성", 조명전기설비학회 논문지, Vol.17, No.5, pp.22-28, 2003.
- [13] Ju-Hong Eom, Sung-Chul Cho, Tae-Hyeong Lee and Bok-Hee Lee, "Ground Impedance Analyzer using the Variable Frequency Wave Generator and PC Based Measuring System", Proc. 15th ISH, T2-475, pp.1-6, 2007.

◇ 저자소개 ◇

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 부회장.

Tel : (032)860-7398, Fax : (032)863-5822

E-mail : bhlee@inha.ac.kr

최중혁 (崔鍾赫)

1980년 5월 12일생. 2006년 인하대 공대 전자공학과 졸업. 2008년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정.

Tel : (032)860-7398, Fax : (032)863-5822

E-mail : chjohy80@naver.com

배성배 (裵城培)

1976년 1월 11일생. 2000년 인하공업전문대 전기공학과 졸업. 현재 인하대학교 정보전기공학과 석사과정.

Tel : (032)4500-643, Fax : (032)751-4611

E-mail : sbbae@iae.co.kr