

수분함유량에 따른 토양의 전기적 파라미터의 주파수의존성

(Frequency-dependent electrical parameters of soils as a function of the moisture content)

이복희* · 김기복

(Bok-Hee Lee · Ki-Bok Kim)

Abstract

The electrical parameters of soils are highly dependent on the various factors such as types of soil, chemical compositions, moisture content, temperature, frequency, and so on. The analysis of soil parameters is of fundamental importance in design of grounding systems. In this paper, we present the experimental results of frequency-dependent impedance, resistivity, permittivity of soils as functions of types of soil and moisture content. The impedance and resistivity of soils are decreased as the moisture content and the frequency increase. In particular, the variation of the soil resistivity with the frequency is pronounced in the conditions of high resistivity and low moisture content. On the contrary, the permittivity of soils are sharply decreased with increasing the frequency below 10kHz and the frequency-dependent permittivity of soils are highly changed in the conditions of high moisture and low resistivity.

Key Words : Soil Parameter, Grounding System, Permittivity, Soil Resistivity, Frequency-dependent Impedance

1. 서 론

접지시스템의 성능에 가장 크게 영향을 미치는 요인이 토양의 저항률이므로 접지의 설계와 시공에 있어서 토양의 전기적 특성을 정확하게 파악하는 것은 매우

중요하다. 토양에서의 전기전도는 근본적으로 전해질 중에 함유되어 있는 이온의 이동에 의한 전기전도에 의해서 이루어지므로 토양 중에 함유된 수분의 양이 증가하면 저항률은 감소한다. 토양에 함유되어 있는 수분의 양은 토양을 구성하는 입자의 종류, 크기와 조성, 조밀도에 의존하게 된다[1-4]. 균일한 토질의 토양에 매설되어 있는 접지극의 접지저항은 대지저항률에 비례하므로 토양의 종류와 수분의 함유량은 접지저항을 결정하는 핵심적인 요소라고 볼 수 있다. 그리고 뇌서지와 같이 수 MHz에 이르는 높은 주파수성분을 포함하는 이상전류에 대하여는 접지임피던스의

* 주(교신)저자 : 인하대학교 IT공대 전기공학과 교수

* Main(Corresponding) author : Department of Electrical Engineering, Inha University, Professor

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

E-mail : bhlee@inha.ac.kr

접수일자 : 2014년 3월 8일

1차심사 : 2014년 3월 11일

심사완료 : 2014년 4월 16일

개념이 요구되고 주파수 변화에 따른 성능평가가 이루어져야 한다. 토양의 저항률과 비유전율은 주파수에 따른 접지시스템의 성능을 나타낼 수 있는 중요한 요소이다[6]. 이렇게 접지임피던스에 크게 영향을 미치는 토양의 저항률과 비유전율에 대하여 주파수에 따른 변동성의 분석이 요구되며, 주파수에 따른 토양의 저항률 및 비유전율의 변동이 접지임피던스에 미치는 영향을 고려할 필요가 있다[7-8].

본 논문에서는 접지시스템의 고주파 영역의 성능에 영향을 미치는 요인을 분석할 목적으로 접지전류의 주파수에 따른 토양의 저항률과 비유전율을 측정하고 특성을 해명하는 연구결과를 기술하였다. 우리나라에 많이 분포되어 있는 토양을 시료로 선택하였고, 토양의 종류별 수분함유량에 따른 임피던스, 저항률과 비유전율의 주파수의존성을 측정하였다. 토양의 종류와 수분함유량을 파라미터로 하여 토양 저항률의 주파수의존성을 측정하여 접지시스템의 고주파수 특성의 해석에 적용할 수 있는 기초데이터를 확보하였다.

2. 실험

2.1 실험계

토양의 수분함유량에 따른 토양의 저항률 및 비유전율의 주파수 특성을 측정하기 위해 그림 1에 나타난 바와 같은 실험계를 구성하였다. 토양의 저항률 측정에는 통상 2전극 용기를 사용하며[9-10], 본 연구에서는 원통형 용기를 적용하였고, 실험용기의 지름은 0.23m, 전극간격은 0.05m이며, 측정시에는 상단 전극 위에 5kg의 압력을 가하였다.

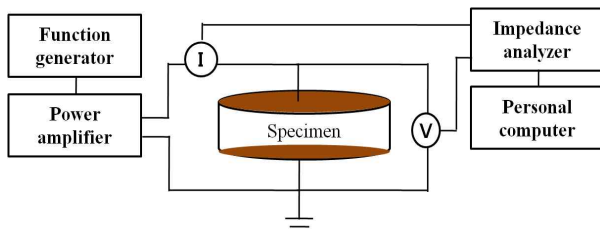


그림 1. 실험계의 개략도
Fig. 1. Schematic diagram of the experimental set-up

본 실험에 사용된 주요 장비는 전원을 공급하는 함수발생기와 전력증폭기, 전압과 전류 파형의 측정을 위한 능동형 전류프로브와 차동전압프로브, PC기반 임피던스 분석기 등이다. 수분함유량을 중량비에 따라 정확하게 조절하기 위해 전자저울을 사용하였으며 실험장비의 주요 규격을 표 1에 나타내었다.

표 1. 본 연구에 사용한 장비의 규격
Table 1. Specifications of main equipment used in this work

항 목		규 격
전력증폭기	주파수	DC ~ 1MHz, 40W
		10kHz ~ 250MHz, 75W
함수발생기	주파수	DC ~ 80MHz
전압프로브	전압	0 ~ 2.2kV
전류프로브	전류	0.6 ~ 60kA
	주파수	0.1Hz ~ 16MHz

2.2 시료 및 실험방법

시료로는 굵은 자갈, 가는 자갈, 굵은 모래, 굵은 마사토 가는 모래, 가는 마사토, 황토의 7종류의 토양을 대상으로 하였다. 표준체를 이용하여 실험대상 토양의 입자를 일정한 크기로 분류하였으며, 본 연구에 적용한 입자의 크기에 따른 토양의 분류를 표 2에 나타내었다.

표 2. 본 연구에 사용한 토양의 분류
Table 2. Classifications of soils used in this work

토양의 분류	입자의 크기(mm)
굵은 자갈	7 ~ 15
가는 자갈	4 ~ 7
굵은 모래	3 ~ 4
가는 모래	2 이하
굵은 마사토	2 ~ 3
가는 마사토	2 이하
황토	2 이하

포화수분함유량을 고려하여 토양에 따라 수분함유량 1~15%까지의 범위에서 실험하였으며, 수분함유

량의 조절에는 70Ω·m의 수돗물을 사용하였다. 인가 전류의 주파수를 1kHz부터 1MHz까지 주파수를 변동 시키며 측정된 전압과 전류의 비로 임피던스를 산정 하였다. 측정계의 전기적 등가회로는 그림 2와 같으며, 저항률과 비유전율은 다음과 같은 관계로부터 산출된 다[11].

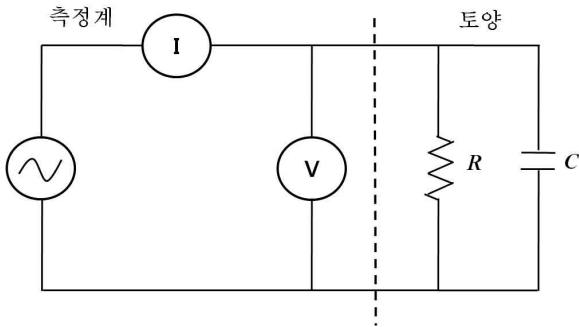


그림 2. 실험계의 등가회로
Fig. 2. Equipotential circuit of the experimental set-up

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

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

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

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

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

여기서 A는 실험용기의 전극의 단면적, l은 전극간 거리, $R_e = Z \cos \theta$, $I_m = Z \sin \theta$ 이다. 따라서 식 (1)의 임피던스는 위상차에 의한 실수부 성분과 허수부 성분으로 구분되며, 이는 저항과 커패시턴스 및 주파수로 특징지어진다. 식 (2), (3)으로부터 용기의 단면적과 전극간 거리를 알고 있기 때문에 토양의 저항률 ρ Ω·m와 비유전율 ϵ_r 을 각각 식 (4), (5)로부터 산출한다.

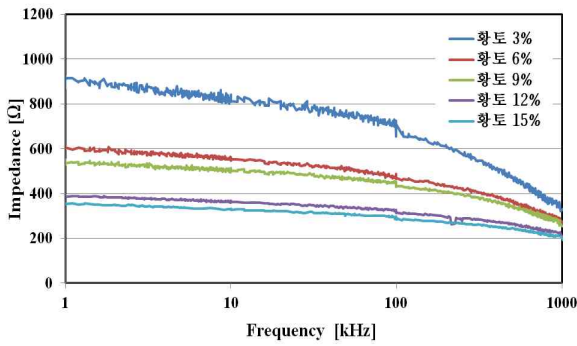
3. 결과 및 고찰

3.1 황토의 전기적 파라미터의 주파수의존성

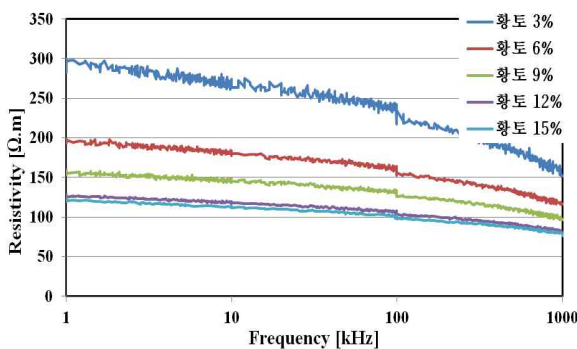
토양에서의 전기전도기구는 전자성 전도와 이온성 전도로 대별할 수 있으며, 일반적으로 토양에는 화학 물질과 수분이 포함되므로 이온성 전기전도가 지배적으로 작용한다[1, 3]. 또한 토양을 구성하는 입자의 크기와 종류 및 수분함유량에 따른 토양의 저항률과 비유전율의 성질이 전기적 특성을 결정짓는 중요한 요소로 볼 수 있고, 이들의 영향을 중점적으로 분석할 필요가 있다. 따라서 토양의 종류별로 수분함유량을 변화시키며 임피던스 및 저항률과 비유전율의 주파수의존성을 분석하였다. 비교적 저항률이 낮으며 이온성 전기전도가 지배적일 것으로 예상되는 황토의 전기적 파라미터의 주파수의존성을 수분함유량에 따라 측정한 결과를 그림 3에 나타내었다.

비교적 저항률이 낮은 황토의 수분함유량을 3%씩 증가시켜 15%까지에서 측정하였다. 황토의 수분함유량이 3%인 경우 낮은 주파수에서 약 1,000Ω의 큰 임피던스를 나타내었고 수분의 양이 증가함에 따라 임피던스가 감소하여 15%의 수분함유량에서 약 400Ω로 나타났다. 측정주파수의 증가에 따른 황토의 임피던스의 변화는 수분함유량이 증가할수록 1kHz에서 1MHz까지 측정된 결과 수분함유량 3%일 때에는 5배 정도로 감소한 반면 수분함유량이 15%일 때에는 2배로 수분함유량이 적을 때보다 감소폭이 둔화되었다.

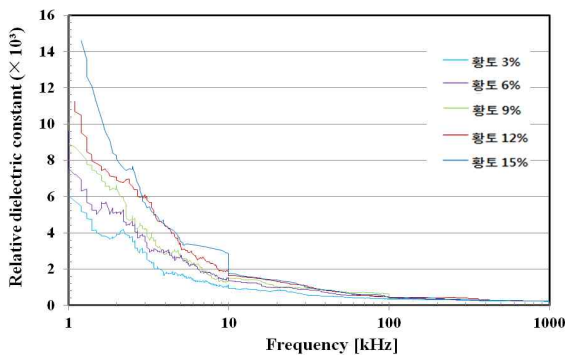
저항률도 임피던스와 유사한 추세로 변화되었으며, 수분함유량 3%일 때에는 320Ω·m로 나타났고 점점 감소하여 15%일 때에는 130Ω·m로 나타났다. 이는 수분함유량과 주파수가 증가함에 따라 위상차가 감소하는 원인으로써 RC병렬회로에서 수분이 증가할수록 고주파수에서는 저항성 전류성분이 크게 작용하기 때문인 것으로 판단된다. 비유전율의 경우 10kHz 이하의 주파수에서 큰 변화를 나타내었고 100kHz 이상의 주파수에서 주파수의존성이 거의 나타나지 않는 것으로 분석된다. 이미 발표된 문헌에서와 마찬가지로 비유전율의 주파수의존성은 수분함유량이 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다.



(a) 임피던스



(b) 저항률



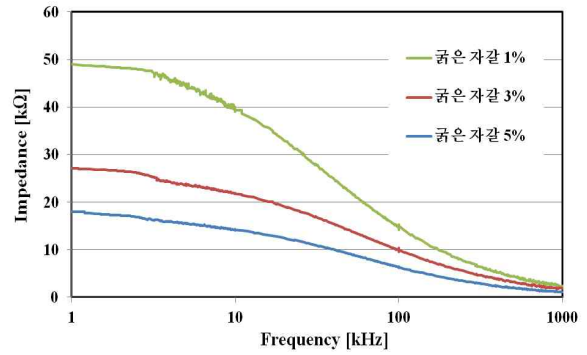
(c) 비유전율

그림 3. 수분함유량에 따라 측정한 황토의 전기적 파라미터의 주파수의존성

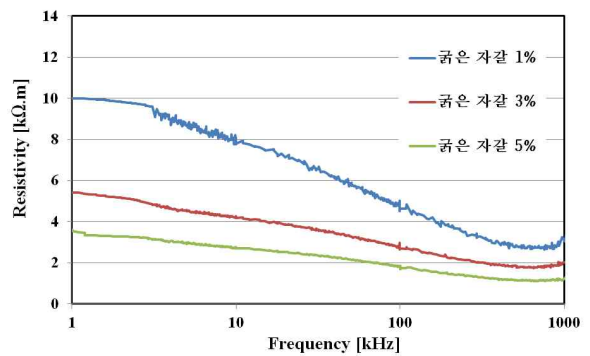
Fig. 3. Frequency dependence of the electrical parameters of yellow soils measured as a function of the moisture content

3.2 자갈의 전기적 파라미터의 주파수의존성

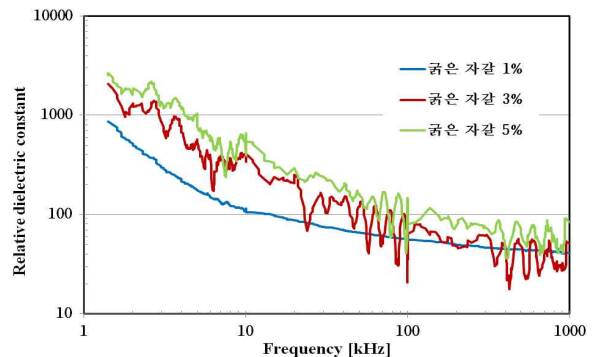
건조한 상태에서 전자성 전도가 지배적인 것으로 알려진 자갈의 수분함유량에 따른 전기적 파라미터의



(a) 임피던스



(b) 저항률



(c) 비유전율

그림 4. 수분함유량에 따라 측정한 자갈의 전기적 파라미터의 주파수의존성

Fig. 4. Frequency dependence of the electrical parameters of gravels measured as a function of the moisture content

주파수의존성을 그림 4에 나타내었다.

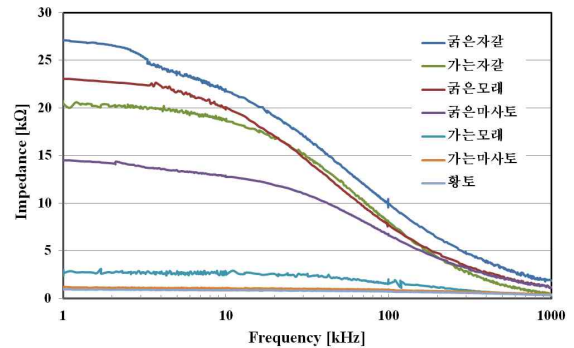
수분함유량이 1%인 경우 낮은 주파수에서 약 50,000Ω의 큰 임피던스를 나타내고 수분의 양이 증가

함에 따라 임피던스가 감소하여 5%의 수분함유량에서 약 18,000Ω으로 약 2.7배 감소하는 것으로 나타났다. 주파수의 증가에 따라 임피던스가 감소하는 것으로 나타났다.

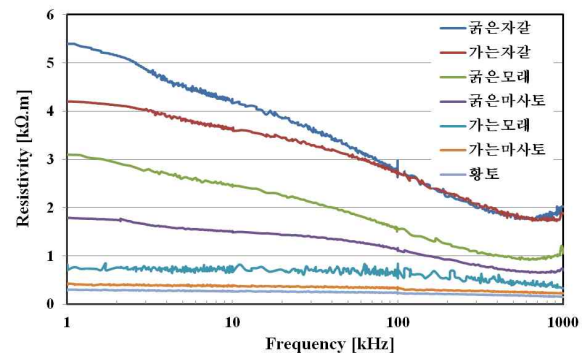
주파수에 따른 임피던스의 변화는 저주파수에서 큰 임피던스를 나타내는 수분함유량 1%에서 가장 크게 발생하였고, 수분함유량이 클수록 주파수에 따른 임피던스의 감소폭이 작게 나타났다. 1MHz의 주파수에 이르러 모든 수분함유량에서 임피던스는 300Ω으로 비슷한 결과를 나타내었다. 약 10~100kHz 주파수 범위에서 임피던스의 감소가 현저 하였으며 100kHz 이후에서는 감소가 둔화되었다. 이것은 그림 2의 등가회로에서 나타낸 바와 같이 10kHz 이하의 주파수에서는 대부분의 전류가 저항을 통해서 흐르고 100kHz 이상의 주파수에서 리액티브성분이 감소하여 커패시터를 통하여 전류가 흐르기 때문인 것으로 판단된다. 저항률과 비유전율의 주파수의존성은 대체적으로 임피던스의 주파수에 따른 변동특성과 유사한 것으로 나타났다.

3.3 토양의 종류별 전기적 파라미터의 주파수의존성의 비교

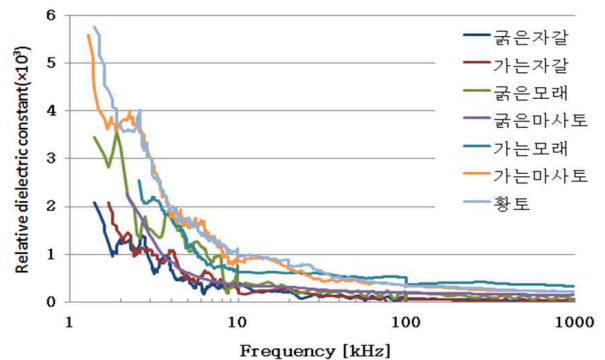
토양의 종류별 수분함유량 3%에서의 임피던스, 저항률, 비유전율의 주파수에 따른 변동특성에 대한 측정결과를 그림 5에 나타내었다. 황토, 가는 마사토와 같이 300Ω·m 이하의 낮은 저항률의 토양에서는 저항률의 주파수에 따른 변동이 크지 않으나 토양의 저항률이 클수록 주파수의존성은 현저한 것으로 나타났다. 이는 주파수가 높아질수록 용량성 전류가 많이 흐르게 되어 임피던스가 더욱 급격하게 작아지는 것으로 분석되었다. 비유전율의 측정결과는 임피던스와 저항률에서의 역순의 크기로 6,000~2,000정도로 토양의 종류에 따라 큰 차이를 나타내었다. 10kHz 이하의 주파수에서 토양의 비유전율의 감소가 현저하였다. 또한 주파수가 증가함에 따라 비유전율이 거의 지수함수적으로 감소하였고, 1MHz 정도의 주파수에서 측정된 결과의 변동폭이 크게 감소하는 것으로 나타났다.



(a) 임피던스



(b) 저항률



(c) 비유전율

그림 5. 수분함유량 3%인 여러 가지 토양의 전기적 파라미터의 주파수의존성

Fig. 5. Frequency dependence of the electrical parameters of various soils with the moisture content of 3%

여러 가지 토양의 수분함유량에 따른 전기적 파라미터의 주파수의존성을 비교·검토하기 위해 규격화시킨 저항률의 그래프를 그림 6에 나타내었다. 또한 토양의 종류별 수분함유량에 따른 저항률의 측정결과

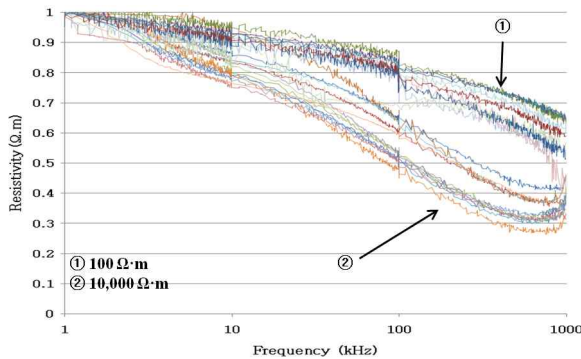


그림 6. 토양 저항률의 주파수의존성을 규격화한 곡선
Fig. 6. The normalized curves of frequency-dependent soil resistivity

표 3. 1kHz의 주파수에서 수분함유량에 따라 측정된 여러 가지 토양의 저항률의 범위

Table 3. Resistivity ranges of various soils measured as a function of moisture content at the frequency of 1kHz

토양의 종류	수분함유량(%)	저항률(Ω · m)
굵은 자갈	1, 3, 5	4,000 ~ 10,000
가는 자갈	1, 3, 5	3,000 ~ 7,000
굵은 모래	1, 2, 3	3,000 ~ 3,700
굵은 마사토	1, 2, 3, 4	1,000 ~ 2,800
가는 모래	3, 6, 9	200 ~ 800
가는 마사토	3, 6, 9, 12, 15	130 ~ 450
황토	3, 6, 9, 12, 15	100 ~ 210

범위를 표 3에 나타내었다.

이와 같은 결과는 이미 발표된 문헌[12]의 내용과 같은 경향을 나타내고 있다. 분석범위의 경계인 10kHz와 100kHz의 주파수에서 실측데이터의 일부 불연속성이 나타났으나 전반적인 변동의 경향성은 유지됨을 알 수 있다. 1kHz의 주파수에 대한 저항률을 1로 하여 규격화시킨 여러 가지 토양의 수분 함유량에 따른 저항률의 주파수의존성에 관한 그래프를 보면 주파수 1kHz~1MHz 범위에서 100Ω · m의 토양저항률의 변화율은 약 30% 정도인 반면 10,000Ω · m의 토양에서는 70% 이상까지 변화하였다. 이의 결과로부터 저항률이 클수록 주파수의 증가에 따라 저항률의 주파수에 따른 변동특성이 수분함유량과 복합적으로 작

용하는 것을 알 수 있다. 접지임피던스를 기반으로 하는 접지시스템의 주파수에 따른 성능을 정확히 평가하기 위해서는 토양의 저항률 및 비유전율의 주파수의존성에 대한 분석이 정확하게 이루어져야 하는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 접지시스템의 고주파 성능과 과도 특성의 해석에 기반이 되는 토양의 전기적 파라미터의 주파수의존성을 분석하는 기법과 기초자료의 확보를 위한 실험적 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 토양의 임피던스와 저항률은 주파수의 증가에 따라 감소하였으며, 이들 파라미터는 수분함유량이 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다.
- (2) 비유전율은 10kHz 이하에서 주파수의 증가에 따라 급격히 감소하였으며, 저항률의 주파수의존성과는 반대로 저항률이 낮은 경우 주파수에 따른 변동이 크게 나타났다.
- (3) 저항률의 주파수의 증가에 따른 감소는 100Ω · m 일 때 1MHz에서의 저항률은 1kHz에 비하여 약 30% 감소하였고, 저항률 10,000Ω · m일 때에는 약 70% 감소하였다.

이 논문은 2014년도 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음.

References

- [1] Bok-Hee Lee and Seung-Chil Lee, The Major Foundational Technics for Grounding Systems, Uije Publication Ltd., pp. 37-51, 1999.
- [2] A. Phillips, Guide for Transmission Line Grounding: A Roadmap for Design, Testing, and Remediation: Part 1 - Theory Book, EPRI, pp.4-1~13, 2006.
- [3] IEEE Standard 80-2000, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", pp.71-80, 2000.
- [4] IEEE Std 142-2007, "IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems", IEEE Green Book, pp.161-181, 2007.
- [5] C. H. Choi, B. H. Lee and S. K. Paek, Frequency-

dependent grounding impedance of the counterpoise based on the dispersed currents, Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 7, No.4, pp.589-596, 2012.

[6] C. H. Choi and B. H. Lee, An analysis on the Frequency-dependent grounding impedance based on the ground current dissipation of counterpoises in the two-layered soils, Journal of Electrostatics, Vol. 70, Iss. 2, pp.184-191, 2012.

[7] C. H. Choi and B. H. Lee, An analysis of conventional grounding impedance based on the impulsive current distribution of a horizontal electrode, EPSR, Vol.85, pp.30-37, 2012.

[8] M.Akbari, K.Sheshyekani, M. R. Alemi, "The Effect of Frequency Dependence of Soil Electrical Parameters on the Lightning Performance of Grounding Systems," IEEE Trans. EMC, doi: 10.1109/TEMC.2012.2222416, in press, 2013.

[9] American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Fopur-Electrode Method, G 57 - 95a, pp.1-5, 2001.

[10] KS C IEC 62561-7, Lightning protection system components (LPSC) - Part 7: Requirements for earthing enhancing compounds, Ed. 1.0, pp.6-8], 2013.

[11] Jong-Hyuk Choi, Eung-Suk Cha and Bok-Hee Lee, "Frequency-Dependent Resistivity and Relative Dielectric Constant of Soil on Water Content", J. KIIEE, Vol.24, No.1, pp.96-104, 2010.

[12] S. Visacro and R. Alipio, Frequency Dependence of Soil Parameters: Experimental Results, Predicting Formula and Influence on the Lightning Response of Grounding Electrodes, IEEE Trans. PD, Vol.27, No.2, pp.927-935, 2012.

◆ 저자소개 ◆



이복희(李福熙)

1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업
1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사).
1988~1989년 동경대학 객원연구원.
1999년 Cincinnati대학 방문교수. 2010~
2011년 당 학회 회장. 현재 인하대 IT
공대 전기공학과 교수. 본 학회 명예회장.

Tel : (032)860-7398

Fax : (032)863-5822

E-mail : bhlee@inha.ac.kr



김기복(金基福)

1970년 9월 30일생. 2006년 2월 한밭대
공대 전기공학과 졸업. 2008년 2월 인하대
공학대학원 정보전기공학과 졸업(석사).
현재 인하대 대학원 전기공학과 박사
과정수료.

Tel : (032)860-7398

Fax : (032)863-5822

E-mail : kbkim7@korea.kr