

## 탄소접지극이 병설된 접지그리드의 접지임피던스의 해석

(Analysis of the Ground Impedance of Ground Grids Combined with the Carbon Ground Electrodes)

이복희\* · 엄상현 · 김유하 · 이강수 · 전병욱 · 최종혁

(Bok-Hee Lee · Sang-Hyun Um · You-Ha Kim · Kang-Soo Lee · Byung-Wook Jeon · Jong-Hyuk Choi)

### Abstract

This paper deals with the frequency-dependent ground impedance of ground grids combined with the carbon ground electrodes. Ground grids are generally valid for multipurpose grounding systems as well as lightning protection systems. The carbon ground electrodes may be supplementarily used to reduce the high frequency ground impedance and to improve the transient response to surge currents. The frequency-dependent ground impedances of ground grids combined with or without the carbon ground electrodes were measured and their simulations with due regard to frequency-dependent soil resistivity were implemented by using EMTP program and Matlab modeling. As a consequence, the ground impedance of ground grids combined with the carbon ground electrodes is significantly reduced when the test current is injected at the terminal of the carbon ground electrode. The measured and simulated data for the test ground grids fairly agree with each other. It was found that the proposed method of simulating the frequency-dependent ground impedance is distinguished. The simulation techniques of predicting accurately the ground impedances without actual measurements can be used in the design of grounding systems based on ground grids and the carbon ground electrodes.

Key Words : Frequency-Dependent Ground Impedance, Carbon Ground Electrode, Ground Grid, Grounding System, EMTP

### 1. 서 론

최근 기후변화로 인한 낙뢰빈도의 증가와 전력변환 소자를 이용한 전기기기의 사용의 증가로 인하여 접지시스템에는 서지전류를 비롯하여 고주파수의 전류가 크게 증가하고 있다. 인체와 기기의 전기적 안전성에 중요한 역할을 하는 접지시스템은 고성능이 요구되고 있으며, 그에 따라 접지임피던스로 접지성능의 평가가 요구되었다. 여러 문헌에서 제시되었듯이 접

---

\* 주(교신)저자 : 인하대학교 IT공대 전기공학부 교수  
\* Main(Corresponding) author : School of Electrical Engineering, Inha University, Professor  
Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822  
E-mail : bhlee@inha.ac.kr  
접수일자 : 2012년 10월 26일  
1차심사 : 2012년 10월 30일  
심사완료 : 2012년 12월 21일

지전극의 고주파수의 접지전류와 서지전류에 대한 접지임피던스는 정상상태 접지저항과 큰 차이를 나타낸다[1-2]. 뇌격전류와 같이 수 kHz에서 1MHz까지 넓은 영역의 주파수 스펙트럼을 갖는 전류가 접지시스템에 입사되었을 때 전기적 성능으로 접지임피던스를 기반으로 하는 임펄스전류 및 접지전류의 주파수에 따른 접지시스템의 성능평가가 적합하며, 이에 대한 연구가 이루어지고 있다[3-6].

접지임피던스가 낮고 고성능의 접지시스템의 설계에 접지그리드의 사용이 일반화되었으며, 접지임피던스를 낮추기 위해 대형 접지극을 적용하고 있다. 접지그리드를 비롯하여 접지극이 대형화되면 접지극 자체의 인덕턴스 때문에 고주파수의 접지전류 또는 서지전류에 대해 접지임피던스가 증가하는 문제가 있다. 통합접지와 같이 다목적으로 사용하는 접지시스템에는 다양한 주파수의 접지전류와 서지전류가 흐르게 되므로 이들 전류에 대한 접지임피던스를 낮추는 방안을 강구하여 접지시스템을 설계할 필요가 있다.

따라서 본 논문에서는 접지그리드를 사용하는 경우 정상상태 접지저항뿐만 아니라 고주파수에서의 접지임피던스도 낮출 수 있는 접지극시스템의 구현을 위한 목적으로 탄소접지극을 병설한 접지그리드의 접지임피던스의 주파수의존성을 해석하여 접지설계에 활용할 수 있는 시뮬레이션기법을 제안하였다. 또한 EMTP와 Matlab모형을 이용하여 접지그리드에 탄소접지극을 병설하기 전과 병설한 후의 접지임피던스의 주파수의존성을 해석한 결과와 실측결과를 비교·분석하여 시뮬레이션방법의 타당성에 대하여 검토한 결과를 기술하였다.

## 2. 실험 및 시뮬레이션

### 2.1 실험계 및 방법

실험에 사용된 10m×10m, 4메시 접지그리드는 50mm<sup>2</sup>의 나동선으로 그림 1과 같이 설치하였다. 접지그리드 및 접지극의 중앙과 모퉁이에 총 5개의 탄소접지극을 병설한 조건에 대하여 연구하였다. 접지그리드에 병설한 탄소접지극의 시방을 표 1에 나타내었다.

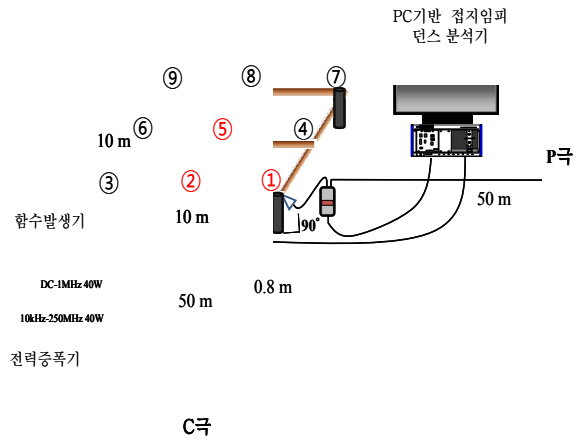


그림 1. 실험계의 개략도  
Fig. 1. Schematic diagram of the experiment

표 1. 탄소접지극의 시방  
Table 1. Specifications of the carbon ground electrode

크기	Φ260×1,000mm
무게	50kg
저항률	≤ 4.0Ω · m
전기저항	4Ω 이하

접지전류의 주파수에 따른 접지임피던스를 측정하기 위해 그림 1과 같이 IEEE Std 81.2-1991에 규정되어 있는 수정된 전위강하법을 적용하여 실험회로를 구성하였다[7]. 수정된 전위강하법의 경우 필연적으로 전류보조극과 전위보조극의 설치에 따른 도전유도에 의한 오차가 유발되는데 이에 대한 오차평가를 선행하여 도전유도에 의한 측정오차가 3% 미만인 거리에 전류보조극과 전위보조극을 설치하였다[8]. 이때 전류보조극과 전위보조극은 각각 측정대상 접지극으로부터 50m 떨어진 위치에 설치하고, 2.5mm<sup>2</sup> IV 전선으로 대지로부터 0.8m의 높이에 서로 직각이 되도록 배치하여 전자유도영향이 최소가 되도록 포설하였다.

합수발생기(DC-250MHz)의 정현파 출력전압을 전력증폭기로 증폭한 후 주파수를 100Hz에서 1MHz까지 변동시켜 접지그리드의 전류인가점 ①, ②, ⑤의 위치에 인가하였다. 인가전류와 접지그리드의 전위는 능동성 전류프로브와 전압프로브를 이용하여 검출하

였다. 측정된 전위와 인가전류를 컴퓨터에 저장하고 접지임피던스분석기를 이용하여 주파수에 따른 접지 임피던스를 산출하였다.

### 2.2 시뮬레이션

접지전류의 주파수에 따른 접지임피던스의 특성은 EMTP기반으로 해석하는 것이 적합하다. 시뮬레이션 결과와 실측결과를 비교하면 시뮬레이션에 적용한 모델의 타당성과 결과의 신뢰도, 그리고 실측에 포함되는 오차 및 불확도를 알 수 있게 된다. 또한 시뮬레이션은 실측할 수 없는 주파수 범위에 대한 접지시스템의 접지임피던스의 평가와 대지저항률이 다른 임의의 대지에 설치된 접지시스템의 접지임피던스를 예측할 수 있다.

10m×10m, 4메시 접지그리드에 탄소접지극을 병설한 조건에 대한 EMTP해석을 위한 모델회로도를 그

림 2에 나타내었으며, 기본적으로 접지그리드의 모델과 탄소접지극의 모델을 합성하였다. 따라서 탄소접지극을 병설하지 않은 경우는 접지그리드만의 회로모델을 적용하여 해석하면 된다[1,3].

토양의 저항률과 비유전율의 주파수의존성을 고려한 데이터를 적용하여 Matlab을 통해 시뮬레이션 결과를 산출했다. 접지그리드의 접지임피던스의 시뮬레이션은 분균일 분포정수회로모델(Non-uniform distributed constant circuit model)을 이용하여 Matlab으로 연산하였고[9], 그 연산된 값을 EMTP에 입력된  $R, L, C$  값으로 치환하여 EMTP를 기반으로 해석하였다. 탄소접지극은 접지그리드에 비하여 길이가 상대적으로 짧기 때문에 분포정수이론모델을 적용하였다. 접지그리드와 탄소접지극을 병설한 접지그리드의 접지전류의 주파수에 따른 접지임피던스를 산출하여 비교·분석하여 접지임피던스의 저감과 주파수의존성에 대한 탄소접지극의 효과를 검토하였다.

### 3. 결과 및 고찰

접지그리드 및 탄소접지극을 병설한 접지그리드에 대한 접지전류의 인가점에 따른 접지임피던스의 주파수의존성의 측정결과를 그림 3에 나타내었다. 그림 3 (a)는 전류인가위치 ①, 그림 3 (b)는 전류인가위치 ②, 그림 5 (c)는 전류인가위치 ⑤일 때의 주파수에 따른 접지임피던스를 비교한 결과로써 접지그리드의 정상상태 접지저항은 16.2Ω이고, 탄소접지극을 병설한 접지그리드의 접지저항은 10.8Ω으로 측정되었다. 접지그리드에 탄소접지극을 병설한 경우 접지저항은 약 5.4Ω 저감되었다. 접지전류의 인가위치 ①은 전류의 분기도가 2로 접지전류의 주파수가 증가할수록 유효방출면적이 작아 접지임피던스가 증가하는 경향을 보였고, 전류의 인가위치 ②는 전류의 분기도가 3으로 ① 위치보다 유효방출면적이 넓어 접지임피던스의 주파수 의존성도 작아지는 경향을 보였다.

또한 접지전류의 인가위치 ⑤의 경우 전류의 분기도가 4로 대지로 분산되는 경로가 많아 측정위치 3곳 중

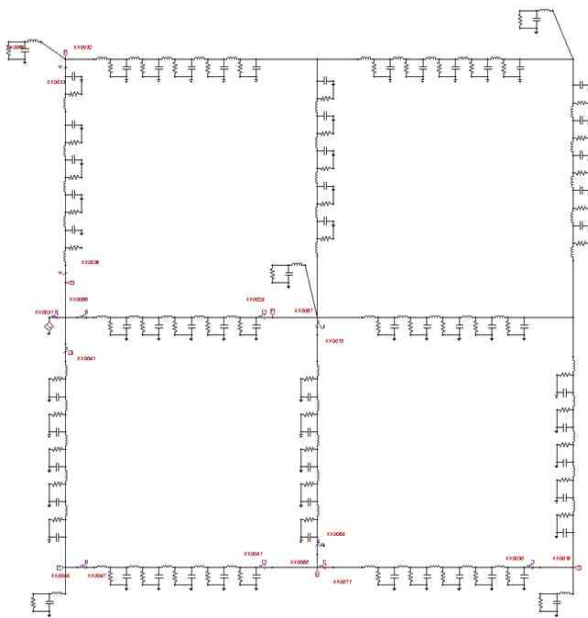
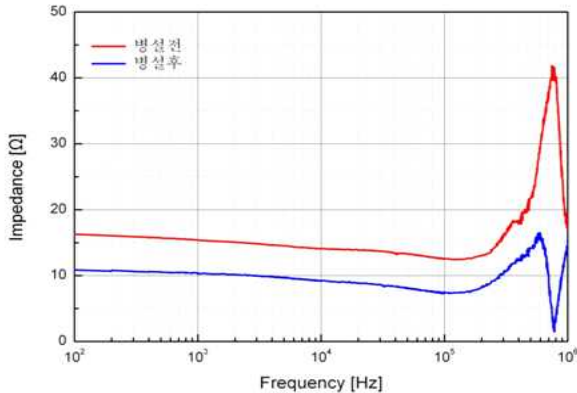
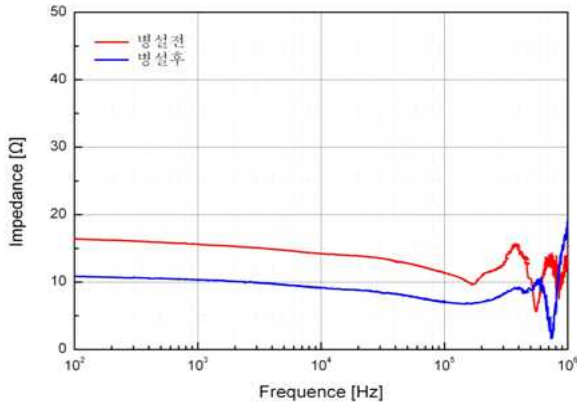


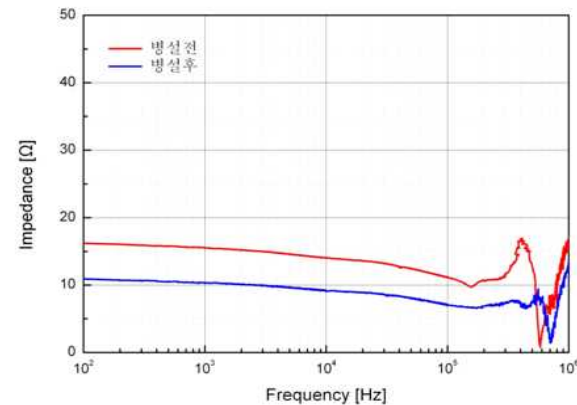
그림 2. 탄소접지극을 병설한 접지그리드의 접지임피던스의 주파수의존성을 해석하기 위한 회로모델  
Fig. 2. Circuit model for simulating the frequency dependent ground impedances of the ground grids combined with the carbon ground electrodes



(a) 인가위치 ①번의 접지임피던스



(b) 인가위치 ②번의 접지임피던스



(c) 인가위치 ⑤번의 접지임피던스

그림 3. 탄소접지극의 병설 여부에 따른 접지그리드의 접지임피던스의 주파수의존성의 측정결과  
 Fig. 3. Measured results of frequency- dependent ground impedances of the ground grids whether the carbon ground electrodes are combined or not

접지임피던스의 저감이 가장 큰 것으로 나타났다. 접지그리드와 탄소접지극을 병설한 접지그리드의 경우 모두 전류인가 점에 상관없이 100Hz에서부터 주파수가 증가함에 따라 접지임피던스는 감소하는 용량성 특성을 보였고, 약 200kHz 이후 접지임피던스는 증가하는 유도성 특성이 나타났다. 특히 전류인가위치 ①에서 접지전류의 주파수가 약 200kHz 이상에서 접지임피던스의 증가가 현저하였으며, 탄소접지극의 병설에 의한 접지임피던스의 저감효과도 가장 큰 것으로 나타났다[10]. 또한 접지전류의 인가위치 ⑤의 경우 고주파수에서 접지임피던스의 저감효과도 우수하고 변동이 작은 안정된 성능을 나타내었다. 접지임피던스-주파수특성곡선은 접지전류의 인가위치 상관없이 접지전류의 주파수 200kHz 이상에서 진동현상이 나타났다으며, 이는 실제의 복잡한 대지구조의 영향인 것으로 추정된다. 전류인가위치에 따른 접지그리드의 접지임피던스의 주파수의존성에 대한 측정결과와 시뮬레이션결과를 그림 4에 나타내었다.

접지임피던스의 주파수의존성에 대한 이론적 해석에서는 특히 토양의 저항률과 비유전율의 주파수의존성을 반영하여야 한다[11]. 토양의 저항률과 비유전율의 주파수 의존성에 관하여 최근에 발표된 논문에서 실험식으로 식 (1)과 식 (2)이 제시되었으며[12], 접지전류의 주파수와 정상상태 접지저항의 함수로 표현되며 이를 시뮬레이션에 반영하였다.

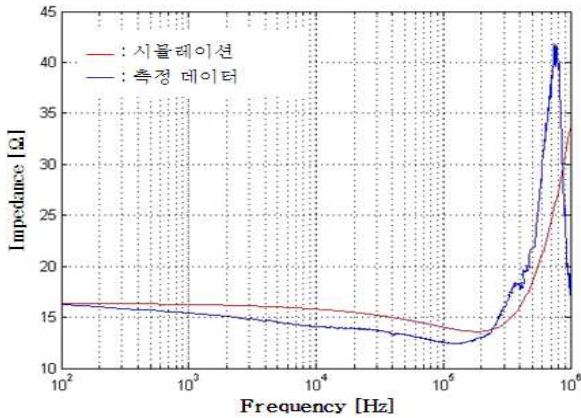
$$\rho_r(f) = \frac{1}{1 + (1.2 \times 10^{-6} \times \rho_0^{0.732}) \times (f - 100)^{0.65}} \quad (1)$$

$$\epsilon_r(f) = 7.6 \times 10^3 \times f^{-0.4} + 1.3 \quad (2)$$

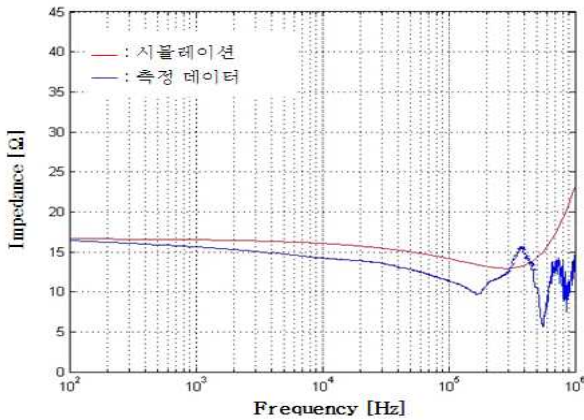
측정대상의 접지극이 매설된 장소의 대지저항률을 Wenner 4전극법으로 측정한 결과인 걸보기 대지저항률 360Ω·m를 식 (1)의 ρ<sub>0</sub>의 값으로 적용하여 시뮬레이션하였다[11].

정상상태 접지저항은 전류의 인가위치별 3곳 모두 시뮬레이션결과와 측정결과가 비슷하였다. 측정결과와 시뮬레이션결과 모두 접지전류의 주파수가 증가함에 따라 접지임피던스가 감소하다가 약 200-300kHz

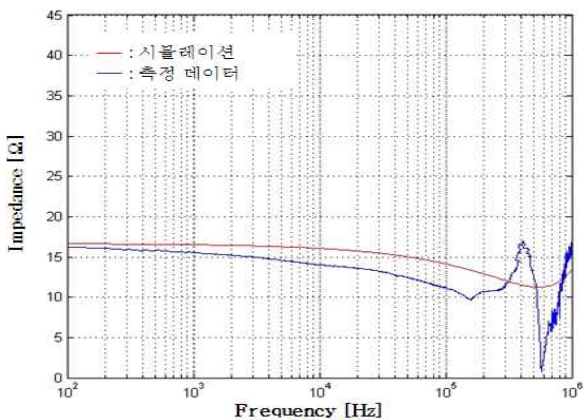




(a) 인가위치 ①번의 접지임피던스특성



(b) 인가위치 ②번의 접지임피던스특성



(c) 인가위치 ⑤번의 접지임피던스특성

그림 4. 접지그리드의 접지임피던스의 주파수의존성의 측정결과와 시뮬레이션결과와의 비교  
 Fig. 4. Comparison between the measured and simulated results of frequency-dependent ground impedances of the ground grid

이상의 주파수에서 접지임피던스가 증가하거나 진동하는 특성을 보였다. 접지전류의 주파수 200kHz 이하에서는 측정결과보다 시뮬레이션결과가 크게 나타났으며, 그 이상의 주파수에서는 교차하는 특성을 보였다. 그러나 전반적으로 시뮬레이션결과는 측정결과와 대체로 일치하였으며, 경향성은 유사한 것으로 나타났다. 실측결과와 시뮬레이션결과의 약간의 차이는 실제의 모든 토양조건을 시뮬레이션에 반영하지 못함에 기인된 것으로 사료된다.

탄소접지극을 병설한 접지그리드의 접지임피던스의 주파수의존성에 대한 측정결과와 시뮬레이션결과를 그림 5에 나타내었다. 접지전류의 인가위치에 관계없이 실측한 접지임피던스는 100kHz까지의 주파수에서 미소한 용량성 특성으로 나타났다. 시뮬레이션결과에서는 용량성 특성이 매우 미미하였으며, 200kHz 이상의 주파수에서부터 유도성 특성을 나타내었다.

시뮬레이션결과의 정상상태 접지저항은 10.8Ω으로 실측의 접지저항 10.8Ω과 거의 일치하였으며, 측정전류의 인가점의 위치에 따라 약간 차이가 나지만 1MHz 주파수의 영역까지 접지임피던스가 변동하는 경향은 거의 비슷하게 나타났다.

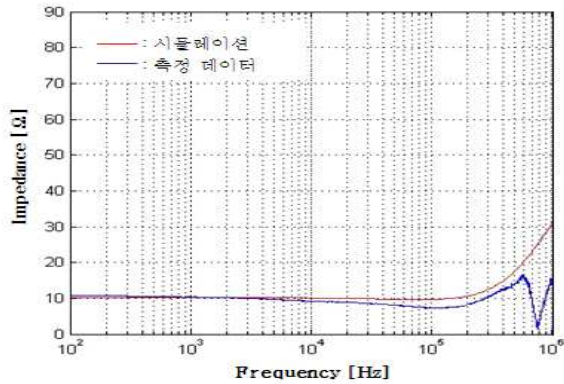
탄소접지극을 병설한 접지그리드의 경우 시뮬레이션결과는 실측결과와 보다 잘 일치하였으며, 이는 다음과 같은 이유인 것으로 판단된다. 고주파수의 접지전류가 인가된 경우 전류분류회로의 영향이 크게 작용한다. 고주파수의 접지전류가 인가하게 되면 접지전류는 접지그리드의 인덕턴스 때문에 접지그리드 끝단까지 전달되지 않고 인가점 주변으로 많이 방출되는데 탄소접지극을 수직으로 병설함으로써 전류의 분류회로가 증가하고, 탄소접지극의 고주파수 접지전류에 대한 응답특성이 우수하여 접지임피던스가 저감되는 효과로 나타나며, 시뮬레이션에서는 이런 경향이 그대로 반영되어 나타났다.

따라서 접지그리드에 탄소접지극을 병설함으로써 접지임피던스의 저감 및 고주파수의 접지전류에 대하여 거의 일정한 접지임피던스를 나타내는 안정된 성능을 나타내며, 접지설계의 측면에서도 실제의 조건에 상응하는 접지성능을 예측할 수 있는 수단임이 밝혀졌다.

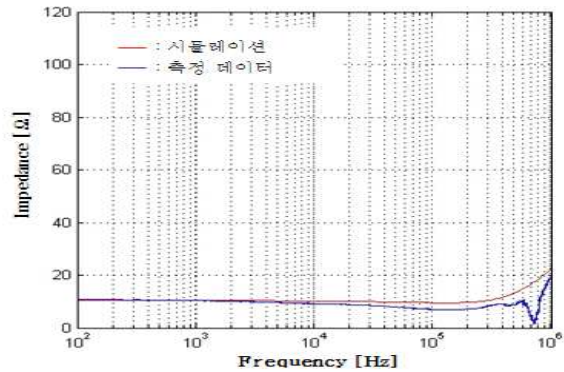
#### 4. 결 론

본 논문에서는 탄소접지극을 병설한 접지그리드의 주파수에 따른 접지임피던스를 실측하고, EMPT를 이용하여 계산한 결과를 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

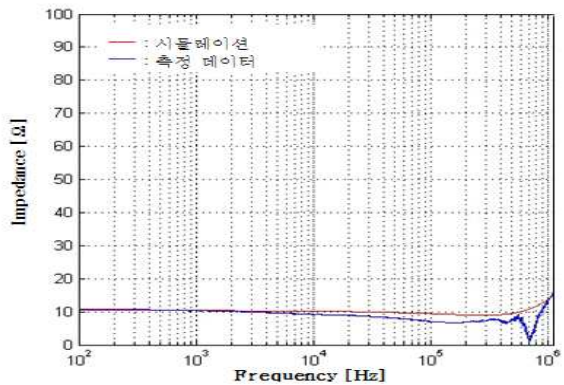
- (1) 접지그리드에 탄소접지극을 병설함으로써 접지 임피던스의 저감은 물론 고주파수에서도 접지 임피던스가 거의 일정한 안정된 성능이 확연하게 이루어졌다.
- (2) 접지그리드에 탄소접지극을 병설한 지점에 전류가 인가된 경우 고주파에서 접지임피던스의 저감효과가 큰 것으로 나타났다.
- (3) 탄소접지극을 병설한 접지그리드의 접지임피던스의 주파수의존성에 대한 시뮬레이션결과는 실측결과와 잘 일치하였으며, 제안된 접지임피던스의 해석기법의 우수한 정확성이 확인되었다.
- (4) 본 연구에서 제안된 접지전류의 주파수에 따른 접지임피던스를 해석하는 시뮬레이션기법은 접지그리드를 기반으로 하는 접지시스템의 설계에 유용하게 활용될 것으로 기대된다.



(a) 인가위치 ①번의 접지임피던스특성



(b) 인가위치 ②번의 접지임피던스특성



(c) 인가위치 ⑤번의 접지임피던스특성

그림 5. 탄소접지극을 병설한 접지그리드의 접지임피던스의 주파수의존성의 측정결과와 시뮬레이션결과와의 비교  
Fig. 5. Comparison between the measured and simulated results of frequency-dependent ground impedances of ground grid combined with the carbon ground electrodes

#### References

- [1] B. H. Lee, J. H. Kim and J. H. Choi, "Analysis for the Grounding Impedance of Vertical Grounding Electrodes using the Distributed Parameter Circuit Model", T. KIEE, Vol.59, No 6, pp.1103-1108, 2010.
- [2] P. Llovera, J. A. Lliso, A. Quijano, V. Fuster, "High frequency measurements of grounding impedance on resistive soils", 28th ICLP, PP.727-729, 2006.
- [3] B. H. Lee, H. K. Shin and C. H. Seong, "A Method of Simulating the Frequency-dependent Ground Impedance of Counterpoises" J. KIEE, Vol.26, No.3, pp.73-79, 2012.
- [4] S. Visacro, "A comprehensive approach the grounding response lightning currents", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.22 No.1, pp.381-386, 2007.
- [5] M. I. Lorentzou, N. D. Hatzargyriou, and B. C. Papadias, "Time domain analysis of grounding electrode impulse response," IEEE Trans. Power delivery, Vol. 18, No. 2, pp.517-524, 2003.
- [6] Y. Liu, N. Theethayi, R. Thottappillil, "An Engineering Model for Transient Analysis of Grounding System Under Lightning strikes: Nonuniform Transmission-Line Approach", IEEE Trans. Power Del., Vol. 20, No.2, 2005.
- [7] IEEE Std. 81.2-1991, "IEEE Guide for Measurement of

Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems”, pp.12-17. 1991.

[8] J. H. Choi, Y. Choi and B. H. Lee, “Evaluations of Errors due to Earth Mutual Resistance in Measuring Ground Impedance of Vertically-driven Ground Electrode”, T. KIEE, Vol.58, No. 9, pp.1778-1783, 2009.

[9] B. H. Lee, S. C. Cho and C. H. Seong, “An Analysis of the Frequency-Dependent Resultant Ground Impedance of Vertical Ground Electrodes Installed in Parallel” J. KIIEE, Vol.26, No.2, pp.99-105, 2012.

[10] S. H. Um, Y. H. Kim, K. S. Lee, B. W. Jeon, and B. H. Lee, “Effect of carbon ground electrodes on ground impedance reduction”, Proc. KIIEE Autumn Annual Conference 2012, pp.150-151, 2012.

[11] B. H. Lee, K. S. Lee, S. H. Um and, Y. H. Kim, “Analysis of transient response behaviors and frequency-dependent ground impedances of the carbon ground electrodes”, J. KIIEE, Vol.27, No.1, pp.000-000, 2013.

[12] S. Visacro and R. Alipio, “Frequency Dependence of Soil Parameters: Experimental Results, Predicting Formula and Influence on the Lightning Response of Grounding Electrode”, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 27, No. 2, pp.931, 2012.

◆ 저자소개 ◆



**이복희 (李福熙)**

1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업.  
1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사).  
1988~1989년 동경대학 생산기술연구소  
객원연구원. 1999년 Cincinnati대학 방문  
교수. 2010~2011년 본 학회 회장. 현재  
인하대 IT공대 전기공학부 교수.  
Tel : (032)860-7398  
Fax : (032)863-5822  
E-mail : bhlee@inha.ac.kr



**엄상현 (嚴相賢)**

1984년 1월 16일생. 2012년 2월 인하대  
공대 전기공학과 졸업. 현재 인하대 대학원  
전기공학과 석사과정.  
Tel : (032)860-7398  
Fax : (032)863-5822  
E-mail : s4na2s@gmail.com



**김유하 (金庾河)**

1980년 4월 27일생. 2007년 2월 인하대  
공대 전기공학과 졸업. 현재 인하대 대학원  
전기공학과 석사과정.  
Tel : (032)860-7398  
Fax : (032)863-5822  
E-mail : baal80@daum.net



**이강수 (李康壽)**

1970년 2월 19일생. 1996년 숭실대 공대  
전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기  
공학과 졸업(석사). 현재 인하대 대학원  
전기공학과 박사과정. (주)옵니엘피에스  
연구소장.  
Tel : (02)2632-4541  
Fax : (02)2671-5313  
E-mail : pwrtoy@empal.com



**전병욱 (全炳昱)**

1984년 1월 6일생. 2007년 2월 인하대  
공대 전기공학과 졸업. 2009년 2월 동  
대학원 전기공학과 석사졸업.  
Tel : (02)2062-5033  
Fax : (02)2632-4541  
E-mail : junbw2@naver.com



**최중혁 (崔鍾赫)**

1980년 5월 12일생. 2006년 2월 인하대  
공대 전자공학과 졸업. 2008년 2월 인하대  
대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동  
대학원 박사과정.  
Tel : (032)860-7398  
Fax : (032)863-5822  
E-mail : choijh@keri.re.kr