

탄소혼합물 접지전극의 접지임피던스의 특성

(Characteristics of Grounding Impedances of Carbon Compound Grounding Electrodes)

이강수* · 이복희

(Kang-Soo Lee · Bok-Hee Lee)

Abstract

This paper presents characteristics of frequency-dependent grounding impedance and transient grounding impedance for the carbon compound grounding electrode used in the installation of computerized electronic equipment and lightning protection system. The frequency-dependent grounding impedances were measured by applying sinusoidal currents in the frequency range from 100 [Hz] to 10[MHz], and the transient grounding impedances were examined by subjecting the impulse current with the front-time between 1~80[μ s]. As a result, the ground resistance of the carbon compound grounding electrode is less than that of another type grounding electrodes. The transient grounding impedance is relatively low and the conventional grounding impedance is rather lower than the ground resistance. The frequency-dependent grounding impedance of the carbon compound grounding electrode is capacitive and the grounding impedance is decreased with increasing the frequency of injected currents. Therefore in the case that the carbon compound grounding electrode is jointly used with large-scaled grounding electrodes, it is possible to reduce the high frequency grounding impedance of the integrated grounding electrode system.

Key Words : Carbon Compound Grounding Electrode, Frequency-Dependent Grounding Impedance, Transient Grounding Impedance, Conventional Grounding Impedance, Grounding System

1. 서 론

정보통신 산업의 발달과 건물의 초고층화/복합화로 인하여, 차단기 차단동작, 낙뢰전류의 유입 등의 과도

현상에 의한 고장전류 관점에서 검토하면 주파수는 상용 주파수 개념을 벗어나게 되고, 대부분 고주파 전류가 발생한다. 고주파의 경우 리액턴스 성분을 검토해야하고, 접지의 측면에서는 “접지임피던스” 개념이 도입되게 된다. 접지 임피던스는 주파수의 개념이 포함된 교류적 상태를 기준으로 한 것으로 과도적 상태를 쉽게 이해할 수 있으며 문제의 해결방안을 도출하는데 이용할 수 있다. 현대 건축물의 접지시스템은 보안용 접지와 기능용 접지 모두의 양호한 성능을 요구

* 주저자 : 인하대학교 대학원 박사과정
** 교신저자 : 인하대학교 IT공대 전기공학부 교수
Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822
E-mail : pwrtoy@empal.com
접수일자 : 2011년 1월 18일
1차심사 : 2011년 1월 20일
심사완료 : 2011년 3월 29일

하고 있으며, 높은주파수 영역의 접지임피던스 특성은 접지전극의 형상, 크기, 매설방법, 대지저항률, 유전율 등에 의하여 변화하며, 특히 접지에 사용되는 접지도체의 종류 길이 굵기 배치방법등이 큰 변수로 작용한다. 접지시스템의 과도접지임피던스 특성에 대한 면밀한 검토가 요구되며, 규약임피던스로 평가 할 필요가 있다. 접지전극에 임펄스전류가 가 가유입될 때에는 단순히 저항만이 아니라 인덕턴스(L)나 정전용량(C)의 영향 때문에 일반적으로 접지전극과 무한원 점사이에는 전압 가나타난다. 이때 전압과전류의 피크값의비 V_p/I_p 를 규약접지 임피던스(Conventional grounding impedance)라하며, 접지시스템이 임펄스전류에 대한 과도적인 특성은 간이적으로 나타낸 것이다. 규약접지임피던스가 낮은 것이 뇌격전류가 흐를 때 전위상승이 낮으므로 성능이 양호한 접지시스템 이라고 볼 수 있다[1-3].

탄소혼합물의 주 원료인 흑연은 전기도전율이 큰 광물로 주성분이 흑연으로 이루어져 있다. 따라서 탄소혼합물 접지전극은 금속 접지전극에 비해서 표면적의 확대효과가 있으며, 흡습효과가 뛰어나 대지와외의 접촉상태가 양호하게 유지되어 낮은 접지저항을 확보할 수 있다[4]. 최근 통합접지시스템의 적용이 일반화되면서 낮은 접지저항은 물론 고주파수에 대한 양호한 성능과 낮은 과도접지임피던스 특성이 요구되고 있다 [5-6]. 따라서 본 논문에서는 탄소혼합물 접지전극을 통합접지시스템에 적용하는 경우 기능용 접지와 피뢰용 접지에 요구되는 고주파수에서의 성능 분석을 위해 수행한 접지임피던스의 주파수의존성과 과도접지 임피던스의 특성에 대한 분석결과를 기술한다.

2. 실험

2.1 실험장 대지구조 및 접지전극

실험대상 접지전극의 접지임피던스의 과도적 특성을 평가하기 위한 실험장은 매립하여 조성한 부지로 설계된 대지구조는 그림 1과 같으며 표 1에 나타난 토양으로 이루어져 있다.

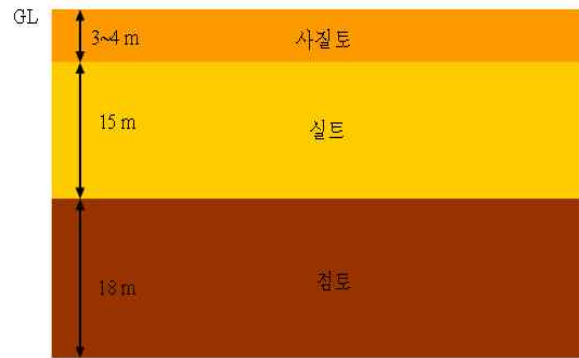


그림 1. 실험장 부지의 대지구조
Fig. 1. Soil structure of the test site

표 1. 실험장 부지의 토양의 종류
Table 1. Types of the soil at the test site

토양의 종류	토양입자의 크기
사토질(sand)	0.05 ~ 2[mm]
실트(silt)	0.002 ~ 0.5[mm]
점토(clay)	0.002[mm]이하

접지전극이 매설된 위치의 겉보기 대지저항률은 약 $36[\Omega \cdot m]$ 이며, 2차원으로 나타낸 대지저항률의 분포는 그림 2와 같다.

측정대상 접지전극은 단면적 $25[mm^2]$ 이고 길이 $1.3[m]$ 인 매설지선, 직경 $75[mm]$ 이고 길이 $2[m]$ 인 동축구조형 탄소접지전극모듈, 그리고 직경 $110[mm]$ 이고 길이 $1.3[m]$ 인 탄소접지전극모듈(G-1N, G-2N) 4종류를 그림 3과 같이 지표면으로부터 $0.5[m]$ 의 깊이에 매설하였다.

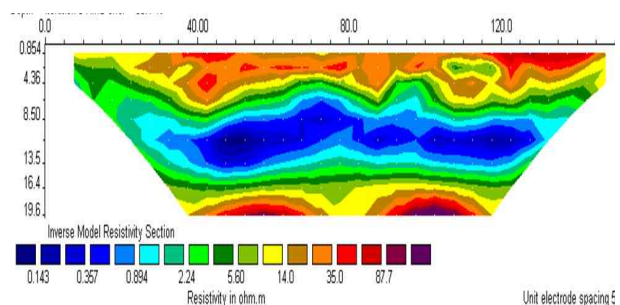


그림 2. 실험장의 대지저항률의 2차원 분포
Fig. 2. Two-dimensional map of the soil resistivity at the test site

측정전류는 접지전극의 끝단에서 인가하였으며, 각 접지전극간의 상호 간섭을 배제하기 위해서 충분한 이격거리를 두고 설치하였다.

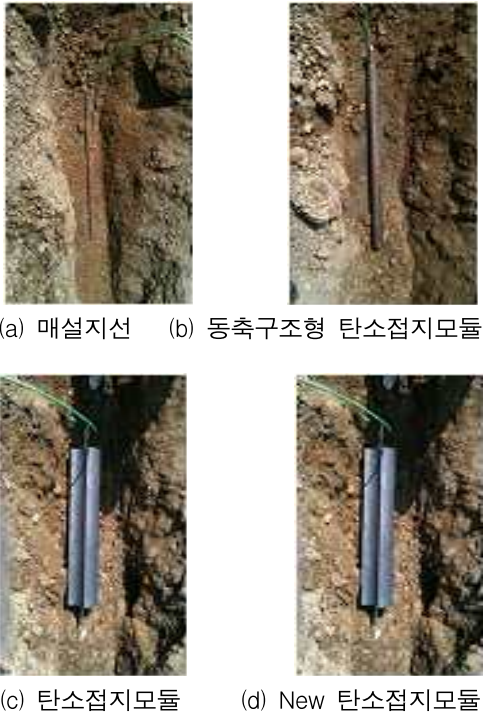


그림 3. 본 연구에 사용한 접지전극의 사진
Fig. 3. Photo. of the grounding electrodes used in this work

2.2 측정회로 및 방법

임펄스전류 또는 고주파수의 정현파 전류를 인가하여 접지임피던스를 측정하는 경우에는 측정선의 상호 결합에 의한 전자유도의 영향이 매우 크게 나타날 수 있다. 따라서 이의 영향이 최소가 되도록 IEEE Std. 81.2에 제시된 수정된 전위강하법을 사용하여 전류보조전극과 전위보조전극을 90°가 되도록 그림 4와 같이 측정회로를 구성하였다[7]. 또한 수정된 전위강하법의 경우 전류보조전극과 전위보조전극의 90° 배치로 도전유도에 의한 오차가 나타나기 때문에 이를 최소화하여 접지임피던스를 측정할 수 있도록 도전유도에 의한 오차가 5%이내인 거리를 선정하여 전류보조전극과 전위보조전극을 설치하였다[8].

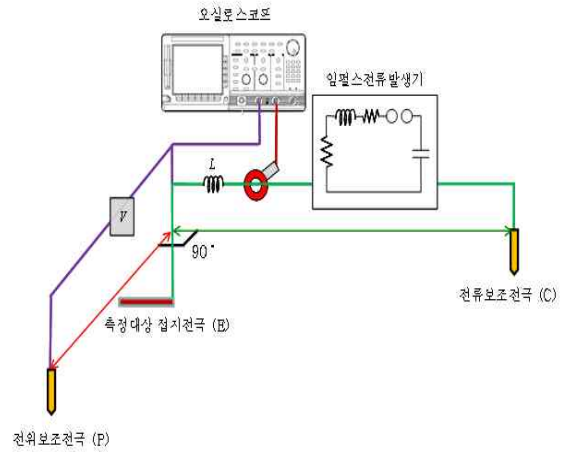


그림 4. 접지임피던스의 측정을 위한 실험계
Fig. 4. Experimental arrangement for measuring the grounding impedance

임펄스전류에 대한 과도접지임피던스의 측정에는 조합형 임펄스전류발생장치를 이용하여 측정대상 접지전극에 임펄스전류를 인가하였다. 임펄스전류발생장치의 커패시턴스를 조절하여 과두시간을 1~80[μ s]의 범위에서 10[A]크기의 임펄스전류를 인가하였다. 능동성 전류프로브와 차동전압프로브로 검출된 인가전류와 전위 파형을 디지털 오실로스코프로 관측하여 과도접지임피던스와 규약접지임피던스를 산출하였다. 접지임피던스의 주파수 의존성의 측정에는 전원공급장치로 조합형 임펄스전류발생장치 대신에 DC 80[MHz]의 전류를 인가할 수 있는 함수발생기와 주파수대역이 DC 250[MHz]이고 최대 출력이 75[W]인 전력증폭기를 이용하여 100[Hz]에서 10[MHz]주파수 범위의 정현파 전류를 인가하였다. 능동성 전류프로브와 차동전압프로브를 사용하여 인가전류와 전위를 검출하였다. 측정된 신호는 100[MS/s]의 샘플링률(sampling rate)을 갖는 A/D변환기를 통하여 개인용 컴퓨터로 전송되며, 디지털 필터를 이용하여 노이즈를 제거하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 과도접지임피던스 및 규약접지임피던스

임펄스전류를 인가하였을 때 접지전극의 전위상승

에 대한 응답특성은 규약접지임피던스로 나타나며, 뇌 임펄스전류에 대한 전위상승의 영향을 평가하는 지표로 적용된다. 고장전류 및 뇌격전류의 피크값에 대하여 접지전극의 전위가 얼마로 상승할 것인가가 관심의 대상으로 규약접지임피던스는 임펄스전류의 피크값에 대한 접지전극의 전위의 피크값의 비로 정의되며, 다음의 수식으로 표현된다.

$$Z = \frac{V_{peak}}{I_{peak}} \quad (1)$$

규약접지임피던스의 정의에 대한 도식적인 설명을 그림 5에 나타내었으며, 여기서 I_{peak} 는 접지전극에 인가한 임펄스전류 파형의 피크값이며, V_{peak} 는 접지전극의 전위상승 파형의 피크값이다[12-15].

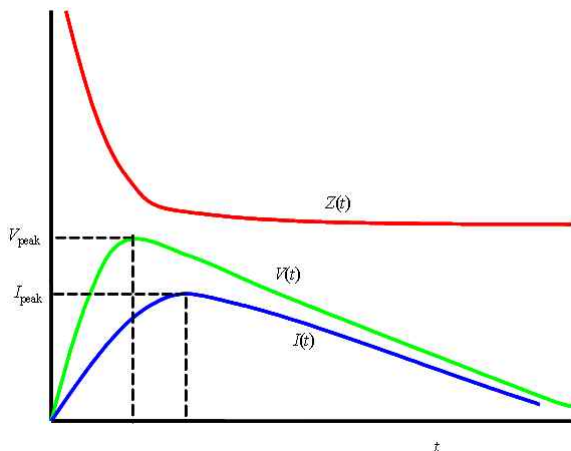


그림 5. 규약접지임피던스의 정의
Fig. 5. Definition of the conventional grounding impedance

접지전극의 과도접지임피던스는 임펄스전류가 인가된 때 측정대상 접지전극의 전위를 인가전류로 나누어 산출하였다. 실험대상 접지전극 중의 하나인 탄소 접지전극모듈에 인가한 임펄스전류와 전위상승의 전형적인 파형 및 접지임피던스 시간특성($Z-t$ 특성)의 예를 그림 6에 나타내었다. 일반적으로 과도접지임피던스는 접지전극의 형상과 크기, 접지도체의 인덕턴스, 대지저항률, 인가전류의 크기와 파형등 의존한다[9-11].

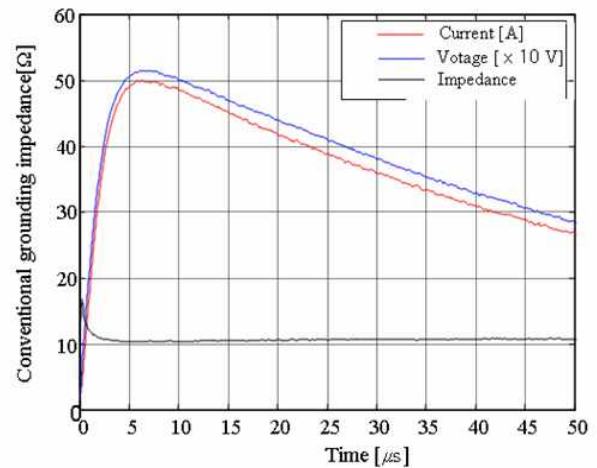


그림 6. 탄소접지전극모듈의 과도접지임피던스의 예
Fig. 6. An example of the transient grounding impedance of the carbon grounding electrode module

과도접지임피던스는 인가된 임펄스전류의 $1[\mu s]$ 이내에서 피크값을 보이며 지수함수적으로 감소하여 인가한 임펄스전류의 파고값 부근에서 접지임피던스는 접지저항과 거의 같았으며, 인덕턴스의 영향이 미미한 것으로 볼 수 있다. 즉 측정대상 접지전극의 길이가 비교적 짧기 때문에 인덕턴스에 의한 접지임피던스의 과도적인 변동이 적은 것으로 보인다. 임펄스전류를 측정대상 접지전극에 인가시켰을 때의 $Z-t$ 특성곡선을 그림 7에 나타내었다.

실험장에 설치된 매설지선, 동축구조 탄소접지전극, 탄소접지전극의 정상상태 접지저항의 측정값은 각각 $17.2[\Omega]$, $16.2[\Omega]$, $10.9[\Omega]$, $9.2[\Omega]$ 이었다. 측정대상 접지전극에 인가된 임펄스전류의 피크값은 약 $50[A]$ 이며, 상승시간은 접지전극의 임피던스에 따라 약간 다르다. 접지전극의 길이가 비교적 짧기 때문에 접지임피던스의 과도적 특성은 $2[\mu s]$ 이내에서 나타나며, 전류의 인가 순간을 지나 $1[\mu s]$ 의 짧은 시간범위에서 현저하게 감소하는 유도성 특성을 나타내었다. 특히 $1[\mu s]$ 이내의 짧은 시간영역에서도 접지도선(접속선)이 없는 ①의 경우가 접지임피던스의 변동이 가장 작게 나타났으며, 이는 접지전극을 시공할 때 접속선의 영향이 최소가 되는 공법의 중요성을 암시하고 있다.

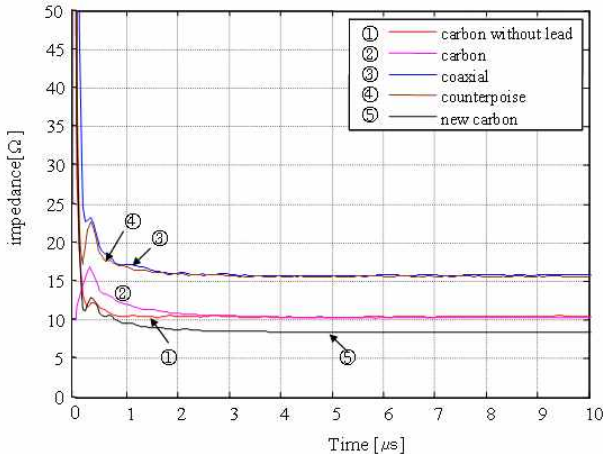


그림 7. Z-t 특성곡선
Fig. 7. Z-t characteristic curves

과두시간을 1~80[μs]의 범위로 하여 10[A] 크기의 임펄스전류를 인가하여 측정된 규약접지임피던스를 그림 8에 나타내었다. 접지시스템의 과도접지임피던스를 결정하는 중요한 요소들은 접지전극에 인가되는 임펄스전류의 과두시간, 접지저항, 접지전극 자체의 저항 및 인덕턴스 그리고 토양의 비유전율 등이다. 특히 규약접지임피던스는 접지전극의 자기인덕턴스와 토양의 비유전율에 따른 커패시턴스의 영향을 받는다. 규약접지임피던스는 대략 10[μs] 이전의 빠른 시간영역에서 접지저항보다 작은 값을 나타내는 용량성 특성으로 나타났다.

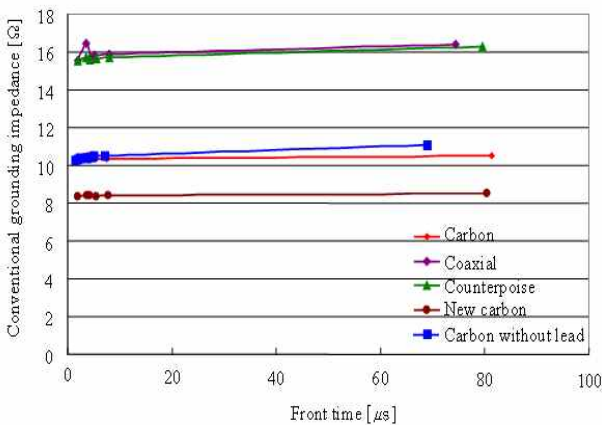


그림 8. 임펄스전류의 과두시간에 따른 규약접지임피던스
Fig. 8. The conventional grounding impedance as a function of front time of impulse current

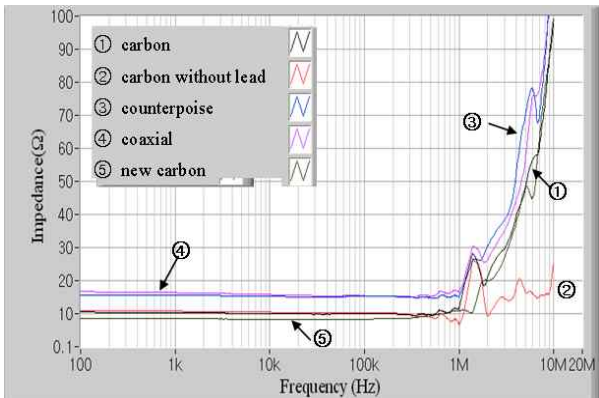
접지전극의 임펄스전류에 대한 전반적인 특성을 종합하여 보면 상승시간 1[μs] 이내에 상응하는 대략 350[kHz] 이상의 고주파에 대하여는 유도성으로 접지임피던스가 과도적으로 증가하지만 뇌임펄스전류에 상응하는 과두시간 10[μs] 정도의 시간범위에서는 용량성으로 오히려 규약접지임피던스가 감소하는 경향을 나타내었다. 따라서 본 연구에 적용한 접지전극의 임펄스전류에 특성은 피뢰설비용으로 적합한 것으로 평가할 수 있다.

3.2 접지임피던스의 주파수의존성

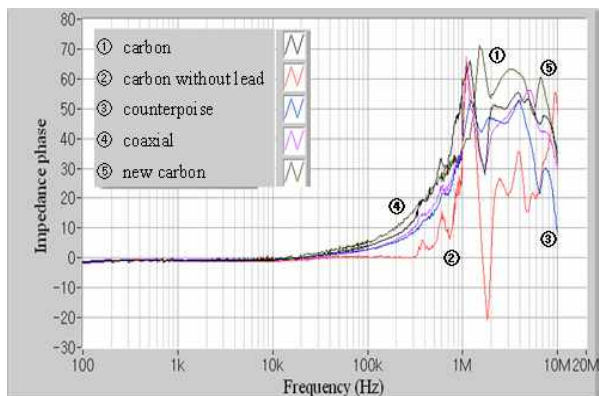
임펄스전류에 의한 과도접지임피던스와 규약접지임피던스는 시간영역의 값으로 접지시스템의 성능평가 및 설계의 지표로 사용하기가 모호하다. 이에 반해 접지전류의 주파수에 상응하는 접지임피던스로 접지시스템의 성능을 나타내면 보다 정량적인 특성으로 나타낼 수 있다. 측정대상 접지전극에 100[Hz]~10[MHz] 주파수 범위의 정현파 전류를 인가하였을 때의 접지임피던스와 위상각을 측정하였으며, 이의 결과를 그림 9에 나타내었다.

규약접지임피던스에서 나타난 것처럼 100[Hz]에서 수십 [kHz]까지는 주파수의 증가에 따라 접지임피던스가 약간 감소하는 용량성 특성으로 나타났으며, 이 주파수범위에서 위상차도 부(-)의 값으로 나타났다.

위상차 특성에서 대체로 수십 [kHz] 이상의 주파수에서 유도성 특성이 나타나기 시작하여 1[MHz]의 주파수까지 접지임피던스는 거의 접지저항에 상응하는 값을 나타내었으나 1[MHz] 이상의 주파수에서는 접지임피던스가 주파수에 따라 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 1[MHz] 이상의 주파수를 갖는 접지전류에 대하여 접지저항은 별 의미가 없으며 접지성능이 낮은 것으로 볼 수 있다. 뇌전류의 주파수 성분은 약 1[MHz] 이내의 스펙트럼을 갖기 때문에 낮은 피뢰설비용 접지전극의 크기는 본 연구에 적용한 정도가 적합하므로 탄소접지전극모듈을 병렬로 조합하여 뇌전류에 대하여 양호한 응답특성을 얻을 수 있도록 접지설계에 반영하는 것이 합리적인 설계방법이라 판단된다.



a) 접지임피던스



(b) 위상차

그림 9. 정현파 전류에 대한 접지임피던스와 위상차의 주파수의존성

Fig. 9. Frequency-dependent grounding impedances and impedance phase associated with the sine-currents

4. 결 론

본 논문에서는 지능형 빌딩을 비롯하여 정보화를 위한 전자통신설비를 구비하는 건축물에 적용하는 통합 접지시스템을 구성하는 기능용 및 피뢰설비용 접지전극의 서지전류에 대한 응답특성을 평가하기 위하여 매설지선, 동축구조형 탄소혼합물 접지전극과 탄소접지전극모듈의 임펄스전류에 대한 과도접지임피던스와 접지임피던스의 주파수의존성에 대한 실험적 연구의 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

과두시간 1~80[μs]의 임펄스전류에 대한 과도접지

임피던스와 100[Hz]~10[MHz]의 주파수범위의 정현파 전류에 대한 접지임피던스를 평가한 결과, 탄소접지전극모듈의 접지저항은 다른 형태의 접지전극의 접지저항보다 낮았다. 접지임피던스의 과도적 특성은 뇌임펄스전류의 과두시간보다 훨씬 짧은 2[μs] 이내에서만 나타났기 때문에 피뢰설비의 접지성능을 나타내는 지표가 되는 과두시간 10[μs]인 뇌임펄스전류에 대한 규약접지임피던스는 오히려 접지저항보다 낮았다. 수십 [kHz] 이하의 주파수범위에서 탄소혼합물 접지전극의 접지임피던스의 주파수의존성은 용량성을 나타내었으며, 그 이상의 주파수에서는 유도성으로 변하며 1 [MHz] 이상의 주파수에서 접지임피던스는 대단히 증가하는 특성을 나타내어 접지성능이 현저히 저하됨을 알 수 있었다. 결론적으로 뇌임펄스전류에 대한 응답특성이 양호한 탄소혼합물 접지전극을 대형 접지전극과 병용하여 고주파수에서 접지임피던스가 낮은 통합 접지시스템의 구현이 합리적인 접지설계의 방법 중의 하나인 것으로 판단된다.

References

- [1] R Kosztaluk, M. Loboda, D. Mukhedkar, "Experimental Study of Transient Ground Impedances", IEEE Tras. PAS, Vol.100, No.11, pp.4653~4660, 1981.
- [2] B. R. Gupta and B. Thapar, "Impulse impedance of grounding grids", IEEE Trans. Vol.PAS-99, No.6, pp.214-218, 1980.
- [3] S. Visacro, "A didactic general approach of grounding behavior for lightning currents", Proceedings of the 27th ICLP-International Conference on Lightning Protection, Avignon, France, Vol. 1, pp. 508-513, 2004.
- [4] 이복희, 이승철, "접지의 핵심 기초 기술" 도서출판 의제, pp.1~23, 1999.
- [5] Leonid Grcev, "High frequency performance of ground rods in highly resistive soil". International Conference on Grounding and Earthing, pp.85-89, 2000.
- [6] L Grcev, "Modeling of grounding systems for better protection of communication installations against effects from electric power system and lightning", IEE Conf. Pub., No. 484, pp. 461-468, 2001.
- [7] IEEE Std 81.2-1991, "IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems", IEEE Inc., pp. 4~15, 1991.
- [8] 최중혁, 최영철, 이복희, "수직 접지전극의 접지임피던스 측정에서 도전유도에 의한 오차 평가", 전기학회 논문지, Vol. 58, No. 9, pp.1778~1783, 2009.

- [9] Bok-Hee Lee, Dong-Cheol Jeong, Su-Bong Lee and Keun-Chul Chang, "Effective Impulse Impedances of Deeply Driven Grounding Electrodes", KIEE Int. Trans. on EA, Vol.4-C, N0.5, pp.207~214, 2004.
- [10] Silverio Visacro, "A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents", IEEE Trans. on P.D., Vol. 22 No. 1, January, 2007.
- [11] S. Visacro, G. Rosado, "Response of Grounding Electrodes to Impulsive Currents: An Experimental Evaluation", IEEE Trans. on E.C., Vol. 51, No. 1, pp. 161-164, 2009.
- [12] Leonid Grcev, "Impulse Efficiency of Ground Electrodes", IEEE Trans. on P.D. Vol. 24, No. 1, pp.441-451, 2009.
- [13] 이복희, 정동철, 이수봉, "봉상 접지전극에서 전류유입 위치에 따른 임펄스접지임피던스 특성", 조명·전기설비학회 논문지, Vol.19, No.1, pp.94~100, 2005.
- [14] Y.Chen and P.Chowdhuri, "Correlation between laboratory and field tests on the impulse impedance of rod-type ground electrodes", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib. Vol. 150. No. 4, pp.420~426, July 2003.
- [15] KS C IEC 62305-1, 피뢰시스템-제1부: 일반원칙, pp.3-15, 2007.

◇ 저자소개 ◇



이강수(李康壽)

1970년 2월 19일생. 1996년 숭실대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 인하대 대학원 전기공학과 박사과정. (주)옵니엘피에스 상무.

Tel : (02)2632-4541

Fax : (02)2671-5313

E-mail : pwrtoy@empal.com



이복희(李福熙)

1954년 6월 29일생. 1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 1995년 호주 Queensland대학 방문교수. 1999년 Cincinnati대학 방문교수. 현재 인하대

IT공대 전기공학부 교수. 본 학회 회장.

Tel : (032)860-7398

Fax : (032)863-5822

E-mail : bhlee@inha.ac.kr