

접지임피던스의 변동이 최소가 되는 동축형 탄소접지전극의 길이의 산정

(Determination of the Length of Coaxial Type Carbon Grounding Electrode to Minimize the Fluctuation of Grounding Impedance)

이강수* · 김종호 · 이복희**

(Kang-Soo Lee · Jong-Ho Kim · Bock-Hee Lee)

Abstract

For the surge currents like lightning or ground fault currents containing high frequency components which cause the electromagnetic interferences for the electronic devices and communication equipment, the grounding impedances give the significantly composite characteristics which are dependent on the frequency of surge currents. In this paper, the analytical model and method for determining the optimal length of the newly developed coaxial type carbon ground electrode which has a little fluctuation in grounding impedance with frequency. The length of minimizing the fluctuation of grounding impedance by changing frequency from 100[Hz] to 1[MHz] was determined, and the validity of this proposed method was confirmed by comparing with the simulated and measured data.

Key Words : Grounding Impedance, Coaxial Type Carbon Ground Electrode, Optimal Length, Distributed Parameter Circuit Model, Frequency-Dependent Grounding Impedance

1. 서 론

최근 전기설비 관련 국제표준을 우리나라의 표준으로 받아들이고 있으며, 국내의 접지 관련 규정 또한 IEC 60364, IEC 62305 등과 같은 국제표준을 변경 없이 도입하여 내선규정 및 각종 시설 기준을 개정하였다. 이러한 표준의 주요 내용은 전력, 통신, 피뢰 등 모

든 접지를 하나의 접지전극으로 사용하는 통합접지를 기본으로 하고 있다. 이러한 접지시스템은 일반건축물이나 주택, 공동주택 등 고주파의 노이즈가 거의 발생하지 않는 환경에서는 매우 유효한 접지시스템이라 할 수 있다.

현재 국내의 접지 설계 및 시공사들은 대부분 접지 저항만을 고려하여 매설지선이나 대지를 천공하여 길이가 긴 수직 접지전극 등을 시설하고 있다. 이렇게 규모가 큰 접지전극들은 대부분 고주파수에서 접지임피던스가 급격하게 증가하는 특성을 보이며 이는 고주파 고장전류에 대하여 기기 및 인체의 안전을 보장할 수 없는 조건을 형성하게 된다. 고주파성분을 함유

* 주저자 : 인하대학교 대학원 박사과정
** 교신저자 : 인하대학교 IT공대 전기공학부 교수
Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822
E-mail : bhlee@inha.ac.kr
접수일자 : 2010년 8월 12일
1차심사 : 2010년 8월 17일
심사완료 : 2010년 12월 14일

한 뇌전류와 전자통신기기의 전자기장해를 유발하는 고주파 이상전류에 대하여 접지전극은 주파수에 의존적인 대단히 복잡한 임피던스의 특성을 보인다 [1-2].

본 논문에서는 최대 1 [MHz]까지의 주파수 변화에 따른 접지임피던스의 변동이 최소가 되도록 개발된 동축형 탄소접지전극의 정확한 접지임피던스의 산출을 위해 분포정수회로모델을 이용하여 시뮬레이션하였으며, 그 결과를 측정결과와 비교·분석하였다. 직선형 접지전극에 대한 단층 대기구조에서의 분포정수회로모델을 바탕으로 탄소접지전극의 특성을 추가한 모델을 구현하였다. 회로의 과도적인 특성을 분석을 위해 EMTP 프로그램으로 시뮬레이션하였으며, 주파수 변화에 따른 접지임피던스의 변동이 최소가 되는 최적 접지설계기법을 개발하여 접지전극의 최적 길이를 산정하는 방법을 제안하였다.

2. 본 론

2.1 동축구조 탄소접지전극의 분포정수회로 모델

고주파성분을 포함하는 뇌전류와 전자기장해를 유발하는 고주파 이상전류가 접지전극에 인가되는 경우 접지전극의 인덕턴스와 토양의 커패시턴스에 의한 임피던스특성이 나타나며, 이러한 접지전극의 고주파 전류에 대한 임피던스특성은 분포정수회로모델을 이용하여 해석할 수 있다.

분포정수회로모델은 그림 1과 같이 접지전극을 이루는 금속도체인 동의 저항과 인덕턴스, 그리고 접지전극이 매설된 토양의 컨덕턴스와 커패시턴스를 분포회로정수로 표현하며, 분포회로정수와 전송선로의 전파방정식을 이용하여 접지전극의 접지임피던스를 산출한다. 접지전극 도체의 저항률은 토양의 저항률에 비해서 대단히 작으므로 접지시스템을 설계할 때 접지전극 자체의 저항(R)은 무시할 수 있으므로, 접지전극의 인덕턴스 성분만으로 나타내었다[1,3-4].

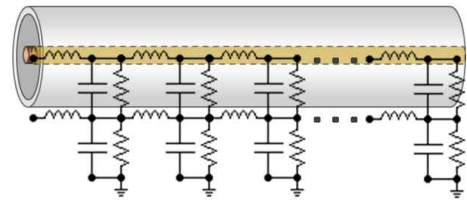
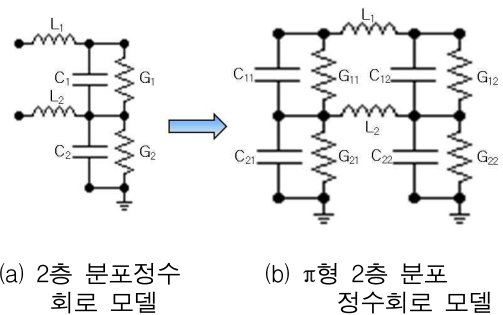


그림 1. 동축형 탄소접지전극의 2층 구조 분포정수회로 모델

Fig. 1. Double-layered distributed parameter circuit model of the coaxial type carbon ground electrode

탄소접지전극의 경우 직선형 접지전극의 일종으로 접지임피던스에 대한 모의가 가능하나 탄소접지전극 내부에 충전된 탄소혼합물의 특성이 주파수에 따라 접지임피던스에 영향을 미치므로, 그 특성을 반영하기 위하여 그림 1과 같이 분포정수회로의 2층 구조 모델을 제안하였다.

2.2 분포회로정수의 산정



(a) 2층 분포정수회로 모델

(b) π 형 2층 분포정수회로 모델

그림 2. 2층 구조 분포회로모델의 정수

Fig. 2. Parameters of the double-layered distributed circuit model

그림 2 (a)의 2층 구조 분포정수회로 모델의 경우 인가점에서 충전재의 특성이 고려되지 않고 단락되어 있는 효과가 나타나기 때문에, 그림 2 (b)와 같이 π 형 모델로 분포정수회로 모델을 선정하여 충전재의 특성이 인가점에서도 반영이 되도록 분포정수회로 모델을 개선하였다. 2층 구조 분포정수회로는 크게 충전재의 특성을 반영하기 위한 상층의 분포정수회로와 토양의 영향을 반영하기 위한 하층의 분포정수회로로 이루어

져 있기 때문에, 각각의 분포정수회로를 산정하여야 모의가 가능하다.

그림 2와 같이 2층 구조 분포정수회로 모델의 분포회로정수를 먼저 계산하고, π 형 2층 분포정수회로 모델에 맞도록 분포회로정수를 수정하여 동축형 탄소접지전극의 분포회로정수를 산정하였다. 하층의 분포회로정수 G_2, C_2, L_2 는 외부전극에 의한 접지저항(R_0)으로 산정할 수 있다. 접지저항(R_0)은 접지전극 주변토양의 대지저항률에 의해 결정되며, 동축형 탄소접지전극을 수평으로 매설한 때에는 매설지선의 접지저항을 산출하는 식 (3)을 이용하였다. 전송선로 이론에 의하면 임의의 형태의 송전선로에 대하여 분포회로정수 G, C, L 은 식 (1), (2)과 같은 상관관계를 갖는다.

$$C/G = \epsilon_r \epsilon_0 \rho \quad (1)$$

$$LC = \mu_0 \epsilon_r \epsilon_0 \quad (2)$$

단, ϵ_r 은 토양의 비유전율, ϵ_0, μ_0 는 진공의 유전율과 투자율이다.

이러한 G, C, L 의 상관관계를 통하여 C 와 L 을 산정할 수 있으며 이때 동축형 탄소접지전극의 수평매설 시 분포회로정수는 식 (3)~(6)과 같다[5,6].

$$R_0 = \frac{\rho}{\pi l} \left[\ln \left(\frac{2l}{\sqrt{2rs}} \right) - 1 \right] \quad [\Omega] \quad (3)$$

$$G_2 = \frac{\pi}{\rho} \frac{1}{\ln \left(\frac{2l}{\sqrt{2rs}} \right) - 1} \quad [S/m] \quad (4)$$

$$C_2 = \frac{\pi \epsilon_r \epsilon_0}{\ln \left(\frac{2l}{\sqrt{2rs}} \right) - 1} \quad [F/m] \quad (5)$$

$$L_2 = \frac{\mu_0}{\pi} \ln \left(\frac{2l}{\sqrt{2rs}} \right) - 1 \quad [H/m] \quad (6)$$

대지의 비유전율은 그 측정이 매우 어렵고 수분의 함유량 및 포함된 수분의 저항률 등에 따라 그 값이 다양하게 변하기 때문에 문헌에 제시된 비유전율을 적용하여 시뮬레이션하였다. 건조한 토양의 비유전율은

약 2~3 정도이고 물의 비유전율이 대략 80 정도인 것을 고려하여, 10~80의 범위의 비유전율에 대하여 모의 해석하였다[6-7].

또한 상층의 충전재를 모의하는 분포회로정수 파라미터는 토양과 다르기 때문에 탄소의 함유량에 따른 충전재의 저항률과 비유전율을 측정하여 이 결과를 상층의 분포회로정수 G_1, C_1 의 산정하기 위한 시뮬레이션에 반영하였다. 해석한 결과에 따르면 각 토양의 특성과 주파수에 따라 접지임피던스의 변동이 최소가 되는 접지극의 길이가 존재하며, 이 길이를 각 토양의 특성과 주파수에 대한 접지임피던스의 변동이 최소가 되는 길이로 정의한다.

2.3 시료 탄소접지전극

동축형 탄소접지전극의 외관은 지름이 76 [mm]인 철제관이다. 중심도체는 지름이 16 [mm]이고 길이가 2.2 [m]인 철봉을 사용하였으며, 충전재로는 레미탈과 흑연분말을 사용하였다. 흑연분말의 함유율 20 [%]로 혼합하여 제작하였다. 탄소접지전극 자체의 접지임피던스도 주파수에 따라 변동하며, 대략적으로 상용주파수에서는 0.5 [Ω], 100 [kHz]에서 1 [Ω]이하이었다.

3. 결과 및 고찰

동축형 탄소접지전극의 시뮬레이션기법을 이용하여 접지전극의 접지임피던스를 산출하고 각 주파수에 따른 접지전극의 길이별 접지임피던스를 나타내어 접지임피던스의 변동이 최소가 되는 접지전극의 길이를 산정하는 기법을 제안하였다. 또한 대지저항률이 다른 2곳을 선정하여 접지임피던스의 변동이 최소가 되는 길이의 접지전극을 직접 시공하여 시뮬레이션한 결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

3.1 접지임피던스의 토양의 비유전율에 대한 의존성

본 연구에서 제안된 2층 구조 분포정수회로모델을

이용하여 동축형 탄소접지전극의 접지임피던스를 시뮬레이션하였으며, 그 결과를 기반으로 주파수에 따른 접지임피던스의 변동을 최소로 하는 접지전극의 길이를 산정하는 방법을 제시하였다.

그림 3은 10 [m] 동축형 탄소접지전극을 300 [$\Omega \cdot m$]의 대지에 수평으로 설치한 경우 EMTP프로그램을 이용하여 시뮬레이션한 접지임피던스의 주파수의존성을 나타낸 것이다. 토양의 비유전율은 이미 알려진 1~80 사이의 값 중 4가지를 선택하여 시뮬레이션한 결과를 나타내었다. 약 50 [kHz] 이하의 주파수에서는 비유전율의 크기에 상관없이 탄소접지전극의 접지저항에 수렴하는 거의 일정한 접지임피던스를 나타내었고, 약 100 [kHz] 이상의 주파수에서는 토양의 비유전율의 크기에 따라 접지임피던스가 접지저항보다 커지는 유도성 특성을 보이거나 접지저항보다 작아지는 용량성 특성을 나타내었다. 대지저항률 300 [$\Omega \cdot m$], 비유전율 20에서 주파수의 변화에 따라 접지임피던스가 거의 변화하지 않는 것으로 나타났다. 이 결과를 통해 토양의 비유전율은 주파수 변화에 따른 접지임피던스의 변동이 최소가 되는 접지설계에서 가장 중요한 핵

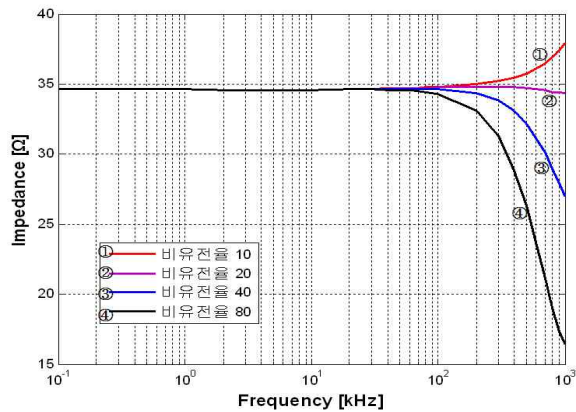


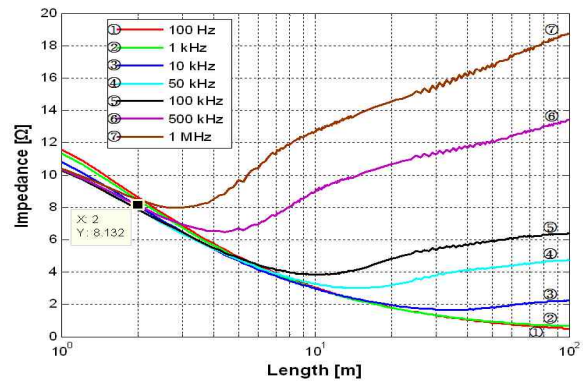
그림 3. 수평으로 매설된 10[m] 탄소접지전극의 접지임피던스의 주파수의존성에 대하여 토양의 파라미터로 시뮬레이션한 결과

Fig. 3. Simulated results for the frequency-dependent grounding impedance of the horizontally buried 10[m] carbon grounding electrode as a parameter of the relative dielectric constant of soil

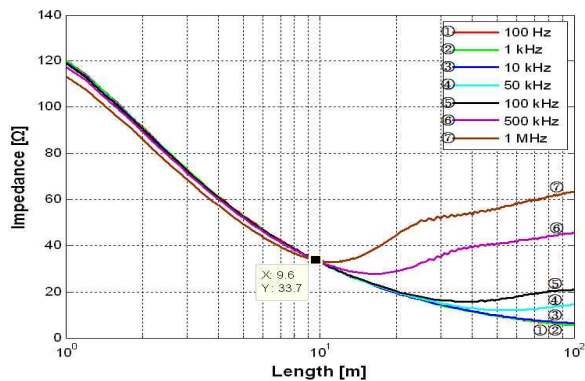
요소이며, 최적의 접지전극 길이의 산정에 우선적으로 고려해야 할 요소임을 알 수 있다.

3.2 접지임피던스의 변동이 최소가 되는 접지전극의 길이

동축형 탄소접지전극의 길이가 증가함에 따른 특정 주파수에서의 접지임피던스를 모의한 결과 동축형 탄소접지전극의 길이가 짧고 대지저항률이 높은 경우 용량성 접지임피던스가 나타났으며, 탄소접지전극의 길이가 길어질 때에는 접지전극 내부의 인덕턴스 영



(a) 대지저항률 23[$\Omega \cdot m$], 비유전율 20



(b) 대지저항률 280[$\Omega \cdot m$], 비유전율 20

그림 4. 접지전극의 길이에 따른 동축형 탄소접지전극의 접지임피던스의 변동

Fig. 4. Fluctuation of grounding impedance with the length of the coaxial type carbon grounding electrode

접지임피던스의 변동이 최소가 되는 동축형 탄소접지전극의 길이의 산정

항이 커져 유도성 접지임피던스가 나타났다. 제안된 시뮬레이션기법을 이용하여 100 [Hz]~1 [MHz]의 주파수 범위에서 동축형 탄소접지전극의 길이가 증가함에 따른 접지임피던스를 나타내었을 때 각 주파수별 차이가 가장 작은 길이가 나타나게 되는데 이 길이가 접지임피던스의 변동을 최소로 하는 길이라 할 수 있다. 따라서 이러한 길이를 산출하여 그 결과를 입증하기 위해 대지저항률이 매우 낮은 23 [$\Omega \cdot m$]의 저항률인 장소와 대지저항률이 비교적 높은 280 [$\Omega \cdot m$]인 위치에 대하여 접지임피던스의 변동이 최소가 되는 접지전극의 길이를 산출하였다.

그림 4는 대지저항률이 비교적 높은 280 [$\Omega \cdot m$], 비유전율 20의 토양과 대지저항률이 비교적 낮은 23 [$\Omega \cdot m$], 비유전율 20의 조건에서 탄소접지전극의 접지임피던스를 모의한 결과이다. 동축형 탄소접지전극의 길이가 짧고 대지저항률이 높은 경우 용량성 성분이 커서 주파수가 높을 때 접지임피던스가 접지저항보다 낮게 나타났으며, 탄소접지전극의 길이가 길어질 때에는 접지전극 내부의 인덕턴스 영향이 커져 접지저항보다 큰 접지임피던스가 나타났다.

따라서 탄소접지전극의 길이가 길어짐에 따라 용량성에서 유도성으로 변화되는 과정에서 주파수에 따른 접지임피던스의 변동이 가장 작게 나타나는 길이를 산출할 수 있다. 즉 그림 4(a)의 높은 대지저항률에서는 9.6 [m], 그림 4(b)의 낮은 대지저항률에서는 2 [m]의 길이에서 접지임피던스의 변동이 가장 적었으며, 그 길이를 주파수에 따른 접지임피던스 변동을 최소화 할 수 있는 최적 길이로 정하였다.

일반적인 토양의 대지저항률은 10~1,000 [$\Omega \cdot m$]이고 토양의 비유전율이 1~80으로 알려져 있기 때문에, 각 토양의 특성에 따라 탄소접지전극의 접지임피던스 변동성이 가장 적은 길이인 임계 길이를 산출하여야 접지시스템을 시공할 때 탄소접지전극의 길이를 결정할 수 있다. 토양의 저항률과 비유전율에 따른 접지임피던스의 변동이 최소가 되는 동축형 탄소접지전극의 최적 길이를 각각 분포정수회로 모델로 모의하였으며, 그 산출 결과를 최적의 탄소접지전극 길이의 산정을 위한 기준으로 표 1에 제시하였다.

표 1. 토양의 저항률과 비유전율에 따른 접지임피던스의 변동이 최소가 되는 수평으로 매설된 동축형 탄소접지전극의 길이(단위 : m)

Table 1. Length of the horizontally-buried coaxial type carbon grounding electrode to minimize the fluctuation of grounding impedance with the resistivity and relative dielectric constant of soil (unit : m)

저항률 $\Omega \cdot m$ \ 비유전율	10	20	40	80
10	1.8	1.8	1.8	1.8
25	2.1	2.2	2.2	2.4
50	2.5	2.6	2.9	3.5
75	2.8	3.1	3.8	5.1
100	3.1	3.7	4.9	6.5
200	4.7	6.7	9.4	11.2
300	7	10.2	13.2	13.7
400	9.7	13.5	16.1	15.6
500	12.4	16.4	18.3	29.2
600	15	18.8	20	29.2
700	17.2	21	20.4	29.2
800	19.4	23	22.2	30.8
900	21.4	24.6	23	30.8
1,000	23.4	26	42.2	60.2

3.3 접지임피던스의 측정값과 시뮬레이션 결과의 비교

동축형 탄소접지전극의 접지임피던스의 변동이 최소가 되는 길이를 결정하는 시뮬레이션결과의 정확도를 입증하기 위해 실측값과 비교·검토하였다. 접지임피던스는 전자유도에 의한 오차가 최소가 되도록 수정된 전위강하법을 이용하여 측정하였으며, 실험계를 그림 5에 나타내었다. 측정전류는 함수발생기와 전력증폭기로 인가하였으며, 주파수대역이 80 [MHz]인 차동전압프로브와 10 [MHz]의 주파수대역인 전류프로브를 사용하여 전위와 접지전류를 측정하였다. 측정된 신호는 A/D 변환기를 거쳐 대역통과필터를 통과한 후 PC 기반 접지임피던스분석기로 분석되었다.

23 [$\Omega \cdot m$]의 대지저항률을 갖는 토양에 2 [m]의 동축형 탄소접지전극을 시공하고, 280 [$\Omega \cdot m$]의 대지저

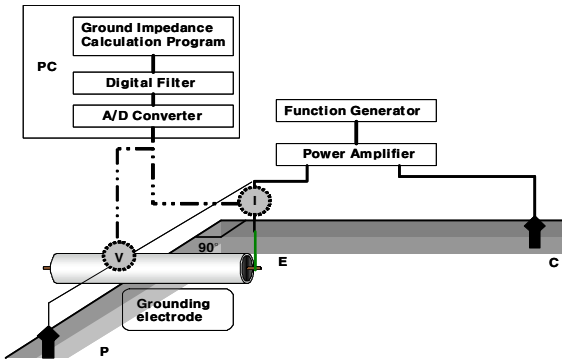
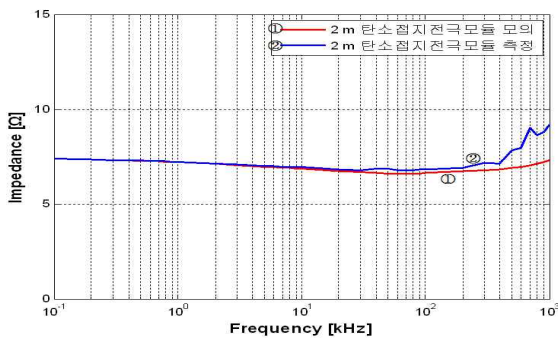


그림 5. 수정된 전위강하법을 이용한 접지임피던스 측정 회로

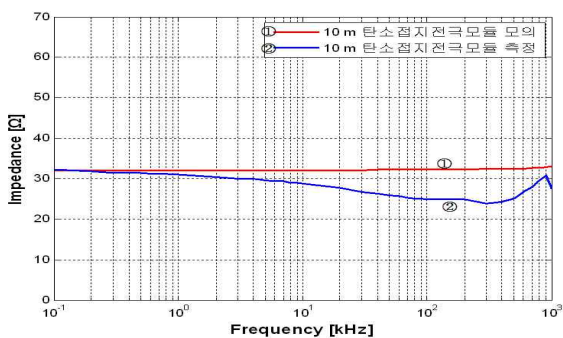
Fig. 5. Grounding impedance measurement circuit using the revised fall of potential method

항렬인 대지에 10 [m]의 동축형 탄소접지전극을 시공하여 접지임피던스를 측정하였다. 주파수에 따른 탄소접지전극의 접지임피던스를 시뮬레이션하고 실측한 결과를 그림 6에 비교하여 나타내었다.

해석결과와 실측값은 대체적으로 일치하였으며, 고주파 영역에서 접지임피던스의 해석결과와 실측값 사이 약간의 차이가 있으나 이것은 실제 토양의 불균일성에 기인된 차이로 판단되며 주파수 변화에 따른 접지임피던스의 경향성이 측정결과와 매우 유사하며 접지임피던스의 변동이 적다는 것을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서 제안한 탄소접지전극의 접지임피던스의 산출과 주파수에 따른 접지임피던스 변동이 적은 탄소접지전극의 길이를 산정하는 방법이 적정하며 신뢰성이 있음을 알 수 있다.



(a) 대지저항률 23[Ω·m], 비유전율 20



(b) 대지저항률 280[Ω·m], 비유전율 20

그림 6. 동축형 탄소접지전극의 접지임피던스의 주파수의 존성

Fig. 6. Frequency-dependent grounding impedance of the coaxial type carbon grounding electrodes

4. 결 론

본 논문은 동축형 탄소접지전극의 접지임피던스를 해석하는 모델을 제안하여 접지임피던스의 주파수의 존성을 분석하였고, 접지전류의 주파수 변동에 따른 접지임피던스의 변동을 최소화 하는 접지전극의 길이를 산정하고 그 결과의 정확성을 입증하기 위한 모의와 실측 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 동축형 탄소접지전극의 접지임피던스의 주파수의 존성을 분석하는 2층 구조 분포정수회로 모델을 제안하였으며, 분석결과와 측정값과는 비교적 잘 일치하였다.
- (2) 접지전극의 길이가 길어짐에 따라 용량성 접지임피던스에서 유도성 임피던스로 변화되는 과정에서 주파수에 따른 접지임피던스의 변동이 가장 작게 나타나는 최적의 길이를 산출하는 설계기법이 도출되었다. 본 연구에서 제안된 접지설계기법은 피뢰설비와 같은 고주파용 접지시스템의 설계·시공에 적용될 것으로 기대된다.

본 연구는 중소기업청과 지방자치단체 지원에 의하여 (과제번호 : 39204) 수행된 과제임

References

- [1] M. E. Almeida and M. T. Correia de Barros "Fundamental considerations on long ground electrodes design", 13th International Symposium on High Voltage Engineering, pp.241~244, 2003.
- [2] L. Grcev, "Lightning Surge Characteristics of Earthing Electrodes," 29th International Conference on Lightning Protection, pp. 5a-1-1~16, 2008.
- [3] 이복희, 이승철, "접지의 핵심 기초 기술", 도서출판 의제, pp.46~56, pp.73~78, pp.84~85 1999.
- [4] E. D. Sunde, "Surge Characteristics of a Buried Bare wire", AIEE Transactions, Vol. 59, pp. 987~991, 1940.
- [5] 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.
- [6] W. H. Hayt, J. A. Buck, "Engineering Electromagnetics, sixth edition", McGraw-Hill, pp.183~186, 225~231, 442~448, 540~543, 2001.
- [7] S. Visacro, "A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22 No. 1, pp. 381~386, 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)의제전기설비 연구원 연구소장.

Tel : (02)2632-4541

Fax : (02)2671-5313

E-mail : pwrtoy@empal.com



김중호(金鍾昊)

1981년 9월 8일생. 2007년 2월 인하대 공대 전자공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel. (032) 860-7398,

Fax. (032) 863-5822

E-mail : alchemic98@naver.com



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 인하대 IT

공대 전기공학부 교수. 본 학회 회장.

Tel : (032)860-7398

Fax : (032)863-5822

E-mail : bhlee@inha.ac.kr