

임펄스전류에 의한 매설지선의 과도임피던스특성에 대한 모의해석

논 문

58-10-5

Simulated Analysis for the Transient Impedance Behaviors of Counterpoises Subjected to the Impulsive Currents

조 정 현* · 이 복 희†
(Jeong-Hyeon Joe · Bok-Hee Lee)

Abstract - A ground electrode subjected to lightning surge current shows the transient impedance behaviors. The ground electrode for protection against lightning should be evaluated in view of the transient grounding impedance and conventional grounding impedance, not ground resistance. The transient impedance characteristics of ground electrodes are influenced by the shape of ground electrode and the soil characteristics, as well as the waveform of lightning surge current. In order to propose a simulation method of analyzing the transient impedance characteristics of the grounding system in practical use, this paper suggests a theoretical analysis method of distributed parameter circuit model to simulate the transient impedance characteristics of counterpoise subjected to lightning surge current. EMTP and Matlab programs were employed to compute the transient grounding impedances of three counterpoises with different lengths. As a consequence, the simulated results using the proposed distributed parameter circuit model are in good agreement with the measured results.

Key Words : Lightning, Impulsive current, Transient grounding impedance, Counterpoise, Distributed circuit model

1. 서 론

피뢰시스템을 이루는 구성요소 중 하나인 접지전극의 역할은 뇌서지전류를 안전하게 대지로 방류시키는 것이다[1]. 피뢰설비용 접지전극은 상용주파수에서 측정되는 접지저항이 작아야 할뿐만 아니라 뇌서지전류에 대하여도 우수한 응답특성이 요구된다. 상용주파수와 같은 저주파대역에서는 대지의 저항성분이 접지성능에 지배적으로 영향을 미치지만, 뇌서지전류와 같이 과도적으로 변화하는 경우 접지저항과 더불어 함유된 고주파수에 의해 접지전극을 이루는 금속도체의 인덕턴스와 토양의 커패시턴스에 의한 임피던스의 영향이 작용한다. 따라서 피뢰시스템용 접지전극은 접지저항이 아닌 과도접지임피던스와 규약접지임피던스로 평가되어야 한다.

또한 접지전극에 뇌서지가 인가된 경우 접지임피던스의 과도적 특성은 뇌서지 전류의 크기와 파형, 접지전극의 형상, 토양의 성질 등 여러 가지 요인에 따라 변하게 된다. 피뢰설비용 접지시스템의 뇌서지전류에 대한 정확한 성능을 파악하기 위해서는 접지임피던스의 과도적 특성의 해석이 필요하므로 이에 대한 실험적·이론적 연구가 많이 수행되어 왔다[2-5].

본 논문에서는 피뢰설비용 접지전극의 뇌임펄스전류에 대한 과도접지임피던스의 과도적 특성을 이론적으로 해석하는

방법을 제안할 목적으로 길이가 다른 세 가지 매설지선을 대상으로 분포정수회로모델을 적용하는 모의해석기법을 구현하였으며, EMTP와 Matlab 프로그램으로 계산하였다. EMTP해석은 Heidler 전류원을 임펄스전류로 사용하였으며, 임펄스전류가 인가되는 접지도선의 인덕턴스 영향도 고려하였다. 이러한 방법으로 길이가 다른 매설지선에 대한 모의해석결과와 실험결과를 비교하여 본 연구에서 제안하는 분포정수회로모델의 모의해석기법의 타당성을 검토하였다.

2. 본 론

2.1 모의해석방법

매설지선은 주로 수직접지전극이나 메쉬를 설치하기 힘든 산간지역에 시설되며, 산간지역의 토양은 보통 상당히 큰 저항률을 보인다. 본 논문에서는 약 360 ~ 540 Ω·m의 저항률의 토양으로 이루어진 산간지역에 그림 1과 같이 시설한 길이(l)가 10, 30, 50 m인 세 가지 매설지선을 대상으로 분포정수회로모델을 이용하여 임펄스전류에 의해 접지전극에 발생하는 전압과 과도임피던스특성을 모의해석하였으며, 그 결과를 측정결과와 비교·분석함으로써 타당성을 검토하였다. 각 매설지선은 그림 1과 같이 임펄스전류를 인가하기 위해 인출된 접지도선에 전기적으로 접속되어 있으며, 본 연구에서는 매설지선 자체의 특성뿐만 아니라 접지도선의 인덕턴스에 의한 영향 또한 고려하였다. 본 절에서는 매설지선의 모의해석에 이용한 분포정수회로모델과 EMTP의 임펄스전류원, 그리고 접지도선의 인덕턴스 산출방법에 대하여 기술하였다.

* 준 회원 : 인하대 IT공대 전기공학과 석사과정

† 교신저자, 펠로우회원 : 인하대 IT공대 전기공학과 교수

E-mail : bhlee@inha.ac.kr

접수일자 : 2009년 5월 6일

최종완료 : 2009년 8월 13일

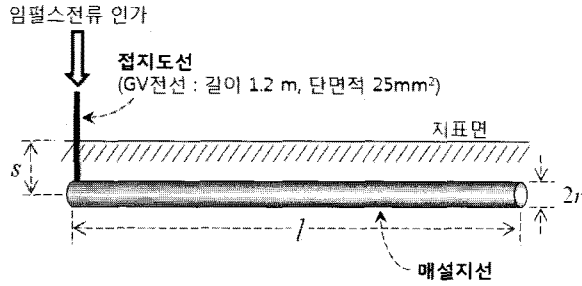


그림 1 모의와 측정대상 매설지선의 구성

Fig. 1 Configuration of a counterpoise for the simulations and measurements

2.1.1 분포정수회로모델

분포정수회로모델은 수직접지전극과 매설지선과 같은 직선형 접지전극의 모의해석에 사용되는 모델 중 하나이다. 서지나 고장전류가 접지전극으로 유입될 때, 매설된 접지전극을 따라 분산된 누설전류의 형태로 대지로 방류된다. 이러한 전류의 분산특성은 전송선로(Transmission line) 이론을 통하여 이론적으로 구현이 가능하며, 이를 구현한 모의해석방법이 본 논문에서 이용한 분포정수회로모델이다[2].

분포정수회로모델은 그림 2와 같이 접지전극을 이루는 금속도체인 동선의 저항(R)과 인덕턴스(L), 그리고 접지전극이 매설된 토양의 컨덕턴스(G)와 커패시턴스(C)를 분포회로정수로 표현하며, 분포회로정수와 전송선로의 전파방정식을 이용하여 접지전극의 접지임피던스를 산출한다[5].

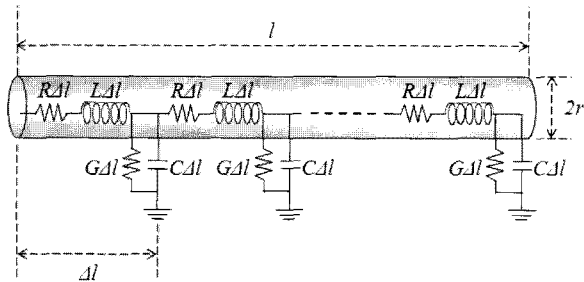


그림 2 매설지선의 분포정수회로모델의 등가회로

Fig. 2 The equivalent circuit for the distributed parameter circuit model of counterpoise

접지전극을 이루는 동선의 저항률 $10^{-8} \Omega \cdot m$ 에 비해서 토양의 대지저항률은 $1 \sim 10^6 \Omega \cdot m$ 으로 $10^8 \sim 10^{14}$ 배의 차이가 나기 때문에 접지시스템을 설계할 때 접지전극 자체의 저항(R)은 무시할 수 있으므로[6], 본 연구에서는 접지전극을 이상적인 도체로 가정하였다. 접지전극 자체의 저항은 무시할 수 있으므로 접지저항(R_0)은 접지전극 주변의 토양의 저항률에 의해 결정되며[6], 토양의 저항률과 접지전극의 형상에 의해 식 (1)의 Sunde의 매설지선의 접지저항식[7]과 같은 관계를 갖는다. 분포정수회로모델에서 토양에 의한 단위길

이당 컨덕턴스는 접지저항과 관련된 회로정수이며, 식 (1)의 접지저항의 역수를 접지전극의 길이로 나누어 식 (2)과 같이 산정한다. 토양에 의한 단위길이당 컨덕턴스의 산정에 이용되는 Sunde의 접지저항식은 참고문헌[7,8]의 이론적 수식전개에 의해 유도된 이론식이다.

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

$$G = \frac{1}{R_0 l} = \frac{\pi}{\rho} \frac{1}{\ln \left(\frac{2l}{\sqrt{2rs}} \right) - 1} \quad [S/m] \quad (2)$$

단, l 은 매설지선의 길이, r 은 반경, s 는 매설깊이, ρ 는 토양의 저항률이다.

전송선로 이론에 의하면 임의의 형태의 송전선로에 대하여 분포회로정수 G , C , L 은 식 (2)와 (3)과 같은 상관관계를 갖는다[9][10].

$$C/G = \epsilon_r \epsilon_0 \rho \quad (3)$$

$$LC = \mu_0 \epsilon_r \epsilon_0 \quad (4)$$

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

이러한 G , C , L 의 상관관계와 식 (4)와 같이 산정된 G 를 통하여, C 와 L 을 식 (5), (6)과 같이 산정할 수 있다[7][9,10].

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

$$L = \frac{\mu_0 \epsilon_r \epsilon_0}{C} = \frac{\mu_0}{\pi} \left[\ln \left(\frac{2l}{\sqrt{2rs}} \right) - 1 \right] \quad [H/m] \quad (6)$$

식 (1), (2), (5), (6)의 매설지선 분포회로정수와 전송선로의 전파방정식을 이용하여 매설지선의 전류 인가점에서 바라본 임피던스를 식 (9)과 같이 산출한다. α 와 Z_0 는 각각 전파정수와 특성임피던스로 분포회로정수와 관계는 식 (7), (8)과 같으며, 접지전극에 인가된 전류는 모두 대지로 방출되므로 매설지선 끝단은 무부하상태로 가정하였다[5][11,12].

$$Z = \frac{E_s}{I_s} = \frac{e^{2\alpha l} + 1}{e^{2\alpha l} - 1} Z_0 \quad (7)$$

$$\alpha = \sqrt{j\omega L(G + j\omega C)} \quad (8)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{j\omega L}{(G + j\omega C)}} \quad (9)$$

본 논문에서는 EMTP를 이용하여 매설지선의 분포정수회로모델을 적용한 해석기법을 구현하기 위하여 매설지선을

100 개의 미소구간(segment)으로 나누었으며, 각 미소구간의 컨덕턴스, 커패시턴스, 인덕턴스는 분포정수와 미소구간의 길이를 적용하여 각 미소구간에 대한 분포회로정수를 계산하였다.

2.1.2 EMTP의 임펄스전류원

EMTP의 전류원으로 Heidler 임펄스전류원을 사용하였으며, Heidler가 제안한 임펄스전류원의 수식적 표현은 식 (8)과 같다[3].

$$i(t) = I_0 \left[\frac{t}{\tau_1} \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) - \frac{t}{\tau_2} \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \right] \quad (8)$$

여기서, I_0 는 전류펄스의 진폭, τ_1 은 파두시정수(front time constant), τ_2 는 감쇠시정수(decay time constant), n 은 2~10의 값을 갖는 지수, n 은 진폭보정계수(amplitude correction factor)이다.

각 매설지선의 뇌서지전류에 대한 과도접지임피던스의 모의해석을 위하여, 실험에 사용된 임펄스전류와 동일한 파형을 Heidler 임펄스전류원을 이용하여 구현하였으며, 각 매설지선의 분포정수회로모델에 인가하여 모의해석에 활용하였다.

2.1.3 접지도선의 영향

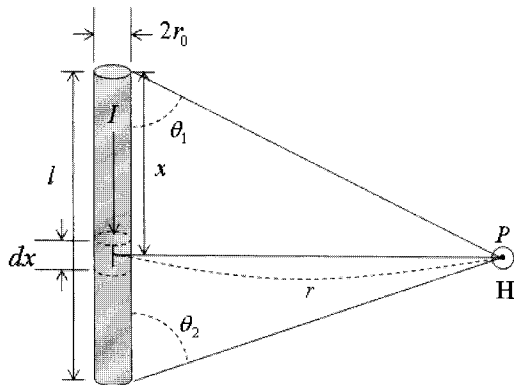


그림 3 유한길이의 도선에 흐르는 전류에 의한 자계의 세기
Fig. 3 Magnetic field intensity induced by the current flowing through the conductor with a finite length

모의해석결과와의 비교를 위한 실측결과를 얻기 위하여 접지임피던스를 측정할 때, 접지임피던스는 인가전류와 매설지선의 전위의 측정에 의해 산출된다. 이 때, 검출된 매설지선의 전위에는 접지전극의 전위뿐만 아니라 인출용 접지도선의 전압강하가 포함하며, 접지전극에 접속된 접지도선의 인덕턴스가 1 μH 이면, 접지임피던스는 주파수 1 MHz에서 인출용 접지도선에 의해 6.28 Ω 증가하게 되고, 10 MHz에서는 62.8 Ω 증가하게 된다. 따라서 고주파수에서 인출용 접지도선의 인덕턴스의 영향을 무시할 수 없으므로, 아래에 제시된 방법으로 접지도선의 인덕턴스를 계산하여, 접지임피던

스 모의해석에 적용하였다.

그림 3과 같은 유한길이의 도선에 흐르는 전류에 의해 임의의 위치 P점에 발생하는 자계의 세기는 Biot-Savart 법칙 [10]을 적용하는 식 (9)으로 계산되며, 유한길이의 도선에 쇄교하는 총 전류자속쇄교수는 식 (10)으로 산출된다. 이 계산된 도선에 쇄교하는 총 전류자속쇄교수를 기초로 하여 식 (11)과 같이 도선의 직경과 길이에 따른 인덕턴스가 산출된다.

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{-l/2}^{l/2} \frac{dx}{r^2} \quad (9)$$

$$\Phi = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{-l/2}^{l/2} \frac{dx}{r} \quad (10)$$

$$L = \frac{\Phi}{I} \quad (11)$$



실험용 매설지선의 한쪽 끝에 연결하여 인출한 접지도선은 그림 1에 표시한 것과 같이 단면적 25 mm²의 GV전선이므로, 이에 대한 모의결과와 측정결과를 표 1을 통하여 제시하였다. LCR미터를 이용하여 측정하였으며, 측정장비의 여건 상 310 mm 이상의 길이의 직선 형태의 도선에 대하여 측정이 불가능하고 도선의 형태에 따라 인덕턴스가 변하므로 측정이 가능한 범위 내의 3가지 길이에 대한 직선형 도선의 인덕턴스 모의결과와 측정결과를 비교하여 제시하였다. 표 1에 제시된 자료와 같이 모의결과가 측정결과와 거의 동일한 값을 나타냄을 확인할 수 있다. 실제 매설지선에 연결된 접지도선은 길이가 1.2 m이므로 이에 대한 인덕턴스의 계산결과는 1.38 μH 이며, 이 계산결과를 그림 4와 같이 EMTP의 매설지선의 분포정수회로에 추가하여 모의해석 시 접지도선의 인덕턴스에 의한 영향을 반영하였다.

표 1 접지도선의 인덕턴스의 측정결과와 모의결과의 비교
Table 1 Comparison between the measured and simulated results of the inductance of ground conductor

길이 [m]	모의결과 [nH]	측정결과 [nH]
0.215	174.21	176.10
0.255	215.14	213.20
0.305	268.05	265.57

2.1.4 모의해석조건

접지전극의 과도특성은 전극형상, 토양의 성질, 서지전류의 파형에 따라 변화한다. 따라서 다양한 조건에서 모의해석결과와 실험결과를 비교·분석하기 위하여, 각기 다른 저항률의 대지에 설치된 3가지 형태의 매설지선에 대하여 다양한 파형의 임펄스전류를 인가하는 실측실험과 모의해석을 수행하였으며, 그 세부조건은 다음과 같다.

접지전극의 형태는 길이가 10, 30, 50 m인 3가지 매설지선이며, 단면적 25 mm^2 의 나동선을 지표면으로부터 깊이 0.5 m에 설치하였다. 전류를 인가하는 접지도선은 길이 1.2 m, 단면적 25 mm^2 의 GV전선을 사용하였으며, 식 (11)을 적용하여 계산한 접지도선의 인덕턴스는 약 $1.38 \mu\text{H}$ 이다.

대지구조는 식 (1)을 적용하여 각 매설지선의 접지저항으로부터 역산한 저항률이 균일한 토양의 단층 구조로 가정하였으며, 접지저항은 측정된 과도접지임피던스가 정상상태에 수렴하는 20~30 μs 구간의 평균값을 채용하였다. 10 m, 30 m, 50 m 매설지선의 접지저항은 각각 83 Ω , 23 Ω , 22.5 Ω 이며, 이와 같은 큰 접지저항을 보이는 이유는 매설지선을 시설한 위치가 산간지역으로 토양의 저항률이 상당히 크기 때문이다. 매설지선은 주로 수직접지전극이나 메쉬를 설치하기 힘든 산간지역에 시설되며, 산간지역은 암반이 존재하고 토양의 입자가 고르지 못해 큰 저항률을 가질 가능성이 크다. 본 연구를 위해 산간지역에 시설된 3가지 길이의 매설지선은 토양의 저항률이 대략 360~530 $\Omega\cdot\text{m}$ 으로 보통의 토양의 저항률이 100 $\Omega\cdot\text{m}$ 정도의 값을 보이는 것과 비교하면 상당히 큰 저항률을 보인다. 따라서 매설지선이 시설된 토양의 큰 저항률에 의해 10 m, 30 m 매설지선의 접지저항이 수십 Ω 의 값을 나타내었다. 토양의 비유전율은 측정이 불가능하여 단일 비유전율로 가정하였다. 건조한 토양의 비유전율이 약 4 정도이고 물의 비유전율이 대략 80 정도임을 고려하여[10], 토양의 비유전율의 범위를 4~80으로 산정하였으며, 실험측정치와 가장 일치하는 결과를 보인 비유전율 80에 대하여 매설지선의 분포정수회로모델을 모의하여 해석하였다.

임펄스전류의 경우에는 측정할 때 인가한 임펄스전류와 동일한 파형의 임펄스전류를 EMTP의 입력전류원으로 사용하였으며, 길이 10, 30, 50 m 매설지선에 대하여 각각 5.6, 2.6, 4.3 μs 의 전류피크(I_{peak})시간을 갖는 임펄스전류 파형에 대하여 모의적으로 해석하여 얻은 결과를 측정결과와 비교·검토하였다.

2.1.5 EMTP를 통한 모델구현 및 모의해석과정

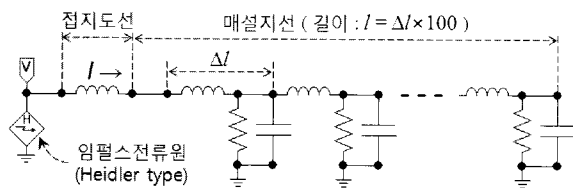


그림 4 EMTP를 이용한 모의대상 매설지선의 등가회로
Fig. 4 Equivalent circuit of a counterpoise for the simulations using EMTP

그림 4는 EMTP를 이용하여 매설지선의 분포정수회로모델을 구현한 등가회로도이다. 길이가 각각 다른 3가지 매설지선에 대하여 매설지선의 길이를 100등분하여 분포정수회로로 구현하였으며, 접지도선의 인덕턴스의 계산결과를 인덕턴스 소자를 통해 반영하였다. 모의시간간격(Δt)은 0.01 μs , 총 모의시간은 50 μs 로 설정하였다.

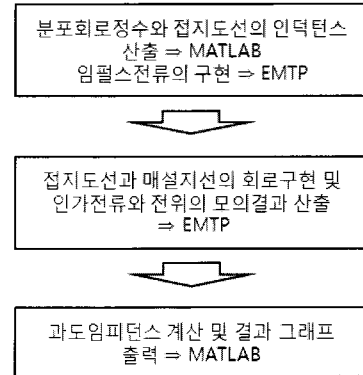


그림 5 모의해석과정의 개요

Fig. 5 Outline for the simulation analysis process

본 논문에서 제안한 모의해석과정은 그림 5의 개요와 같다. 각 미소구간 Δl 에 대한 분포회로정수 GA/l , CA/l , LA/l 과 접지도선의 인덕턴스를 MATLAB을 통하여 계산하고 그 결과를 EMTP에 반영하였다. 임펄스전류의 인가를 위해 EMTP에 구현되어 있는 Heidler가 제안한 임펄스전류원을 통해 실험 시 인가된 전류와 동일한 파형의 임펄스전류를 구현하여, 구현된 임펄스전류를 그림 4와 같이 EMTP를 통해 구현한 접지도선과 매설지선의 회로에 인가하였다. EMTP에 구현된 전위, 전류 프로브를 통하여 모의된 인가전류와 그에 따른 전위파형을 MATLAB과 연동하여 변수로 저장하였으며 각 시간(t)에서의 전위($V(t)$)을 인가전류($I(t)$)로 나누어 과도임피던스를 산출하였다. 모의된 인가전류와 전위, 과도임피던스를 측정된 인가전류와 전위, 과도임피던스와 비교·분석하기 위하여 MATLAB을 이용하여 그래프 출력하였다.

2.2 측정방법

접지임피던스를 실측할 때 임펄스전류의 인가에 대한 접지전극의 전위측정은 전자유도결합에 의한 영향을 최소화하기 위해 IEEE 81.2-1991에서 권고하는 전류보조전극을 전위보조극과 90° 각도를 이루게 배치하는 수정된 전위강하법을 적용하였으며[13], 본 실험에 이용한 측정계 구성은 그림 6과 같다.

측정대상 접지전극(E극)과 전류보조전극(C극) 사이의 일직선상의 61.8% 지점에 전위보조전극(P극)을 설치하여 접지전극의 전위를 측정하는 기존의 전위강하법(61.8%법)에서는 E극과 C극 사이를 연결하는 리드선에 흐르는 전류에 의해서 E극과 P극을 연결하는 리드선에 전자유도결합에 의한 전위간섭이 발생하므로 접지전극의 전위측정에 상당한 오차를 유발한다. 따라서 61.8%법은 접지임피던스 측정에 적합

하지 않기 때문에, P극과 C극을 90°의 각도를 이루게 배치하여 그 영향을 최소화하여 측정하여야 한다. 이 수정된 전위강하법은 도전유도에 의한 약간의 오차가 수반되지만, 그 오차의 크기가 전자유도결합에 의한 오차보다 현저히 작은 수% 정도이므로, IEEE 81.20-1991에서는 접지임피던스 측정 시 P극과 C극을 90°로 배치하는 수정된 전위강하법을 적용하여 측정하기를 권고하고 있다[13]. 그림 6의 측정회로와 같이 P극과 C극을 90°로 배치하는 수정된 전위강하법을 이용하여 각 매설지선의 접지임피던스를 측정하였다. E극과 C극 사이의 이격거리와 E극과 P극 사이의 이격거리는 동일하게 하였고, 도전유도에 의한 오차를 5%미만이 되도록 10 m, 30 m, 50 m 매설지선에 대하여 각각 20 m, 75 m, 75 m로 하였다.

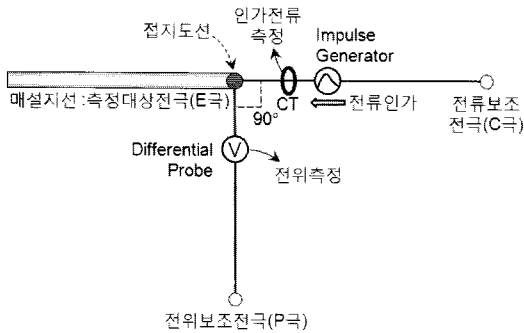


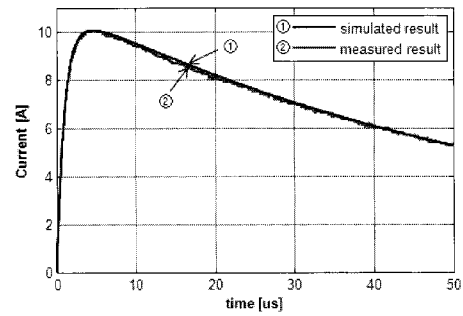
그림 6 매설지선의 접지임피던스 측정회로의 구성

Fig. 6 Configuration of the circuit for measuring the grounding impedances of a counterpoise

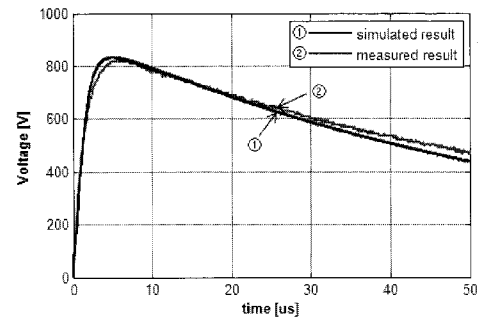
2.3 결과 및 검토

본 논문에서 제안한 모의해석방법의 타당성을 검토하기 위하여 각 매설지선의 분포정수회로모델을 적용하여 모의한 접지전극의 전위, 과도접지임피던스, 규약접지임피던스에 대한 결과를 실험결과와 비교·검토하였다. 그림 7에 나타난 바와 같이 길이 10 m인 매설지선의 경우 분포정수회로모델로 해석한 접지전극의 전위와 과도접지임피던스, 규약접지임피던스의 결과는 측정결과와 그 경향과 크기가 거의 근사한 값을 나타냈다.

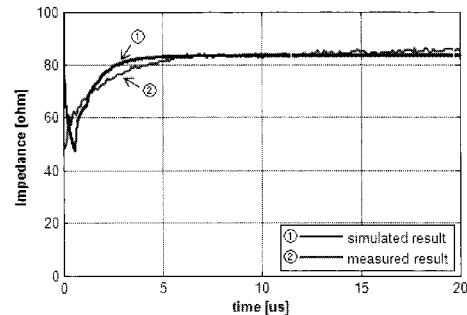
길이 10 m인 매설지선에 대한 측정 및 모의해석의 결과는 전류피크시간이 전위피크시간보다 앞섰으며, 과도접지임피던스도 초기에 작은 크기를 보이다가 정상상태 접지저항으로 도달하는 용량성 특성을 보였다. 그림 2에서와 같이 대지는 GA/ρ 와 CA/ρ 의 병렬구조로 모의하였으며, 10 m 매설지선 주변의 토양은 다른 매설지선 주변의 토양에 비하여 높은 대지저항률을 갖고 있다. 대지저항률이 높으면 GA/ρ 의 크기는 작게 되므로, 상대적으로 CA/ρ 의 영향이 크게 되고, 이로 인해 접지전극에서 대지로 방류되는 전류에 대한 용량성 전류의 비율이 상대적으로 커지게 된다. 이 용량성 전류의 영향이 LA/ρ 에 의한 유도성 특성에 비해 크게 작용하면 전압보다 전류가 앞서게 되고, 결과적으로 이러한 이유로 인해 길이 10 m인 매설지선의 과도접지임피던스가 그림 7(c)와 같이 용량성 특성을 보이는 것으로 판단된다.



(a) 인가전류



(b) 전위



(c) 과도접지임피던스

	규약접지임피던스
모의결과	83.03 Ω
측정결과	82.07 Ω

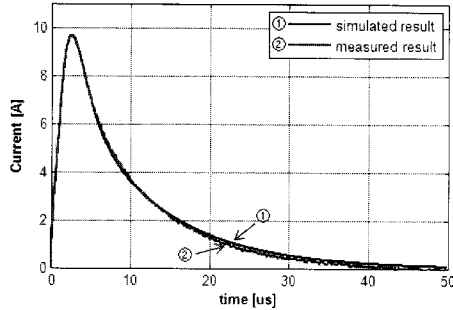
(d) 규약접지임피던스

그림 7 10 m 매설지선의 모의결과와 실험결과와의 비교

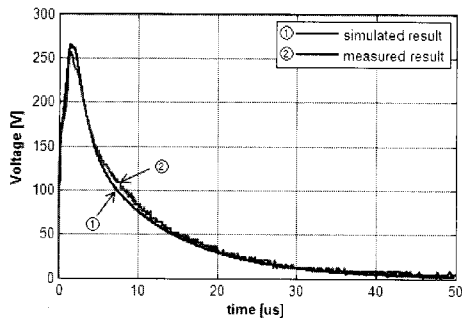
Fig. 7 Comparison between the simulated and measured results for the 10 m counterpoise

너서지전류의 인가에 의한 길이 30 m, 50 m인 매설지선에 대한 분포정수회로모델을 적용한 해석결과의 전위 파형은 그림 8(b)와 9(b)와 같이 측정전압파형과 거의 일치하는 것으로 얻어졌다. 두 가지 매설지선 모두 전위파형이 전류파형에 비해 앞선 피크시간을 보였으며, 이는 매설지선의 인덕턴스 영향에 의한 것이다. 그림 8(c)와 9(c)의 과도접지임피던스도 길이 30 m, 50 m인 매설지선 모두 그 경향이 일치하는 결과를 보였으며, 규약접지임피던스도 거의 근사한

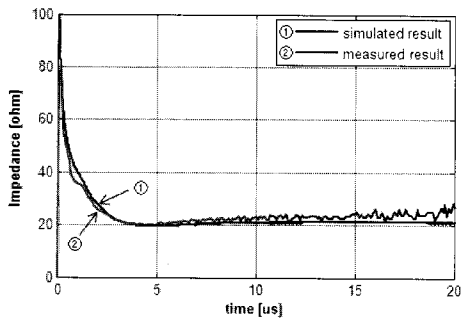
결과로 나타났다. 두 매설지선의 과도접지임피던스는 초기에 약 100 Ω 정도의 큰 값을 보이다가 점차 정상상태에 도달하여 정상상태 접지저항에 수렴하는 유도성 특성을 보였으며, 규약접지임피던스는 측정된 정상상태 접지저항보다 약간 큰 값을 보였다.



(a) 인가전류



(b) 전위



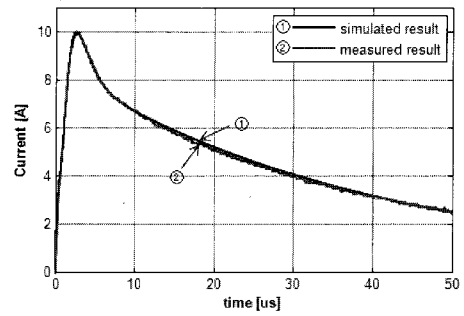
(c) 과도접지임피던스

	규약접지임피던스
모의결과	27.35 Ω
측정결과	26.67 Ω

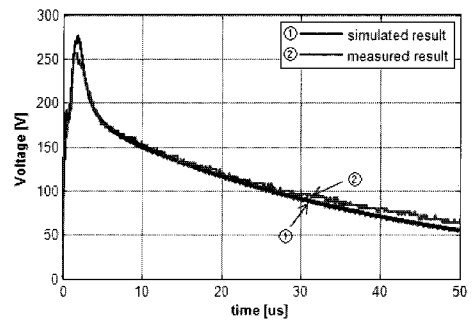
(d) 규약접지임피던스

그림 8 30 m 매설지선의 모의결과와 실험결과의 비교

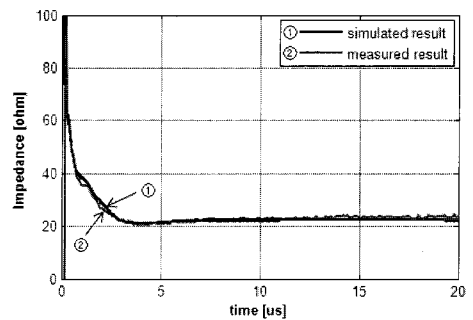
Fig. 8 Comparison between the simulated and measured results for the 30 m counterpoise



(a) 인가전류



(b) 전위



(c) 과도접지임피던스

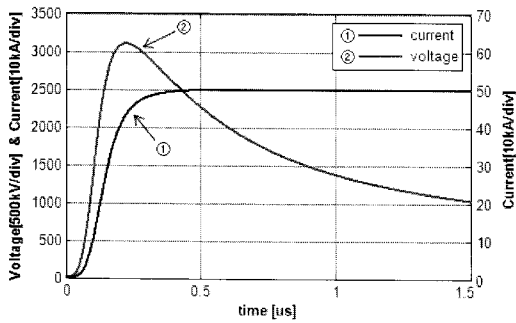
	규약접지임피던스
모의결과	23.33 Ω
측정결과	22.58 Ω

(d) 규약접지임피던스

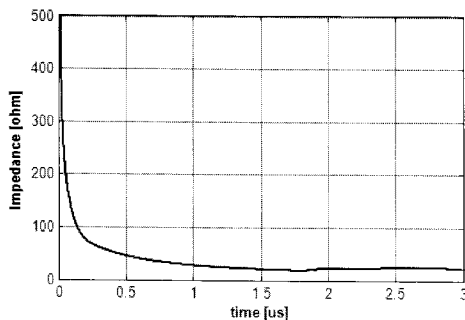
그림 9 50 m 매설지선의 모의결과와 실험결과의 비교

Fig. 9 Comparison between the simulated and measured results for the 50 m counterpoise

뇌서지전류에 대한 접지전극의 접지임피던스의 과도특성은 임펄스전류의 상승시간이 빠를수록 현저하다[3]. 따라서 뇌격전류파형 중 가장 빠른 상승시간을 갖는 후속단시간뇌격전류 0.25/100 μs의 파형[14]에 대하여 길이 30 m 매설지선에 대하여 분포정수회로모델을 적용하여 모의해석하였으며, 그 결과를 그림 6에 나타내었다.



(a) 전류와 전위 파형



(b) 과도접지임피던스

그림 10 후속단시간뇌격전류에 대한 30 m 매설지선의 모의 결과

Fig. 10 The simulated result for the 30 m counterpoise when injecting the current of the subsequent short stroke

피뢰설비에 대한 국제표준의 보호등급 I에 상당하는 후속단시간뇌격전류의 피크치는 50 kA이며[14], 이 전류를 인가한 경우 길이 30 m인 매설지선에 유도된 전압은 피크시간이 전류에 비해 앞선 파형을 보였으며, 전압의 피크치는 3,105 kV의 결과를 나타내었다. 이에 의한 과도접지임피던스 파형은 그림 6(b)과 같이 초기에 과도적으로 큰 값을 보였으며, 규약접지 임피던스는 정상상태 접지저항 값인 23 Ω에 비해 2.7배에 달하는 62.1 Ω을 나타내었다. 이와 같이 뇌서지전류에 대한 매설지선의 특성이 접지저항과는 다른 과도적 현상으로 큰 값을 나타내므로, 과도접지임피던스와 규약접지임피던스를 접지시스템의 뇌서지전류에 대한 성능평가에 반영하는 것이 바람직하다. 또한 접지전극의 뇌서지전류에 대한 과도접지임피던스는 접지전극이 설치된 장소의 저항률, 대지구조 및 비유전율 등에 의존한다[3][15]. 따라서 이와 같은 다양한 요소들을 해석에 반영한다면 보다 더 정확한 접지전극의 과도접지임피던스에 대한 모의가 이루어질 것으로 판단되며, 향후 이에 대한 연구의 수행이 필요하다.

3. 결 론

본 논문에서는 분포정수회로모델을 적용하여 뇌서지전류에 대한 매설지선의 접지임피던스의 과도특성을 이론적으로 해석하였으며, 다양한 조건에서 모의해석결과와 측정결과를

비교함으로써, 모의해석결과가 측정결과와 거의 일치하는 확인을 통하여 모의해석기법의 타당성이 검증되었다. 또한 후속단시간뇌격전류에 대한 모의해석을 통하여, 뇌서지전류에 대한 접지전극의 과도특성이 접지시스템의 성능을 평가할 때 반드시 고려되어야 함을 확인하였고, 이러한 접지전극의 과도특성은 과도접지임피던스와 규약접지임피던스에 의해 평가될 수 있다. 현장 실험을 통하여 규명하기 어려운 다양한 조건에 대하여 분포정수회로모델을 적용하는 모의해석 방법은 피뢰설비용 접지전극의 뇌서지전류에 대한 접지임피던스의 과도특성에 대한 분석과 성능의 예측에 활용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 지원에 의하여 한국전기안전공사(과제번호:R-2007-1-014)주관으로 수행된 과제임.

참 고 문 헌

- [1] IEC 62305-1, "Protection against lightning - Part 3: Physical damages to structures and life hazard", 1st ed., pp.43~52, 2006.
- [2] S. Bourg, B. Sacepe, T. Debu, "Deep earth electrodes in highly resistive ground frequency behavior," IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp.584-589, 1995.
- [3] Leonid Grcev, "Lightning Surge Characteristics of Earthing Electrodes," 29th International Conference on Lightning Protection, pp. 5a-1-1~16, 2008.
- [4] H. Griffiths, A. M. Davies, "Effective Length of earth electrodes under high frequency and transient conditions," 25th International Conference on Lightning Protection, pp.469~471, 2000.
- [5] 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.
- [6] 이복희, 이승철, "접지의 핵심 기초 기술", 도서출판 의제, pp.40, 67~68, 1999.
- [7] E. D. Sunde, "Surge Characteristics of a Buried Bare wire", AIEE Transactions, Vol. 59, pp. 987~991, 1940.
- [8] H. B. Dwight, "Calculation of Resistances to Ground", AIEE Transactions, Vol. 55, pp.1319~1328, 1936.
- [9] Yaqing Liu, Nelson Theethayi, Rajeev 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, Apr. 2005.
- [10] William H. Hayt, John A. Buck, "Engineering Electromagnetics, sixth edition", McGraw-Hill, pp.18

- 3~186, 225~231, 442~448, 540~543, 2001.
- [11] M. I. Lorentzou, N. D. Hatzargyriou, and B. C. Papadias, "Time domain analysis of grounding electrodes impulse response," IEEE Trans. Power Del., Vol. 18, No. 2, pp. 517 - 524, Apr. 2003.
- [12] 이복희, "전력시스템공학", 인하대학교 출판부, pp.137~143, 2007.
- [13] IEEE Std 81.2-1991, "IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems," IEEE Inc., pp.9~22, 1991.
- [14] IEC 62305-1, "Protection against lightning - Part 1: General principles," 1st ed., pp.71~85, 2006.
- [15] Silvério Visacro, Wyllian L.F. Pinto, Fuad S. Almeida, M.H. Murta Vale, Gláucio Rosado, "Experimental Evaluation of Soil Parameter Behavior in the Frequency Range Associated to Lightning Currents," 29th International Conference on Lightning Protection, pp.5c-2-1~5, 2008.

저 자 소 개



조 정 현 (曹 正 鉉)

1981년 8월 2일생. 2008년 2월 인하대 IT공대 전자공학과 졸업(학사). 현재 인하대 대학원 전기공학과 석사과정

Tel : (032) 860-7398

Fax : (032) 863-5822

E-mail : smilejoejh@naver.com



이 복 희 (李 福 熙)

1954년 6월 29일생. 1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1988-89년 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 1995년 호주 Queensland대학 방문교수. 1999년 Cincinnati대학 방문교수. 현재 인하대 IT공대 전기공학부 교수. 한국조명전기설비학회 부회장.

Tel : (032) 860-7398

Fax : (032) 863-5822

E-mail : bhlee@inha.ac.kr