

## 매설지선의 임펄스임피던스의 해석

(Analysis for the impulsive impedance of counterpoise)

조정현\* · 김종호 · 백영환 · 김동성 · 이강수 · 김기복 · 이복희

(Jeong-Hyeon Joe · Jong-Ho Kim · Young-Hwan Beak · Dong-Seong Kim · Gang-Su Lee · Ki-Bok Kim · Bok-Hee Lee)

### Abstract

For lightning currents, a grounding system shows the transient grounding impedance characteristics. A grounding system for protection against lightning should be evaluated by the transient grounding impedance, not it's ground resistance. The transient grounding impedance varies with the shape of ground electrode and earth characteristics as well as the waveform of lightning surge current. For the analysis and practical use of transient grounding impedance, the characteristics of transient grounding impedance should be analyzed theoretically and this papaer suggests the theoretical analysis for the transient grounding impedance of counterpoise by using the distributed parameter circuit model. EMTP and Matlab are used to simulate the distributed parameter circuit model of counterpoise and the adequacy of the distributed parameter model of counterpoise is examined by comparing the simulated results with the measured results.

### 1. 서론

뇌서지 전류에 대한 접지시스템의 응답특성은 상용주파수에서 측정된 접지저항과는 다르게, 뇌서지 전류의 등가주파수 대역에 의존적인 과도임피던스의 특성을 보인다[1]. 따라서 피뢰시스템으로서의 접지전극은 접지저항이 아닌 과도접지임피던스로 평가되어야 하며, 접지전극의 과도임피던스는 뇌서지 전류의 파형, 접지전극의 형상, 토양의 성질에 따라 그 특성이 변하게 된다. 이러한 과도접지임피던스의 해석과 활용을 위해 그 특성에 대한 이론적 고찰이 필요하다. 본 논문에서는 분포정수회로모델[2]을 통하여 매설지선의 과도접지임피던스를 이론적으로 해석하는 방법을 제안한다. 분포정수회로모델의 구현을 위해 EMTP와 Matlab 프로그램을 이용하였으며, 접지도선의 영향 또한 고려하였다. 매설지선의 분포정수회로모델을 통한 모의해석결과와 실험결과의 비교를 통해 분포정수회로모델의 이론적 타당성을 검토하였다.

### 2. 모의해석방법

#### 2.1. 분포정수회로모델

그림 1과 같이 매설지선의 분포정수회로모델을 구현하기 위해 식 (1)의 Sunde의 매설지선 접지저항식을 통해 매설지선의 단위길이당 분포회로정수  $G$ ,  $C$ ,  $L$ 를 산

정하였다[3].

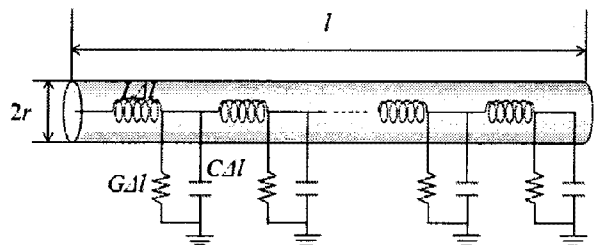


그림 1. 매설지선의 분포정수회로모델의 등가회로  
Fig. 1. An equivalent circuit diagram for the distributed parameter circuit model of counterpoise

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

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

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 \pi}{\ln \left( \frac{2l}{\sqrt{2rs}} \right) - 1} \quad [F/m] \quad (3)$$

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \left[ \ln \left( \frac{2l}{\sqrt{2rs}} \right) - 1 \right] \quad [H/m] \quad (4)$$

단,  $l$ 은 매설지선의 길이,  $r$ 은 반경,  $s$ 는 매설깊이  $\rho$ 는 대지저항률,  $\epsilon_r$ 은 토양의 비유전율,  $\epsilon_0$ ,  $\mu_0$ 는 진공의 유전율과 투자율이다.

식 (2)~(4)의 매설지선 분포회로정수와 전송선로의 전파방정식을 이용하여 접지봉의 전류 인가점에서 바라본 임피던스를 식 (5)와 같이 산출하였다[3][4].  $\dot{\alpha}$ 와  $\dot{Z}_c$ 는 각각 전파정수와 특성임피던스로 분포회로정수와와의 관계는 식 (6), (7)과 같으며, 접지봉 끝단은 무부하상태로 가정하였다.

$$\dot{Z} = \frac{\dot{E}_s}{\dot{I}_b} = \frac{e^{2\dot{\alpha}l} + 1}{e^{2\dot{\alpha}l} - 1} \dot{Z}_c \quad (5)$$

$$\dot{\alpha} = \sqrt{j\omega L'(G + j\omega C')} \quad (6)$$

$$\dot{Z}_c = \sqrt{\frac{j\omega L'}{G + j\omega C'}} \quad (7)$$

## 2.2. EMTP의 임펄스 전류원

임펄스 전류원은 EMTP 프로그램의 Heidler 전류원을 사용하였으며, Heidler가 제안한 임펄스 전류원의 수식적 표현은 식 (8)과 같다[5].

$$i(t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^n}{1 + (t/\tau_1)^n} e^{-(t/\tau_2)}, \quad \eta = e^{-\frac{\tau_1}{\tau_2} \left( \frac{\tau_2}{\tau_1} \right)^{1/n}} \quad (8)$$

여기서,  $I_0$ 는 전류 펄스의 진폭,  $\tau_1$ 은 상승시간정수(front time constant),  $\tau_2$ 는 감쇠시간정수(decay time constant),  $n$ 은 2~10의 값을 갖는 지수,  $\eta$ 는 진폭보정인자(amplitude correction factor)이다.

## 2.3. 접지도선의 영향

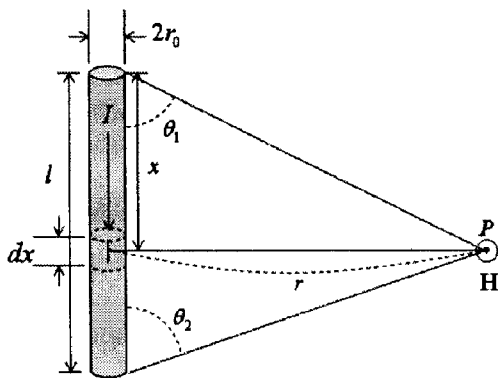


그림 2. 유한길이의 도선에 흐르는 전류에 의한 자기장 세기  
Fig. 2. Magnetic field intensity induced by the current flowing through the conductor with finite length

모의결과와 비교할 실제 접지임피던스의 측정 시, 접지임피던스는 인가전류와 매설지선의 전위 측정에 의해

산출된다. 이 때, 전위는 접지전극의 전위뿐만이 아니라 접지도선의 전위를 포함하게 되는데, 접지전극에 연결된 접지도선의 인덕턴스가 1  $\mu$ H 이상이 되면, 접지임피던스는 주파수 1 MHz에서 접지도선에 의해 6.28  $\Omega$  이상 증가하게 되고, 10 MHz에서는 62.8  $\Omega$  이상 증가하게 된다. 따라서 고주파수에서 접지도선의 영향을 무시할 수 없으므로, 아래에 제시된 방법으로 접지도선의 인덕턴스를 계산하여, 접지임피던스 모의분석에 적용하였다.

그림 2와 같이 유한한 길이의 도선에 식 (9)의 Biot-Savart 법칙을 적용하여 자기장의 세기를 계산하고, 식 (9)의 자기장의 세기를 통해 유한한 길이의 도선에 쇠교되는 총자속을 계산하여 식 (10)과 같이 도선의 직경과 길이에 따른 인덕턴스를 산출하였다.

$$H = \frac{1}{4\pi r} (\cos\theta_1 + \cos\theta_2) \quad (9)$$

$$= \frac{1}{4\pi r} \left( \frac{x}{\sqrt{r_0^2 + x^2}} + \frac{l-x}{\sqrt{r_0^2 + (l-x)^2}} \right)$$

$$L = \frac{\Phi}{I}$$

$$= \frac{\mu_0}{4\pi} \int_0^l \left[ \ln \left( \frac{1 - \frac{x}{\sqrt{r_0^2 + x^2}}}{1 + \frac{x}{\sqrt{r_0^2 + x^2}}} \right) + \ln \left( \frac{1 - \frac{l-x}{\sqrt{r_0^2 + (l-x)^2}}}{1 + \frac{l-x}{\sqrt{r_0^2 + (l-x)^2}}} \right) \right] dx \quad (10)$$

## 3. 모의해석조건

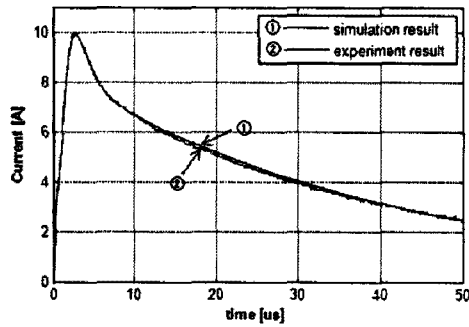
과도접지임피던스는 전극형상, 토양의 성질, 서지전류의 파형에 따라 그 특성이 변화한다. 본 모의해석에서는 아래의 조건에서 매설지선을 모의하였다.

전극은 단면적 25 mm<sup>2</sup>의 나동선으로 깊이 0.5 m에 매설하였으며, 길이가 30 m, 50 m의 두 가지 매설지선에 대하여 모의해석을 수행하였다. 대지구조는 식(1)을 통해 각 매설지선의 접지저항으로부터 역산한 단일 대지저항률의 토양으로 가정하였으며, 접지저항은 과도접지임피던스 측정결과가 정상상태에 수렴하는 20~30  $\mu$ s 구간의 평균값을 이용하였다. 토양의 비유전율은 측정이 불가능하여 단일 비유전율로 가정하였다. 건조 토양의 비유전율이 약 4 정도이고 물의 비유전율이 대략 80 정도임을 고려하여[6], 비유전율을 4~80 범위로 정하였으며, 측정 결과와 가장 일치하는 결과를 보인 비유전율을 80에 대하여 매설지선의 분포정수회로모델을 모의해석하였다.

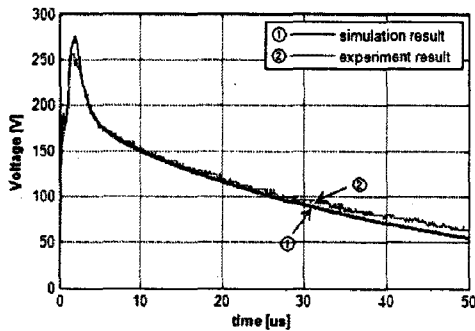
서지전류를 모의한 임펄스전류의 경우에는 측정할 때 인가한 임펄스전류와 동일한 파형의 임펄스전류를 EMTP를 통하여 구현하였고, 30 m, 50 m 매설지선에 대하여 각각 2.6, 5.6  $\mu$ s의 전류피크( $I_{peak}$ )시간의 파형의 전류를 인가하여 측정결과와 비교·분석하였다.

#### 4. 결과 및 검토

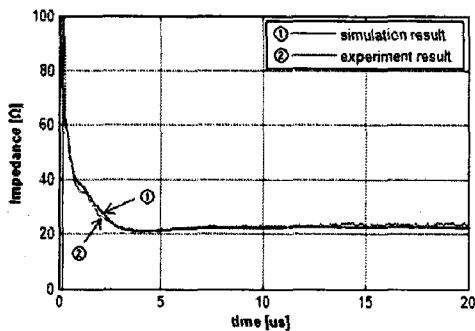
30 m와 50 m 매설지선의 분포정수회로모델을 통해 모의해석한 전압, 과도접지임피던스, 규약접지임피던스를 실험결과와 비교·분석하였다. 본 논문의 실험측정은 IEEE 81.2-1991에서 권고하는 전류보조전극을 전위보조극과 90° 각도를 이루게 배치하는 수정된 전위강하법을 적용하였다[7]. 그림 3(a)와 4(a)과 같이 측정할 때 인가한 임펄스전류와 동일한 파형의 임펄스전류를 EMTP를 통해 구현하여 각 매설지선의 분포정수회로모델에 인가하였다.



(a) 인가전류

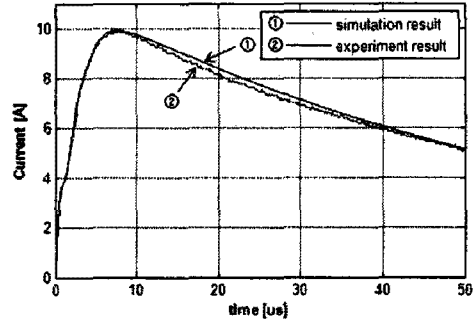


(b) 측정전압

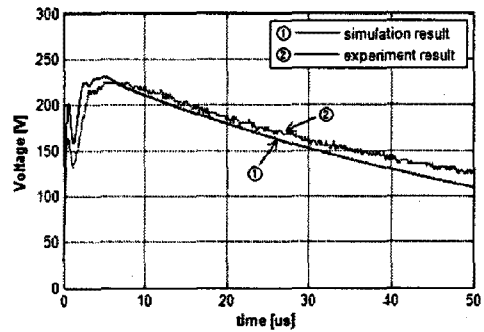


(c) 과도접지임피던스

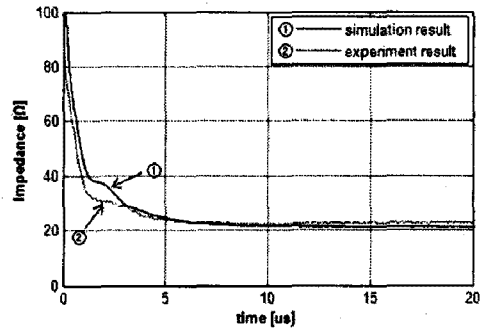
그림 3. 30 m 매설지선의 모의결과와 실험결과와의 비교  
Fig. 3. Comparison between the measured and simulated results for the 30 m counterpoise



(a) 인가전류



(b) 측정전압



(c) 과도접지임피던스

그림 4. 50 m 매설지선의 모의결과와 실험결과와의 비교  
Fig. 4. Comparison between the measured and simulated results for the 50 m counterpoise

인가전류에 대한 분포정수회로모델의 전압이 실험의 측정전압파형과 경향이 일치하는 것을 그림 3(b)와 4(b)의 그래프를 통해 확인할 수 있다. 그림 3(c)와 4(c)의 과도접지임피던스도 30 m, 50 m 매설지선 모두 그 경향이 일치하는 결과를 보였으며, 모의결과와 측정결과 모두 매설지선의 인덕턴스 영향에 의해 초기의 과도접지임피던스가 약 100 Ω 정도의 큰 값을 보이다가 점차 정상상태에 도달하여 접지저항 값으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 뇌서지 전류에 대한 매설지선의 특성이 접지저항과는 다른 과도적 현상을 보이므로, 과도접지임피던스는 접지시스템의 뇌서지 성능평가에 반영되어야 한다.

## 5. 결 론

뇌서지 전류에 대하여 접지시스템의 응답특성은 저주파수에서 측정된 접지저항과 달리, 뇌서지 전류의 등가 주파수 대역에 의존적인 과도임피던스의 특성을 보인다. 이러한 과도접지임피던스의 해석과 활용을 위해 그 특성에 대한 이론적 고찰이 필요하며, 본 논문에서는 분포정수회로모델을 통하여 매설지선의 과도접지임피던스를 이론적으로 해석하였다. 분포정수회로모델의 구현을 위해 EMTP와 Matlab 프로그램을 이용하였으며, 접지도선의 영향 또한 고려하였다. 매설지선의 분포정수회로모델의 모의해석결과와 측정결과의 비교를 통해 그 모의해석결과가 측정결과와 그 경향에 있어서 일치함을 확인하였다. 접지전극이 시공된 장소의 대지구조 및 비유전율과 비저항의 주파수특성 등의 요소를 반영한다면 보다 더 정확한 접지전극의 과도접지임피던스에 대한 모의해석이 가능할 것으로 판단되며, 이러한 모의해석 방법은 다양한 조건에 대한 과도접지임피던스의 해석에 활용될 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] N. Fujimoto, E. P. Dick, S. A. Boggs and G. L. Ford, "Transient Ground Potential Rise in Gas-Insulated Substations-Experimental Studies", IEEE Trans., Vol. PAS-101, No. 10, pp.3603~3609, 1982.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 이복희, "전력시스템공학", 인하대학교 출판부, pp.137~143, 2007.
- [5] Leonid Groev, "Lightning Surge Characteristics of Earthing Electrodes," 29th International Conference on Lightning Protection, pp. 5a-1-1~16, 2008.
- [6] William H. Hayt, John A. Buck, "Engineering Electromagnetics, sixth edition", McGraw-Hill, pp.540~543, 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.9~22, 1991.