

논문 2014-51-12-21

# 접지전류의 입사점에 따른 정보통신설비용 수평접지전극의 과도전위상승 계산 방법

( Calculation Method of Transient Potential Rises of Horizontal Ground  
Electrodes Depending on Injection Point of the Ground Current )

안 창 환\*

( Chang-Hwan Ahn<sup>©</sup> )

## 요 약

뇌격전류가 정보통신설비의 접지시스템에 유입되었을 때 발생하는 과도전위상승에 대한 해석은 접지시스템을 효과적으로 설계하기 위해서 요구되는 사항 중에 하나이다. 접지시스템의 성능은 보통 접지시스템의 전기적 특성을 나타내는 접지임피던스와 과도전위상승으로 평가된다. 뇌격전류의 입사점에 따른 접지임피던스를 계산하는 방법을 제안하였다. 뇌격전류가 수평접지전극의 중앙에 입사되는 경우 델타갭소스 모델을 이용하여 접지임피던스를 계산하였다. 디바이 모델(Debye Model)을 이용하여 주파수의존적인 토양 파라미터를 적용할 수 있는 프로그램을 제안하였다. 그 이유는 접지시스템의 성능을 분석하는 상용 프로그램은 주파수 의존적인 토양 파라미터 특성을 적용할 수 없기 때문이다. 동일한 조건에서의 시뮬레이션 결과의 신뢰성을 확인하기 위해서 실험을 수행하였다. 마지막으로, 토양 파라미터의 주파수의존성을 반영한 접지임피던스를 이용하여 뇌격전류 파형에 따른 수평접지전극의 과도전위상승을 분석하였다.

## Abstract

When the lightning current is injected to the ground system of information and communication facilities, analysis of the transient potential rise in the ground system is one of main factors to effectively design the ground system. The performance of grounding systems is normally estimated with the grounding impedance and the transient potential rise which represents the electrical characteristics of the grounding system. The method for calculating the grounding impedance depending on the injection point of the lightning current was proposed. The delta-gap source model was proposed to calculate the grounding impedance in the case that the lightning current is injected to the center of the horizontal ground electrode. A new program which is possible to apply the frequency-dependent soil parameters using the Debye model was developed, because a commercial program for analyzing the performance of the grounding system can not apply to the frequency-dependent soil parameters. The experiment was carried out to confirm the availability of the simulation results with the same condition. Finally, the transient potential rises of a horizontal ground electrode depending on the lightning current waveforms were analyzed by using the results of the grounding impedance which is associated with the frequency-dependent soil parameters.

**Keywords :** Permittivity of Soil, Debye Model, Transient Potential Rise, Grounding System

\* 정회원, 인하공업전문대학 디지털전자과  
(Department of Digital Electronics, Inha Technical College)

© Corresponding Author(E-mail: aza@inhac.ac.kr)

※ 이 논문은 2014학년도 인하공업전문대학 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.  
접수일자: 2014년10월13일, 수정일자: 2014년10월26일, 게재확정: 2014년11월24일

### I. 서론

최근 지구의 이상기후로 인하여 낙뢰의 발생빈도가 지속적으로 증가하고 있는 추세에 따라 낙뢰에 취약한 정보통신설비들이 피해를 보고 있다. 정보통신설비들의 고장은 단순히 기기 자체의 고장보다 설비의 손상으로 인한 통신이 두절되는 현상이 나타나기 때문에 설비의 손상에 의한 파급효과가 매우 크다고 볼 수 있다. 따라서 뇌격전류에 대한 정보통신설비들의 파괴설계가 잘 이루어져야 한다.

파괴설계에 있어 가장 중요한 정보는 접지시스템의 임피던스와 과도전위상승이다<sup>[1]</sup>. 접지를 설계 및 시공할 때 인하도록 접지시스템의 접속지점에 따라 임피던스와 과도전위상승이 다르게 나타난다. 특히 수평접지전극의 경우 뇌격전류가 끝단인 경우와 중앙의 경우로 유입될 수 있는데 유입경로에 따라 달라지는 접지전극의 전기적 특성을 고려하여 접지를 설계해야 한다.

그동안 접지시스템의 임피던스를 해석하는 많은 연구가 수행되어왔지만 뇌격전류가 수평접지전극의 중앙에 입사되었을 때의 해석 방법에 대한 이론적 접근이 정확히 제시되어 있지 않았다<sup>[2~4]</sup>. 단지 수평접지전극의 끝단에 뇌격전류가 입사되었을 때의 이론적 방법만 제시되어 있어서 보다 정확하고 다양한 접지임피던스를 해석하는데 한계가 있었다.

본 논문에서는 델타갭 소스 모델을 이용하여 뇌격전류가 수평접지전극의 중앙에 입사한 경우의 임피던스를 계산하는 방법을 제시하였다. 이렇게 계산된 접지임피던스를 이용하여 수평접지전극의 과도전위상승을 계산하는 방법을 함께 제시하였다. 해석 방법에 대한 신뢰성은 접지해석에 많이 사용되고 있는 상용프로그램(HIFREQ)의 결과와 10 [m] 수평접지전극, 30 [m] 수평접지전극의 실측된 임피던스와 비교하였다. 마지막으로 계산된 수평접지전극의 임피던스를 이용하여 30 [m] 수평접지전극의 과도전위상승을 직격뢰의 파형에 따라 해석하였다.

### II. 본론

#### 1. 접지전류가 끝단에 인가된 경우

뇌격전류 혹은 스위칭 서지와 같은 과도 특성을 갖는 접지전류가 수평접지전극의 끝단에 유입되었을 때 접지

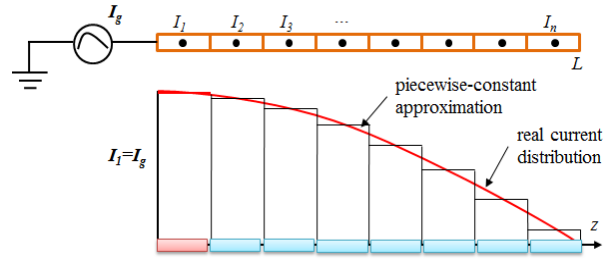


그림 1. 접지전류가 수평접지전극의 끝단에 인가된 경우

Fig. 1. In case that the ground current is injected at an end of a horizontal ground electrode.

전극에서의 접지임피던스를 분석하기 위해서 전자계이론을 이용하였으며, 계산의 편의를 위해서 가는 선 근사와 완전도체 가정을 적용하였다. 길이가 \$L\$이며, 반지름이 \$a\$인 수평접지전극이 대지에 매설되어 있을 때 접지전류가 수평접지전극의 끝단에 인가된 경우의 전류분포를 그림 1에 나타내었다.

수평접지전극의 임피던스를 계산하기 위해서는 수평접지전극의 모든 지점의 전류분포를 먼저 계산해야 한다. 접지전류가 수평접지전극의 끝단에 인가된 경우에 대한 전류분포를 계산하는 방법은 이미 여러 문헌에 자세히 제시되어 있기 때문에 본 논문에서는 간략하게 나타내었다.

가는 선 근사를 적용하였기 때문에 수평접지전극의 반대쪽 끝단에 위치한 세그먼트에서 전류는 영이 된다고 가정한다. \$N\$개 세그먼트에 대한 전류분포를 구하기 위해서는 \$N\$개의 식이 필요하다. 접지전류가 \$I\_g\$라고 한다면 맨 첫 번째 수식은 \$I\_1 = I\_g\$가 된다. 수평접지전극의 \$i\$번째 세그먼트의 전압은 모든 세그먼트에서의 전류에 대한 영향의 합으로 표현이 되며, 다음과 같이 표현된다.

$$V_i = I_1 z_{i1} + I_2 z_{i2} + \dots + I_N z_{iN} \tag{1}$$

여기에서 \$z\_{im}\$은 다른 모든 세그먼트의 전류에 의한 영향으로 인한 \$i\$번째 세그먼트에서의 임피던스가 된다. 손실이 없는 완전 도체인 경우, 식 (1)에서 \$V\_i\$는 영이 된다. 그래서 \$I\_1 = I\_g\$조건과 식 (1)에서 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{N1} & z_{N2} & \dots & z_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_g \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \tag{2}$$

여기에서  $z_{im}$  은  $m$  번째 쌍극자와  $i$  번째 쌍극자 간의 상호임피던스를 나타낸다.

식 (2)에서 전류분포를 구하고 난 이후 식 (3)을 이용하여 접지임피던스를 계산할 수 있다.

$$V(z) = -\frac{1}{j4\pi\omega\epsilon} \int_0^L \frac{\partial I(z')}{\partial z'} G(z, z') dz' \quad (3)$$

인가 전류가 1 [A]라고 한다면, 접지임피던스는 식 (3)의 전압과 같게 된다.

## 2. 접지전류가 중앙에 인가된 경우

일반적으로 안테나 기지국과 같은 정보통신기기가 접속되어 있는 기기의 접지시스템은 접지저항을 최소화시키기 위해서 인하도록 접지전극이 분기되는 지점에 접속하게 된다. 인하도록을 통해서 접지전류가 접지시스템으로 유입되는 경우 분기되는 지점이 많이 있는 곳일수록 접지임피던스가 작아지기 때문이다. 그림 2와 같이 접지전류가 수평접지전극의 중앙에 인가된 경우는 식 (2)를 이용하여 전류분포를 구하는 것이 불가능하다. 따라서 접지전류가 중앙에 인가된 경우에 대한 전류분

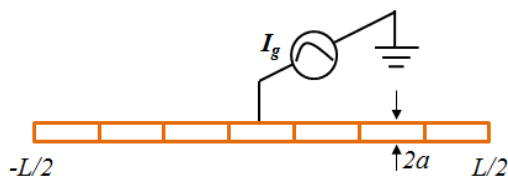
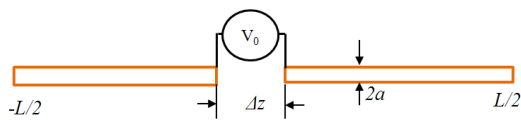
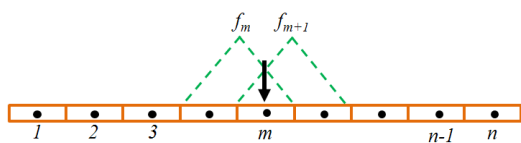


그림 2. 접지전류가 수평접지전극의 중앙에 인가된 경우

Fig. 2. In case that the ground current is injected at the center of a horizontal ground electrode.



(a) 델타갭 소스 모델



(b) 적용 모델

그림 3. 델타갭 소스 모델과 적용

Fig. 3. Delta-gap source model and its application.

포를 구하는 방법이 요구된다.

본 논문에서는 안테나 해석 및 설계에 주로 적용되는 델타갭(delta-gap) 소스 모델을 적용하였다<sup>[5]</sup>. 델타갭 소스 모델과 그 적용을 그림 3에 나타내었다.

델타갭 소스 모델은 수평 접지전극의 중앙에 매우 작은 크기의 갭에 전압을 인가하는 것이다. 접지전류가 수평 접지전극의 끝단에 인가되는 경우에는 전류원을 직접 고려하여 계산하는 방법과는 다른 방법이다. 델타갭 소스를 이용하는 경우에는 인가 지점의 전압이 일정하고, 나머지 위치에서는 영이 된다고 가정한다. 따라서 인가전계  $E^i$ 가 인가 지점의 갭에서 일정하게 되고 나머지 위치에서는 영이 된다. 인가전계는 다음과 같이 표현된다.

$$E^i = \frac{V_0}{\Delta z} \hat{z} \quad (4)$$

여기서  $\Delta z$ 는 갭의 간격이며,  $V_0$ 는 보통 1로 설정된다. 그림 3(b)에서 가중함수를 삼각형 함수로 적용하였을 때 중앙 세그먼트에서만 전압이 존재하게 된다. 따라서 중앙 세그먼트에 적용되는 가중함수는 2개만이 존재하게 되며, 중앙 세그먼트를 기준으로 왼쪽에 있는 삼각형 함수( $f_m$ )는 감소하는 구간만 적용되며, 오른쪽에 있는 삼각형 함수( $f_{m+1}$ )는 증가하는 구간만 적용된다. 델타갭 소스 모델을 적용하였을 때 식(2)는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1N} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ z_{m1} & z_{m2} & \cdots & z_{mN} \\ z_{m+11} & z_{m+12} & \cdots & z_{m+1N} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ z_{N1} & z_{N2} & \cdots & z_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_m \\ I_{m+1} \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots \\ 0 \\ E_m \\ E_{m+1} \\ 0 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (5)$$

따라서 식 (5)로부터 접지전극의 전류분포를 구할 수 있다. 그 이후에 중앙 세그먼트의 전류값이 1이 되도록 만들어주고, 동일한 비율로 나머지 세그먼트의 전류값도 환산해준다. 이것은 중앙에 인가되는 전류가 1 [A]가 되도록 만들어주는 것과 동일하며, 이때의 전류분포를 이용하여 접지전극의 임피던스를 계산할 수 있다.

## 3. 과도전위상승의 계산

접지전극의 과도접지전위상승을 계산하기 위해서는 계산된 접지임피던스와 뇌격전류의 곱셈 과정이 필요하

다. 계산된 접지임피던스는 주파수 크기에 따른 임피던스 결과를 나타내고 있기 때문에 주파수 영역에서의 접지임피던스(Harmonic impedance)라고 볼 수 있다<sup>[6-7]</sup>. 시간 영역의 뇌격전류에 대해서 푸리에 변환을 하고 접지임피던스와 곱해주면 주파수 영역에서의 전위상승을 구할 수 있다.

$$V(f) = Z(f) \times I(f) = Z(f) \times FFT[i(t)] \quad (6)$$

식 (6)을 통해서 얻어진 전위는 역푸리에 변환(Inverse Fourier transform)을 통해서 시간 영역에서의 전위를 구할 수 있다.

$$v(t) = IFFT\{Z(f) \times FFT[i(t)]\} \quad (7)$$

식 (7)의 전압은 뇌격전류의 파형에 따른 접지시스템에서 발생하는 과도전위가 된다.

#### 4. 실험

시뮬레이션 결과의 유효성을 확인하기 위해서 실제 접지전극의 임피던스를 측정하였다. IEEE Std. 81.2에 제시된 수정된 전위강화법을 사용하였다<sup>[8]</sup>. 전자유도에 의한 오차를 줄이기 위해서 전위보조전극과 전류보조전극을 90°로 설치하였다. 수평접지전극의 경우 전류보조전극과 전위보조전극을 90°로 배치하는 방법이 2가지가 있는데, 본 연구에서는 수평접지전극과 같은 선상에 전류보조전극을 설치하고 전위보조전극이 90°가 되도록 설치하여 도전유도의 영향을 줄였다.

실험에 사용된 수평 접지전극의 길이는 10 [m]와 50 [m]이며, 반경은 5 [mm]이고, 매설깊이는 0.5 [m]이다. 인가하는 전류원은 함수발생기를 사용하였으며, 300

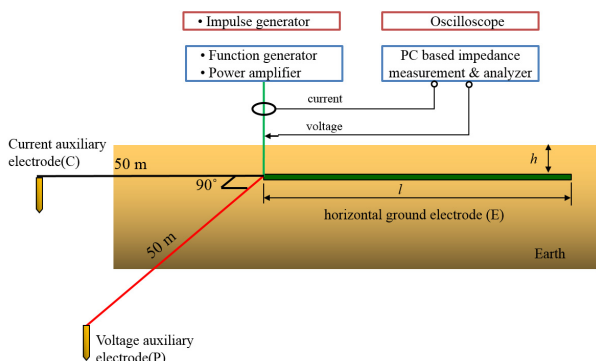


그림 4. 접지임피던스를 측정하는 실험계의 구성  
Fig. 4. Schematic diagram of experimental setup for measuring ground impedance.

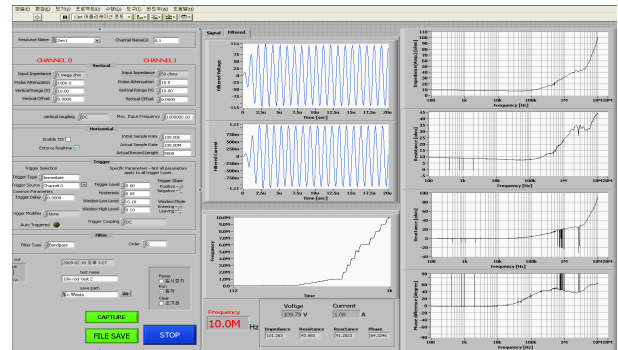


그림 5. PC기반 접지임피던스 분석 프로그램의 사진  
Fig. 5. Photograph of the PC based ground impedance analysis program.

[W]용량의 증폭기를 사용하여 노이즈 영향을 최소화 하였다. 접지전극으로 흐르는 전류와 접지전극의 입력 측에서 측정된 전압은 100 [MS/s] 성능의 디지털라이저(NI 5112)를 사용하였다. 측정된 두 신호는 다른 주파수 성분에 대한 영향을 최소화하기 위해서 밴드패스 필터를 적용하였으며, 인가된 신호의 해석 주파수 범위는 인가된 주파수에서  $-f/4$ 에서  $+f/4$ 로 제한하였다. 전체 실험계의 구성도를 그림 4에 나타내었으며, PC기반 접지임피던스 분석 프로그램을 그림 5에 나타내었다.

### III. 결 과

수평접지전극의 과도전위상승을 계산하기 위해서 접지임피던스가 먼저 계산되어야 한다<sup>[9]</sup>. 그리고 접지극의 임피던스를 계산하기 위해서는 접지극의 각 세그먼트에서 전류분포를 알아야 한다. 계산된 전류분포로부터 첫 번째 세그먼트에서의 전압을 구할 수가 있다. 인가된 전류가 1 [A]라고 가정하면, 그 때의 전압이 접지극의 임피던스가 된다.

접지전류가 수평접지전극의 중앙에 입사되었을 때 10 [m] 수평접지전극에서의 전류분포를 계산하여 그림 5에 나타내었다. 수평접지전극이 매설된 토양의 대지저항률은 10 [ $\Omega \cdot m$ ]로 가정하였으며, 전류분포는 인가되는 접지전류의 주파수가 10 [Hz], 100 [kHz], 1 [MHz]인 경우에 대해서 상용프로그램과 함께 각각 계산하였다.

그림 6의 전류분포 결과에서 시뮬레이션된 세 가지 주파수 경우에 대해서 상용프로그램의 결과와 본 연구의 결과와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 접지전류

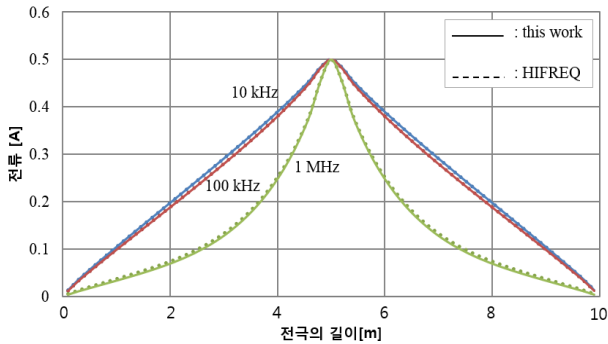


그림 6. 접지전류가 중앙에 인가된 경우의 10 m 수평 접지전극의 전류분포( $10 \Omega \cdot m$ )

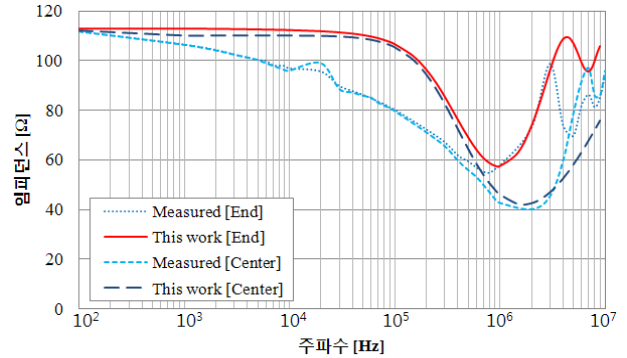
Fig. 6. Current distribution of 10 m horizontal ground electrode when the test current is injected at the center of the ground electrode( $10 \Omega \cdot m$ ).

가 수평접지전극의 중앙에 입사되었을 때 수평접지전극의 전류분포를 계산하는 제안된 방법에 대한 유효성이 확인된 것이다.

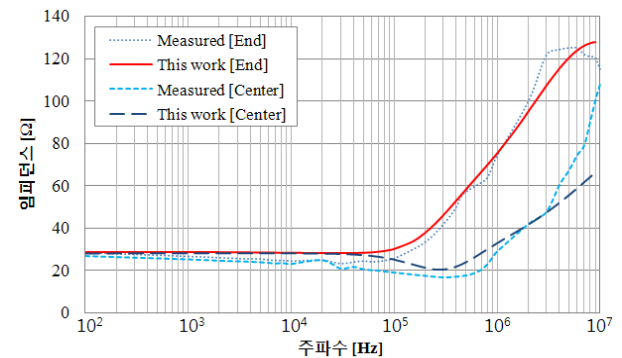
수평접지전극의 전류분포를 이용하여 수평접지전극의 한 쪽 끝지점과 중앙지점에서 임피던스를 각각 계산하였다. 10 [m] 수평접지전극과 30 [m] 수평접지전극의 접지임피던스를 계산한 결과를 그림 7에 나타내었다.

100 [Hz]부터 10 [MHz]의 주파수 범위에 대해서 접지임피던스를 계산한 결과를 측정값과 비교하여 나타내었다. 10 [m] 수평접지전극의 경우 100 [Hz]의 주파수에서 접지임피던스는 약 110 [ $\Omega$ ]정도이며, 주파수가 증가하여도 임피던스는 일정하게 유지되다가 약 100 [kHz]부터 1 [MHz]까지 감소하는 특성을 보인다. 접지임피던스는 주파수가 1 [MHz] 이상부터 다시 증가하는 추세를 보인다. 접지전류가 중앙에 입사되는 경우 접지임피던스는 주파수가 증가하면서 감소하는 추세를 보인다. 접지전류가 중앙에 입사되는 경우 접지임피던스가 약 2 [MHz]에서 제일 낮게 나타나며 그 값은 끝단에 인가된 경우보다 더 낮게 나타난다.

30 [m] 수평접지전극의 경우 접지전류의 입사위치와는 상관없이 접지임피던스는 약 100 [kHz] 주파수 범위까지 일정하게 유지되다가 증가하는 현상이 나타난다. 30 [m]의 길이에 해당되는 인덕턴스 성분에 의해서 접지임피던스가 증가하는 현상이 나타났다. 접지전류가 중앙에 인가된 경우가 끝단에 인가된 경우보다 접지임피던스가 더 낮게 나타났으며, 그 이유는 접지전류가 중앙에 입사된 경우 접지전류는 수평접지전극의 양쪽



(a) 10 m 수평 접지전극



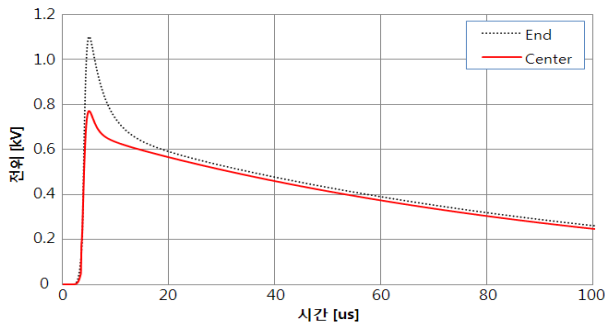
(b) 30 m 수평 접지전극

그림 7. 수평접지전극의 접지임피던스

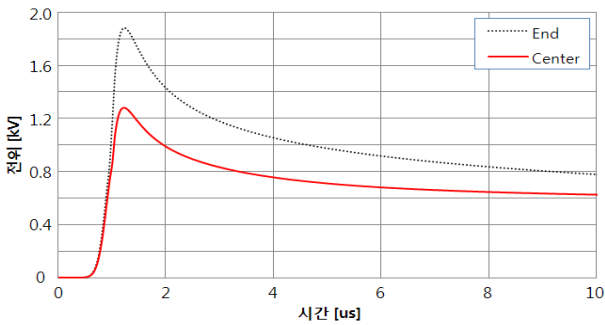
Fig. 7. Ground impedance of horizontal ground electrodes.

방향으로 흘러가기 때문에 15 [m] 수평접지전극 2개가 서로 연결되어 있는 특성이 나타나기 때문이다. 수평접지전극의 길이가 짧아진 만큼 인덕턴스 성분이 더 작게 영향을 주어 접지임피던스가 더 작게 나타났다. 접지임피던스의 결과에서 접지전류가 수평접지전극의 중앙으로 유입되도록 설계하는 것이 수평접지전극의 접지임피던스를 줄일 수 있는 방법임을 확인할 수 있다.

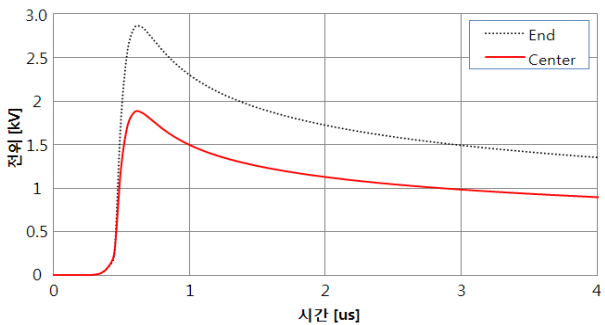
접지임피던스의 결과로부터 수평접지전극에서의 과도전위상승을 식 (6),(7)을 통해서 계산하였으며, 그 결과를 그림 8에 나타내었다. 적용된 접지전류는 직격뢰의 뇌격전류파형을 모의하였다. 직격뢰의 전류파형은  $10/350 [\mu s]$ ,  $1/200 [\mu s]$  그리고  $0.25/100 [\mu s]$ 으로 구분된다. 따라서 각각의 뇌격전류파형에 대해서 수평접지전극의 과도전위상승을 계산되어야 접지전극의 성능을 효과적으로 평가할 수 있다. 뇌격전류의 입사점이 끝단과 중앙인 경우 그림 8의 결과에서 중앙에 뇌격전류가 입사된 경우가 끝단의 경우보다 과도전위상승의 최댓값이 약 70% 정도 더 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 접



(a) 10/350  $\mu$ s



(b) 1/200  $\mu$ s



(c) 0.25/100  $\mu$ s

그림 8. 뇌격전류의 입사점에 따른 길이 30 m 수평 접지전극의 과도접지전위 상승(10  $\Omega \cdot$  m)

Fig. 8. Transient ground potential rises of 30 m horizontal ground electrode depending on the injection point of lightning Harmonic impedance and phase difference of 50 m horizontal ground electrode(10  $\Omega \cdot$  m).

지시스템의 과도접지전위상승은 접지시스템에 접속되어 있는 전자기기의 절연내력과 밀접한 관련이 있기 때문에 피뢰설계 및 절연내력 설계에 있어서 매우 유용한 정보를 제공하게 된다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 뇌격전류의 입사점에 따른 수평접지전극의 접지임피던스를 계산하는 방법을 제시하고 이를 통하여 과도전위상승을 계산한 결과를 제시하였다. 기존의 문헌에서 뇌격전류가 수평접지전극의 중앙에 입사된 경우 접지임피던스를 계산하는 방법에 대한 정확한 이론적 접근이 부족한 부분에 대해서 본 논문에서는 델타갭 소스모델을 이용한 방법을 제안하였다. 또한 계산된 접지임피던스를 이용하여 수평접지전극의 과도전위상승을 계산하는 방법을 제시하고 이를 통하여 세 가지 직격뢰의 전류파형에 대해서 30 [m] 수평접지전극에서의 과도전위상승을 뇌격전류의 입사점에 따라 계산하였다. 해석 결과 수평접지전극의 중앙에 뇌격전류가 입사하였을 때 접지임피던스와 과도전위상승이 수평접지전극의 끝단에 입사된 경우보다 더 낮게 나타났음을 확인하였다. 본 논문에서 제안된 방법을 이용한 수평접지전극의 과도전위상승은 정보통신기기의 피뢰설계 및 절연내력설계에 활용될 것으로 기대된다.

#### REFERENCES

- [1] ANSI/IEEE Std 81-1983, "IEEE Guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a ground system", pp.16~28, 1983.
- [2] S. Visacro, R. Alipio, "Frequency dependence of soil parameters: Experimental Results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes", IEEE Trans. Power Del., vol. 27, No. 2, pp.927~935. 2012.
- [3] L. Grcev, F. Dawalibi, "An electromagnetic model for transients in grounding systems", IEEE Trans. Power Delivery, Vol.5, No.4, pp.1773~1781, 1990.
- [4] D. Poljak, V. Roje, "The integral equation method for ground wire input impedance", Integral methods in science and engineering, Vol. I, U.K., pp.139~143, 1997.
- [5] W. C. Gibson, "The method of moments in electromagnetics", Chapman & Hall/CRC, pp.33~79, 2008.
- [6] L. Grcev, "Modeling of grounding electrode under lightning currents", IEEE Trans. on Electromagn. Compat., Vol.51, No.3, pp.559~571,

2009.

- [7] D. Roubertou, J. Fontaine, "Harmonic input impedance of earth connections", in Proc. IEEE Int. Sysmp. Electromagn. Compat., pp.717~720, 1984.
- [8] IEEE Std 81.2-1991, "IEEE Guide for measurement of impedance and safety characteristics of large, extended or interconnected grounding systems", pp. 10~16, 1991.
- [9] Chang-Hwan Ahn, "Numerical Calculation for Input Impedance of a Conductor Located in the Loss Media", Journal of The Institute of Electronics Engineers of Korea Vol. 50, NO. 3, pp.237~236, 2013.

---

저 자 소 개

---



안 창 환(정회원)

1983년 원광대학교 공과대학  
전기공학과 학사 졸업

1991년 인하대학교 대학원  
전기공학과 석사 졸업

1999년 인하대학교 대학원  
전기공학과 박사 졸업.

2005년~현재 인하공업전문대학 디지털전자과  
교수.

<주관심분야 : EMI/EMC, 통신, 신호처리>