

### 수직 접지전극의 정n각형배열의 합성 접지임피던스

성창훈, 이규선, 김기복, 김유하 이복희  
인하대학교

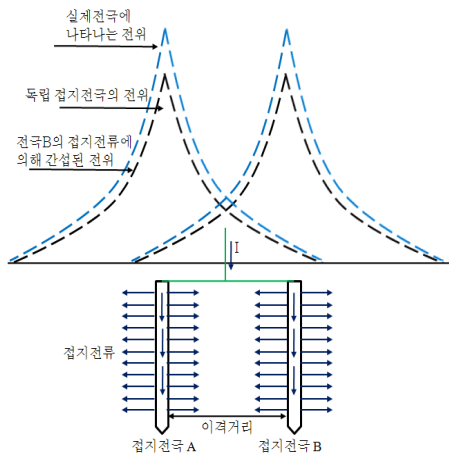
#### Combined ground impedance of equally-spaced n-vertical ground rods on circle

Chang-Hoon Seong, Kyu-Sun Lee, Ki-Bok Kim, Tae-Ki Kim and Bok-Hee Lee  
InHa University

**Abstract** - 접지 저항을 줄이기 위해서 접지전극을 병렬로 시공할 경우 보다 쉽게 원하는 접지저항을 얻을 수 있다. 그러나 근접된 접지전극이 병렬로 배열되어 있을 경우 전위간섭의 영향으로 인해 합성 접지저항은 크게 감소하지 않는다. 현재의 전위간섭을 고려한 병렬접지전극의 합성 접지저항 및 합성 접지임피던스에 관한 연구는 많이 이루어지지 않았다. 본 논문에서 수직 접지전극을 정n각형배열로 배열하였을 경우에 모의해석 방법을 제안하였으며 그 정확도를 평가하기 위해 실측값과 비교하였다.

#### 1. 서 론

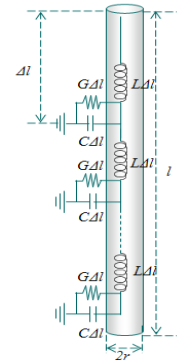
수직 접지전극을 시공할 경우 1본의 접지전극으로 구하고자 하는 접지저항을 얻지 못하는 경우가 많다. 이러한 경우 접지전극의 길이를 늘리는 것보다 접지전극을 병렬로 시공함으로써 경제적이고 보다 쉽게 원하는 접지저항값을 얻을 수 있다. 그러나 병렬 시공된 접지전극에 이상 전류가 유입될 경우 그림 1과 같이 접지전극간 간섭이 발생하게 되며, 접지저항은 개별접지전극의 이론적인 합성 저항값처럼 감소하지 않는다. 접지전극이 병렬로 시공될 경우 그림 1과 같이 접지전류의 흐름에 따라 전위가 발생되며, 발생된 전위로 인하여 주변 접지전극의 전위는 상승하게 된다. 또한 다수의 접지전극을 시공하였을 경우 주변 접지전극으로부터 더 많은 전위간섭의 영향을 받게 되어 접지전극에 중첩되는 전위는 높아지므로 합성 접지저항도 증가하게 된다. 따라서 접지전극의 병렬 효과는 감소하게 된다. 현재의 병렬 접지전극에 관한 연구는 합성 접지저항 측면에서만 주로 검토되어 왔다. 또한 다수의 접지전극이 시공되었을 경우 일반화된 합성 접지저항 및 합성 접지임피던스에 관한 연구는 거의 이루어지지 않는 상태이다. 따라서 본 연구에서는 정n각의 배치로 접지전극을 시공하였을 경우 주파수 변동에 따른 합성 접지임피던스의 특성을 분석하기 위해 분포정수회로모형을 이용하여 합성 접지임피던스를 해석하였으며, 그 결과를 측정결과와 비교·분석하였다.



〈그림 1〉 접지전류에 의한 전위간섭

#### 2. 분포정수회로 모델에 의한 합성 접지임피던스

병렬로 시공된 수직 접지전극을 분포정수회로모델로 나타내면 그림 2와 같이 접지전극의 인덕턴스와 토양과 접지전극간의 컨덕턴스, 서셉턴스로 나타낼 수 있다.[1]



〈그림 2〉 수직 접지전극의 분포정수회로모델의 등가회로

수직 접지전극에 대한 접지저항을 Tagg의 식을 이용하여 식 (1)과 같이 접지저항  $R_0$ 를 계산하고, 단위길이당 컨덕턴스  $G$ 를 접지저항의 역수로 나누어 식(2)와 같이 산정할 수 있다. 단위길이당의 커패시턴스와 인덕턴스  $C, L$ 은 단위 길이당 컨덕턴스  $G$ 를 식(5), (6)에 대입하여 식 (3), (4)과 같이 산정할 수 있다.

$$R_0 = \frac{\rho \ln\left(\frac{4l}{d}\right)}{2\pi l} [\Omega] \tag{1}$$

$$G = \frac{2\pi}{\rho \ln\left(\frac{4l}{d}\right)} [D/m] \tag{2}$$

$$C = \frac{2\pi \epsilon_r \epsilon_0}{\ln\left(\frac{4l}{d}\right)} [F/m] \tag{3}$$

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{4l}{d}\right) [H/m] \tag{4}$$

$$C/G = \epsilon_r \epsilon_0 \rho \tag{5}$$

$$LC = \mu_0 \epsilon_r \epsilon_0 \tag{6}$$

여기서  $l$ 은 수직 접지전극의 길이,  $d$ 는 수직 접지전극의 직경,  $\rho$ 는 대지저항률,  $\epsilon_r$ 은 토양의 비유전율,  $\epsilon_0$ 은 진공의 유전율,  $\mu_0$ 는 진공의 투자율이다. 식 (2)~(4)의 수직 접지전극의 분포회로정수와 전송선로의 전파방정식을 이용하여 수직 접지전극의 전류 인가점에서 본 임피던스를 식 (7)과 같이 산출하였다.  $\dot{a}$ 와  $\dot{Z}$ 는 각각 전파정수와 특성임피던스로 분포회로정수와 관계는 식(8), (9)와 같으며, 수직 접지전극 끝단은 무부하인 것으로 가정하였다.[1] 토양의 대지저항률과 비유전율의 주파수의존성을 반영하기 위해 문헌 [2]와 같이 토양의 샘플을 취하여 측정된 후 합성 접지임피던스의 모의해석에 반영하였다.[2] 수직 접지전극을 정n각형 배치로 병렬 시공하였을 때 접지전극에 나타나는 총 전위간섭 영향  $\Delta Z$ 를 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.[3] 여기서  $D$ 는 그림 3과 같이 정n각형위에 형성된 원의 직경이며,  $n$ 은 수직 접지전극의 개수이다. 따라서 정n각형의 합성 접지임피던스의 경우 식(10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{Z} = \frac{\dot{E}_S}{\dot{I}_S} = \frac{e^{2\dot{a}l} + 1}{e^{2\dot{a}l} - 1} \dot{Z}_C \tag{7}$$

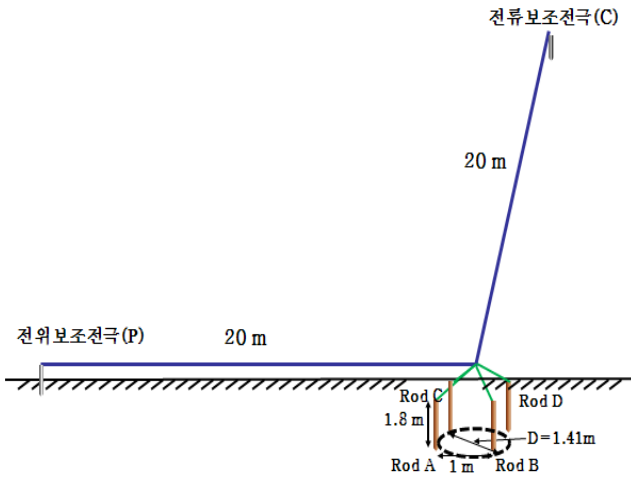
$$\dot{\alpha} = \sqrt{j\omega L(G + j\omega C)} \quad (8)$$

$$\Delta Z = \frac{\rho}{2\pi n l} \left( \frac{2nl}{\pi D} \ln \frac{2n}{\pi} \right) \quad (9)$$

$$Z = \frac{\dot{Z}}{n} + \Delta Z \quad (10)$$

### 3. 실험계

수직 접지전극의 합성 접지임피던스의 주파수의존성을 분석하기 위해 그림 3과 같은 실험계를 구성하여 합성 접지임피던스를 측정하였다. 측정대상 접지전극의 접지임피던스의 측정에는 IEEE Std. 81.2-1991에서 제안한 수정된 전위강하법을 사용하였으며[4], 전위보조전극과 전류보조전극을 측정대상 접지전극의 길이의 10 배이상 이격된 위치에 설치하여 도전유도에 의한 오차를 작게 하였다[5].

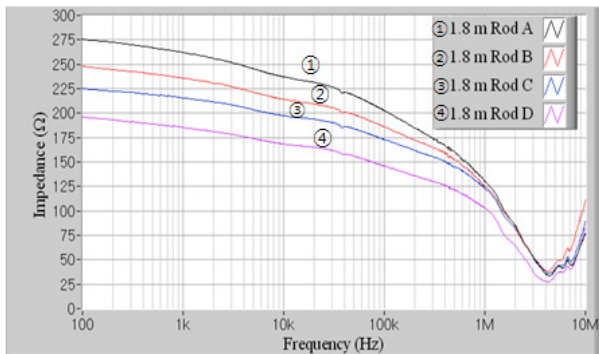


〈그림 3〉 접지임피던스 측정을 위한 실험계

정현파 교류 80 MHz까지 발생시킬 수 있는 함수발생기와 DC-250 MHz의 주파수대역을 갖는 전력증폭기를 이용하여, 측정대상 접지전극에 시험전류를 인가하였으며, 전위보조전극과 측정대상 접지전극 사이에서 측정된 전위차를 기반으로 합성 접지임피던스를 산출하였다.

### 4. 결과 및 검토

그림 4는 각각의 독립 접지전극의 접지임피던스의 주파수의존성을 나타낸다. 측정된 수직 접지전극은 주파수가 높아질수록 접지 임피던스가 감소하는 용량성 특성이 나타났다. 이때 100 Hz에서 측정된 수직 접지전극의 접지 임피던스를 바탕으로 식 (1)에 의해 환산한 길보기 대지저항률을 산출하여 표 1에 나타냈었다. 모의해석에서는 각각의 독립접지전극의 대지저항률에 평균값을 구하여 반영하였다.

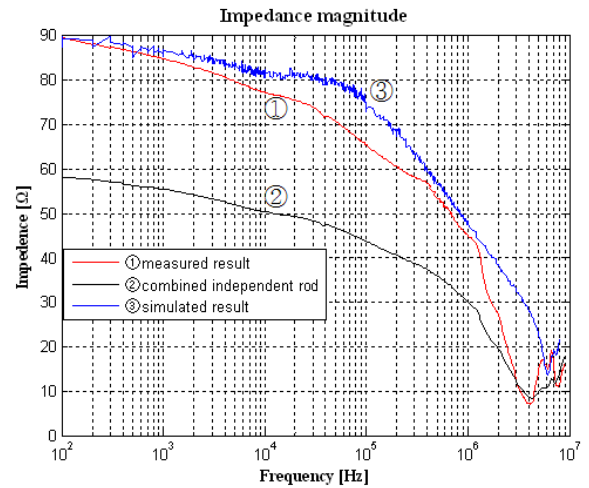


〈그림 4〉 독립 접지전극의 접지임피던스의 주파수의존성

〈표 1〉 접지전극의 평균대지저항률

접지전극	Rod A	Rod B	Rod C	Rod D	평균대지저항률
대지저항률[Ω·m]	505	452	412	359	432

식 (1)과 식(9)의 합으로 정n각형의 합성 접지저항을 구할 수 있다. 실험 조건과 동일한 조건인 D=1.414 m이고 평균대지저항률 432 [Ω·m]의 조건으로 합성 접지저항을 구하였다. 합성 접지저항 값은 87.9 [Ω]이 산출되었고 실측값과 거의 일치하는 값이 산출되었다. 합성 접지임피던스의 경우 모의결과의 정확도를 입증하기 위해 실측값과 모의값의 비교를 그림 5에 나타내었다. ③곡선은 본 논문에서 제안한 식에 의해 계산한 결과이며 ①의 곡선은 그림 3의 실험계를 통해 측정된 합성 접지임피던스 값을 나타낸다. 측정된 값은 주파수가 높아질수록 임피던스가 감소하는 용량성 특성으로 나타났다. 두 그래프의 비교결과 모의값과 측정값은 어느 정도 일치하는 추세를 확인할 수 있었다. ②의 곡선은 그림 4에 나타낸 독립접지전극의 접지임피던스를 이론적으로 합성한 결과이다. 이때의 값은 접지전극 상호간에 전위간섭이 배제된 값으로 접지전극간 간섭영향이 포함된 ①의 곡선과의 차이는 간섭에 의해 증가된 임피던스의 값으로 판단된다. 따라서 병렬 시공된 수직 접지전극을 모의해석할 경우 반드시 전위간섭영향에 따른 증가된 접지임피던스를 고려해 주어야 한다.



〈그림 5〉 합성 접지임피던스의 모의해석결과와 측정결과의 비교

### 5. 결론

본 논문에서는 정n각형 배치로 수직 접지전극을 병렬 시공하는 경우 전위간섭을 고려하여 합성 접지임피던스의 주파수의존성을 해석하는 기법을 제안하였다. 본 논문에서 제안된 기법으로 해석된 결과는 측정결과와 잘 일치하였으며, 접지전극을 병렬로 설계할 때 설계기술로써 활용성이 기대된다.

### [참고 문헌]

- [1] 이복희, 김중호, 최종혁 “분포정수회로모델을 이용한 수직접지전극의 접지임피던스의 분석”, 전기학회논문지 Vol.59, No 6, pp1103-1108, 2010
- [2] 최종혁, 차응석, 이복희 “수분함유량에 따른 토양의 저항률 및 비유전율의 주파수 의존성 2010 조명전기설비학회 논문지 Vol 24, No.1 pp98-104
- [3] EPRI Guide for Transmission Line Grounding
- [4] IEEE Std. 81.2-1991, IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems, pp.12~.17, 1991.
- [5] 최종혁, 최영철, 이복희, “수직 접지전극의 접지임피던스 측정에서 도전유도에 의한 오차 평가”, 대한전기학회 논문지, Vol. 58 No. 9, pp.1778-1783, 2009