

다중 접지계 GPR 수치 해석을 위한 최적 모델링 기법

A Modeling Optimization for Numerical Analysis of GPR in Multi-Grounding Systems

이재복 · 장석훈 · 명성호 · 조연규

Jae-Bok Lee · Sug-Hun Chang · Sung-Ho Myung · Yeon-Gyu Cho

요 약

본 연구는 combined integration/matrix method에 의해 다양한 접지 시스템의 특성을 모의할 수 있는 수치 해석 기법에 관한 연구이다. Combined integration/matrix method는 접지 시스템을 일정한 길이의 요소로 분할하여 미리 적분을 한 후 적분된 길이 요소 기법에 대해 matrix method를 사용하는 방법으로 연산 시간 및 해석시 에러 발생을 줄일 수 있다. 이를 위해 본 연구에서는 수치 해석시 분할 요소 길이에 대한 오차 분석을 통해 최적의 요소 길이 산정 방법을 제시하였으며 이를 통해 실규모 접지 시스템의 다양한 형태의 접지 시스템의 성능 분석이 가능하도록 하였다. 오차 분석을 토대로 접지 전극의 길이와 매설 깊이에 따라 적절하게 요소의 길이를 도출한 결과 분할하고자 하는 요소의 길이는 매설 깊이와 접지 도체의 길이에 주요한 상관 관계가 있음을 알 수 있었으며 본 연구에서 제시한 수치 해석 모델링 방법에 따라 3% 이내의 해석 정확도를 얻을 수 있었다. 또한, 이를 다중 접지계 해석에 적용하여 현재 산업 플랜트 접지 방식에서 가장 논란이 되고 있는 전원 접지계와 신호/통신 접지계의 공통 접지 및 분리 접지의 영향 평가 등에 활용될 수 있음을 보여주었다.

Abstract

This paper describes the numerical analysis techniques using the Combined Integration/Matrix Method to calculate ground potential rise which can be occurred in the various grounding systems. Combined Integration/Matrix Method is used to reduce the error and computation time with the analytical integration equation and the proper segmentation of earth embedded conductor. To do it, optimal segmentation method for the buried conductors is presented through error analysis which is capable of applying the practical scaled various grounding systems. The optimum length of segmented element is much co-related with the buried depth of grounding electrode and the maximum length of buried electrode. As a result, less 3 percent errors was obtained by proposed model. The proposed model is applied to verify an effect of multi-grounding problems which was aroused much controversy with separated or common grounding between the high power grounding system and low power grounding system such as signal and telecommunication grounding.

Key words : GPR(Ground Potential Rise), Combined Integration/Matrix Method, Multi-Grounding System

I. 서 론

산업 플랜트 설비가 대규모화되고 복잡화됨에 따

라 안전성과 경제성을 고려한 접지 시스템의 설계에 대한 관심이 높아지고 있다. 이러한 접지 시스템의 특성은 접지 전극의 종류, 형태, 이격 거리, 매설 깊

한국전기연구원 전력연구단, 전기환경송전연구그룹(Electrical Environment & Transmission Group, Electric Power Research Lab, Korea Electrotechnology Research Institute)

· 논문 번호 : 20061009-122

· 수정완료일자 : 2006년 11월 7일

이, 토양의 저항률 등 다양한 요인에 따라 변한다. 또한 대규모의 접지계에서는 수평 매설 지선과 수직봉 등이 조합된 망상형 구조로 이루어져 있으며 이들 접지 시스템을 실규모로 모의, 분석하기에는 현실적으로 불가능하다. 이에 대한 대안으로써 축소 모델을 이용한 접지계의 모의 해석 방법과^{[1],[2]} 컴퓨터 수치 해석을 이용한 접지계의 해석 방법이 널리 적용되고 있으나^{[3],[4]}, 전자의 경우 다중 접지계를 모의하기 위해서는 대지를 모의하는 수조의 크기가 커야 하는 단점이 있으며, 다층 구조의 접지계를 구현하기가 매우 힘들다. 한편, 후자의 경우 대규모 접지계를 계산시 요소 분할 수가 매우 커지게 되어 계산 시간이 길어지게 되고, 해의 정확도가 불안정해지는 계산상의 어려움이 있다. 이에 따라 본 연구에서는 combined integration/matrix method에 의해 다양한 접지 시스템의 특성을 모의할 수 있는 해석 도구를 구현하고 정확한 해를 구하는 모델링 기법을 제안하였다. 본 연구에서는 combined integration/matrix method를 이용한 접지계 계산시 접지 전극의 매설 깊이 및 길이에 따라 계산 오차를 최소화하는 최적 요소 분할의 관계식을 제시하였으며 이를 위해 전자기장 해석에 사용되는 경계조건에 의한 전위 오차 분석방법을 도입하였다. 이를 통해 실규모 접지 시스템의 다양한 형태의 접지 시스템의 성능 분석이 가능하도록 하였다. 또한, 이를 다중 접지계 해석에 적용하여 현재 산업 플랜트 접지 방식에서 가장 논란이 되고 있는 전원 접지계와 신호/통신 접지계의 공통 접지 및 분리 접지의 영향 평가 등에 활용한 사례를 제시하였다.

II. Combined Integration/Matrix Method에 의한 접지계 수치 해석

2.1 접지계의 기본 방정식^[5]

접지계를 모의 해석하기 위해서 그림 1과 같이 점 전류원을 모의할 수 있는 무한히 작은 금속체를 고려한다. 여기에서 대지내의 임의의 한점 A_s 에 위치한 점 전류원으로부터 총 전류 I_s 가 대지로 흐른다고 가정하면 대지내의 임의의 점 $A(r, \phi, z)$ 에서의 전압 $V(r, \phi, z)$ 는 다음 식 (1)과 같은 Laplace 방정식을 만족한다.

$$\nabla^2 V(r, \phi, z) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V(r, \phi, z)}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V(r, \phi, z)}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 V(r, \phi, z)}{\partial z^2} = 0.0 \quad (1)$$

여기에서 r, ϕ, z 는 그림 1(a)에서 원통 좌표계에서의 좌표값이며, 주어진 모델이 대칭성을 갖기 때문에 좌표 ϕ 와는 무관하게 되므로 결국 식 (1)은 다음과 같이 정리된다.

$$\nabla^2 V(r, z) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial V(r, z)}{\partial r} + \frac{\partial^2 V(r, z)}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

식 (2)의 해는 잘 알려져 있듯이 식 (3)과 같은 zero order의 Bessel 함수로 주어지게 되며 여기에서 k 는 매개 변수이고 $\theta(k)$ 는 임의 함수로써 경계 조건으로부터 결정된다.

$$V(r, z) = -\frac{I_s}{4\pi\sigma l} \int_{k=0}^{\infty} \theta(k) J_0(kr) e^{\pm kz} dk \quad (3)$$

위 식에서 해는 2가지 방향으로 존재하는데 $+z$ 축으로 전파되는 해는 (-) 부호에 따르므로 영역 2

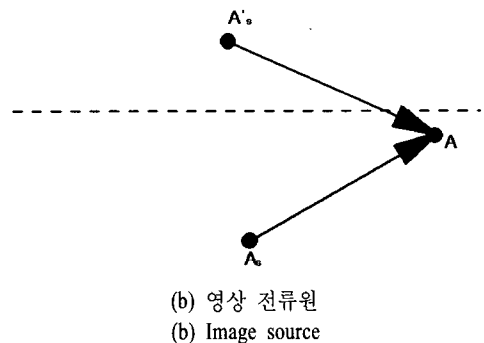
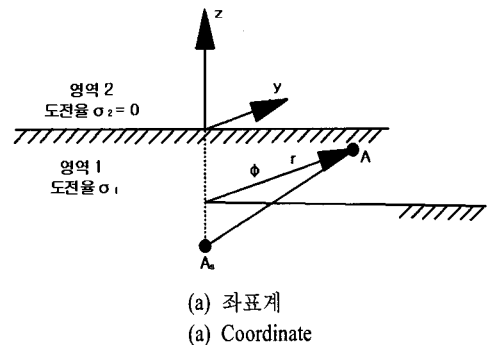


그림 1. 대지내의 점 전류원
Fig. 1. A point current source inside the semi-infinite conducting earth.

에서 일반해는 식 (4)로 주어지며 영역 1에서 일반해는 식 (5)로 주어지게 된다.

$$V_2(r, z) = \frac{I_s}{4\pi\sigma_1} \int_0^\infty \theta_2(k) J_0(kr) e^{-kz} dk, \quad z > 0 \quad (4)$$

$$V_1(r, z) = \frac{I_s}{4\pi\sigma_1} \int_0^\infty J_0(kr) e^{-k|z-z_s|} dk + \frac{I_s}{4\pi\sigma_1} \int_0^\infty \theta_1(k) J_0(kr) e^{kz} dk, \quad z \leq 0 \quad (5)$$

$r=0$ 인 경계점에서는 식 (4)와 식 (5)에서 구한 전위 V 가 식 (6)과 같이 동일하고, 또한 연속 조건이 성립하므로 식 (4)와 식 (5)의 1계 미분방정식의 값도 식 (7)과 같이 모든 r 에 대해 동일하게 된다.

$$V_1(r, 0) = V_2(r, 0) \quad (6)$$

$$\sigma_1 \frac{\partial V_1(r, 0)}{\partial z} = \sigma_2 \frac{\partial V_2(r, 0)}{\partial z} \quad (7)$$

식 (6)과 식 (7)에서 임의의 미지함수 $\theta_1(k)$ 와 $\theta_2(k)$ 가 구해지게 되고, 이를 원식인 식 (4)와 (5)에 대입하면 미지 함수가 소거된 최종식을 다음 식 (8) 및 식 (9)와 같이 얻을 수 있다.

$$V_2(r, z) = \frac{I_s}{4\pi\sigma_1} \int_0^\infty 2J_0(kr) e^{-k(z-z_s)} dk \quad (8)$$

$$V_1(r, z) = \frac{I_s}{4\pi\sigma_1} \int_0^\infty J_0(kr) e^{-k|z-z_s|} dk + \frac{I_s}{4\pi\sigma_1} \int_0^\infty J_0(kr) e^{k(z+z_s)} dk, \quad z \leq 0 \quad (9)$$

위 식에 식 (10)의 Bessel 함수값을 적용하면 구하고자 하는 영역 1에서의 전위가 식 (11)과 같이 얻어진다.

$$\int_0^\infty J_0(kr) e^{ka} dk = \frac{1}{(r^2 + a^2)^{0.5}} \quad (10)$$

$$V_1(r, z) = \frac{I_s}{4\pi\sigma_1} \left\{ \frac{1}{[r^2 + (z-z_s)^2]^{0.5}} + \frac{1}{[r^2 + (z+z_s)^2]^{0.5}} \right\} \quad (11)$$

여기에서 식 (11)을 직각 좌표계로 나타내면 접지계 해석의 기본이 되는 지배방정식인 식 (12)가 얻어지게 된다.

$$V_1(r, z) = \frac{I_s}{4\pi\sigma_1} \{ [(x-x_s)^2 + (y-y_s)^2 + (z-z_s^2)]^{-0.5} + [(x-x_s)^2 + (y-y_s)^2 + (z+z_s)^2]^{-0.5} \} \quad (12)$$

2-2 Matrix Method에 의한 접지계 수치해석

접지계 해석의 기본 개념은 접지계를 매우 작은 요소로 분할하여 점 전류원으로 취급하는 것이다. 이 방법은 현실적으로 해석시 메모리 문제와 행렬이 너무 커지게 되어 수치 에러가 발생하게 되는 제약 조건이 있어 실제 수치 해석방법은 후에 기술하는 combined integration/matrix method를 이용한다. 그림 1(a)와 같은 간단한 사각 모양의 접지극을 매설하는 경우 그림 1(b)와 같이 접지극을 매우 작은 요소로 분할한다.

여기에서 i 번째 요소는 중심에 전류가 I_i 인 점 전

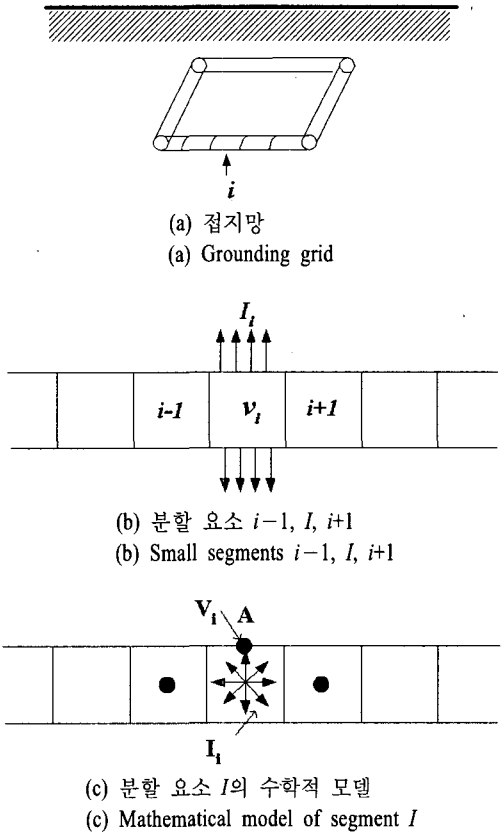


그림 2. Matrix method 설명
Fig. 2. Illustration of matrix method.

류를 갖는다고 가정하고 이때 요소 표면 전위는 V_i 로 나타낸다. 이와 같은 모델링은 $i-1$ 번째 요소, $i+1$ 번째 요소 등 모든 부분에 동일하게 적용된다. 그림 1의 (c)와 같이 전극 표면상의 임의의 점 A에서의 전압 V_i 는 앞에서 구한 접지계의 기본 방정식인 식 (12)에 따라 식 (13)과 같이 표현할 수 있다.

$$V_i = f(x_{Ai}, y_{Ai}, z_{Ai}, x_j, y_j, z_j, \sigma) I_j \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \text{단, } & f(x_{Ai}, y_{Ai}, z_{Ai}, x_j, y_j, z_j, \sigma) I_j \\ &= \frac{1}{4\pi\sigma} \sqrt{(x_{Ai}-x_j)^2 + (y_{Ai}-y_j)^2 + (z_{Ai}-z_j)^2} \\ &+ \sqrt{(x_{Ai}-x_j)^2 + (y_{Ai}-y_j)^2 + (z_{Ai}+z_j)^2} \end{aligned}$$

(x_{Ai}, y_{Ai}, z_{Ai}) : i 번째 요소의 전극 표면 좌표

(x_j, y_j, z_j) : j 번째 요소의 중심 좌표

I_j : j 번째 요소에서 대지로 흐르는 총 전류

여기에서 n 개의 요소를 가정하면, 다음과 같은 n 개의 요소 방정식이 존재하게 되며 이를 일반화 하면 식 (14)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} V_1 &= \sum_{j=1}^n f(x_{A1}, y_{A1}, z_{A1}, x_j, y_j, z_j, \sigma) I_j \\ V_2 &= \sum_{j=1}^n f(x_{A2}, y_{A2}, z_{A2}, x_j, y_j, z_j, \sigma) I_j \\ &\dots \dots \dots \\ V_n &= \sum_{j=1}^n f(x_{An}, y_{An}, z_{An}, x_j, y_j, z_j, \sigma) I_j \\ V(x, y, z) &= \sum_{j=1}^n f(x, y, z, x_j, y_j, z_j, \sigma). \quad (14) \end{aligned}$$

일반적으로 접지극에 사용되는 도체는 나동선으로 도전율을 고려하면 접지계의 전위는 동일하다고 생각할 수 있으므로 전극의 모든 부분에서 전위는 일정하게 된다. ($V_1 = V_2 = \dots = V_n = V$)

이를 행렬식을 이용하여 표현하면 식 (15)와 같으며 여기에서 VDF(Voltage Distribution Factors)는 전압분포계수라 칭한다.

$$V1 = [VDF][I] \quad (15)$$

여기에서, $1^T = [1 \ 1 \ 1 \ \dots \ 1]$

$$[I]^T = [I_1 \ I_2 \ \dots \ I_n]$$

$$[VDF]_{ij} = f(x_{Ai}, y_{Ai}, z_{Ai}, x_j, y_j, z_j, \sigma)$$

다중 접지계 GPR 수치 해석을 위한 최적 모델링 기법

그러므로 식 (15)로부터 전류 $[I]$ 는 다음 식 (16)과 같이 계산된다.

$$[I] = [VDF]^{-1} 1^T V \quad (16)$$

따라서 접지계로부터 대지로 흐르는 총 전류 I_T 와 이때 접지계 임피던스(저항) R 은 다음과 같이 표현된다.

$$I_T = \sum_{j=1}^n I_j = 1^T [I] \quad (17)$$

$$R = \frac{V}{I_T} \quad (18)$$

2-3 Combined Integration/Matrix Method에 의한 접지계 수치 해석

Matrix method에 의한 수치 해석의 기본 개념은 단순하지만, 메모리가 문제로 수치 에러가 발생하는 제약조건을 극복하기 위해서 전극의 일정한 길이를 미리 적분을 해두고, 적분된 길이 요소에 대해 matrix method를 사용하는 Hybrid 방식을 이용한다. 대지내의 임의의 점 (x, y, z) 에서의 전위는 명백히 전극으로부터 흐르는 전류에 비례하므로 다음과 같은 식 (19)를 생각할 수 있다.

$$V = R_s I \quad (19)$$

여기에서 I 는 도체로부터 대지에 흐르는 전류를 나타내며, R_s 는 접지계의 구성과 모양의 대지의 도전율을 함수로 하는 저항과 유사한 의미를 갖는 전압분포 계수(Voltage Distribution Factors: VDF)이다. 따라서 VDF를 구하게 되면 식 (19)를 이용하여 전압 V 나 전류 I 를 구할 수 있게 된다.

이러한 VDF 값은 전극 도체의 기하학적 구조에 따라 결정되는 함수이므로 전극의 배열에 따라 무수히 많은 경우가 발생하게 된다. 그러나 접지계를 구성할 때에는 보통 전극을 X, Y, Z 축에 따라 매설하게 되므로 전극 배열에 따른 VDF는 축과 평행한 경우만 고려하여도 현실적으로 큰 문제가 없다고 여겨진다. 아래에 축 방향으로 놓여진 도체와 임의의 점간의 VDF를 나타내었다.

그림 3과 같이 길이가 $2L_1$ 이고, 중심좌표가 (x_1, y_1, z_1) 인 전극 도체가 X축 방향으로 놓여 있을 때

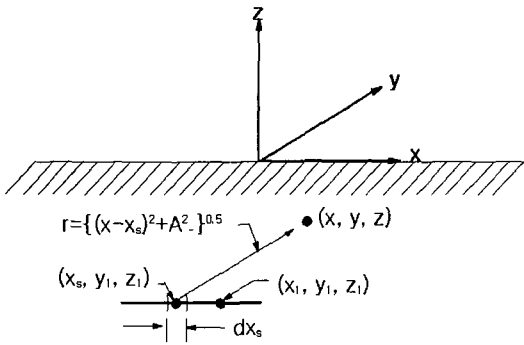


그림 3. 선 전류원에 의한 임의의 점 (x, y, z) 에서의 전위
 Fig. 3. Potential of (x, y, z) due to the line current source.

도체 반경이 작고, 전류 I_1 이 균일하게 분포되어 있다면 선전류 밀도는 $I_1/2L_1$ 이 된다. 이때 선 전류원의 미소 길이 dx_s 에서의 전류는 $I_1 dx_s/2L_1$ 이 되며 임의의 점 (x, y, z) 에서의 전위 v 는 다음과 같이 표현된다.

$$dv(x, y, z) = \frac{I_1 dx_s}{8L_1 \pi \sigma} \{ [(x-x_s)^2 + A_-^2]^{-1} + [(x-x_s)^2 + A_+^2]^{-0.5} \} \quad (20)$$

$$\text{단, } A_{\pm}^2 = (y-y_1)^2 + (z \pm z_1)^2$$

따라서 그림 3의 임의의 점 (x, y, z) 에서의 전위는 식 (20)을 도체의 길이 방향으로 다음과 같이 적분한 값이 된다.

$$V(x, y, z) = \int dv(x, y, z) = \frac{1}{8L\pi\sigma} \int_{x_1-L}^{x_1+L} \{ [(x-x_s)^2 + A_-^2]^{-0.5} + [(x-x_s)^2 + A_+^2]^{-0.5} \} dx_s \quad (21)$$

식 (21)을 매개변수법을 이용하여 풀면 식 (22)와 같다.

$$V(x, y, z) = \frac{I}{8L\pi\sigma} [F_1(x-x_1+L, A_-) - F_1(x-x_1-L, A_-) + F_1(x-x_1+L, A_+) - F_1(x-x_1-L, A_+)] \quad (22)$$

$$\text{단, } F_1(t, u) = \ln[t + (t^2 + u^2)^{0.5}]$$

최종적으로 X축 방향으로 놓여진 도체와 임의의 점 (x, y, z) 간의 VDF는 식 (23)과 같이 나타낸다.

$$VDF = \frac{1}{8L\pi\sigma} [F_1(x-x_1+L, A_x^-) - F_1(x-x_1-L, A_x^-) + F_1(x-x_1+L, A_x^+) - F_1(x-x_1-L, A_x^+)] \quad (23)$$

$$\text{단, } A_x^{\pm} = \sqrt{(y-y_1)^2 + (z \pm z_1)^2}$$

위와 같은 방법으로 y축, Z축 방향으로 놓여진 도체와 임의의 점간의 VDF 및 같은 축방향으로 놓여진 두 도체간의 VDF와 다른 축방향으로 놓인 도체간의 VDF를 나타낼 수 있다.

III. 접지전극 최적 요소 길이 산정

3-1 수치해석시 분할 요소 길이 산정의 필요성

본 연구에서 사용한 matrix/integration 방법에 의한 접지계 수치 해석시 가장 중요한 것은 하나의 접지전극을 몇 개의 요소로 분할하여야 하는 점이다. 일반적으로 수치 해석에 있어 작은 요소로 많이 분할한다고 하여 계산의 정확도가 증가하지 않으며 오히려 불리해질 수 있다. 본 장에서는 접지계 수치 해석에 있어서도 마찬가지로 현상이 발생됨을 보이고 계산의 정확도를 기할 수 있는 요소 길이 모델링 방법을 찾고자 한다. 즉, matrix method를 이용한 접지계 계산시 계산 오차를 최소화하는 접지전극의 매설 깊이 및 길이와 최적 요소 분할의 상관 관계식을 구하고자 한다. 이를 위해 전자기장 해석시 계산의 정확도 검증 수단으로 사용되는 경계 조건에 의한 전위 오차 분석 기법을 도입하고자 한다.

3-2 오차 분석 방법

경계 요소(boundary element)를 이용한 수치 해석 방법에서 일반적으로 해의 정밀도는 검사점에서의 전위 오차 분석을 통해 평가하는데^[6], 검사점이란 경계 조건을 준 지점(유평점)을 제외한 경계 조건을 만족해야 하는 지점으로 본 문제에서는 접지 전극 도체상의 표면이 된다.

검사점에서 평균 전위 오차를 식으로 표현하면 다음 식 (24)와 같이 표현된다^{[7],[8]}.

$$Error = \frac{\sum_{i=1}^N |\phi_{cal}(i) - \phi_{ref}|}{\phi_{ref} \cdot N} \times 100 \quad [\%] \quad (24)$$

$\phi_{cal}(i)$: i 번째 검사점(x_i, y_i, z_i)에서의 전위 [V]

ϕ_{ref} : 윤곽점에서의 기준 전위 [V]

N : 검사점의 갯수

즉, 접지계 해석에 있어 대지를 통하여 흐르는 요소 전류값을 구하기 위해 접지 전극의 윤곽점에서 기준 전위를 1 V로 주고 검사점에서도 기준 전위 1 V에 대한 오차율을 분석하면 계산의 정확도를 알아 볼 수 있다.

3.3 오차 분석 결과

본 연구에서는 접지 전극의 길이가 10 m, 50 m, 100 m인 모델을 선정하여 먼저 접지 전극의 직경 및 매설 깊이에 따른 오차의 변화를 분석하였다. 일반적으로 사용하는 직경 30 mm 이하의 접지 전극에 있어서는 접지 전극의 직경에 따른 오차 변화는 거의 없었으며, 주요 오차 요인은 매설 깊이로 판단된다.

접지 전극의 길이가 10 m인 경우 매설 깊이에 따른 오차 분석 결과를 표 1에 나타내었다. 접지 저항 계산시 토양 저항률은 100 Ωm로 하였다.

표 1에서 알 수 있듯이 접지 전극의 길이가 10 m인 경우에는 매설 깊이가 0.05 m이면 분할 요소의 길이를 0.5 m로 하는 것이 오차가 가장 적었으며, 매설 깊이가 0.5 m 이상이면 분할하지 않고 10 m로 하는 것이 오차가 가장 적었다.

접지 전극의 길이가 50 m인 경우, 매설 깊이에 따른 오차 분석 결과를 표 2에 나타내었다. 접지 저항 계산시 토양 저항률은 100 Ωm로 하였다. 접지 전극의 길이가 50 m인 경우에는 매설 깊이가 0.05 m이면 분할 요소의 길이를 0.5 m, 매설 깊이가 0.5 m이면 분할 요소의 길이는 5 m, 매설 깊이가 1.0 m이면 분할 요소의 길이는 10 m로 하는 것이 오차가 가장 낮게 나타났다. 위와 같은 방법으로 분석한 결과 100 m인 경우에는 매설 깊이가 0.05 m이면 분할 요소의 길이를 0.5 m로 하는 것이 오차가 가장 적었으며, 매설 깊이가 0.5 m이면 분할 요소의 길이는 1 m로 하는 것이 오차가 가장 적었다. 그리고 매설 깊이가 1.0 m이면

표 1. 요소 분할에 따른 오차 분석(전극 길이: 10 m)
Table 1. Error analysis of segmentation for the 10 m length of electrode.

접지전극 길이 [m]	전극매설 깊이 [m]	요소분할 길이	오차 [%]	접지 저항 [Ω]
10	0.05	10	4.31	18.99
10	0.05	5	4.31	18.96
10	0.05	1	1.84	18.63
10	0.05	0.5	0.94	18.33
10	0.05	0.2	5.05	17.48
10	0.5	10	4.61	15.22
10	0.5	5	5.06	14.95
10	0.5	2	6.34	14.10
10	0.5	1	15.71	12.81
10	0.5	0.5	42.28	10.32
10	1.0	10	6.32	12.64
10	1.0	5	13.65	11.64

분할 요소의 길이는 10 m로 하는 것이 오차가 가장 낮게 분석되었다.

3.4 요소 길이 최적 산정 모델링

오차 분석을 토대로 접지 전극의 길이와 매설 깊이에 따라 적절하게 요소의 길이를 산정하는 방법을 도출한 결과는 다음과 같다. 즉, 분할하고자 하는 요소의 길이(L_seg)는 매설 깊이(H_depth) 및 접지 도체의 길이(L_line)와 대략 다음의 관계가 성립하며, 이와 같이 요소 분할을 하여 수치 계산을 하면 3% 이내의 정확도를 얻을 수 있다.

$$L_{seg} = 500 \times H_{depth} / L_{line} \quad [m] \quad (25)$$

단, $L_{line} (m) > L_{seg}(m)$

만약, 위의 식을 계산하여 분할 길이가 접지 도체 길이보다 큰 결과가 나오면 요소 분할을 할 필요가 없이 전체 전극을 하나로 모델링하는 것이 효과적이다. 위의 모델링 방법을 이용하여 메쉬 전극 (3×3, Grid 간격 2 m)에 대한 GPR 계산 예를 그림 4에 나타내었다.

표 2. 요소 분할에 따른 오차 분석(전극 길이: 50 m)
Table 2. Error analysis of segmentation for the 50 m length of electrode.

접지전극 길이 [m]	전극매설 깊이 [m]	요소분할 길이	오차 [%]	접지저항 (ohm)
50	0.05	50	3.44	4.82
50	0.05	25	3.44	4.82
50	0.05	10	2.66	4.81
50	0.05	5	2.20	4.80
50	0.05	2	1.61	4.78
50	0.05	1	0.95	4.75
50	0.05	0.5	0.43	4.69
50	0.05	0.2	7.84	4.23
50	0.5	50	3.92	4.08
50	0.5	25	3.92	4.07
50	0.5	10	2.59	4.03
50	0.5	5	1.14	3.97
50	0.5	2	1.89	3.91
50	0.5	1	11.30	3.55
50	1.0	50	4.07	3.86
50	1.0	25	4.08	3.85
50	1.0	10	2.04	3.77
50	1.0	5	3.35	3.65
50	1.0	2	11.97	3.35
50	1.0	1	30.47	2.86

IV. 다중 접지계 해석

4-1 2개의 독립 접지계로 구성된 다중 접지계 해석

다중 접지계는 전원 접지계와 통신 접지계가 혼재된 접지계에서 흔히 사용되고 있는 방법으로 1990년대 이래 접지계간의 전위차를 억제한다는 관점에서 접지계를 상호 연결하는 본딩 방법이 전 세계적으로 권장되고 있다. 그러나 전원용 접지계에 흐르는 전원 계통의 불평형 전류가 변압기의 중성점을 통해 흐르는 경우, 통신 계통에 영향을 미치는 관점과 전력선

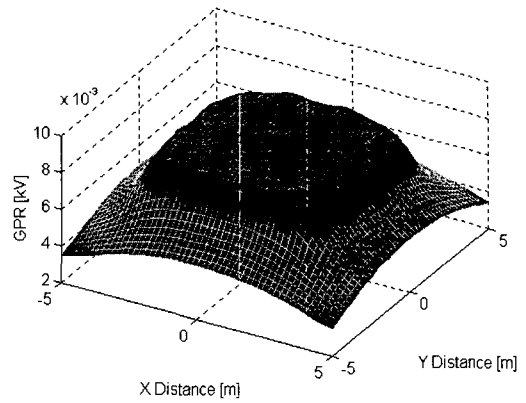


그림 4. GPR 계산 결과(토양 저항률은 100 Ωm)
Fig. 4. GPR calculation result(soil resistivity: 100 Ωm).

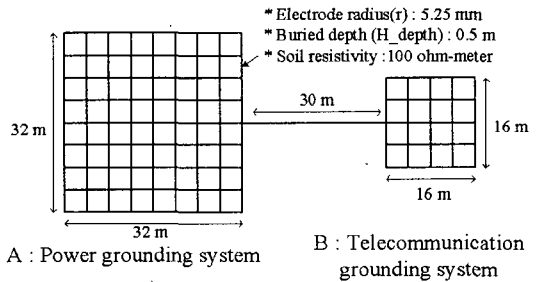


그림 5. 2개의 모의 독립 접지계
Fig. 5. Modeled two isolated grounding systems.

의 일선 지락시 소신호 통신 회로로 과전압의 전달 관점에서 접지계를 분리 운용하는 사례도 많이 있어 다중 접지계의 독립 혹은 본딩시에 따르는 영향을 검토할 필요가 있다.

이와 같은 배경으로 여기에서는 본 연구에서 개발한 수치 해석 도구를 이용하여 다중 접지계에 있어 각 독립 접지계를 분리하는 경우와 분리하지 않았을 경우를 상정하여 접지계 저항과 상승 전위 값을 계산하여 그 영향에 대해서 분석하고자 한다.

그림 5와 같은 이격 거리가 30 m인 두 개의 독립 접지계로 구성된 다중 접지계를 해석 모델로 사용하였다.

4-1-1 전원 접지계와 통신 접지계를 분리된 경우

전원 접지계와 통신 접지계가 분리된 경우, resistance matrix 계산 결과와 접지망의 전위 상승 계산

결과는 다음과 같다.

- Resistance Matrix 계산 결과 -

1.507811 12.166504

12.166504 3.431649

- 접지망의 전위상승 계산 결과 -

전원 접지계 A=1.374905 V

통신 접지계 B=0.302484 V

해석 결과 전원 접지계 A의 저항은 1.507811 Ω, 통신접지계 B의 저항은 3.431649 Ω 및 전원 접지계와 통신 접지계의 상호 저항은 12.166504 Ω로 계산되었다. 그리고 1 A의 전류가 전원 접지계 A에 유입되었을 때 전원 접지계 A의 도체 전위 상승은 1.374905 V, 통신 접지계 B의 도체 전위 상승은 0.302484 V로 나타나 통신 접지계의 전위 상승값이 전원 접지계의 22 % 정도로 낮아진 반면, 두 접지계 간의 전위차는 1.072 V가 발생하였다.

다중 접지계의 지표면 대위 전위 상승(GPR) 계산 결과를 Contour 형태 및 3차원 형태로 나타내면 그림 6 및 그림 7과 같이 표현된다.

4-1-2 전원 접지계와 통신 접지계가 연결된 경우

전원 접지계와 통신 접지계를 연결한 경우는 전원 접지계와 통신 접지계를 분리한 경우의 계산 결과를 이용하여 간단히 구할 수 있다. 즉, 접지계를 연결하면 두 접지계간의 상호 저항이 0이 되므로 두 접지계가 아닌 하나의 접지계로 표현된다. 이때 접지계 저항은 resistance matrix에서 대각 행렬값을 병

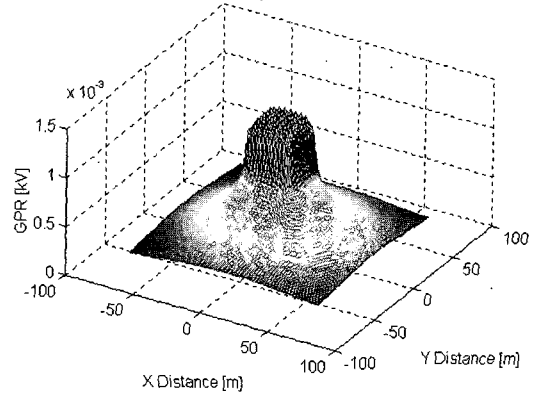


그림 7. GPR 3차원 분포도
Fig. 7. Three dimensional GPR profile.

렬로 합성하여 구할 수 있다. 엄밀히 분석하면, 두 접지계를 연결하는 도체에 의하여 전체 접지계 구성이 약간 변화하므로 대각 행렬값도 조금 바뀌게 되나, 이는 무시하여도 계산 결과에 큰 영향을 주지 않는다. 이 경우, 합성 저항값을 구하면 1.04754 Ω가 되므로 1 A의 전류가 접지계에 유입되었을 때 전원 접지계나 통신 접지계의 전위 상승 값은 동일하게 1.04754 V가 된다.

이와 같은 계산 결과를 가지고 분리한 경우와 대비하여 보면 전원 접지계와 통신 접지계를 연결하면 전원 접지계는 도체 전위가 1.374905 V에서 1.04754 V로 23.8 % 낮아진 반면, 통신 접지계는 도체 전위가 0.302484 V에서 1.04754 V로 2배 이상 상승하여 단순한 Remote 대지 전위 상승 관점에서 통신 접지계는 분리한 경우가 좋을 수 있다.

그러나 접지계를 분리하면 대부분의 통신 장치의 전원 공급원인 3상 전원부의 중성점이 위치한 전원 접지계와 통신 접지간에 전위차가 발생하고 이 전위차가 통신 전원의 입력부와 통신 장치의 외함에 발생하기 때문에 전원부의 고장시 과전압이 통신측에 더 전이될 수 있다. 즉, 두 접지계간에 전위면이 형성되지 않아, 통신 기기의 AC 전원부는 전원 접지에 연결하고, DC 전원이나 케이블의 실드선 및 통신기기의 외함을 통신 접지계에 연결하면, 위 모델의 경우 사고 전류 1 A당 1.072421 V의 전위차가 발생하여 오히려 통신 기기가 파손될 수 있는 위험을 초래할 수 있으므로 분리와 연결 문제는 시스템의 접속

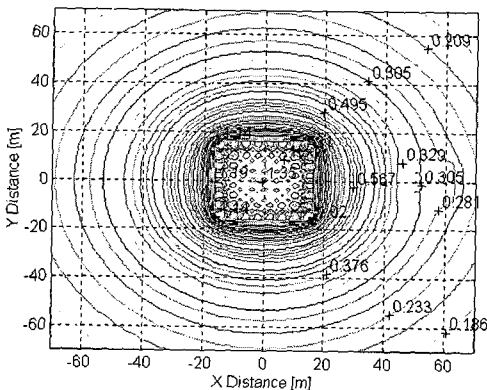


그림 6. GPR 윤곽 선도
Fig. 6. GPR contour.

상황 등을 세심히 고려하여 결정하여야 한다.

4-2 수직봉을 병렬로 연결한 접지계

실제 접지계를 구성하는 경우, 수직봉을 타입하고 전체 접지 저항을 줄이기 위해 각 수직봉을 병렬로 연결하는 경우가 많이 있다. 이와 같은 경우, 간이적인 계산 방법으로는 하나의 수직봉의 접지 저항을 계산하고 실험적 방법에 의해 알려진 근접 효과 계수를 도입하여 병렬로 연결된 전체 접지계의 저항을 구하게 된다. 그러나, 본 연구에서 제시한 바와 같이 각 접지봉을 하나의 독립 접지계로 취급하여 다중 접지계 해석을 하면 근접 효과가 수치 해석적으로 자동 반영되므로, 구해진 전체 저항 행렬의 대각 행렬만 병렬로 합성하면 쉽게 전체 접지계의 저항을 구할 수 있다. 본 연구에서는 그림 8과 같이 수직봉을 병렬로 연결한 접지계가 10 ohm 정도의 접지 저항을 갖기 위해 요구되는 토양 저항을 계산하였으며 해석 결과는 표 3에 나타내었다.

4-3 3중 Mesh 접지계

접지계를 분리하는 경우에는 보통 전원 접지계, 통

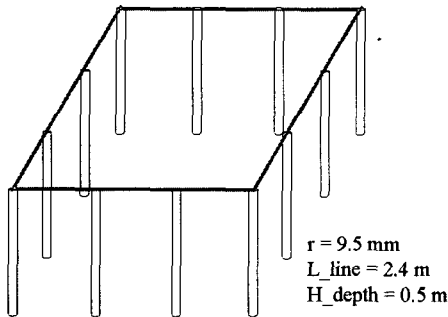


그림 8. 수직봉을 병렬로 연결한 접지계
Fig. 8. Parallel connected vertical grounding electrodes.

표 3. 요구되는 토양 저항 계산 결과
Table 3. Requiring soil resistivity to obtain the target resistance 10 ohm.

수직 접지봉 간격	병렬 합성 저항	요구 토양 저항
2 m	9.906 ohm	130 Ω·m
3 m	9.928 ohm	155 Ω·m
5 m	9.950 ohm	180 Ω·m

신 접지계, 피뢰침 접지계 등 3개의 독립 접지계로 구분할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 전원 접지계, 통신 접지계, 피뢰침 접지계 등 3개의 독립 접지계로 구성된 3중 mesh 접지계에 대하여 여러 가지 모델을 상정하고 각 경우의 접지계 해석 및 GPR을 계산하고자 한다. 기본적으로 각 접지계는 10 Ω 정도의 접지 저항을 갖는 것을 목표로 하였다.

각 독립 접지계의 기본 구성

- 전원 접지계(A)
 - 크기 : 6 m×6 m 크기의 mesh를 병렬로 연결
 - Mesh에서 도체간 거리 : 2 m
 - Mesh 접지 전극의 직경 : 4.374 mm
- 통신 접지계(B) 및 피뢰 접지계(C)
 - 크기 : 6 m×6 m 크기의 mesh
 - Mesh에서 도체간 거리 : 2 m
 - Mesh 접지 전극의 직경 : 4.374 mm

4-3-1 Case 1

토양 저항이 145 Ω·m일 때, 그림 9와 같은 3중 mesh 접지계의 구성에서는 mesh간의 이격거리가 최소한 50 m 정도는 되어야 근접 효과가 나타나지 않았으며, 다음에 나타난 Resistance Matrix 계산 결과를

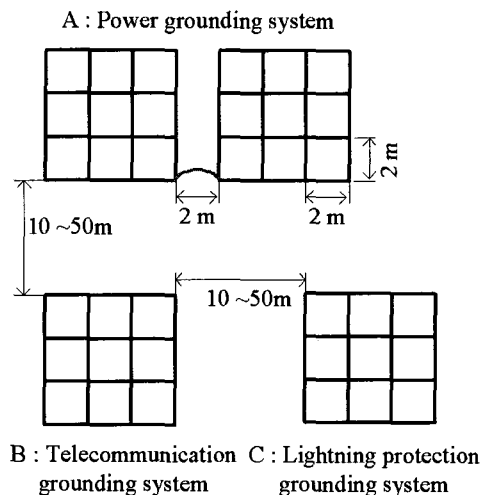


그림 9. 3개의 독립 mesh 접지계의 구성 모델
Fig. 9. Configuration of grounding simulation model with three isolated mesh.

보면 전원 접지계는 6.75 Ω, 통신 접지계는 10.88 Ω, 피뢰 접지계는 10.68 Ω로 나타났다.

이 때, 전원 접지계에 1 A의 사고 전류 유입시, 각 접지계의 전위 상승 계산 결과를 보면 전원 접지계는 6.307 V, 통신 접지계는 0.410 V, 피뢰 접지계는 0.302 V로 나타났으며 이때 대지 표면 전위 상승(GPR)의 계산 결과는 그림 10과 같다.

Resistance Matrix 계산 결과

6.753636	215.446852	154.42985
215.446852	10.678636	242.736737
154.42985	242.736737	10.876718

그림 9의 구성 모델에서 10 m 정도의 이격거리 정도만 확보가 가능하다면, 각 접지계가 10 Ω 정도의 접지 저항을 갖기 위해서는 토양 저항을 줄이는 방법밖에 없어 이 경우를 계산하여 보았다. 그 결과 토양 저항을 최소한 105 Ωm 정도가 되어야 함을 알 수 있었으며 이 때의 resistance matrix 계산 결과는 다음과 같았다.

Resistance Matrix 계산 결과

5.626142	43.224096	34.397373
43.224096	9.526597	53.341322
34.397373	53.341322	9.957905

이 경우, 전원 접지계에 1 A의 사고 전류가 유입 되었을 때, 각 접지계의 전위 상승 계산 결과를 보면 전

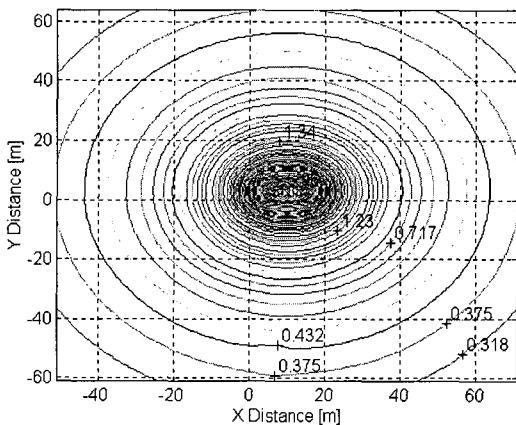


그림 10. 대지 표면 전위 상승 계산($\rho=145 \Omega\text{-m}$)
Fig. 10. Calculated ground surface potential rise profile for the case 1($\rho=145 \Omega\text{-m}$).

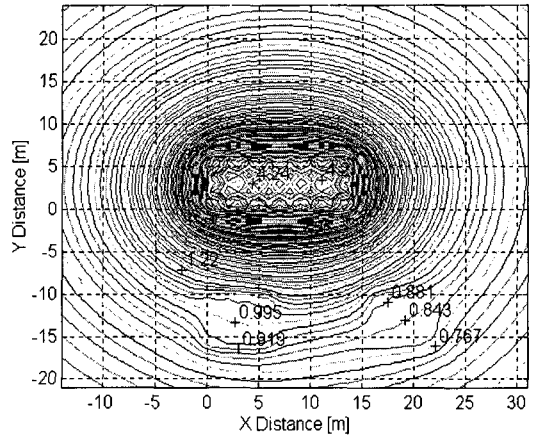


그림 11. 대지 표면 전위 상승의 계산($\rho=105 \Omega\text{m}$)
Fig. 11. Calculated ground surface potential rise profile for the case 1($\rho=105 \Omega\text{m}$).

원 접지계는 4.560 V, 통신 접지계는 1.001 V, 피뢰침 접지계는 0.846 V로 나타났다. 또한, 대지 표면 전위 상승(GPR)의 계산 결과는 그림 11과 같다.

4-3-2 Case 2

토양 저항이 145 Ω-m일 때, 그림 12와 같은 3중 mesh 접지계의 구성에서도 앞의 경우와 같이 mesh 간의 이격거리가 최소한 50 m 정도는 되어야 근접 효과가 나타나지 않았으며, Resistance Matrix 계산 결과를 보면 전원 접지계는 6.30 Ω, 통신 접지계는 10.64 Ω, 피뢰침 접지계는 10.64 Ω으로 나타났다.

여기서 전원 접지계에 1 A의 사고 전류가 유입되었을 때, 각 접지계의 전위 상승 계산 결과를 보면 전원 접지계는 6.307 V, 통신 접지계는 0.410 V, 피뢰침 접지계는 0.410 V로 나타났다.

또한, 접지계간의 이격거리가 10 m인 경우, 각 접지계가 10 Ω 정도의 접지 저항을 갖기 위해서는 토양 저항이 최소한 110 Ωm 정도가 되어야 함을 알 수 있었다. 이 경우, 전원 접지계에 1 A의 사고 전류가 유입되었을 때, 각 접지계의 전위 상승 계산 결과를 보면 전원 접지계는 4.775 V, 통신 접지계는 1.049 V, 피뢰침 접지계는 1.049 V로 나타났다. 대지 표면 전위 상승(GPR)의 계산 결과는 그림 13에 나타났다.

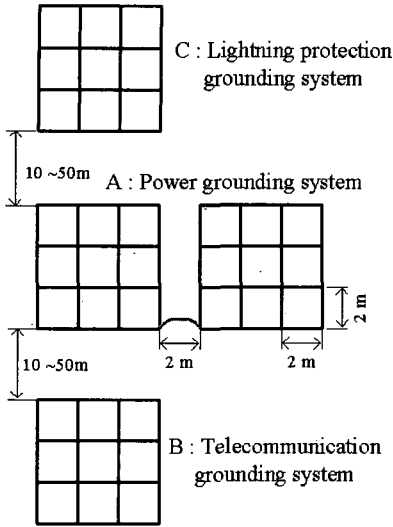


그림 12. 3개의 독립 mesh로 구성된 수직 구조의 접지 모의 모델
 Fig. 12. Vertical configured grounding simulation model with three isolated mesh.

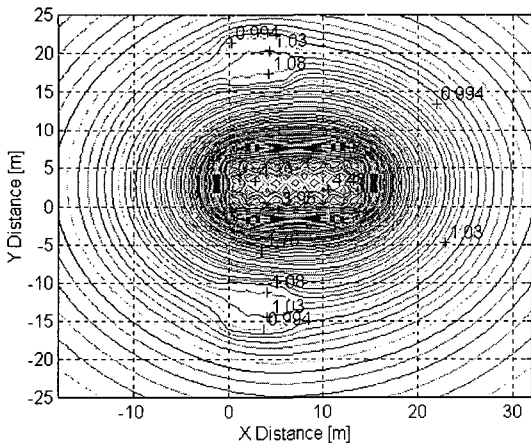


그림 13. 대지 표면 전위 상승 계산 결과
 Fig. 13. Calculated surface ground potential rise profile for the case 2($\rho=105 \Omega\cdot m$).

V. 결 론

본 연구는 combined integration/matrix method에 의해 다양한 접지 시스템의 특성을 모의할 수 있는 수치 해석 기법에 관한 연구이다. 접지 저항 및 고장 전류의 유입에 따른 대지 전위 상승 등 접지 시스템의 특성 분석을 위해 combined integration/matrix me-

thod를 이용한 수치 해석 모델링 기법을 제안하였다. 특히 본 연구에서는 분할 요소의 길이에 따른 오차 분석을 통해 효과적인 요소 길이의 모델링 방법을 제시하였다. 오차 분석을 토대로 접지 전극의 길이와 매설 깊이에 따라 적절하게 요소의 길이를 도출한 결과 분할하고자 하는 요소의 길이(L_{seg})는 매설 깊이(H_{depth})와 접지 도체의 길이(L_{line})에 주요한 상관 관계가 있음을 알 수 있었으며 본 연구에서 제시한 수치 해석 모델링 방법에 따라 3% 이내의 해석 정확도를 얻을 수 있었다. 또한, 이를 다중 접지계 해석에 적용하여 현재 산업 플랜트 접지 방식에서 가장 논란이 되고 있는 전원 접지계와 신호/통신 접지계의 공통 접지 및 분리 접지의 영향 평가 등에 활용될 수 있음을 보여주었다.

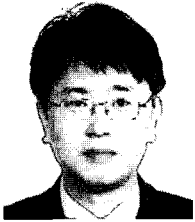
참 고 문 헌

- [1] B. Tarpar, S. L. Goyal, "Scale model studies of grounding grids in non-uniform soils", *IEEE Trans. PWRD.*, vol. 2, no. 4, pp. 1060-1066, Oct. 1987.
- [2] R. Caldecott, D. G. Kasten, "Scale model studies of station ground grids", *IEEE Trans. PAS.*, vol. 102, no. 3, pp. 558-566, Mar. 1983.
- [3] A. P. Meliopoulos, R. P. Webb, and E. B. Joy, "Analysis of grounding systems", *IEEE Trans. PWRD.*, vol. 100, no. 3, pp. 1039-1048, Mar. 1981.
- [4] F. Dawalibi, D. Mukhedkar, "Multi step analysis of interconnected grounding electrodes", *IEEE Trans. PAS.*, vol. 95, no. 1, pp. 113-119, Jan/Feb. 1976.
- [5] A. P. Sakis Meliopoulos, *Power System Grounding and Transients*, Marcel Dekker, INC, pp. 135-178, 1988.
- [6] T. Takuma, 數値電界 計算法, Corona, 1980.
- [7] S. H. Myung, B. Y. Lee, J. K. Park, S. W. Min, and E. S. Kim, "Three dimensional electric field analysis of substation using nonuniform optimal charge simulation", *Ninth International Symposium on High Voltage Engineering*, Austria, Europe, pp. 8363-1-8363-4, 1995.
- [8] B. Y. Lee, J. K. Park, S. H. Myung, S. W. Min, and E. S. Kim, "An effective modelling method to

analyze electric field around transmission lines and substation using a generalized finite line charge",

IEEE Trans. on PWRD, vol. 12, no. 3, pp. 1143-1150, Jul. 1997.

이 재 복



1985년 2월: 인하대학교 전기공학과 (공학사)
1987년 2월: 인하대학교 전기공학과 (공학석사)
1999년 2월: 인하대학교 전기공학과 (공학박사)
1987년 2월~현재: 한국전기연구원

전기환경송전연구그룹 책임연구원, 전자기과도현상 대책기술 팀장
[주 관심분야] 전력계통 서지해석/대책, 접지계 해석

명 성 호



1981년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
1983년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
1996년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학박사)
1985년 8월~현재: 한국전기연구원

전기환경송전연구그룹장
[주 관심분야] EMI/EMC, ELF, EMF, 전기환경 등

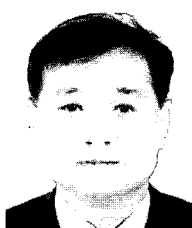
장 석 훈



1996년 2월: 인하대학교 전기공학과 (공학사)
1999년 2월: 인하대학교 전기공학과 (공학석사)
2003년 2월~현재: 한국전기연구원
기환경송전연구그룹 선임연구원
[주 관심분야] 전력계통 서지해석/

대책, 접지계 해석

조 연 규



2003년 2월: 경남대학교 전기공학과 (공학사)
2005년 8월: 국립창원대학교 전기공학과 (공학석사)
1988년 2월~현재: 한국전기연구원
전기환경송전연구그룹 선임기술원

[주 관심분야] EMI/EMC 대책설계, 전기환경 대책설계