

# 접지시스템 설계에서 대지구조 모델의 영향 분석

(The Effects of Soil Model in the Grounding System Design)

한기항\* · 심건보\*\* · 오기봉\*\*\*

(Ki-Hang Han · Keon-Bo Shim · Kie-Bong Oh)

\* (주)준영이앤씨, \*\* 홍익대학교, \*\*\* 서울산업대학교

## Abstract

Purpose of the grounding system design are establish a safe environment for personnel as well as the general public in the vicinity of the power system equipment, and establish a low resistance connection to earth such that protective devices detect and isolate faults quickly and potential rise of the grounding system does not exceed a value which could damage electrical equipment.

This paper deals with the grounding system design for the electric facilities. In this paper, emphasize the necessity of the computer programs for the grounding system designs. Especially, earth soil models for the grounding system design are must used two-layered soil model.

## 1. 서 론

전기에너지를 사용하는 전력설비에서 고장은 필연적으로 일어나는 것이며, 특히 지락고장이 발생하면 고장전류가 대지로 흘러가게 되어 전기설비의 구내 및 주변에 전위차가 나타나게 되어 인체의 안전이나 설비의 절연에 위험을 초래하게 된다. 더욱이 최근에 전력사용의 수요가 급속하게 성장함에 따라 전력설비도 증대되어 전력설비의 고장용량도 증가하고 있으므로 상대적으로 고장전류에 의한 대지전위의 상승이 커져서 인체의 안전이나 설비의 절연 등에 미치는 위험도 증대되고 있는 실정이다. 이러한 위험에 대비하기 위한 것이 전기설비의 접지시스템인데, 우리 나라와 같이 국토의 면적이 작아서 충분한 전력설비의 용지를 확보하기 곤란하거나 주변 환경과의 조화, 인구 밀집지역인 도심이나 산악지 등의 대지 저항률이 큰 경우에 적절한 접지시스템을 설계하여 대지전위의 상승을 억제하고, 고장전류의 크기를 제어하는 등의 적절한 대책을 세워야 한다. 따라서 최근에 전력설비의 접지기술에 대한 관심이 높아지고 있으며, 접지라고 하면 과거에는 접지저항의 크기에만 관심이 있었으나, 최근에는 기준 접지, 등전위 접지, 대지전위상승(Ground Potential Rise, GPR), 위험전압(접촉전압, 보폭전압), 전자파 장애 (Electro-Magnetic Interference, EMI) 및 전자파 적합성 (Electro-Magnetic Compatibility,

EMC) 등을 고려하기 위한 기술들에 대한 관심으로 변화하고 있다.

그러나 국내의 접지 기술에 대한 수준은 아주 미약한 수준으로, 현재 대부분의 전기 설계 용역을 하는 엔지니어링 회사에서는 접지 설계를 위한 가장 기본적인 대지저항률의 특성도 분석하지 않을 뿐만 아니라 접지 저항 값의 계산조차도 제대로 하지 않고 설계 도면에 접지공사의 종류만을 표시하고 있는 실정이다. 이러한 현상은 현장에서 공사를 시행할 때 많은 혼란과 시행착오를 일으키고 있으며, 경제적으로도 많은 손실이 발생하고 있다. 이와 같은 현실에서 위험 전압이나 GPR, EMI 및 EMC 등에 대하여 논의를 하는 것은 현실과 맞지 않는 상황이다. 또한, 접지에 관한 기준은 나라마다 약간의 차이는 있지만, 근본적으로는 인체에 대한 감전의 위험을 피하고, 기기 사이의 안정적인 동작을 목적으로 한다는 점에는 차이가 없다. 우리나라의 경우에 전기설비 기술 기준에서 접지공사의 종류에 따른 접지저항의 크기만을 기준으로 제시하고 있으나, 실제로는 접지저항의 크기가 아닌 주파수의 함수인 임피던스의 크기를 고려하여야 한다는 점이다. 또한, 기준 접지 저항의 크기에 대한 근거도 확실하지 않고 모호한 것으로서, 접지설계의 최종 목표를 접지 저항의 크기로 정할 것이 아니라 접촉전압이나 보폭 전압과 같은 위험 전압, GPR 등으로 정하여야 할 것이다. 이와 같은 여러 가지의 설계 조건을 만족시키기 위하여 접지설계의 기초 단계에서부터 가장 경제적이고 신뢰성

있는 접지설계가 달성될 수 있는 기술의 개발과 보급이 필수적인 것이다.

본 연구는 전력설비에 대하여 고장이나 낙뢰 등에 의한 피해를 줄일 수 있는 대책으로 접지 기술에 대한 내용으로서, 주로 전기설비의 접지 시스템을 설계하기 위한 과정 및 접지해석 등에 대하여 다루었다. 특히, 현재 엔지니어링 설계분야에서 접지시스템의 설계 시에 적용하고 있는 단일층의 등가 대지저항률에 의한 설계가 잘못 적용되고 있음을 사례연구를 통하여 입증하고자 한다. 사례를 위하여 대지를 등가 2층 구조로 가정하여 대지저항률이 매우 높은 지역과 낮은 지역에 대한 접지시스템의 설계 및 해석을 수행하였다.

## 2. 접지시스템의 설계

설계기술자는 해석적인 방법을 이용하여 예비적인 접지시스템을 수립하여야만 한다. 이러한 초기 계산의 목적은 가능한 한 최적으로 위험전압으로부터 안전한 전극을 얻기 위한 것이다. 일단 이러한 안전조건을 만족하는 전극의 결과는 컴퓨터 프로그램에 의해서 얻어질 것이다. 그림 1은 접지 시스템 설계와 시공에 대한 흐름도를 보인 것이다.

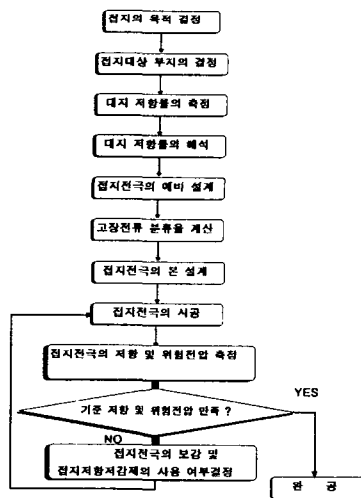


그림 1. 접지시스템의 설계 및 시공 흐름도  
Fig. 1. Flowchart of Design & Construction of Grounding System

접지시스템의 설계를 위한 단계적인 과정의 순서는 다음과 같다.

1) 접지 대상지역에 대한 대지 저항률을 측정한다. 대지저항률을 측정하는 방법에는 직접적인 측

정방법과 간접적인 측정방법이 있으며, 주로 간접적인 측정방법으로는 전극의 배치법에 따라 크게 Schlumberger와 Wenner의 4 전극 배치법으로 분류된다.

2) 측정으로부터 얻어진 자료로 대지 파라미터를 결정한다. 측정된 자료로부터 대지의 저항률을 결정하기 위하여 어떤 방법을 사용하느냐와 어떤 대지구조로 대지저항률을 표현하느냐에 따라 상당히 다른 결과를 나타내게 되므로 접지설계에서 매우 중요한 파라미터가 된다. 일반적으로 단일층의 대지구조를 사용하지만, 이것은 대지의 구조를 상당히 왜곡할 수 있는 요인이 되므로 다층 구조의 대지모델이 적용되어야 한다.

3) 접지 시스템의 골격을 수립하기 위해 필요한 예비적인 계산과 접지전극의 크기를 구한다. 접지전극의 종류는 여러 가지로 분류되는데, 목적에 따라 적당한 전극의 종류와 크기가 결정되어야 한다.

4) 적절한 계산 방법에 의하여 접지전극에 흐르는 고장전류의 배분을 결정하여 접지전류를 결정한다. 일반적으로 설비 계통의 일선지락 고장전류를 계산하여 계통의 특성과 상관없이 일정한 분류율을 적용하여 접지전류의 크기를 결정하고 있으므로 접지시스템의 과설계가 나타날 수 있다.

5) 정확한 접지도체의 구성을 고려한 대지전위상승을 계산하여 접지저항의 크기를 결정한다. 접지시스템의 접지도체 구성을 정확하게 고려하여 접지 저항이나 여러 가지의 위험전압을 계산하여야 하지만 일반적으로 고려되고 있지 않다.

6) 고장 전류의 접지전류를 기초로 하여 다양한 위치 P에서의 대지 지표면 전위  $V_p$ 를 적당한 프로그램을 사용하여 계산한다.

a) 접지 시스템 위의 어떤 위치에서의 최저값  $V_b$ 를 선택한다.

b) 전극의 경계에서 1[m] 떨어진 두 점 사이에서 전위의 최대 변화차  $V_{smax} = V_m - V_n$ 을 선택한다.

7) 접지시스템의 안전성에 대한 적정성을 검사한다.

a) 대지 전위상승  $V_e$ 는 설계 한계값을 초과하지 말아야 한다.

b) 접촉 전압  $V_t$ 는 최대 안전 허용 값  $E_t$ 는 초과하지 말아야 한다.

c) 보폭 전압  $V_s$ 는 최대 안전 허용 값  $E_s$ 를 초과하지 말아야 한다.

8) 목표 접지저항, 대지전위상승, 접촉전압 및

보폭전압 중에서 하나 또는 그 이상이 만족되지 않는다면, 기본설계를 최적화하기 위해 필요한 3) 단계에서 다시 계산을 반복하여 만족할 때까지 계산한다.

### 3. 등가 대지저항률의 추정

#### 3.1 대지저항률의 등가모델링

접지시스템을 설계하는 과정에서 가장 중요한 입력 자료가 바로 대지저항률이다. 정확한 대지저항률 값의 해석도 안한 상태에서 접지시스템을 설계하고 해석한다면, 올바른 접지시스템의 해석이 되었다고 볼 수 없다.

접지시스템을 해석하는 경우에 일반적으로 대지저항률은 단층 구조의 대지모델을 사용하고 있으며, 다층구조의 대지모델을 적용하여 컴퓨터 프로그램을 이용할 수 있으나, 접지시스템의 모델링이 복잡하여 간이계산을 할 필요가 있거나, 전산 프로그램을 활용할 수 없는 경우에 IEEE Std. 80[1]에서 추천하는 공식을 사용하기 위해서는 다층구조의 대지를 단층구조의 대지모델로 등가화하여 사용하여야 한다.

#### 3.2 다층구조 모델의 평균 대지저항률

다층구조의 대지모델을 단층 구조의 대지모델로 변환하는 방법은 평균적 대지저항률 또는 등가적 대지저항률로 환산하는 방법[4,5]이 일반적으로 알려져 있다.

##### (1) 평균 대지저항률 I

이 방법은 대지를 각 지층마다 병렬저항으로 가정하여 평균 대지저항률로 계산하는 방법이다. 식 (1)과 (2)는 평균 대지저항률을 계산하는 식으로서 1층에서  $n - 1$ 층까지의 평균값을 나타낸다.

$$\frac{h_1 + h_2 + \dots + h_n}{\rho_0} = \frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} + \dots + \frac{h_n}{\rho_n} \quad (1)$$

$$\rho_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} h_i}{\frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} + \dots + \frac{h_{n-1}}{\rho_{n-1}}} \quad (2)$$

##### (2) 평균 대지저항률 II

봉상전극이 있는 다층구조의 대지저항률을 환산할 때 사용하는 방법에 의하여 그 대지의 평균 대

지저항률을 결정한다.

대지가 다층일 경우에는 봉상전극 표면으로부터 대지로 유출하는 전류가 동일하다고 할 수 없다. 따라서 다층구조 대지에 있어서 봉상전극 표면으로부터 대지로 유출하는 전류 즉 전류밀도가 대지저항률  $\rho$ 에 반비례한다고 가정하고, 각 지층 내에서 전류가 균등하다고 생각할 수 있다. 수평 구조 대지모델에서 전극의 길이를  $l$ , 전극에 흐르는 전류를  $I$ , 제  $n$ 층의 지층두께를  $h_n$ , 대지저항률을  $\rho_n$ ,  $n$ 층에 존재하는 전류원을  $I_n$ , 단일 층일 때의 대지저항률을  $\rho_a$ 라고 하면,

$$\rho_1 I_1 = \rho_2 I_2 = \rho_3 I_3 = \dots + \rho_n I_n = \rho_a I \quad (3)$$

$$I_1 h_1 + I_2 h_2 + \dots + I_{n-1} h_{n-1} + I_n (l - h_1 - h_2 - \dots - h_{n-1}) = I l \quad (4)$$

와 같이 표현되고, 식 (3)과 (4)로부터 단층 구조의 평균 대지저항률  $\rho_a$ 를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \rho_a &= \frac{1}{\frac{1}{\rho_1} \times \frac{h_1}{l} + \frac{1}{\rho_2} \times \frac{h_2}{l} + \dots + \frac{1}{\rho_n} \times \frac{h_n}{l}} \\ &= \frac{l}{\frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} + \dots + \frac{h_n}{\rho_n}} [\Omega \cdot m] \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,  $\rho_i$  :  $i$ 층의 대지고유저항 [ $\Omega \cdot m$ ]

$h_i$  :  $i$ 지층의 두께 [ $m$ ]

$l$  : 전극의 길이 ( $l = h_1 + h_2 + \dots + h_n$ ) [ $m$ ]

#### 3.3 등가대지저항률

단층 구조의 평균 대지저항률 계산방법의 변형으로 등가 깊이를 지정하여, 그 깊이까지의 대지저항률로 다층구조의 등가 대지저항률로 표현하는 방법이다.

$$\rho_{eq} = \frac{l}{\frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} + \dots + \frac{l - \sum_{i=1}^{n-1} h_i}{\rho_n}} \quad (6)$$

이 등가 대지저항률은 일반식으로 표현되는 접지저항 계산식이나 IEEE Std 80에서 제시하고 있는 접촉·보폭전압과 접지저항을 계산하는 간략식에 적용된다. 이 식에 의해 예측한 위험전압(접지저항)이 허용 기준 값을 만족하면 접지설계가 종료되며, 이를 만족하지 못할 경우에는 허용 기준 값을 만족할 때까지 접지설계를 보완하게 된다. 이처럼 접지시스템의 성능을 결정하는 중요한 파라미터인 접지저항 또는 접촉·보폭전압의 간략 계

산식은 “등가 대지저항률”에 절대적으로 의존한다.

그러나 이러한 평균 대지저항률이나 등가 대지저항률은 실제 접지시스템을 설계하는 관점에서 본다면 많은 가정을 포함하는 것으로서 단층의 대지 구조에 의한 접지시스템의 설계에 많은 오류가 나타날 수 있음을 의미한다.

#### 4. 사례 연구

본 연구에서 다루고 있는 다층 구조 대지저항률을 단층 구조로 변환하는 등가 대지저항률에 의한 접지시스템과 등가 2층 구조의 대지모델에 의한 접지시스템을 비교하여 등가 2층 구조 대지모델과 접지도체의 정밀한 모델링에 의한 접지시스템의 설계 및 해석을 위한 방법론의 실용성을 검증하기 위하여 전력설비를 대상으로 접지시스템을 설계하고 해석하였다.

##### 4.1 등가 대지저항률의 계산

다층 구조 대지저항률을 단층 구조로 변환하는 등가 대지저항률에 의한 접지시스템과 등가 2층 구조의 대지모델에 의한 접지시스템을 비교하기 위하여 그림 2와 같이 위층의 대지 저항률이 1000[Ω·m], 아래층의 대지 저항률이 100[Ω·m]인 모델 I과 위층의 대지 저항률이 100[Ω·m], 아래층의 대지 저항률이 1000[Ω·m]인 모델 II의 2층 구조 대지모델을 사용하였다.

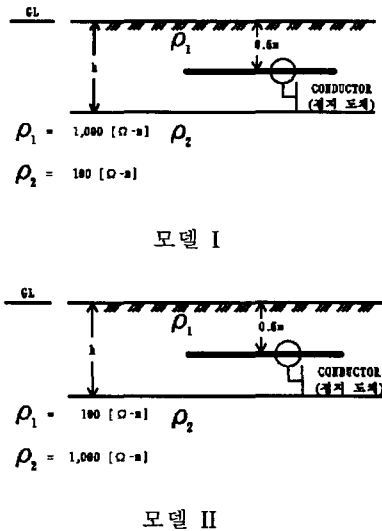


그림 2. 2층 구조의 대지모델

Fig. 2. Two-layered Soil Model

두 개의 2층 구조 대지모델에서 위층의 두께를 변화시키면서 등가 깊이를 50[m]로 하여 식 (6)에 의한 등가 대지 저항률을 구하면 각각의 두께별 등가 대지 저항률은 <표 1>과 그림 3에서와 같이 나타낼 수 있으며, 그림 3에서 등가 대지 저항률이 같은 점은 두께가 25[m]인 깊이라는 것을 알 수 있다.

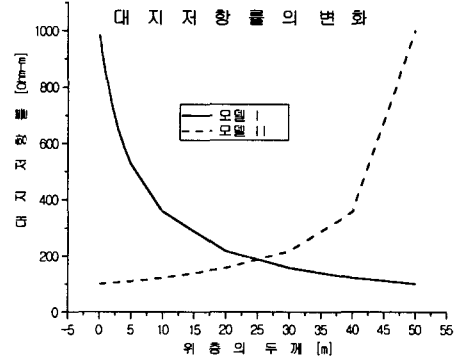


그림 3. 위층의 두께별 등가 대지저항률의 변화

Fig. 3. Variation of Equivalent Resistivity

##### 4.2 단층 구조의 등가 대지저항률에 의한 설계

본 연구에서는 제안한 두 가지의 등가 2층 구조 모델에 대하여 40×40[m<sup>2</sup>]의 면적에 5[m] 간격의 메쉬 접지시스템을 설계하여 그 때의 값을 비교해 보았다. 그림 4는 메쉬 접지시스템을 보였다. 두 가지의 대지구조에서 등가 깊이 50[m]에 대한 단층 구조의 대지 저항률은 위층의 두께가 25[m]라고 한다면 똑같이 181.82[Ω·m]를 나타내므로 단층 구조의 대지저항률에 의하여 접지시스템을 설계하는 방법인 IEEE Std-80[1]에서 사용되는 방법에 의하여 메쉬 접지시스템을 설계하였다. 이 방법은 접지저항의 크기만을 얻기 위한 접지시스템의 설계가 아닌 대지표면의 전위 상승을 제한하여 안전전압 조건을 만족시키는 설계방법이다. 이 때 고장전류 1000[A]가 접지전극에 흐르는 것으로 가정하였다.

이 방법에 의한 설계 결과는 단층 구조의 대지 저항률이 같기 때문에 설계 결과가 같게 나온다는 것을 알 수 있다. <표 2>에 IEEE Std-80에 의한 설계 결과를 보였다.

<표 2>에서 보는 바와 같이 허용 접촉전압과 허용 보폭전압이 각각 574.04와 1948.16[V]인데 대하여 접지 대상 지점에서의 최대 접촉전압과 최대

<표 1> 등가 대지 저항률의 변화

<Table 1> Variation of Equivalent Resistivity

두께[m]		0.1	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0
등가 대지 저항률 [Ω·m]	모델I	982.32	917.43	847.46	735.29	649.35	581.40	526.32	357.14	217.39	156.25	121.95	100.00
	모델II	100.18	100.91	101.83	103.73	105.71	107.76	109.89	121.95	156.25	217.39	357.14	1000.0

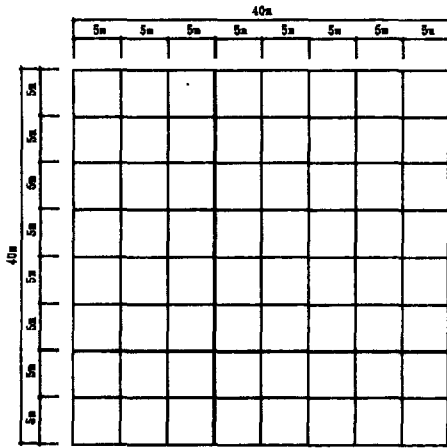


그림 4. 메쉬 접지시스템(40×40)

Fig. 4. Mesh Grounding System(40×40)

보폭전압이 413.16과 275.70[V]로 계산되어 안전 전압의 관점에서 만족스러운 결과를 보이고 있는 반면에 접지저항의 크기는 2.22142[Ω]으로 계산되었다. 또한, 대지전위상승 값도 기준 값인 5000[V] 보다 낮은 값으로 계산되어서 모든 조건이 IEEE Std 80의 기준을 만족시키는 것으로 나타났다.

<표 2> IEEE Std-80에 의한 설계 결과  
<Table 2> Results of Design by IEEE Std-80

항 목	대상	모델 I & II	비 고
접지도체의 길이[m]		720	
허용 접촉 전압[V]		574.04	몸무게 50[kg]
최대 접촉 전압[V]		413.16	
허용 보폭 전압[V]		1948.16	몸무게 50[kg]
최대 보폭 전압[V]		275.70	
접지 저항의 크기[Ω]		2.22142	
대지 전위상승(GPR)[V]		2221.42	

### 4.3 2층 구조모델에 의한 접지시스템 설계

접지시스템에 대한 설계 및 해석을 IEEE Std-80에 의한다는 것은 이 방법의 한계 때문에 정확하다고 볼 수 없다. IEEE Std-80방법의 한계란 접지시스템 설계 및 해석 방법은 대지의 구조를 단층으로 등가화하여 해석한다는 점과 임의의 모양으로 배치되는 접지전극에 대하여는 해석할 수 없다는 한계에 도달하게 된다. 따라서 본 연구에서는 등가 2층 대지구조로 해석하며, 임의의 접지전극 배치에 대해서도 해석이 가능한 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 정밀 해석을 하고자 한다.

등가 2층 구조의 대지모델을 사용하는 프로그램(DGSSIM)의 결과를 두 가지의 대지모델에 대하여 비교함으로써 단층 구조의 대지저항률에 의한 계산 결과가 등가 2층 구조의 대지모델을 사용하는 계산 결과와 상당한 차이를 나타내고 있어서 정밀한 접지시스템의 설계와 해석을 위해서는 대지모델이 2층의 구조가 되어야 하는 적합성을 나타내고자 한다.

<표 3>은 각각의 대지모델에 대한 접지시스템 설계의 계산 결과를 요약한 것이다. <표 3>에서 보는 바와 같이 대지를 등가 2층 구조로 계산한 결과는 대지구조 모델 I에서 접지저항 값은 9.17 [Ω]으로 나타나서 단층 구조로 계산한 IEEE 방법의 결과 2.22[Ω]과 상당히 큰 차이를 보이고 있다. 또한, 대지구조 모델 II의 접지저항 값의 계산 결과는 2.31[Ω]으로 계산되어 IEEE 방법의 결과와 상당히 비슷한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 단층 구조의 등가 대지저항률에 의한 접지시스템의 설계는 실제의 대지구조가 충분히 반영이 되지 않고 있음을 알 수 있어서, 접지시스템의 정밀 설계 및 해석을 위해서는 대지 구조의 특성을 반영할 수 있는 2층 구조의 대지모델이 사용되어야 함을 의미한다.

그림 5는 대지구조 모델II에 대한 지표면 전위분포를 보인 것이며, 그림 6은 접촉전압 분포, 그림 7은 보폭전압의 분포를 보인 것이다.

<표 3> 접지시스템 설계 및 해석의 계산 결과  
 <Table 3> Results of Design

항 목	구분	시뮬레이션 방식		비 고
	IEEE 방식	모델 I	모델 II	
접지저항[Ω]	2.22142	9.1679	2.3104	
GPR[V]	2221.42	9167.9	2310.4	
접촉전압[V]	413.16	922.34	439.86	
보폭전압[V]	275.70	300.64	33.96	
대지 구조	단층구조	등가 2층 구조		

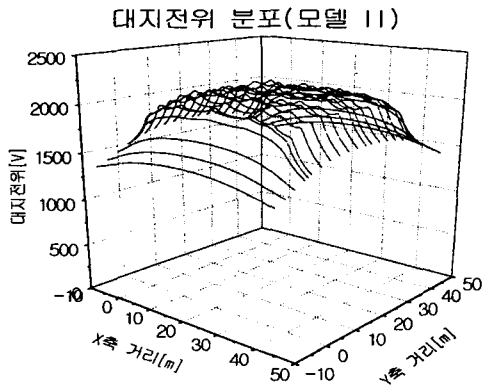


그림 5. 대지구조 모델 II의 대지전위 분포  
 Fig. 5. Ground Potential(Model II)

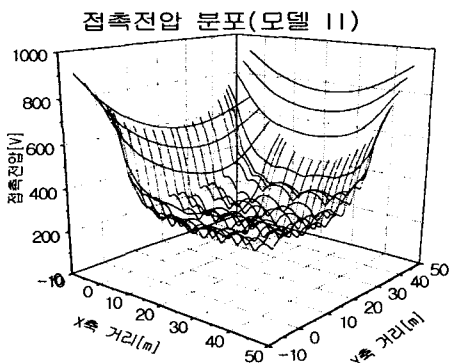


그림 6. 대지구조 모델 II의 접촉전압 분포  
 Fig. 6. Touch Voltages(Model II)

### 5. 결론

본 연구에서는 접지시스템의 설계 및 해석을 위한 방법론에 대하여 다루었으며, 그 주요 내용을 요약하면 다음과 같다.

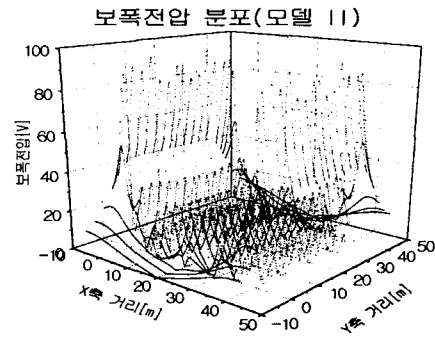


그림 7. 대지구조 모델 II의 보폭전압 분포  
 Fig. 7. Step Voltages(Model II)

1) 정밀한 접지시스템의 설계 및 해석을 위하여 대지저항률이나 지표면 전위 등의 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 정확한 계산이 필요하다.

2) 특히, 대지의 구조를 단층 구조로 해석할 것이 아니라 2층 구조의 대지모델을 도입하여야 접지시스템에 대한 정밀한 해석이 달성될 수 있음을 보였다.

3) 본 연구에서는 IEEE Std-80에서 사용하는 단층 구조의 대지모델에 의한 수작업의 설계방식과 등가 2층 구조의 대지모델에 의한 접지설계용 소프트웨어를 이용한 설계방식의 결과에 대하여 검토한 결과, 등가 단층 구조의 대지모델에 의한 접지시스템의 설계는 정확성이 없음을 알 수 있었다.

앞으로 접지효과를 증대하기 위한 최적의 접지 설계기술을 완성하기 위해서는 좀 더 많은 연구와 프로그램의 개발이 요구되며, 국내에서도 많은 전기기술자들이 이 분야에 대한 관심을 기울여야 할 것으로 생각된다.

### 참 고 문 헌

- [1] IEEE Std. 80, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, 1986
- [2] Meliopoulos, A. P. S., Power System Grounding and Transients, Marcel Dekker, Inc., 1988.
- [3] EPRI, Transmission Line Grounding, Vol.1, Research Project 1494-1, Report EL 2695, Principal Author F.Dawalibi, 1982.
- [4] 高橋健彦, 이형수역, 接地設計 入門, 동일출판사, 1993.
- [5] 高橋健彦, 이형수역, 接地技術 入門, 동일출판사, 1995.
- [6] Dawalibi, F. and Mukhedkar, D., "Optimum Design of Substation Grounding in Two-Layer Earth Structure, IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-94, No. 2, 1975, pp. 252-272.