

# 접지시스템에서 지층구조의 변화에 대한 최대 허용전압의 특성

(The Characteristics of Maximum Tolerable Voltage about Earth-Layer Structure in the Grounding System)

심건보\* · 김경철\* · 이형수\*\*

\*충익대학교 · \*\*산업안전공단

(Keon-Bo Shim · Kung-Chul Kim · Hyung-Su Lee)

## Abstract

During the ground fault conditions, the flow of current to earth will produce potential gradients within and around a substation.

The common physiological effects of electric current on the body, stated in order of increasing current magnitude, are threshold perception, muscular contraction, unconsciousness, fibrillation of the heart.

In this study, determined the tolerable voltage about earth-layered structure in the grounding system.

## 1. 서론

전력설비에서 지락고장이 발생하면 고장전류가 대지로 흘러가게 되어 전기설비의 구내 및 주변에 전위차가 나타나게 되어 인체의 안전이나 설비의 절연에 위험을 초래하게 된다. 더욱 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 접지시스템으로서, 특히 변전소 등의 접지시스템을 위한 기준으로 인체의 안전 한계전압(안전 한계 보폭전압 및 접촉전압)을 평가하는 접지설계의 개념을 사용하고 있다.

현재까지 우리나라에서는 일반적인 접지설계의 기준으로 소요접지저항을 만족시키기 위한 접지전극의 설계를 목표로 하고 있지만, 미국을 비롯한 접지기술의 선진국에서는 인체에 영향을 미치는 보폭전압, 접촉전압 및 매쉬 전압 등을 고려한 전위분포의 경도를 줄이기 위한 내용을 목표로 접지전극을 설계하고 있다.

전기설비에서 인체의 안전을 평가하는 기준은 IEC 479-1[1]에서는 인체의 통전 허용전류를 기준으로 제시하고 있는 반면에 IEEE Std 80[2]에서는 인체에 영향을 미치는 접촉전압과 보폭전압의 허용 위험전압의 크기를 기준으로 하여 접지시스템의 안전성 평가 방법과 접지시스템의 설계 절차를 제시하고 있다. 두 기준 모두 인체의 허용 안전을 위한 기준을 제공하고 있는 점에서는 같은 점이 있으나, 인체의 파라미터 적용부분에서 약간

의 차이를 가지고 있다

본 연구에서는 대형 접지시스템 설계의 기준으로 사용되고 있는 IEEE Std 80-2000을 기본으로 변전소 설계 대상 설치 장소의 지층구조에 따라 위험전압의 한계 값 변화에 대하여 검토하였다. 검토를 위하여 등가의 2층 구조를 갖는 대지구조에서 상층과 하층의 대지저항 및 하층의 두께 변화, 표토 층에 덮게 되는 고저항률의 재료 변화에 대한 허용 위험전압을 계산하였다.

## 2. 인체의 안전

인체에 전압이 인가되면 전류가 흐르게 되고, 이 전류의 크기는 흐르는 경로에 따라 구성되는 전기저항에 의하여 결정된다. 인체에 흐르는 전류의 크기에 따라 인체의 반응이 다르게 나타나며, 인체의 위험에 영향을 미치는 파라미터에는 전류의 크기, 경로, 전압의 종류 및 감전 지속시간 등의 여러 가지 인자가 있다.

### 2.1. 인체의 저항

직류와 50 또는 60[Hz] 교류가 흐르는 경우에 인체를 저항만이 있는 전기회로로 가정할 수 있으며, 이 때 인체의 저항( $R_B$ )은 손과 발 사이, 손과 손 사이 또는 발과 발사이의 값으로서 1,000[Ω]으로 한다.

### 2.2. 인체의 허용전류 한계 값

일반적으로 인체에 전류가 흐르면, 흐르는 전류의 크기에 따라 인체의 반응이 다르게 나타나며 전류의 크기

가 크고, 감전의 지속시간이 길어지면 심실 세동 (Ventricular Fibrillation)이 발생하여 사망에 이르게 된다. 따라서 이러한 심실 세동이 발생하기 시작하는 인체의 통과전류 값이 허용전류의 한계값이 되는 것이다. Dalziel 등의 실험 결과에 의하면 인체의 허용전류 한계 값  $I_B$  [A]는 감전 지속시간과 인체의 체중을 고려하여 식 (1)과 같이 표현된다[2].

$$I_B = \frac{k_w}{\sqrt{t_s}} \quad (1)$$

여기서,  $k_w$  : 인체의 체중에 따라 결정되는 상수  
 $t_s$  : 감전 지속시간[Sec]

식 (1)은 감전 지속시간이 0.03~3.0[Sec] 범위에서 실험한 결과로부터 얻어진 것으로서 이 시간 범위 안에서만 적용하여야 한다.

Dalziel 등에 의한 실험 결과로부터 인체의 체중에 따라 결정되는 상수  $k_w$ 를 구하면 체중이 50[kg]인 경우에 0.116, 체중이 70[kg]인 경우에 0.157이 된다. 일반적으로  $k_w$ 는 체중이 70[kg]인 경우를 가정하여 0.157의 값을 적용한다.

### 2.3. 사고에 의한 등가회로

#### 2.3.1 접촉전압

그림 1과 같이 접지되어 있는 구조물에서 고장전류가 발생한 경우에 인체가 접촉하면 그림 2와 같은 등가회로로 표현할 수 있으며, 인체에 흐르는 전류는 식 (2)와 같다.

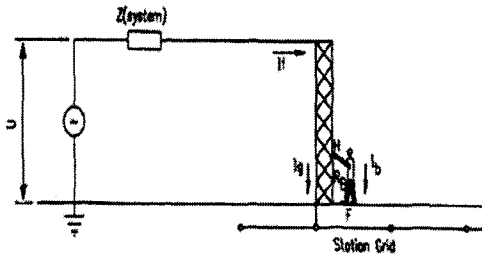


그림 1. 접촉전압 발생 상황[2]

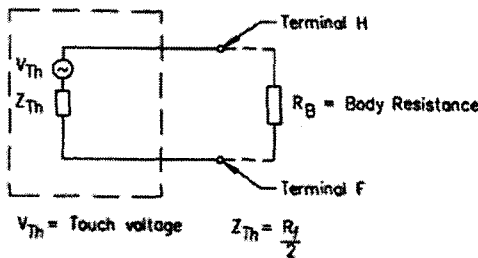


그림 2. 접촉전압의 등가회로[2]

$$I_b = \frac{V_{Th}}{Z_{Th} + R_B} \quad (2)$$

#### 2.3.2 보폭전압

그림 3과 같이 접지되어 있는 구조물에서 고장 전류가 발생하여 대지로 고장전류가 흐르면 대지 표면에 전위상승이 나타나고, 이 경우에 인체가 구조물의 주변에 위치하고 있다면 그림 4와 같은 등가회로로 표현할 수 있으며, 이 때 인체에 흐르는 전류도 식 (2)와 같이 표현된다.

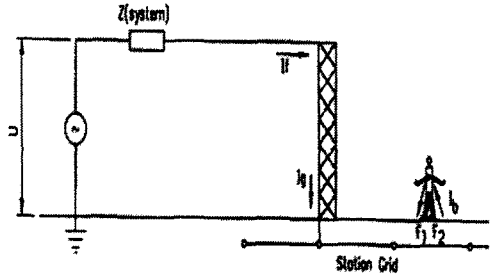


그림 3. 보폭전압 발생 상황[2]

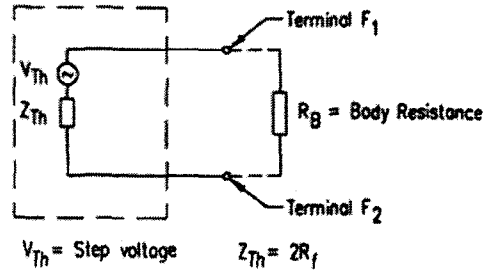


그림 4. 보폭전압의 등가회로[2]

### 3. 인체의 허용 안전전압

#### 3.1. 등가회로를 고려한 허용전압

접촉전압과 보폭전압의 등가회로에서 각각의 등가 임피던스  $Z_{Th}$ 는 인체가 위치하고 있는 지점의 대지 저항률(단일지층)  $\rho$  [ $\Omega$ -m]와 신발의 저항  $R_f$ 를 고려하면, 식 (3)과 (4)로 각각 표현된다.

$$Z_{Th(touch)} = 1.5 \rho \quad (3)$$

$$Z_{Th(step)} = 6.0 \rho \quad (4)$$

식 (3)과 (4)를 이용하여 접촉전압과 보폭전압의 한계 값을 구하면 식 (5)와 (6)으로 각각 표현된다.

$$E_{touch} = I_B (R_B + 1.5 \rho) \quad (5)$$

$$E_{step} = I_B (R_B + 6.0 \rho) \quad (6)$$

### 3.2. 표토층 재료의 영향

인체가 위치한 지점의 대지저항률을 단일지층으로 가정한 결과식이 식 (5)와 (6)이다. 그런데, 인체가 위치하는 지점의 넓은 면적을 자갈이나 아스팔트와 같이 저항률이 높은 재료를 0.08~0.15[m]의 층으로 덮는 경우에는 신발과 대지와의 접촉저항이 증가한다. 따라서 접촉전압과 보폭전압의 등가회로에서 저항률이 높은 재료를 덮는 경우에 접촉전압과 보폭전압의 최대 허용전압 한계 값은 식 (7)과 (8)로 표현된다.

$$E_{touch} = I_B (R_B + 1.5 C_s \rho) \quad (7)$$

$$= (R_B + 1.5 C_s \rho) \frac{k_w}{\sqrt{t_s}}$$

$$E_{touch} = I_B (R_B + 6.0 C_s \rho) \quad (8)$$

$$= (R_B + 6.0 C_s \rho) \frac{k_w}{\sqrt{t_s}}$$

여기서,  $C_s$  : 표토 층 재료와 두께에 따른 감쇄계수

감쇄계수  $C_s$ 는 표토 층의 재료와 두께에 의하여 결정할 수 있으며, 지층의 대지저항률( $\rho$ )과 표토 층 재료의 저항률( $\rho_s$ )와의 특성인 반사계수(K)에 따라서도 다른 값을 나타낸다. 이러한 관계를 보인 것이 그림 5이며, 반사계수(K)는 식 (9)와 같다.

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \quad (9)$$

여기서,  $\rho_s$  : 대지표면(표토 층)의 저항률[ $\Omega$ -m]

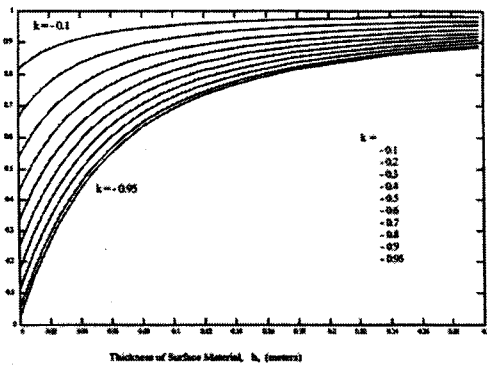


그림 5. 표토 층의 두께와 감쇄계수의 관계

감쇄계수  $C_s$ 를 식 (10)과 같이 해석식으로 구할 수 있다.

$$C_s = \frac{1}{0.96} \left\{ 1 - 0.106 \left( \frac{1 - \frac{\rho}{\rho_s}}{2h_s + 0.106} \right) \right\} \quad (10)$$

### 3.3. 체중별 허용 안전전압

$$\begin{aligned} \text{허용보폭전압}(E_{step}) &= (1,000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} (\text{body weight } 50[\text{Kg}]) \\ &= (1,000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} (\text{body weight } 70[\text{Kg}]) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{허용접촉전압}(E_{touch}) &= (1,000 + 1.5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} (\text{body weight } 50[\text{Kg}]) \\ &= (1,000 + 1.5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} (\text{body weight } 70[\text{Kg}]) \end{aligned} \quad (12)$$

## 4. 허용 안전전압의 계산 조건

### 4.1. 등가 2층 대지구조 모델

대지구조 변화에 대한 인체의 허용 안전전압을 보다 정확히 계산하기 위하여 대지구조모델을 그림 6과 같은 수평 2층 모델을 적용하였다. 수평 2층 대지구조모델에 대한 경우의 수는 표 1과 같다. 상층의 대지저항률( $\rho_1$ )은 50~2,000 [ $\Omega$ -m], 반사계수(K)는 -0.7~0.7 및 상층의 두께(h)는 0.5~20 [m]를 가정하였다. 그림 7는 반사계수 K의 변화에 대한 하층의 대지저항률 변화를 보인 것이다.

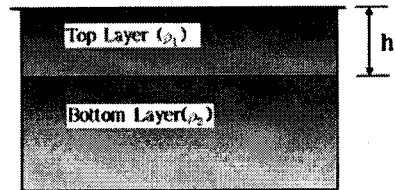


그림 6. 수평 2층 대지구조 모델

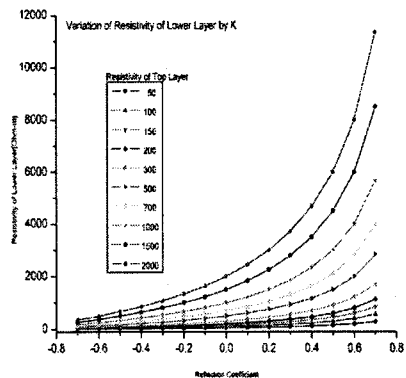


그림 7. 상층의 대지저항률 변화

<표 1> 대지구조 모델에 따른 하층 대지저항률

| $\rho_1$<br>반사계수(RS) | 50    | 100   | 150   | 200    | 300   | 500    | 700    | 1000   | 1500   | 2000    |
|----------------------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|
| -0.7                 | 8.8   | 17.6  | 26.5  | 35.3   | 52.9  | 88.2   | 123.5  | 176.5  | 264.7  | 352.9   |
| -0.6                 | 12.5  | 25    | 37.5  | 50     | 75    | 125    | 175    | 250    | 375    | 500     |
| -0.5                 | 16.7  | 33.3  | 50    | 66.7   | 100   | 166.7  | 233.3  | 333.3  | 500    | 666.7   |
| -0.4                 | 21.4  | 42.9  | 64.3  | 85.7   | 128.6 | 214.3  | 300    | 428.6  | 642.9  | 857.1   |
| -0.3                 | 26.9  | 53.8  | 80.8  | 107.7  | 161.5 | 269.2  | 376.9  | 538.5  | 807.7  | 1076.9  |
| -0.2                 | 33.3  | 66.7  | 100   | 133.3  | 200   | 333.3  | 466.7  | 666.7  | 1000   | 1333.3  |
| -0.1                 | 40.9  | 81.8  | 122.7 | 163.6  | 245.5 | 409.1  | 572.7  | 818.2  | 1227.3 | 1636.4  |
| 0.0                  | 50    | 100   | 150   | 200    | 300   | 500    | 700    | 1000   | 1500   | 2000    |
| 0.1                  | 61.1  | 122.2 | 183.3 | 244.4  | 366.7 | 611.1  | 855.6  | 1222.2 | 1833.3 | 2444.4  |
| 0.2                  | 75    | 150   | 225   | 300    | 450   | 750    | 1050   | 1500   | 2250   | 3000    |
| 0.3                  | 92.9  | 185.7 | 278.6 | 371.4  | 557.1 | 928.6  | 1300   | 1857.1 | 2785.7 | 3714.3  |
| 0.4                  | 116.7 | 233.3 | 350   | 466.7  | 700   | 1166.7 | 1633.3 | 2333.3 | 3500   | 4666.7  |
| 0.5                  | 150   | 300   | 450   | 600    | 900   | 1500   | 2100   | 3000   | 4500   | 6000    |
| 0.6                  | 200   | 400   | 600   | 800    | 1200  | 2000   | 2800   | 4000   | 6000   | 8000    |
| 0.7                  | 283.3 | 566.7 | 850   | 1133.3 | 1700  | 2833.3 | 3966.7 | 5666.7 | 8500   | 11333.3 |

[주] 1. 상층의 두께(h)= 0.5, 1, 2, 3, 5, 7, 10, 13, 15, 20 [m]  
 2. 대지구조모델 총 개수 = 15(반사계수)×10(상층 저항률)×10(깊이)  
 3. 반사계수  $K = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$ ,  
 $\rho_1$ : 상층의 대지저항률,  
 $\rho_2$ : 하층의 대지저항률

#### 4.2. 표토 층의 재료 및 두께

변전소 안에서 인체가 위치하는 지점의 넓은 면적을 자갈이나 아스팔트와 같이 저항률이 높은 재료를 일정한 두께의 층으로 덮는 경우에는 신발과 대지와의 접촉 저항이 증가한다. 본 연구에서는 표토 층의 두께를 0.08~0.15[m]사이에서 0.1[m] 단위로 변화시키면서 인체의 허용 안전전압을 계산하였으며, 또한, 표토 층의 재료에 대한 저항률도 1000, 1500, 2500, 3000, 5000, 6000, 8000 및 10000[Ω-m]로 변화시키면서 인체의 허용 안전전압을 계산하였다.

### 5. 사례 연구

수평 2층 구조 모델로 가정한 변전소의 설치 장소에 대하여 상층의 대지저항률을 변화시키면서 반사계수 K 및 상층의 두께 변화에 대한 인체의 허용 안전전압을 계산하여 그 특성을 비교하였다.

#### 5.1. 표토 층의 두께별 허용 안전전압

상층의 대지저항률, 반사계수 및 표토 층의 저항률을 일정하게 하고 표토 층의 두께만을 변화시키는 경우에 대한(상층의 대지저항률이 100[Ω-m], 반사계수 K=0.0, 표토 층의 저항률 3000[Ω-m]로 고정시킨 경우) 허용 안전전압의 변화를 보인 것이 그림 8이다.

그림 8에서 보는 바와 같이 표토 층의 두께가 두꺼워질수록 허용 안전전압의 크기가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

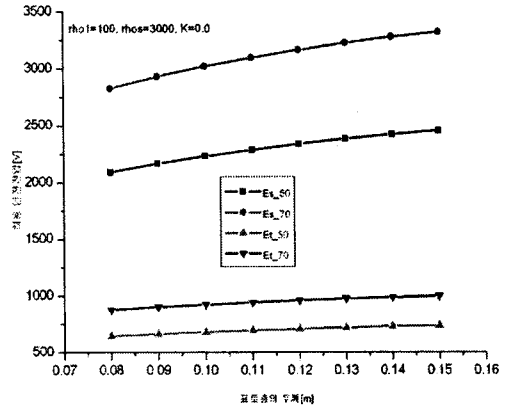


그림 8. 표토 층 두께별 허용 안전전압 변화

#### 5.2. 표토 층의 재료별 허용 안전전압

표토 층의 재료를 저항률별로 변화시키면서 허용 안전전압의 변화를 계산하였다. 그림 9는 상층의 대지저항률이 100[Ω-m] 이고, 반사계수 K=0.0, 표토층의 두께를 0.1[m]로 고정시킨 경우에 대한 표토 층의 재료별 허용 안전전압의 변화를 보인 것이다.

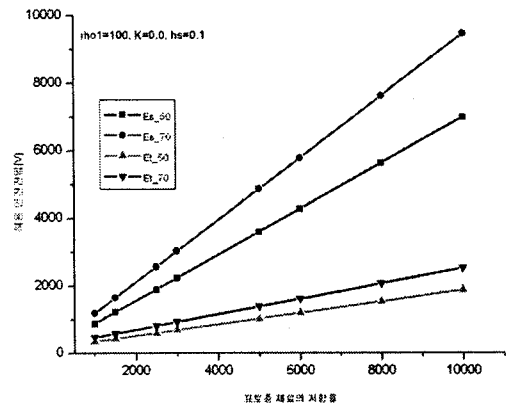


그림 9. 표토 층의 재료별 허용 안전전압 변화

그림 9에서 보는 바와 같이 표토 층의 재료별 허용 안전전압 특성은 재료의 저항률이 증가할수록 선형적으로 변화하는 것을 확인할 수 있다.

그림 10은 상층의 대지저항률이 2000[Ω-m] 이고, 반사계수 K=0.0, 표토 층의 두께를 0.1[m]로 고정시킨 경우에 대한 표토 층의 재료별 허용 안전전압의 변화를 보인 것이다.

그림 10에서도 표토 층의 재료별 허용 안전전압의 변화 특성은 재료의 저항률이 증가할수록 선형의 특성으로 변화하는 것을 확인할 수 있으며, 표토 층의 저항률이 2000[Ω-m]인 경우에 허용 접촉전압의 변화가 다른 경우와 다르게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

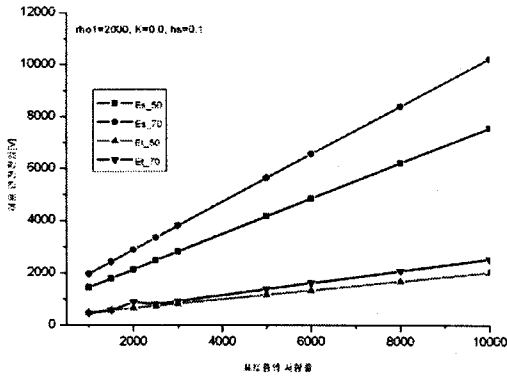


그림 10. 표토 층의 재료별 허용 안전전압 변화

### 5.3. 반사계수의 변화별 허용 안전전압

상층의 대지저항률, 상층의 깊이 및 표토 층의 저항률을 고정시키고 반사계수  $K$ 를  $-0.7$ 부터  $0.7$ 까지 변화시키면서 허용 안전전압의 변화 특성을 계산하였다.

그림 11은 상층의 대지저항률이  $300[\Omega\cdot m]$  이고, 상층의 깊이는  $1.0[m]$ , 표토 층의 두께와 저항률은 각각  $0.1[m]$ 과  $3000[\Omega\cdot m]$ 으로 고정시킨 경우에 대한 허용 안전전압의 변화를 보인 것이다.

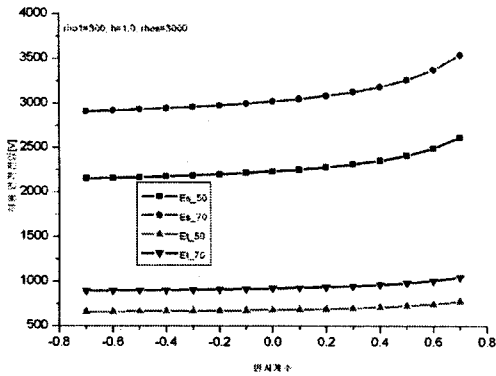


그림 11. 반사계수의 변화별 허용 안전전압 변화

그림에서 보는 바와 같이 반사계수가 커지면서 상층의 대지저항률도 커져서 표토 층의 역할을 하게 되면서 허용 안전전압의 변화가 크게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

### 5.4. 상층의 깊이 변화별 허용 안전전압

상층의 대지저항률, 표토 층의 두께 및 저항률을 고정시키고 상층의 깊이를 변화시키면서 반사계수  $K=0.5$ 와  $-0.5$ 인 경우에 대하여 허용 안전전압의 변화 특성을 계산하였다.

그림 12는 상층의 대지저항률  $300[\Omega\cdot m]$ , 표토 층 두께  $0.1[m]$ , 표토층 저항률  $3000[\Omega\cdot m]$ 인 경우에 허용 보폭전압의 변화를 보인 것이다.

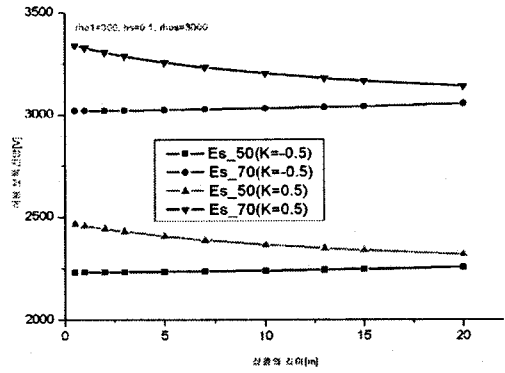


그림 12. 상층의 깊이 변화별 허용 보폭전압 변화

그림 12에서 보는 바와 같이 상층의 깊이 변화에 대하여 반사계수가  $-0.5$ 인 경우에는 허용 보폭전압의 변화가 적게 나타나고 있으나, 반사계수가  $0.5$ 인 경우에는 허용 보폭전압의 변화가 크게 나타나고 있다. 이러한 현상은 하층의 대지저항률이 상층의 대지저항률보다 큰 상태에서 상층의 깊이 변화에 따라 허용 보폭전압이 증가한다는 점을 확인할 수 있다.

그림 13은 상층의 대지저항률  $300[\Omega\cdot m]$ , 표토 층 두께  $0.1[m]$ , 표토층 저항률  $3000[\Omega\cdot m]$ 인 경우에 허용 접촉전압의 변화를 보인 것이다.

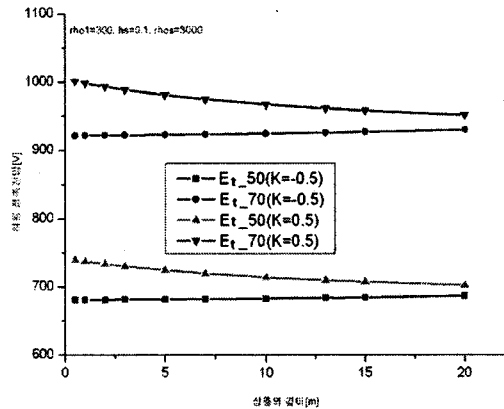


그림 13. 상층의 깊이 변화별 허용 접촉전압 변화

그림 13에서도 보는 바와 같이 상층의 깊이 변화에 대하여 반사계수가  $-0.5$ 인 경우에는 허용 접촉전압의 변화가 적게 나타나고 있으나, 반사계수가  $0.5$ 인 경우에는 허용 접촉전압의 변화가 크게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

## 6. 결론

본 연구에서는 대형 집지시스템 설계의 기준으로 사용되고 있는 IEEE Std 80-2000을 기본으로 변전소 설

계 대상 설치 장소의 지층구조에 따라 위험전압의 한계 값 변화에 대하여 연구하였다.

본 연구에서 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

가. 표토 층의 두께가 두꺼워질수록 허용 안전전압 (보폭 및 접촉전압)의 크기가 증가한다.

나. 표토 층의 재료별 특성에서 저항률이 높을수록 허용 안전전압의 크기가 선형적으로 증가한다. 다만, 상층의 대지저항률이 표토 층 재료의 저항률과 같을 경우에는 접촉전압의 변화가 다르게 나타난다.

다. 반사계수의 변화별 허용 안전전압은 반사계수가 +방향으로 커질수록 변화하는 정도가 크게 나타난다.

라. 상층의 깊이 변화별 허용 안전전압의 변화는 반사계수가 -인 경우에는 변화가 매우 작게 나타나지만, 반사계수가 +인 경우에는 크게 나타나고 있음을 확인하였다.

본 연구에서 제안하는 대지구조의 변화에 따른 허용 안전전압의 변화를 분석한 결과는 변전소와 같은 대형 접지시스템의 설계를 할 때 참고자료로 적용할 수 있을 것이며, 추후 다층구조의 대지구조에서도 적용이 가능한 일반적인 허용 안전전압 모델에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

- [1] IEC 60479-1(1994-09), Effect of current passing through human body-Part I: General aspects.
- [2] IEEE Std. 80, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, 2000.
- [3] Tagg, G. F., Earth Resistance, George Newnes Limited, 1964.
- [4] 高橋健彦, 이형수역, 接地設計 入門, 동일출판사, 옴사, 1993.
- [5] 高橋健彦, 이형수역, 接地技術 入門, 동일출판사, 옴사, 1995.
- [6] C. J. Blattner, "Prediction of Soil Resistivity and Ground Rod Resistance for Deep Ground Electrodes", IEEE PAS, Vol. 99, No. 5, Sep./Oct. 1980, pp 1758~1761
- [7] IEEE Std. 81, IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance and Earth Surface Potentials of a Ground System, 1983.