

위험전압 검토에 따른 개선된 접지설비 모델

(An Improved Model for Grounding System Using Examination of Dangerous Voltage)

홍순석 · 신복성*

(Soon-Seuk Hong · Bog-Sung Shin)

요 약

국내 접지설계시 가장 널리 사용되는 것은 IEEE Std. 80 위험전압 계산식이나 국내 접지설계 환경의 적정성 여부를 검토되지 않고 있다. 따라서, 본 논문에서는 IEEE Std. 80 접촉전압 계산식의 적용한계를 검토하고 그 문제점을 극복하기 위해 IEEE Std. 80 접촉전압값과 컴퓨터 모의실험값을 비교하여 접촉전압 계산식의 보정계수 K_a 를 유도하였다. 또한, 유도된 모델 중 Logistic 모델 형식의 보정계수를 적용할 경우 최대 오차율이 10[%]미만인 것을 검증함으로써 고가의 프로그램을 사용하지 않고도 안전하고 경제적인 접지설계를 할 수 있는 방법을 제시하였다.

Abstract

When we design the grounding grid, dangerous voltage IEEE Std. 80 method has been commonly used in the domestic area. However there is not appropriate examination of ground design environment. So in this paper, we examined of IEEE Std. 80 touch voltage method's marginal utility and we induced corrective factor for those problems by comparison between IEEE Std. 80 touch voltage value and simulation experimentation value. Moreover, Logistic model's corrective factor we proved the maximum accidental error has reduced less than 10[%].

Key Words : Grounding grid, Dangerous voltage, Touch Voltage, IEEE Std. 80

1. 서 론

접지설계시 접지망의 접지저항과 건축물 구내의 위험전압을 예측하는 것은 매우 중요한 작업이다. 이는 지락고장전류의 접지망 유입으로 인한 접지망과 지표면의 전위상승으로 인하여 인체에 인가될 수

있는 위험전압을 안전허용치 이내가 되도록 접지망을 구성하여야 하기 때문이다. 변전소와 같이 부지면적이 넓은 장소에서의 접지설계에는 "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding (ANSI/IEEE Std. 80)"이 널리 사용되고 있다[1-2].

IEEE Std. 80-1986에서는 등간격 Mesh접지망에 적용할 수 있는 접촉·보폭전압 계산식을 제시하고 있으나, 계산식의 각종 계수들(K_m , K_s , K_i)을 유도하는 과정에서 전제된 많은 가정들로 인하여 접지망 한 번의 도체개수는 25개를 초과하거나 도체간격이

* 주저자 : 코오롱 건설 부장
Tel : 031-445-6718, Fax : 031-445-6715
E-mail : sbs@kolon.com
접수일자 : 2007년 12월 5일
1차심사 : 2007년 12월 7일
심사완료 : 2008년 1월 30일

2.5[m] 이하인 경우 적용하지 말 것을 권고하는 등 여러 가지 적용상 제한이 따른다.

그리고 가장 최근판인 IEEE Std. 80-2000에서는 K_i 계수식의 근거가 된 Koch 수조실험을 컴퓨터 모의실험으로 대체함으로써 K_m , K_s , K_i 계수의 계산에 사용되는 도체개수(n)식과 K_i 식이 수정되었으며, 상기 수정된 계산식들은 접지망 한 변의 도체개수가 41개 이하인 경우에 한하여 검증되었다는 기술이 있을 뿐, 1986년판의 계산식이 갖고 있던 여러 적용한계에 대해서는 제한을 두지 않고 있다[1-5].

우리나라의 경우 부지가 좁고 대지저항율이 비교적 높은 곳이 많아 접지저항과 위험전압을 안전허용치 이내로 낮추기 위하여 접지도체 간격을 좁게 설계하는 경향이 있으므로 한 변의 도체개수가 41개를 초과하는 경우가 발생할 수 있다. 또한 접지망의 형태도 건축물의 위치나 규모에 따라 정사각형, 직사각형, L형 등이 있다[4]. 따라서 상기의 조건에 맞도록 IEEE Std. 80 위험전압식의 적용한계에 대한 검증이 필요하므로 본 논문에서는 우리나라 대부분의 건축물에서 채택하고 있는 정사각형이나 직사각형에 대한 IEEE Std. 80 계산식과 컴퓨터 모의실험 값을 비교하여 적용한계를 검토하였다. 또한, IEEE Std. 80 계산식과 컴퓨터 모의실험 값의 차이를 보정하는 계수를 유도함으로써 고가의 프로그램[6]을 사용하지 않고도 안전하고 경제적인 접지설계를 할 수 있는 방법을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 IEEE Std. 80 위험전압 계산식의 한계검토

Mesh, 보폭전압은 고장전류의 접지망 유입시 접지도체의 전위상승(GPR)과 이로 인한 지표면 전위상승과 밀접한 관계가 있다. 지표면 전위상승은 접지도체 각 부분에서 누설되는 전류가 지표면에 가까운 토양으로 분포되는 과정에서 발생하며, 접지도체의 배열상태, 접지전위 및 지표면 근처의 대지 고유저항과 상호 밀접한 관계가 있다.

2.1.1 IEEE Std. 80-1961과 1976

IEEE Std 80-1961과 1976에서의 Mesh, 보폭전압 계산식은 비대칭 유도모델 간격계수 K_m 의 문제점을 보완하고 Mesh형상의 접지망에서 적용할 수 있도록 Koch의 실험식에 근거한 K_i 계수가 도입 되었다. 즉, Mesh, 보폭전압을 계산하기 위한 간격계수 K_m , K_s 에 보정계수 K_i 를 곱하여 수식 (1)과 같이 나타내었다.

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M}, \quad E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_S} \quad (1)$$

여기서,

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{D^2}{16hd}\right) + \frac{1}{\pi} \ln(\lambda)$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left\{ \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{3D} + \dots + \frac{1}{(n-1)D} \right\}$$

$$K_i = 0.65 + 0.172n$$

ρ : 대지고유저항 [$\Omega \cdot m$]

L : 접지도체 전체길이 [m]

($L = L_M = L_S = L_c + L_r$, ($L = L_M = L_S = L_c + L_r$

L_M : Mesh전압을 계산하기 위한 접지도체 전체길이 [m]

L_S : 보폭전압을 계산하기 위한 접지도체 전체길이 [m]

L_c : Mesh도체의 전체길이 [m]

L_r : 접지봉의 전체길이 [m]

I_G : 대지전류 또는 GPR전류 [A]

K_m : Mesh전압 산출을 위한 간격계수

K_s : 보폭전압 산출을 위한 간격계수

K_i : 접지망의 고장전류 불균일 분포에 따른 전위경도 변화에 대한 보정계수

n : 한 방향에서의 도체개수 [개]

D : Grid 간격 [m], d : Grid도체의 직경 [m]

h : 매설깊이 [m], λ : 무한급수

그러나, Koch의 실험식에 사용된 축소모델은 실제 접지망을 대표한다고 할 수 없으므로 Mesh, 보폭

위험전압 검토에 따른 개선된 접지설비 모델

전압의 계산식에서 Koch의 실험결과가 유효하려면 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

- ① $D > 20h > 10d$
- ② $h < 0.25$ [m]

2.1.2 IEEE Std. 80-1986

IEEE Std. 80-1986에서의 Mesh, 보폭전압 계산식은 IEEE Std. 80-1961과 1976에 사용되었던 Mesh 전압 산출을 위한 간격계수 K_m 의 유도에 적용된 비대칭 모델을 새로운 대칭모델로 제안하였으며, 간격계수 K_m , K_s 의 보정계수 K_i 는 단일 Mesh에 대한 정확성을 높이기 위해 약간 수정되었다. 그리고 직사각형 Grid 계산을 위해 도체개수 n 의 수식이 확장되었으며, 외곽 또는 전체에 접지봉의 타설 유무에 따라 접지도체 전체길이 L 의 수식도 수정되었다. 즉, IEEE Std. 80-1986에서의 Mesh, 보폭전압 계산식은 IEEE Std. 80-1961과 1976에서 사용한 수식 (1)을 그대로 적용하는 대신 대칭모델로 유도된 K_m , K_s 와 새롭게 확장·수정된 n , L 을 적용한 것으로 다음과 같이 나타내었다.

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M}, \quad E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_S} \quad (2)$$

여기서,

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left\{ \frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right\} + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left\{ \frac{8}{\pi(2n-1)} \right\} \right]$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left\{ \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1-0.5^{n-2}) \right\}$$

$$K_i = 0.656 + 0.172n$$

L : 접지도체 전체길이 [m] ($L = L_M = L_S$)

$L = L_c + 1.15L_r$ (접지망 외곽 or 전체에 접지봉 타설)

$L = L_c + L_r$ (상기 이외의 경우)

n : 도체개수 [개]

$n = \sqrt{n_A n_B}$ (Mesh전압을 계산하기 위한 도체개수)

$n = \text{Max}(n_A, n_B)$ (보폭전압을 계산하기 위한 도체개수)

n_A, n_B : 각 방향의 평행 도체개수 [개]

그러나, IEEE Std. 80-1986에서의 Mesh, 보폭전압 계산식에서 계산결과가 유효하려면 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

- ① $n < 25$
- ② 0.25 [m] $< h < 2.5$ [m]
- ③ $d < 0.25h$
- ④ $D > 2.5$ [m]
- ⑤ 접지망의 긴 변과 짧은 변의 길이 25 : 1초과금지

2.1.3 IEEE Std. 80-2000

IEEE Std. 80-2000에서의 Mesh, 보폭전압 계산식은 T형, L형, 삼각형 Grid를 계산하기 위하여 IEEE Std. 80-1986에서 사용되었던 Mesh전압 산출을 위한 간격계수 K_m 와 보폭전압 산출을 위한 간격계수 K_s 의 수정 없이 도체개수 n 이 확장 되었으며, n 의 확장에 따른 간격계수 K_m , K_s 의 보정계수 K_i 의 수식이 수정되었다. 그리고 IEEE Std. 80-1986에서 사용되었던 접지도체 전체길이 L 의 수식이 외곽 또는 전체에 접지봉의 타설 유무에 관계없이 Mesh전압을 계산하기 위한 접지도체 전체길이 L_M 과 보폭전압을 계산하기 위한 접지도체 전체길이 L_S 로 변형되었다. 즉 IEEE Std. 80-2000에서의 Mesh, 보폭전압 계산식은 IEEE Std. 80-1986에서 사용한 수식 (2)를 그대로 적용하는 대신 새롭게 확장·수정된 n , L 을 사용하는 것으로 다음과 같이 나타내었다.

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M}, \quad E_s = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_S} \quad (3)$$

여기서,

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left\{ \frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right\} + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left\{ \frac{8}{\pi(2n-1)} \right\} \right]$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left\{ \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1-0.5^{n-2}) \right\}$$

$$K_i = 0.644 + 0.148n$$

L : 접지도체 전체길이 [m]

$$L_M = L_c + \left\{ 1.15 + 1.22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right\} L_r$$

$$L_S = 0.75L_c + 0.85L_r$$

L_R : 접지봉의 전체길이 [m]

L_r : 각 접지봉의 길이 [m]

n : 도체개수 [개]

$$n = n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \cdot n_4$$

$$n_1 = \frac{2L_c}{L_p}$$

$$n_2 = 1(\text{정방형 접지망}), n_2 = \sqrt{\frac{L_c}{4V/A}} \text{ (그외 경우)}$$

$$n_3 = 1(\text{정방형, 직사각형}), n_3 = \left[\frac{L_x L_y}{A} \right]^{\frac{0.7A}{L_c}} \text{ (그외)}$$

$$n_4 = 1(\text{정방형, 직사각형, L형}),$$

$$n_4 = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \text{ (그외)}$$

그러나, IEEE Std. 80-2000의 Mesh, 보폭전압 계산식 결과가 유효하려면 매설깊이는 0.25[m]이상 매설해야 하며 한 변의 도체개수가 41개를 초과할 수 없도록 하고 적용한계에는 제한을 두지 않고 있다. 그러나 우리나라의 경우 부지가 좁고 대지저항율이 비교적 높은 곳이 많아 접지저항과 위험전압을 안전허용치 이내로 낮추기 위해 접지도체 간격을 좁게 설계하는 경향이 있으므로 한 변의 도체개수가 41개를 초과하는 경우가 발생할 수 있으므로 이에 대한 검증이 필요하다.

2.2 IEEE Std. 80 접촉전압과 컴퓨터 모의실험 비교

따라서, 본 절에서는 우리나라 대부분의 건축물에서 채택하고 있는 정사각형이나 직사각형 접지망에 대한 IEEE Std. 80 계산식과 컴퓨터 모의실험 값을 비교하여 적용한계를 검토하였다. 컴퓨터 모의실험은 CDEGS의 MALT 모듈을 이용하여 수행하였다. 컴퓨터 모의실험에 CDEGS의 MALT모듈을 사용한 것은 MALT모듈이 IEEE Std. 80을 기초로 해서 개발된 프로그램으로 국내·외의 많은 전문가들이 인정하고 있고 IEEE Std. 80의 문제점인 수계산이나 단일지층에 대한 한계를 극복할 수 있어 IEEE Std. 80 보다 좀 더 신뢰성이 높고 편리한 접지설계 모델을 제안할 수 있기 때문이다.

2.2.1 컴퓨터 모의실험 조건

접지면적은 40×40에서부터 300×300까지 27가지의 정사각형과 60×40, 80×60, 150×100, 200×150, 300×240 5가지의 직사각형을 선정하였다. 각 접지망의 제원을 나타내면 표 1과 같다.

표 1. 각 접지망의 제원
Table 1. The specification of each grounding grid

접지전류(I _G)	1[kA]
대지저항율(ρ)	500[Ω · m]
도체굵기(A)	100[mm ²]
매설깊이(h)	1.0[m]
도체간격(D)	2~20[m]
접지면적(정사각형)	40×40~300×300[m ²] 27가지
접지면적(직사각형)	60×40, 80×60, 150×100, 200×150, 300×240[m ²] 5가지

2.2.2 컴퓨터 모의실험 결과

지면관계상 정사각형 접지면적 50×50과 직사각형 접지면적 150×100에 대한 모의실험결과를 요약하고자 한다. 그림 1, 2와 표 2, 3은 IEEE Std. 80-2000 접촉전압 계산식의 결과와 컴퓨터 모의실험의 계산결과를 나타낸 것이다.

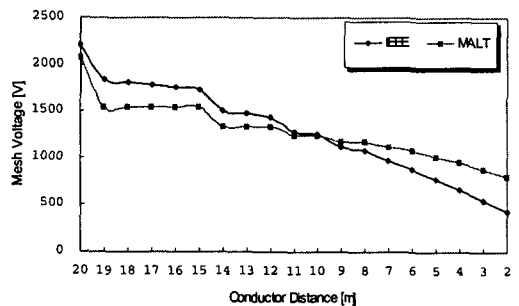


그림 1. IEEE 와 MALT의 결과 비교 그래프(50×50)
Fig. 1. The comparison graph of IEEE with MALT (50×50)

위험전압 검토에 따른 개선된 접지설비 모델

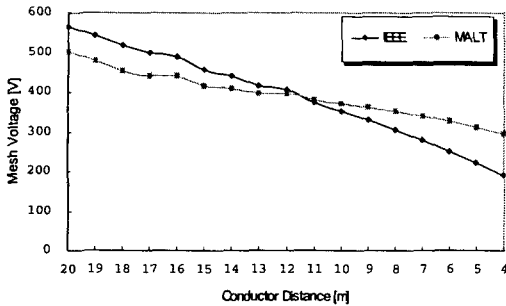


그림 2. IEEE 와 MALT의 결과 비교 그래프(150x100)
Fig. 2. The comparison graph of IEEE with MALT (150x100)

결과에서 [%]오차는 수식 (4)로 구하였고 IEEE Std 80-2000 계산식과 컴퓨터 모의실험과의 차이를 보정하는 접촉전압 보정계수는 수식 (5)에 의해서 구하였다.

$$\%오차 = \frac{IEEE\ 계산식의\ 접촉전압값 - 컴퓨터\ 모의실험값}{컴퓨터\ 모의실험값} \quad (4)$$

$$보정계수 = \frac{컴퓨터\ 모의실험값}{IEEE\ 계산식의\ 접촉전압값} \quad (5)$$

표 2, 3에서 보정계수는 도체수가 아닌 도체의 간격에 따라 변화하는데 이 값은 IEEE Std. 80-2000의 접촉전압 계산값과 컴퓨터 모의실험 값의 오차를 의미한다. 접지도체 간격이 10~12[m]를 초과하는 경우에는 IEEE Std. 80-2000 접촉전압 계산값이 컴퓨터 모의실험 결과 값보다 크게 나오고(최대 18.6%), 10~12[m]이하에서는 IEEE Std. 80-2000 접촉전압 계산값이 컴퓨터 모의실험 결과 값보다 작게 나오는(최대 -45.7%) 오차가 발생하였다. 특히, 도체수가 41개의 초과여부 보다는 도체간격이 지나치게 넓거나 좁을 경우 IEEE Std. 80-2000 접촉전압 계산식이 부정확해지는 것을 알 수 있다.

표 2. IEEE 와 MALT의 결과 비교(50x50)
Table 2. The comparison of IEEE with MALT (50x50)

도체간격	도체개수	IEEE	MALT	[%]오차	보정계수
20	3	2214.08	2078.28	6.5	0.939
19	4	1837.01	1549.09	18.6	0.843
18	4	1812.29	1549.09	17.0	0.855
17	4	1786.02	1549.09	15.3	0.867
16	4	1758.21	1549.09	13.5	0.881
15	4	1728.86	1549.09	11.6	0.896
14	5	1498.87	1329.72	12.7	0.887
13	5	1469.81	1329.72	10.5	0.905
12	5	1437.98	1329.72	8.1	0.925
11	6	1276.67	1238.86	3.1	0.970
10	6	1243.47	1238.86	0.4	0.996
9	7	1117.20	1171.98	-4.7	1.049
8	7	1081.20	1171.98	-7.7	1.084
7	8	975.70	1119.64	-12.9	1.148
6	9	882.61	1077.24	-18.1	1.221
5	11	766.28	1011.72	-24.3	1.320
4	13	669.66	962.50	-30.4	1.437
3	18	543.06	877.42	-38.1	1.616
2	26	431.92	795.37	-45.7	1.841

표 3. IEEE 와 MALT의 결과 비교(150x100)
Table 3. The comparison of IEEE with MALT (150x100)

도체간격	도체개수		IEEE	MALT	[%]오차	보정계수
	가로	세로				
20	8	6	566.35	501.80	12.9	0.886
19	9	6	544.19	479.14	13.6	0.880
18	9	7	517.47	455.24	13.7	0.880
17	10	7	498.51	440.84	13.1	0.884
16	10	7	490.30	440.84	11.2	0.899
15	11	8	458.23	415.70	10.2	0.907
14	12	8	441.35	409.85	7.7	0.929
13	13	9	414.49	396.95	4.4	0.958
12	13	9	405.24	396.95	2.1	0.980
11	15	10	375.86	381.99	-1.6	1.016
10	16	11	353.82	372.94	-5.1	1.054
9	18	12	329.42	362.02	-9.0	1.099
8	20	13	306.31	352.63	-13.1	1.151
7	22	15	280.74	341.20	-17.7	1.215
6	26	18	250.00	325.62	-23.2	1.302
5	31	21	221.50	311.95	-29.0	1.408
4	38	26	190.50	295.88	-35.6	1.553

2.3 접촉전압 보정계수

앞에서 언급하였듯이 우리나라는 건축물 부지가 협소한 경우가 많고 심층토양으로 갈수록 암반이 나타나는 등 대지저항율이 비교적 높기 때문에, 접지망의 도체간격을 좁게 설계하는 경우가 많다. 이 경우 IEEE Std. 80-2000의 계산식을 그대로 사용하게 되면, 컴퓨터 모의실험 결과에서 볼 수 있듯이 접지 도체 간격이 10~12[m]를 초과하는 경우에는 IEEE Std. 80-2000 접촉전압 계산값이 컴퓨터 모의실험 결과값보다 크게 나와 과대평가됨에 따라 과설계 될 수 있고, 10~12[m]이하에서는 IEEE Std. 80-2000 접촉전압 계산값이 컴퓨터 모의실험 결과보다 작게 나와 과소평가됨에 따라 부족설계가 되어 접촉전압이 안전 허용치를 초과하더라도 허용치 이내인 것처럼 계산될 수 있다.

이러한 문제를 해결할 수 있는 좋은 방법은 유한요소해석으로 접촉전압을 계산하는 컴퓨터 프로그램들을 이용하는 방법과 IEEE Std. 80-2000 계산 값과 컴퓨터 모의실험의 접촉전압 결과 값과의 차이를 보정해주는 또 다른 계수를 만들어 적용하는 방법이 있다.

2.3.1 접촉전압 보정계수 유도

컴퓨터 모의실험 결과에서 얻어진 도체간격에 따른 접촉전압 보정계수는 표 4와 같이 나타낼 수 있다. 표 4는 정사각형 27가지와 직사각형 5가지를 합한 총 32가지 경우에 대해 도체간격을 20~2[m]로 변화시켜 구한 보정계수 값들을 평균한 것이다. 이것을 그림으로 표현하면 그림 3과 같다.

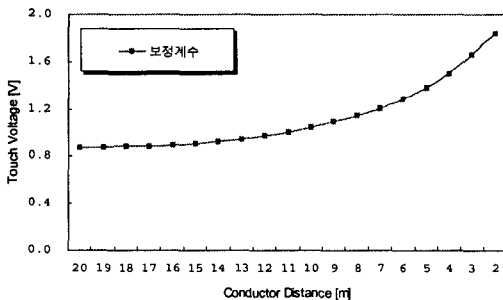


그림 3. 보정계수 평균 그래프
Fig. 3. The average graph of a corrective factor

그림 3의 보정계수와 도체간격과의 상관관계는 Curve fitting을 이용하여 수식화 하였다. Curve fitting에 사용된 모델에는 Logistic 모델, Shifted Power fit 모델, Power fit 모델 등이 있다. 각 모델에 대한 Curve fitting을 구하면 그림 4~6과 같다.

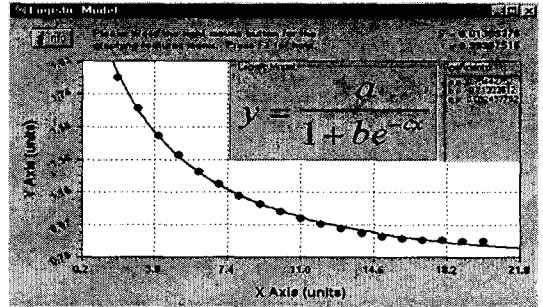


그림 4. 접촉전압 보정계수(Logistic 모델)
Fig. 4. The corrective factor of touch voltage (Logistic model)

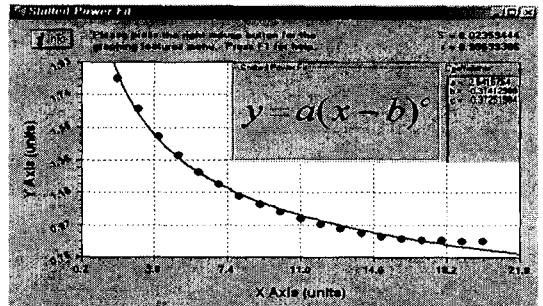


그림 5. 접촉전압 보정계수(Shifted Power fit 모델)
Fig. 5. The corrective factor of touch voltage (Shift Power Fit model)

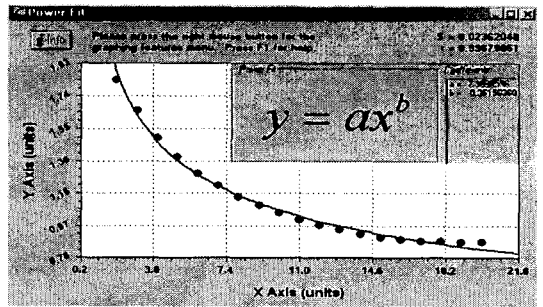


그림 6. 접촉전압 보정계수(Power Fit 모델)
Fig. 6. The corrective factor of touch voltage (Power Fit model)

워엄전압 검토에 따른 개선된 접지설비 모델

표 4. 보정계수의 평균값
Table 4. The average value of a corrective factor

접지망 면적	도체 간격									
	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11
40 × 40	0.887	0.898	0.910	0.923	0.937	0.848	0.864	0.880	0.899	0.951
50 × 50	0.939	0.843	0.855	0.867	0.881	0.896	0.887	0.905	0.925	0.970
60 × 60	0.875	0.886	0.898	0.851	0.864	0.879	0.895	0.922	0.943	0.965
70 × 70	0.910	0.856	0.868	0.880	0.894	0.883	0.900	0.918	0.956	0.981
80 × 80	0.874	0.886	0.898	0.869	0.883	0.898	0.913	0.932	0.967	0.991
90 × 90	0.777	0.865	0.877	0.890	0.877	0.892	0.909	0.941	0.963	1.000
100 × 100	0.875	0.886	0.867	0.880	0.895	0.901	0.918	0.949	0.970	0.976
110 × 110	0.898	0.870	0.883	0.896	0.885	0.901	0.925	0.945	0.976	1.012
120 × 120	0.876	0.887	0.874	0.888	0.902	0.904	0.930	0.951	0.981	1.015
130 × 130	0.895	0.875	0.887	0.879	0.894	0.910	0.927	0.985	0.985	1.018
140 × 140	0.876	0.888	0.879	0.892	0.890	0.906	0.932	0.958	0.988	1.020
150 × 150	0.893	0.876	0.889	0.885	0.900	0.910	0.934	0.961	0.984	1.022
160 × 160	0.875	0.887	0.882	0.896	0.892	0.913	0.931	0.958	0.986	1.024
170 × 170	0.891	0.878	0.891	0.888	0.894	0.910	0.934	0.959	0.988	1.020
180 × 180	0.848	0.859	0.883	0.881	0.897	0.912	0.935	0.961	0.989	1.021
190 × 190	0.888	0.878	0.877	0.891	0.893	0.914	0.937	0.963	0.990	1.022
200 × 200	0.874	0.871	0.885	0.884	0.870	0.911	0.934	0.960	0.991	1.023
210 × 210	0.886	0.878	0.878	0.892	0.893	0.912	0.936	0.960	0.988	1.023
220 × 220	0.873	0.872	0.885	0.885	0.894	0.914	0.936	0.961	0.988	1.022
230 × 230	0.884	0.878	0.878	0.879	0.895	0.912	0.934	0.961	0.989	1.023
240 × 240	0.871	0.871	0.884	0.886	0.892	0.912	0.935	0.959	0.989	1.023
250 × 250	0.881	0.877	0.878	0.880	0.892	0.913	0.935	0.959	0.989	1.022
260 × 260	0.869	0.870	0.884	0.886	0.890	0.911	0.935	0.958	0.989	1.022
270 × 270	0.878	0.876	0.877	0.880	0.891	0.910	0.932	0.959	0.986	1.021
280 × 280	0.868	0.869	0.871	0.886	0.891	0.911	0.932	0.958	0.986	1.019
290 × 290	0.876	0.874	0.877	0.881	0.889	0.909	0.932	0.956	0.985	1.018
300 × 300	0.865	0.868	0.871	0.875	0.889	0.908	0.930	0.956	0.985	1.018
60 × 40	0.883	0.894	0.906	0.873	0.887	0.863	0.879	0.902	0.922	0.960
80 × 60	0.875	0.887	0.899	0.861	0.874	0.890	0.899	0.928	0.956	0.979
150 × 100	0.886	0.880	0.880	0.884	0.899	0.907	0.929	0.958	0.980	1.016
200 × 150	0.884	0.875	0.888	0.885	0.901	0.912	0.935	0.962	0.989	1.023
300 × 240	0.869	0.870	0.879	0.881	0.891	0.911	0.933	0.958	0.988	1.021
보정계수 평균	0.878	0.876	0.882	0.883	0.891	0.903	0.922	0.948	0.975	1.008

각 보정계수 모델에 대한 수식은 수식 (6)~(8)과 같고 상관계수와 표준오차는 표 5와 같다. 수식 (6)은 Logistic 모델 형식으로 나타난 보정계수 식이고

수식 (7)과 수식 (8)은 Shifted Power fit 모델, Power fit

표 4. 보정계수의 평균값 (계속)
Table 4. The average value of a corrective factor (continue)

접지망 면적	도체 간격								
	10	9	8	7	6	5	4	3	2
40 × 40	0.976	1.004	1.066	1.133	1.207	1.292	1.412	1.565	1.787
50 × 50	0.996	1.049	1.084	1.148	1.221	1.320	1.437	1.616	1.841
60 × 60	1.013	1.061	1.098	1.176	1.246	1.343	1.471	1.643	1.886
70 × 70	1.024	1.071	1.123	1.183	1.265	1.359	1.486	1.667	0.000
80 × 80	1.033	1.079	1.130	1.187	1.268	1.372	1.505	1.693	0.000
90 × 90	1.040	1.144	1.134	1.203	1.280	1.384	1.499	1.711	0.000
100 × 100	1.046	1.088	1.139	1.204	1.290	1.394	1.531	1.725	0.000
110 × 110	1.049	1.092	1.149	1.215	1.293	1.400	1.526	0.000	0.000
120 × 120	1.053	1.096	1.150	1.216	1.299	1.405	1.550	0.000	0.000
130 × 130	1.055	1.097	1.152	1.223	1.305	1.411	1.544	0.000	0.000
140 × 140	1.057	1.105	1.153	1.223	1.305	1.418	0.000	0.000	0.000
150 × 150	1.059	1.106	1.160	1.223	1.310	1.421	0.000	0.000	0.000
160 × 160	1.060	1.107	1.160	1.227	1.315	1.425	0.000	0.000	0.000
170 × 170	1.061	1.107	1.160	1.228	1.314	1.428	0.000	0.000	0.000
180 × 180	1.062	1.106	1.160	1.232	1.317	0.000	0.000	0.000	0.000
190 × 190	1.062	1.107	1.163	1.231	1.320	0.000	0.000	0.000	0.000
200 × 200	1.061	1.107	1.163	1.234	1.319	0.000	0.000	0.000	0.000
210 × 210	1.062	1.106	1.162	1.232	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
220 × 220	1.062	1.107	1.153	1.232	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
230 × 230	1.061	1.109	1.164	1.235	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
240 × 240	1.062	1.109	1.164	1.234	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
250 × 250	1.060	1.108	1.164	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
260 × 260	1.061	1.108	1.163	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
270 × 270	1.060	1.106	1.164	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
280 × 280	1.060	1.106	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
290 × 290	1.059	1.106	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
300 × 300	1.058	1.105	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
60 × 40	0.995	1.034	1.085	1.156	1.228	1.319	1.442	1.605	1.837
80 × 60	1.024	1.072	1.116	1.183	1.259	1.358	1.489	1.668	0.000
150 × 100	1.054	1.099	1.151	1.215	1.302	1.408	1.553	0.000	0.000
200 × 150	1.061	1.108	1.163	1.229	1.315	0.000	0.000	0.000	0.000
300 × 240	1.061	1.107	1.164	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
보정계수 평균	1.047	1.094	1.143	1.208	1.285	1.380	1.496	1.655	1.838

모델 형식으로 나타낸 보정계수 식들이다. 여기서, K_a 는 접촉전압 보정계수이고 D 는 도체간격이다.

$$K_a = \frac{0.754}{1 - 0.713e^{-0.0924D}} \quad (6)$$

$$K_a = 2.541(D + 0.314)^{-0.3725} \quad (7)$$

$$K_a = 2.389D^{-0.3515} \quad (8)$$

표 5. 각 모델에 대한 상관계수와 표준오차
Table 5. The correlation coefficient and standard error

모델명	Logistic	Shift Power fit	Power fit
상관계수	0.9991	0.9970	0.9968
표준오차[%]	0.0131	0.02359	0.02360

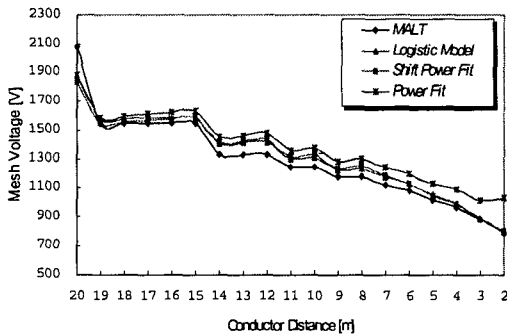


그림 7. 각 모델별 접촉전압 보정계수 (50×50)
Fig. 7. The corrective factor of touch voltage by each model (50×50)

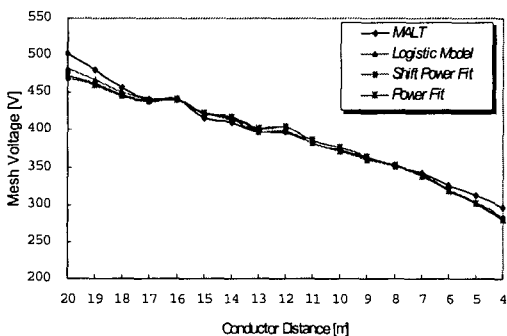


그림 8. 각 모델별 접촉전압 보정계수 (150×100)
Fig. 8. The corrective factor of touch voltage by each model (150×100)

컴퓨터 모의실험 결과인 정사각형 접지면적 50×50 과 직사각형 접지면적 150×100 대해서 Curve fitting 한 세 모델을 적용하면 그림 7, 8과 같다.

표 6은 접지면적 40×40에서부터 300×300까지 27 가지의 정사각형 경우와 60×40, 80×60, 150×100, 200×150, 300×240 5가지의 직사각형인 경우인 32가지 경우에 대해서 Curve fitting으로 구한 Logistic 모델, Shifted Power fit 모델, Power fit 모델을 접촉전압 보정계수로 사용하였을 때의 최대 오차율을 나타낸 것이다. 세 모델 모두 IEEE Std. 80-2000의 계산식 보다는 최대 오차율이 적고 Shifted Power fit 모델은 접지면적 90×90과 180×180에서 최대 오차율이 가장 적으며 나머지 30가지 경우에서 Logistic 모델이 가장 적었다. 특히, Logistic 모델은 최대 오차율이 10[%] 미만이다. 이것은 IEEE Std. 80-2000의 접촉전압 계산식에 Logistic 모델형식의 접촉전압 보정계수를 적용한다면 컴퓨터 모의실험과의 오차가 10[%] 미만이 되어서 정확성이 높아진다는 것을 의미한다.

표 6. 각 모델에 대한 최대 오차율
Table 6. The maximum error rate about each model

접지면적 [m ²]	최대 오차율			
	IEEE Std.80	Logistic	Shifted Power Fit	Power Fit
40 × 40	-44.0	11.0	33.7	
50 × 50	-45.7	-11.8	29.7	
60 × 60	-47.0	5.4	10.1	
70 × 70	-40.0	-9.0	12.3	
80 × 80	-40.9	-5.3	10.6	
90 × 90	-41.6	9.3	9.4	
100 × 100	-42.0	-5.7	9.0	
110 × 110	-34.4	-7.9	6.4	
120 × 120	-35.5	-5.5	5.0	
130 × 130	-35.2	-7.6	-5.2	
140 × 140	-29.5	-5.5	4.5	
150 × 150	-29.6	-7.4	-5.0	
160 × 160	-29.8	-5.5	4.3	
170 × 170	-30.0	-7.1	-4.7	

위험전압 검토에 따른 개선된 접지설비 모델

접지면적 [m ²]	최대 오차율			
	IEEE Std.80	Logistic	Shifted Power Fit	Power Fit
180 × 180	-24.1	-3.0		4.1
190 × 190	-24.3		-6.8	-4.5
200 × 200	-24.2		-5.3	6.0
210 × 210	-18.8		-6.6	4.1
220 × 220	-18.8		-5.1	4.6
230 × 230	-19.1		-6.3	-4.0
240 × 240	-19.0		-5.0	4.0
250 × 250	-14.1		-6.1	4.1
260 × 260	15.1		-4.8	4.0
270 × 270	-14.1		-5.8	4.3
280 × 280	15.3		-4.6	4.4
290 × 290	14.5		5.5	4.5
300 × 300	15.6		-4.4	4.4
60 × 40	-45.6		8.2	8.2
80 × 60	-40.0		-5.4	5.0
150 × 100	-35.6		-6.6	-5.9
200 × 150	-23.9		-6.4	-5.8
300 × 240	15.1		-4.7	-4.0

컴퓨터 모의실험 결과와 표 6에서 얻어진 도체간 격에 따른 접촉전압 보정계수를 적용하여 Curve fitting 한 결과 상관계수가 0.9991, 표준오차가 0.0131[%]이고 최대 오차율이 10[%] 미만으로 가장 좋은 Logistic 모델 형식인 수식 (6)이 IEEE Std. 80-2000의 접촉전압 보정계수로 가장 적합하였다.

그러므로, IEEE Std. 80-2000의 접촉전압 수식인 수식 (3)은 수식 (6)의 접촉전압 보정계수를 적용하여 수식 (7)과 같이 확장된 수식으로 표현할 수 있다.

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot K_a \cdot I_G}{L_M} \quad (7)$$

여기서,

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left\{ \frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right\} + \frac{K_h}{K_s} \ln \left\{ \frac{8}{\pi(2n-1)} \right\} \right]$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left\{ \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right\}$$

$$K_i = 0.644 + 0.148n$$

$$K_a = \frac{0.754}{1 - 0.713e^{-0.0924D}}$$

컴퓨터 모의실험 결과인 정사각형 접지면적 50×50과 직사각형 접지면적 150×100에 대해서 Logistic 모델을 적용한 IEEE Std. 80의 접촉전압을 나타내면 그림 9, 10과 같다.

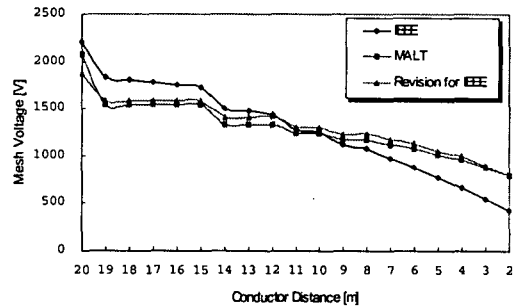


그림 9. IEEE 접촉전압 보정계수(50×50)
Fig. 9. The corrective factor of the IEEE touch voltage(50×50)

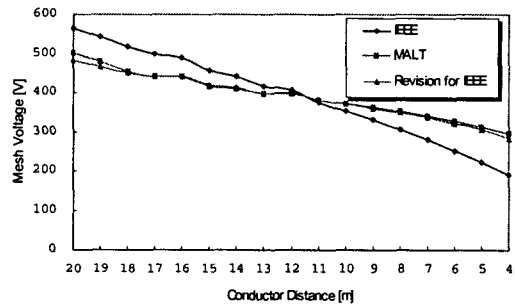


그림 10. IEEE 접촉전압 보정계수(150×100)
Fig. 10. The corrective factor of the IEEE touch voltage(150×100)

3. 결 론

본 논문에서는 국내 접지설계시 가장 많이 사용되는 IEEE Std. 80 접촉전압 계산식의 적용한계를 검토하고 그 문제점을 극복하기 위해 IEEE Std. 80 접촉전압값과 컴퓨터 모의실험값을 비교하여 접촉전

압 계산식의 보정계수 K_a 를 유도하여 최대오차율이 10[%]미만인 Logistic 모델 형식의 보정계수 K_a 를 제시하였다. 이것을 정리하면 다음과 같다.

1. IEEE Std. 80 위험전압 계산식의 한계검토
IEEE Std. 80-1961과 1976에서부터 IEEE Std. 80-2000에 이르기까지 위험전압 계산식의 변천과정 및 적용한계를 검토하였고 국내 접지설계시 검증의 필요성을 제시하였다.
2. IEEE Std. 80 접촉전압과 컴퓨터 모의실험 비교
접지도체 간격이 10~12[m]를 초과하는 경우에는 IEEE Std. 80 접촉전압 계산값이 컴퓨터 모의실험 결과 값보다 크게 나오고(최대 18.6[%]), 10~12[m]이하에서는 IEEE Std. 80 접촉전압 계산값이 컴퓨터 모의실험 결과 값보다 작게 나왔다(최대 -45.7[%]).
3. IEEE Std. 80 접촉전압 계산식의 보정계수 유도
Curve fitting을 이용하여 Logistic 모델, Shifted Power fit 모델, Power fit 모델 등 3가지 모델을 제시하였고 이중 Logistic 모델을 적용할 경우 IEEE Std. 80 접촉전압 계산식의 최대오차율이 10[%] 미만이 되는 것을 검증하였다.

본 연구는 2006학년도 홍익대학교 교내 연구비로 수행되었음.

References

- (1) ANSI/IEEE Std. 80-1986, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 1986.
- (2) ANSI/IEEE Std. 80-2000, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 2000.
- (3) J. G. Sverak, "Progress in Step and Touch Voltage Equations of ANSI/IEEE Std. 80 - Historical Perspective", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 3, 1998.
- (4) B. Thapar, "Simplified Equations for Mesh and Step Voltages in an AC Substation", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 2, 1991.
- (5) 문태완외, "IEEE Std-2000의 배쉬전압식 적용한계의 검토", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, 2001.
- (6) "Current Distrigution, Electromagnetic Interference, Grounding Ad Soil Structure Analysis", SES, 1997.

◇ 저자소개 ◇

홍순석 (洪淳錫)

1945년 12월 21일생. 1971년 인하대학교 전기공학과 졸업. 1974년 인하대학교 전기공학과 졸업(석사). 1993년 홍익대학교 전자공학과 졸업(박사). 1991~현재 홍익대학교 전자·전기공학과 교수.

신복성 (慎福晟)

1956년 3월 29일생. 1982년 울산대학교 전기공학과 졸업. 1982년~현재 코오롱 건설 부장. 현재 홍익대학교 전기공학과 석사과정.