

접지선 굵기에 관한 연구

(The study on the ground wire size)

최홍규 · 최병숙 · 송영주*

(Hong-Kyoo Choi · Byoung-Sook Choi · Young-Joo Song)

홍익대학교 전기설비 연구소

Abstract

Ground wire must choose enough sectional area of conductor durably in maximum fault current, fault duration time, maximum allowable temperature and have strong durability and life-time can bear enough from spontaneous corrosion or electrolytic corrosion and must choose material that problem does not exist electrically and mechanically when connection or junction. In this paper, modeled new ground wire size numerical formula, and examine and compare of modeled numerical formula and abroad regulation, and proved and analyzed validity of the new ground wire size computation method because do simulation to computer program.

1. 서 론

건축물의 시스템은 전력을 공급하는 전력 설비, 통신 시스템 및 전산 시스템, OA 기기 그리고 보안 및 빌딩 관리시스템 등의 다양한 설비가 혼합되어 설치 운용된다.[1][2] 따라서, 이 시스템들은 전력선, 통신선 및 데이터 선과 같은 각종의 케이블로 설치되어 있다. 건축물 내에 설비와 장비의 노이즈나 서어지는 대부분 이러한 케이블을 통해 유입되며,[4][5] 유입된 서어지나 뇌전류는 이들 설비에 손상을 주거나 파괴시키게 되므로 이러한 피해를 방지하기 위해 접지가 필요하다.[2] [4]~[7]

건축물의 각종 전기, 전자, 통신설비를 대지와 전기적으로 접속하여 접지를 구성하기 위한 단자가 접지전극이다.[1][3][8] 이 전극과 전력사용 설비기기 사이에 연결하는 도체가 접지선이다. 따라서, 지락 전류 혹은 Noise 전류 발생시 접지선을 통해서 대지로 신속하게 고장전류를 흘려줌으로서 접지선의 과열로 인한 손상방지 및 전위 상승을 억제하여 시스템의 여러 가지 장애 또는 인체 감전 사고를 방지 할 수 있다. [1][2][7] 접지선 굵기는 굵은 것이 이상적이거나[1][7] 실제적으로 불가능하므로 접지선에 접속된 장비나 설비에 영향이 미치지 않는 범위 내에서 접지선의 굵기를 선정하는 것이 절대적으로 필요하다.[2][7][8]

이 연구의 목적은 현재 국·내외 적용하고 있는 접지선 굵기 산정 방식이 복잡하고 적용 방법이 상이하야 시공현장에서 엔지니어들이 적용하는데 많은 어려움이

있다. 따라서, 국제화 추세에 부응하고 건설현장에서 엔지니어들이 쉽게 적용할 수 있는 새로운 접지선 굵기 산정방식을 연구하는데 목적이 있으며 본 논문에서는 새로운 접지선 굵기 산정방식을 모델링 하였고 모델링 수식과 외국의 규정을 비교 검토하였으며, 사례연구에서 컴퓨터 프로그램으로 접지전위, 접촉전압, 보폭전압을 Simulation하여 새로운 접지선 굵기 산정방식의 타당성을 입증하고 분석하였다.

2. 본 론

접지선을 통해 지락전류나 뇌전류가 흐를 때 방전이 잘되지 않으면 열이 발생하게 되고 발생된 열로 인해 화재나 접지선의 단선으로 인한 사고파급 범위의 확대 및 주위의 가연물 등에 위험이 미치게 되므로 접지재료는 이 온도에 견딜 수 있도록 도체의 단면적을 충분히 선정 하여야 하며, 자연부식이나 전식으로 부터 충분히 견딜 수 있는 강한 내구성과 수명 그리고 접속이나 연결시 전기적으로나 기계적으로 문제가 없는 재료를 선정하여야 한다.[8]

2.1. 접지선 굵기 계산식

2.1.1 국내·외 규격 비교

접지망을 구성하는 요소중 접지선은 최대고장전류가 고장지속시간동안 지속되어도 용단, 열화 되지 않아야 하며, 접지망에서 위험한 전위차가 발생되지 않도록 충

분한 도전율과 기계적 강도를 가져야 한다. 최대고장전류 및 고장지속시간을 고려하여 접지선의 굵기를 결정하는 국내·외 규격에는 ANSI/IEEE std. 80, IEC pub 60364-5, JIS, 전기설비기술기준(내선규정 포함) 등이 있고 각 규격의 접지선 굵기 선정 조건은 표 1과 같다.

표 1. 국내·외 접지선 굵기 선정 조건
Table 1. Internal and external ground wire size choice condition

계산 조건	ANSI/IEEE 80, IEC pub 60364-5	일본규격 국내규격(전기, 내규)
피복 재료	PVC, XLPE, EPE등	IV 절연전선
물리적 정수	도전율, 열저항률, 열용량 계수 적용	적용하지 않음
최대허용온도	사용재질에 따라 적용 (피복과 도체 재질)	150[°C]
고장지속시간	제통조건에 따라 적용	0.1초(계통조건에 따라 다르게 적용가능)

2.1.2 ANSI/IEEE std. 80

ANSI/IEEE std. 80에서 사용하는 접지선의 굵기는 고장전류크기, 고장지속시간, 온도, 재료의 특성값 등을 적용하여 수식 (1)과 같이 구한다.

$$A = I \sqrt{\frac{t_c \alpha_r \rho_r \times 10^4}{TCAP} \ln \left\{ 1 + \left(\frac{T_m - T_a}{K_0 + T_a} \right) \right\}} \quad (1)$$

전선재료를 연동선으로 사용하고 최대허용온도를 250[°C], 주위온도를 30[°C]로 할 때 ANSI/IEEE 규격을 사용하여 고장전류 크기별, 고장지속 시간별 접지선 굵기를 계산한 결과는 표 2와 같다.

표 2. ANSI/IEEE 규격에 의한 접지선 굵기 계산
Table 2. Ground wire size calculation by ANSI/IEEE standard

고장지속 시간[s]	고장전류 크기[kA]				
	10	20	30	40	50
0.1	18.07	36.15	54.22	72.30	90.37
0.5	40.41	80.83	121.24	161.66	202.07
1.0	57.15	114.31	171.46	228.62	285.77
2.0	80.83	161.66	242.49	323.32	404.15

2.1.3 IEC pub. 60364-5

IEC pub. 60364-5에서 사용하는 접지선의 굵기는 ANSI/IEEE std. 80과 유사하며 수식 (2)와 같이 구한다.

$$A = \frac{I \sqrt{t_c}}{k}, k = \sqrt{\frac{Q_c (B+20)}{\phi_{20}} \ln \left(1 + \frac{\theta_f - \theta_i}{B + \theta_i} \right)} \quad (2)$$

전선재료를 동으로 하고 최대허용온도를 250[°C], 주위온도를 30[°C]로 할 때 IEC 규격을 사용하여 고장전류 크기별, 고장지속 시간별 접지선 굵기를 계산한 결과는 표 3과 같다.

표 3. IEC 규격에 의한 접지선 굵기 계산
Table 3. Ground wire size calculation by IEC standard

고장지속 시간[s]	고장전류 크기[kA]				
	10	20	30	40	50
0.1	17.97	35.93	53.90	71.87	89.84
0.5	40.18	80.35	120.53	160.71	200.88
1.0	56.82	113.64	170.45	227.27	284.09
2.0	80.35	160.71	241.06	321.41	401.77

2.1.4 일본 규격(JIS)

일본 규격(JIS)에서 사용하는 접지선의 굵기는 앞의 규격과는 달리 재료의 특성값을 제외한 고장전류크기, 고장지속시간, 온도 등을 적용하여 수식 (3)과 같이 구한다.

$$A = I \sqrt{\frac{t_c (8 \times 10^{-3})}{T_m - T_a}} \quad (3)$$

일본규격은 최대허용온도 150[°C], 주위온도 30[°C], 고장지속시간을 0.1[s]로 하고, 접지선의 도체재질을 동선으로 제한하고 있어 최대허용온도를 250[°C]로 하는 것은 정확한 계산조건이 되지 않지만 앞의 다른 규격과 계산결과를 비교하기 위해 주위온도를 30[°C]로 하고 고장지속시간이 0.1[s]인 경우에는 최대허용온도를 150[°C], 0.5[s]에서 2.0[s]까지는 250[°C]로 할 때 고장전류 크기별, 고장지속 시간별 접지선 굵기를 계산한 결과는 표 4와 같다.

표 4. 일본 규격(JIS)에 의한 접지선 굵기 계산
Table 4. Ground wire size calculation by JAPAN(JIS) standard

고장지속 시간[s]	고장전류 크기[kA]				
	10	20	30	40	50
0.1	25.82	51.64	77.46	103.28	129.10
0.5	42.64	85.28	127.92	170.56	213.20
1.0	60.30	120.60	180.91	241.21	301.51
2.0	85.28	170.56	255.84	341.12	426.40

2.1.5 전기설비기술기준 (내선규정포함)

국내 규격에서 사용하는 접지선의 굵기는 전원측에 시설한 과전류차단기의 동작특성과 관련하여 선정하며 각 접지공사마다 전류용량에 따라 접지선 굵기를 규정하고 있다. 접지선의 최소 굵기는 전기설비기술기준 제 22조에 명시되어 있고 세부내용은 내선규정 140조에 의하며 수식 (4)와 같이 구한다.

$$A = I \sqrt{\frac{0.008 \times t_c}{T_m - T_a}} = 0.052I_n \quad (4)$$

전선재료를 동선으로 할 때 고장전류 크기별, 고장지속 시간별 접지선 굵기를 계산한 결과는 일본규격 표 4와 같다.

2.2. 접지선 굵기 제안식 모델링

2.2.1 흐름도

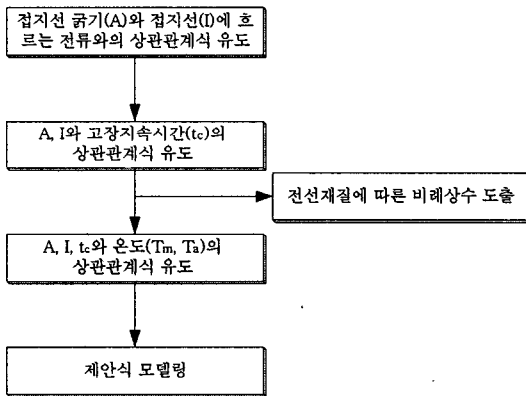


그림 1. 접지선 굵기 제안식 흐름도
Fig. 1. The flowchart of ground wire propose model

2.2.2 접지선 굵기와 접지선에 흐르는 전류

접지선 굵기와 접지선에 흐르는 전류와의 상관관계는 최소자승법을 이용하여 수식화 하였다. 최소자승법은 n개의 데이터 점을 지나는 최적의 직선은 편차의 제곱의 합이 최소가 될 때 최적이 되는 이론을 적용한 것으로 목적함수와 제약조건을 나타내면 수식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} \text{Min } & \sum_{i=1}^N [y_i - (bx_i + a)]^2 \\ \text{st. } & A = \sum_{i=1}^N x_i, B = \sum_{i=1}^N y_i, C = \sum_{i=1}^N x_i^2, \\ & D = \sum_{i=1}^N x_i y_i, N : \text{number} \end{aligned} \quad (5)$$

이때 기울기 b는 $b = AB - ND/A^2 - NC$ 로, 절편 a는 $a = AD - BC/A^2 - NC$ 로 구한다.

본 논문에서는 표 2에 사용된 접지선에 흐르는 고장전류 크기 I를 x로 접지선 굵기 A를 y로 대치하여 각 고장지속시간에 대한 수식을 유도하였다. 유도된 수식은 수식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} A_{0.1} &= 1.807I, & A_{0.5} &= 4.041I \\ A_{1.0} &= 5.715I, & A_{2.0} &= 8.083I \end{aligned} \quad (6)$$

2.2.3 A, I와 고장지속시간

접지선의 굵기와 접지선에 흐르는 전류 그리고 고장지속시간과의 상관관계는 각 구간별 기울기를 비교하여 수식화 하였다.

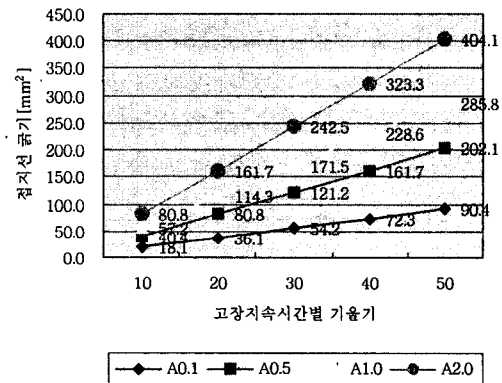


그림 2. 각 구간별 기울기 비교 그래프
Fig. 2. Tilt comparison graph by each section

표 5. 각 구간별 기울기 비교
Table 5. Tilt Comparison by each section

기울기 및 비율	각 구간별 기울기 및 비율				
	1구간	2구간	3구간	4구간	평균
$A_{0.1}$	0.5556	0.5525	0.5525	0.5525	0.5533
$A_{0.5}$	0.2475	0.2475	0.2469	0.2375	0.2474
$A_{1.0}$	0.1751	0.1748	0.1751	0.1748	0.1750
$A_{2.0}$	0.1236	0.1238	0.1239	0.1236	0.1237
$A_{0.1/0.5}$	2.2444	2.2320	2.2375	2.2320	$\sqrt{3}$
$A_{0.1/1.0}$	3.1722	3.1602	3.1547	3.1602	$\sqrt{10}$
$A_{0.1/2.0}$	4.4944	4.4641	4.4586	4.4696	$\sqrt{20}$

고장지속시간 0.1[s]를 기준으로 하여 지속시간이 길어지게 됨에 따라 접지선의 굵기는 $\sqrt{10t_c}$ 배가 된다.

$$A_{t_c} = 1.807I \times \sqrt{10t_c} \quad (7)$$

2.2.4 전선 재질에 따른 비례상수

최소자승법과 각 구간별 기온기를 이용하여 사용전선 재질에 따른 비례상수 K 를 구한다. 구해진 비례상수 K 값은 표 6과 같다.

표 6. 전선재질에 따른 비례상수
Table 6. Proportional factor by wire material

전선 재료	연 동선	경 동선	알루미늄 선	동복 강선	내식 알루미늄 #5005	알루미늄 복합선	아연도금 강선	스테인레스강 #304
K	5.714	5.780	8.503	8.576	8.842	14.205	17.762	30.581

2.2.5 A, I, t_c 와 최대허용온도, 주위온도

접지선의 굵기와 접지선에 흐르는 전류, 고장 지속시간과 최대허용온도, 주위온도와 상관계는 Curve fitting를 이용하여 수식화 하였다. Curve fitting에 사용된 모델에는 Harris 모델, Hoerl 모델, Vapor pressure 모델, Weibull 모델, Power fit 모델, Rational function 모델, Polynomial fit 모델, Quadratic fit 모델, Exponential fit 모델 등이 있으나 본 논문에서는 최대허용온도 250[°C]를 기준으로 하여 120[°C]에서 900[°C]까지 온도를 변화 시킬 때 상관계수가 0.99992275이고 표준오차가 0.00388[%]로 제일 적은 Harris 모델 $1/(a + bx^c)$ 를 사용하였다.

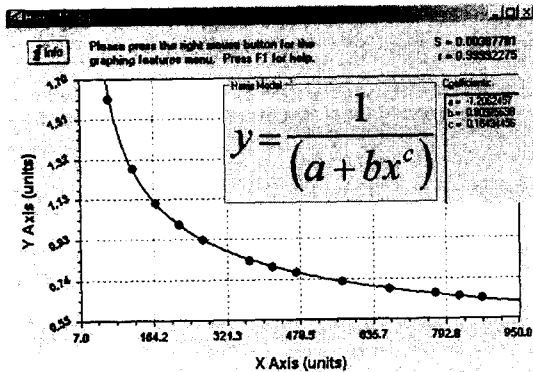


그림 3. 온도 변화에 따른 Harrison model
Fig. 3. Harrison model by temperature change

2.2.6 접지선 굵기 제안식

제안된 접지선 굵기 수식은 ANSI/IEEE std. 80 수식과 IEC pub.60364-5 수식과 같이 고장전류크기, 고장지속시간, 최대허용온도, 주위온도, 접지선 재료에 쓰이는 금속의 물리적인 정수를 고려한 전선 재질에 따른 비례상수 등을 적용하여 수식 (8)과 같이 구한다.

$$A = \frac{KI\sqrt{t_c}}{[a + b(T_m - T_a)]^c} \quad (8)$$

여기서,

상수 $a = -1.21, b = 0.91, c = 0.164$

K : 전선 재질에 따른 비례상수

I : 접지선에 흐르는 전류[kA],

t_c : 고장지속시간[s]

T_m : 최대허용온도[°C], T_a : 주위온도[°C]

전선재료를 연동선으로 사용하고 최대허용온도를 250[°C], 주위온도를 30[°C]로 할 때 제안식을 사용하여 고장전류 크기별, 고장지속 시간별 접지선 굵기를 계산한 결과는 표 7과 같다.

표 7. 제안식에 의한 접지선 굵기 계산
Table 7. Ground wire size calculation by proposal model

고장지속 시간[s]	고장전류 크기[kA]				
	10	20	30	40	50
0.1	18.18	36.36	54.54	72.27	90.90
0.5	40.65	81.30	121.95	162.60	203.25
1.0	57.49	114.98	172.47	229.96	287.44
2.0	81.30	162.60	243.90	325.20	406.50

2.3. 기존 수식과 제안식과의 비교

2.3.1 온도변화에 따른 비교

고장지속시간 0.1[s], 주위온도 30[°C], 고장전류크기가 50[kA]이고 최대허용온도가 120[°C]에서 900[°C]까지 변할 때 각 규격을 비교한 것은 표 8과 그림 4와 같다.

표 8. 온도변화에 따른 비교 (50 kA)
Table 8. The comparison by temperature change (50 kA)

최대허용 온도[°C]	$I: 50 [kA], t_c: 0.1 [s], T_a: 30 [°C]$			
	ANSI/IEEE	IEC	JIS	제안식
900	260.62	259.29	214.42	260.46
850	264.75	263.40	220.86	265.01
800	269.29	267.91	227.92	269.98
700	279.92	278.50	244.34	281.47
600	293.37	291.89	264.91	295.72
500	311.16	309.59	291.73	314.17
450	322.48	320.86	308.61	325.72
400	336.16	334.48	328.80	339.52
300	374.89	373.03	384.90	377.90
250	404.15	402.16	426.40	406.53
200	446.28	444.10	485.07	447.62
150	514.03	511.54	577.35	514.47
120	580.94	578.15	666.67	582.70

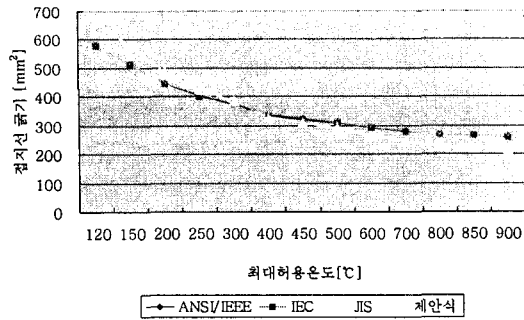


그림 4. 온도변화에 따른 비교 그래프
Fig. 4. The comparison graph of temperature change

2.3.2 고장지속시간변화에 따른 비교

고장전류크기가 50[kA], 최대허용온도 250[°C], 주위 온도 30[°C]이고 고장지속시간이 0.1[s]에서 2.0[s]까지 변할 때 각 규격을 비교한 것은 표 9와 그림 5와 같다.

표 9. 고장지속시간변화에 따른 비교
Table 9. The comparison by fault duration time change

고장지속 시간[s]	I: 50 [kA], T _m : 250 [°C], T _a : 30 [°C]			
	ANSI/IEEE	IEC	JIS	제안식
0.1	90.37	89.84	95.35	90.90
0.5	202.07	200.88	213.20	203.25
1.0	285.77	284.09	301.51	287.44
2.0	404.15	401.77	426.40	406.51

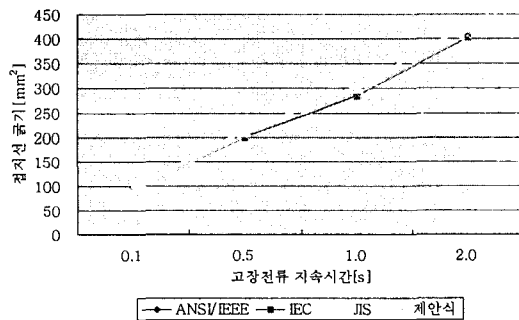


그림 5. 고장지속시간변화에 따른 비교 그래프
Fig. 5. The comparison graph of fault duration time change

2.3.3 고장전류크기변화에 따른 비교

고장지속시간 2[s], 최대허용온도 250[°C], 주위온도 30[°C]이고 고장전류크기가 10[kA]에서 50[kA]까지 변할 때 각 규격을 비교한 것은 표 10과 그림 6과 같다.

표 10. 고장전류크기변화에 따른 비교
Table 10. The comparison of fault current size change

고장전류 크기[kA]	t _c : 2 [s], T _m : 250 [°C], T _a : 30 [°C]			
	ANSI/IEEE	IEC	JIS	제안식
10	80.83	80.35	85.28	81.30
20	161.66	160.71	170.56	162.60
30	242.49	241.06	255.84	243.90
40	323.32	321.41	341.12	325.21
50	404.15	401.77	426.40	406.51

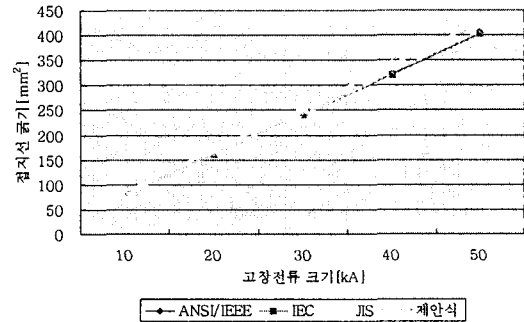


그림 6. 고장전류크기변화에 따른 비교 그래프
Fig. 6. The comparison graph of fault current size change

2.4. 사례연구

제안된 수식은 ○○대회 선수촌을 대상으로 수행 되었다. 표 11는 사례연구 시스템의 접지설계 기본 자료이다.

표 11. 접지설계 기본자료
Table 11. Foundational data of ground design

구분	내용
접지 분류	공통접지
접지 면적	11[m] × 11[m]
대지 저항률	119[Ω·m] / 170[Ω·m] / 1.4깊이
요구접지저항	5[Ω]
고장전류크기	1680.79[A]
고장지속시간	1[s]
접지선 굵기	60[mm ²]

○○선수촌 건물의 전기실을 공통접지로 하고 11[m] × 11[m] 접지면적에서 요구접지저항 5[Ω]이하를 만족시키기 위한 Simulation 조건은 표 11과 같이 수평 다층 지역의 주전극만을 고려하였다. 제안된 접지선 굵기 산정식을 적용하여 Simulation 한 결과 접지전위분포 (GPR)는 4809.3[V]이고 접촉전압은 2500[V], 보폭전압은 600[V]이며 접지 전위분포, 접촉전압 전위분포, 보폭

전압 전위분포를 simulation한 결과는 그림 7, 8, 9와 같고 전위분포가 고르게 분포됨을 확인할 수 있다.

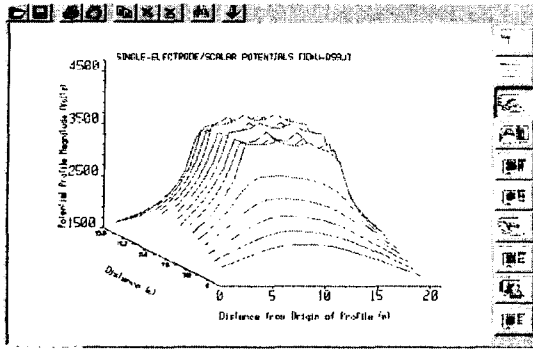


그림 7. 접지 전위분포
Fig. 7. Ground electric potential distribution

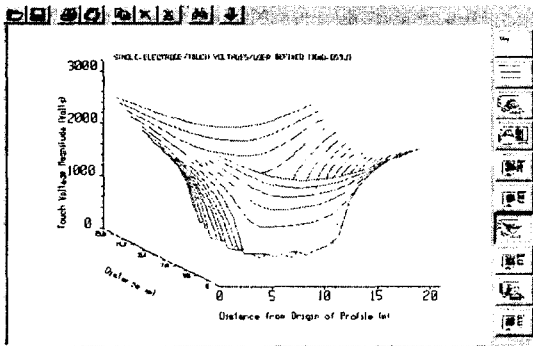


그림 8. 접촉전압 전위분포
Fig. 8. Touch voltage electric potential distribution

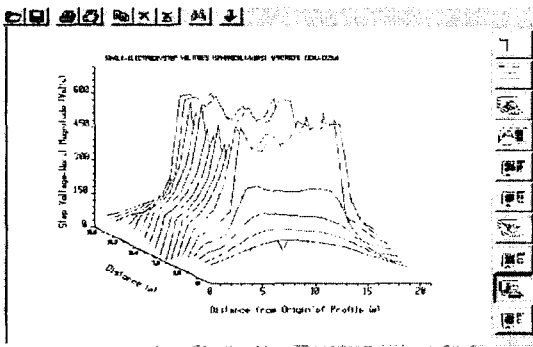


그림 9. 보폭전압 전위분포
Fig. 9. Step voltage electric potential distribution

3. 결론

접지선은 건축물에 시공 설치되어 있는 OA기기 및 각종 첩단장비에 Noise 및 뇌격으로 인한 오동작 및 설

비기기의 파손을 사전에 억제할 수 있는 중요한 설비이다. 그러나 현재 국·내외의 적용하고 있는 접지선 굵기 선정 방식은 복잡하고 적용 방법이 상이하여 현장에서 엔지니어들이 적용하는데 많은 어려움이 있으므로 본 논문에서는 새로운 접지선 굵기 선정식을 모델링 하고 모델링한 수식을 외국규격과 비교 검토하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 최대허용온도를 120[°C]에서 900[°C]까지 변화 시킬 경우 제안식이 ANSI/IEEE, IEC수식과 근접함을 알 수 있다. (고장전류크기, 고장지속시간, 주위 온도 일정)
2. 고장지속시간을 0.1[s]에서 2.0[s]까지 변화 시킬 경우 제안식이 ANSI/IEEE, IEC수식과 근접함을 알 수 있다.

고장지속 시간[s]	$I: 50 [kA], T_m: 250 [^{\circ}C], T_a: 30 [^{\circ}C]$		
	ANSI/IEEE	IEC	제안식
1.0	285.77	284.09	287.44

3. 고장전류크기를 10[kA]에서 50[kA]까지 변화 시킬 경우 제안식이 ANSI/IEEE, IEC수식과 근접함을 알 수 있다.

고장전류 크기[kA]	$t_c: 2 [s], T_m: 250 [^{\circ}C], T_a: 30 [^{\circ}C]$		
	ANSI/IEEE	IEC	제안식
30	242.49	241.06	243.90

4. 외국에서 사용하는 접지선 굵기의 선정식과 본 연구에서 제안한 선정식을 비교하고 사례연구에서 Simulation한 결과 요구 접지저항값을 만족 시키며 접지전위, 접촉전압, 보폭전압이 고르게 분포되므로 본 연구에서 제안한 선정식의 타당성을 입증하였다.

향후 국제화 추세에 부응하고 WTO등으로 기술력이 개방되는 시점에 국내에서 제안한 접지선 굵기 선정식을 적용하여 국내 기술력 발전에 도움이 되길 바란다.

참고 문헌

- (1) 高橋建彦 외, "接地設計入門", 東逸出版社, 1993.
- (2) 최세하, "알기쉬운 접지설비기술", 진한도서, 1999
- (3) 이계성, "통신접지시설" 진한도서, 1998
- (4) ANSI, "IEEE std. 80 - IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", IEEE PRESS, 1986
- (5) Warren R. Jone. "Bentonite Rods Assure Ground Rod Installation In Problem Soils", IEEE Transactions on power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No.4 July/Aug 1980
- (6) ANSI, "IEEE Std. 81-Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System", 1983
- (7) 이종선, "현장의 접지기술과 접지 시스템", 성안당, 1998
- (8) 최홍규 외, "전력사용시설물 설비 및 설계", 성안당, 2000