

접지도체 간격에 관한 연구

최홍규 · 최병숙 · 송영주*
홍익대학교

The study on the spaced grounding conductor

Hong-Kyoo Choi · Byoung-Sook Choi · Young-Joo Song*
Hong-ik University

Abstract - 등간격 접지Grid의 설계에서는 대부분의 전류가 외곽접지도체로 누설되어 Grid 구석 접촉전압이 중심 접촉전압 보다 높아지는 문제점이 있다. 비등간격 접지Grid의 설계는 이러한 문제점을 극복할 수 있으나 적절한 비등간격 접지Grid의 설계방법이나 간격결정 방법은 논의되고 있지 않다. 따라서, 본 논문에서는 비등간격 접지Grid의 장점, 수식, 최적의 간격비율을 제시한다.

1. 서 론

접지도체의 접지Grid 간격 설계는 접지시스템에서 중요한 역할을 한다. 일반적으로, 접지시스템의 접지도체 간격은 ANSI/IEEE Standard 80-1986의 표준 순서를 사용하여 등간격으로 설계되고 격자로 매설된 평행도체로 구성되어 있다.[1][2] 접지도체 간격 설계의 목적은 안전 허용값 이내로 보폭전압과 전압접촉을 유지하고 접지저항을 낮게 유지하는 것이다.[1]-[10]

지금까지의 접지도체 간격 설계는 접지도체의 개수, 접지도체의 길이, 접지도체의 직경, 접지도체의 간격, 접지봉과 접지도체의 구성 등과 같은 여러 요소를 고려한 등간격 접지Grid의 최적 설계를 통한 접촉전압과 보폭전압, 접지저항에 미치는 영향에 대해서 설명하고 있다.[12][13] 그리고 안전하고 경제적인 등간격 접지Grid의 최적 설계를 얻기위해 전문가 시스템이나 유전자 알고리즘을 적용하기도 한다.[18]-[20]

그러나 등간격 접지Grid의 설계는 설계를 아무리 잘한다고 할지라도 오음의 법칙과 도체의 표피효과 때문에 대부분의 전류가 외곽접지도체로부터 누설되고, Grid 구석에서의 접촉전압이 중심의 접촉전압 보다 높아지는 문제점이 있다. 또한, 접지도체의 위험전압 산정시 Grid 구석에서의 접촉전압을 기준으로 하여 산정함으로써 접지Grid의 재료비가 많아져 경제적인 불이익을 가져온다.[14]-[17] 비등간격 접지Grid의 설계는 이러한 등간격 접지Grid 설계의 문제점과 불이익을 극복할 수 있으나 접지도체의 간격을 결정하는 방법과 적절한 비등간격 접지Grid의 설계는 논의되고 있지 않다.

따라서 본 논문에서는 먼저 비등간격 접지Grid 설계의 장점을 설명한 다음 일정비율에 따른 비등간격 접지Grid 수식과 컴퓨터 모의실험을 통한 비등간격 접지Grid 수식 유도, 비교·평가하고 최적의 수식과 최적의 비등간격 비율을 제시하여 국제화 추세에 부응하고 건설현장에서 엔지니어들이 쉽게 적용할 수 있는 새로운 접지도체 간격 산출방식을 연구하는데 목적이 있다.

2. 본 론

2.1 비등간격 접지Grid의 장점

접지도체를 통하여 대지로 빠져나가는 전류의 통로는 접지도체가 넓게 배열되어 있거나 접지Grid의 구석일수록 저항이 작아서 넓고, 좁게 배열된 부분일수록 저항이

커서 좁다. 따라서 통로가 넓은 쪽으로 전류를 흘러보내면 전압이 낮아지게 되고 이로 인한 접지저항과 GPR 값도 낮출 수 있다.

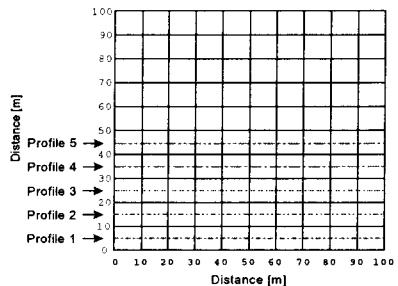
그러므로 접지도체를 넓게 배열하는 것 보다 좁게 배열하는 것이 효과적이며, 도체간격을 등간격으로 좁게 배열하는 것 보다 도체간격을 비등간격으로 구석을 좁게 하고 중앙을 넓게 배열하는 것이 더욱더 효과적이다.

본 절에서는 비등간격 접지Grid의 장점을 설명하기 위하여 CDEGS의 MALT를 이용하여 컴퓨터 모의실험을 수행 하였다. 접촉전압은 접지면적 100x100[m²]에, 1[kA]의 접지전류가 500[Ωm] 토양에 포설되어 있는 제원의 접지망으로 유입되는 경우를 계산하였고 접지망의 제원을 나타내면 표 1과 같다.

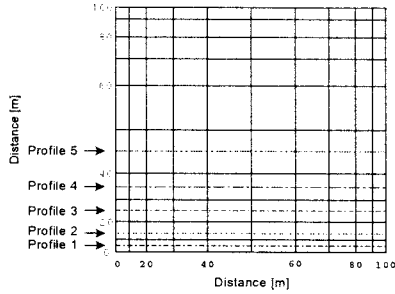
[표 1] 접지망의 제원
[Table 1] The specification of grounding grid

접지망의 제원	내용
접지 전류 (I_G)	1[kA]
대지 저항률 (ρ)	500[Ωm]
도체 굵기 (A)	100[mm ²]
도체 직경 (d)	0.00564[m]
매설 깊이 (h)	1.0[m]
도체 간격 (D)	10[m]
한변의 도체개수 (n)	11[개]

그림 1과 2는 한변의 매설 도체개수와 접지면적이 같은 2개의 접지Grid 설계를 나타낸 것이다. 등간격의 경우 접지도체 간격을 10[m]로 하여 모의실험 하였고, 비등간격의 경우 등간격에서 구한 한변의 도체개수 11개를 본 논문에서 제안한 다항함수 수식을 적용하여 구한 최적 접지Grid 간격을 사용하여 모의실험 하였다.



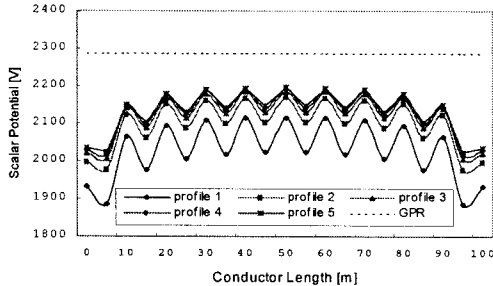
[그림 1] 등간격 접지Grid(100x100 [m²], n=11[개])
[Fig. 1] The equally spaced grounding grid



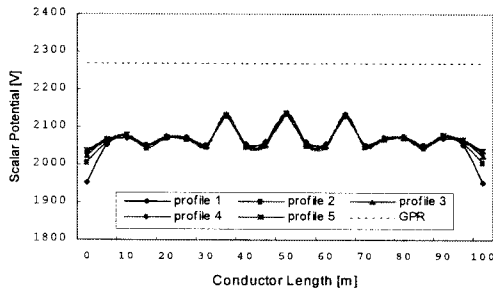
[그림 2] 비등간격 접지Grid(100x100 [㎡], n=11[개])
[Fig. 2] The unequally spaced grounding grid

2.1.1 비등간격 접지Grid의 전위

Mesh 전위를 Grid Mesh 중심점위의 지표면 전위라고 한다면 중심 Mesh 전위는 Grid의 중심 Mesh에서의 Mesh 전위이고 외곽 Mesh 전위는 Grid의 외곽 Mesh에서의 Mesh 전위이다. 그림 3은 등간격 접지Grid의 지표면 전위분포를 나타낸 것으로 외곽 Mesh전위(1886.67[V])가 중심 Mesh전위(2147.06[V])보다 2.13[%]낮은 것을 보여준다. 그러나 비등간격 접지Grid profile 1,2,3,4,5 지점에서의 Mesh전위 분포는 크게 다르지 않다. 그림 4는 비등간격 접지Grid의 지표면 전위분포를 나타낸 것으로 최대 Mesh전위(2067.36[V])와 최소 Mesh전위(2045.76[V])의 차이가 1.04[%]로 2[%]이하인 것을 보여준다.



[그림 3] 등간격 접지Grid의 전위
[Fig. 3] The potential of equally spaced grounding grid

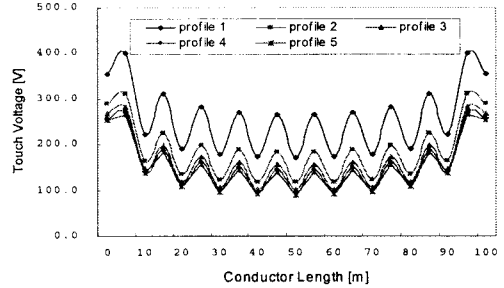


[그림 4] 비등간격 접지Grid의 전위
[Fig. 4] The potential of unequally spaced grounding grid

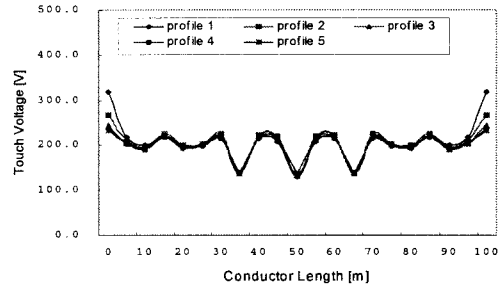
2.1.2 비등간격 접지Grid의 전압

Mesh 전압은 Grid 지표면전위상승(GPR)과 Mesh 전위의 차이로 비등간격 접지Grid의 Mesh 전압은 등간격 접지Grid의 Mesh 전압보다 낮아 인간과 장비에 대한 안전성 레벨을 향상시킨다. 그림 5는 등간격 접지Grid의 Mesh 전압을 나타낸 것으로 외곽 Mesh전압(400.7[V])이

중심 Mesh전위(140.3[V])보다 185.65[%] 높은 것을 보여준다. 그러나 비등간격 접지Grid profile 1,2,3,4,5 지점에서의 Mesh전압 분포는 크게 다르지 않다. 그림 6은 비등간격 접지Grid의 Mesh 전압을 나타낸 것으로 최대 Mesh전압(224.8[V])이 최소 Mesh전압(203.2[V])보다 9.61[%] 높은 것을 보여준다.



[그림 5] 등간격 접지Grid의 전압
[Fig. 5] The touch voltage of equally spaced grounding grid



[그림 6] 비등간격 접지Grid의 전압
[Fig. 6] The touch voltage of unequally spaced grounding grid

2.1.3 비등간격 접지Grid의 GPR과 접지저항

비등간격 접지Grid의 지표면 전위상승(GPR)과 접지저항(R)은 등간격 접지Grid의 지표면 전위상승과 접지저항보다 낮아 인간과 장비에 대한 안전성 레벨을 향상시킨다. 표 2는 등간격 접지Grid의 지표면 전위상승, 접지저항과 비등간격 접지Grid의 지표면 전위상승, 접지저항과의 차이를 나타낸 것으로 비등간격 접지Grid의 지표면 전위상승이 등간격 접지Grid의 지표면 전위상승보다 0.74[%] 낮으며, 접지저항도 0.749[%] 낮다.

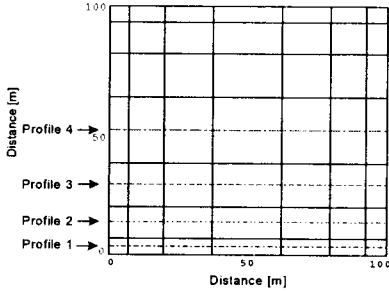
[표 2] 접지Grid 간격에 따른 지표면 전위상승과 접지저항의 비교
[Table 2] The comparison of GPR with ground resistor

접지Grid 간격	GPR	접지저항
등간격	2287.33 [V]	2.287 [Ω]
비등간격	2270.53 [V]	2.270 [Ω]

2.1.4 비등간격 접지Grid의 재료비

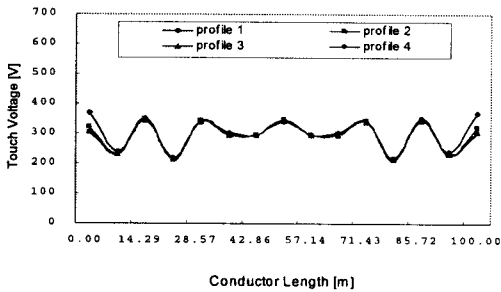
그림 1과 같이 10[m] 등간격 접지Grid인 경우 최대접촉전압인 외곽 Mesh전압은 400.7[V]이고 접지망을 구성하기 위해 사용된 접지도체의 전체길이는 2200[m]이다. 그러나 비등간격 접지Grid를 사용할 경우 등간격 접지Grid의 최대접촉전압인 400.7[V]에 근접하거나 낮게 최대접촉전압을 유지하면서 접지Grid의 재료비를 줄일 수 있으며 이것을 나타낸 것이 그림 7이다. 그림 7에서 제시한 비등간격 접지Grid를 구성하기 위해 필요한 접지도

체의 전체길이는 1400[m]이다. 이것은 등간격 접지Grid의 접지도체 전체길이인 2200[m]와 비교할 때 접지Grid 재료비가 약 36.36% 절약된 것이며 접지 설치비용도 줄일 수 있다. 그림 8은 비등간격 접지Grid의 최대접촉 전압이 352.8[V]인 것을 나타낸 것이다.



[그림 7] 비등간격 접지Grid의 형태

[Fig. 7] The shape of unequally spaced grounding grid



[그림 8] 비등간격 접지Grid의 최대접촉전압

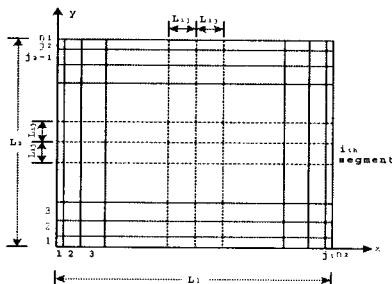
[Fig. 8] The maximum touch voltage of unequally grounding grid

2.2 비등간격 접지Grid 수식

앞 절에서 비등간격 접지Grid는 지표면 전위상승을 감소시킬 뿐만 아니라 경제적이며 안정적인 설계가 된다는 것을 증명하였다. 그러나 비등간격 접지Grid의 도체간격을 결정하거나 적절한 비등간격 Grid의 설계에 대한 논의가 되지 않았으므로 이절에서는 비등간격 Grid의 도체간격을 결정하기 위한 일련의 수식을 유도하고 제시한다.

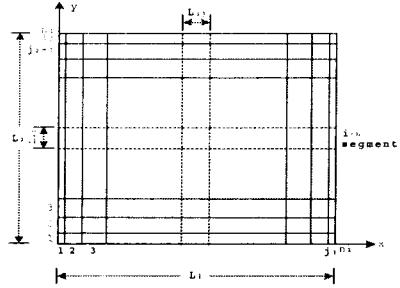
2.2.1 비등간격 접지Grid의 수식 전체조건

비등간격 접지Grid의 수식유도를 위한 비등간격 접지Grid의 형태는 접지도체 개수가 홀수(구획이 짝수)인 그림 9와 짝수(구획이 홀수)인 10으로 나타낼 수 있다.



[그림 9] 접지도체가 홀수인 비등간격 접지Grid의 형태

[Fig. 9] Unequally spaced grounding grid with odd grounding conductors



[그림 10] 접지도체가 짝수인 비등간격 접지Grid의 형태
[Fig. 10] Unequally spaced grounding grid with even grounding conductors

비등간격 접지Grid 형태에 대한 제원을 나타내면 표 3과 같다. 비등간격 접지Grid의 도체간격은 접지도체 구획 개수인 j_1 나 j_2 , 구획순서 i , 그리고 X축과 Y축 방향에 대한 한번의 접지도체 길이 L_1 나 L_2 와 관계가 있다는 것을 그림 9, 10과 표 3을 통해서 알 수 있다.

[표 3] 비등간격 접지Grid 형태에 대한 제원

[Table 3] The specification about unequally spaced grounding

기호	정의
L_1	X축 한번의 접지도체 길이 [m]
L_2	Y축 한번의 접지도체 길이 [m]
n_1	X축과 평행인 접지도체의 개수 [개]
n_2	Y축과 평행인 접지도체의 개수 [개]
j_1	X축 방향의 접지도체 구획 수 ($n_2 - 1$)
j_2	Y축 방향의 접지도체 구획 수 ($n_1 - 1$)
i	구획의 순서
L_{ij}	i 번째 구획의 접지도체 길이 [m]

2.2.2 일정비율의 배수에 따른 비등간격의 수식유도

일정비율의 배수에 따른 비등간격 접지Grid의 수식은 접지면적을 일정비율로 구획하기 위해 필요한 비등간격 접지Grid의 최소비율을 구한다음 최소비율에다 각 구획값을 곱하여 최적비율을 구한다. 접지Grid의 최소비율을 구하기 위한 방법은 접지도체 개수 n 이 홀수(구획 j 는 짝수)인 경우와 접지도체 개수 n 이 짝수(구획 j 는 홀수)인 경우로 나누어서 생각할 수 있다.

1) 접지도체 개수 n 이 홀수(구획 j 는 짝수)인 경우
접지도체 개수 n 이 홀수(구획 j 는 짝수)인 경우를 나타낸 것이 그림 9이다. 여기에서, 비등간격 접지Grid의 형태는 접지망 가운데를 중심으로 Y축 대칭이므로 접지Grid의 최소 비율은 접지Grid 형태의 절반만 계산하여 구한다. 이것을 나타낸 것이 수식 (1)이다.

$$\begin{aligned} \frac{L}{2} &= a_1 + a_2 + \dots + a_{\frac{j}{2}} \\ &= a_1 (1 + 2 + \dots + \frac{j}{2}) \\ &= a_1 \sum_{i=1}^{\frac{j}{2}} i \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,

L : 한번의 접지도체 길이 ($L = L_1 = L_2$)

수식 (1)을 접지Grid 간격 최소 비율인 a_1 에 대해서 다시 정리하면 수식 (2)와 같다.

$$a_1 = \frac{L}{2 \sum_{i=1}^j i} \quad (2)$$

수식 (2)를 적용하여 각 구획의 접지Grid 간격 비율을 나타내면 수식 (3)과 같다.

$$D_{ij} = a_1 \times i \times 100 [\%] \quad (3)$$

2) 접지도체 개수 n 이 짝수(구획 j 는 홀수)인 경우

접지도체 개수 n 이 짝수(구획 j 는 홀수)인 경우를 나타낸 것이 그림 10이다. 여기에서, 비등간격 접지Grid의 형태는 접지망 중앙이 가장 넓은 비율을 가지며 구석으로 갈수록 좁은 비율을 가진다. 접지도체 개수가 짝수인 경우의 접지Grid 최소 비율을 구하기 위한 접지Grid 간격을 나타내면 수식 (4)와 같다.

$$L = b_1 + b_2 + \dots + b_{\frac{j+1}{2}} + \dots + b_{j-1} + b_j \quad (4)$$

그림 10에서 비등간격 접지Grid의 형태는 $b_{\frac{j+1}{2}}$ 을 중심으로 대칭이므로 수식 (4)는 수식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} L &= 2b_1 + 2b_2 + \dots + 2b_{\frac{j+1}{2}-1} + b_{\frac{j+1}{2}} \\ &= 2b_1 + 4b_1 + \dots + 2\left(\frac{j+1}{2} - 1\right)b_1 + \frac{j+1}{2}b_1 \quad (5) \\ &= b_1 \left(\sum_{i=1}^{\frac{j+1}{2}-1} 2i + \frac{j+1}{2} \right) \end{aligned}$$

여기서,

$$L : \text{한변의 접지도체 길이} (L = L_1 = L_2)$$

수식 (5)를 접지Grid 간격 최소 비율인 b_1 에 대해서 다시 정리하면 수식 (6)과 같다.

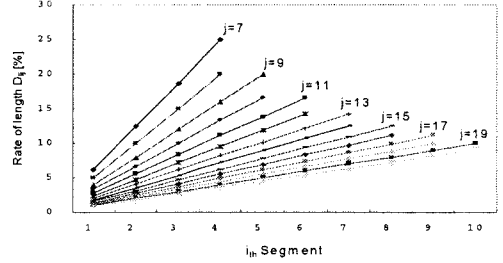
$$b_1 = \frac{L}{\sum_{i=1}^{\frac{j+1}{2}-1} 2i + \frac{j+1}{2}} \quad (6)$$

수식 (6)을 적용하여 각 구획의 접지Grid 간격 비율을 나타내면 수식 (7)과 같다.

$$D_{ij} = b_1 \times i \times 100 [\%] \quad (7)$$

3) 일정비율의 배수에 따른 비등간격 접지Grid의 수식

접지Grid 구획 개수(j)를 7개에서 20개까지 변화시켰을 때 수식 (3)과 수식 (7)을 적용한 구획의 순서와 각 구획의 접지Grid 간격 비율인 $i - D_{ij}$ 의 상관관계는 그림 11과 같다.



[그림 11] 일정비율의 배수에 따른 비등간격의 $i - D_{ij}$ 상관관계
[Fig. 11] The $i - D_{ij}$ of unequally spaced grid by multiple at a set rate

일정비율의 배수에 따른 비등간격 접지Grid의 수식은 $i - D_{ij}$ 의 상관관계인 그림 11을 Curve fitting하여 수식화 한 것으로 이것을 표현하면 일차함수 형태인 수식 (8)과 같고 접지Grid 구획 개수(j)에 따른 계수 a 는 표 4와 같다.

$$D_{ij} = ai \quad (9)$$

[표 4] 일정비율의 배수에 따른 비등간격 $j - a$ 상관관계

[Table 4] The $j - a$ of unequally spaced grid by multiple at a set rate

j	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
a	6.25	5.00	4.00	3.33	2.78	2.38	2.04	1.79	1.56	1.39	1.23	1.11	1.00	0.91

2.2.3 컴퓨터 모의실험에 따른 비등간격의 수식유도

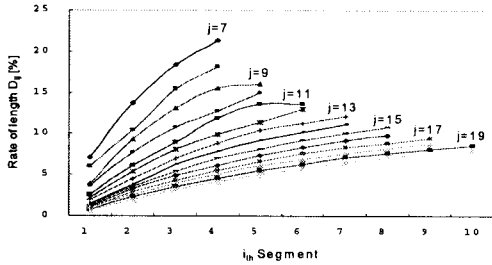
컴퓨터 모의실험에 따른 비등간격 접지Grid의 수식을 유도하기 위하여 CDEGS의 MALT를 이용하여 컴퓨터 모의실험을 수행하였다. 접촉전압은 접지면적 $100 \times 100 [m^2]$ 에, $1[kA]$ 의 접지전류가 $500[\Omega m]$ 토양에 포설되어 있는 제원의 접지망으로 유입되는 경우를 계산하였고 접지망의 제원을 나타내면 표 5와 같다.

[표 5] 컴퓨터 모의실험을 위한 접지망의 제원

[Table 5] The specification of grounding grid for computer simulation

접지망의 제원	내용
접지 전류 (I_G)	1[kA]
대지 저항률 (ρ)	500[Ωm]
도체 굵기 (A)	100[mm^2]
도체 직경 (d)	0.00564[m]
매설 깊이 (h)	1.0[m]
접지Grid 구획 개수 (j)	7~20[개]
한변의 도체개수 (n)	8~21[개]

또한, MALT를 이용하여 여러 가지의 비등간격 접지Grid의 구성을 얻을 수 있었고 Grid 위의 최대 Mesh전위와 최소 Mesh전위차가 2[%] 이내가 되도록 각 구획의 접지Grid 간격 비율(D_{ij})을 구하였다. 접지Grid 구획 개수(j)를 7개에서 20개까지 구획할 때 구획의 순서와 각 구획의 접지Grid 간격 비율인 $i - D_{ij}$ 의 상관관계는 그림 12와 같다.



[그림 12] 컴퓨터 모의실험에 따른 비등간격의 $i-D_{ij}$ 상관관계
 [Fig. 12] The $i-D_{ij}$ of unequally spaced grid by computer simulation

컴퓨터 모의실험에 따른 비등간격 접지Grid의 수식은 $i-D_{ij}$ 의 상관관계인 그림 12를 Curve fitting하여 수식화 한 것으로 이것을 표현하면 루트함수 형태인 수식 (10)과 다항함수 형태인 수식 (11)과 같다. 그리고 접지 Grid 구획 개수(j)에 따른 루트함수 수식의 계수 a, b , 상관관계는 표 6과 같으며 다항함수 수식의 계수 a, b, c , 상관관계는 표 7과 같다.

$$D_{ij} = aln(i) + b \quad (10)$$

$$D_{ij} = ai^2 + bi + c \quad (11)$$

[표 6] 컴퓨터 모의실험에 따른 j -계수 상관관계(루트함수)
 [Table 6] The j -factor function by computer simulation(root function)

j	a	b	상관계수
7	10.2960	6.9894	0.9984
8	8.9049	5.4247	0.9795
9	7.9532	3.9948	0.9899
10	6.8841	3.4051	0.9965
11	6.6129	2.2154	0.9815
12	6.0134	1.7394	0.9898
13	5.4389	1.3847	0.9898
14	5.1405	0.8824	0.9865
15	4.6884	0.7076	0.9894
16	4.2651	0.5964	0.9861
17	3.9781	0.4218	0.9871
18	3.6762	0.3264	0.9803
19	3.5332	0.0913	0.9799
20	3.3055	0.0072	0.9729

[표 7] 컴퓨터 모의실험에 따른 j -계수 상관관계(다항함수)
 [Table 7] The j -factor function by computer simulation(polynomial function)

j	a	b	c	상관계수
7	-0.9150	9.3030	-1.2250	1.0000
8	-0.4453	6.3880	-0.1308	0.9957
9	-0.8000	7.8700	-3.2000	0.9998
10	-0.3514	4.8626	-0.7220	0.9973
11	-0.3929	5.0374	-2.2060	0.9949
12	-0.2280	3.7094	-1.1910	0.9984
13	-0.2049	3.3351	-1.2343	0.9997
14	-0.1763	3.0007	-1.3886	0.9991
15	-0.1305	2.5017	-1.0079	0.9989
16	-0.1061	2.1689	-0.8054	0.9989
17	-0.0915	1.9453	-0.7485	0.9987
18	-0.0730	1.6903	-0.5855	0.9993
19	-0.0628	1.5403	-0.6245	0.9993
20	-0.0509	1.3606	-0.5245	0.9996

표 6과 7의 컴퓨터 모의실험에 따른 비등간격 접지 Grid의 접지Grid 구획 개수(j)와 계수의 상관관계를 살펴보면 다음과 같다. 루트함수는 접지Grid 구획 개수가 7에서 20으로 점점 증가할 때 계수 a, b 가 점점 줄어드는 일정한 형식을 가지지만 접지Grid 구획 개수가 7일 때 상관계수가 제일 좋은 0.9984로 표준오차가 0.0016[%]이고, 접지Grid 구획 개수가 20일 때 상관계수가 제일 나쁜 0.9729로 표준오차가 0.0271[%]이다. 다항함수는 접지 Grid 구획 개수가 7에서 20으로 점점 증가할 때 계수 a, b, c 가 일정한 형식을 가지지는 않지만 접지Grid 구획 개수가 7일 때 상관계수가 제일 좋은 1.0로 표준오차가 0.0[%]이고, 접지Grid 구획 개수가 11일 때 상관계수가 제일 나쁜 0.9949로 표준오차가 0.0051[%]로 루트함수에 비해 상당히 정확하다. 그러므로, 본 논문에서는 일정한 형식을 가지지는 않지만 표준오차가 적은 다항함수 수식 (11)과 접지Grid 구획 개수에 따른 다항함수 수식의 계수 표 7을 권고한다.

2.3 접지도체 접지Grid 간격 비교

접지도체의 접지Grid 간격을 비교하기 위하여 등간격 접지Grid, 일정비율의 배수에 따른 비등간격 접지Grid와 컴퓨터 모의실험에 따른 비등간격 접지Grid의 Mesh전위, Mesh전압을 비교하였다. 결과에서 일정비율의 배수에 따른 비등간격 접지Grid는 일차함수 형태인 수식 (9)와 일차함수 수식의 계수인 표 4를 사용하여 얻은 각 구획의 접지Grid 간격 비율을 적용하여 구한 것이고 컴퓨터 모의실험에 따른 비등간격 접지Grid는 다항함수 형태인 식 (11)과 다항함수 수식의 계수인 표 7을 사용하여 얻은 각 구획의 접지Grid 간격 비율을 적용하여 구한 것이다.

2.3.1 접지도체 접지Grid 간격 비교(Mesh전위)

접지Grid 구획 개수(j)를 7개에서 20개까지 구획할 때 등간격 접지Grid와 일차함수 형태인 일정비율의 배수에 따른 비등간격 접지Grid, 다항함수 형태인 컴퓨터 모의 실험에 따른 비등간격 접지Grid의 최대 Mesh전위, 최소 Mesh전위, 전위차를 비교하면 표 8과 같다.

[표 8] 접지도체 접지Grid 간격 비교(Mesh전위)
 [Table 8] The comparison of grounding conductor's intervals(Mesh potential)

구획 개수 (j)	등간격 접지Grid			비등간격 접지 Grid					
	최대	최소	차pm	일정비율의 배수		컴퓨터 모의실험		최대	최소
7	2131.1	1865.4	12.51	2031.8	1958.4	3.61	2014.8	2002.4	0.61
8	2140.9	1875.2	12.41	2075.6	2001.4	3.58	2038.9	2023.4	0.76
9	2143.1	1884.4	12.07	2073.0	1991.8	3.92	2061.3	2028.7	1.58
10	2147.1	1886.7	12.13	2069.2	2016.4	2.58	2067.4	2045.8	1.04
11	2147.8	1895.5	11.75	2071.2	2011.7	2.87	2068.6	2043.7	1.21
12	2151.9	1900.5	11.69	2077.9	2033.5	2.14	2181.9	2047.2	1.67
13	2149.5	1905.8	11.34	2081.9	2025.3	2.71	2071.7	2044.4	1.32
14	2151.4	1910.4	11.20	2086.3	2044.3	2.01	2079.1	2044.8	1.65
15	2149.2	1914.2	10.93	2085.9	2037.1	2.34	2069.9	2043.3	1.29
16	2150.0	1919.0	10.74	2090.9	2046.3	2.13	2081.0	2046.5	1.66
17	2147.5	1922.8	10.46	2092.7	2045.8	2.24	2078.3	2044.4	1.63
18	2148.4	1926.1	10.34	2092.5	2052.5	1.91	2084.8	2043.2	1.99
19	2159.2	2027.0	6.12	2093.5	2050.9	2.03	2086.1	2048.3	1.81
20	2144.8	1930.6	9.97	2095.2	2050.4	2.14	2087.5	2046.0	1.99

표 8의 차pm은 최대 Mesh전위와 최소 Mesh전위차를

구하기 위해 수식 (12)에 의하여 계산된 값이다.

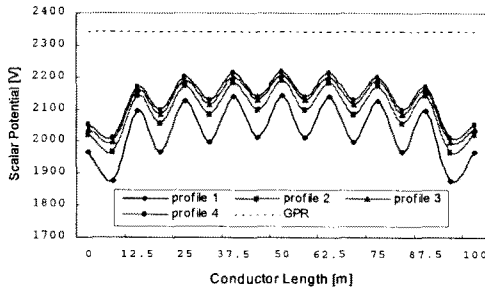
$$\text{차}_{vm} = \frac{\text{최대 Mesh전위} - \text{최소 Mesh전위}}{\text{최대 Mesh전위}} \times 100[\%] \quad (12)$$

표 5-8의 등간격 접지Grid와 비등간격 접지Grid의 Mesh전위차를 비교한 결과는 다음과 같다. 등간격 접지Grid는 접지Grid 구획 개수가 7개에서 20개로 점점 증가할 때 접지Grid 구획 개수가 19개인 경우를 제외하고 차_{vm}이 점점 작아지는 일정한 형식을 가진다. 또한, 접지Grid 구획 개수가 7개일 때 Mesh전위차가 가장 큰 12.51[%]이고 19개일 때 가장 적은 6.12[%]이며, 19개, 20개를 제외한 7-18개의 경우 Mesh전위차가 10[%] 이상 되는 것을 알 수 있다.

일정비율의 배수에 따른 비등간격 접지Grid는 접지Grid 구획 개수가 7개에서 20개로 점점 증가할 때 일정한 형식을 가지지는 않지만 접지Grid 구획 개수가 18개일 때 Mesh전위차가 가장 적은 1.91[%]이고, 접지Grid 구획 개수가 9개일 때 Mesh전위차가 가장 큰 3.92[%]로 등간격 접지Grid에 비해 Mesh전위차가 많이 감소한 것을 알 수 있다.

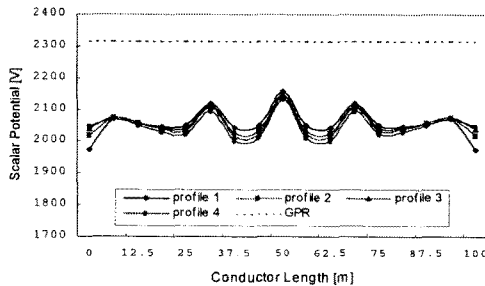
컴퓨터 모의실험에 따른 비등간격 접지Grid는 접지Grid 구획 개수가 7개에서 20개로 점점 증가할 때 일정한 형식을 가지지는 않지만 접지Grid 구획 개수가 7개일 때 Mesh전위차가 가장 적은 0.61[%]이고, 접지Grid 구획 개수가 18개, 20개일 때 Mesh전위차가 가장 큰 1.99[%]이다. 또한, 접지Grid 구획 개수 19개를 제외한 모든 구획에서 Mesh전위차가 등간격 접지Grid와 일정비율의 배수에 따른 비등간격 접지Grid에 비해 적으며 Mesh전위차가 2[%]이내 인 것을 알 수 있다.

그림 13-15는 접지Grid 구획개수가 8일때 등간격 접지Grid, 일정비율의 배수에 따른 비등간격 접지Grid, 컴퓨터 모의실험에 따른 접지Grid의 Mesh전위를 나타낸 것이다.



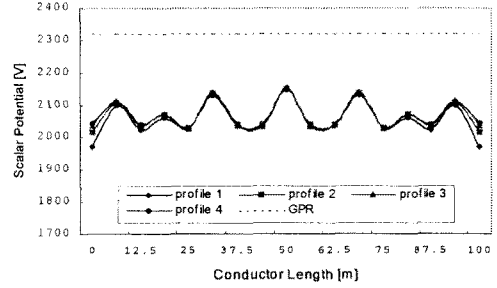
[그림 13] 등간격 접지Grid의 Mesh 전위($j=8$)

[Fig. 13] The mesh potential of equally spaced ground grid($j=8$)



[그림 14] 일정비율의 배수에 따른 비등간격 Mesh 전위($j=8$)

[Fig. 14] The mesh potential by multiple at a set rate($j=8$)



[그림 15] 컴퓨터 모의실험에 따른 비등간격 Mesh 전위($j=8$)
[Fig. 15] The mesh potential by computer simulation($j=8$)

2.3.2 접지도체 접지Grid 간격 비교(Mesh전압)

접지Grid 구획 개수(j)를 7개에서 20개까지 구획할 때 등간격 접지Grid와 일차함수 형태인 일정비율의 배수에 따른 비등간격 접지Grid, 다항함수 형태인 컴퓨터 모의 실험에 따른 비등간격 접지Grid의 최대 Mesh전압, 최소 Mesh전압, 전압차를 비교하면 표 9와 같다.

[표 9] 접지도체 접지Grid 간격 비교(Mesh전압)

[Table 9] The comparison of grounding conductor's intervals(Mesh voltage)

구획 개수 (j)	등간격 접지Grid				비등간격 접지 Grid					
	최대	최소	차 _{vm}	차 _{vc}	일정비율의 배수			컴퓨터 모의실험		
					최대	최소	차 _{vm}	최대	최소	차 _{vm}
7	514.4	247.7	51.85	107.7	395.7	322.4	18.53	352.8	340.5	3.50
8	469.7	204.0	56.57	130.3	316.1	241.9	23.48	298.0	282.4	5.22
9	433.8	175.0	59.66	147.8	298.6	217.4	27.19	264.2	231.6	12.33
10	400.7	140.3	64.99	185.7	248.7	195.8	21.24	224.8	203.2	9.61
11	383.5	131.2	65.79	192.3	239.9	180.4	24.81	206.7	181.8	12.06
12	363.7	112.2	69.15	224.1	203.9	159.5	21.78	190.0	155.2	18.31
13	346.0	102.3	70.43	236.5	197.6	141.1	28.60	180.7	153.4	15.10
14	330.3	89.3	72.96	258.4	168.6	126.6	24.88	166.1	131.8	20.62
15	316.1	81.2	74.31	280.5	168.0	119.1	29.07	161.0	134.3	16.54
16	311.3	80.3	74.2	287.6	148.5	103.9	30.33	147.8	113.3	23.34
17	293.3	68.7	76.58	327.3	144.5	97.6	32.45	144.8	110.9	23.43
18	290.0	67.8	76.62	327.8	129.0	89.1	30.93	139.6	98.1	29.77
19	176.9	44.7	74.7	295.8	126.9	84.3	33.58	128.7	91.0	29.32
20	266.0	51.8	80.5	409.3	121.9	77.1	36.74	126.2	84.7	31.98

표 9의 차_{vm}는 최대 Mesh전압과 최소 Mesh전압차를 구하기 위해 수식 (13)에 의하여 계산된 값이고 차_{vc}는 중앙 Mesh전압과 구석 Mesh전압과의 차를 구하기 위해 수식 (14)에 의해서 계산된 값이다.

$$\text{차}_{vm} = \frac{\text{최대 Mesh전압} - \text{최소 Mesh전압}}{\text{최대 Mesh전압}} \times 100[\%] \quad (13)$$

$$\text{차}_{vc} = \frac{\text{구석 Mesh전압} - \text{중앙 Mesh전압}}{\text{구석 Mesh전압}} \times 100[\%] \quad (14)$$

표 9의 등간격 접지Grid와 비등간격 접지Grid의 Mesh 전압차를 비교한 결과는 다음과 같다. 등간격 접지Grid는 접지Grid 구획 개수가 7개에서 20개로 점점 증가할 때 접지Grid 구획 개수가 16개와 19개인 경우를 제외하고 차_{vm}이 점점 커지는 일정한 형식을 가진다. 또한, 접지Grid 구획 개수가 7개일 때 Mesh전압차가 가장 적은

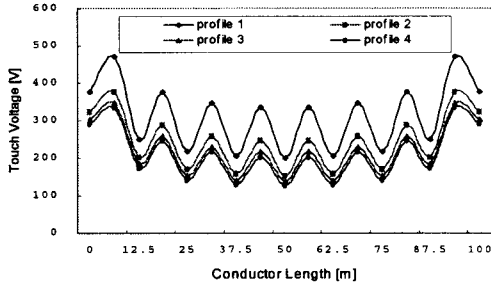
51.85[%]이고 20개일 때 가장 큰 80.5[%]이다. 그리고 접지Grid 구획 개수가 7개에서 20개로 점점 증가할 때 최대 Mesh전압은 점점 작아지는 반면 구석 Mesh전압과 중앙 Mesh전압과의 전압차인 차vc는 점점 커지는 것을 알 수 있다. 즉, 접지Grid 구획 개수가 많아지면 최대 Mesh전압은 작아지지만 최대 Mesh전압과 최소 Mesh전압과의 전압차인 차vm과 구석 Mesh전압과 중앙 Mesh전압과의 전압차인 차vc는 커진다.

일정비율의 배수에 따른 비등간격 접지Grid는 접지Grid 구획 개수가 7개에서 20개로 점점 증가할 때 일정한 형식을 가지지는 않지만 접지Grid 구획 개수가 7개일 때 Mesh전압차가 가장 적은 18.53[%]이고, 접지Grid 구획 개수가 20개일 때 Mesh전압차가 가장 큰 36.74[%]로 등간격 접지Grid에 비해 Mesh전압차가 많이 감소한 것을 알 수 있다.

컴퓨터 모의실험에 따른 비등간격 접지Grid는 접지Grid 구획 개수가 7개에서 20개로 점점 증가할 때 일정한 형식을 가지지는 않지만 접지Grid 구획 개수가 7개일 때 Mesh전압차가 가장 적은 3.50[%]이고, 접지Grid 구획 개수가 20개일 때 Mesh전압차가 가장 큰 31.98[%]이다. 또한, 접지Grid의 모든 구획에서 등간격 접지Grid와 일정비율의 배수에 따른 비등간격 접지Grid에 비해 최대 Mesh전압은 물론 최대 Mesh전압과 최소 Mesh전압과의 차인 차vm도 적은 것을 알 수 있다.

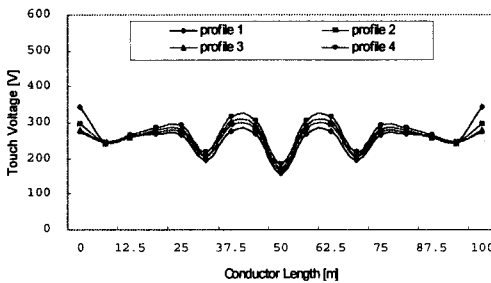
그러므로 접지도체의 매설시 등간격 접지Grid 보다는 컴퓨터 모의실험을 통해서 구한 다항함수 형태의 접지Grid 간격 최적비율을 사용한 비등간격 접지Grid를 적용하는 것이 안전성과 경제성 면에서 우수한 공법이라고 사료된다.

그림 16-18은 접지Grid 구획개수가 8일때 등간격 접지Grid, 일정비율의 배수에 따른 비등간격 접지Grid, 컴퓨터 모의실험에 따른 접지Grid의 Mesh전압을 나타낸 것이다.



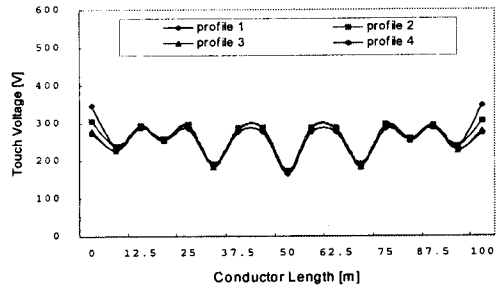
[그림 16] 등간격 접지Grid의 Mesh 전압(j = 8)

[Fig. 16] The mesh voltage of equally spaced ground grid(j = 8)



[그림 17] 일정비율의 배수에 따른 비등간격 Mesh 전위(j = 8)

[Fig. 17] The mesh voltage by multiple at a set rate(j = 8)



[그림 18] 컴퓨터 모의실험에 따른 비등간격 Mesh 전압(j = 8)
[Fig. 18] The mesh voltage by computer simulation(j = 8)

3. 결 론

본 논문에서는 안전하고 경제적이며 효율적인 최적의 접지시스템을 구축하기 위해 등간격 접지Grid와 비등간격 접지Grid의 전위, 전압, 접지저항, GPR, 재료비등을 비교·검토하여 비등간격 접지Grid의 우수성을 설명하였고 컴퓨터 모의실험을 통한 최적의 접지Grid 간격 비율을 제시 하였다. 이것을 정리하면 다음과 같다.

1. 비등간격 접지Grid의 우수성을 검증

접지면적 100x100[m²]에, 1[kA]의 접지전류가 500[μm] 도양에 포설되어 있는 제원의 접지망으로 유입되는 경우에 대해서 표1의 접지망 제원을 적용하여 비등간격 접지Grid의 우수성을 검증하였다. 등간격 접지Grid와 비등간격 접지Grid의 전위, 전압, GPR, 접지저항, 재료비를 비교·검토한 결과는 표 10과 같다.

[표 10] 접지Grid의 비교

[Table 10] The comparison of grounding grid

비교 대상		등간격	비등간격	비고
전위	최대[V]	2147.06	2067.36	외곽전위가 중심전위보다 12.13[%] 낮음
	최소[V]	1886.67	2045.76	
	오차[%]	12.13	1.04	
전압	최대[V]	400.7	224.8	외곽전압이 중심전압보다 185.65[%] 높음
	최소[V]	140.3	203.2	
	오차[%]	185.65	9.61	
지표면전위상승[V]		2287.33	2270.53	0.74[%] 낮음
접지저항[Ω]		2.287	2.270	0.749[%] 낮음
재료비(L)[m]		2200	1400	36.35[%] 절약

2. 비등간격 접지Grid의 수식유도

접지Grid 구획 개수(j)를 7개에서 20개까지 구획할 때 일정비율의 배수에 따른 비등간격 접지Grid와 컴퓨터 모의실험에 따른 비등간격 접지Grid의 수식을 유도한 결과는 표 11과 같다.

[표 11] 비등간격 접지Grid의 수식

[Table 11] The formula of unequally spaced ground grid

비등간격	일정비율배수	컴퓨터 모의실험	
	일차함수	루트함수	다항함수
수식	$D_j = ai$	$D_{ij} = aln(i) + b$	$D_{ij} = ai^2 + bi + c$

3. 다항함수 형태의 최적의 접지Grid 간격비율 제시
 컴퓨터 모의실험에 따른 다항함수 형태의 비등간격 접지Grid는 접지Grid 구획 개수가 7일 때 상관계수가 제일 좋은 1.0으로 표준오차가 0.0[%]이고, 접지Grid 구획 개수가 11일 때 상관계수가 제일 나쁜 0.9949로 표준오차가 0.0051[%]이므로 상당히 정확하여 본 논문에서는 최적의 접지Grid 간격 비율로 다항함수 형태의 비등간격 접지Grid 수식인 수식 (11)과 계수값인 표 7을 제시하였다.

[참 고 문 헌]

- [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] ANSI/IEEE Std. 81-1983, "IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System", Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 1983.
- [4] ANSI/IEEE Std. 142-1991, "IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems", Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 1991.
- [5] ANSI/IEEE Std. 367-1996, "IEEE Recommended Practice for Determining the Electric Power Station Ground Potential Rise and Induced Voltage From a Power Fault", Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 1996.
- [6] 高橋建彦외, "接地設計入門", 東逸出版社, 1993.
- [7] 최홍규외, "전력사용시설물 설비 및 설계", 성안당, 2001.
- [8] 최홍규외, "접지설비 및 설계", 성안당, 2004.
- [9] 이복희외, "접지의 핵심 기초 기술", 의제, 1999.
- [10] 高橋建彦, "그림해설 접지시스템입문", 성안당, 2003.
- [11] 최병숙, "Pattern Search법을 이용한 전력설비의 최적화 접지설계", 홍익대, 2001.
- [12] 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.
- [13] B. Thapar, "Simplified Equations for Mesh and Step Voltages in an AC Substation", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 2, 1991
- [14] L. Huang, "Study of Unequally Spaced Grounding Grids", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 2, 1995.
- [15] L. Huang, "Study of Calculation and Modeling of Unequal Spacing Ground Grid Potential Distribution", Master's Thesis, Chongqing University, 1988.
- [16] W. Sun, "Optimal Design Analysis of Grounding Grids for Substations Built in Nonuniform Soil", IEEE, 2000
- [17] N.Krisnachinda "New Techniques the Computer-Aided Design for Substation Grounding", IEEE, 2000.
- [18] M. C. Costa, "Optimization of Grounding Grids by Response Surfaces and Genetic Algorithms", IEEE Transactions on magnetics, Vol. 39, No. 3, 2003.
- [19] A. F. Otero, "Genetic Algorithm Based Method for Grounding Grid Design", IEEE, 1998
- [20] J. Yuan, "Simulation of Substation Grounding Grids with Unequal-Potential", IEEE Transactions on magnetics, Vol. 36, NO. 4, 2000.
- [21] "Current Distribution, Electromagnetic Interference, Grounding And Soil Structure Analysis", SES, 1997