

접지도체의 간격배치에 따른 개선된 접지설비 모델

(An Improved Method for Mesh Grounding System Using Unequally Spaced Arrangement)

최홍규 · 송영주*

(Hong-Kyoo Choi · Young-Joo Song*)

Abstract

No matter how well the equally spaced grounding grid is designed, there are questions keep rising, such as leakage of current from corner conductor, high voltage of touch voltage in corners of grid than in center, and high material cost for grounding grid. The best-fitted design for unequally spaced grounding grid is a part that must be considered. Explain advantages of unequally spaced grounding grid and lead formula by dividing the number of grid division, j , into 20, instead of 7. Then, present D_{ij} , which is optimum rate for unequally spaced grounding grid and verify safety and economy of the unequally spaced grounding grid by computer simulation with a poly-nominal function form.

1. 서 론

접지도체의 접지Grid 간격 설계는 접지시스템에서 중요한 역할을 한다. 현재까지의 접지Grid 간격 설계는 접지도체의 개수, 접지도체의 길이, 접지도체의 직경, 접지봉과 접지도체의 구성 등과 같은 여러 요소를 고려한 등간격 접지Grid의 최적 설계를 통한 접촉전압과 보폭 전압, 접지저항에 미치는 영향에 대해서 설명하고 있다.[12][13] 그리고 안전하고 경제적인 등간격 접지Grid의 최적 설계를 얻기 위해 전문가 시스템이나 유전자 알고리즘을 적용하기도 한다.[18]~[20]

그러나 등간격 접지Grid의 설계는 설계를 아무리 잘 한다고 할지라도 오음의 법칙과 도체의 표면효과 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 높아져 경제적인 불이익을 가져온다.[14]~[17] 비등간격 접지Grid의 설계는 이러한 등간격 접지Grid 설계의 문제점과 불이익을 극복할 수 있으나 접지도체의 간격을 결정하는 방법이나 적절한 비등간격 접지Grid의 설계에 대해서는 논의되지 않고 있다.

따라서 본 논문에서는 일정비율에 따른 비등간격 접지Grid 수식과 컴퓨터 모의실험을 통한 비등간격 접지Grid 수식을 유도, 비교·평가하고 최적의 수식과 최적의 비등간격 비율을 제시하여 국제화 추세에 부응하고 건설현장에서 엔지니어들이 쉽게 적용할 수 있는 새로

운 접지도체 간격 산출방식을 연구하는데 목적이 있다.

2. 본 론

2.1. 비등간격 접지Grid 수식

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 흘려 보내면 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 Grid의 도체간격을 결정하기 위한 일련의 수식을 유도하고 제시한다.

2.1.1 비등간격 접지Grid의 수식 전제 조건

비등간격 접지Grid의 수식유도를 위한 비등간격 접지Grid의 형태는 접지도체 개수가 홀수(구획이 짝수)인 그림 1과 짝수(구획이 홀수)인 그림 2로 나타낼 수 있고 비등간격 접지Grid 형태에 대한 제원을 나타내면 표 1과 같다. 비등간격 접지Grid의 도체간격은 접지도체 구획 개수인 j_1 나 j_2 , 구획순서 i , 그리고 X축과 Y축 방향에 대한 한변의 접지도체 길이 L_1 나 L_2 와 관계가 있다

는 것을 그림 1, 2와 표 1을 통해서 알 수 있다.

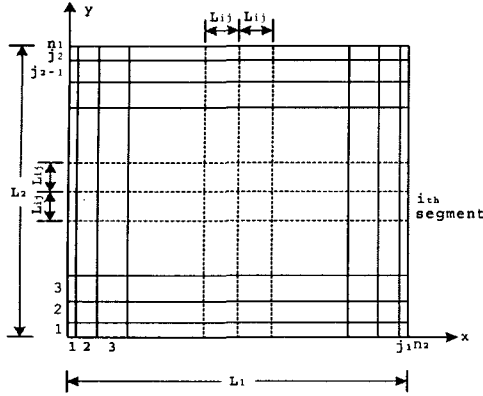


그림 1. 비등간격 접지Grid의 형태(홀수)
Fig. 1. Unequally spaced grounding grid(odd)

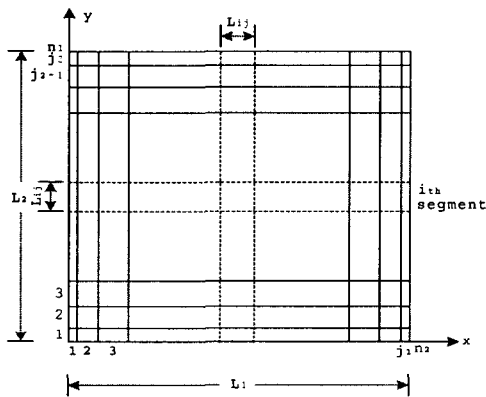


그림 2. 비등간격 접지Grid의 형태(짝수)
Fig. 2. Unequally spaced grounding grid(even)

표 1. 비등간격 접지Grid 형태에 대한 제원
Table 1. The specification about unequally spaced grounding

기 호	정 의
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]

2.1.2 일정비율의 배수에 따른 비등간격 수식

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 1이다. 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.

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

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 2이다. 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 2에서 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 접지Grid 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 3과 같다.

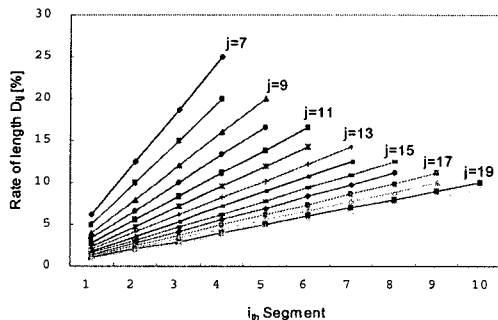


그림 3. 일정비율의 배수에 따른 비등간격 $i - D_{ij}$ 상관관계
Fig. 3. The $i - D_{ij}$ of unequally spaced grid by multiple at a set rate

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 2와 같다.

$$D_{ij} = ai \quad (8)$$

표 2. 일정비율의 배수에 따른 비등간격 $j - a$ 상관관계
Table 2. 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

2.1.3 컴퓨터 모의실험에 따른 비등간격 수식

컴퓨터 모의실험에 따른 비등간격 접지Grid의 수식을 유도하기 위하여 CDEGS의 MALT를 이용하여 컴퓨터 모의실험을 수행하였다. 접촉전압은 접지면적 100x100 [m²]에, 1[kA]의 접지전류가 500[Ωm] 토양에 포설되어 있는 제원의 접지망으로 유입되는 경우를 계산하였고 접지망의 제원을 나타내면 표 3과 같다.

표 3. 컴퓨터 모의실험을 위한 접지망의 제원
Table 3. 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]
한 변의 도체개수 (n)	8~21[개]

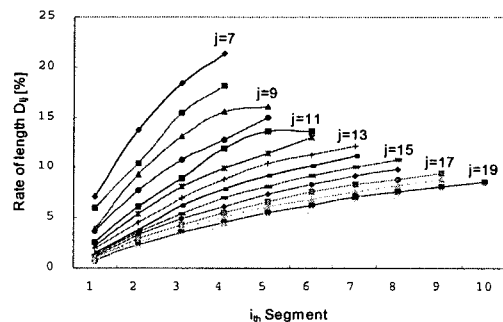


그림 4. 컴퓨터 모의실험에 따른 비등간격의 $i - D_{ij}$ 상관관계
Fig. 4. The $i - D_{ij}$ of unequally spaced grid by computer simulation

또한, MALT를 이용하여 여러 가지의 비등간격 접지 Grid의 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 4와 같다.

컴퓨터 모의실험에 따른 비등간격 접지Grid의 수식은 $i - D_{ij}$ 의 상관관계인 그림 4를 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 4와 같으며 다항함수 수식의 계수 a, b, c , 상관관계는 표 5와 같다.

$$D_{ij} = a \ln(i) + b \quad (9)$$

$$D_{ij} = ai^2 + bi + c \quad (10)$$

표 4. 컴퓨터 모의실험에 따른 j -계수 상관관계(루트함수)
Table 4. 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 5. 컴퓨터 모의실험에 따른 j -계수 상관관계(다항함수)
Table 5. 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 4와 5의 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 접지Grid 구획 개수가 7에서 20으로 점점 증가할 때 계수 a, b, c 가 일정한 형식을 가지지는 않지만 접지 Grid 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[%]로 루트함수에 비해 상당히 정확하다. 그러므로, 본 논문에서는 일정한 형식을 가지지는 않지만 표준오차가 적은 다항함수 수식 (10)과 접지Grid 구획 개수에 따른 다항함수 수식의 계수 표 5를 권고한다.

2.2 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 (8)과 일차함수 수식의 계수인 표 2를 사용하여 얻은 각 구획의 접지Grid 간격 비율을 적용하여 구한 것이고 컴퓨터 모의실험에 따른 비등간격 접지Grid는 다항함수 형태인 식 (10)과 다항함수 수식의 계수인 표 5를 사용하여 얻은 각 구획의 접지Grid 간격 비율을 적용하여 구한 것이다.

2.2.1 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 모의실험에 따른 비등간격 접지Grid의 최대 Mesh전위, 최소 Mesh전위, 전위차를 비교하면 표 6과 같다. 표 6의 차pm은 최대 Mesh전위와 최소 Mesh전위차를 구하기 위해 수식 (11)에 의하여 계산된 값이다.

$$\text{차}_{pm} = \frac{\text{최대Mesh전위} - \text{최소Mesh전위}}{\text{최대Mesh전위}} \times 100[\%] \quad (11)$$

표 6의 등간격 접지Grid와 비등간격 접지Grid의 Mesh전위차를 비교한 결과는 다음과 같다. 등간격 접지Grid는 접지Grid 구획 개수가 7개에서 20개로 점점 증가할 때 접지Grid 구획 개수가 19개인 경우를 제외하

고 차 μm 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.

표 6. 접지도체 접지Grid 간격 비교(Mesh전위)
Table 6. The comparison of grounding conductor's intervals(Mesh potential)

구획 개수 (j)	등간격 접지Grid			비등간격 접지 Grid					
	최대	최소	차 μm	일정비율의 배수			컴퓨터 모의실험		
				최대	최소	차 μm	최대	최소	차 μm
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

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 5~7은 접지Grid 구획개수가 10일 때 등간격 접지Grid, 일정비율의 배수에 따른 비등간격 접지Grid, 컴퓨터 모의실험에 따른 접지Grid의 Mesh전위를 나타낸 것이다.

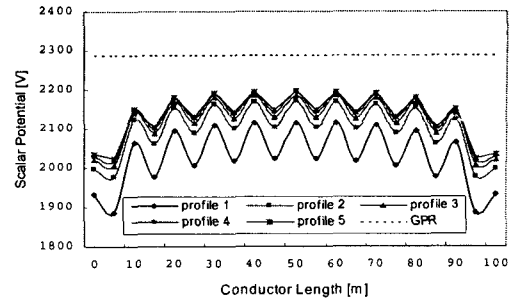


그림 5. 등간격 접지Grid의 Mesh 전위(j = 10)
Fig. 5. The mesh potential of equally spaced ground grid(j = 10)

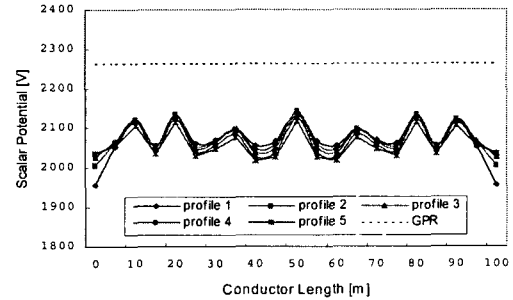


그림 6. 일정비율의 배수에 따른 비등간격 Mesh 전위(j = 10)
Fig. 6. The mesh potential by multiple at a set rate(j = 10)

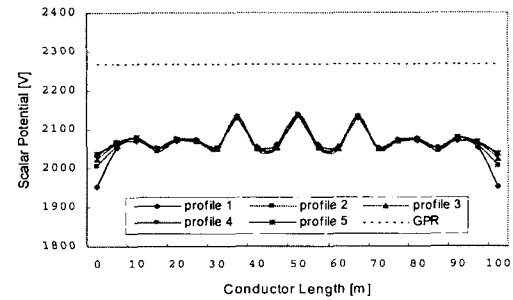


그림 7. 컴퓨터 모의실험에 따른 비등간격 Mesh 전위(j = 10)
Fig. 7. The mesh potential by computer simulation(j = 10)

2.2.2 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 모의실험에 따른 비등간격 접지Grid의 최대 Mesh전압, 최소 Mesh전압, 전압차를 비교하면 표 7과 같다. 표 7의 차 μm 은 최대 Mesh전압과 최소 Mesh전압차를 구하기 위해 수식 (12)에 의하여 계산된 값이고 차 νc 는 중앙 Mesh전압과 구석 Mesh전압과의 차를 구하기 위해 수식 (13)에 의해서 계산된 값이다.

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

$$\text{차}_{vc} = \frac{\text{구석 Mesh 전압} - \text{중앙 Mesh 전압}}{\text{구석 Mesh 전압}} \times 100[\%] \quad (13)$$

표 7. 접지도체 접지Grid 간격 비교(Mesh 전압)
Table 7. The comparison of grounding conductor's intervals(Mesh voltage)

구획 개수 (j)	등간격 접지Grid				비등간격 접지 Grid					
	최대	최소	차vm	차vc	일정비율의 배수			컴퓨터 모의실험		
					최대	최소	차vm	최대	최소	차vm
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 7의 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 차vm이 점점 커지는 일정한 형식을 가진다. 또한, 접지Grid 구획 개수가 7개일 때 Mesh 전압차가 가장 적은 51.85[%]이고 20개일 때 가장 큰 80.5[%]이다. 그리고 접지Grid 구획 개수가 7개에서 20개로 점점 증가할 때 최대 Mesh 전압은 점점 작아지는 반면 구석 Mesh 전압과 중앙 Mesh 전압과의 전압차인 차vc는 점점 커지는 것을 알 수 있다. 즉, 접지Grid 구획 개수가 많아지면 최대 Mesh 전압은 작아지지만 최대 Mesh 전압과 최소 Mesh 전압과의 전압차인 차vm과 구석 Mesh 전압과 중앙 Mesh 전압과의 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 Mesh 전압차가 가장 적은 18.53[%]이고, 접지Grid 구획 개수가 20개일 때 Mesh 전압차가 가장 큰 36.74[%]로 등간격 접지Grid에 비해 Mesh 전압차가 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 Mesh 전압차가 가장 적은 3.50[%]이고, 접지Grid 구획 개수가 20개일 때 Mesh 전압차가 가장 큰 31.98[%]이다. 또한, 접지Grid의 모든 구획에서 등간격 접지Grid와 일정비율의 배수에 따른 비등간격 접지Grid에 비해 최대 Mesh 전압은 물론 최대 Mesh 전압과 최소 Mesh 전압과의 차인 차vm도 적은 것을 알 수 있다.

그러므로 접지도체의 매설시 등간격 접지Grid 보다는 다항함수 형태의 접지Grid 간격 최적비율을 사용한 비등간격 접지Grid를 적용하는 것이 안전성과 경제성 면에서 우수한 공법이라 사료된다.

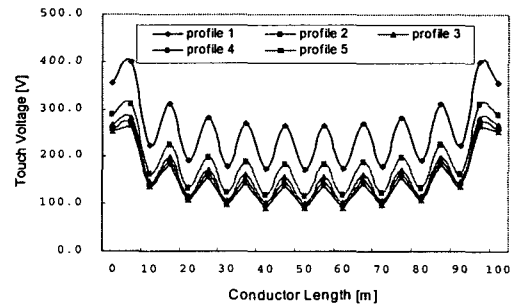


그림 8. 등간격 접지Grid의 Mesh 전압 (j = 10)
Fig. 8. The mesh voltage of equally spaced ground grid (j = 10)

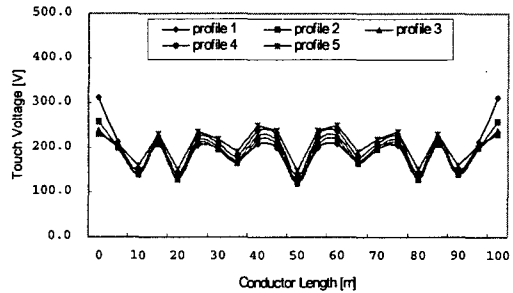


그림 9. 일정비율의 배수에 따른 비등간격 Mesh 전압 (j = 10)
Fig. 9. The mesh voltage by multiple at a set rate (j = 10)

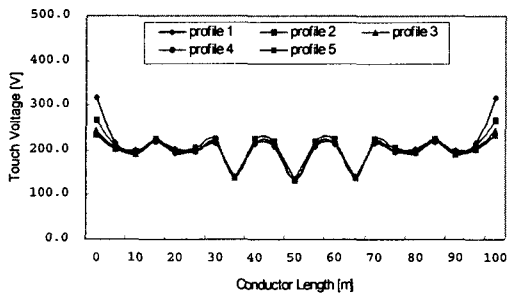


그림 10. 컴퓨터 모의실험에 따른 비등간격 Mesh 전압 (j = 10)
Fig. 10. The mesh voltage by computer simulation (j = 10)

그림 8~10은 접지Grid 구획개수가 10일 때 등간격 접지Grid, 일정비율의 배수에 따른 비등간격 접지Grid, 컴퓨터 모의실험에 따른 접지Grid의 Mesh전압을 나타낸 것이다.

3. 결론

본 논문에서는 안전하고 경제적이며 효율적인 최적의 접지시스템을 구축하기 위해 일차함수, 루트함수, 다항함수 형태의 비등간격 접지Grid의 수식을 유도하여 등간격 접지Grid와 비교 평가하였고 컴퓨터 모의실험을 통한 최적의 접지Grid 간격 비율을 제시 하였다. 이것을 정리하면 다음과 같다.

1. 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 8과 같다.

표 8. 비등간격 접지Grid의 수식
Table 8. The formula of unequally spaced ground grid

비등 간격	일정비율배수	컴퓨터 모의실험	
	일차함수	루트함수	다항함수
수식	$D_{ij} = ai$	$D_{ij} = a \ln(i) + b$	$D_{ij} = ai^2 + bi + c$

2. 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 표준 오차가 0.0051[%]이므로 상당히 정확하고 최대 Mesh 전위와 최소 Mesh전위차가 2[%] 이내가 되도록 유도 하였으므로 본 논문에서는 최적의 접지Grid 간격 비율로 다항함수 형태의 비등간격 접지Grid 수식인 수식 (10)과 계수값인 표 5를 제시한다.

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