

Characteristic Analysis of Large Grounding system by Using Reduced Scale Model Method

張錫勳* · 李在福** · 明聖鎬*** · 趙延奎§ · 金点植§§

(Sug-Hun Chang · Jae-Bok Lee · Sung-Ho Myung · Yuen-Gue Cho · Jeom-Sik Kim)

Abstract - The scale model grounding systems to study the behavior of grounding system in uniform soils have been designed and fabricated. Constructional details and instrumentation have been discussed. To verify the accuracy of the results obtained from the experimental tests, they have been compared with computer calculation results. Also, in order to assess the effectiveness of bonding two grounding systems, grounding grid conductors which were downsized as a scale factor of 100:1 were analyzed by using the scale model method. A profile of GPR(Grounding Potential Rise) of each case was measured. The scale model grounding system presented in this paper can be valuable tool to analyze the ground potential profile and ground resistance of practical grounding system.

Key Words : Scale model grounding system, Grounding grid, GPR(Grounding Potential Rise), Ground resistance

1. 서 론

산업플랜트설비의 대규모화, 복잡화에 따라 안전적인 측면과 경제적인 측면을 겸비한 접지시스템의 설계에 대한 관심이 높아지고 있다. 토양의 저항률이 높거나 저저항의 접지계가 요구되는 대규모 전원 및 신호 접지계에는 여러개의 수평매설지선과 수직봉이 접속되어 있는 망상접지계가 대부분을 차지하고 있다. 그러나, 접지계통의 최적배치 구조 즉, 수평 매설지선이나 수직봉의 매설 깊이, 간격, 접지극 크기 등의 구조적인 변수가 적지 않다. 이와 같이 많은 변수로 인해 실제 규모의 접지계를 구성하여 최적배치 구조를 찾는 것은 현실적으로 매우 힘들다. 실규모 측정의 대안으로서 계산기를 사용한 수치 해석적인 방법이 있으나, 1 이하의 접지저항이 요구되는 망상접지계는 해석상의 계산 오차를 줄이기 위해서는 많은 계산시간이 요구된다.[1]~[3] 이와 같은 해석적인 방법은 접지계를 평가하는데 매우 유용한 방법이지만 해석적인 결과를 정확히 입증하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 실질적이고 경제적인 대안으로써 실규모의 접지계의 대지전위상승 특성분석을 위해 축소모델 접지모의장치를 구성하였다. 축소모델 모의 접지시스템은 실규모 접지망의 도체 크기와 매설깊이를 모의 가능한 임의의 축척으로

줄이고, 접지계에 전류가 흐를 때 생기는 등전위면의 형상이 실규모 접지망과 동일하게 나타나도록 구성하였다[4].

이를 이용하여 망상형 접지모델에 대해 고장전류 유입시 대지 전위상승 분포를 측정, 분석하였으며 서로 독립된 두 개의 망상형 접지모델에 대해 각각 단독접지시와 본당에 의한 공통접지시의 대지전위상승의 영향을 실험적인 방법을 통해 분석하였다. 또한 그 결과를 수치해석에 의한 결과와 비교하였으며 이를 통해 축소모델기법의 타당성을 검증하였다. 본 축소모델 모의접지시스템은 다양한 형태의 실규모 접지계의 특성분석을 위한 유용하게 활용될 수 있다.

2. 본 론

2.1 축소모델을 위한 기본 개념

무한장의 실제 접지계를 한정된 공간으로 축소하기 위한 이상적인 모델은 고장전류에 의해 형성되는 전위값이 동일한 등전위면이 이루는 윤곽선을 가진 형체이다. 균등한 대지면에 매설된 유한 전극에서 등전위면은 관측점이 전극과 멀어질수록 반구면이 된다. 이 등전위면의 도전면을 대체하더라도 전계의 양상은 동일하다. 따라서 본래의 전위를 유지시켜주는 어떤 전원을 이면에 접속하면 면(Tank) 외부의 영역을 제외하더라도 면 내부의 전계는 일정하게 된다.

이와 같은 원리를 수조 탱크에 적용하여, 그림 1과 같이 준 무한대지의 표면에 반경이 r_1 인 반구가 있다고 하면 무한점으로부터 이 반구까지 전압을 인가하면 모든 등전위면은 반구가 된다. 반경 r_2 의 반구를 설치하더라도 등전위면은 변하지 않는다. 이들 두 반구간의 저항은

* 正 會 員 : 韓國電氣研究院 研究員
 ** 正 會 員 : 韓國電氣研究院 責任研究員
 *** 正 會 員 : 韓國電氣研究院 責任研究員
 § 正 會 員 : 韓國電氣研究院 先任技術員
 §§ 正 會 員 : 韓國海洋大學校 電氣工學科 博士課程
 接受日字 : 2003年 12月 15日
 最終完了 : 2004年 2月 2日

$$R_{12} = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (1)$$

이 된다. 여기서 ρ 는 매질의 저항률이다.

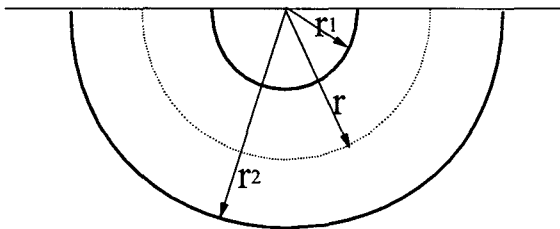


그림 1 준무한 대지에서 반구 접지극의 등전위선
Fig. 1 Equipotential lines around hemisphere electrode in the semi-infinite earth.

여기서 $r_2 \rightarrow \infty$ 이고, r_1 을 r_2 로 바꾸면 무한점에 대한 r_2 의 저항은

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi r_2} \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다. 두 반구간에 V_{12} 의 전압을 인가하면 이때 흐르는 전류는 식 (3)과 같다.

$$I_{12} = \frac{V_{12}}{R_{12}} = \frac{2\pi V_{12}}{\rho} \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1} \quad (3)$$

외부 반구에 대한 임의의 지점 r 의 전위가 측정되면 무한점에 대한 임의의 거리 r 의 전위 V_r 은 탱크의 외벽에 대한 r 점의 전위 즉, 측정전압 V_m 과 무한대에 대한 탱크의 전위 V_{r2} 의 합으로

$$V_r = V_m + V_{r2} = V_m + I_{12} R_2 = V_m + \frac{I_{12} \rho}{2\pi r_2} \quad (4)$$

이 된다. 위 예에서 내부반구는 모의하고자 하는 전극(grid)을 나타내며, 외부의 반구형 수조탱크 r_2 는 그 내부에서 전계 왜형이 발생하지 않도록 설계되어야 한다.

2.2 모의 접지시스템의 설계

접지체의 이상적인 구조로 가장 널리 사용되는 망상 접지극을 축소하는 경우 효과적인 반구의 크기는 보통 접지극의 대각방향 크기의 2배 이상에서 형성된다.[5] 이와 같은 결과를 감안하면 지름이 d 인 반구는 최대 $d/2\sqrt{2}$ 의 폭으로 축소된 접지전극(grid)에 대하여 모의할 수 있다. 이를 확인하기 위해 망상 접지도체와 봉상 접지전극을 병용하고 그림 2와 같은 $24\text{ m} \times 24\text{ m}$ 망상 접지극에 대해 아래와 같은 제원을 입력데이터로 이용하여 선전류원에 대한 임의의 점의 전위 적분 해석식을 행렬화하여 미지수를 구하는 소위 조합형 적분-행렬알고리즘을 적용하여 접지저항과 대지 전위를 계산하였다.[6]

- 대지저항률(ρ) : $200 \Omega \cdot \text{m}$ (uniform soil)
- 접지망 깊이(h) : 0.76 m

- 접지망 면적(A) : $24\text{ m} \times 24\text{ m}$ (576 m^2)
- 망상 접지도체 지름(dg) : 0.01 m
- 봉상 접지전극 지름(dr) : 0.0127 m
- 봉상 접지전극 길이(lr) : 8 m
- 접지고장전류(I_f) : 100 A

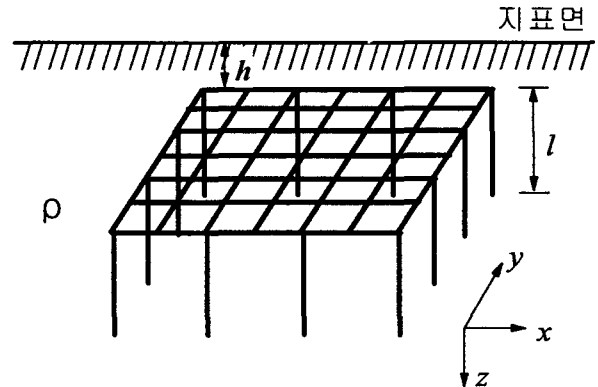


그림 2 조사대상 접지계
Fig. 2 Investigated mesh grounding system

계산 결과 접지저항(R)과 전극 전위상승(GPR)은 각각 $3.0832\ \Omega$ 및 308.32 V 로 산출되었으며, 이 접지전극의 한변의 길이를 1/30로 축소한 $0.8 \times 0.8\text{ m}$ 접지계에 동일한 고장전류를 흘린 경우 접지 저항과 접지 전극의 전위상승은 각각 $92.4947\ \Omega$ 및 $9,249.47\text{ V}$ 로 $24\text{ m} \times 24\text{ m}$ 접지계보다 30 배 반비례한 값이 나타내었다. 그림 3에 1/30 축소모델 접지계의 등전위선을 나타내었다. 접지전극 길이의 1.5배 지점에서부터 등전위선이 원을 이루며 금속제 반구의 수조 탱크 대지모델은 접지계의 축소모델을 실험적으로 모의 할 수 있음을 알 수 있다. 이와 같은 해석결과와 제작상의 편의성을 고려하여 본 연구에서는 2 m 지름의 반구로 축소 접지 시스템을 설계하였다.

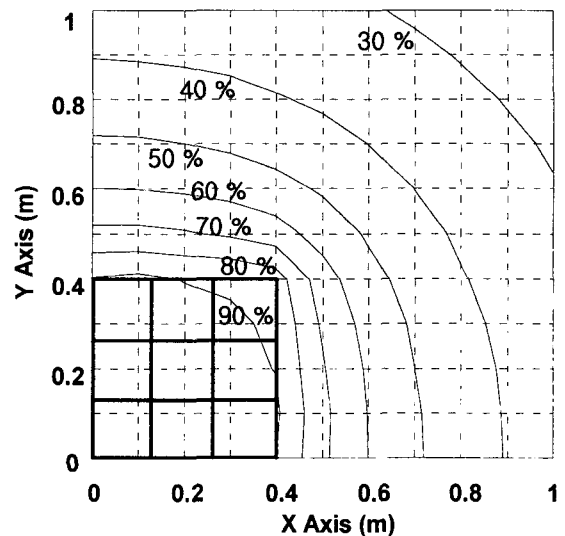


그림 3 축소 모의 접지계 모델의 표면 전위 분포
Fig. 3 Surface potential distribution of the scale model of mesh grounding system

2.3 축소 접지모의 시스템의 구성

균등한 대지면에 매설된 접지계를 모의하기 위해 직경 2 m의 반구형 수조탱크를 이용하여 축소접지모의 시스템을 구성하였다. 접지모의시스템은 지락전류를 일정하게 인가하기 위한 전원장치, 측정점의 이동 및 계측을 위한 제어계측장치, 반구형 수조탱크, 시험접지계로 이루어진다. 그림 4에 접지모의 시스템의 구성도를 나타내었다. 저항률 $39.1 \Omega \cdot m$ 의 지하수로 대지를 모의하였으며 외부저항 R_{ext} 는 무한점에 대한 반구까지의 저항을 의미하는 것으로 반구의 크기와 대지저항률에 의존하며 본 실험에서는 6.22Ω 을 적용하였다. 시험 접지계로는 전원 접지계와 신호 접지계를 100:1의 비율로 축소 모의하였다. 실규모 접지계의 파라미터를 표 1에 나타내었다. 적용된 전원 접지계와 신호 접지계는 각각 $0.32 m \times 0.32 m$, $0.16 m \times 0.16 m$ 의 망상 전극구조(그리드 간격 $0.04m$)로 표면에서 $5mm$ 깊이에 설치하였다. 여기서 접지도체의 반경은 제조상 문제로 10:1 축척을 이용하였다. 표면전위 측정용 프로브는 콘베이어를 통해 자동조정되며 출력전압은 Labview program에 의해 위치(X축)에 대한 전위(Y축)가 자동 계측된다. 그림 5에 구성된 축소 접지모의 시스템을 나타내었다.

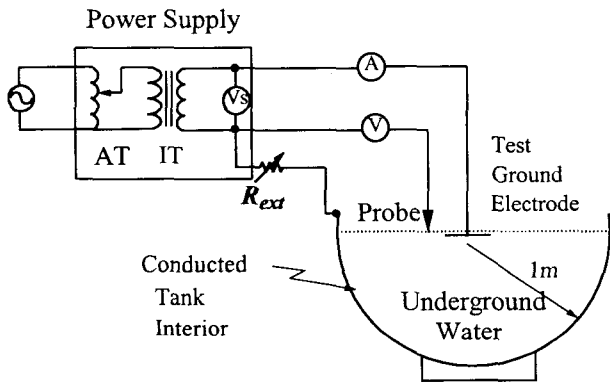


그림 4 접지 모의 시스템의 구성도
Fig. 4 Schematic diagram of scale model grounding system

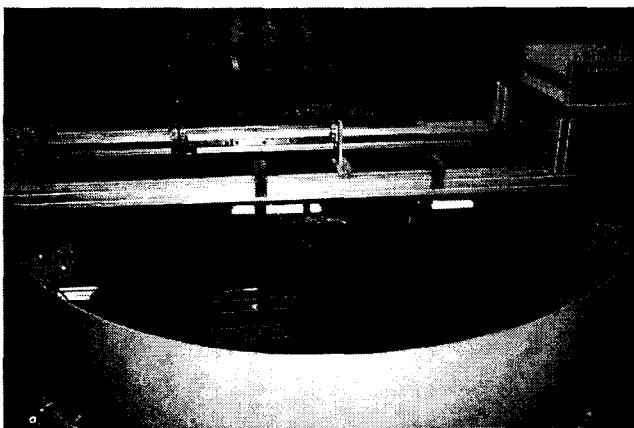


그림 5 축소 접지 모의 시스템
Fig. 5 Scale model grounding system

표 1 접지시스템의 파라미터

Table 1 Parameters of grounding system

접지계	grid size	간격	접지도체 반경	매설깊이
전원접지	32m × 32m	4m	5.25mm	0.5m
통신접지	16m × 16m	4m	5.25mm	0.5m

2.4 실험결과 및 분석

2.4.1 전원 접지계의 전위상승 분포

모의된 접지계를 그림 6에 나타내었으며 접지전극의 중심에 1 A의 전류를 인가시 표면의 전위상승 분포를 횡방향(a-d) 및 대각방향(e)으로 측정하였다.

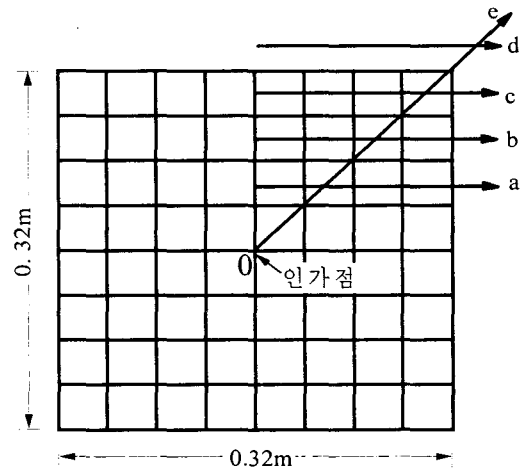


그림 6 모의 전원접지 시스템의 구성
Fig. 6 Configuration of grounding grid of power system

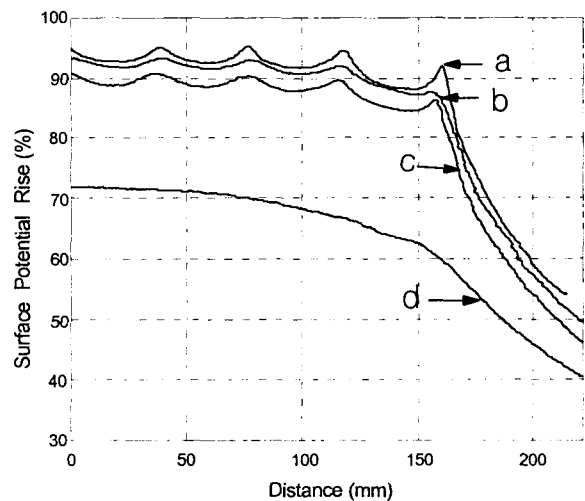


그림 7 전원접지의 표면 전위상승 분포 (횡방향)
Fig. 7 Surface potential rise profiles of grounding grid of power system (normal profile)

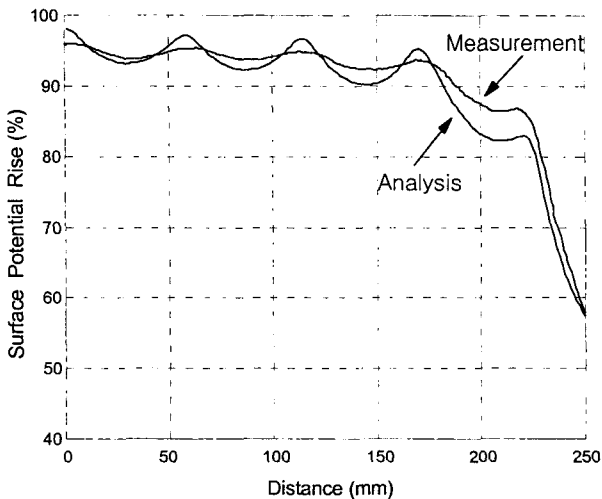


그림 8 전원접지의 표면 전위상승 분포 (대각방향)
 Fig. 8 Surface potential rise profiles of grounding grid of power system (Diagonal profiles)

그림 7은 a~d 방향에 대한 각각의 전위상승분포를 나타낸 것이다. 전류 인가점에서 거리가 증가됨에 따라 전위상승은 서서히 감소하며 망상전극을 벗어난 지점에서 급격히 줄어드는 경향을 보이고 있다. 그림 8에 대각방향의 전위상승분포 측정결과와 수치해석 결과를 비교하였다. 배위 사이의 전압강하가 해석 결과에 비해 다소 완만하게 측정되었으나 이는 시험 접지계와 검침용 프로브의 간격이 설치상의 문제로 약간의 오차를 가지기 때문으로 사료되며 전반적인 양상은 거의 유사하게 나타났다. 통신 접지계의 경우에도 유사한 경향이 관측되어졌으며 단독 접지시 모의한 전원 접지계와 통신접지계의 접지저항을 표 2에 나타내었다. 접지저항은 각각 53.6 Ω, 105.8 Ω으로 해석에 의한 결과와 매우 근접하게 나타났다.

표 2 각 접지계의 접지저항
 Table 2 Ground resistance for each case

구 분	접지저항 [Ω]	
	측정값	해석값
전원접지	53.6	55.2
통신접지	105.8	112.6

2.4.2 독립접지와 공통접지시의 전위상승 분포

독립접지와 공통접지의 전위상승분포를 측정하기 위해 그림 9와 같은 두 개의 독립된 접지시스템을 이용하여 접지계를 구성하였다. 접지계의 구성에 따른 접지저항 측정값은 표 3과 같다. 각각 독립접지시 접지저항은 전원 단독접지시와 거의 유사한 값을 나타내며 이는 통신접지에 비해 상대적으로 큰 규모의 전원접지계가 지배적인 영향을 미치는 것으로 볼 수 있다. 두 접지계를 본딩하였을 때 접지저항은 42 Ω으로 독립접지시 보다 낮게 나타났다.

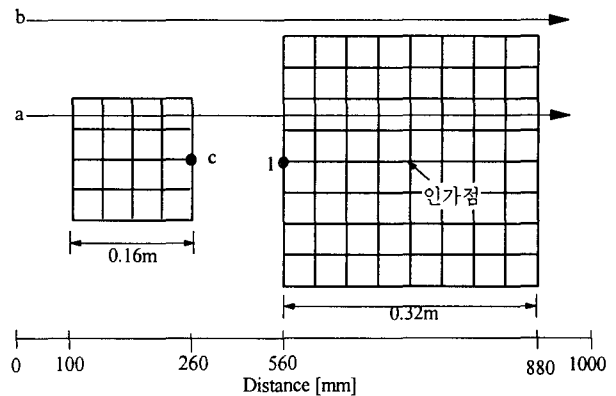
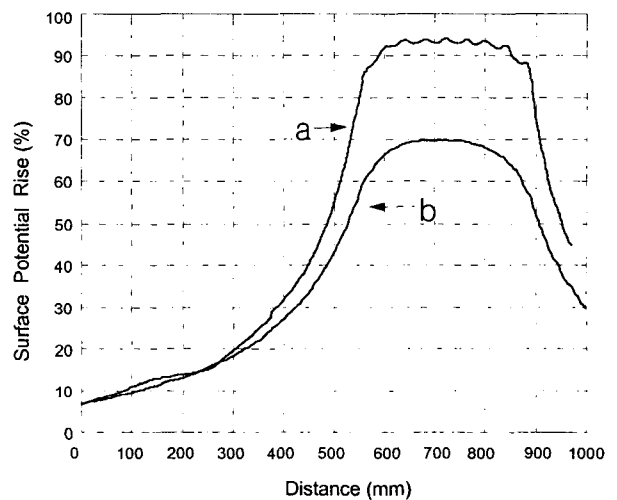


그림 9 접지계의 구성
 Fig. 9 Configuration of grounding systems

표 3 독립접지와 본딩시의 접지계의 접지저항
 Table 3 Ground resistance of separated case and bonded case

구 분	접지저항 [Ω]	
	측정값	해석값
독립접지	53.6	55.2
공통접지(본딩시)	40.6	40.9

독립접지시 a, b 방향에 대한 전위상승분포의 측정 및 해석결과를 그림 10에 나타내었다. 전원접지계의 중심에 1 A의 전류 인가시 전위상승은 이격거리의 증가에 따라 감소하다가 통신접지계가 있는 지점에서 약간의 왜곡이 발생함을 알 수 있으며 측정결과는 해석결과와 비교해 거의 동일한 특성을 나타내었다.



(a) 측정결과

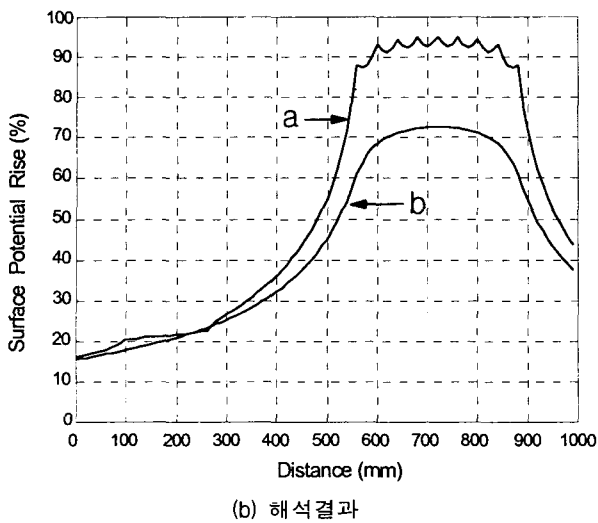


그림 10. 독립접지시의 표면 전위상승 분포
 Fig. 10. Surface potential rise profiles in case of a separated grounding system

그림 11은 두 접지계를 본딩하여 공통접지한 경우의 전위 상승 분포특성을 나타내었다. 그림 9에서 1-c 지점을상호본딩시 통신접지계의 전위는 90 %정도 상승하였으나 전원 접지계와의 전위차는 5 % 이내로 등전위화를 이룸을 알 수 있다. 측정치가 계산결과에 비해 접지전극이 없는 지점에서의 전위상승 정도가 다소 낮게 관측되었으나 전반적으로 유사한 경향을 나타낸다. 여기서 통신접지계의 전위상승은 단순히 대지전위상승의 관점에서 본다면 독립접지시가 유리함을 알 수 있다. 그러나 독립접지시 통신기기의 AC전원부는

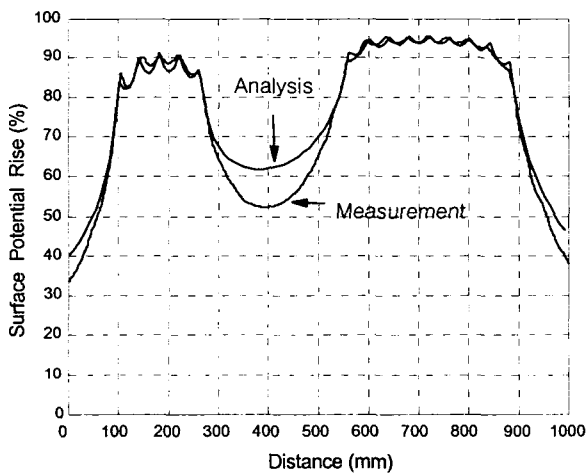


그림 11 본딩시의 표면 전위상승 분포
 Fig. 11 Surface potential rise profiles in case of bonding

전원접지에 연결되고 DC전원이나 실드선, 통신기기의 외함 등을 통신 접지계에 연결된 경우에는 두 접지계사이의 큰 전위차에 의해 기기의 소손을 초래할 수 있다. 따라서 두 접지계를 본딩하는 것이 접지저항을 저감할 뿐 아니라 등전위화를 이루어 사고예방에도 효과가 있다고 판단된다.

3. 결 론

접지 시스템의 특성분석을 위해 축소 모의 접지시스템을 구성하였으며 축소형 접지 시스템의 유효성을 검증하기 위해 수치해석 결과와 비교하였다. 먼저 축소모의 접지시스템을 이용하여 전원접지와 통신접지를 모의한 망상형 접지계에 대한 표면 대지전위상승을 각각 측정하였다. 표면 대지전위상승에 대한 측정 결과와 수치해석에 의한 시뮬레이션 결과가 유사한 양상으로 나타났으며 이를 통해 축소형 접지 시스템의 유효성을 확인하였다. 또한 이들 접지계의 독립접지시와 본딩에 의한 공통접지시의 전위상승분포를 분석하였으며 이를 통해 본딩시 두 접지계의 전위차를 줄일 수 있으며 사고예방에 효과적임을 알 수 있었다. 본 축소모델 접지 모의 시스템은 다양한 구조의 접지시스템의 설계 및 특성분석과 대지전위상승의 영향분석에 활용 가능하다.

참 고 문 헌

- [1] F. Dawalibi, D. Mukedkar, "Optimum Design of Substation Grounding in a Earth Structure : Part I-Analytical Study". IEEE Trans. PAS., Vol.PAS-94, No.2, pp.252~261, 1975.
- [2] F. Dawalibi, D. Mukedkar, "Optimum Design of Substation Grounding in a Earth Structure : Part II-Comparison between Theoretical and Experimental results". IEEE Trans. PAS., Vol.PAS-94, No.2, pp.262~266, 1975.
- [3] A.P. Meliopoulos, R.P. Webb, "Touch and Step Calculation for Substation Systems". IEEE PES Winter meeting, A79 052-2.
- [4] R. Caldecott, D.G. Kasten, "Scale model study of station grounding grids", IEEE trans. on power apparatus and system, vol. PAS-102, No.3, pp.558-pp.566, 1983
- [5] R. Cadecott, D.G. Kasten, "Scale Model Studies of Station Grounding Grids", IEEE Trans. PAS., Vol.PAS-102, No.3, pp.558~566, 1975.
- [6] A.P. Meliopoulos, Power System Grounding and Transients, Marcel dekker Inc., 1988.

저 자 소 개



장 석 훈 (張 錫 勳)

1974년 2월 20일생. 1996년 인하대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 한국전기연구원 전기환경송전연구그룹 연구원

Tel : 055-280-1328
Fax : 055-280-1329
Email : shchang@keri.re.kr



명 성 호 (明 聖 鎬)

1959년 3월 20일생. 1981년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 한국전기연구원 전기환경송전연구그룹장

Tel : 055-280-1320, Fax : 055-280-1329
Email : shmyung@keri.re.kr



이 재 복 (李 在 福)

1962년 8월 17일생. 1985년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 한국전기연구원 전기환경송전연구그룹 책임연구원

Tel : 055-280-1323
Fax : 055-280-1329
Email : jblee@keri.re.kr



조 연 규 (趙 延 奎)

1957년 3월 10일생. 1982년 경남대 전기공학과 졸업. 한국전기연구원 전기환경송전연구그룹 선임기술원

Tel : 055-280-1343, Fax : 055-280-1329
Email : ygcho@keri.re.kr



김 점 식 (金 点 植)

1973년 1월 11일생. 1995년 원광대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국해양대 전기공학과 박사과정.

Tel : 055-280-1325, Fax : 055-280-1329
Email : jpoint@orgio.net