

축소모형을 이용한 봉형과 망상형 접지전극의 전위경도 비교

길형준 · 김향곤 · 한운기 · 이기연 · 최충석

한국전기안전공사 부설 전기안전연구원

1. 서 론

광역화 정보통신망의 구축으로 정보기술의 의존도가 점점증하고 있으며 이에 따라 전기설비도 대형화·첨단화·다양화되어 가는 추세이며 현대산업 개발에 있어 중요한 역할을 수행하여 왔다. 그러나, 전기에너지는 사회에 편리함을 제공하는 반면 안전성을 확보하지 못할 경우 위험성이 많아 매년 많은 감전사고가 발생하여 왔다. 특히, 건설현장의 임시전력설비는 부적합한 작업환경, 최소한의 안전장치의구비 등 여러 가지 요인에 의해 많은 감전위험요소가 존재한다. 한국전기안전공사의 1997~2001년의 통계자료에 의하면, 임시전력설비에서의 감전재해자는 년당 110명 정도이고 이는 전체 설비에서 15[%]의 매우 높은 점유율을 차지하였다¹⁻³⁾.

이러한 임시전력설비에서 다양한 위험요소들이 있겠지만 그 중에서도 접지설비는 매우 중요하다고 할 수 있다. 접지설비는 다른 설비에 비해 단지 부속설비처럼 안이하게 취급하는 경우가 많으나 전력설비의 사고나 절연불량, 전원회로나 전자장치에 넘서지 또는 개폐서지와 같은 과도이상전압이 침입할 때 취급자를 감전사고로부터 보호하고, 설비기기의 절연파괴를 방지하는 중요한 역할을 한다. 그러므로, 접지시스템의 성능을 단지 접지저항이 아니라 대지전위상승, 접촉전압, 보폭전압 등 위험전압으로 평가하는 것이 바람직하다⁴⁻⁸⁾. 실제 규모의 접지계를 구성하여 최적배치 구조를 찾는 것은 현실적으로 매우 힘들며 실규모 측정의 대안으로서 계산기를 사용한 수치 해석적인 방법이 있으나, 계산 오차를 줄이기 위해서는 많은 계산시간이 요구된다. 이에 본 논문에서는 전기설비의 지락고장시 감전사고에 있어 중요한 요소인 대지전위상승을 측정 및 분석하기 위해 실질적이고 경제적인 대안으로써 축소모델인 반구형 접지모의시스템 및 봉형과 망상형 시험접지계를 설계·제작하여 실규모의 접지계에 대해 분석하는데 이용하고자 하였으며 전기공작물의 보안확보, 공중의 안전 및 전기관련사업의 효율화에 이바지할 수 있도록 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 축소모델의 원리

축소모델인 반구형 접지모의시스템은 실규모 접지계의 도체 크기와 매설깊이를 임의의 축적으로 줄이고, 접지계에 전류가 흐를 때 생기는 등전위면의 형상이 실규모 접지계와 동일하게 유지할 수 있도록 하는 장치이다. 균등한 대지면 근처에 매설된 유한 전극에서 등전위면은 관측점이 전극과 멀어질수록 반구면이 된다. 이 등전위면에 도전면을 대체하더라도 전계

의 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

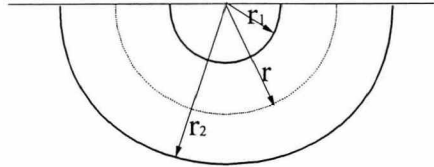


그림 1. 준무한대지에서 반구형 접지전극 주변의 등전위선

무한점으로부터 이 반구까지 전압을 인가하면 모든 등전위면은 반구가 된다. 반경 r_2 의 반구를 설치하더라도 등전위면은 변하지 않는다. 이들 두 반구간의 저항은

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

이 된다. 비슷하게 $r_2 \rightarrow \infty$ 이고, r_1 을 r_2 로 대체하면 무한점에 대한 r_2 의 저항은

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

이며, 두 반구간에 V_{12} 의 전압을 인가하면 이때 흐르는 전류는

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

따라서, 무한점에 대한 임의 거리 r 의 전위 V_r 은 탱크의 외벽에 대한 r 점의 전위 즉, 측정전압 V_m 과 무한대에 대한 탱크의 전위 V_{r_2} 의 합으로

$$V_r = V_{r_2} + V_m = \frac{I\rho}{2\pi r_2} + V_m \quad (4)$$

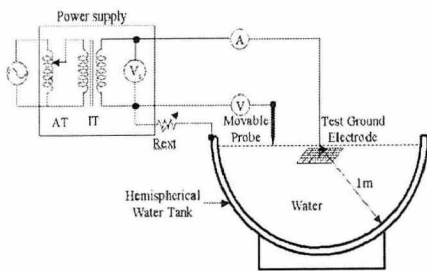
이 된다.

위 예에서 r_1 은 모의하고자 하는 전극이며, r_2 는 그 내부에서 전계 왜형이 발생되지 않는 r_1 보다 큰 수조통이다. 무한장의 실제 접지계를 한정된 공간으로 축소하기 위한 이상적인 모델은 고장전류에 의해 형성되는 전위값이 동일한 등전위점이 이루는 윤곽선을 가진 형체이다. 이와 같은 조건을 만족하는 형상은 봉형 접지전극, 매설지선, 판접지전극 및 이들의 조합인 망상형 접지전극 등 대부분의 실제 접지전극으로부터 이격된 제한된 거리에서부터 형성되는 반구의 형상이다^{9, 10)}.

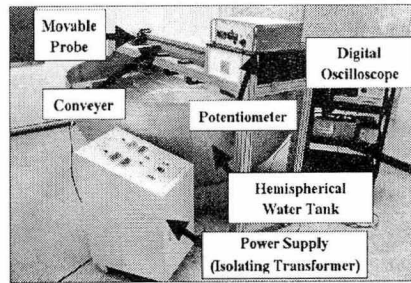
2.2 측정시스템 구성 및 실험방법

본 접지모의시스템은 지락전류를 일정하게 발생하기 위한 교류전원공급장치, 측정점의 궤적과 대지전위상승을 측정하는 이송형 전위계측장치, 반구형 수조탱크 및 시험접지극으로 구성하였다. 그림 2는 반구형 접지모의시스템 측정계의 측정 원리도 및 외형

을 나타내고 있다. 반구형 수조탱크의 재질은 스테인레스이며 직경은 2[m]이다. 그림 2(a)에서 가변저항은 교류전원발생장치에서 지락전류 발생시 전류를 제한하기 위해 설치한 것으로 7.64[Ω]로 설정하였다. 전압계(Vs)는 인가전압을 지시하고 전압계(V)는 프로브와 무한점간의 대지전위를 나타낸다. 또한 전류계(A)는 시험접지극과 무한점 사이에 흐르는 전류를 나타내며, V/I의 비로서 준무한 대지에 매설된 접지전극의 접지저항이 구해진다. 대지전위를 측정하기 위한 프로브는 물의 표면 혹은 내부의 전위를 측정하기 위한 것으로 콘베이어를 통해 이송되며, 전위계측장치에서 프로브의 이동궤적이 표시된다. 측정시의 물의 저항률은 42[Ω · m]이며 수저항률계(CM-21P)로 측정하였다.



(a) 측정 회로



(b) 외형

그림 2. 반구형 접지모의시스템의 측정회로 및 외형

표 1. 실제 모델과 80:1의 축소모델

항목	모델	실제 모델	축소 모델
접지전극의 매설깊이		0.76m	9.5mm
망상형 접지전극의 크기		24m×24m	0.3m×0.3m
망상형 접지전극의 직경		0.01m	1mm
봉형 접지전극의 길이		8m	0.1m
봉형 접지전극의 직경		0.0127m	1mm

시험접지극을 구성하기 위해 실제 건설현장에서 시설중인 접지계를 모의하였다. 실제 접지계와 실제 접지계를 80:1로 축소한 모델을 표 1에 나타낸다. 토양의 특성을 모의하기 위해 측정이 용이한 42[Ω · m]의 지하수를 수조탱크내에 채웠으며 시험접지극은 해석 대상 접지계를 80:1로 축소한 크기로서 시험접지극을 제작하는데 어려움과 9.5[mm] 깊이의 수조 내부에 고정시 편의를 위해 두께 1[mm]의 스테인레스 도체를 이용하였다. 그 이유는 접지도체의 두께는 저항값과 대지전위상승에 미치는 영향이 적으므로 80:1의 축소에 적용하지 않았다. 또한, 시험접지극을 수면 아래 9.5[mm]에 장착한 이유는 전기설비기술기준에서 접지전극은 지표면에서 0.75[m] 이하에 시설하도록 규정하고 있으며 이를 80:1로 축소한 값이기 때문이다. 시험접지극으로는 봉형 및 망상형의 2가지 유형에 대해 제작이 이루어졌으며 그림 3에 그 일례를 나타낸다. 이러한 시험접지극을 수조탱크의 중앙 수면 아래 9.5[mm]에 장착하고 지락전류를 시험접지극 중심부에 흘린 후 프로브가 수조탱크 직경방향으로 이송하며 대지전위상승을 실시간으로 측정하게 된다.

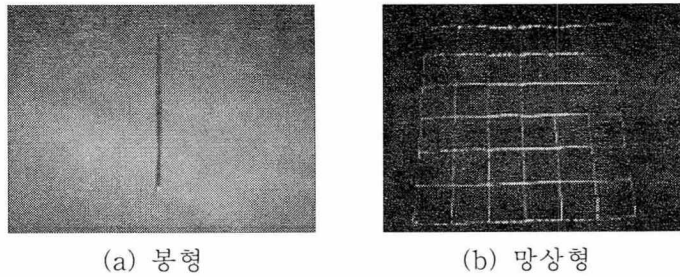


그림 3. 시험접지극의 일례

3. 결과 및 고찰

3.1 봉형 접지전극의 대지전위분포

접지고장에 기인한 접지전류에 의해서 형성되는 대지표면의 전위분포는 다른 설비에 의 영향과 인체에 대한 감전사고 등을 고려하여 일반적으로 대지표면에서의 값으로 나타낸다. 접지전극의 전위가 상승하게 되면 인체 감전뿐만 아니라 설비 및 기기의 오동작이나 파손을 가져오게 된다^{5,6)}.

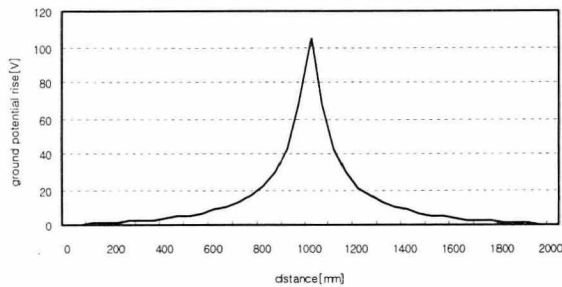


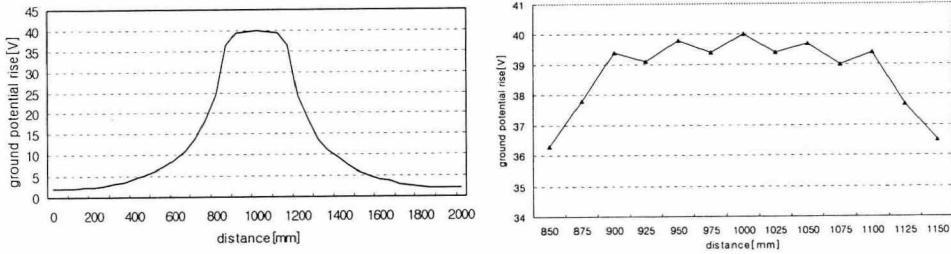
그림 4. 봉형 접지전극의 대지전위분포

우선, 축소모델로 제작된 봉형 접지전극에 대해 살펴보면, 봉형 접지전극을 수조탱크 중앙에 위치시킨후 1[A]의 지락전류를 흘려주어 대지전위상승을 측정하였다. 그림 4는 봉형 접지전극이 설치된 경우, 0~2000[mm]의 거리에 대해 측정된 대지전위의 분포 곡선이며, 거리에 따른 대지전위상승을 2차원적으로 표현하였다. 최대값은 수조탱크의 중심점인 1000[mm] 지점에서 발생하였으며 그 값은 1[A]당 105[V]이다. 이 때 공급전압은 224[V]이다. 그림 4에 나타낸 바와 같이, 봉형 접지전극의 경우 전위경도는 매우 가파른 양상을 나타냈으며 1000[mm] 지점을 중심으로 대칭인 분포를 나타내었다.

3.2 망상형 접지전극의 대지전위분포

전원설비나 대형 건축물의 접지설비에서 대단히 낮은 접지저항이 요구되거나 대지표면의 전위경도를 거의 없애어 등전위로 할 필요가 있는 경우에 망상형 접지전극을 이용하는 접지시스템이 많이 활용되고 있다. 최근 변전소용 접지설비로는 대부분 망상형 접지전극을

사용하고 있다. 그림 5(a)는 전체 분포도를 나타내고 그림 5(b)는 망상형 접지전극이 시설된 부분인 850[mm]부터 1150[mm]까지의 확대 분포도를 나타낸다. 봉형 접지전극과 마찬가지로 1[A]의 지락전류를 인가하였으며 이 때 공급전압은 43.2[V]이다. 그림 5에 나타낸 바와 같이, 접지전극을 중심으로 대칭 분포를 나타내었으며 최대값은 1[A]당 40[V]이다. 접지전극이 시설된 850[mm]와 1150[mm] 사이에서 거의 전위분포가 일정한 양상을 나타내었다. 이는 망상형 접지전극이 시설될 경우 등전위화가 이루어짐을 입증하는 것이다.



(a) 전체 분포도 (b) 확대 분포도

그림 5. 망상형 접지전극의 대지전위분포

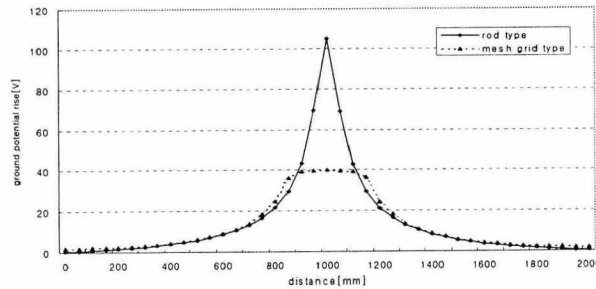


그림 6. 봉형과 망상형 접지전극의 비교

그림 6은 봉형과 망상형 접지전극의 대지전위분포를 비교한 것이다. 2가지 접지전극의 대지전위 최대값 차이는 65[V]로 나타났고 봉형 접지전극에 비해 망상형 접지전극이 더 전위경도가 완만하며 접지전극이 시설된 부분에서 등전위화가 이루어졌음을 알 수 있었다. 따라서, 봉형 접지전극보다 망상형 접지전극이 인체보호 및 설비 안정화 측면에서 더 적합하다고 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 축소모델인 반구형 접지모의시스템을 이용한 접지전극의 형상에 따른 대지전위상승의 측정 및 분석이 수행되었으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 실규모 접지시스템을 구축하여 최적 배치구조를 얻는 것은 어렵고 수치해석의 경우에 계산상의 오차를 줄이기 위해 많은 계산시간이 요구되므로, 실질적이고 경제적인

대안으로써 축소모델인 반구형 접지모의시스템이 설계 및 제작되었다.

(2) 반구형 접지모의시스템은 반구형 수조탱크, 교류전원공급장치, 이송형 전위계측장치, 시험접지극으로 구성되며, 시험접지극은 실규모 접지계를 80:1로 축소하여 봉형 및 망상형으로 제작되었다.

(3) 봉형 접지전극의 대지전위분포에 있어 전위경도는 날카롭고 1000[mm] 지점을 중심으로 대칭적 분포를 나타내었으며, 망상형 접지전극의 대지전위상승을 측정하였을 때 등전위는 접지전극 주변에서 형성되었으며 이를 통해 망상형 접지전극이 설비 안정화 및 인체 감전보호 측면에서 더 적합한 것으로 판단된다. 또한 분석된 자료는 단일 토양에서의 적합한 접지시스템을 결정하는데 이용될 수 있고, 건축물, 전력설비 등의 접지시스템 설계에 기술자료로 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 전력산업기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Chung-Seog Choi, Hyoung-Jun Gil, Ki-Boong Han, Woon-Ki Han, "The Statistical Analysis and Investigation of Field Condition about Electrical Shock Accidents and Risk Factors in Temporary Power Installations", International Journal of Safety, Vol. 2, No. 2, pp.22-28, 2003.
- [2] 길형준, 한운기, 김향곤, 최충석, "건설현장의 수전설비 및 배·분전반의 현장실태 분석", 한국조명·전기설비학회 춘계학술대회 논문집, pp.335-340, 2004.
- [3] 한운기, 한기봉, 길형준, 최충석, "임시전력설비 감전재해 발생현황 분석에 관한 연구", 한국산업안전학회 추계학술발표회 논문집, pp.118-123, 2003.
- [4] Ronald P. O'Riley, "Electrical grounding", Delmar Thomson Learning, pp.1-29, 2002.
- [5] 이복희, "접지의 핵심기초기술", 의제, pp.113-124, 2000.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] A.P. Meliopoulos, R.P. Webb, "Touch and Step Calculation for Substation Systems", IEEE PES Winter meeting, A79 052-2.
- [9] R. Cadecott, D.G. Kasten, "Scale Model Studies of Station Grounding Grids", IEEE Trans. PAS., Vol.PAS-102, No.3, pp.558-566, 1975.
- [10] A.P. Meliopoulos, "Power System Grounding and Transients", Marcel dekker Inc., 1988.