

병렬판상전극의 수조모델 시뮬레이션 해석

고희석^{*}·김성삼^{*}·이충식^{**}·최종규^{***}·류희석^{****}
 경남대^{*}·대원과학대학^{**}·마산대학^{***}·한국전기연구원^{****}

Analysis for Water tank model simulation of parallel plate electrodes

Hee-Seog Koh^{*}·Sung-Sam, Kim^{*}·Chung-Sik Lee^{**}·Jong-Kyu Choi^{***}·Hee-Suk Ryoo^{****}
 Kyungnam Univ^{*}·Deawon Science College^{**}·Masan College^{***}·KERI^{****}

Abstract - In this paper, we tried to analyze through the water tank model to solve these kinds of problems about the square plate earth electrode using general facilities with being compared with the theory formula announced before. The square plate earth electrode that haven't investigated so far is analyzed by being based on laid rod electrode. And the each kind of calculation model was investigated with the experiment of water tank. An experiment of the vertical square plate electrode about laying depth in the center of the surface of the water has already done with the practical models that have different forms of electrodes

으로서 사용되어지고 있다. 같은 형상치수의 전극을 복수개로 집합시켜 이들을 연결선으로 병렬로 접속하는 것을 병렬접속이라고 한다. 하나의 전극의 접지저항을 R 이라고 할 때 N 개를 병렬로 접속한 경우의 합성저항, 흔히 병렬접지저항 R_0 은 다음식으로 따른다.^[7]

$$R_0 = \eta \cdot \frac{R}{N} \quad (2-2)$$

여기서 η 는 병렬접지의 효과를 나타내는 지표로 되는 계수로서 집합계수라 부른다.

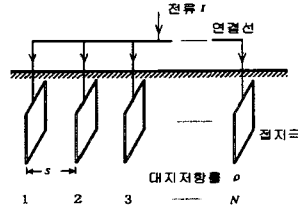


그림 2.1 판상전극의 병렬접지
 Fig.2.1 Parallel grounding of plate electrodes

병렬접지의 특징은 전극간의 거리의 대소에 의해서 합성저항의 저감 양상이 달라지는 것이다. 결국 전극간거리가 적게되면 전극에서 유출하는 접지전류의 통로가 좁게 되고 전극의 상호간섭에 의한 전류선이 조밀하게 된다. 한편 전극의 전위분포에 대해 살펴 보게 되면 전극간 거리가 적게 됨에 따라 전위 중첩의 정도가 크게 된다. 이들의 이유로 합성접지저항의 저감이 나쁘게 되는 것으로 된다.

집합계수는 항상 1보다 큰값을 갖는 것이다. 예를 들면 전극은 무한대의 이격거리에서 병렬접지저항으로 했을 경우 전극의 상호간섭은 무시할 수 있고 전위의 중첩이 없으므로 되기 때문에 집합계수는 한없이 1에 접근한다. 그러나 현실에서는 유한의 거리이기 때문에 1보다도 큰 값으로 된다.

1. 서 론

판상 접지극의 접지저항의 이론적인 해석을 고찰하고자 한다. 판상 접지극 해석의 특성에 대해서는 판형상을 직접 취급한 해석 예는 국내외의 문헌을 조사해도 눈에 띄지 않는다. 판상 전극의 접지저항계산식의 Dwight^[1]나 Tagg^[2]의 식에 의한 산출 등 공식적으로 쓰여지고 있는 것이 있지만 이들 계산에 있어서 판상을 원형상 전극으로 면적 치환하거나 형상에 대해서 구한 수치 계수를 사용해 계산을 하는 등의 조사 추정값이다.^[3,4] 또한 형상을 치환하고 있으므로 전극주변에 발생하는 전위분포에 대한 해석은 되지 못한다. 더욱이 이들의 식은 균질대지에 매설된 경우를 규정해 산출된 값이고, 다층대지에 대한 해석은 행하지 못하고 있다. 최근 일본 문헌에서는 판상 전극에 대한 형상 치환에 의하지 않고 계산 모델을 설정해 이것에 의해 균질대지에 매설될 때의 이론적인 해석을 발표했다.^[5,6]

본 논문에서는 최근에 발표된 문헌의 이론식을 검토함과 동시에 기존에 발표된 Dwight식에 의해 균질대지에 매설된 판상 전극의 접지특성을 구한다. 계산식의 도출 과정을 이용하여 그 결과를 기초로 접지극 형상이나 매설 깊이 차이에 의한 병렬판상 전극의 접지저항 특성과 집합계수를 수조 모의 실험에 의해 검증하고자 한다.

2. 본 론

2.1 수직에 매설된 판상 접지극의 접지저항

전극에서 유출하는 전류가 전체에 균등한 것으로 하고 따라서 접지저항식의 산정에는 평균전위법을 사용해 전극표면의 평균전위를 유입 전류로서 나눈 값을 접지저항 식으로 사용한다. 평판상 전극의 접지저항 계산식으로서 종래 부터 제안되고 있는 Dwight의 식은 전극을 등가면적의 원판상전극으로 치환해 추정하는 것이고 다음과 같이 나타내는 계산식이다.^[8]

$$R = \frac{\rho}{8r} + \frac{\rho}{4\pi s} \left[1 + \frac{7}{24} \frac{r^2}{s^2} + \frac{99}{320} \frac{r^4}{s^4} \right] \quad (2-1)$$

단, r : 판의 등가반경[m] $r = \sqrt{\frac{ab}{\pi}}$

ρ : 대지저항률[Ω m]
 $s/2$: 매설깊이[m]

2.2 판상전극의 병렬접지저항의 해석

접지저항을 저감하는 방법으로서 같은 형상전극을 병렬로 접속하는 병렬접속 공법이 있다.^[9,10] 판상전극의 병렬접지저항의 계산은 회전타원체전극에 의한 집합계수의 계산법이 확립되어 있다.^[11,12]

한편 판상전극은 시공영역의 제한을 받지만 봉상전극에서는 소요접지저항이 얻어지지 않은 경우에 유용한 공법

2.3 모델 전극에 의한 수조모델 실험 방법

수조모델 실험에 대한 이론적인 내용을 살펴보면 다음과 같다. 접지 전극을 설계할 때 모양이 복잡한 전극인 경우에는 계산공식을 유도하는 것이 곤란하다. 이러한 경우 접지저항을 추정하는 편리한 방법으로서 모형 실험법 이 있다.^[3,7,11] 접지의 모형 실험법은 그림 2.2와 같이 수조 속에 접지 전극의 축척모형(스케일모델)을 배치하여 측정하는 방법이다.

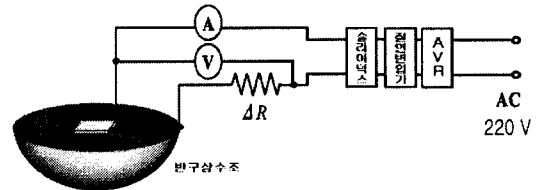


그림 2.2 수조 실험 장치도
 Fig.2.2 Equipment hemispherical water tank

수조 모델 실험에 필요한 것으로는 수조, 그속에 넣는 매질, 모형 접지전극, 전원, 측정장비가 있다. 접지의 모형 실험을 하는 데에는 먼저 균질 대지와 유사한 환경을 만들어야 한다. 수조 모델 실험에서는 그림과 같이 물을 가득 채운 수조를 균질 대지에 가깝게 만든다. 수돗물의 저항률은 온도에 따라 변하기 때문에, 실험때 마다 전도율계를 이용하여 측정한다. 수조는 측정 정밀도라는 관점에서 보면 클수록 바람직하다.

리턴 전극으로서 수조 그 자체를 이용할 수 있는 금속제 수조를 이용하는 편이 수조의 넓이를 효과적으로 사용할 수 있어 편리하다.

전극재료로서는 도전성이 높은 것이 바람직하며, 일반적으로 가공이 용이한 동, 황동이 사용된다.

이들 전극은 수조 속에서 물이 잠기게 되므로, 크기가 작은 모델인 경우는 물의 표면 장력 때문에 전극 표면과 물이 잘 융합되지 않을 수가 있다. 이렇게 되면 측정 결과에 영향을 미치게 되므로, 사용하기 전에 전극 표면을 탈지할 필요가 있다. 전원으로서서는 상용 전원을 사용하고, 배전 계통의 접지와 단절시키기 위해 반드시 절연 변압기를 사용한다.

접지저항이란 접지 전극의 전류를 흘렸을 때에, 무한 원점에 대한 접지전극의 상승값을 주입 전류로 나눈 몫이다. 수조 모형 실험인 경우는 그림에서 나타내는 바와 같이 주입한 전류의 크기는 전류계로 측정하고 모형 접지 전극의 전위 상승은 전압계로 측정한다.

전압계의 한쪽 단자는 모형 접지 전극에 연결하고, 다른 쪽 단자는 금속 수조의 경우 수조 그 자체에 연결한다. 접지 저항은 이론적으로 엄밀하게 말하면 무한 거리의 대지까지 포함된다. 그러나 수조 실험의 경우 수조의 크기는 유한하다는 한계가 있다.

수조의 유한성에 의한 오차는 그림 2.3에 나타낸 반구 전극과 반구 수조에 의해서 개략적으로 짐작할 수 있다.

그림 2.3과 같은 반구상 접지 전극(반경 r_0)인 경우, 주입 전류가 방사상으로 유출되는 것으로 하고 반구의 중심에서 거리 r 인 곳에 반경 r 인 반구면의 수조를 상상한다.

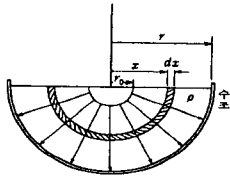


그림 2.3 반구 전극과 반구 수조
Fig 2.3 Hemispherical electrode and hemispherical water tank

물의 저항률을 ρ 로 하면, 반구 전극의 중심에서 거리 x 인 곳의 두께 dx 인 부분의 저항 요소 dR 은

$$dR = \rho \frac{dx}{2\pi x^2} \quad (2-3)$$

dR 은 전극에서의 거리 x 의 제곱에 반비례하여 작아진다. 전극의 표면($x=r_0$)에서 무한 원점($x=\infty$)까지의 dR 을 적분한 결과가 반구 전극의 이론상의 접지 저항 R 이다. 즉

$$R = \int_{r_0}^{\infty} dR = \frac{\rho}{2\pi} \int_{r_0}^{\infty} \frac{dx}{x^2} = \frac{\rho}{2\pi} \left[-\frac{1}{x} \right]_{r_0}^{\infty} = \frac{\rho}{2\pi r_0} \quad (2-4)$$

반경 r 의 수조를 사용하여 실험한 것으로서 수조보다 외측으로 분포되는 저항분을 ΔR 로 하면 그것은 dR 을 $x=r$ 에서 $x=\infty$ 까지 적분한 결과와 같아져

$$\Delta R = \int_{r_0}^{\infty} dR = \frac{\rho r}{2\pi r} \quad (2-5)$$

반경 r 의 수조를 사용하여 실험했다고 하면, 수조보다 외측으로 분포되어야 할 저항분 ΔR 은 무시되므로, 측정 결과에 그 만큼의 오차가 들어가게 된다. 지금 이 오차를 중단 오차 ϵ [%]로 하고, 이것을 산정하기 위해 ΔR 과 R 의 비를 구해보면

$$\epsilon = \frac{\Delta R}{R} \times 100 = \frac{r_0}{r} \times 100[\%] \quad (2-6)$$

즉, 오차 ϵ 는 $\frac{r_0}{r}$ 의 비에 의해서 결정된다. 표 2.1에 여

러 종류의 r 에 관하여 ϵ 을 계산하였다. r 은 r_0 의 배수로 나타내고 있다. $r=10r_0$, 즉 수조의 반경이 모형 반경의 10배인 경우 오차 ϵ 는 10%이다.

표 2.1 수조의 크기와 중단오차

Table 2.1 Hemispherical water tank size absolute error

수조의 반경 r	중단 오차 ϵ [%]
$2 r_0$	50
$5 r_0$	20
$10 r_0$	10
$20 r_0$	5

모형에 비해 큰 수조를 사용할수록, 반대로 수조에 비해 모형을 작게 만들수록, 오차는 작아진다.

무한정 큰 수조를 만들 수도 없고, 반대로 모형을 축소하는 데에는 한도가 있다. 따라서 현실적으로 실험에서 생기는 다소의 중단오차는 피할 수 없게 된다. 단, 접지 저항의 추정 정밀도는 중단 오차 ϵ 에 의해서 결정되는 것도 아니다. 추정 정밀도를 개선하는 방법이 있다.

그것은 반구 전극으로 실험했을 경우, 그 접지 저항의 참값은 이론적으로 명백하게 정해져 있으므로 그것을 이용하여 중단 저항분 ΔR 을 정확하게 산출할 수 있기 때문이다. 이 ΔR 은 구체적인 실험 조건(수조의 크기와 형상)에 의해서 거의 결정되어, 모형 형상의 영향은 그다지 받지 않는다.

왜냐하면 형상에 따른 접지 저항의 변화는 전극 부근에서만 발생하고 원격으로 될수록 작아지기 때문이다. 따라서 반구이외의 전극으로 실험했을 경우에도 반구일 때의 ΔR 을 사용하여 측정값을 어느 정도 보정할 수 있다.

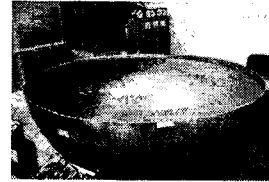


사진 1. 스테인레스제 반구상수조

Photo 1. Hemispherical water tank form of stainless steel

표 2.2 측정에 사용된 기기 제원

Table 2.2 Specification of measuring equipment

기기명칭	제조원	제원
ρ 미터 (전도율계)	(주)東亞電波工業 (Japan)	CM-21P
교류전류계	HWA SHIN	TYPE : HS 7015 CLASS : 0.5
디지털전압계	FLUKE	FLUKE 16
AVR	삼풍전원시스템	정격용량 : 2kva
슬라이더스	삼신전업사	정격용량 : 2kva (0~120[V])
절연변압기	삼풍전원시스템	정격용량 : 1kva

2.4 병렬 판상전극의 접지저항 특성 검토

병렬 판상 전극의 접지저항의 특성을 검토 하기위해 수조 실험 장치에서 수조의 수면중심에 매설 깊이를 같도록 고정하고 2극의 모형 전극을 수직병렬 평행배열과 직선배열로 그림 2.4처럼 전극간의 거리를 변화시킬때의 접지저항을 측정한다.

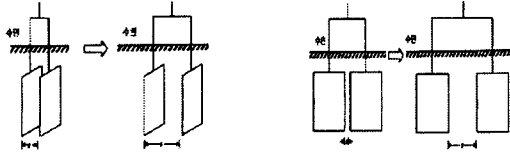


그림 2.4 수직병렬 평행배열과 수직병렬 직선배열
Fig. 2.4 Vertical parallel laying and Vertical direct laying

판상전극의 수직병렬 평행배열과 직선배열의 특성을 실험하기 위해 모델 전극을 다음과 같은 조건으로 하였다. 전극의 크기는 가로·세로 크기를 각각 50[mm]로 하였고 매설깊이는 50[mm]를 기준하였다. 그리고 전극간의 이격거리 s 는 10~100[mm]로 하였다. 실험결과는 표 2.3과 같다.

판상전극을 수직병렬 평행배열과 직선배열로 실험한 결과 내용은 다음과 같다. 수직병렬 평행배열의 접지저항값은 전극 간격 10~100[mm]에서 약 40%의 실험값의 변화가 생길 것을 알 수 있고 반면에 수직병렬 직선배열에서는 약 12%의 실험값의 변화가 발생하였다. 아래 결과에서 알 수 있듯이 전극간의 간격이 클수록 접지저항값이 적게 나타나고 있다. 수직병렬 평행배열과 직선배열이 판상 접지전극의 형태 및 크기가 일정한 경우 병렬접지 시공에서는 직선배열이 평행 배열보다 접지성능이 우수하다는 것을 실험을 통해 알 수 있었다.

표 2.3 판상전극의 수직병렬 평행·직선배열 실험결과값[Ω]

Table 2.3 Experimental values Vertical parallel and direct laying of plate electrodes

전극간 간격[mm]	평행배열	직선배열	비교[%]
10	203.5	159.2	27.8
20	185.4	155.5	19.2
30	172.2	153	12.5
40	162	148.5	9
50	159	147	8.2
60	155.8	145.5	7
70	152.5	144	5.9
80	146.7	143.5	2.2
90	146	142	2.8
100	145.1	141	2.9

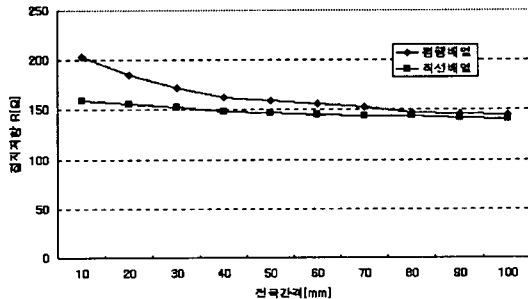


그림 2.5 병렬 배열에 의한 접지저항값 변화
Fig. 2.5 Variation resistance value by parallel laying

이와 같은 결과는 접지전극이 근접해 있을 경우 각 전극에서 유출하는 전류에 의한 전위상승으로 인해 저항을 받을 것으로 사료된다. 그러기 때문에 병렬접지 시공에는 접지전극간의 전위 분포를 최대한 확보하는 것이 중요하다고 판단된다. 즉 충분한 전극간의 이격거리를 유지하는 것이다.

2.5 판상 전극의 병렬접지에 따른 집합계수
판상전극을 수직병렬 평행배열과 직선배열에 의한 병렬 접지저항의 정도를 나타내는 집합계수를 검증하기 위해

접지저항을 측정한다.^[4,7,10] 그림 2.4와 같이 수직판상 전극을 같은 매설깊이로 전극간의 거리를 변화시켜 합성저항을 측정해 식(2-2)을 적용하여 집합계수를 평가했다.^[9] 축척모형전극(판형상 세로가로 $2a = 2b = 10$ [mm], 두께 $2n=0.5$ [mm])을 매설깊이 0~30[mm]에 설치한다. 수직병렬 평행배열과 직선배열에서 전극간의 매설깊이 및 전극간의 간격에 대한 집합계수를 파악하기 위해 실험하였다.

수직 매설 평행배열에서 실험 방법은 매설 깊이당 단극전극에 대한 접지저항값을 구한다. 같은 매설깊이에서 병렬전극을 일정한 간격을 유지하여 전극간의 간격당 접지저항값을 구한다.

그리고 식(2-2)에 의해 집합계수를 구한다. 실험 결과 다음과 같은 경향을 볼 수 있었다.

전극간의 거리가 협소한 경우는 매설 깊이가 깊을수록 집합계수가 적게 되는 것이 확인되었다. 즉 접지저항값이 적게 나타나고 있다.

3. 결 론

본 연구는 판상 전극에 대한 접지저항을 해석하기 위하여 수조모델 실험을 하였다. 수조모델 실험에서는 접지설계 및 시공에 널리 적용되고 있는 Dwight이론식을 기초로 하였다. 수조모델 실험에서 오차를 최대한 감소시키기 위해 실험 모델을 최소한 크기로 선정하였다. 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 병렬접지에서 직선상 전극배치가 평행 전극배치보다 병렬 접지효과가 크다는 것을 수조 실험을 통해 입증되었다.
- (2) 병렬접지에서 집합계수에 의한 직선상 및 평행배치에서의 접지저항의 차이를 평가 할 수 있었다.
- (3) 판상 전극을 사용한 병렬 접지공법에서는 수직병렬 평행배열과 직선배열이 판상 접지전극의 형태 및 크기가 일정한 경우, 직선배열이 평행 배열보다 접지성능이 우수하다는 것을 실험을 통해 알 수 있었다.
- (4) 후후에는 수조 실험을 통한 다양한 형태의 접지극도 축척률 및 형상계수법을 이용한 모의 실험이 가능 하기 때문에 접지시설 시공 전 사전에 추정하는데 많은 도움이 될 것으로 기대된다. 특히 봉상 및 메쉬접지도 수조에 실험이 가능하다고 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] H. B. Dwight: 'Calculation of Resistance to Ground', Electrical Engineering, No.12, 1936, pp.1319-1328
- [2] G. F. Tagg : "Earth Resistance", George Newnes LTD (1964), pp. 90-102, pp.161-172
- [3] 高橋建彦, 「圖解 接地設計入門」, オーム社, 平成 8年
- [4] 高橋建彦, 川瀬太郎 「圖解 接地技術入門」, オーム社, 平成8年
- [5] 三谷正志, 高橋健彦: 「埋設られた棒狀接地極の電位分布・接地 抵抗計算式に關する一考察」 電氣設備學會誌, Vol.20, No. 6, 2000年, pp.470-476
- [6] 三谷正志, 高橋健彦: 「角板狀接地極の電位分布・接地 抵抗計算式に關する理論的解析」 電氣設備學會誌, Vol.21 No.6, 2001年, pp.510-515
- [7] 川瀬太郎: 「現場の 接地技術と接地システム」, オーム社, 1993年
- [8] T. Takahashi and K. Kawase, "Calculation of Earth Resistance for a Deep-Driven rod in a Multi-Layer Earth Structure", IEEE Trans. on Power delivery, Vol.6, No.2, pp.608-614, 1991.
- [9] 高橋: 「並列接地電極の接地特性について」 電氣設備學會誌, 電氣設備學會研究發表會, #B-8(昭62-4)
- [10] 高橋他: 「並列接地電極の集合計數について」 電氣學會電力應用研究會 (昭58-9)
- [11] 高橋, 川瀬: 「接地電極の形狀係數の推定法」 電氣學會論文誌B, Vol.103, No12(昭58-12)