

대지의 전기적 특성

개요

접지저항은 접지전극의 형성과 재료, 크기, 접지 전극이 매설된 대지를 구성하는 토양의 형태와 조건, 대지 구조 등에 따라 변화하며 특히 대지저항률에 의해서 지배적으로 영향을 받는다. 접지전극이 매설되는 지점의 토양의 저항률(soil resistivity) 또는 대지 저항률(earth resistivity)이 접지의 효과를 크게 좌우하게 된다. 대지 저항률이 낮은 장소일수록 낮은 접지저항을 얻기 쉬우므로 접지의 설계와 시공에 있어서 접지전극 매설지점의 대지저항률과 지층의 구조를 정확하게 알아내는 것은 대단히 중요하다. 접지를 시공하는 장소의 대지저항률은 토질이나 토양내에 함유되어 있는 화학물질, 염분, 수분의 함유량 및 토양의 온도 등에 따라 상당히 변화하므로 이들의 특성에 따라 접지저항은 변동하게 된다. 따라서 대지 저항률을 정확하게 결정하는 것은 주변의 환경, 토질과 지층의 구조를 잘 이해 하여야만 가능하기 때문에 결코 간단한 일은 아니다. 그러나 개략적이지만 대지의 구조를 정량적으로 분석하는 방법이 제안되어 사용되고 있으며, 본 장에서는 토양의 전기적 성질, 대지저항률의 특성 및 측정 평가에 대해서 중점적으로 알아본다.

2.2 토양의 전기적성질

접지전극을 통하여 대지로 흐르는 전류 즉, 접지전류는 전자의 이동에 의한 전기전도와 이온의 이동에 의한 전기전도에 의해서 흐르게 된다. 전류의 흐름에 대한 물질의 저항은 전기저항률 또는 고유저항으로 특징지어지며, 전기저항률 또는 저항률(electric resistivity) $[\Omega \cdot m]$ 은 옴의 법칙의 미분형으로 나타낸 다음의 식과 같이 표현할 수 있다.

$$E = \rho$$

여기서 $E[V/m]$ 는 전위경도(potential gradient), $[A/m^2]$ 는 전류밀도(current density)이다.

전자의 이동에 의한 전기전도는 도체 또는 반도체에 직류 전장이 인가되었을 때 자유전자(free electron)의 이동(drift)에 의해 이루어지며, 원자 구조의 차이 때문에 반도체의 저항률은 도체의 저항률보다 크다. 도체와 반도체의 전기적 특성은 저항률의 온도특성에 의해 명확하게 구별되며, 어느 온도 범위에서 도체의 저항률은 증가하지만 반도체의 저항률은 감소하며 변동폭도 크다. 토양 중에는 다른 물질에 비해서 금속성 도체와 반도체의 함유량은 비교적 적지만 순금속 상태로 약간 함유하게 되면 대지저항률은 대단히 낮아지게 된다.

지구의 표면에 존재하는 모든 암석들은 기공성(porous)이며, 암석의 기공도는 그의 전기적 특성을 결정하는 중요한 요소이다. 화강암이나 석회암은 기공도가 1[%]이하로 매우 적지만 기공도(porosity)가 50[%]에 이르는 암석도 있다.

암석의 보이드(void)에 물을 포함한 물이 채워지면 저항률은 낮아지게 된다. 지구표면에 존재하는 암석의 전기전도(electric conduction)는 전해질에 의한 이온성 전도(ionic conduction)가 지배적이지만 수분의 함유량, 염분의 농도, 금속의 종류와 농도에 따라 암석에서의 전기 전도기구(electrical conduction mechanism)는 바뀌게 된다.

완전히 동경되어 있거나 깊게 매장되어 있어 높은 압력을 받는 암석에서는 전자성 전도(electronic conduction)가 우세하다. 대지표면 근처의 토양의 저항률은 수분의 함량과 수분에 용해되어 있는 염분의 특성에 따라 변화하므로 토양이나 암석의 저항률을 단일의 특정한 값으로 나타낼 수는 없다.

전기적관점에서 볼 때 대지는 다양한 모양과 크기, 다른 저항률을 갖는 물질의 혼합으로 이루어져 있으며 대지표면 가까이에서의 전기전도는 주로 전해질에 의해 일어나고 대지 저항률의 차이는 함유되어 있는 수분을 양과 염분의 특성에 따라 변화한다. 대지의 전기적특성을 지배하는 물리적 특성 요소중에서 비투자율(relative permeability) μ_r 은 약 1로 일정하지만 비유전율(relative permittivity) ξ_r 은 1~100의 범위이다. 대지저항률 ρ 는 1~10,000 $[\Omega \cdot m]$ 까지 변동하며 대지의 전기적특성에서 대지저항률 ρ 의 변동은 비유전율 ξ_r 의

변동보다 훨씬 더 크게 영향을 미친다. 비투자율과 비유전율은 직류와 저주파 전류의 전도에 있어서 중요한 요소는 아니다. 토양의 절연강도는 뇌서지와 같은 대전류(high current)의 통전현상에 대한 중요한 요소이며 이의 변동범위는 매우 좁다.

그림 2.1에 나타낸 바와 같이 지구의 전기 지질학적 모형(geolectric model of earth)은 매우 낮은 저항율을 갖는 반경 3,500[km]인 고온마그마 핵(hot magma core)과 고온이 단단하고 저항율이 낮은 물질로 구성된 2,850km두께의 두꺼운 cm으로 둘러 쌓인 구형의 고체덩어리(hot solid crust)로 모형화할 수 있다. 또한 비교적 저항률이 큰 암반으로 이루어진 또 다른 얇은 층이 그 외곽을 둘러싸고 있다. 균일한 저항율의 여러 수평층으로 이루어진 이와 같은 모형은 각 층에서의 저항률의 수직적 변동을 또 다른 층으로 볼 수 있는 것이 특징이다. 대부분의 접지를 설계시공하려 할 때 발생하게 되는 문제점에 있어서 대지의 구조가 실제의 측정에 의하면 좀더 복잡한 구조 일지라도 2층 구조의 대지모형이 개략적으로 잘 적용되는 경우가 있다.

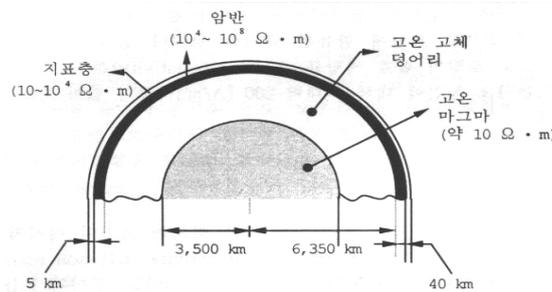


그림 2.1 전기지질학적 지구의 모형

접지전극의 매설되는 토양은 주로 저항체와 유전체로 작용하며, 고주파 영역을 제외하고는 순수저항체로 나타내는 것이 일반적이다. 또한 토양의 저항률은 접지전극 주변의 전위경도가 절연과괴강도 이하일 때는 전위경도에 영향을 받지 않지만 전위경도가 수 kV/cm 정도에서는 약간 변화한다.

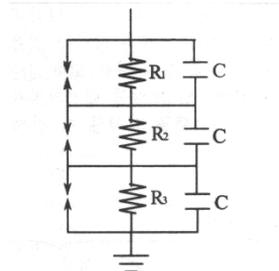


그림 2.2 토양의 전기적 등가회로

접지전극의 전위경도가 토양의 절연과괴강도(dielectric breakdown strength)를 넘어서게 되면 접지 전극표면에서 아크방전(arc discharge)이 발생하며, 아크가 대지의 하부 지층을 향하여 진전하여 접지전극의 실효크기는 증가하며, 마침내 접지전극 주변의 전위경도는 절연과괴강도 이하인 상태로 된다. 이와같은 토양의 전기적 특성을 고려한 등가회로를 그림 2.2에 나타내었다.

또한 접지전극 주변의 토양의 저항률은 접지전극에서 대지로 유입됨에 따라 변동한다. 접지전극에 유입되는 접지 전류의 크기가 증가하거나 지속시간이 길어지면 토양이 건조하게 되므로 토양에 함유된 습기의 양이나 열적 특성(thermal characteristic)이 변화하므로 토양의 실효 저항률 (effective resistivity)은 증가하게 된다. 따라서 접지전류밀도는 1초 동안에 대해서 대략 200[A/m²]이하의 값이 되도록 설계하는 것이 바람직하다.

대지 저항률

접지저항 및 접지효과에 영향을 크게 미치는 요인이 대지 저항률이므로 접지의 설계와 시공에 있어서 대지저항률(earth resistivity 또는 soil resistivity)을 정확하게 파악하는 것은 대단히 중요하다.

단면적이 1[m²]이고, 길이가 1[m]인 토양의 전기저항을 대지저항률, 대지고유저항 또는 대지비저항(specific resistivity)이라고 정의하며, 단위는 [Ω . m]이다.

또한 대지저항률 ρ [Ω . m]의 역수를 대지도전율(earth conductivity) σ [S/m]이라고 한다. 이들 동의어 중에서 대지 저항률이 가장 일반적으로 사용한다.

토양의 주성분은 규산(sio₂)과 산화알루미늄(A12O₃)이므로 완전한 건조상태에서는 전기가 흐르지 않는 절연체이다. 그러나 자연계의 토양이 완전한 건조상태에서는 아니므로 어느 정도의 도전성을 가지며, 토양에 수분이 함유되어 있으면 그 저항률은 급격히 낮아져서 전기가 잘 흐르게 된다.

즉, 금속에 비하면 매우 도전율이 낮은 반도체로 볼 수 있으며, 대표적인 물질의 저항률을 그림 2.3에 나타내었다.

대지저항률이 토양의 구성성분에 따라 차이가 10⁵배 이상 크게 나타나는 것은 진흙, 점토, 모래, 자갈, 암반 등 지질의 구성과 지형 등 장소에 따라 다른 값을 가지기 때문이다.

동(copper)의 저항률 108[Ω . m]에 비해서 일반적인 토양의 대지저항률은 100[Ω . m]이므로 10¹⁰배의 차이를 가지기 때문에 접지시스템을 설계할 때 접지전극 자체의 저항은 무시하여도 상관은 없다.

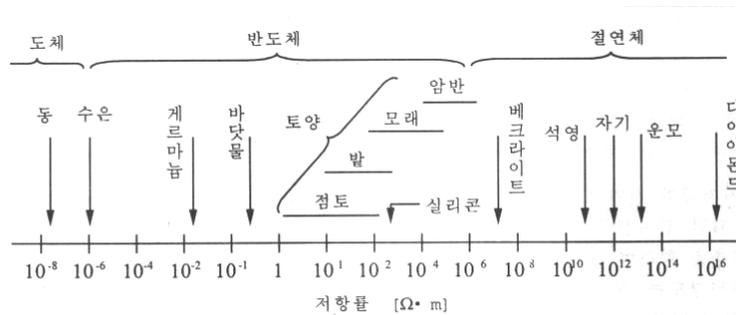


그림 2.3 대표적인 물질의 저항률

대지 저항률에 영향을 미치는 요인

대지 저항률은 항상 일정한 값을 가지는 것이 아니라 기후, 온도, 습도나 주위환경의 조건에 따라 변화한다.

대지저항률의 변동에 영향을 미치는 요인으로는 토양의 종류, 토양에 용해되어 있는 화학물질의 종류와 농도, 수분의 양, 온도, 토양을 구성하는 입자의 크기와 분포, 대지 표면으로부터의 깊이에 따른 압력과 조밀도(compaction)등이 있다.

다시 말하면 대지저항률은 토양에 함유되어 있는 전해질의 저항률이라고 볼 수 있으며, 지표수(surface water)는 대지저항률에 크게 영향을 미치지 않는다.

(1) 토양의 종류

일반적으로 토양을 구성하는 성분(composition), 입자의 크기, 분포, 균질성(homogeneity), 조밀도 등에 따라 대지의 전기적 성질도 다르며, 여러 가지 토양의 저항률을 표 2.1에 나타내었다.

표 2.1 토양의 종류와 저항률

토양의 종류	저항률 [$\Omega \cdot m$]
점토질의 논 또는 늪지	10~150
점토질의 밭	10~200
점토질의 산지	200~2,000
암반지대의 산지	2,000~5,000
자갈, 옥석이 깔린 해안지대	1,000~5,000
해안지대의 모래땅	50~100
양토(loam)	20~100
부식토(humic soil)	10~150
사점토(sandy clay)	50~500
소성점토	50
무수규산점토	200~3,000
편암(schist)	50~300
운모편암	800
바위 및 일반지대	104~107

(2) 수분의 영향

토양에서의 전기전도는 근본적으로 전해질 중에 함유되어 있는 이온의 이동에 의한 전기전도에 의해서 이루어지므로 토양 중에 수분이 함유되면 저항률이 저하하며, 수분의 함유량이 증가하면 대지저항률은 급격히 감소한다. 그림 2.4에 수분의 함유량에 따른 대지저항률의 변화에 대한 예를 나타내었다. 토양의 종류에 따라 다르기는 하지만 수분의 함유량이 약 16[%]이하에서는 수분 함유량의 증가에 따라 대지저항률은 급격히 감소하며, 16[%]이상이 되면 대지저항률의 감소는 완만하다.

토양에 함유되는 수분의 양은 토양을 구성하고 있는 입자의 크기와 다양성, 조밀도에 의존하게 된다. 균일한 토질의 토양에 매설되어 있는 접지전극의 접지저항은 대지저항률에 직접적으로 비례하므로 토양의 종류와 수분의 함유량은 접지저항을 결정하는 핵심적 중요요소라고 볼 수 있다. 또한 대지 저항률은 함유된 물의 종류에 따라 다르게 되며 여러 가지 종류의 물의 저항률의 개략 값을 표 2.2에 나타내었다.

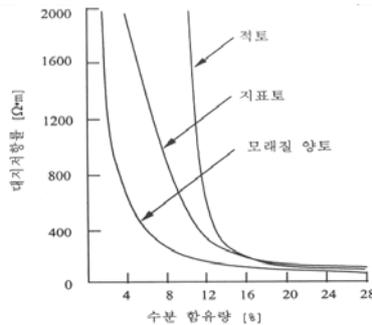


그림 2.4 대지저항률에 대한 수분의 영향

표 2.2 여러 가지 물의 저항률

--	--

물의 종류	저항률[Ω . m]
순수	200,000
증류수	50,000
빗물	200
수돗물	70
우물물	20~70
하천물	2
바닷물	0.15~0.3

(3) 온도의 영향

물질의 저항률은 온도에 따라 변화하며, 일반적으로 온도가 높아지면 금속의 저항률은 증가하는 데에 비해서 반도체나 전해질의 저항률은 감소한다. 토양에 함유되어 있는 수분도 전해질(electrolyte)이므로 대지저항률은 온도 상승과 더불어 감소한다. 그림 2.5에는 토양과 암반의 온도변화에 따른 대지저항률의 변화 특성에 대한 대표적인 예를 나타내었다.

토양이나 암반에 함유되어 있는 수분이 증발되거나 동결될 정도로 높은 온도 또는 낮은 온도로 변화되면 대지저항률은 수 배 정도 변화하는 경우도 있다. 그러나 수분이 증발되지 않는 범위에서 온도가 상승하면 수분에 포함되어 있는 이온의 이동도(mobility)가 증가하여 대지저항률은 약간 감소하게 된다. 모래와 자갈의 경우 대지저항률이 온도가 0[°C]인 때 비선형적으로 증가하는 특성은 토양이 동결되었을 경우 대지저항률이 급격히 증가하기 때문이다. 0[°C]이하의 온도에서의 대지저항률의 변화율은 영상의 온도에서의 변화율보다 대단히 크다.

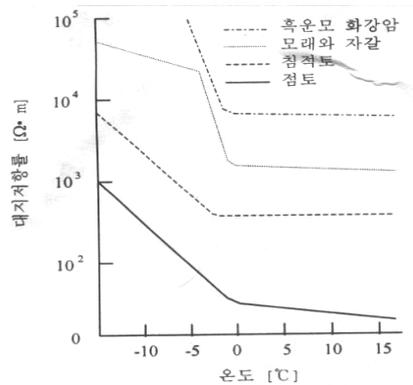


그림 2.5 대지저항률의 온도의존성

(4) 화학성분의 영향

토양의 저항률은 함유되어 있는 수분의 양에 따라 변화할 뿐만 아니라 토양중에 용해되어 있는 염분, 산, 알칼리등 화학 물질의 양이나 조성에 따라 대단히 크게 변화한다. 그림 2.6에는 대지저항률의 염분(염화나트륨)의 농도에 대한 영향의 대표적인 예를 나타내었으며, 토양의 종류나 수분의 함유량에 따라 염분의 영향은 크게 다르다.

대지저항률은 염분의 농도가 증가하면 급격히 감소하므로 접지저항의 저감을 위해 소금이나 화학 성분(chemical composition)의 접지저항 저감제(ground resistance lowering agent)를 사영하기도 하지만 지속성이 유지되도록 주의 하여야만 한다.

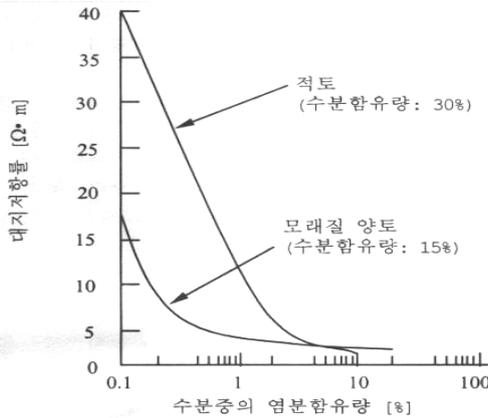


그림 2.6 염분과 대지저항률의 관계

(5) 개별적 영향

앞에서 기술한 바와 같이 대지저항률은 토양에 함유되어 있는 수분과 온도 등과 밀접한 관계를 가지고 있으므로 기후나 계절에 따라서도 크게 변화한다. 계절이 변하면 온도 뿐만 아니라 토양에 함유되어 있는 수분의 양도 함께 변하게 되므로 대지저항률은 대체적으로 기온이 낮으며 건조한 겨울철에 높고, 기온이 높고 습기가 많은 여름철에는 낮게 된다. 대지저항률의 계절적 변동량은 동일한 토질이라고 하더라도 장소와 시간, 접지전극의 형태와 매설 깊이 등에 관련된다.

또한 접지전극이 대지에 평행하게 매설되기도 하지만, 많은 경우 접지전극의 매설형태는 대지의 표면에 대하여 수직으로 설치되기도 한다. 토양은 그 깊이에 따라 온도가 다르거나 토질이 다른 이른바 다층 구조(multiple structure)를 이루기 때문에 실제로 대지 표면의 어느 한 점에서 그 아래 지층의 토양상태를 평가하기란 쉽지 않으므로 특정한 토질에 대해서 대지 저항률을 명시하기는 곤란하다.

인천지역의 평지에서 대지저항률의 평균값에 대한 연간 변동률의 예를 그림 2.7에 나타내었으며, 특히 접지전극의 매설깊이에 대한 의존성이 크게 나타남을 알 수 있다.

대지저항률의 연간 변동량은 지역에 따라 다르지만 대략 2~5배 정도인 것으로 알려져 있으며, 접지공사를 시설 할 때는 연간 접지저항의 변동을 고려하여 설계·시공 할 필요가 있다.

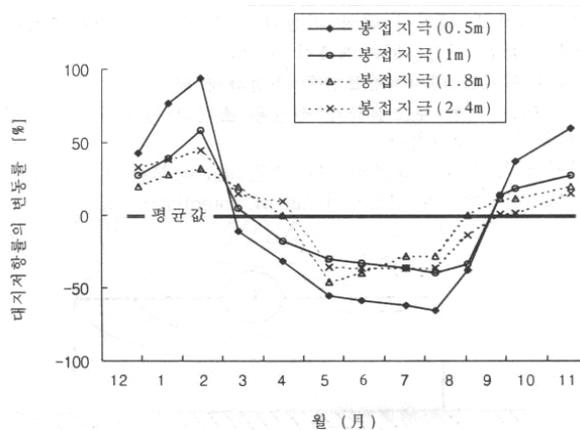


그림 2.7 대지저항률의 계절적 변동량

대지저항률의 측정

대지표면에서 깊은 지점까지 동일한 토질로 이루어진 토양의 단층구조의 대지는 거의 없고 대단히 복잡한 지층, 지형으로 이루어져 있는 경우가 보통이므로 대지 표면의 지층을 비롯하여 지하층의 대지저항률을 정확하게 측정할 필요가 있다. 현재까지 2전극법(two electrode method), 4전극법(four electrode method), 접지저항계(earth tester)을 이용한 간이측정법 등 여러 가지 대지저항률을 측정하는 방법이 제안되어 사용되고 있다. 이들 중에서 4전극법(Wenner법이라고도 한다)이 정확도가 우수하고 측정도 간편하므로 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 대지 구조가 복잡한 경우 대지저항률의 측정은 그리 간단하지 않으며, 특히 측정용 전극이 매설깊이에 따라 대지저항률의 변동율이 크다. 예를 들면 대지저항률이 측정용 전극의 매설깊이에 따라 상당히 변화하면 측정전극의 간격을 넓게 하는 것이 바람직하고, 각각의 대지저항률의 측정 방법의 원리를 잘 이해 하여야 할 필요가 있다.

전극법

2전극법(two electrode method) 또는 2점법(two-point method)은 균일한 토질이 아닌 토양의 대지저항률을 현장에서 개략적으로 측정하는 방법중의 하나로 절연봉에 부착된 2기의 소형전극을 사용한다. 측전지의 정극성(+)단자는 미소전류계를 경유하여 하나의 전극에 접속하며, 부극성(-)단자는 다른 전극에 접속한다. 계측기는 미리 규정의 측전지 전압으로 대지저항률 $\Omega \cdot \text{cm}$ 를 직접 읽을 수 있도록 교정하여 놓는다. 이동성이 간편하고, 대지나 굴삭 지점의 측벽 또는 바닥에 측정용 전극을 설치하여 대지저항률을 짧은 시간 내에 계측할 수 있는 방법이다. 그러나 정확성이 낮으며, 토양의 국부적인 위치의 대지저항률만을 측정하게 되는 단점이 있다.

주 접지전극 또는 대형 보조전극과 측정용 소형의 보조전극을 그림 2.8과 같이 충분한 이격거리를 두고 설치한다.

보조전극사이의 거리 x 가 보조전극의 반경 a_0 , a 보다 훨씬 크면 인가전압은 거의 측정용 소형 보조전극에서의 전압강하(fall-of-potential)로 된다.

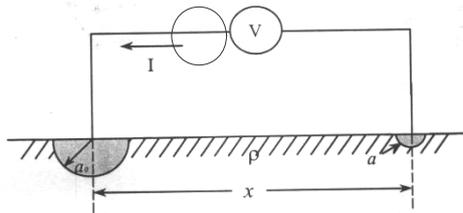


그림 2.8 2전극법에 의한 대지저항률의 측정

그림 2.8에 나타낸 측정회로의 합성 접지저항은

$$R = \frac{V}{I} = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{\alpha_0} + \frac{1}{\alpha} - \frac{2}{\chi} \right) \quad (2.2)$$

으로 표현된다. 두 개의 반구형 접지전극(hemispherical grounding electrode) 각각의 접지저항보다는 작아진다. 대지저항률 ρ 가 일정하다면 이는 인가 전류와 전압, 보조 전극의 크기와 이격거리에 의해서 결정 될 수 있다. 만약 $a \ll \alpha_0$, χ 가 되도록 측정회로를 구성하면 대지저항률 ρ 는

$$\rho = 2\pi\alpha \frac{V}{I} \quad (2.3)$$

이다. 따라서 측정용 소형의 보조전극의 반경과 측정전류 및 전압에 의해서 대지저항률이

산출된다.

4전극법

(1) 측정 원리

전류를 접지전극에 유입시켜 대지저항률을 측정하는 경우 측정용 전류가 대지를 침투한 깊이까지의 대지저항률의 평균값을 얻게 된다. 대지저항률 ρ 가 동일한 토질의 토양에 그림 2.9에 나타낸 바와 같이 두 개의 접지전극 A, B에 전류를 흘린 경우를 생각한다.

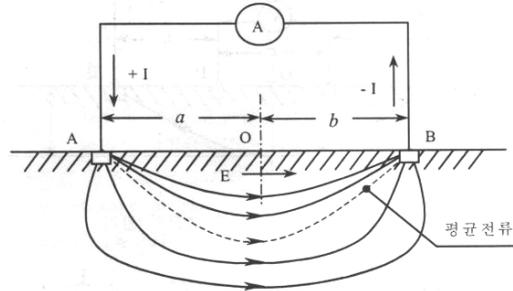


그림 2.9 점 O 직하부의 대지저항률 측정

접지전극 A, B에 형성된 반대부호의 전하의 존재 때문에 점 O에서의 전위경도는 다음 식과 같이 표현된다.

$$E = -\frac{\rho}{2\pi} \left[\frac{I}{a^2} - \frac{I}{b^2} \right] \quad (2.4)$$

만약 점 O를 중앙에 위치시키면 $a=b$ 이므로 점 O의 직하부에서의 대지저항률은 다음의 식에 의해서 산출된다.

$$\rho = \pi a^2 \frac{E}{I} \quad (2.5)$$

토양은 대개 동질의 토양이 아니므로 식(2.3)은 점 O에 하부에 위치한 접지전극 A, B사이의 평균전류 통로인 지층의 합성 대지저항률(apparent resistivity)을 나타낸다. 실제상 전위경도 E는 점 O에 대해 대칭인 점 C, D사이의 전위차를 전극 C, D사이의 거리로 나눈 값으로 식 (2.6)과 같다.

$$E = \frac{V}{C} \quad (2.6)$$

또한 전위차 V는 그림 2.10에 나타낸 바와 같이 측정용 전류 I와 전극 C, D사이의 거리 c의 함수로 다음 식과 같이 표현 될 수 있다.

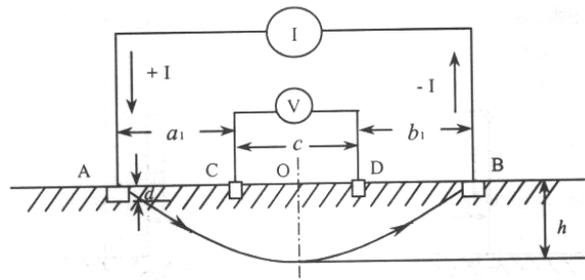


그림 2.10 합성 대지저항률 측정의 원리

$$V = V_C - V_D = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{b_1} - \frac{1}{b_1 + c} - \frac{1}{a_1 + c} \right) \quad (2.7)$$

식 (2.7)으로부터 점 O의 직하부인 지층의 합성 대지저항률을 식 (2.8)과 같이 산출할 수 있다.

$$\rho = \frac{2\pi}{\frac{1}{a_1} + \frac{1}{b_1} - \frac{1}{b_1 + c} - \frac{1}{a_1 + c}} \frac{V}{I} \quad (2.8)$$

식(2.8)은 측정용 접지전극사이의 간격과 접지전극의 길이에 의존하지 않는 합성대지저항률을 산출하는 일반 공식이며, 균일한 토질의 토양인 경우 합성 대지저항률은 실제의 대지저항률이 된다. 또한 접지전극의 매설깊이를 그림 2.10에 표시된 바와 같이 d 라고 하면 $a_1 = b_1 = c$ 이고 이를 a 에 나타낸 경우 대지저항률은

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4d^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + d^2}}} \quad (2.9)$$

로 표시된다.

(2) Wenner 4전극법

Frank Wenner 가 1915년에 발표한 4개의 전극을 직선상의 동일한 간격으로 배치하는 방법으로써 현재 대지저항률의 측정방법으로 가장 많이 사용되고 있으며, Wenner 4전극법(Wenner's four electrode method)이라고 한다. 이것은 그림 2.11에 나타낸 바와 같이 4개의 전극을 대지에 설치하고 양쪽 바깥쪽의 전극간에 흐르는 전류 I 와 안쪽 2개의 전극간에 유도되는 전압 V 를 측정하여 대지저항률을 산출하는 방법이다. 외측의 두 접지전극 C1과 C2사이에 전원을 공급하여 대지에 전류를 흘리고, 이 때 안쪽의 두 접지전극 P1과 P2 사이에 생기는 전위차를 측정하여 V/I 로부터 접지저항 $R[\Omega]$ 을 구할 수 있다. 또한 전극 간격을 $a[m]$ 라 하면 대지저항률 $\rho[\Omega.m]$ 은 식 (2.8)으로부터 산출된다. 즉 식(2.8)에서 $a_1 = b_1 = c$ 이고, $V/I = R$ 이므로

$$\rho = 2\pi a R \quad (2.10)$$

이 되어 대지저항률 ρ 를 구할 수 있게 된다. 또한 측정용 접지전극의 매설깊이가 전극간 거리에 비해서 대단히 적은 경우 즉, $d \ll a$ 의 조건이면 식 (2.9)으로부터도 식 (2.10)이 산출된다. 따라서 4전극법(four electrode method) 또는 4점법(four-point method)을 적용하는 경우 $a \geq 20d$ 인 조건으로 대지저항률을 측정하는 것이 바람직하며, 식 (2.10)은 대체적으로 깊이 $(0.75 \sim 1)a$ 인 지점의 토양의 평균 대지저항률 (mean earth resistivity)을 나타낸다.

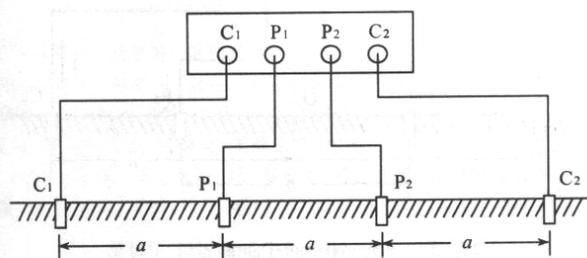


그림 2.11 Wenner 4전극법의 구성도

측정용 전압. 전류 접지전극 C_1, C_2, P_1, P_2 의 접지저항에는 관계없이 대지저항률이 산출된다. 전극간격 a 를 크게 하면 측정용 전류가 침투하는 깊이까지의 대지저항률의 평균값을 측정할 수 있게 된다. 지중에 수도관이나 가스관 등 금속관이 매설되어 있으면 측정용 전류가 이들 금속 도체를 통하여 흐를 수도 있으므로 측정에 오차를 가져올 수도 있다. 따라서 4전극법을 이용하여 대지저항률의 정확한 측정을 위해서는 4전극의 배열 방향과 간격을 변화시켜 가면서 여러 회 측정하여 평균값을 취하는 것이 바람직하다.

(3) Schlumberger-Palmer법

Wenner 4전극법에서 측정용 접지전극 사이의 간격 a 가 넓은 경우 전위검출용 전극 사이의 전위차가 매우 낮아져 전위차의 검출이 곤란하고 오차가 발생할 수 있다. 따라서 측정 전류를 많이 흘려야 되지만 이것도 영리한 일은 아니며, 상용의 계측기를 사용하여 대지저항률을 측정하는 것은 부적당하다. 따라서 깊은 대지의 하부 지층 토양의 저항률을 측정하고자 하는 경우와 같이 측정용 전류전극 사이의 간격이 넓을 때 전위검출용 전극을 전류보조 전극에 가까이 위치하도록 이동시켜 검출전압을 높이는 방법이 Schlumberger-Palmer에 의해서 제안되었으며, 부등간격 4전극법(unequally spaced four electrode method) 이라고도 한다. 동일한 측정 전류에 대해서 Wenner 4전극법에 비해서 검출전압이 높으므로 접지전극간 거리가 먼 경우도 측정이 가능하고 정확도가 개선된다. 그림 2.12에 나타낸 바와 같은 측정용 접지전극의 배치일 때 대지저항률은 식(2.8)으로부터

$$\rho = \pi \left(\frac{a^2}{b} - \frac{b}{4} \right) R \quad (2.11)$$

와 산출된다.

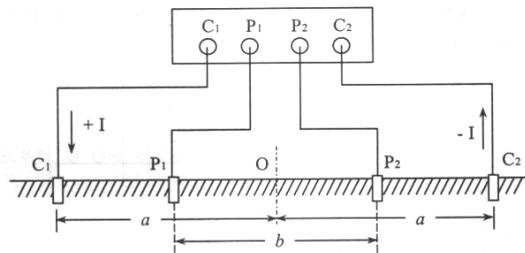


그림 2.12 Schlumberger-Palmer법의 구성도

간이측정법

접지저항이 접지전극 주변의 대지저항률에 비례하는 관계를 이용하는 것으로 길이와 반경을 알고 있는 봉형 접지전극(rod-type electrode)을 설치하고, 이 접지전극의 접지저항을 측정하여 그 값으로부터 대지저항률을 이론적으로 산출하는 방법이다. 즉, 봉형 접지전극의 접지저항을 측정하면 그 값으로부터 대지저항률을 역으로 산출할 수 있다. 그림 2.13과 같이 대지의 표면에 봉형 접지전극을 설치한 경우 접지저항은 이론적으로

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l}{a} \quad (2.12)$$

과 같이 표현된다. 여기서 $R[\Omega]$ 은 접지저항, $\rho[\Omega \cdot m]$ 은 대지저항률, $l[m]$ 은 봉형접지전극의 매입깊이, $a[m]$ 은 봉형 접지전극의 반경이다. 따라서 식 (2.12)으로부터

$$\rho = \frac{2\pi l R}{\ln \frac{2l}{a}} \quad (2.13)$$

와 같이 대지저항률을 산출할 수 있다.

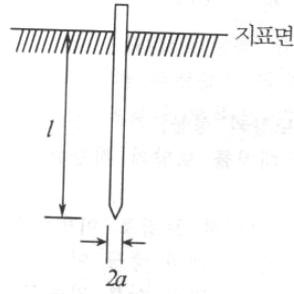


그림 2.13 봉형 접지전극

식 (2.13)을 적용하여 산출한 대지저항률은 합성 대지저항률이며, 봉형 접지전극의 매설깊이에 따라 대지저항률의 값은 달라지게 된다. 봉형 접지전극의 매설깊이에 따라 대지저항률을 측정한 결과의 예를 그림 2.14에 나타내었다. 이것으로부터 측정지점은 대지 구조가 최소한 3층 이상의 지층으로 이루어졌음을 알 수 있으며, 대지의 지층 구조(soil structure)를 결정하는 데 활용할 수 있고, 대지저항률이 낮은 위치소에 접지공사를 할 수 있는 정보를 얻게 된다.

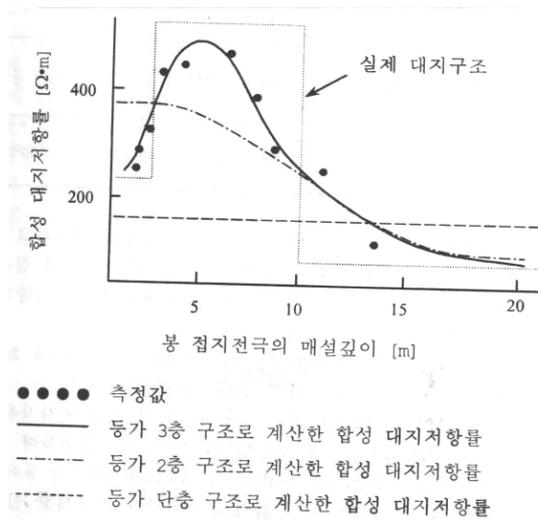


그림 2.14 봉형 접지전극의 매설깊이에 대한 대지저항률의 측정값

대지의 구조와 대지저항률

대지의 분류

대지저항률은 대지의 위치, 토양의 성분, 기후, 토양에 함유된 화학적 성분 등 여러 가지 요소에 의해서 변화하며, 대지를 토지의 저항률의 크기에 따라 표 2.3에 나타낸바와 같이 나눌 수 있다.

대지표면에서 깊은 위치까지 균일한 토질로 이루어진 대지의 경우는 그리 흔하지 않으며, 다른 토질의 토양으로 된 몇 개의 층을 이루고 있는 경우가 보통이므로 지층에 따라 대지저항률도 다르다. 대지표면의 상부 지층의 대지저항률이 낮지만 깊은 층의 대지저항률이 대단히 큰 경우 또는 이와 반대의 경우도 있기 때문에 접지의 설계에 있어서는 대지저항률의 정확한 측정과 대지 구조의 해석은 중요한 요소이며, 핵심적 사항이 된다.

표 2.3 저항률에 의한 대지의 분류

분류	저항률[Ω.m]	특징
저 저항률지대	$\rho < 100$	항상 토양에 수분이 많이 함유되어 있는 하구 또는 해안지역
중 저항률지대	$100 \leq \rho < 1000$	지하수를 쉽게 얻을 수 있는 내륙의 평야지대
고 저항률지대	$1000 \leq \rho$	배수가 잘되는 구릉지대, 고원, 암반지대

합리적인 접지의 설계와 시공을 위해서는 미리 대지 구조를 조사하고 정확한 대지저항률의 측정이 필요하다. 대지의 구조를 파악하는 기법에는 대지의 깊은 구멍을 뚫고 토양을 채취하여 토질을 분석하는 직접적방법과 대지표면에서 지층의 정보를 알아내는 간접적방법이 있다.

탄성파나 음파를 이용하는 물리탐사법(physical probing method)과 토양의 전기적특성 값을 측정하는 전기 탐사법(electrical probing method)이 있다.

전기탐사법으로는 장파(3~300 kHz)의 전자파를 투사하여 이의 반사작용을 이용하는 전자탐사법(radio-wave method), 깊게 구멍을 뚫고 전극을 삽입하여 대지저항률을 측정하는 검층법(electrical well logging method)과 Wenner 4전극법 등이 있다.

대지저항률의 측정방법인 Wenner 4전극법이 가장 널리 사용되고 있으며, 간이형 접지저항계를 사용하는 방법도 있다.

접지전류의 분포

접지전극을 통하여 대지로 흐르는 접지전류의 분포는 접지저항은 물론이고 대지저항률의 측정에도 영향을 미치게 된다. 특히 측정용 전류가 대지에 어떻게 분포되어 흐르며 얼마의 깊이까지 흐르는가에 따라 측정값이 달라지므로 접지전류의 분포를 파악하는 것은 대지저항률의 측정, 접촉전압과 보폭전압의 산출에 있어서도 중요한 요소가 된다.

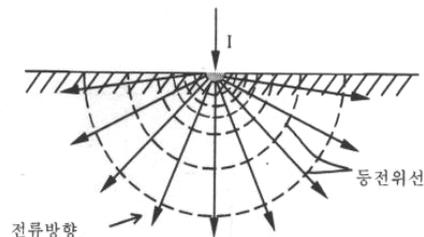
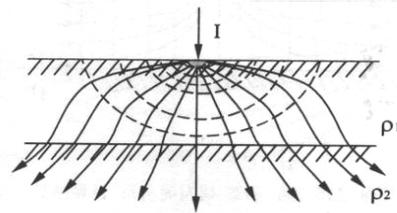


그림 2.15 단층의 구조 대지에서 전류분포

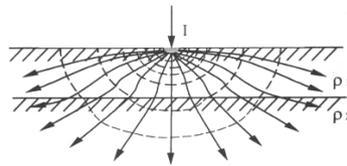
균일한 토질인 단층구조(single layer structure)의 대지에 설치된 접지전극을 통하여 흐르

는 전류는 그림 2.15에 나타난 바와 같이 방사상의 분포로 흐르게 된다. 그러나 다층 구조 (multiple layer structure)의 대지에 흐르는 전류분포는 각 지층의 대지저항률의 크기에 따라 변화하게 되며 복잡한 양상을 나타낸다.

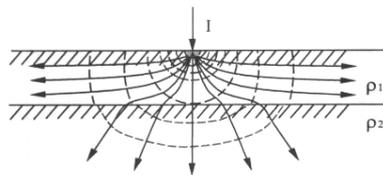
그림 2.16에 2층 구조(two layer structure)의 대지에 흐르는 전류분포를 나타내었으며, 지표층의 대지저항률이 하부 지층의 대지저항률에 비해서 큰 경우 전류가 흐르는 범위는 좁아진다, 반면에 지표층의 대지저항률이 하부 지층의 대지저항률보다 작은 경우 전류는 분산되어 넓은 범위에 걸쳐 흐르게 된다. 이와같이 대지의 지층구조와 각 층의 대지저항률의 크기가 다른 경우 측정조건에 따라 합성 대지저항률의 측정값은 다른 값을 나타내게 된다.



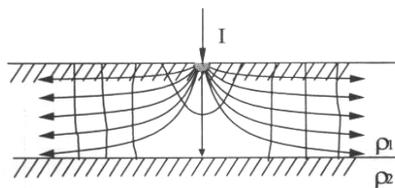
(a) $\rho_2 = 0$



(b) $\rho_2 < \rho_1$



(c) $\rho_2 > \rho_1$



(d) $\rho_2 = \infty$

그림 2.16 2층 구조 대지에서의 전류분포

Wenner 4전극법에서의 전류분포를 살펴보면 접지전류의 분포는 지층구조와 측정용 전류를 흘리는 전류보조전극 사이의 간격에 따라 다르게 된다. 그러나 이들 요인을 모두 고려하면 대단히 복잡하기 때문에 그림 2.17에 나타난 바와 같이 간단한 단층구조의 대지를 대상으로 알아본다.

측정용 전류를 흘리는 전류보조전극사이의 중앙점 O에서 깊이 방향을 z축으로 나타내면 z축을 따라 전류밀도는 변화하게 되며, 지표부분에 많은 전류가 흐르고 깊이가 증가함에 따라

라 감소한다. 즉, 대지표면에서의 전류밀도가 가장 크고 깊이 들어갈수록 작아지게 되는데 측정용 전류보조전극의 대지표면의 중앙점 O에서의 전류밀도 j_0 와 z축상의 임의의 점에서의 전류밀도 j 의 비는 다음식으로 표현된다.

$$\frac{j}{j_0} = \frac{1}{\sqrt{\{1 + (\frac{z}{D})^2\}^3}} \quad (2.14)$$

식(2.14)로 표현된 전류밀도의 분포를 그림 2.18에 도식적으로 나타내었으며, 접지전류의 침투깊이(penetration depth)를 개략적으로 산출할 수 있다. Wenner 4 전극법에 비유한다면 $D=3a/2$ 이므로 전류분포의 평균깊이 즉, $j/j_0=0.5$ 인 위치는 대략 $z=1.15a$ 인 지점이다. 그러나 앞에서 언급한 바와 같이 전류분포는 지층 구조와 각 층의 대지저항률에 따라 변화되므로 실제의 측정에 있어서는 이러한 요인들을 고려하여 측정의 정확도를 검토할 필요가 있다.

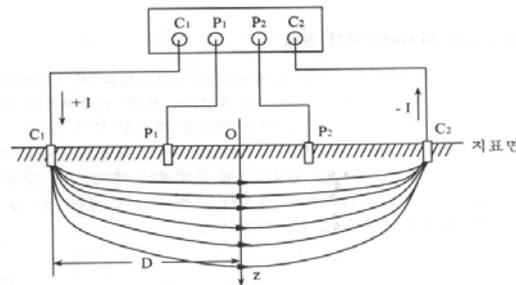


그림 2.17 4전극법에서의 접지전류의 분포

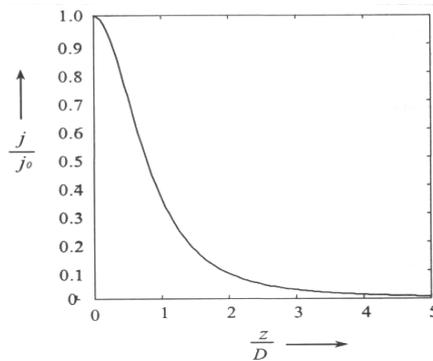


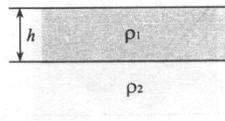
그림 2.18 대지에 흐르는 전류밀도의 변화

Gish와 Rooney는 4전극법으로 측정한 합성 대지저항률은 접지전극 사이의 간격과 거의 같은 깊이의 토질의 평균저항률이고, 측정용 전류는 전극 간격보다 더 깊은 깊이까지 침투하지 않는다고 지적하였으나 단층구조의 대지에 대해서는 차이를 보이고 있다. 그리고 하부 층에 저항률이 낮은 토양의 지층이 있으면, 이 층에서의 전류밀도는 더 크게 될 수도 있으므로 면밀한 분석이 필요하다.

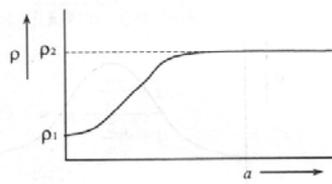
대지구조와 대지저항률의 관계

2.4.2 (2)항에서 기술한 Wenner 4전극법에서의 대지저항률은 식 (2.10)으로부터 산출되므로 측정용 접지전극의 간격에 따라 다르게 되며, 또한 전극간격에 따라 측정용 전류의 침투 깊이도 변하게 되므로 대지의 지층구조를 파악할 수가 있다.

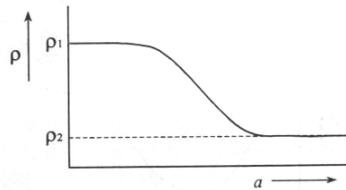
즉, $\rho - a$ 곡선을 구하면 지층의 구조와 각 지층의 대지저항률을 산출 할 수 있게 된다. 그림 2.19에는 수평 2층 구조인 대지, 그림 2.20에는 수평3층 구조인 대지의 $\rho - a$ 곡선의 대표적인 예를 나타내었다. 대지의 지층구조에 따라 $\rho - a$ 곡선은 변화하며, 일반적으로 대단히 복잡한 양상을 가지고 있다.



(a) 수평 2층 구조의 대지모델

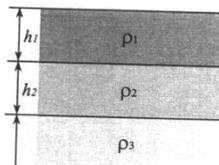


(b) $\rho_1 < \rho_2$ 인 경우

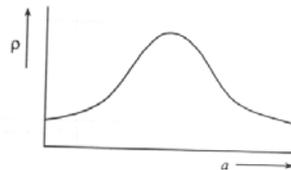


(c) $\rho_1 > \rho_2$ 인 경우

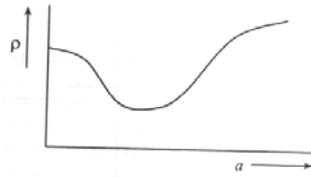
그림 2.19 수평2층 구조인 대지의 $\rho - a$ 곡



(a) 수평 3층 구조의 대지모델



(b) $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$ 인 경우



(c) $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$ 인 경우

그림 2.20 수평 3층 구조인 대지의 곡선

이와같이 $\rho - a$ 곡선을 구하게 되면 대지의 지층의 수, 각 지층의 대지저항률 및 지층의 두께 등 대지의 구조 해석을 통하여 알 수 있으며 이것을 바탕으로 효과적인 접지의 시공방법을 선정 할 수 있으므로 합리적인 접지 설계의 기본이 된다. 예를 들면 그림 2.19(b)와 그림 2.20(b)과 같은 경우는 상부지층에 짧은 길이의 봉형접지전극을 여러개 병렬로 시설하거나 매설 지선 망상접지전극을 시설하는 것이 효과적이다. 그림 2.19(c)의 경우는 깊은 위치에 시설하는 시공법을 시공방법을 적용하며 그리고 그림 2.20(c)의 경우는 중간 지층에 접지전극이 위치하게 되는 시공방법을 적용하는 것이 바람직하다. 이와같이 $\rho - a$ 곡선은 대지의 지층 구조를 파악하고 효과적인 접지의 시공방법과 매설 깊이를 선정하는 중요한 정보를 제공하는 접지설계에 있어 기본자료이다.

현재 까지 대지구조의 해석에는 여러 가지 방법이 제안되었으며 일반적으로 접지 시스템의 설계(design of grounding system)에 있어서는 2층 대지구조가 가장 많이 적용되고 있으므로 여기에서도 2층 대지 구조의 해석에 대하여 살펴본다. 그림 2.19(a)에 나타난 바와 같이 상부지층의 대지저항률을 ρ_1 , 하부지층의 대지저항률을 ρ_2 상부지층의 두께를 h 이고, 반사계수를

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} = \frac{\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1}{\frac{\rho_2}{\rho_1} + 1} \quad (2.15)$$

이라고 하면, 그림 2.19에 나타난 2층 대지구조에 대한 Wenner 의 4전극법으로 측정된 합성 대지저항률은 다음 식으로 표현된다.

$$\rho(a) = \rho_1 \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 + (2nh/a)^2}} - \frac{1}{\sqrt{4 + (2nh/a)^2}} \right\} \right] \quad (2.16)$$

또한 직경이 d [m]이고, 길이가 l [m]인 봉형 접지전극을 2층 구조의 대지에 시설한 경우의 봉형 접지전극이 매설되어 접지저항의 산출에 적용할 수 있는 합성 대지저항률은 다음의 G. F.Taggs의식으로 나타낼 수 있다.

① $l < h$ 인 경우

$$\rho_d = \rho_1 \left(1 + \frac{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{2} \frac{1n \frac{nh+1}{nh-1}}{1n \frac{4l}{d} - 1} \right) \quad (2.17)$$

② $l > h$ 인 경우

$$\rho_d = \frac{\rho_1 \rho_2 l}{\rho_2 h + \rho_1 (l - h)} \left[1 + \frac{\sum_{n=1}^{\infty} K^n 1n \frac{2nh + l}{(2n - 2)h + l}}{1n \frac{4l}{d} - 1} \right] \quad (2.18)$$

그림 2-21빈곳

식(2.16)의 $\rho(a)$ 는 상부 지층의 대지저항률 ρ_1 , 하부지층의 대지저항률 ρ_2 및 h/a 의 함수로 되어 있다. 그림 2.21에는 ρ_2/ρ_1 을 파라미터로 하여 a/h 에 대한 $\rho(a)/\rho_1$ 의 관계를 나타내었으며, 이를 Sundbrg의 2층 표준곡선(two layer standard curve)이라고도 한다.

따라서 Wenner의 4전극법으로 측정된 $\rho - a$ 곡선을 그림 2.21과 비교하여 ρ_2/ρ_1 을 결정할 수 있다. 또한 ρ_2/ρ_1 가 결정되면 상부지층의 대지저항률 ρ_1 과 상부지층의 두께 h 를 산출할 수 있다.

다층 구조의 대지저항률

접지전극을 설치하였을 때 접지저항이 형성되는 범위의 대지의 구조는 대단히 복잡하고 다양하며, 균일한 토질로 이루어진 단층 대지는 매우 드물다. 접지저항의 산출에 있어서도 접지전극이 여러 지층에 걸쳐 매설되었다면 각 지층의 대지저항률을 고려하여야 정확하게 접지저항을 계산할 수 있지만 접지전극의 형상도 단순하지 않기 때문에 대단히 어렵다. 따라서 실용적으로는 다층구조의 대지에 매설된 주어진 접지전극의 형상에 대한 접지저항을 균일한 토양의 대지로 가정하여 산출하는 것이 일반적이다. 균일한 토질의 단층 대지로 가정하여 접지저항을 산출하기 위해서는 접지저항의 형성 영역(formative region of ground resistance)에 대한 대지저항률을 등가의 균일한 대지로 환산하는 것이 필요하다. 다층 구조의 대지를 등가의 균일한 토양의 대지로 나타내는 방법으로는 평균 대지저항률(mean earth resistivity) 또는 등가 대지저항률(equivalent earth resistivity)을 적용하는 방법이 있다.

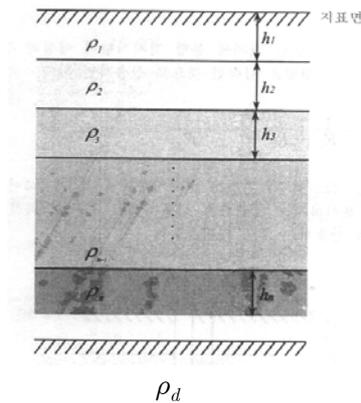


그림 2.22 다층 구조의 대지

그림 2.22에 나타난 바와 같이 수평인 n 층의 대지를 고려할 때 각 지층이 병렬로 접속되어 있는 것으로 가정하여 합성 저항을 산출하는 방법으로 계산하면

$$\frac{h_1 + h_2 + h_3 + \dots + h_n}{\rho_d} = \frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} + \frac{h_3}{\rho_3} + \dots + \frac{h_n}{\rho_n} \quad (2.19)$$

의 관계가 성립된다. 따라서 평균 대지저항률 ρ_d 는

$$\rho_d = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\rho_i}} \quad (2.20)$$

와 같이 구할 수가 있다.

또한 그림 2.23과 같이 다층인 대지에 봉형 접지저항이 매설된 경우의 접지저항은 각 지층에서의 접지저항이 병렬로 접속된 것으로 산출하면 된다. 즉,

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (2.21)$$

과 같이 구하면 된다. 그러나 각 지층의 대지저항률과 각 지층에서의 접지저항을 산출하는 것이 그다지 용이하지는 않으므로 실용적이지 못하다. 따라서 등가적으로 다음과 같이 접지저항을 산출하는 것이 일반적이다.

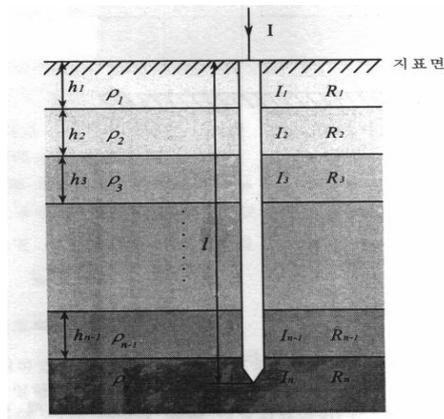


그림 2.23 다층 구조의 대지에 매설된 봉형 접지전극의 접지저항의 산출

봉형 접지전극에 흐르는 전류밀도가 각 지층의 대지저항률에 반비례하는 것으로 가정하면 각 지층에서의 전류는 균일하게 된다. 따라서

$$\rho_1 I_1 = \rho_2 I_2 = \rho_3 I_3 = \dots = \rho_n I_n \quad (2.22)$$

$$I_1 h_1 + I_2 h_2 + I_3 h_3 + \dots + I_n (l - h_1 - h_2 - h_3 - \dots - h_{n-1}) = I \quad (2.23)$$

의 관계가 성립된다. 식(2.21)~식(2.23)으로부터 균일한 토양으로 등가화시킨 대지로 생각할 때의 등가 대지저항률 ρ_e 는

$$\rho_e = \frac{l}{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{h_i}{\rho_i} + \frac{l - h_{n-1}}{\rho_n}} \quad (2.24)$$

$$\text{여기서, } h_{n-1} = \sum_{i=n}^{n-1} h_i \quad .$$

가 된다.

이와 같이 접지저항을 산출하게 되면 다른 방법에 비해서 간단하며 실용적이다.

예를 들면 2층 구조의 대지에 봉형 접지전극이 매설된 경우라고 생각하면 등가화시킨 대지저항률은 식(2.24)으로부터

$$\rho_e = \frac{l}{\frac{h_1}{\rho_1} + \frac{l - h_1}{\rho_2}} \quad (2.25)$$

와 같이 비교적 쉽게 얻을 수 있기 때문에 접지저항의 산출도 용이하다. 즉, 식(2.18)의 우변의 제1항만을 고려한 개략적인 계산식과 동일하다.

다층 구조의 대지에 접지전극을 설치하는 경우 각 층의 대지저항률이 다르며, Wenner의 4전극법으로 대지저항률을 측정하더라도 전극의 간격에 따라 대지저항률이 다르기 때문에 어느 간격에서 측정한 대지저항률이 적합한가를 결정하는 것이 매우 어렵다. 따라서 Wenner의 4전극법으로 대지저항률을 측정한 결과를 바탕으로 접지전극의 매설깊이에 상응하는 위치의 대지저항률을 추정하는 것이 바람직하다. 대지저항률의 측정값은 합성 대지저항률이며, 또한 측정할 때의 측정용 전극의 간격에 따라 다르게 되므로 $\rho - a$ 곡선으로부터 지층구조와 지층의 깊이, 각 층의 대지저항률을 산출한다. 그리고 접지전극이 매설되는 위치의 대지저항률을 추정하여 접지저항의 산출에 적용하는 방법이 효과적이다.

앞에서 설명한바와 같이 접지전극이 설치되는 위치의 합성 대지저항률을 추정하는 방법으로는 평균 대지저항률과 등가 대지저항률이 있다. 평균대지저항률은 Wenner의 4전극법으로 측정용 전극의 간격을 여러 가지로 하여 측정한 결과의 평균값으로부터 얻을 수도 있다.

이 방법은 넓은 범위에 걸친 대지저항률의 평균값이므로 접지전극이 놓이는 위치의 대지저항률과는 차이가 생길 수도 있다. 따라서 식(2.25)을 적용하여 합성된 등가 대지저항률을 산출하여 접지저항의 산출에 적용하는 방법이 정확성 측면에서는 우수하다고 생각된다.

일반적으로 시공하는 접지전극이 대단히 크거나 천공(보링)공법(boring method)을 채용하는 경우를 제외하고는 접지전극의 매설깊이에서의 대지저항률은 전극간격을 매설깊이와 동일하게 하여 측정한 저항률을 채용하여도 계산 값과 측정 값 사이의 차이가 그다지 크지 않을 경우도 많다. 따라서 규모가 비교적 크지 않은 접지전극에 대해서는 어려운 토양의 해석을 통하여 각 지층의 저항률을 산출하지 않고도 측정으로부터 얻은 곡선의 대지저항률의 값을 적용하여 접지저항을 산출하여도 지장이 없다. 그러나 천공 공법을 적용하는 경우는 굴삭깊이까지의 각 지층의 저항률을 산출하여 접지저항을 계산하지 않으면 오차가 크게 발생하게 되는 경우도 있다.