

최적 접지설계를 위한 대지파라미터의 측정 및 해석 방법

심 건 보
(용익대 과학기술연구소 연구원)

1. 서 론

전기·전자 및 통신설비 등에 접지(Grounding)을 한다는 것은 대지와 각 설비를 전기적으로 낮은 저항값을 갖도록 접속시키는 것을 말하며, 최종적인 접지의 목표는 인간이나 각종 전기·전자 및 통신설비기 상호간에 대하여 안전하고 안정된 동작 특성을 확보하는데 있다.

현대 문명생활에서 사용하는 모든 에너지 중에서 전기 에너지는 사용에 매우 편리하고 제어하기가 쉬울 뿐만 아니라, 인간의 능력을 확대시키는데 필수적이기 때문에 전기에너지의 사용이 증가되고 있는 추세이며, 또한 최근에는 전기·전자 및 통신기기들의 전자화, 고도의 정보화 진전에 따라 컴퓨터 등의 정밀기기 보급이 증가하고 있다. 따라서 최근에는 접지에 대한 관심이 더욱더 증가되고 있어서 접지라고 하는 것이 단지 대지만을 대상으로 하는 것이 아니라 지상 공간의 전위변동을 적게하여 특히 전자·통신기기 등에 대하여 전위 변동에 의한 오동작 등을 방지하기 위한 목적으로 접지기술이 전개되고 있다.

이러한 환경하에서 접지설계의 첫번째 단계는 접지의 목적을 충분히 달성할 수 있는냐의 성패에 직접적인 영향을 미치는 대지파라미터(대지의 지층별 고유저항과 각 지층의 두께)를 구하는 것이다. 이러한 대지파라미터를 구하기 위해서는 대지고유저항의 측정이 필수적인데, 대지고유저항 측정방법은 지표면의 특정 지점에 전류를 흘려 이때의 전기적 응답(전위차)으로부터 도선 매개체(대지)의 전기적 특성을 결정하는 것으로, Wenner의 전극법, Schlumberger 전극법 등이 널리 이용되고 있다. 그러나, 대지는 일반적으로 지층에 따라 대지고유저항이 다른 다층구조이며, 대지고유저항은 계절과 온도, 습도 등의 영향을 받는 종속변수이므로 이를 정확하게 추정하는 것은 대단히 복잡한 문제이다. 여기에서는 최적 접지설계를 위한 대지의 파라미터를 측정하고 해석하는 여러방법들에 대하여 다루고자 한다.

2. 비균질 토양의 대지파라미터

실제의 토양은 항상 비균질이며, 이들의 비균질성으로부터 많은 형태의 대지구조 모델을 얻을 수 있다. 대부분의 대지는 진흙, 모래, 자갈, 점토, 이들의 혼합물, 바위 등의 여러 층으로 이루어져 있다. 이러한 층들은 대개 지표면과 평행하거나 지표면과 각을 이루며 경사져 있다. 여기에서 지하수가 포함하고 있는 물질이나 수분의 증가에 따라서 고유저항의 변화가 많이 일어나는 부가적인 층으로 작용한다는 사실을 알아야 한다. 이론적인 관점에서 병렬층의 문제는 비록 결과는 복잡하고 어려울지도 모르지만 결과는 비교적 간단한 문제이다.

고유저항의 변화는 수직적인 단층에 의해서 생기며, 이 단층의 측면에서 토양은 다른 성분을 가지거나 여러 층의 두께가 변할 수도 있다. 이러한 경우에, 고유저항의 중대한 변화가 있을 수도 있으며, 이런 변화는 감지될 수 있고, 또한 단층의 위치를 찾는 데 사용된다. 매설물은 어떤 선호될 수 있는 조건하에 매설될 수 있으며, 이 매설물은 접지도체가 매설물의 위에 있거나 매설물의 부근으로부터 완전하게 제거될 때 얻어지는 겉보기 저항율의 차이를 나타나게 한다. 지하 매설물의 위치는 예를 들면, 고고학적 특징, 광물체 및 토양의 측면변화 등이 어떻게 위치하는가 하는 것을 추정하는데 많은 응용이 되고 있다.

다층구조의 비균질토양을 가장 간단한 2층 구조로 등가화하여 고찰하기 위해서 전극간격이 각각 a 인 그림 1을 생각하기로 하자. 두께가 h 이고, 저항율이 ρ_1 인 표면층과 아래방향으로 두께가 무한 길이며, 저항율이 ρ_2 인 두 번째 층이 있다.

전류 I 는 전극 A에서 들어가고 전위전극 B, C 및 D로 나온다. 먼저 B에서의 전위를 생각해 보자. 전극 B로부터 거리 a 만큼 떨어진 전극 A에서의 전류원에 의한 B의 전위는

$$\frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{[a^2 + (2nh)^2]^{1/2}} \right] \quad (1)$$

이고, 여기서, $k = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$ 를 나타낸다. 전류는 전

극 B로부터 $2a$ 의 거리에 있는 전극 D로 나간다. 따라서 전극 D에 의한 전극 B의 전위는 다음과 같다.

$$-\frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{2a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{[4a^2 + (2nh)^2]^{1/2}} \right] \quad (2)$$

결과적으로 전극 B에서의 총 전위는

$$V_B = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{2a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{[a^2 + (2nh)^2]^{1/2}} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{[4a^2 + (2nh)^2]^{1/2}} \right] \quad (3)$$

이 된다.

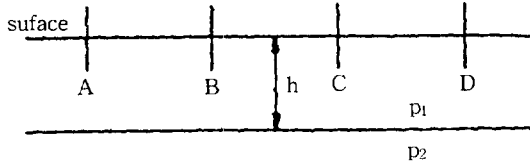


그림 1. 2층 대지구조와 wenner의 4전극 배치

계통의 대칭성으로부터 전극 C에서의 전위는 전극 B의 전위와 방향은 반대이지만 같은 크기를 나타내서 전극 B와 C의 차이는 $2V$ 가 된다. 그러므로,

$$V_{AB} = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{a} + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{[a^2 + (2nh)^2]^{1/2}} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{[4a^2 + (2nh)^2]^{1/2}} \right] \quad (4)$$

로 정리되고, 이 식은 다시 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$2\pi a \frac{V_{AB}}{I} = \rho_1 \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{[a^2 + (2n\frac{h}{a})^2]^{1/2}} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{[4a^2 + (2n\frac{h}{a})^2]^{1/2}} \right] \quad (5)$$

식 (5)의 왼쪽 항에서 V_{AB}/I 는 측정된 저항 R 이 되어 $2\pi aR\rho_1$ 가 된다. 그러나, wenner의 4전극 배치에서 식 (5)는 고유저항이 주어진 균일 토양에서 사용될 때의 표현이다.

만약 이층 구조의 대지모델에서 사용된다면, 이 값은 ρ_a 로써 나타내지는 겉보기 저항률(Apparent Resistivity)이 된다. 따라서 식 (5)는 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{k^n}{[a^2 + (2n\frac{h}{a})^2]^{1/2}} - \frac{k^n}{[4a^2 + (2n\frac{h}{a})^2]^{1/2}} \right] \quad (6)$$

식 (6)은 매우 중요하며, 실제 현장에서 측정된 결과를 해석하는 많은 방법들의 기본이 된다.

앞에서 k 로 표현되었던 계수는 일반적으로 반사 계수를 나타내는 것으로서 식 (6)에서는 중요한 값이다. 이 반사계수는 $+1$ 과 -1 사이에서 변화하는 값으로서, 만일 두 번째 층이 순수한 절연체로 $\rho_2 = \infty$ 라고 하면 $k = +1$ 이고, 만일 두 번째 층이 완전한 도체로 $\rho_2 = 0$ 로 되어 있다면, $k = -1$ 이 된다. 반사계수 k 는

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} = \frac{\rho_2/\rho_1 - 1}{\rho_2/\rho_1 + 1} \quad (7)$$

와 같이 표현되고, ρ_2/ρ_1 의 비에 따라 값이 변한다. k 의 변화에 따른 ρ_2/ρ_1 의 값을 표 1에 표시하였다.

임의로 주어진 반사계수 k 의 값의 대하여 h/a 의 비와 ρ_a/ρ_1 의 관계를 나타내는 곡선의 계산이 식 (6)으로부터 가능하다. 이것은 k 의 모든 가능한 값에서 반복될 수 있으며, 만일 k 가 음이라면 이 결과로부터 얻어지는 곡선의 집합은 그림 2가 된다.

표 1. 반사계수 k 의 변화에 따른 ρ_2/ρ_1 의 변화

value of k	ρ_2/ρ_1	value of k	ρ_2/ρ_1
+1.0		-1.0	0
+0.9	19.0	-0.9	0.526
+0.8	9.0	-0.8	0.1111
+0.7	5.67	-0.7	0.1765
+0.6	4.0	-0.6	0.2500
+0.5	3.0	-0.5	0.3333
+0.4	2.333	-0.4	0.4286
+0.3	1.857	-0.3	0.5384
+0.2	1.50	-0.2	0.6667
+0.1	1.222	-0.1	0.8182
0	1.000		

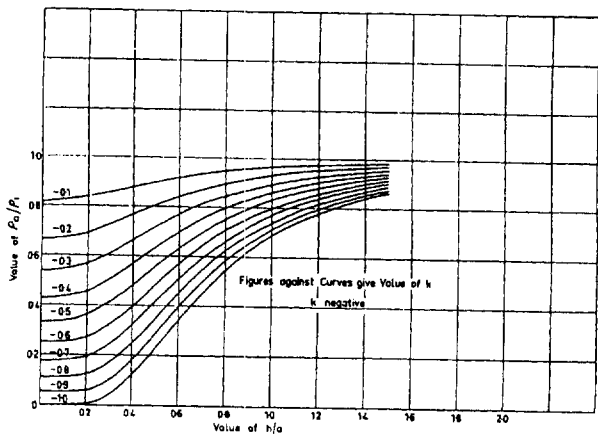


그림 2. 2층 대지구조의 마스터 곡선 - ρ_2 가 작은 경우

반사계수 k 가 양수라면 ρ_a/ρ_1 의 역수를 계산하는 것이 더 편리하다. 그래서 σ_a 가 겉보기 도전을 $1/\rho_a$ 이고, 은 지표면의 도전을 $1/\rho_1$ 이라면, 그림 3은 반사계수 k 의 모든 값에 대한 σ_a/σ_1 과 h/a 사이의 관계를 보여준다.

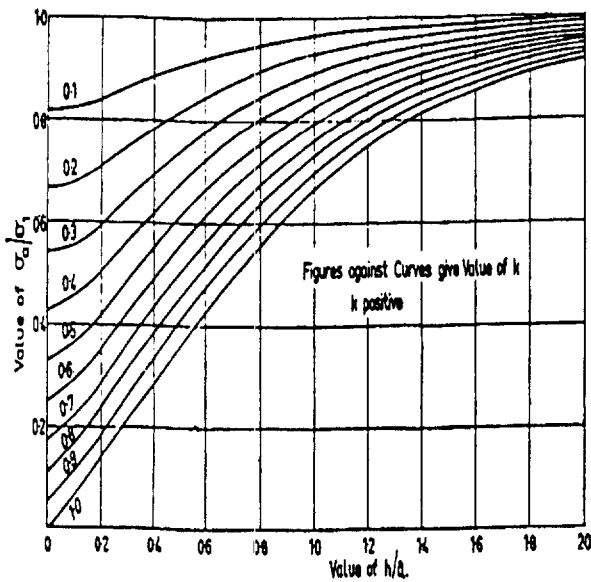


그림 3. 2층 대지구조의 마스터 곡선 - ρ_2 가 큰 경우

3. 대지파라미터의 측정

3.1 대지파라미터 측정을 위한 전극배치

대지파라미터의 측정을 위해 가장 널리 사용되는 전극 배치법의 5가지를 그림 4에 보였다. Schlumberger와 Wenner의 전극배치는 수직 전기탐침법(수직 대지저항을 변화의 결정)에서 가장 중요하고 가장 널리 사용되는 측정방법이다.

Wenner의 전극배치는 대지파라미터의 정량적인 해석에 주

로 사용된다. 대지를 측면에서 본 저항율의 변화를 찾거나 보정하는 데에는 특별히 세심한 주의가 필요하다. Wenner법도 전기지질학적인 단층도의 해석에 잘 맞지만, Schlumberger 배치는 이런 면에서 더욱 더 융통성이 있다.

Schlumberger 배치는 전위 전극이 여러 번의 연속적인 측정동안에 고정된 위치에 있기 때문에 Wenner 배치에 비해 단층의 대지저항을 변화에 대해서는 덜 민감하다. 이러한 점은 또한 두 개의 전극(4개의 전극 대신)만을 이동시키면 되므로 측정이 더 빨리 수행된다는 하나의 이점이 되기도 한다. Schlumberger 배치의 단점은 가끔씩 해석에 앞서서 복잡한 실측 데이터의 조정을 해야 한다는 점과 Wenner 법에서 요구되는 것보다 더욱 민감한 측정장비를 필요로 한다는 것이다.

그림 4(b와 d)에 보여진 3전극 배치법이 Wenner와 Schlumberger 4전극 배치의 대안이 될 수 있다. 이 3전극 배치법에서는 전류전극의 하나가 다른 세개의 전극으로부터 먼 거리(무한원점)에 위치한다. 어떤 상황에서는 이러한 방법이 몇 가지의 이점을 제공할 수도 있다.

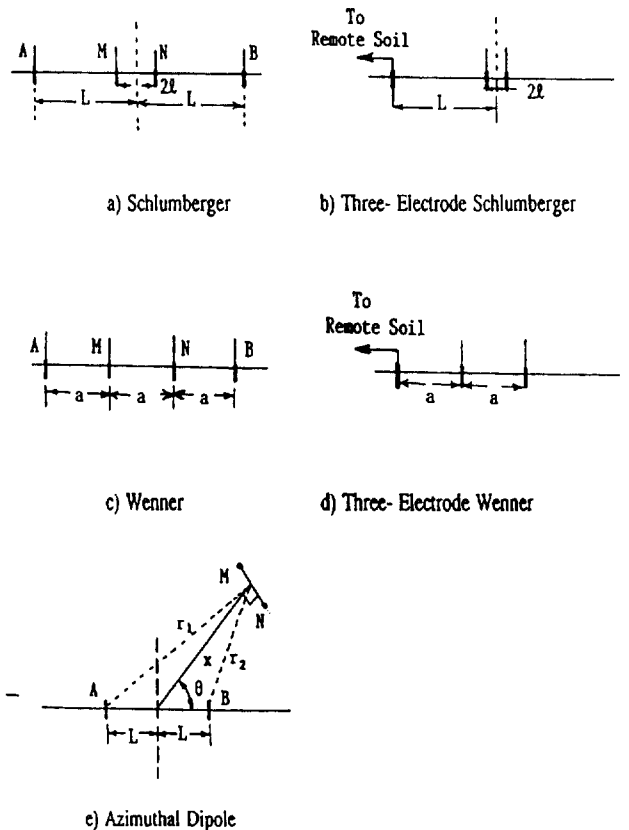


그림 4. 대지파라미터 측정을 위한 전극의 배치

Azimuthal-Dipole 배치의 주요 이점은 측정 케이블과 회로 사이의 전자기적 결합에 대한 낮은 민감성과 긴 측정 케이블과 관련된 조작 문제의 감소에 있다. 이 방법에서 전류전극은 고정된 위치에 놓이고, 전위전극은 다양한 거리와

전류전극의 방향과 다른 방향을 따라 놓일 수도 있다. 이것은 복잡한 지형 조건에서 매우 유용할 수 있다. 각도 $\theta = 90^\circ$ 인 경우에 상응하는 Equatorial-Dipole 전극배치는 측정에 대한 해석을 할 때, 확실한 이점이 있는 특별한 경우이다.

Azimuthal-Dipole 배치는 지질학적 구조의 깊이와 다른 단층 변화에 대하여 Wenner와 Schlumberger 배치보다 더욱 민감하다. 이 방법은 본래 깊은 깊이의 구조적 조사, 특히 석유 탐사에서 사용되었으며, 전기공학분야에는 비교적 덜 알려져 있는 방법이다.

3.2 수직전기 측정법

수직전기측정법(Vertical Electrical Sounding : VES)은 깊이에 따른 전기적인 대지 특성의 변화를 측정하는 데 사용된다. 이 방법은 대지의 전기적 특성이 깊이에 따라 우선적으로 변화(수평방향에서의 미약한 변화)하는 장소에서 유용한 방법이다. 앞에서 설명한 전극배치 중의 하나를 사용하여 수행할 수도 있는 VES법은 전극간격의 증가에 대하여 연속적으로 길보기저항을 측정하도록 구성된다. 매우 작은 전극간격에서, 대지전류의 대부분은 가장 위의 지표층으로 흐른다. 전류와 전위전극 사이의 간격이 클수록 전류는 더 아래층으로 침투하여 흐른다. 이러한 성질은 두께의 증가에 따른 대지의 특성을 연구하는데 참고가 된다.

3.3 대지의 전기지질학적 단층

지질학에서 "전기지질학적 단층"은 대지의 특정한 용적내에서 저항율의 수직적 분포를 나타낸다. 많은 경우에 표면 지질학은 균일한 수평지층의 연속으로 구성된 전기지질학적 단층으로 근사화될 수 있다. 그림 5는 n개의 지층으로 구성된 전기지질학적 단층도를 보여준다. 이 단층은 종종 다층 대지로서 언급된다.

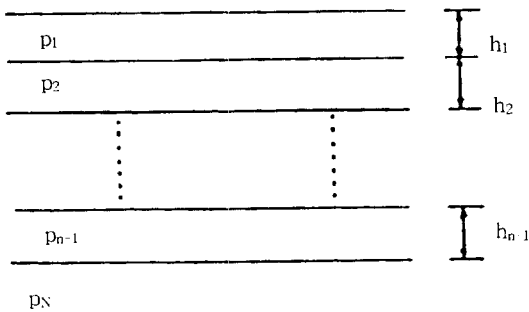


그림 5. n층 대지의 전기지질학적 단층도

지층 두께는 $h_1, h_2, h_3, \dots, h_n$ 에 의해 나타내고, 각 지층의 실제 저항율은 $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, \rho_n$ 으로 표현된다. 마지막 또는 n 지층은 매우 두꺼운 층이라고 가정한다.

그림 5의 다층 대지는 일반적으로 n의 값에 따라 분류된다. 그림 6은 2층 대지(n=2)의 저항율의 도식적 표현을 보여준다. 2층 대지는 현재의 전력공학 접지 설계에서 광범위

하게 사용된다. 3층(n=3) 대지와 4층(n=4)에 대한 여러 저항율 형태가 각각 그림 7과 8에 보였다.

그림 6에 보인 것과 같이 상층 저항율 ρ_1 이 하층 저항율 ρ_2 보다 더 크든 작든 간에 따라서 2층 대지 모델의 두 가지 형태가 가능하다. 또한, 3층 대지 모델은 그림 7과 같이 네 가지 형태로 나뉠 수 있다.

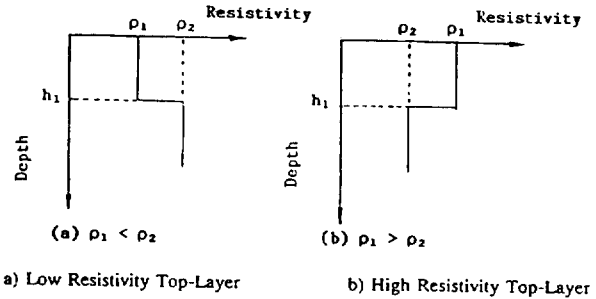


그림 6. 2층 구조의 전기지질학적 단층도

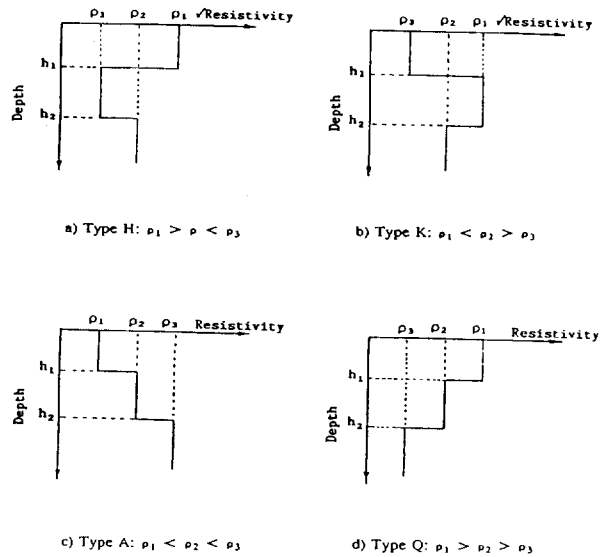


그림 7. 3층 대지의 전기지질학적 단층도

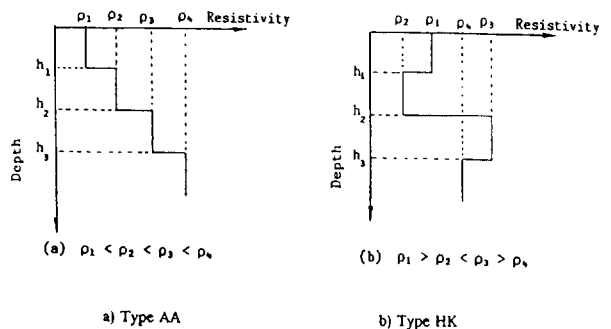


그림 8. 4층 대지의 전기지질학적 단층도

4층 대지 모델은 8 가지 형태로 구분된다. 각 형태는 3층의 표시의 결합에 의해 확인된다. 예를 들어, 형태 AA는 결합 $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$ 에 상응하고, 형태 HK는 $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$ 에 상응한다. 그림 8은 4층 대지 모델의 두가지 형태를 보여준다. 일반적으로 n층 대지는 2^{n-1} 개의 형태로 분류된다.

3.4 종축의 콘덕턴스와 횡축의 저항

전기지지학적 단층에서 각 지층은 두께 h와 저항을 ρ 에 의해 특성지어진다. 두 개의 매개변수쌍이 전기지지학적 단층의 전기적 특성을 나타내는데 사용된다. Dar Zarrouk 매개변수라고도 표현되는 이 매개변수는 "횡축 단위저항" T와 "종축 단위 콘덕턴스" S이다. 이는 다음과 같이 정의된다.

$$T = h\rho$$

$$S = h/\rho$$

그림 9는 지질학에서 널리 사용되는 S, T 매개변수의 개념을 설명한다. 이 매개변수의 주요한 장점은 겉보기 대지저항을 곡선에서 h, ρ 매개변수보다 효과가 잘 제공된다는 것이다.

횡축 단위저항 T는 전류가 지층에 수직 방향으로 흐를 때, 지층에 대하여 수직인 축에서 단위각주 제곱의 저항이며, 종축 단위 콘덕턴스 S는 전류가 지층에 대하여 수평 방향으로 흐를 때, 지층에 대하여 수직인 축에서 단위 각주 제곱의 콘덕턴스이다.

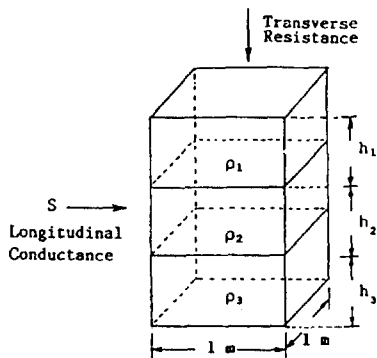


그림 9. Dar Zarrouk의 매개변수 T와 S

Dar Zarrouk 매개변수는 전기지지학적 단층에 대하여 보조적인 것이다. n 지층의 단층에 대해 증가의 S, T 값은 다음의 관계식을 사용하여 결정된다.

$$T = \sum_{i=1}^n T_i \tag{8}$$

$$S = \sum_{i=1}^n S_i \tag{9}$$

Dar Zarrouk 매개변수는 전기지지학적 측정에 기초한 대지 파라미터 측정 결과의 해석에 널리 사용된다.

3.5 대지파라미터의 실제 측정

접지 대상부지가 선정되면 대지 파라미터를 측정하게 되는데, 여기에서는 Wenner의 4전극법에 의한 방법을 설명하기로 하자.

먼저 대상 부지의 조건에 따라 부지에 대하여 수직 및 수평방향으로 측정선을 결정한 후, 측정선에 대하여 일직선으로 그림 1에서 A 및 D전극에 전류전극(C₁, C₂)을, B와 C 전극에 전위전극(P₁, P₂)를 등간격(a)이 되도록 배치한다. 이 때, 전극의 간격(a)은 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 10.0, 15.0, 20.0, 30.0, 50.0, 70.0, 100.0, 150 [m]등이 되도록 이동하며 반복하여 측정하고, 접지 대상부지의 가장 긴 길이 이상의 간격이 될 때까지 측정한다. 또한, 각 전극의 땅속 깊이도 충분하도록 타설한다.

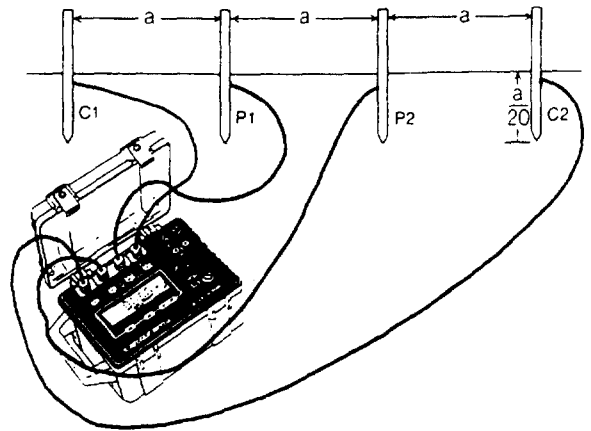


그림 10. 대지파라미터 측정의 실제도

표 2. 대지파라미터 측정 기록표의 예
대지 고유 저항 측정표

1. 현장명 : ○○ # 2. 산측 측정.
2. 측정 일시 : 1900년 0월 0일
3. 측정 방법 : WENNER 4전극법.
4. 측정 계측기 : SAS 300C.
5. 측정자 : ○○○
6. 위치자 : ○○○

측정번호	전극간격	극 위치 (METER)		측정 결과		비고
	(METER)	C ₁ -C ₂	P ₁ -P ₂	T	S	
R 1	0.5	0.75	0.25	234	718.38	
R 2	1	1.5	0.5	109.8	674.172	
R 3	2	3	1	77.8	955.384	
R 4	3	4.5	1.5	46.1	849.162	
R 5	4	6	2	35.7	876.792	
R 6	5	7.5	2.5	27.4	841.18	
R 7	6	9	3	22.1	814.164	
R 8	7	10.5	3.5	18.94	814.0412	
R 9	10	15	5	15.72	965.208	
R 10	15	22.5	7.5	14.72	1355.712	
R 11	20	30	10	11.78	1446.584	
R 12	30	45	15	10.06	1853.052	
R 13	50	75	25	7.13	2188.91	
R 14	70	105	35	7.16	3077.368	
R 15	100	150	50	4.73	2904.22	
R 16	0	0	0		0	
R 17	0	0	0		0	
R 18	0	0	0		0	
R 19	0	0	0		0	

대지파라미터를 측정하는 계측장비도 문제가 될 수 있는데, 과거에 우리나라에서는 주로 일본YOKOGAWA사의 YEW-3244형 장비를 사용하여 왔으나 이 장비는 생산이 중지된 상태이며, 최신의 장비로는 일본 OYO사의 McOHM Mark-2, 스웨덴 ABEM사의 SAS 300C, 미국회사의 STING R1, SYSCAL JUNIOR, DET 2/2 등이 있다. 그림 10은 실제의 측정을 위한 계측장비의 그림을 보인 것이며, 표 2는 대지파라미터 실측 기록표의 예를 보인 것이다.

4. 대지 파라미터의 해석방법

현장에서 측정된 대지 파라미터의 측정값에 대한 해석은 상당히 어려운 작업에 속한다. 실제의 대지구조는 지층별로 서로 다르기 때문에 대지 저항율의 변화가 복잡한 경우가 많다. 대지 파라미터 해석방법에는 다음과 같이 크게 2가지 방법으로 분류할 수 있다.

- (1) Wenner의 4전극 배열에 따라 극간 거리를 변화시키면서 측정된 대지 고유저항과 전극간격을 이용하여 그런 표준곡선에 의하여 대지구조를 추정하는 방법
- (2) 측정값으로부터 등가 대지구조로 모델링하여 계산하는 수치해석적 방법

전자의 방법은 컴퓨터를 이용하는 수치해석적 방법이 등장하기 전에 널리 이용되었던 것으로, 주로 경험적인 해석 방법이라고 할 수 있다. 이 방법에는 대지 파라미터의 표준곡선에서 대지저항율이 다른 지층에 도달할 때 생기는 변곡점을 이용하는 Gish & Rooney법과, 저항율이 다른 하층의 깊이는 변곡점이 발생한 전극간격의 2/3을 취한 값으로 해석하는 Lanczster-Jones법이 있다. 그러나, 표준곡선을 가지고 동일한 대지 고유저항의 두께를 구하는 것이 결코 용이한 일이 아니다.

수치해석법은 대지를 n층의 등가대지구조 모델로 가정하여 이론적인 대지 저항율과 대지파라미터(대지 저항율, 지층두께 및 반사계수)간의 수학적 관계를 구하여 측정값과 비교추정하는 방법으로서 정량적으로 해석할 수 있는 가장 적합한 방법이다.

4.1 표준곡선을 이용하는 방법

대지의 지층 구조를 파악하기 위하여 측정된 겉보기 대지파라미터 곡선(ρ -a곡선)을 해석하여 대지의 파라미터(지층의 두께와 대지저항율)를 구할 필요가 있다.

Wenner 법에 의한 측정결과는 ρ -a 곡선을 해석하는 방법으로서 일반적으로 그림 11과 같은 Sundberg의 표준곡선이 사용되고 있다. 이 방법의 해석원리는 대지가 2층 구조로 되어 있다고 가정하기 때문에 3층 이상의 대지 구조를 가지는 ρ -a 곡선을 해석하기 위하여는 등가 대지저항율의 개념에 근거하여 작성한 그림 12와 같은 Hummel의 보조곡선을 사용할 필요가 있다. 그러나 이 곡선들을 이용하여 대지의 파라미터를 해석하는 방법은

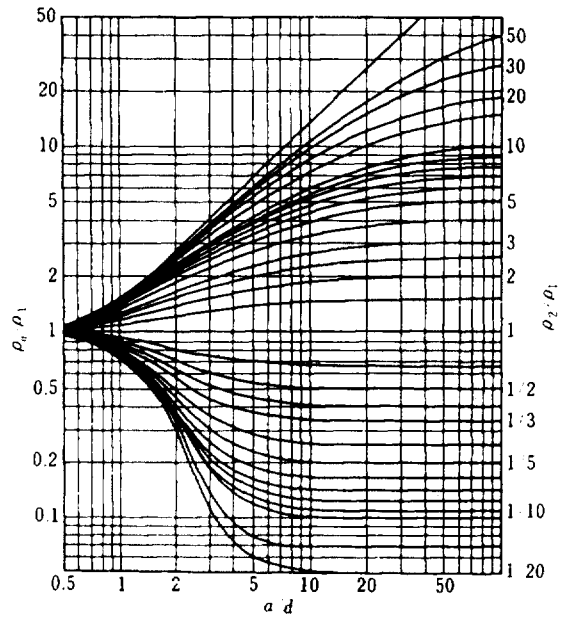


그림 11. Sundberg의 2층 표준곡선

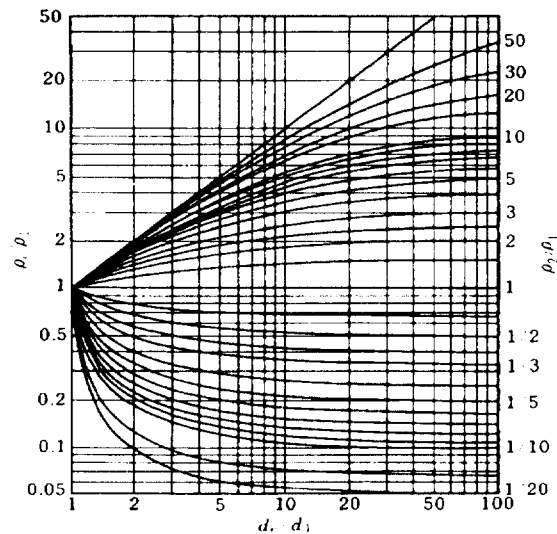


그림 12. Hummel의 보조곡선

완전히 수작업에 의존하기 때문에 해석을 위해서는 상당한 숙련이 필요하다는 점이다.

이 표준곡선과 보조곡선은 정수배 (1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20, 30, 50, ∞)의 곡선으로 작성되어 있기 때문에 이 곡선과 실측의 ρ -a 곡선을 중첩해 가면서 해석하는 수법(표준곡선법)에서는 ρ -a 곡선이 표준곡선의 중간에 위치하는 경우 그 차이만큼 오차가 생기게 된다. 또 해석자의 주관에 의하여 해석치가 크게 변화할 수가 있다. 그리하여 대지저항율의 변동이 심한 지층에서는 해석이 불가능해 질 수도 있다. 따라서, 이상의 표준곡선으로부터 일반적으로 정확한 대지 파라미터를 결정하는 것은 곤란하다.

4.2 수치해석적 방법

현장에서 측정된 겉보기 대지파라미터의 측정값으로부터 대지파라미터를 해석하기 위한 방법으로서, ρ - α 곡선에 의한 방법 외에 최근에는 일반적으로 많이 보급되고 있는 컴퓨터를 이용한 프로그램을 수행하여 해석하는 방법이 있다. 이러한 수치해석적 알고리즘의 대표적인 것에 일본의 T. Takahashi가 제안한 다층구조의 대지파라미터 해석법과 캐나다의 F. Dawalibi가 제안한 해석법 등이 있다. 최근에는 컴퓨터의 보급과 활용이 증가하면서 측정된 겉보기 대지저항율에 대하여 대지 파라미터를 해석하기 위한 컴퓨터 프로그램이 개발되어 사용되고 있는 실정이며, 특히 대지파라미터 측정기에 내장되어 측정과 동시에 대지파라미터를 현장에서 측정된 자료를 해석할 수 있는 측정장비도 개발되어 있다. 대표적인 컴퓨터 프로그램으로는 RESIX PLUS, SOUND, GRIVEL, RESAP, CEVES 및 ElecAUTO 등이 있으며, 현재 우리나라에서는 RESAP 프로그램을 일부 사용중에 있다. 이러한 프로그램들은 다층구조의 대지모델에 대하여 다루고 있는 것도 일부 있으나, 일반적으로는 등가 2층구조를 해석하는데 사용되고 있다.

따라서 여기에서는 등가 2층구조의 대지파라미터 해석법에 대하여 설명하고자 한다.

수치해석법은 대지를 2층 구조의 등가대지로 모델링하여 이론적인 대지파라미터와 대지 파라미터(대지저항율, 지층두께 및 반사계수)간의 수학적 관계를 구하여 측정값과 비교추정하는 방법으로, 정량적으로 해석할 수 있는 가장 적합한 방법이다. 수치해석법을 설명하기 위해서는 먼저 2층구조의 대지모델을 정식화 하여야 한다.

대지를 그림 13과 같이 등가 2층 구조 대지로 모델링할 때 이미 앞에서도 설명한 바와 같이 겉보기 대지 고유저항은 다음 식으로 주어진다. 2층 구조로 해석할 때 수평구조, 수직 구조, Exponential 구조의 3 가지로 등가 모델화할 수 있으나, 가장 일반적인 방법은 수평구조로 해석하는 것이다.

$$\rho_{\omega} = \rho_1 \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} k^n \left(\frac{1}{\sqrt{A_j}} - \frac{1}{\sqrt{B_j}} \right) \right] \quad (10)$$

여기서,

- ρ_a : 겉보기 대지저항율
- ρ_1 : 상층 대지저항율
- a_j : 전극 간격

$$A_j = 1 + \left(\frac{2nh}{a_j} \right)^2$$

$$B_j = A_j + 3$$

겉보기저항율을 측정하기 위한 모델로서 Wenner방법을 적용하면, 전극사이의 거리 a 는 등간격이다. 또한, 측정시에 전극사이를 변화시켜서 거리 a_j ($j = 1 \dots n$)에 대하여 측정된 파라미터 값의 집합 $\rho_m(a_j)$ 를 표시한다. 즉 측

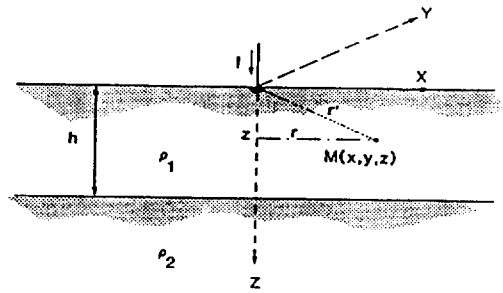


그림 13. 2층구조의 등가대지모델

정값의 집합 $\rho_m(a_1), \rho_m(a_2), \dots, \rho_m(a_n)$ 을 구성하고, 미지수 벡터 X 는 대지파라미터로 다음과 같이 구성한다.

$$X = \begin{pmatrix} \rho_1 \\ k \\ h \end{pmatrix} \text{ 혹은 } X = \begin{pmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ h \end{pmatrix} \quad (11)$$

어떤 전극거리 a_j 와 파라미터의 집합 X 에 대하여 측정값과 계산값 사이의 가중편차 e_j ($j = 1 \dots n$)를

$$e_j = \frac{\rho_m(a_j) - \rho_a(a_j)}{\rho_m(a_j)} \quad (12)$$

와 같이 표현할 수 있고, 모든 가중편차들은 $(n \times 1)$ 의 벡터 D 를 구성할 수 있다. 또한, 대지 파라미터 집합 X 를 구하기 위하여 벡터 D 의 Euclidean Norm $\|D\|^2$ 으로 정의되는 목적함수 $F(X)$ 의 제곱을 최소화하는 것으로 할 수 있다.

$$F(X) = \sum_{j=1}^n \left[\frac{\rho_m(a_j) - \rho_a(a_j)}{\rho_m(a_j)} \right]^2 \quad (13)$$

이러한 수치해석적 방법의 대표적인 몇가지 알고리즘은 다음과 같다.

- 1) Steepest descent 방법
- 2) Levenberg - Marquardt 방법
- 3) Newton 방법
- 4) Generalized Inverse 방법
- 5) Quasi - Newton 방법
- 6) 기타 방법

5. 결 론

지금까지 최적 접지설계를 위한 대지파라미터의 측정과 해석 방법에 대하여 정리하였다. 그 중요한 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 비균질 토양에 대한 대지파라미터를 정의하였으며, 겉보기 대지저항율 식과 반사계수 등을 정리하였다.
- 2) 대지파라미터의 측정을 위하여 전극의 배치 방법, 수직전극 측정법, 대지의 전기지질학적 단층, 중축의 콘

- 덕턴스와 횡축의 저항 등에 대하여 정리하였다.
- 3) 대지파라미터의 실제측정을 위한 하나의 방법으로 Wenner 법에 대하여 간단한 예를 들어 설명하였다.
 - 4) 대지파라미터의 해석을 위한 방법으로서, 표준곡선을 이용하는 방법과 수치해석적 방법에 대하여 정리하였으며, 수치해석적 방법을 이용하여 개발된 프로그램에 대하여 알아 보았다.

이상으로 접지설계를 위하여 필수적으로 수행해야 하는 대지파라미터의 측정에 관한 이론과 측정법, 실제 측정에, 측정된 값으로부터 대지파라미터를 해석하는 방법 등에 대하여 간략하게 정리하였는데, 이러한 내용이 실질적으로 현장에서 접지 업무에 종사하고 있는 기술자 들에게 조금이나마 도움이 되었으면 합니다.

참 고 문 헌

- [1] IEEE Std. 80, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, 1986
- [2] IEEE Std. 81, IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance and Earth Surface Potentials of a Ground System, 1983.
- [3] Sunde, E. D., Earth Conduction effects in Transmission Systems, Dover Pub. 1968.
- [4] Tagg, G. F., Earth Resistance, George Newnes Limited, 1964.
- [5] EPRI, Transmission Line Grounding, Vol.1, Research Project 1494-1, Report EL 2695, Principal Author F.Dawalibi, 1982.
- [6] 심건보, 이형수, 이관형, 이봉용, "최적접지설계를 위한 대지 파라미터의 추정", '94 대한전기학회 추계학술대회 논문집, 1994, pp.61-63
- [7] Harold M. Mooney, Ernesto Orellana, Harry Pickett, Leonard Tornheim, "A Resistivity Computation

Method for Layered Earth Models", Geophysics, Vol. XXX1, No. 1, pp. 192~203, 1966.

- [8] F. Dawalibi, C. J. Blattner, "Earth Resistivity Measurement Interpretation Technique" , IEEE PAS, Vol. 103, No. 2, Feb., pp. 374~382, 1984.
- [9] A. P. Meliopoulos, A. D. Papalexopoulos, R. P. Webb, C. Blattner, "Estimation of Soil Parameters from Driven Rod Measurements", IEEE PAS, Vol. 103, No. 9, pp. 2579~2587, 1984.
- [10] Takehiko Takahashi, Taroh Kawase, "Analysis of Apparent Resistivity in a Multi-Layer Earth Structure" IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, pp. 604~612, 1990.
- [11] J. L. del Alamo, "A comparison among eight different techniques to achieve an optimum estimation of electrical grounding parameters in two-layered earth", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 8, No. 4, pp. 1890~1899, 1993.
- [12] 전력연구원, KEPRI-95Y-J12, 축소형 변전소 접지효과 증대방안 연구(중간보고서), 1996. 9.
- [13] SES, Power System Grounding & Electromagnetic Interference Analysis(Technical Seminar Reference), 1996. 9.



심건보(沈建輔)

1957년 2월 1일생. 1980년 홍익대 공대 전기공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(박). 현재 홍익대 과학기술연구소 연구원