

대지 저항률 측정 기술

Measurement of Earth Resistivity

방송통신표준

KCS.KO-04.0041

제정일: 2013년 12월 31일

대지 저항률 측정 기술

Measurement of Earth Resistivity

미래창조과학부

국립전파연구원

본 문서에 대한 저작권은 미래창조과학부 국립전파연구원에 있으며, 미래창조과학부 국립전파연구원과 사전 협의 없이 이 문서의 전체 또는 일부를 상업적 목적으로 복제 또는 배포해서는 안 됩니다.

Copyright© Ministry of Science, Ict and future Planning National Radio Research Agency 2013. All Rights Reserved.

서 문

1. 표준의 목적

본 표준은 방송통신 서비스 설비 구축을 위한 접지 시스템의 설계에 있어서 시설 지역 성능 결정의 기반이 되는 대지 저항률을 측정하는 기술을 제공한다.

2. 주요 내용 요약

본 표준에서는 대지 저항률의 단위 측정 기술에서부터 해석 작업에 이르기까지 요소가 되는 측정 기술과 기준적 분석 기법을 제공한다.

대지 저항률을 측정하는 측정 전극의 배치 구성 방법에 따른 Wenner의 4 전극법과 Schlumberger의 4 전극법에 대하여 다루며 넓은 대지 규모에 대하여 동시적 측정을 구사할 수 있는 방법으로서 Dipole-Dipole법을 제시한다.

또한, 측정 전극의 배치 구성에 따른 실제 측정의 유효 범위에 대한 규격 차원의 정보를 제공한다. 아울러 토양의 대지 저항률 분포 분석 방법을 제시한다.

3. 표준 적용 산업 분야 및 산업에 미치는 영향

본 표준은 방송통신 설비의 접지 시스템 구축에 활용된다. 대지 저항률 측정은 단순히 일회성 측정으로 해결되는 것은 아니며 접지 시스템이 구축될 지역 지반 범위 차원에서 대지 저항률 분포가 어떻게 이루어져 있는지를 해석하는 작업이 요구된다. 현장에서의 측정상 의문점을 해소하고 어떠한 규격에서 측정하여야 할 것인지에 대한 기술적 수단을 제공함으로써 최적 성능의 접지시설을 이룰 수 있도록 하고 관련 업계 시설 기술의 통일성을 기하여 시스템 구축의 경제적 효율성을 제고할 수 있게 한다.

4. 참조 표준(권고)

4.1. 국외 표준

해당 사항 없음.

4.2. 국내 표준

해당 사항 없음.

5. 참조 표준(권고)과의 비교

5.1. 참조 표준(권고)과의 관련성

해당 사항 없음.

5.2. 참조한 표준(권고)과 본 표준의 비교표

해당 사항 없음.

6. 지식 재산권 관련 사항

본 표준의 ‘지적 재산권 요약서’ 제출 현황은 국립전파연구원 웹사이트에서 확인할 수 있다.

※본 표준을 이용하는 자는 이용함에 있어 지식 재산권이 포함되어 있을 수 있으므로, 확인 후 이용한다.

※본 표준과 관련하여 접수된 요약서 이외에도 지식 재산권이 존재할 수 있다.

7. 시험 인증 관련 사항

7.1. 시험 인증 대상 여부

해당 사항 없음

7.2. 시험 표준 제정 현황

해당 사항 없음

8. 표준의 이력 정보

8.1. 표준의 이력

판수	제정·개정일	제정·개정 내역
제 1 판	2013. 12. 31.	제정 KCS.KO-04.0041

8.2. 주요 개정 사항

해당 사항 없음

Preface

1. Purpose of Standard

The purpose of this standard is to provide earth resistivity measurement technique which is a base element in the construction of ground system in the field of broadcasting and communications facilities.

2. Summary of Contents

This standard provides a measurement technique and analysis method from an elementary basis to advanced manipulation.

Typical measurement techniques such as the Wenner method, Schlumberger method, Dipole-Dipole method are presented according to the arrangement of test electrodes.

Dimensional information about effective range of measurement by the methods is provided. Analytical method for earth resistivity distribution is presented.

3. Applicable Fields of Industry and its Effect

This standard is utilized in constructing the ground system of broadcasting and communications facilities. The measurement of earth resistivity is not solved by one time measurement. A work to analyze how the earth resistivity is distributed in the viewpoint of the corresponding ground area where a ground system will be constructed is required.

This standard will settle the questionable points in practical spots. And it will provide technical means about on what specification a measurement should be practised. It will enable to establish an optimized capability of ground system and encourage economical efficiency of system construction. It also integrates the various means of industrial field.

4. Reference Standards(Recommendations)

4.1. International Standards

None.

4.2. Domestic Standards

None.

5. Comparison between Reference Standards(Recommendations) and this Standard

5.1. Relevance of this Standard with Reference Standards(Recommendations)

None.

5.2. A Comparative Table of Reference Standard(Recommendation) and this Standard

None.

6. Statement of Intellectual Property Rights

“Written Confirmation of Intellectual Property Rights” for this standard can be referenced to the website of the National Radio Research Agency.

Those using this standard must confirm that whether intellectual property rights are included in this standard.

Other intellectual property rights may exist in relation to written confirmation received for this standard.

7. Statement of Testing and Certification

7.1. Object of Testing and Certification

None.

7.2. Standards of Testing and Certification

None.

8. Detailed History of Standard

8.1. History of Standard

Edition	Issued Date	Outline
The 1st edition	2013. 12. 31.	Established KCS.KO-04.0041

8.2. Revision Related Details

None.

목 차

1. 개 요	1
2. 표준의 구성 및 범위	1
3. 용어 정의	1
4. 대지 저항률 측정 방법과 적용 규격	2
4.1. 개요	2
4.2. 4 전극법과 대지 저항률 계산의 일반형	2
4.3. Wenner의 4 전극법	4
4.4. Schlumberger의 4 전극법	7
4.5. Dipole-Dipole 측정법	7
4.6. 측정 구성에 따른 유효 범위	9
4.7. 도전성 매설물의 영향	11
5. 대지 저항률 분포 해석	12
5.1. 대지 구조와 대지 저항률	12
5.2. 2층 대지 구조의 해석	15
5.3. 다층 대지 구조의 해석	16
5.4. 대지 저항률 분포 분석에 있어서의 차원적 접근 방식	19
부속서 A. 측정 전극 배치에 따른 변형 관계	21
부록 I. 대지 저항률의 일반 특성	24
부록 II. 관련 문헌	27

Contents

1. Introduction	1
2. Constitution and Scope	1
3. Terms and Definition	1
4. The General Rule and Application Specification of Earth Resistivity Measurement	2
4.1. Introduction	2
4.2. Measurement Principle of 4 Electrodes Method	2
4.3. Wenner Method	4
4.4. Schlumberger Method	7
4.5. Dipole–Dipole Method	7
4.6. Investigation Depth in the Configurations	9
4.7. Effect of Conductive Material in the Earth	11
5. Analysis on the Distribution of Resistivity in the Soil	12
5.1. Earth Composition and Resistivity	12
5.2. Interpretation of Two Layer Construction	15
5.3. Interpretation of Multi-layer Construction	16
5.4. Dimensional Approach in the Analysis of the Resistivity Distribution ...	19
Annex A. Relationship of Changes by Test Electrodes Arrangement	21
Appendix I. Resistive characteristic of the earth	24
Appendix II. Related Documents	27

대지 저항률 측정 기술 (Measurement of Earth Resistivity)

1. 개요

접지 시스템 설계에 있어서 접지극을 시설하는 지역의 토양 구성 및 전기적 특성이 어떠한지는 접지 성능 결정에 기반이 되는 요소이다. 이러한 토양의 전기적 특성은 대지 저항률이라는 파라미터로써 특징지워지며 이 대지 저항률의 토양 내 특성 분포는 당해 토양의 구성 특성에 기인하는 것이므로 대지 저항률의 해석을 통해 접지극을 시설하고자 하는 지역의 토양 특성을 파악하게 되고 그 특성에 맞도록 효과적인 접지 시스템 구축을 설계하게 된다.

이러한 배경하에 본 표준은 단위 요소가 되는 대지 저항률 측정 방법을 제시하고 전체적인 대지 저항률 측정의 범위라 할 수 있는 토양의 전기적 구성 특성 분석을 위한 대지 저항률 분포 측정의 수행과 이의 해석 기술에 대한 표준적 방법을 제공하여 이를 적용한 시스템 설계에 있어서의 일관되고 통일된 접지 시설 구축 기술을 제공하는 것을 목적으로 한다.

2. 표준의 구성 및 범위

본 표준은 방송통신 설비의 접지 시스템 구축에 활용된다. 대지 저항률 측정은 단순히 일회성 측정으로 해결되는 것은 아니며 접지 시스템이 구축될 지역 지반 범위 차원에서 대지 저항률 분포가 어떻게 이루어져 있는지를 해석하는 작업이 요구된다. 따라서 본 표준에서는 대지 저항률의 단위 측정 기술에서부터 해석 작업에 이르기까지 요소가 되는 측정 기술과 기준적 분석 기법을 제공한다.

본 표준의 초반에는 토양 계층에서 대지 저항률의 분포 특성이 어떻게 이루어지는지에 대한 내용을 다룬다. 대지 저항률을 측정하는 측정 전극의 배치 구성 방법에 따른 Wenner법과 Schlumberger법에 대하여 다루며 넓은 대지 규모에 대하여 동시적 측정을 구사할 수 있는 방법으로서 Dipole-Dipole법을 제시한다.

또한, 측정 전극의 배치 구성에 따른 실제 측정의 유효 범위에 대한 규격 차원의 정보를 제공한다. 아울러 토양의 대지 저항률 분포 분석 방법을 제시한다.

3. 용어 정의

접지저항(ground resistance)

접지된 도체와 충분히 떨어진 지점의 대지 간 저항. 이는 접지된 도체에 교류의 시험전류를 유입시켰을 때 이 도체와 충분히 떨어진 지점의 대지 간 전위차를 시험전류로 나눈 값을 말한다.

접지극(ground electrode)

접지를 위하여 땅 속에 매설된 도체

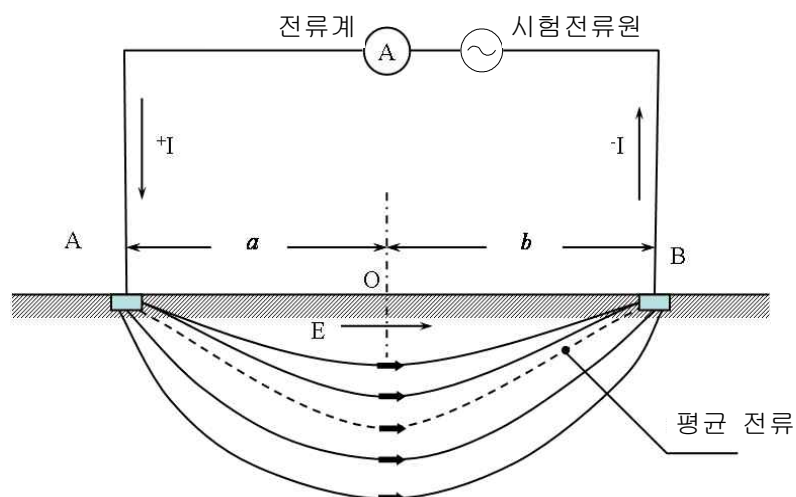
4. 대지 저항률 측정 방법과 적용 규격

4.1. 개요

대지 표면에서 깊은 지점까지 동일한 토질로 이루어진 단층 토양 구조의 대지는 거의 없고 대단히 복잡한 지층, 지형으로 이루어져 있는 경우가 보통이므로 대지 표면의 지층을 비롯하여 지하층의 대지 저항률을 정확하게 측정할 필요가 있다. 현재까지 2 전극법, 4 전극법, 접지저항계를 이용한 간접 측정법 등 여러 가지 대지 저항률을 측정하는 방법이 제안되어 사용되고 있다. 이들 중에서 4 전극법(여러 측정 방법 중 대표적으로는 Wenner법이라고도 한다)이 정확도가 우수하고 측정도 간편하므로 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 대지 구조가 복잡한 경우 대지 저항률의 측정은 간단하지 않으며, 특히 측정용 전극의 매설 깊이에 따라 대지 저항률의 변동이 크다.

4.2. 4 전극법과 대지 저항률 계산의 일반형

측정 전극에 전류를 유입시켜 대지 저항률을 측정할 때 측정용 전류가 대지에 침투한 깊이까지의 대지 저항률의 평균값을 얻게 된다. 대지 저항률 ρ 가 동일한 토질의 토양에 그림 4.1에 나타낸 바와 같이 두 개의 전류 인가 전극 A, B에 전류를 흘린 경우를 가정한다.



*출처 : 부록 II의 [1]

그림 4.1 O 지점 하부의 대지 저항률 측정

시험 전극 A, B에 형성된 반대 부호의 전하의 존재 때문에 점 O에서의 전위 경도는 다음 수식 4.1과 같이 표현된다.

$$E = \frac{\rho}{2\pi} \left[\frac{I}{a^2} + \frac{I}{b^2} \right] \quad \text{수식 4.1}$$

만약 점 O를 중앙에 위치시키면 $a=b$ 이므로 점 O의 직하부에서의 대지 저항률은 다음의 수식 4.2에 의해서 산출된다.

$$\rho = \pi a^2 \frac{E}{I} \quad \text{수식 4.2}$$

그림 4.2에는 4 전극법을 이용하여 A, D 전극에 전류를 인가하고 B, C 전극에서의 전위차를 측정하여 대지 저항률을 측정하는 원리를 나타내었다. 토양은 대개 동질의 성분이 아니므로 수식 4.2는 점 O의 하부에 위치한 전류전극 A, D 사이의 평균 전류 통로인 지층의 합성 대지 저항률을 나타낸다. 실제상 전위 경도 E는 점 O에 대해 대칭인 점 B, C 사이의 전위차를 전극 B, C 사이의 거리로 나눈 값으로 수식 4.3과 같다.

$$E = \frac{V}{c} \quad \text{수식 4.3}$$

또한 전위차 V 는 측정용 전류 I 와 전극 B, C 사이의 거리 c 의 함수로 다음 수식 4.4와 같이 표현할 수 있다.

$$V = V_B - V_C = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{b_1} - \frac{1}{b_1 + c} - \frac{1}{a_1 + c} \right) \quad \text{수식 4.4}$$

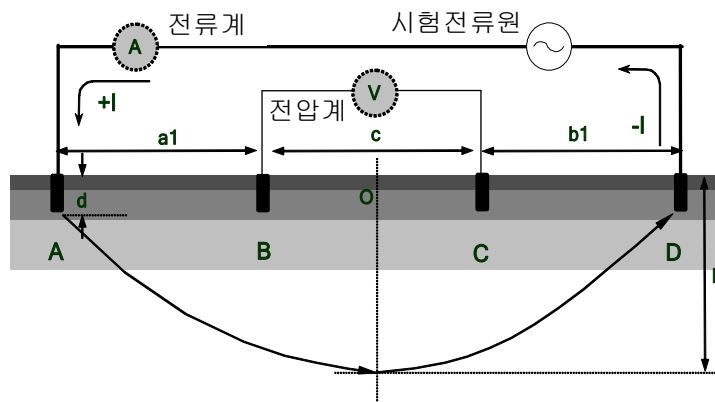


그림 4.2 합성 대지 저항률 측정의 원리

수식 4.4로부터 O 지점의 직하부 지층의 합성 대지 저항률은 수식 4.5와 같이 산출할

수 있다.

$$\rho = \frac{2\pi}{\frac{1}{a_1} + \frac{1}{b_1} - \frac{1}{b_1+c} - \frac{1}{a_1+c}} \frac{V}{I} \quad \text{수식 4.5}$$

수식 4.5는 측정용 전극 사이의 간격과 전극의 길이에 의존하지 않는 합성 대지 저항률을 산출하는 일반 공식이며, 균일한 토질의 토양인 경우 합성 대지 저항률은 실제의 대지 저항률이 된다. 또한 측정 전극의 매설 깊이를 그림 4.2에 표시된 바와 같이 d 라 하고 $a_1 = b_1 = c$ 라고 할 때 이를 a 로 나타낸 경우의 대지 저항률은 수식 4.6으로 표시된다.

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4d^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + d^2}}} \quad \text{수식 4.6}$$

4.3. Wenner의 4 전극법

Frank Wenner가 1915년에 발표한 4 개의 전극을 직선상의 동일한 간격으로 배치하는 방법으로서 현재 대지 저항률의 측정 방법으로 가장 많이 사용되고 있으며 Wenner 4 전극법이라고 한다. 이것은 그림 4.3에 나타낸 바와 같이 4 개의 전극을 대지에 설치하고 양쪽 바깥쪽의 전극 간에 흐르는 전류 I 와 안쪽 2 개의 전극 간에 유도되는 전압 V 를 측정하여 대지 저항률을 산출하는 방법이다. 외측의 두 전류전극 C_1 과 C_2 사이에 전원을 공급하여 대지에 전류를 흘리고, 이 때 안쪽의 두 전위전극 P_1 과 P_2 사이에 생기는 전위차를 측정하여 V/I 로부터 접지저항 R 을 구할 수 있다. 또한, 전극 간격을 a m라고 하면 ρ 는 수식 4.5로부터 산출된다. 즉, 수식 4.5에서 $a_1 = b_1 = c$ 이고, $V/I = R$ 이므로

$$\rho = 2\pi a R \quad \text{수식 4.7}$$

이 되어, 대지 저항률 ρ 를 구할 수 있게 된다. 또한 측정용 전극의 매설 깊이가 전극 간 거리에 비해서 대단히 적은 경우 즉, $d \ll a$ 의 조건이면 수식 5.6으로부터도 수식 4.7이 산출된다. 따라서 4 전극법을 적용하는 경우 $d \leq (1/10)a$ 인 조건으로 대지 저항률을 측정하는 것이 바람직하며, 수식 4.7은 대체적으로 깊이 $(0.5 \sim 1)a$ 인 지점의 토양의 평균 대지 저항률을 나타낸다.

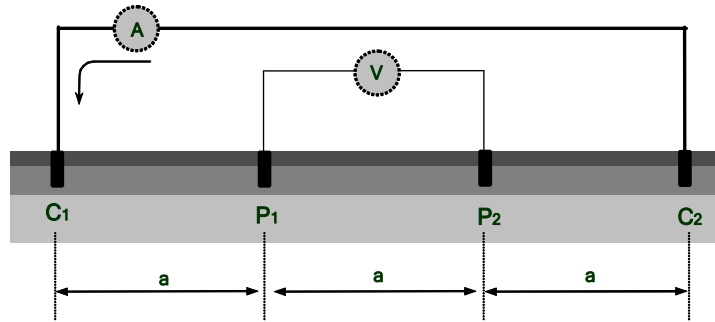
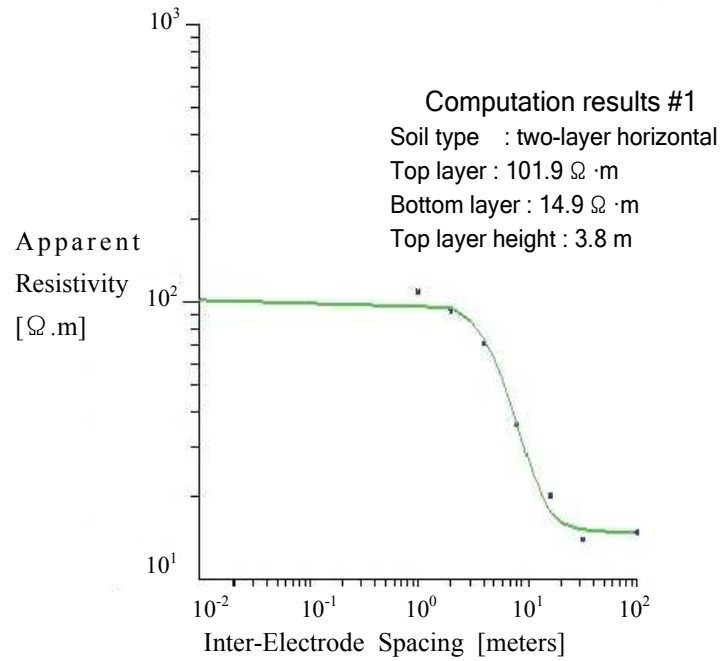


그림 4.3 Wenner 4 전극법의 구성도

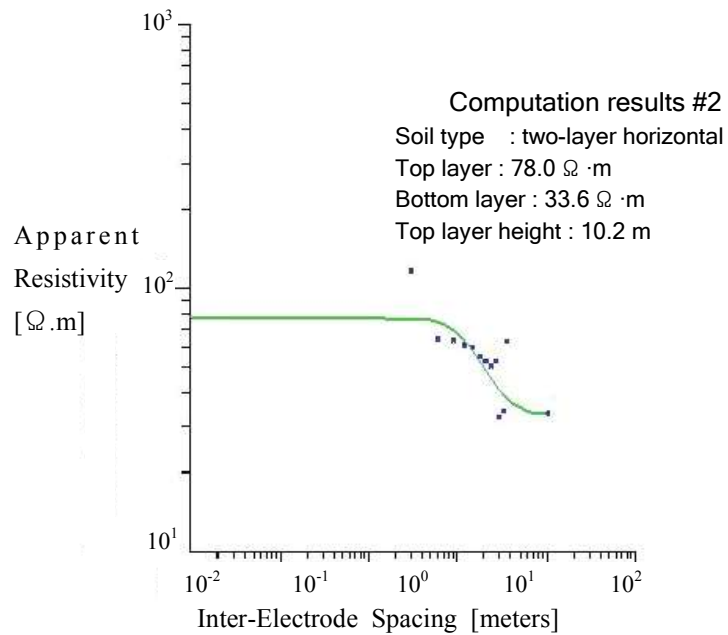
측정용 전압·전류 접지극 C_1 , C_2 , P_1 , P_2 의 접지저항에는 관계없이 대지 저항률이 산출된다.

전극 간격 a 를 크게 함으로써 좀 더 깊은 영역에까지 측정용 전류가 침투하는 깊이의 대지 저항률의 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 4 전극법을 이용하여 대지 저항률의 정확한 측정을 위해서는 4 전극의 배열 방향과 간격을 변화시켜가면서 여러 회 측정하여 평균값을 취하는 것이 바람직하다(이 도전성 매설물에 의한 영향 관계에 대하여는 4.7 절에서 좀 더 구체적으로 설명한다).

그림 4.4에 Wenner의 4 전극법을 사용하여 측정된 대지 저항률 곡선의 예를 나타내었다. 측정된 값으로부터 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 분석한 결과로서 두 개의 측정 결과 모두 2층 대지 구조를 이루고 있다. 동일한 측정 장소에서 측정 위치만 변동시켰을 때 나타난 결과이다(측정 결과에 따른 토양 구성 특성과 관계된 대지 저항률 분포 해석에 관하여는 5 장에서 상세히 다룬다).



(a)



(b)

그림 4.4 Wenner의 4 전극법에 의해 측정된 대지 저항률 곡선의 예

4.4. Schlumberger의 4 전극법

Wenner의 4 전극법에서 측정용 접지극 사이의 간격 a 가 넓은 경우 전위 검출용 전극 사이의 전위차가 매우 낮아져 전위차의 검출이 어려운 경우가 발생할 수 있다. 깊은 대지의 하부 지층 토양의 저항률을 측정하고자 하는 경우와 같이 측정용 전류전극 사이의 간격이 넓을 때 전위 검출용 전극을 전류 보조 전극에 가까이 위치하도록 이동시켜 검출 전압을 높이는 방법이 Schlumberger-Palmer에 의해서 제안되었으며 부등 간격 4 전극법이라고도 한다. 동일한 측정 전류에 대해서 Wenner의 4 전극법에 비해서 검출 전압이 높으므로 접지극 간 거리가 먼 경우도 측정이 가능하고 정확도가 개선된다. 그림 4.5에 나타낸 바와 같은 측정용 접지극의 배치일 때 대지 저항률은 수식 4.5로부터 수식 4.8과 같이 산출된다.

$$\rho = \pi \left(\frac{a^2}{b} - \frac{b}{4} \right) R \quad \text{수식 4.8}$$

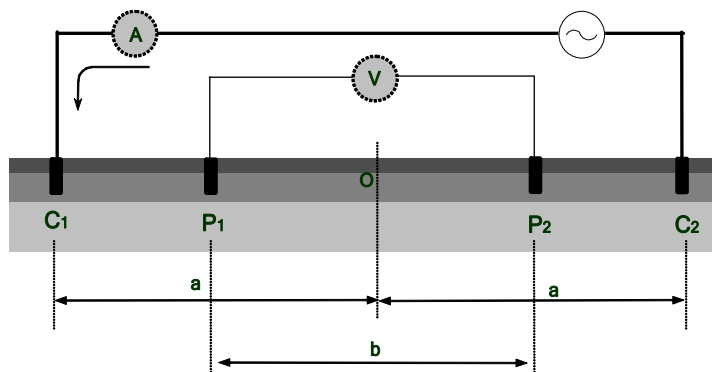


그림 4.5 Schlumberger의 4 전극법 구성도

4.5. Dipole-Dipole법

Dipole-Dipole법은 그림 4.6과 같이 Wenner의 4 전극법 응용 예인 Wenner Beta 법에서 측정의 편의성을 도모하기 위해 C_1 전극과 P_1 전극의 거리를 C_1 전극과 C_2 전극 또는 P_1 전극과 P_2 전극 간 거리의 정수배가 되도록 배치한 방법이다.

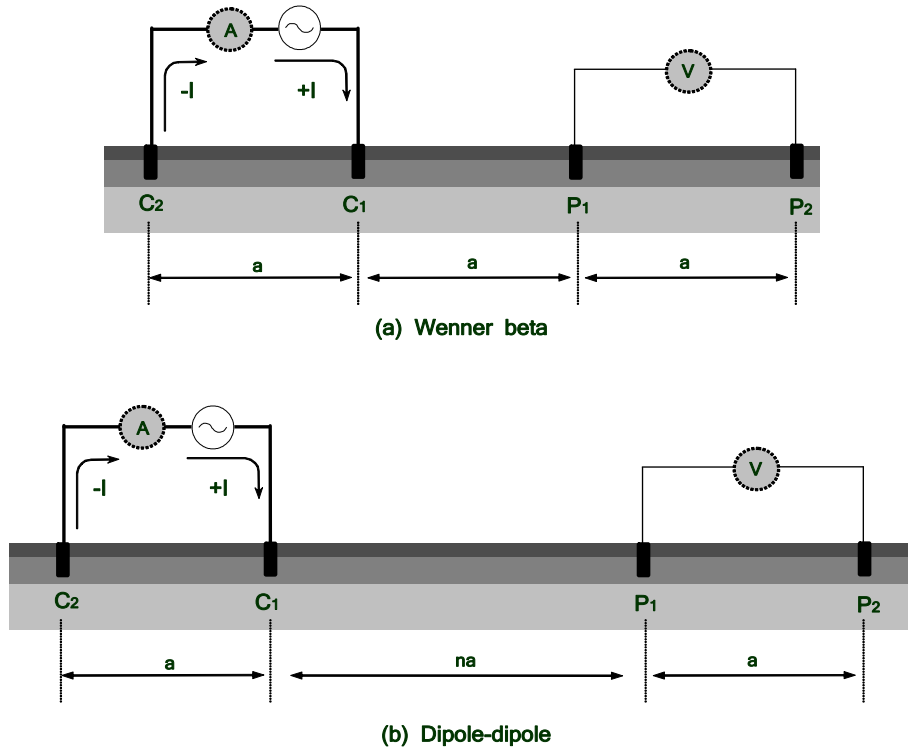


그림 4.6 Wenner Beta 법과 Dipole-Dipole법의 구성도

수식 4.4 및 수식 4.5를 산출하는 방법과 동일하게 Wenner Beta 법과 Dipole-Dipole 법에서의 대지 저항률은 다음과 같이 계산된다.

그림 4.6(b)에서 C_1 과 C_2 전극에 흐르는 전류에 의한 P_1 과 P_2 전극의 전위 V_1 , V_2 는 식 수식 4.9와 수식 4.10과 같다.

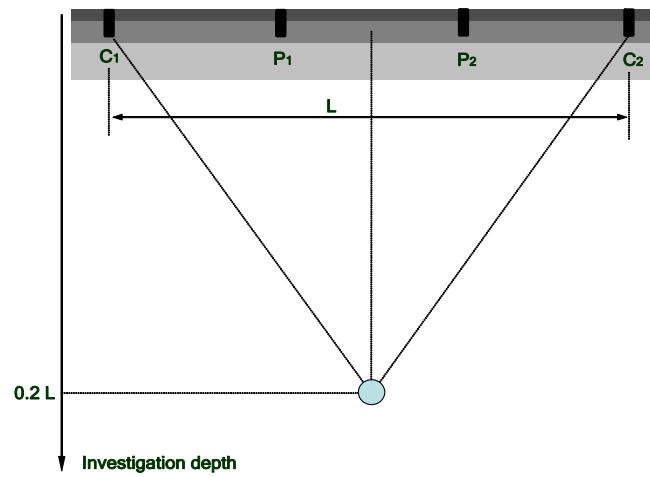
$$V_1 = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{na} - \frac{1}{(n+1)a} \right) \quad \text{수식 4.9}$$

$$V_2 = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{(n+1)a} - \frac{1}{(n+2)a} \right) \quad \text{수식 4.10}$$

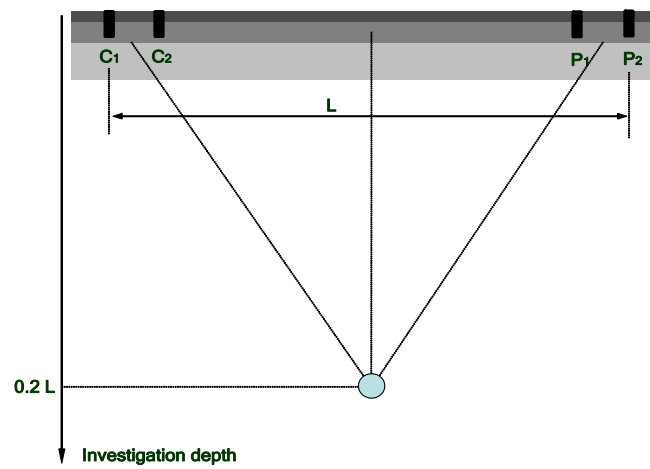
따라서 P_1 전극과 P_2 전극 사이의 전압 V 는 아래 수식 4.11과 같이 된다.

$$\begin{aligned} V = V_1 - V_2 &= \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{na} - \frac{1}{(n+1)a} - \frac{1}{(n+1)a} + \frac{1}{(n+2)a} \right) \\ &= \frac{\rho I}{\pi} \left(\frac{1}{n(n+1)(n+2)a} \right) \end{aligned} \quad \text{수식 4.11}$$

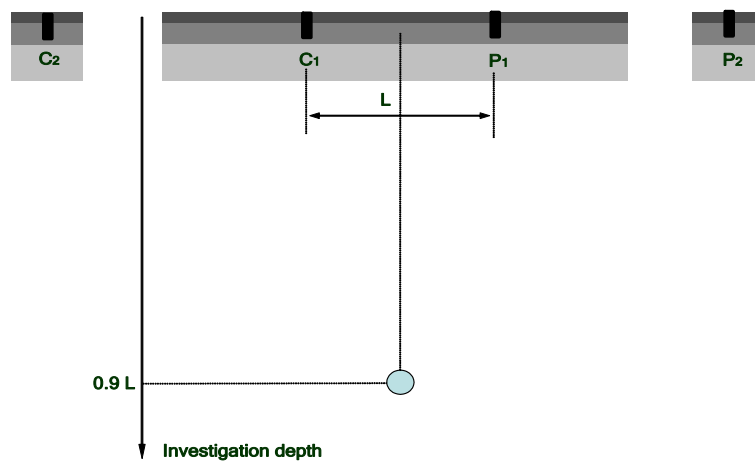
수식 4.11로부터 Dipole-Dipole법에 의해 측정되는 대지 저항률은 수식 4.12와 같이 표현된다. $n=1$ 인 경우, 즉, 등 간격인 경우 Wenner Beta 법이 되며 이때의 대지 저항률은 식 수식 4.13과 같다.



(a) Wenner, Schlumberger



(b) Dipole-Dipole

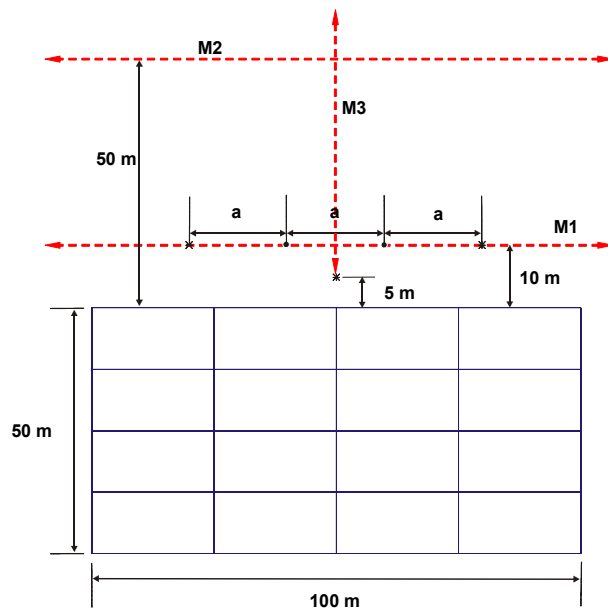


(c) Pole-pole

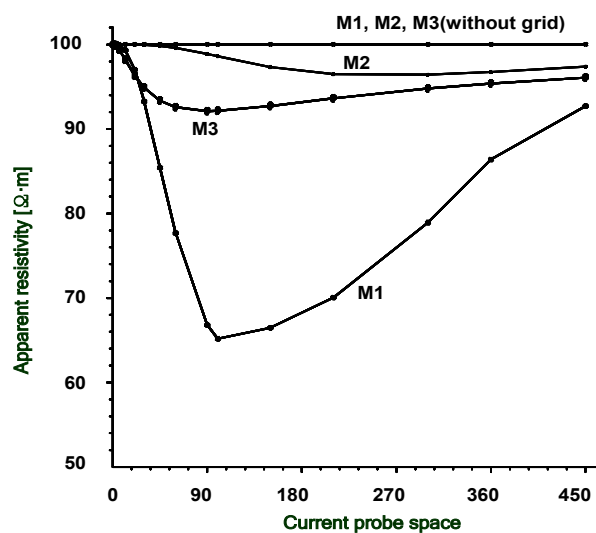
그림 4.8 전극 배치에 따른 대지 저항률 측정 깊이 추정

4.7. 도전성 매설물의 영향

지중에 매설되었거나 지중에 도전 경로를 가지고 있는 철로, 수도관, 기타 금속관 등은 대지 저항률의 측정에 큰 영향을 준다. 실제로 대지 저항률을 측정할 때 주위에 도전성 매설물이 있는 경우에는 대지 저항률 곡선이 급격히 감소하는 결과를 초래한다. 대지 저항률 곡선의 감소 정도나 범위를 통하여 지중에 매설된 도전성 물체가 어느 정도 규모로 영향을 주는지는 짐작할 수 있지만 실제의 대지 저항률에 비하여 대단히 낮은 값으로 측정 결과를 나타내는 경우도 있기 때문에 주의하여야 한다.



(a) 측정선 배치



(b) 겉보기 대지 저항률 곡선

그림 4.9 도전성 매설물이 대지 저항률 측정에 미치는 영향

그림 4.9에는 $50 \times 100 \text{ m}^2$ 의 접지망 근처에서 대지 저항률을 측정할 경우 접지망이 없는 경우와 비교하여 대지 저항률 곡선을 나타내었다. 대지 저항률 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 인 단일층 대지에서 접지망이 없는 경우에는 M1 ~ M3 모두 동일한 직선으로 나타나지만 근처에 접지망이 존재하는 경우에는 대지 저항률 곡선이 접지망 근처에서 매우 낮아지는 결과를 보이고 있다. 이러한 도전성 매설물의 영향은 거리가 가까울수록, 측정 전극을 포설하는 방향이 매설된 도전성 물질과 나란한 방향일수록 크게 나타나므로 가능한 수직 방향으로 전극을 배치하거나 거리를 멀리하여 측정하는 것이 바람직하다.

5. 대지 저항률 분포 해석

접지 시스템의 설계에서 대지 저항률의 측정은 단순히 각 측정 유형별 대지 저항률을 계산한 값만으로서 4 장에서 설명한 바와 같이 측정 현장 대지의 적정 요율 구간 깊이의 대지 저항률의 평균치로서의 의미를 갖는 것이다. 또한 실제의 대지 저항률은 시설 현장의 각 지점 위치마다의 변화가 있으므로 이를 전체적으로 어떠한 분포를 이루고 있는지를 분석하고 이를 토대로 적절한 접지 시스템 시설 설계를 위한 대지 구조를 분석할 필요가 있으며 이 과정까지가 진정한 의미의 대지 저항률 측정이라 할 수 있다. 따라서 본 절에서는 대지 저항률의 분포 해석을 통한 대지 구조를 분석하는 기술을 설명한다.

5.1. 대지 구조와 대지 저항률

5.1.1. 대지의 분류

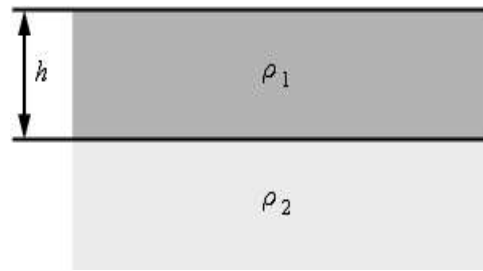
대지 저항률은 대지의 위치, 토양의 성분, 기후, 토양에 함유된 화학적 성분 등 여러 가지 요소에 의해서 변화하며 대지를 토양의 저항률의 크기 범위에 따라 표 5.1에 나타난 바와 같이 대별할 수 있다. 대지는 균일한 토질로 이루어진 경우가 흔하지 않으며 다른 토질의 토양으로 된 몇 개의 층을 이루고 있는 경우가 보통이므로 지층에 따라 대지 저항률도 다르다. 대지 표면의 상부 지층의 대지 저항률이 낮지만 깊은 층의 대지 저항률이 대단히 큰 경우 또는 이와 반대의 경우도 있기 때문에 접지의 설계에 있어서는 대지 저항률의 분포 해석과 대지 구조의 분석이 필요하다.

표 5.1 저항률에 의한 대지의 분류

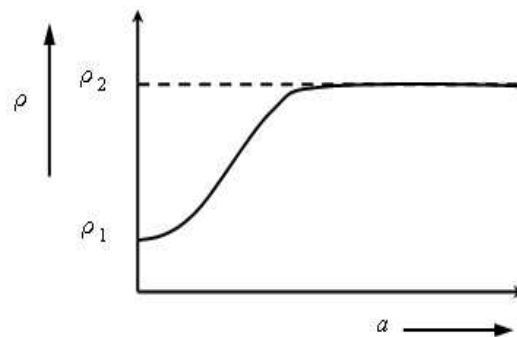
분류	저항률 $\Omega \cdot \text{m}$	특징
저저항률 지대	$\rho < 100$	항상 토양에 수분이 많이 함유되어 있는 하구 또는 해안 지역
중저항률 지대	$100 \leq \rho < 1000$	지하수를 쉽게 얻을 수 있는 내륙의 평야 지대
고저항률 지대	$1000 \leq \rho$	배수가 잘 되는 구릉 지대, 고원, 암반 지대

5.1.2. 대지 구조와 대지 저항률의 관계

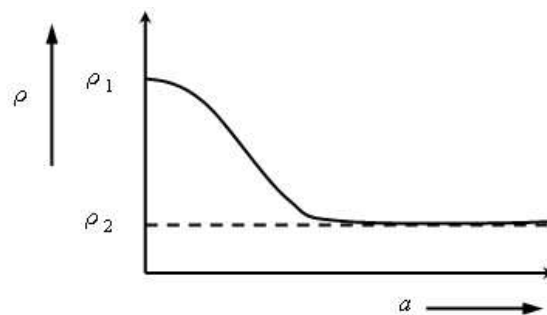
Wenner의 4 전극법에서 측정된 대지 저항률 곡선을 통하여 대지의 지층 구조를 파악할 수가 있다. 즉, $\rho-a$ 곡선을 이용하여 지층의 구조와 각 지층의 대지 저항률을 산출할 수 있게 된다. 그림 5.1에는 수평 2층 구조인 대지, 그림 5.2에는 수평 3층 구조인 대지의 $\rho-a$ 곡선의 대표적인 예를 나타내었다.



(a) 수평 2층 구조의 대지 모델



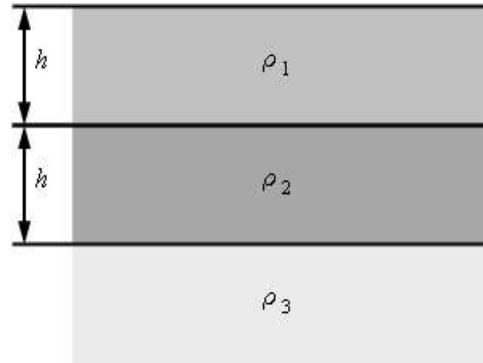
(b) $\rho_1 < \rho_2$ 인 경우



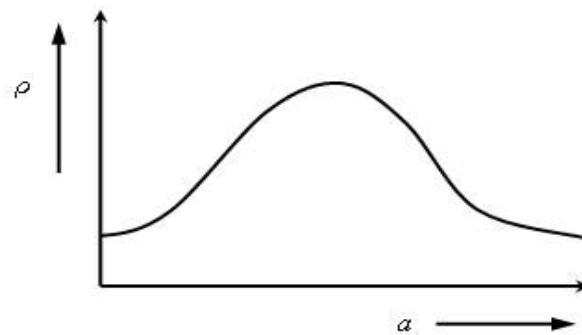
(c) $\rho_1 > \rho_2$ 인 경우

*출처 : 부록 II의 [1]

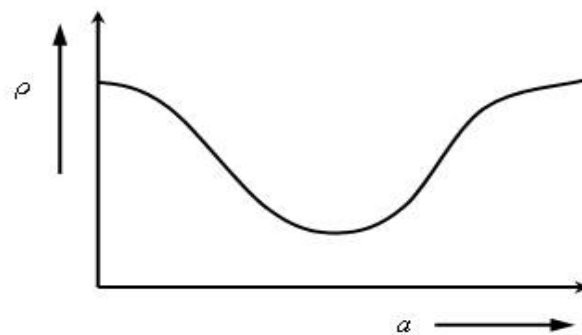
그림 5.1 수평 2층 구조인 대지의 $\rho-a$ 곡선



(a) 수평 3층 구조의 대지모델



(b) $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$ 인 경우



(c) $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$ 인 경우

*출처 : 부록 II의 [1]

그림 5.2 수평 3층 구조인 대지의 $\rho-a$ 곡선

$\rho-a$ 곡선을 구하게 되면 대지의 지층의 수, 각 지층의 대지 저항률 및 지층의 두께 등을 대지의 구조 해석을 통하여 알 수 있으며, 이것을 바탕으로 효과적인 접지의 시공 방법을 선정할 수 있으므로 합리적인 접지 설계의 기본이 된다.

5.2. 2 층 대지 구조의 해석

현재까지 대지 구조의 해석에는 여러 가지 방법이 제안되었으며 일반적으로 접지 시스템의 설계에 있어서는 2층 대지 구조가 가장 많이 적용되고 있으므로 여기에서도 2 층 대지 구조의 해석에 대해서 살펴본다. 그림 5.1 (a)에 나타낸 바와 같이 상부 지층의 대지 저항률 ρ_1 , 하부 지층의 대지 저항률을 ρ_2 , 상부 지층의 두께는 h 이고, 반사 계수를

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} = \frac{\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1}{\frac{\rho_2}{\rho_1} + 1} \quad \text{수식 5.1}$$

이라고 하면, 그림 5.1에 나타낸 2층 대지 구조에 대한 Wenner의 4 전극법으로 측정한 합성 대지 저항률은 다음 식으로 표현된다.

$$\rho(a) = \rho_1 \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left(\frac{1}{\sqrt{1 + (2nh/a)^2}} - \frac{1}{\sqrt{4 + (2nh/a)^2}} \right) \right] \quad \text{수식 5.2}$$

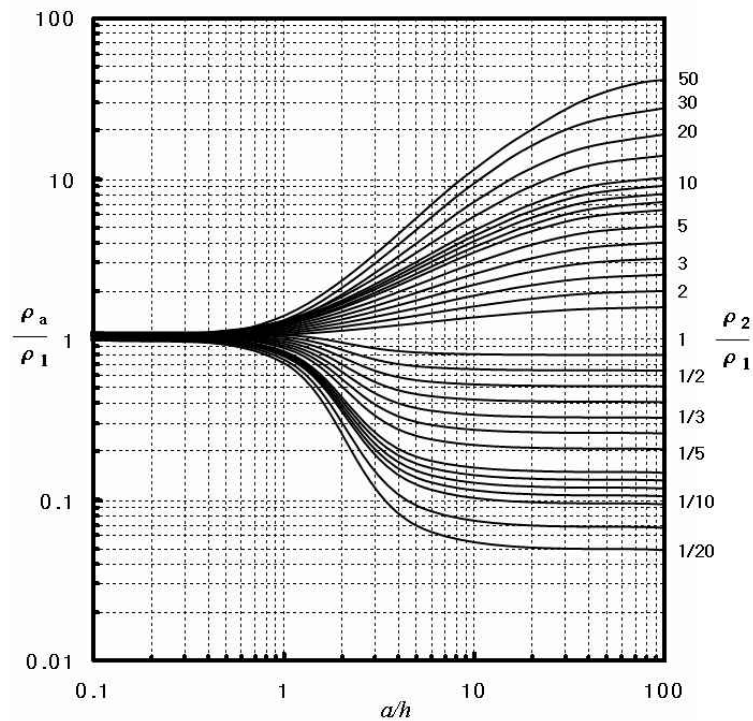
또한 직경이 d m이고, 길이가 l m인 봉형 접지극을 2층 구조의 대지에 시설한 경우의 접지저항 산출에 적용할 수 있는 합성 대지 저항률은 다음의 G. F. Tagg의 식으로 나타낼 수 있다.

① $l < h$ 인 경우

$$\rho_d = \rho_1 \left(1 + \frac{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{2} \ln \frac{nh+l}{nh-l}}{\ln \frac{4l}{d} - 1} \right) \quad \text{수식 5.3}$$

② $l > h$ 인 경우

$$\rho_d = \frac{\rho_1 \rho_2 l}{\rho_2 h + \rho_1 (l-h)} \left[1 + \frac{\sum_{n=1}^{\infty} K^n \ln \frac{2nh+l}{(2n-2)h+1}}{\ln \frac{4l}{d} - 1} \right] \quad \text{수식 5.4}$$



*출처 : 부록 II의 [1]

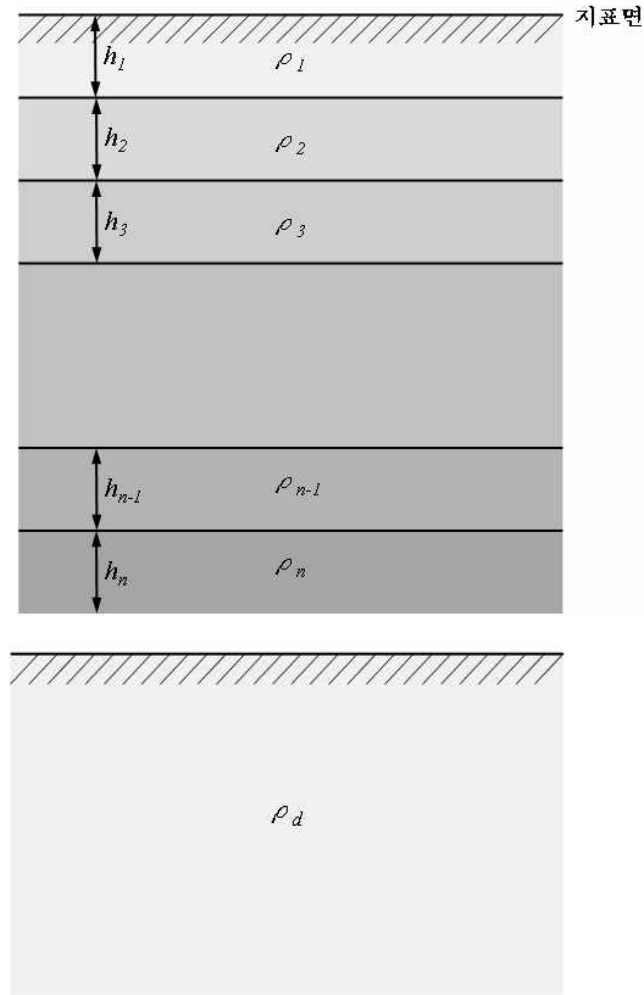
그림 5.3 ρ_2/ρ_1 을 파라미터로 하여 나타낸 a/h 에 대한 $\rho(a)/\rho_1$ 의 곡선

수식 5.2의 $\rho(a)$ 는 상부 지층의 대지 저항률 ρ_1 , 하부 지층의 대지 저항률 ρ_2 및 h/a 의 함수로 되어 있다. 그림 5.3에는 ρ_2/ρ_1 을 파라미터로 하여 a/h 에 대한 $\rho(a)/\rho_1$ 의 관계를 나타내었으며, 이를 Sundberg의 2 층 표준 곡선이라고도 한다.

따라서 Wenner의 4 전극법으로 측정한 $\rho-a$ 곡선이 2 층 대지 구조라고 판단되는 경우에는 $\rho-a$ 곡선을 그림 5.3과 비교하여 ρ_2/ρ_1 을 결정할 수 있다. 또한 ρ_2/ρ_1 가 결정되면 상부 지층의 대지 저항률 ρ_1 과 상부 지층의 두께 h 를 산출할 수 있다.

5.3. 다층 대지 구조의 해석

접지극을 설치하였을 때 접지저항이 형성되는 범위의 대지 구조는 대단히 복잡하고 다양하며, 균일한 토질로 이루어진 단층 대지는 매우 드물다. 3 층 이상의 대지 구조는 분석하기가 매우 어려우며 실제의 접지 설계에 적용하기도 쉽지 않다. 따라서 다층 구조의 대지 해석에는 전용 분석틀을 사용하여 계산하거나 균일한 토양의 대지로 등가화하여 사용한다. 균일한 토질의 단층 대지로 가정하여 접지저항을 산출하기 위해서는 접지저항의 형성 영역에 대한 대지 저항률을 등가의 균일한 대지로 환산하는 것이 필요하다. 다층 구조의 대지를 등가의 균일한 토양의 대지로 나타내는 방법으로는 평균 대지 저항률 또는 등가 대지 저항률을 적용하는 방법이 있다.



*출처 : 부록 II의 [1]

그림 5.4 다층 구조의 대지

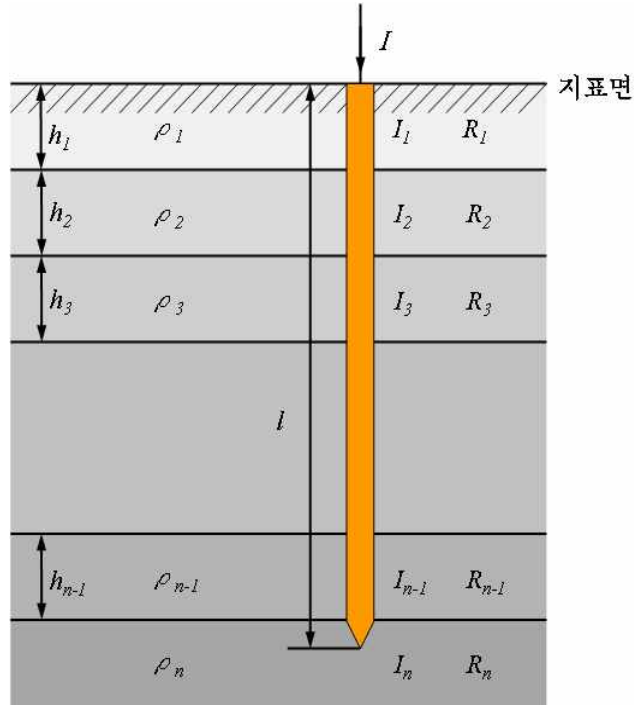
그림 5.4에 나타난 바와 같이 수평인 n 층의 대지를 고려할 때 각 지층이 병렬로 접속되어 있는 것으로 가정하여 합성 저항을 산출하는 방법으로 계산하면

$$\frac{h_1 h_2 h_3 + \cdots + h_n}{\rho_d} = \frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} + \frac{h_3}{\rho_3} + \cdots + \frac{h_n}{\rho_n} \quad \text{수식 5.5}$$

의 관계가 성립된다. 따라서 평균 대지 저항률 ρ_d 는 수식 5.6과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho_d = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\rho_i}} \quad \text{수식 5.6}$$

그러나 각 지층에서의 대지 저항률을 산출하는 것이 그다지 용이하지는 않으므로 실용적이지 못하다. 따라서 등가적으로 다음과 같이 대지 저항률을 산출하는 것이 일반적이다.



*출처 : 부록 II의 [1]

그림 5.5 다층 구조의 대지에 매설된 봉형 접지극의 접지저항 산출

봉형 접지극에 흐르는 전류 밀도가 각 지층의 대지 저항률에 반비례하는 것으로 가정하면 각 지층에서의 전류는 균일하게 된다. 따라서 수식 5.7 및 5.8의 관계가 성립된다.

$$\rho_1 I_1 = \rho_2 I_2 = \rho_3 I_3 = \cdots = \rho_n I_n \quad \text{수식 5.7}$$

$$I_1 h_1 + I_2 h_2 + I_3 h_3 + \cdots + I_n (l - h_1 - h_2 - h_3 - \cdots - h_{n-1}) = I \quad \text{수식 5.8}$$

이들 수식으로부터 균일한 토양으로 등가화시킨 대지로 생각할 때의 등가 대지 저항률 ρ_e 는

$$\rho_e = \frac{l}{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{h_i}{\rho_i} + \frac{l - h_{n-1}}{\rho_n}} \quad \text{수식 5.9}$$

여기서,

$$h_{n-1} = \sum_{i=1}^{n-1} h_i$$

가 된다.

이와 같이 대지 저항률을 산출하게 되면 다른 방법에 비해서 간단하며 실용적이다. 예를 들면 2 층 구조 대지에 봉형 접지극이 매설된 경우라고 생각하면 등가화시킨 대지 저항률은 수식 5.9로부터 수식 5.10과 같이 비교적 쉽게 얻을 수 있다. 즉, 수식 5.4의 우변의 제1항만을 고려한 개략적인 계산식과 동일하다.

$$\rho_e = \frac{l}{\frac{h_1}{\rho_1} + \frac{l-h_1}{\rho_2}} \quad \text{수식 5.10}$$

다층 구조의 대지에 접지극을 설치하는 경우 각 층의 대지 저항률이 다르며, Wenner의 4 전극법으로 대지 저항률을 측정하더라도 전극의 간격에 따라 대지 저항률이 다르기 때문에 어느 간격에서 측정한 대지 저항률이 적합한가를 결정하는 것이 매우 어렵다. 따라서 Wenner의 4 전극법으로 대지 저항률을 측정한 결과를 바탕으로 접지극의 매설 깊이에 상당하는 위치의 대지 저항률을 추정하는 것이 바람직하다. 대지 저항률의 측정값은 합성 대지 저항률이며, 또한 측정할 때의 측정용 전극의 간격에 따라 다르게 되므로 $\rho-a$ 곡선으로부터 지층 구조와 지층의 깊이, 각 층의 대지 저항률을 산출한다.

5.4. 대지 저항률 분포 분석에 있어서의 차원적 접근 방식

앞서 언급하였듯이 대지 저항률 측정은 접지극 시설 지역의 대지 저항률 분포 상태를 분석함으로써 온전한 측정이 이루어진다고 할 수 있다. 그것은 대지 저항률 측정이 단순히 어느 한 지점에 대하여 이루어지는 것으로서는 전체적인 접지 시스템 구축에 실질적인 의미를 가져다 줄 수 없기 때문이다.

이상에서 언급한 대지 구조 해석 방법은 1차원적인 방법에 해당된다. 1차원적 해석 모델이라 함은 단지 대지 깊이 방향만으로는 대지 저항률 차이에 의한 분포를 해석한다는 의미이다. 이것은 대지 저항률 지층을 구분하여 판단하는 것이다. 차원적 접근 방식에 의한 대지 저항률 분포 개념 모델은 이러한 1 차원에 의한 해석 방법을 2 차원과 3 차원 형태로 확장하는 것이다.

1 차원 해석의 문제는 수평 방향으로의 대지 저항률 변화에 대하여는 표식되지 못한다는 것이다. 이에 따른 측정 해석상의 오류가 있을 수 있으므로 이 문제의 보완을 위하여는 2 차원 해석 방법이 요구된다. 이것은 깊이 방향으로의 대지 저항률과 함께 수평 방향으로의 대지 저항률의 분포 구조를 같이 파악하도록 하기 위한 것이다. 2 차원 대지 구조의 해석을 위하여는 측정 전극의 수평 방향으로의 이동을 수행함으로써 달성할 수 있다. 즉 해석 깊이의 증가와 함께 횡 방향으로의 측정 영역 변화에 따른 대지 저항률의 분포 해석을 포함하게 된다. 깊이에 따른 대지 저항률 지층 해석과 수평 방향으로의 대지 저항률 변화 분포가 종합된 해석 작업은 일반적으로 수작업으로는 해결할 수 없고 상용화된 패키지로서의 컴퓨터 프로그램을 사용하여 수행할 수 있다. 이를 통해 접지 시스템 구축 시에 사실상 대지 저항률이 가장 적합한 범위와 위치를 선별할 수 있게 된다.

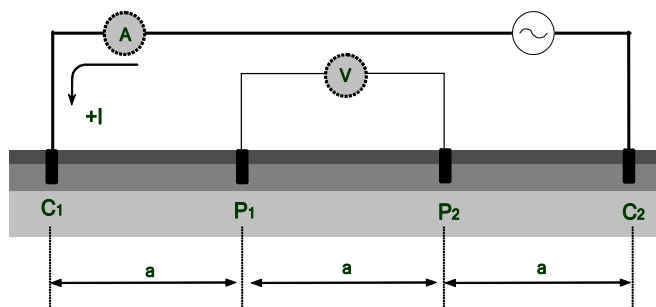
3차원 측정 해석은 2차원 측정 해석 구성에 의한 수평 방향 측정 노드(횡 방향)에 대하여 종 방향(2차원에서 수행한 횡 방향에 대하여 수직 방향)으로의 확장을 추가한 분석을 수행함으로써 이루어질 수 있다. 그러나 3차원 측정 해석은 측정 전극 시설과 측정의 시행 및 분석 등에 소요되는 시간과 비용이 늘어나고 해석 과정이 매우 복잡해지는 단점이 있다.

부 속 서 A

측정 전극 배치에 따른 변형 관계

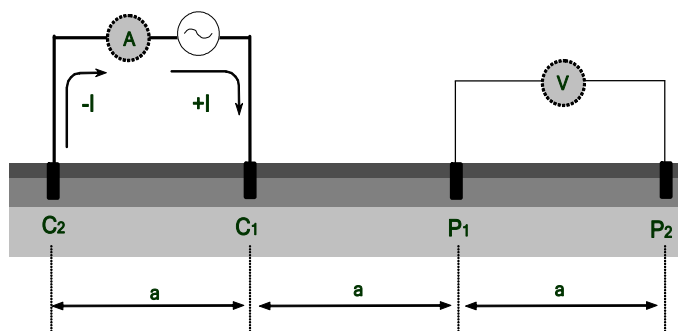
그림 A.1에 본문에서 설명한 Wenner의 4 전극법과 Schlumberger의 4 전극법을 포함하여 대지 저항률 측정에 사용될 수 있는 전극 배치의 여러 가지 형태 및 각각에 대한 대지 저항률 계산식을 나타내었다. 일반적으로 Wenner 4 전극법으로 알려진 Wenner alpha 법을 많이 사용하지만 경우에 따라서는 Schlumberger법이나 Dipole-Dipole법이 대지의 전기적인 구조를 해석할 때 효과적으로 사용되기도 한다. 각각의 측정 방법은 측정 장소의 조건에 따라 측정자가 선정하여 사용할 수 있으며, 정확한 전극 배치를 통하여 얻어진 인가 전류와 지표면의 전위 분포로부터 대지 저항률을 계산하면 된다.

그림 A.1 (e)는 (f)의 Dipole-Dipole법과 유사하나 C_2 전극과 P_2 전극을 $C_1 \sim P_1$ 사이의 거리 a 보다 충분히 멀리 위치시켜 각각 하나의 독립된 pole로 간주할 수 있는 경우이다. 이것은 이론적으로는 무한 원점기준의 시험전류에 대한 전위차를 측정하는 것으로서 C_2 전극과 P_2 전극은 없는 것과 같다. 이와 같은 측정 구성의 목적은 가장 넓은 측정 범위를 얻고자 하는 것이나 상대적으로 대지 구조 해석에 있어서 정밀도는 떨어진다. 실제로 C_2 및 P_2 전극없이 측정할 수는 없기 때문에 무한 원점의 효과를 얻기 위해서는 C_1 및 P_1 전극의 간격에 대하여 C_2 및 P_2 전극 간격을 매우 멀리 띄우도록 하여야 하는데 규격 측면에서 측정 오차가 5 % 미만인 되도록 하기 위해서는 20 배 이상의 간격을 갖도록 하여야 한다. 이러할 때의 또 한 가지 문제는 측정 범위의 최대화의 목적상에서 현장 여건에서 그만한 이격 거리 확보가 사실상 곤란할 것이라는 것이다. 그래서 이 측정 구성은 C_1 및 P_1 전극 간격이 단지 수 미터 정도 범위의 측정에 유효하며 응용의 측면에서는 비교적 소규모 범위의 측정이 소요되는 고고학 탐사에 있어 많이 사용되는 방법이다.



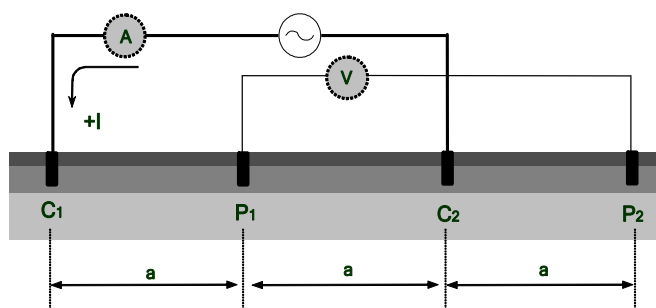
$$\rho = 2\pi a R$$

(a) Wenner Alpha



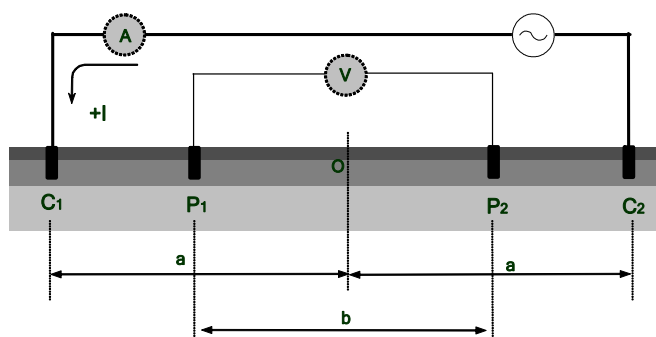
$$\rho = 6\pi a R$$

(b) Wenner Beta



$$\rho = 3\pi a R$$

(c) Wenner Gamma



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

(d) Schlumberger

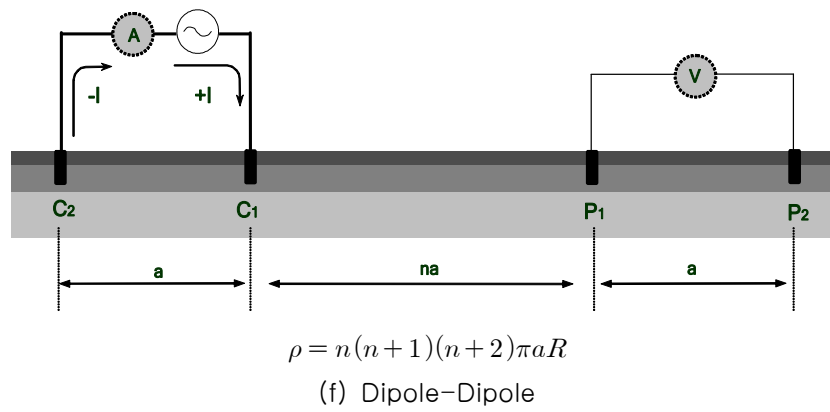
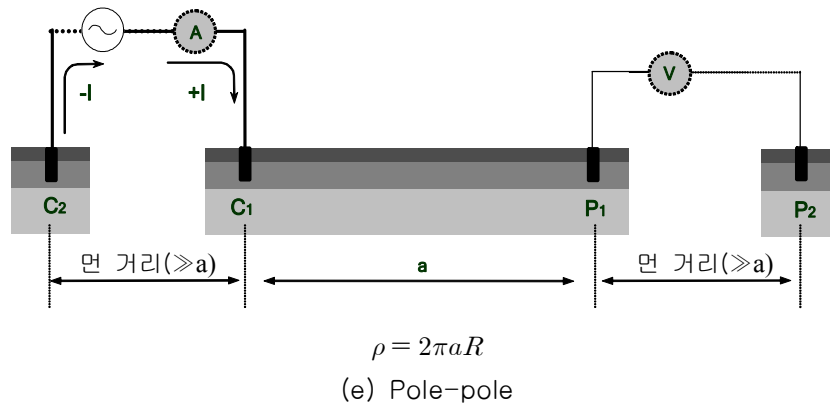


그림 A.1 대지 저항률 측정을 위한 전극 배치 방법

부 록 I

대지 저항률의 일반 특성

I.1. 개요

접지저항은 접지극이 매설된 대지를 구성하는 토양의 종류와 물리적 조건, 토양의 구조 등에 따라 변화하는데, 특히 대지 저항률이 직접적으로 큰 영향을 미친다. 접지극이 매설되는 지점에서 토양의 저항률 또는 대지 저항률이 접지의 성능을 크게 좌우하게 되므로 대지 저항률이 낮은 장소일수록 낮은 접지저항을 얻기 쉽다. 따라서 접지의 설계와 시공에 있어서 접지극 매설지점의 대지 저항률과 지층의 구조를 정확하게 측정하는 절차가 필요하다.

접지를 시공하는 장소의 대지 저항률은 토질이나 토양 내에 함유되어 있는 화학 물질, 염분, 수분의 함유량, 토양의 온도 등에 따라 크게 변동한다.

I.2. 대지 저항률의 기본 개념

접지극을 통하여 대지로 흐르는 전류, 즉 접지 전류는 전자의 이동에 의한 전기전도와 이온의 이동에 의한 전기전도에 의해서 흐르게 된다. 전류의 흐름에 대한 물질의 저항은 전기 저항률 또는 고유 저항으로 특징지워지며, 전기 저항률 또는 저항률 $\Omega \cdot m$ 은 옴의 법칙의 미분형으로 나타낸 다음의 수식 I.1로부터 도출할 수 있다.

$$E = \rho j \quad \text{수식 I.1}$$

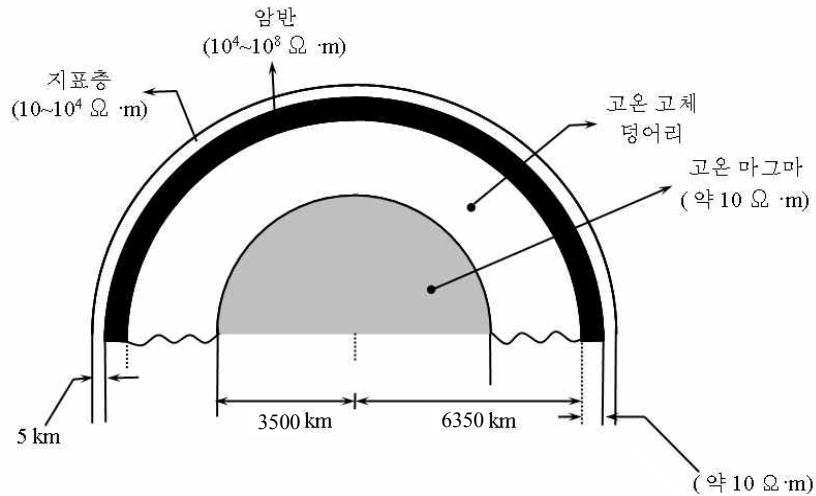
여기서 E V/m는 전위 경도, j A/m²는 전류 밀도이다.

단면적이 1 m² 이고, 길이가 1 m 인 토양의 전기저항을 대지 저항률이라고 하며 단위는 $\Omega \cdot m$ 이다. 대지 저항률을 나타내는 기호는 보통 ρ 를 사용한다. 또한 대지 저항률의 역수를 대지 도전율이라고 한다. 대지 도전율은 보통 σ 로 표기하고 그 단위는 Ω/m 또는 S/m로 표기한다.

대지 저항률을 대지 비저항 또는 대지 고유 저항이라고도 한다.

I.3. 거시적인 대지의 지질학적 모델

그림 I.1에 나타낸 바와 같이 지구의 전기·지질학적 모형은 매우 낮은 저항률을 갖는 반경 3500 km인 고온 마그마 핵과 고온이며 단단하고 저항률이 낮은 2850 km의 두꺼운 층으로 둘러싸인 구형의 고체 덩어리로 모형화할 수 있다. 또한 비교적 저항률이 큰 암반으로 이루어진 또 다른 얇은 층이 그 외곽을 둘러싸고 있다. 균일한 저항률의 여러 수평 층으로 이루어진 이와 같은 모형은 각 층에서 저항률의 수직적 변동에 따라 또 다른 층으로 볼 수 있는 것이 특징이다.

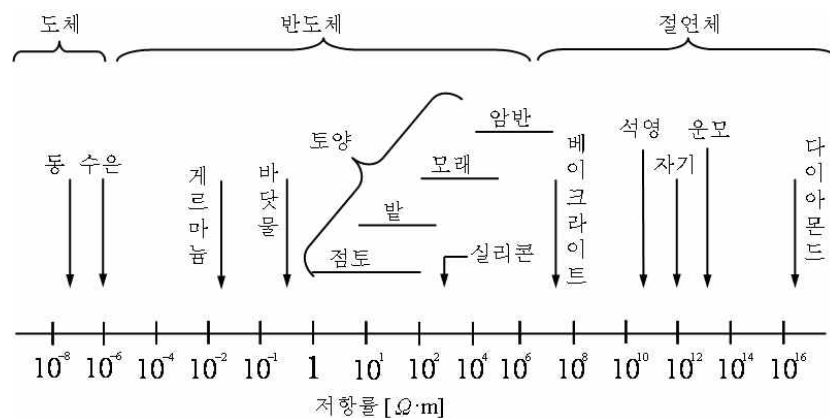


*출처 : 부록 II의 [1]

그림 1.1 전기·지질학적 지구의 모형

1.4. 일반적인 대지 저항률

토양의 주 성분은 규산(SiO_2)과 산화알루미늄(Al_2O_3)이므로 완전한 건조 상태에서는 전기가 흐르지 않는 절연체이다. 그러나 자연계의 토양이 완전한 건조 상태는 아니므로 어느 정도의 도전성을 가지며, 토양에 수분이 함유되는 정도에 따라 저항률이 급격히 변동하는 저항 특성을 나타낸다. 대지는 금속에 비하면 매우 도전율이 낮은 반도체로 볼 수 있으며, 대표적인 물질의 저항률을 그림 1.2에 나타내었다. 대지 저항률이 토양의 구성 성분에 따라 차이가 10^5 배 이상 크게 나타나는 것은 진흙, 점토, 모래, 자갈, 암반 등 지질의 구성과 지형 등 장소에 따라 다른 값을 가지기 때문이다. 동(copper)의 저항률 $10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 에 비해서 일반적인 토양의 대지 저항률은 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 이므로 10^{10} 배의 차이를 가지기 때문에 접지 시스템을 설계할 때 접지극 자체의 저항은 크게 영향을 미치지 않는다.



*출처 : 부록 II의 [1]

그림 1.2 대표적인 물질의 저항률

1.5. 대지 저항률에 영향을 주는 요소

지구의 표면에 존재하는 모든 암석들은 기공성이며, 암석의 기공도는 그의 전기적 특성을 결정하는 중요한 요소이다. 화강암이나 석회암은 기공도가 1 % 이하로 매우 적지만 기공도가 50 %에 이르는 암석도 있다. 암석의 기공에 염분을 포함한 물이 채워지면 저항률은 낮아지게 된다.

지구 표면에 존재하는 암석의 전기 전도는 전해질에 의한 이온성 전도가 지배적이지만 수분의 함유량, 염분의 농도, 암석에 포함된 금속의 종류 및 농도에 따라 전기 전도의 정도는 변화하게 된다. 완전히 동결되어 있거나 깊게 매장되어 있어 높은 압력을 받는 암석에서는 전자성 전도가 우세하다. 대지 표면 근처의 토양의 저항률은 수분의 함량과 수분에 용해되어 있는 염분의 특성에 따라 변화하므로 토양이나 암석의 저항률을 단일의 특정한 값으로 나타내기는 어렵다.

대지는 다양한 형태와 점유체적을 가지는 서로 다른 저항률을 갖는 물질의 혼합으로 이루어져 있으며, 대지 표면 가까이에서의 전기전도는 주로 전해질에 의해 일어나고 대지 저항률의 차이는 함유되어 있는 수분의 양과 염분의 특성에 따라 변화한다. 대지의 전기적 특성을 지배하는 물리적 특성 요소 중에서 비투자율 μ_r 은 약 1로 일정하지만 비유전율 ϵ_r 은 1 ~ 100의 범위이다. 대지 저항률 ρ 는 1 ~ 10000 $\Omega \cdot m$ 까지 변동하며, 대지의 전기적 특성에서 대지 저항률 ρ 의 변동은 비유전율 ϵ_r 의 변동보다 훨씬 더 크게 영향을 미친다.

1.6. 대지의 거시적인 등가 회로 모델

접지극이 매설되는 토양은 주로 저항체와 유전체로 작용하며, 고주파 영역을 제외하고는 순수 저항체로 나타내는 것이 일반적이다. 또한 토양의 저항률은 접지극 주변의 전위 경도가 절연 파괴 강도 이하일 때는 전위 경도에 영향을 받지 않지만 전위 경도가 수 kV/cm 정도에서는 약간 변화한다. 대지의 전기적 특성을 고려한 등가회로를 그림 1.3에 나타내었다. 이 구조는 저항과 커패시터의 병렬 구조로 이루어져 있으며, 높은 전위 경도에서 방전이 발생할 경우 저항이 급격히 줄어들 수 있다는 데에 착안한 모델이다. 일반적으로 저주파 대역에서의 대지는 저항성 특성을 보이므로 대지 저항률의 관점에서 접근하게 된다.

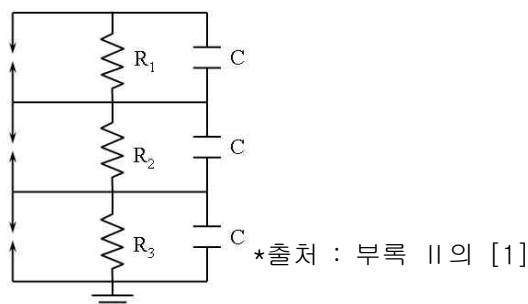


그림 1.3 토양의 전기적 등가회로

부 록 II

관 련 문 헌

- [1] 이복희, 이승철, ‘접지의 핵심 기초 기술’, (주)의제전기설비연구원, 2005.

방송통신표준

대지 저항률 측정 기술 (Measurement of Earth Resistivity)

발행인 : 미래창조과학부 장관

발행처 : 미래창조과학부 국립전파연구원

140-848, 서울 용산구 원효로 41 길 29

발행일 : 2013.12.

국립전파연구원 고시 제2013-20호
