

碩士學位論文

火山岩 地層으로 이루어진 濟州西部
地域의 通信接地시스템에 관한 研究



濟州大學校 産業大學院

電子電氣工學科

通信工學 專攻

徐 泰 洙

2004

碩士學位論文

火山岩 地層으로 이루어진 濟州西部
地域의 通信接地시스템에 관한 研究

指導教授 金 興 洙



濟州大學校 産業大學院

電子電氣工學科

徐 泰 洙

2004

火山岩 地層으로 이루어진 濟州西部地域의
通信接地시스템에 관한 研究

指導教授 金 興 洙

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.

2004 年 6 月 日

濟州大學校 産業大學院

電子電氣工學科 通信工學 專攻



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

徐 泰 洙

徐泰洙의 工學碩士學位 論文을 認准함

2004 年 6 月

委員長 李 鎔 鶴 印

委 員 梁 斗 榮 印

委 員 金 興 洙 印

목차

Abstract	1
I. 서론	3
II. 접지시스템	5
1. 접지시스템	5
2. 대지저항률	6
1) 대지저항률 측정방법	8
2) 접지저항 측정방법	10
III. 접지방식	14
1. 접지전극의 종류	14
1) 일반 접지봉 접지	14
2) 망상 접지	17
3) 화학 저감제 접지	19
4) 전해질 접지시스템	19
2. 접지 구성방식	22
1) 독립접지	22
2) 공통접지	25
3. 통신설비의 접지 구성	26
1) 통신시스템 배선	26
2) 피뢰 및 철탑 접지	27
3) 통신시스템 접지	27
IV. 대지저항률 측정 및 분석	30
1. 제주도의 지질 구조	30
2. 대지저항률 측정	32
3. 대지저항률의 종합 분석	34
V. 접지시스템 설계	36
1. 일반 접지봉 접지 설계	36

2. 망상 접지 설계	38
3. 전해질 접지시스템 설계	39
VI. 통신 접지시스템 시공 및 고찰	42
1. 통신 접지시스템 시공	42
2. 통신 접지시스템의 시공 결과 및 고찰	44
VII. 결론	45
참고문헌	46



A Study on Communication Grounding Systems on Layer of Volcanic Rock in the Western Area of Jeju

Tae-Soo Seo

Department of Electronic and Electrical Engineering
Graduate School of Industry
Cheju National University

Supervised by Professor Heung-Soo Kim



Abstract

It is very difficult to establish a grounding system on a layer of rock. So, various methods have been tried to obtain a lower grounding resistance. In this thesis, the grounding system is studied out to ensure communication systems against surge or noise on the layer of volcanic rock of Jeju. In order to obtain the optimal grounding system for the interesting spot,

resistivities of the spot are measured by the Wenner's method and the electrical characteristics and the structures of the layer are analysed by RESAP module of CDEGS. Three grounding systems - the driven rod, the mesh and the electrolytic, are simulated by MALT module of CDEGS on the condition that the grounding resistance is under 10 ohms. In simulation, grounding resistance of the electrolytic grounding system of which working area is 7,814 square meters appears 9.2 ohms. This grounding system is established on the spot of Jeju. And 7.7 ohms of the grounding resistance is measured.

The electrolytic grounding system could present a good ground condition on a layer of rock like as Jeju.

I. 서론

최근의 전기, 전자, 반도체, 그리고 통신기술의 비약적인 발전과 기술의 집적화는 초고속 종합정보통신망의 구현과 통합 네트워크의 운용을 가능케 하였다. 기술의 발전 및 설비의 집적화는 노이즈(noise)로 인한 장비간의 신호 간섭 및 시스템 오동작의 발생 가능성을 높이게 되며 이로 인한 시스템의 운용장애 및 장비 손상의 위험성은 더욱 높아질 것이다. 따라서 통신시스템에 유입되는 서지(serge)와 노이즈 문제의 해결을 위해 안정되고 우수한 접지시스템의 필요성은 절대적이다.(David, 1995)

접지시스템의 역할은 단순히 접지저항만을 낮추는 것이 아니라 현장 환경, 장비 특성 그리고 시스템의 운용 환경을 종합적으로 검토하여 전체 시스템이 신뢰성 있고 안정적인 동작을 유지하도록 하며, 유사 시 인명이나 설비를 최대한 보호하는 역할을 담당하고 있다. 이러한 접지시스템의 성능은 현장의 지질 구조, 토양 성분 그리고 설치되는 지역의 주위 조건에 크게 영향을 받으므로 여러 요소들을 설계 단계에서 분석하여 정확하고 신뢰성 있는 접지 설계가 수반되어야 하며, 단순한 현장 기술이 아닌 장비 특성 및 외부 파라미터를 반영한 과학적인 설계와 설비로 다루어져야 한다.(IEEE, 1983) 그러므로 접지시스템을 설치하기에 앞서, 현장의 대지저항률과 지층 구조에 대한 사전조사 실시 등 현장에 적합한 최적의 설계를 해야만 최상의 접지시스템을 구성할 수 있다.(신 등, 1999)(박 등, 2002)

일반적으로 암반 지층에서의 접지시스템은 정상적인 설치 자체가 쉽지 않고 또한 양호한 성능을 기대하기가 매우 어려우므로 접지 성능을 높이기 위한 다양한 방법들이 시도되고 있다.(최, 1999) 제주도 지역은 전형적인 화산암 지층지대로 접지시스템의 구축 환경이 매우 열악하고, 낙뢰가 매우 빈번한 자연 환경을 갖추고 있다. 따라서 접지시스템으로 인한 문제와 낙뢰로 인한 피해는 발생 정도가 심각한 실정으므로 지형 및 주변 환경의 조건을 적절히 고려한 접지시스템의 구축이 필요하다.

본 논문에서는 제주도의 특수한 지질 구조인 화산암 지층에 적합한 통신 접지시스템을 구성한다. 이를 위하여 전통적으로 사용되고 있는 일반 접지봉 접지, 망상(mesh) 접지, 화학 저감제 접지 그리고 전해질 접지시스템에 대하여 살펴보고, 제주도 암반 지층에서도 우수한 접지 성능을 발휘하고 대용량의 낙뢰 서지를 빠르고 안전하게 방

전시킬 수 있는 접지시스템을 구성한다. 현장의 대지저항률을 측정하기 위해서는 웨너(Wenner) 4전극법(IEEE, 1983)을 적용하며, 측정데이터의 분석은 접지 프로그램인 CDEGS(current distribution, electromagnetic interference, grounding & soil structure analysis)의 RESAP 모듈을 이용한다. 이를 통해 대지의 전기적인 지층 구조와 지층별 대지저항률 특성을 분석한다. 그리고 현장에 맞는 최적의 접지시스템을 설계하기 위해 일반 접지봉 접지, 망상 접지, 그리고 전해질 접지시스템을 비교 및 분석한다. 접지시스템 설계의 비교에서는 연구의 정확성을 위해 동일 현장의 설계 특성이 반영된 CDEGS의 MALT 모듈의 해석 결과를 이용하여 각 접지시스템의 전위 분포 및 여러 가지 현장 데이터를 고찰한다. 비교 분석된 접지시스템 중에서 최상의 접지 성능을 갖는 접지시스템을 현장에 설치하여 그 성능을 확인하고, 설계 및 결과 데이터를 분석한다. 설치된 접지시스템의 접지저항 측정은 IEEE(1983) 및 NEC 규정의 3전극법(3-point fall of potential test)을 이용하여 측정한다.

본 논문의 구성은 II장에서 접지저항과 접지저항을 결정하는 중요한 요인인 대지저항률에 대하여 설명하고 측정방법을 확인한다. III장에서는 접지전극의 종류와 접지 구성방식을 설명하여 통신설비의 접지 구성을 확인한다. IV장과 V장에서는 대지저항률 측정 및 분석을 통하여 접지시스템을 설계하며, 이를 토대로 현장에 최적인 접지시스템 시공에 대해 VI장에서 다룬다. 마지막으로 VII장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 접지시스템

1. 접지시스템

접지시스템은 설비 및 장비의 내·외부에서 발생한 서지와 노이즈를 대지와의 도선 접속을 통하여 안정적으로 제거하는데 목적이 있다. 접지시스템은 전자통신설비 및 전력 계통의 보호 대책에서 가장 기본이 되며, 얼마나 안정적으로 접지시스템을 구축하는가에 따라 설비의 성능과 안정성이 크게 좌우된다.(한, 1998) 보안용 접지는 강전을 다루는 전력 분야에서 인명 및 설비를 보호하기 위한 수단으로 단순히 접지저항의 크기만을 고려하여 설계하지만 통신 및 컴퓨터 분야와 같은 노이즈 환경에 민감한 설비들은 안정된 운용을 위해 접지의 기능성을 고려하여야 한다. 또한 낙뢰와 같은 임펄스전류가 고려되는 환경에서의 통신용 접지는 정상적인 접지저항과는 전혀 다른 양상을 나타내므로 여러 가지 특성 요소가 고려된 신뢰성 있는 설계가 이루어져야 한다.

일반적으로 암반이나 마사토와 같은 지질에서의 접지 성능은 매우 열악하며 양호한 접지시스템의 구축 또한 어렵다. 그러므로 양호한 접지시스템의 구축과 설비의 보호 대책을 세우기 위해서는 접지시스템의 일반적인 접지저항 특성뿐만 아니라 서지에 대한 과도전류 특성도 고려하여야 한다. 하지만 낙뢰와 같은 임펄스성 서지와 노이즈에 대해 확실한 성능을 지닌 접지시스템을 구축하기는 현실적으로 많은 어려움이 뒤따르므로, 우선은 현장 측정 및 분석을 통한 정확한 접지 환경을 설계에 반영하여 설계의 신뢰성을 높이는 것이 중요하다. 전자통신 및 전력 설비를 안정적으로 보호하기 위한 접지시스템의 보호 대책은 다음과 같이 설명할 수 있다.(Warren, 1980)(David, 1995)

- 현장의 지질 분석 및 외부 환경을 통한 접지 환경의 설계 반영
- 운용시스템의 설비 사양 및 운용 환경을 고려한 접지시스템 설계
- 접지시스템의 구조 및 접지봉의 성능을 고려한 접지시스템 구축

이와 같이 현장에 적합한 접지시스템의 설계는 시공할 때 오류를 최소화하고 경제적

인 낭비를 줄이며 설비운용 시에 안정성과 우수성 확보를 보장해 준다.

접지 환경은 지역이나 위치에 따라 토양의 종류나 온도 및 계절적 특성이 다르므로 이러한 요인들의 특성을 고려한 접지 설계가 이루어져야 한다. 일반적으로 접지 성능은 지중 및 외부 환경에 민감하다. 즉, 계절적 온도 변화에 의해 토양의 결빙과 해빙이 이루어지며 우기와 건기의 기후에 따라 지중 수분의 함유 상태는 달라지게 된다. 따라서 접지 성능의 안정성을 확보하기 위해서는 접지봉의 매설 깊이, 접지봉의 수, 접지 포설면적 그리고 접지 포설형상 등을 적절하게 구성하여 성능 변화의 요인을 최소화하여야 하며, 실제 현장에 최적의 접지 공법을 확인하기 위해서는 접지방식에 대한 특성과 조건을 알아야 한다. 특히 바위나 모래가 많은 지역이나 암석지반인 제주도나 화산암 지층에서 안정된 접지 성능을 지닌 접지시스템을 구축하는 것은 매우 어렵다. 따라서 암반 지층에 맞는 접지 공법을 개발하여 설계하고 구축하는 것은 절대적으로 중요하다. 그러므로 제주도 화산암 지층에서 통신시스템과 같은 민감한 장비의 안정적 운용과 보호를 위한 최적의 접지시스템은 화산암 지층에 맞는 접지 소재와 접지 공법 그리고 정확한 접지 설계 시뮬레이션을 통해 얻어지게 된다. 또한 한 건물에서 통신시스템, 전력시스템, 컴퓨터장비 그리고 각종 전자설비가 혼용되어 운용되는 것이 일반적이므로 이와 같은 설비들의 복합적인 운용 환경에 맞는 접지 구성방식을 적용할 필요가 있다.

2. 대지저항률

접지시스템에서 장비와 대지 사이를 전기적인 접지 회로로 구성할 때 지구는 거의 무한대의 전류를 흡수할 수 있는 체적을 가진다고 가상하게 되며, 장비와 대지 사이에 금속 접지전극(metal electrode-earth)을 연결함으로써 접지전류는 대지로 흐르게 된다. 전류가 금속 접지전극에서 대지로 흐를 때 그림 1에서처럼 접지봉으로부터 점차 바깥쪽으로 위치하는 일련의 가상 대지 전계구(virtual shells of earth)가 접지전극 주위에 만들어지며 접지저항은 대지 전계구들의 합으로부터 얻어진다.(이와 김, 1997) 접지저항은 접지전극에 가장 가까이 있는 전계구가 가장 크고, 점차 외부방향으로 갈

수록 작아진다. 이러한 접지저항을 결정하는 가장 중요한 요인은 대지저항률이다. 높은 대지저항률을 갖는 지역에서 접지봉 주위의 대지저항률을 낮추는 것은 접지 성능을 얻는데 필수적인 요소이다. 접지시스템은 대지와 접촉하는 접지전극인 접지봉, 접지봉에 연결되는 피접지체 그리고 이들을 연결하는 접지선으로 구성된다. 접지저항 성분은 접지선 및 접지전극의 도체저항, 토양과 접지전극의 표면과의 접촉저항 그리고 접지전극 주위의 대지저항이 있다. 여기서 도체저항은 무시할 수 있을 만큼 작으므로 접지저항은 접촉저항과 대지저항의 합이다. 접지저항은 접지시스템 설계에서 가장 중요하며 그 크기를 결정하는 것은 대지저항률이다. 최적의 접지시스템을 설계하기 위해서는 시공 위치에 대한 대지저항률의 특성을 알아야 하며 반드시 현장에서 측정해야만 한다. 대지저항률은 대지 표면으로부터 대지의 깊이에 따라 다르며, 대지 표면에서 물의 존재가 반드시 접지저항을 낮추는 것은 아니다. 따라서 대지저항률은 토양의 종류, 토양내의 화학적 이온 상태, 대지의 온도 및 수분함유 상태 등에 따라 달라진다.

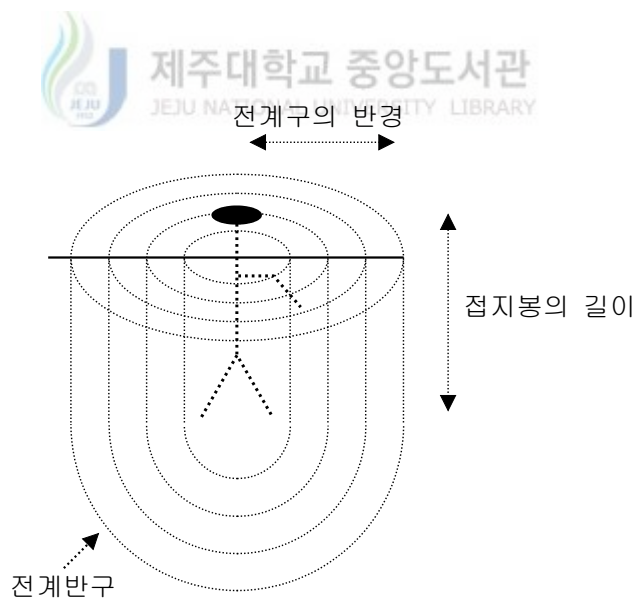


Fig. 1. Virtual shells of earth

1) 대지저항률 측정방법

접지시스템에서 가장 중요한 요소인 대지저항률의 측정치는 토양 구조, 토양 성분, 측정 장소에 따라 큰 차이를 나타내므로 신뢰성 있는 대지저항률을 측정하는 것이 매우 중요하다. 대지저항률은 변의 길이가 1m인 정육면체 토양에서 양면 사이의 저항으로 정의된다. 대지저항률은 습기, 온도 그리고 장소에 따라 큰 차이가 있다. 강변 진흙의 대지저항률은 $1.5\Omega\cdot m$ 이나 산 위나 모래가 섞여 있는 토양에서는 $10,000\Omega\cdot m$ 이상이 되며, 30%의 습기를 포함하고 있는 토양에서는 약 $43\Omega\cdot m$ 의 대지저항률을 갖는 반면 습기가 5% 미만인 토양에서는 $430\Omega\cdot m$ 로 높아지게 된다. 그리고 대지저항률이 $72\Omega\cdot m$ 인 $20^{\circ}C$ 의 토양에서 온도가 $0^{\circ}C$ 로 내려가면 동결 상태의 전후로 $136\Omega\cdot m$ 에서 $300\Omega\cdot m$ 범위의 대지저항률을 갖는다. 그러므로 토양 상태가 고려된 대지저항률은 측정 간격 및 위치를 여러 번 바꾸어가며 측정하여야 한다. 토양 조건에 따른 대표적인 대지저항률을 표 1에 요약하였다.(IEEE, 1983)

Table 1. Typical value of soil resistivity

종류	유전체 진흙 (다습)	토양 (젖은 표면)	젖은 토양 (무 점착성)	마른 토양	모래 (자갈 포함)
대지저항률 ($\Omega\cdot m$)	10	100	200	1,000	10,000

대지저항률을 측정하는 방법은 웨너 4전극법을 사용한다. 측정방법은 4개의 탐침을 일직선상에 일정한 간격으로 매설하고 측정장비 내에서 저주파 전류를 탐침을 통해 대지로 흘려보냄으로써 이루어진다. 정확한 측정을 위해서는 일정거리의 탐침 간격을 변경하면서 다수의 측정을 수행해야 한다. 측정치는 대지저항이며, 대지저항률은 측정치와 측정 간격에 2π 를 곱한 것으로서 단위는 $\Omega\cdot m$ 이다.

웨너 4전극법의 구성은 그림 2와 같다. 같은 크기를 갖는 4개의 금속 탐침을 동일 간격으로 대지에 삽입하며, 바깥쪽 2개의 탐침에 직류전원과 전류계를 연결하고 안쪽 2개의 탐침에는 전위차 측정을 위한 전압계를 연결한다. 전압계 및 전류계로부터 얻어진 측정값에 옴의 법칙을 적용하여 저항을 결정하게 된다. 전류는 그림 2에서처럼 탐침으로부터 동심원을 그리면서 대지를 통해 흐르게 되며 각각 토양의 영향 범위에

서 탐침 간격을 조절함으로써 효율적인 측정값을 얻을 수 있다.

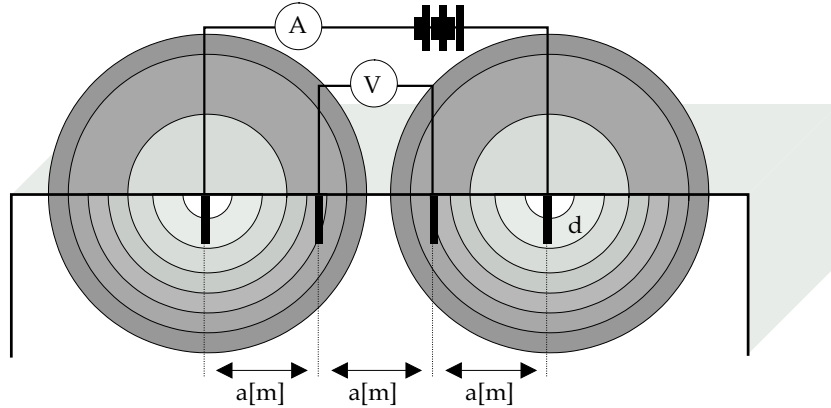


Fig. 2. Current shells of earth

대지저항률은 대지 내에서의 전류 영향 범위인 전계반구의 표면적 함수이며, 저항은 2개의 반구 사이로 흐르는 전류에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$R = \frac{\rho l}{2\pi a^2} \quad (1)$$

여기서 ρ 는 대지저항률이고 a 는 탐침 간격이다. l 은 2개의 반구 사이로 흐르는 전류의 평균 거리로서 다음과 같다(최 등, 2004).

$$l = \left(a + \frac{2a^2}{\sqrt{a^2 + 4d^2}} - \frac{a^2}{\sqrt{a^2 + d^2}} \right) \div 2 \quad (2)$$

여기서 d 는 금속 탐침의 길이이다. 식(2)를 식(1)에 대입함으로써 대지저항률을 구하게 되며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4d^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + d^2}}} \quad (3)$$

만일, $a \gg 20d$ 이라면, 대지저항률은 다음과 같다.

$$\rho = 2\pi a R \quad (4)$$

웨너 4전극법에서의 대지저항률은 접지전극의 간격에 따라 다르게 되며 또한 접지전극 간격에 따라 전류의 침투 깊이도 변하게 되므로 대지의 지층 구조를 파악할 수 있다. 대지저항률 곡선은 웨너 4전극법에 의해 측정된 대지저항률을 분석함으로써 얻게 되며, 예로서 그림 3에 수평 2지층 구조를 갖는 두 종류의 대지저항률 곡선을 나타내었다. 측정된 대지저항률의 분석 결과가 그림 3a일 때는 상층의 대지저항률이 작은 경우이고 그림 3b일 때는 하층의 대지저항률이 작은 경우이다. 이와 같이 측정된 대지저항률 분석 결과로부터 대지저항률 곡선을 얻게 되면 지층의 수, 각 지층의 대지저항률 및 지층의 두께 등을 알 수 있게 된다. 이것을 바탕으로 효과적인 접지 공법을 선정할 수 있으므로 합리적인 접지 설계의 기본이 된다.

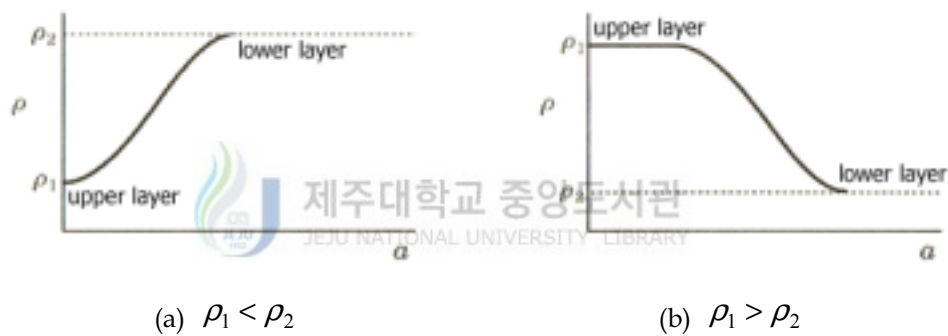


Fig. 3. Curve of soil resistivity for two horizontal layer

2) 접지저항 측정방법

접지시스템은 합선에 의한 지락전류, 낙뢰전류 그리고 전력선 또는 내외의 강한 서지전압 및 전류로부터 통신설비와 각종 제어장치의 손상을 예방한다. 그러므로 접지시스템이 자체의 보호 기능을 적절히 수행하기 위해서는 세계적으로 공인된 IEEE, ANSI, NEC, OSHA 등의 규정에 의한 권고 사양을 만족시키는 높은 신뢰성이 요구되며, 요구 조건을 만족하는 접지시스템을 시공하기 위해서는 정확한 접지저항 측정 및 설계가 가장 중요하다.

접지저항 측정방법에서 3전극법은 접지시스템의 접지저항을 정확하게 측정할 수 있는 방법이며 기본구성은 그림 4와 같다. 점 X는 시공된 접지시스템의 접지봉 위치이

며, 점 Y와 점 Z의 위치는 접지저항을 측정할 때 선정되어야 한다. 점 Z가 선정되면 이 점을 기준으로 62%인 지점을 점 Y의 위치라 두고 접지저항을 측정한다. 측정장비는 IEEE, NEC 규정을 만족하는 접지저항 측정기인 AEMC4500을 이용하였고 그 제원은 표 2와 같다.

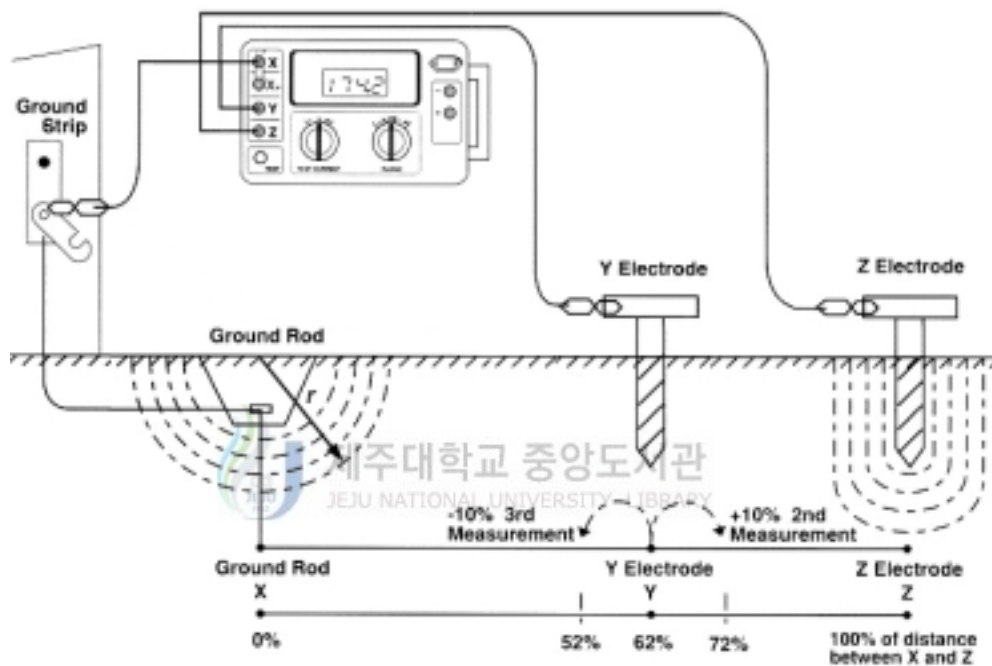


Fig. 4. Grounding resistance by 3-point fall of potential method

Table 2. Specifications of AEMC4500

저항범위	2Ω	20Ω	200Ω	2kΩ	20kΩ
전류범위	10mA or 50mA	2mA, 10mA, 50mA		2mA 10mA	2mA 10mA

그림 4에서 측정장비가 AEMC4500일 때의 설치는 2개의 측정 탐침 전극을 이용하여 측정하고자 하는 지점 X로부터 천공 깊이의 3배 이상 떨어진 지점 Z에 고정 탐침을 삽입하고 점 Y는 일직선상의 점 X와 점 Z 사이의 고정된 위치에 삽입된다. 측정 대

상이 되는 전극 X를 반구모양의 접지전극으로 하고 주위의 대지저항률은 동일하며 전류는 전극 X로 흘러 들어가서 전극 Z로 흘러나온다고 가정하자. 전극 X에서의 전위는 무한원점을 기준으로 해서 전위상승이 있으며, 전극 X로부터 임의의 간격만큼 떨어진 점 Y의 전위상승은 다음과 같다.

$$V = \frac{\rho I}{2\pi y} \quad (5)$$

여기서 y 는 점 X와 점 Y간의 임의의 거리이다. 그러므로 전극 X에 유입되는 전류에 의한 점 X와 점 Y간의 전위차와 전극 Z에서 유출되는 전류에 의한 점 X와 점 Y의 전위차가 발생하며, 두 전위차의 합으로 점 Y에서의 전위를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_y = \frac{\rho I}{2\pi r} \left\{ 1 - \left(\frac{r}{y} + \frac{r}{z} - \frac{r}{z-y} \right) \right\} \quad (6)$$

여기서 공통인수는 반구모양의 접지전극에서의 전위이므로 괄호 안의 제2항은 오차가 된다. 오차가 없다면 y 의 해는 $0.618z$ 의 값을 갖는다. 이것은 반구모양의 접지전극에서의 접지저항을 측정할 때 전극 Y의 설치 위치를 의미하며 정확한 접지저항을 얻을 수 있다. 그림 4에서 나타내듯이 전체 측정 거리의 62% 지점에서 1차 측정이 이루어지고 그 지점을 중심으로 $\pm 10\%$ 의 범위에서 2차와 3차 측정을 수행한 후 1차 측정치와의 오차가 5% 범위 내에 있다면 최종적인 접지저항이 된다. 오차 범위를 초과하게 된다면 점 X와 점 Z간의 간격을 더 두고 측정을 수행하여 접지저항을 얻게 된다.

그림 5와 그림 6은 측정전류에 의한 대지 전계구의 형성 패턴을 나타낸다. 그림 5는 접지시스템과 측정 탐침간의 대지 전계구가 중첩되지 않도록 설치하였을 경우 전계구에 대한 저항 특성으로 평탄한 영역을 갖고 있다. 그리고 그림 6은 대지 전계구의 중첩 현상에 의해 측정된 데이터 곡선을 나타내고 있다. 측정 곡선은 대지 전계구의 영향으로 거의 선형적으로 증가하게 되며 실제보다 매우 낮은 접지저항을 나타낸다. 그래서 측정 방향과 위치에 따라 측정값이 변화되는 부정확한 측정 데이터를 얻게 된다.

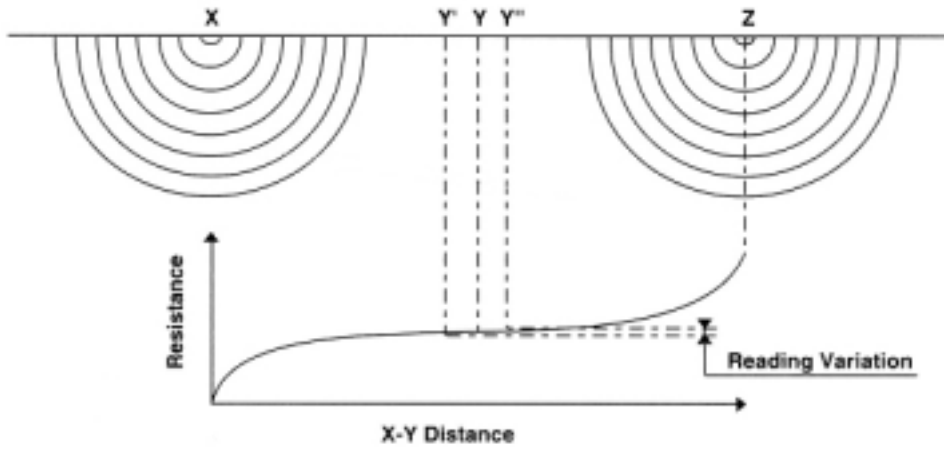


Fig. 5. Valid curve of potential distribution

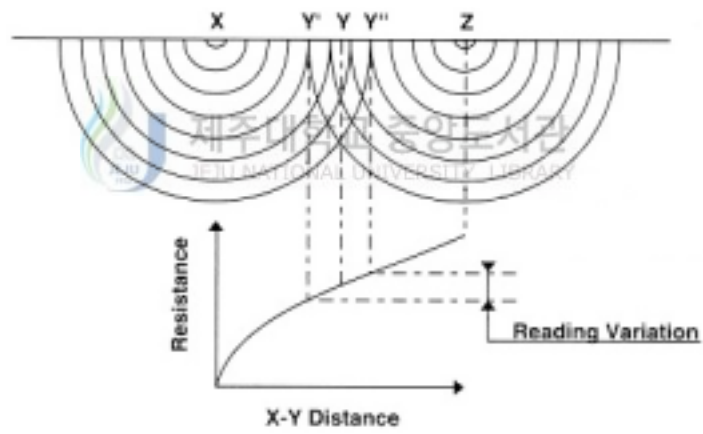


Fig. 6. Invalid curve of potential distribution

Ⅲ. 접지방식

1. 접지전극의 종류

접지시스템은 일반 접지봉 접지, 망상 접지, 화학 저감제 접지 등의 다양한 공법으로 설치할 수 있다. 그렇지만 현장 환경과 토양 특성에 맞는 접지시스템을 어떻게 적용할 것인가의 문제는 운용장비 및 설비의 보호와 안정성 측면에서 매우 중요하다.

1) 일반 접지봉 접지

일반 접지봉 접지방식은 지금까지 접지 분야에서 가장 일반적으로 사용되는 접지방식이다. 접지시공이 비교적 간편하고 임의의 형상으로 포설이 가능하여 가장 일반적으로 적용되어 왔다. 일반 접지봉의 형태는 강철에 동 피막이 입혀진 동봉 또는 동이 도금된 강철 동봉으로서 길이는 다양하다. 시공은 지표면에서 75cm를 파고 동봉을 타설한 후 접지봉과 접지선을 압착 슬리브(sleeve)나 발열 용접(exothermic welding)으로 접속하여 인출한 후에 매립하는 방식이다.

이 방식은 소규모 접지의 경우와 상층의 대지저항률이 좋은 경우에 적합하고, 하층으로 갈수록 대지저항률이 높은 경우에는 접지봉의 타설 깊이를 짧게 하여 여러 개를 병렬로 하는 것이 효과적이며 타 접지와 연계성이 비교적 좋다. 대지저항률이 낮은 지역에서 좋은 성능을 발휘하며, 저주파 저전류 분야에 비교적 경제적으로 시공할 수 있다. 일반 접지봉은 복합적인 지층 구조를 갖는 다 지층 구조에서 토양의 특성을 충분히 활용할 수 없으므로 설계와 시공이 매우 어려워질 때도 있다. 따라서, 접지봉 길이의 한계로 인한 대지 구조, 접지 공사면적, 소요 접지저항에서의 제약을 고려해야 한다. 특히 산악이나 암반에서는 시공이 불가능하고 마사토와 같은 지질의 토양과 대지저항률이 높은 경우 아무리 많은 동봉을 타설하여도 요구 접지저항을 얻을 수 없는 단점을 가지고 있다. 또한, 동봉이나 강철 동봉은 특성상 온도와 습도의 영향을 받아 쉽게 부식되고 이로 인한 동봉의 빠른 침식으로 경년 변화에 따른 안정성 문제가 발생된다. 따라서, 동봉을 시공할 때 다른 접지 공법과 연계하여 시공하거나 접지 저감

제와 병행하여 부식과 전식을 방지해야 한다. 또한 일반 접지봉의 수명이 짧아 시간이 경과한 후 보수나 재시공이 필요하다. 이러한 특성으로 인하여 범용의 장비에는 적합하나 정밀성과 안정성을 필요로 하는 장비에는 부적합하며, 병렬접지 시공에서는 전위가 중첩되어 간섭문제가 발생되므로 이를 고려해서 시공해야 한다.(김, 1999)



Fig. 7. Driven rod

일반 접지봉은 그림 7과 같이 막대형의 매우 단순한 구조를 가지며 시공 방법은 다음과 같다.

- 시공 위치를 폭 50cm, 깊이 75cm 이상으로 굴착
- 굴착 위치에 일반 동봉을 해머를 이용하여 타설
- 접지봉은 최소 2배 이상의 간격을 두어 설치
- 접지봉과 접지봉을 나동선을 이용하여 압착 슬리브로 접속
- 외부 접지선을 나동선과 접속
- 시공 위치 매립

일반 접지봉은 여러 형상으로 설계가 가능하며 1개의 일반 접지봉에 대한 접지저항은 다음과 같이 나타낼 수 있다.(최 등, 2004)

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{r} - 1 \right) \quad (7)$$

여기서 L 은 일반 접지봉의 길이이고 r 은 일반 접지봉의 반경이다. 일반적으로 원하는 접지저항을 얻기 위해 접지전극은 N 개의 일반 접지봉이 병렬 형태로 구성되며 병렬접지 효과를 나타내는 일반 접지봉간의 집합계수가 고려되어야 정확한 접지저항을 얻을 수 있다. 다음은 병렬접지의 합성저항이다.

$$R_o = K \cdot \frac{R}{N}, \quad K \geq 1 \quad (8)$$

여기서 K 는 일반 접지봉간의 집합계수이고 N 은 일반 접지봉의 수이다.

그림 8은 기준 접지저항을 얻기 위한 N 개 일반 접지봉의 병렬 구성을 나타낸다.

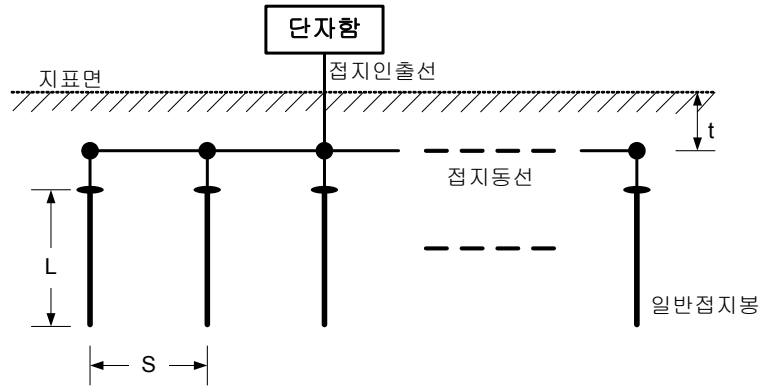


Fig. 8. parallel electrode of driven rods

1개의 일반 접지봉에 대한 접지저항을 계산하고 집합계수를 구할 수 있다면 병렬접지의 합성저항을 쉽게 얻을 수 있다. 하지만 일반 접지봉의 수가 늘어나고 일반 접지봉간의 간격이 가변적이면 집합계수의 계산은 복잡해진다. 일반 접지봉의 길이와 일반 접지봉간의 간격의 비를 α 라 할 때, 병렬접지전극의 구성에 따라 일반적으로 참조할 수 있는 일반 접지봉의 집합계수는 표 3과 같다.(최 등, 2004)

Table 3. The combining factor K for parallel type

$\alpha = S/L$	한 변의 일반 접지봉 수								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.1	2.282	4.015	6.064	8.345	10.805	13.408	16.127	18.946	21.848
0.3	1.805	2.788	3.861	4.984	6.140	7.319	8.516	9.727	10.950
0.5	1.598	2.286	3.013	3.759	4.515	5.278	6.047	6.820	7.597
0.7	1.474	2.001	2.549	3.106	3.668	4.233	4.799	5.367	5.936
0.9	1.391	1.817	2.256	2.700	3.147	3.595	4.043	4.492	4.942
1.0	1.359	1.747	2.146	2.549	2.955	3.361	3.767	4.174	4.580
1.2	1.308	1.638	1.975	2.315	2.657	2.999	3.341	3.683	4.025
1.4	1.269	1.555	1.847	2.141	2.437	2.732	3.027	3.323	3.618
1.6	1.238	1.491	1.748	2.008	2.268	2.528	2.788	3.047	3.307
1.8	1.214	1.440	1.670	1.902	2.134	2.366	2.598	2.830	3.062
2.0	1.194	1.398	1.606	1.815	2.025	2.235	2.445	2.654	2.864

집합계수는 대지저항률과 무관한 특성을 가지며, 일반 접지봉간의 간격이 커지면 집합계수는 작아진다. 접지 설계에 있어서 일반 접지봉은 다 지층 구조의 특성을 충분히 활용할 수 없으므로 설계가 매우 어려워지는 경우도 있으며 특히 작업공간이 좁은 도심지나 암반 지질에서 요구 접지저항을 얻기가 불가능한 경우도 발생한다.

2) 망상 접지

망상 접지방식은 넓은 면적에 75cm 이상의 깊이로 굴착하고 나동선을 그물 형태로 포설하여 교차되는 접지선을 발열 용접이나 압착 슬리브로 접속하고 매립하는 방식이다. 특히 건물 바닥의 접지나 등전위화 접지 시공에 많이 사용되는 접지방식이다.

망상 접지는 낮은 접촉전압을 얻기가 용이하므로 인명의 안전이 최우선 시 되는 대형 플랜트나 발전소, 변전소 등과 같은 곳에서의 대전력 접지에 많이 적용된다. 망상 접지의 성능은 포설되는 접지선간의 간격과 전체 접지 포설면적에 따라 크게 좌우된다. 망상 접지는 넓은 면적에 시공을 해야 하므로, 기본적으로 넓은 시공면적이 확보된 건물의 바닥이나 높은 대지저항률을 갖는 대지인 경우 용이하다. 망상 접지는 시공 특성상 온도와 습도 등 외부 환경의 영향이 비교적 적고, 낮은 접지저항을 얻기가 용이하지만 유지보수가 거의 불가능한 단점이 있다. 설계 시 포설 동선간의 간격과 설치면적 그리고 매설 깊이를 고려하여야 하며 다 지층 구조의 특성을 활용할 수 없으므로 일반적으로 일반 접지봉과 연계하여 설계한다.

그림 9에 보이는 것처럼 나동선을 그물 모양의 일정한 간격으로 포설하는 구조를 가지며 나동선의 접지전극에서 접지선을 인출한다. 나동선은 60mm^2 , 100mm^2 또는 200mm^2 가 사용되며 격자 형태로 이어지는 연결점은 압착 슬리브나 발열 용접으로 접속하며 외부 접지선은 여러 곳에서 인출하여 사용할 수 있다.

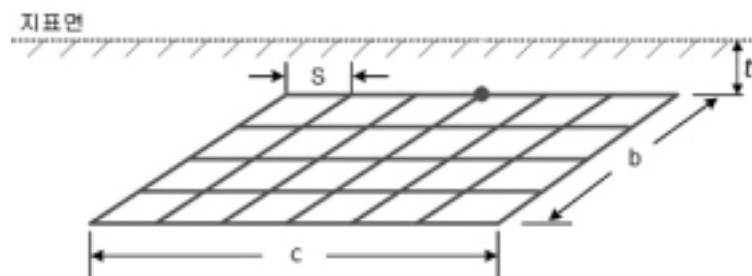


Fig. 9. Mesh grounding

망상 접지의 시공 방법은 다음과 같다.

- 시공 지역 전체에 대하여 75cm 이상의 깊이(t)로 굴착
- 나동선을 일정한 간격(S)의 그물 형태로 포설
- 그물 모양의 각 연결점을 압착 슬리브 또는 발열 용접으로 접속
- 외부 접지선을 연결하여 인출
- 시공 지역 전체를 매립

수평 망상전극의 접지저항은 다음과 같은 Schwarz 계산식이 일반적으로 사용된다.(최 등, 2004)

$$R = \frac{\rho}{\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + K_1 \frac{L}{\sqrt{A}} - K_2 \right) \quad (9)$$

여기서 L 은 접지선의 총 길이, a 는 $2rt$, t 는 매설 깊이, r 은 접지선의 반지름, A 는 망상전극의 총면적, K_1 과 K_2 는 매설 깊이와 가로·세로 길이의 비에 의한 상수이다.

지표면 설치를 가정할 때, a 는 r 이며 상수 K_1 과 K_2 는 그림 10의 데이터곡선 도표에서 결정된다.

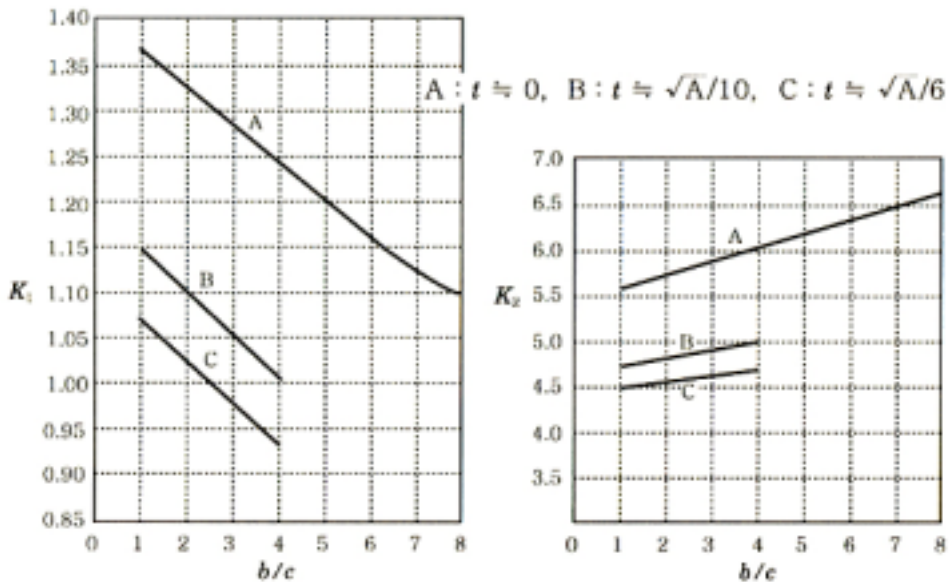


Fig. 10. Schwarz factor

3) 화학 저감제 접지

일반적으로 화학 저감제 접지는 접지봉과 함께 시공하여 대지저항률을 낮추어 접지 저항을 감소시키는 방법으로서 접지봉 주위에 화학 저감제를 함께 시공하는 방법이다. 이러한 저감제는 토양에 도전성 물질을 첨가함으로써 화학적으로 토양의 대지저항률을 낮추어 접지봉과 대지의 접촉저항을 감소시켜 접지저항을 저감시킨다. 접지저감제의 종류는 화학적으로 처리된 화학 성분의 저감제와 자연에서 추출한 천연 성분의 저감제가 있다. 자연 환경의 오염, 공해 물질의 배출, 접지전극의 부식으로 인한 접지 성능의 악화 및 손상 유발 그리고 대지에 스며들어 효과가 사라지게 되는 소모성 물질을 저감제로서 사용하는 것은 부적절하므로 저감제는 사용이 쉽고 경제적이어야 한다.

저감제를 이용한 접지의 구조는 접지전극 주위에 저감제를 첨가함으로써 유사 접지전극을 만드는 것으로 접지전극 주위의 토양은 양호한 도전성을 가지게 된다. 그림 11은 접지전극에 대한 접지 저감제의 첨가방법 중 보링(boring)법으로서 지반을 천공하여 선 혹은 띠 모양의 전극을 설치하고 그 속에 저감제를 타입한다.

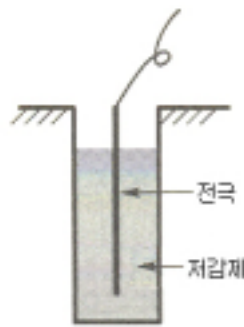


Fig. 11. Boring type

4) 전해질 접지시스템

전해질 접지시스템 방식은 일종의 보링법으로서 지반을 15cm로 천공하여 파이프 형태의 동봉을 삽입하고 린코나이트(lynconite)를 채워 접지를 하는 방식이다. 동봉의 기본 형태로는 직선형과 L형이 있으며, 동봉 내부는 금속성 전해질 전도체인 캐솔라이트(calsolyte)로 채워지고 동봉 주위에는 보호저감제인 린코나이트가 채워진다. 캐솔

레이트는 Ph8 이상의 수분을 생성하여 높은 전도성을 유지하고 동봉을 보호하며, 린코나이트는 전도성이 우수하고 독성이 없으며 일정한 모양으로 간단히 굳힐 수 있는 이상적인 보호저감제로써 천연 점토 성분을 사용하기 때문에 항상 일정한 수분을 유지시켜 접지저항을 낮추게 된다. 또한 동봉에 완전 밀착되어 동봉의 부식 및 전식을 막고 접지 성능을 더욱 안정적으로 유지시킨다.

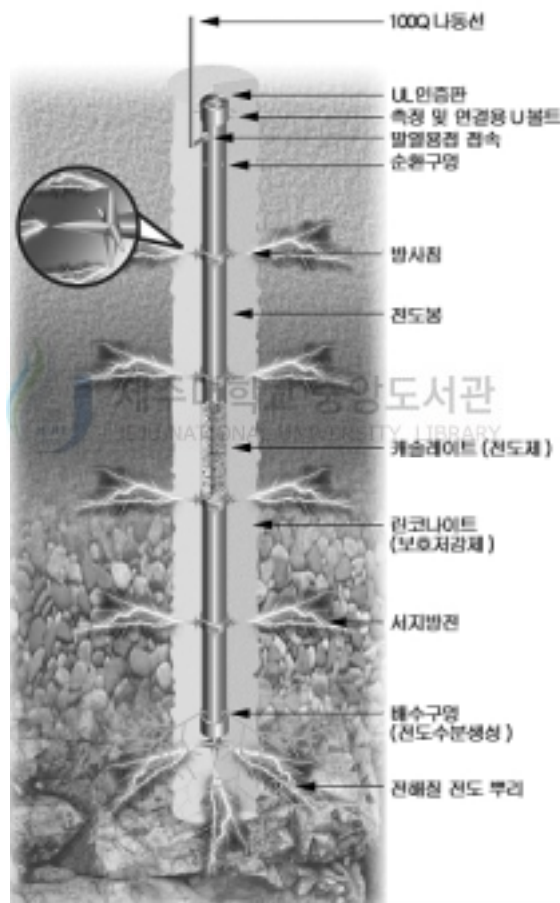


Fig. 12. Electrolytic straight rod

그림 12에서 보이는 것처럼 기존의 일반 접지봉 전극과는 달리 파이프형 전해질 접지전극은 대기압의 변화와 공기 순환에 의해 접지봉의 상부에 있는 순환구멍(breather hole)을 통하여 일정한 수분을 유지한다. 공기에 포함된 습기는 접지봉 내부에 굵은

금속이온 성분의 금속성 소금(metallic salts)인 캐솔레이트 층과 접촉하게 되고, 방울 형태로 흡수 및 축적됨에 따라 전해질 용액이 생성되어 접지봉 내의 하부로 흘러 들어가게 된다. 이 축적량이 증가함에 따라 전해질 용액은 접지봉의 배수구멍(drainage hole)을 통해 지속적으로 접지봉 주위의 토양으로 공급된다. 전해질 용액의 공급 분산은 접지봉 내의 농축 용액이 삼투압 작용에 의하여 자연스럽게 외부의 린코나이트 및 주위 토양으로 방출되면서 이루어진다. 전해질 용액은 접지봉 주위의 토양으로 스며들어 전해질 뿌리를 생성하며 접지전극과 토양 사이의 전기저항을 감소시켜주는 역할을 한다. 따라서, 시간이 경과함에 따라 주위는 전해질 수분의 지속적인 공급으로 인해 보다 낮은 접지저항을 유지하게 된다. 전해질 접지전극은 요구 설치면적이 아주 좁고 접지봉의 구조상 계절과 기후변동에 영향을 거의 받지 않으며 시간이 경과함에 따라 접지 성능이 더욱 향상된다. 파이프형 전해질 접지봉의 이러한 특성은 암반이나 마사토와 같이 낮은 접지저항을 얻기가 어려운 곳에서 탁월한 성능을 발휘하며, 안정되고 낮은 접지저항이 요구되는 통신 및 장비 접지에 매우 유리하다.

전해질 접지시스템 방식은 세계 유일의 습기를 생성하는 접지방식으로서 완전한 자체보수성(self-maintaining), 계절 변화에 무관한 고안정도(high stability), 시간 경과에 따른 탁월한 저항감소 효과를 지니고 있고 설치가 용이하며 50년 이상의 수명을 유지하는 장점이 있다. 전해질 접지시스템 방식은 지반 토양의 종류, 지질 구조, 토양의 성분, 수분의 함유 상태 및 계절적인 온도 변화에 관계없이 가장 효율적이며 안정적으로 낮은 접지저항을 유지시켜 준다. 그리고 전해질 생성의 고전도 접지봉을 이용한 접지방식을 사용하여 통신 접지와 같은 낮은 접지저항이 요구되는 시스템이나 암반 또는 마사토와 같이 낮은 접지저항을 얻기가 어려운 지층에서 주로 사용하는 접지방식이다. 전해질 접지시스템 방식은 시공 방법에 따라 직선형과 L형의 2가지 기본 모델로 구성되며 시공 방법은 다음과 같다.(조와 정, 2001)

- 접지 설계 규격대로 지반 천공
- 접지봉을 삽입하기 전 접지봉에서 인출된 나동선과 동선을 발열 용접
- 천공된 구멍에 접지봉을 단계적으로 연결하여 바닥까지 매입
- 린코나이트를 1포대 당 4.5배의 물을 섞어 죽과 같은 상태가 될 때까지 혼합
- 매입된 봉 주위에 혼합물을 구멍이 막히지 않도록 잘 부어넣음
- 접지 연결선 인출

전해질 접지시스템에서 전해질 접지봉의 전위는 전극에 유입되는 전류와 전극간의 거리함수로서 다음과 같다.

$$V(x) \equiv \rho \cdot F(x) \cdot I \quad (10)$$

여기서 V 는 전해질 접지봉의 전위이고 F 는 전극 배열에 의한 전극간의 거리이다.

N 개의 전해질 접지봉의 합성저항을 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$R_o = \frac{V}{I} = \frac{\rho}{[1 \ 1 \ \Lambda \ 1] F^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ M \\ 1 \end{bmatrix}} \quad (11)$$

여기서 F 의 역함수는 전극 길이 및 배치 형태에 따른 계수이다. 전해질 접지봉간 매설 동선의 저항 계산식은 다음과 같다.(최 등, 2004)

$$R_L = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{r} + \ln \frac{4L}{s} - 2 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \Lambda \right) \quad (12)$$

여기서 L 은 연결 동선의 길이, r 은 연결 동선의 반지름, s 는 전해질 접지봉간의 간격이다. 전해질 접지시스템의 접지저항은 전해질 접지봉간의 합성저항과 연결 동선저항의 합이다.

2. 접지 구성방식

1) 독립접지

독립접지는 접지 대상별로 접지전극을 별도로 설치하여 구성하는 방식이다. 독립접지의 목적은 개별적으로 접지를 시공하여 다른 접지로부터 영향을 받지 않고 설비를 보호하기 위한 것이다. 독립접지의 구조는 그림 13과 같다. 독립접지는 각각의 접지를 일정거리 이상의 간격을 두고 시공함으로써 다른 접지로부터 어떠한 전류가 흘러도

전위상승이나 간섭을 받지 않도록 하는 방식이다. 그러나 시공에서 타 접지설비와 충분히 분리되지 않을 경우 서지나 노이즈 전류가 유입될 때 설비간 전위차 발생으로 설비에 손상을 주거나 오동작을 유발시키는 단점이 있다. 독립접지 시공에서 어느 한 접지에 의해 다른 접지가 전위상승을 일으키지 않도록 하기 위해서는 두 접지간의 거리는 현실적으로 불가능한 무한대가 되어야 한다. 그러나 접지의 전위상승이 일정한 범위 이내인 경우에는 독립접지로 간주할 수도 있다. 따라서 접지의 전위상승에 따른 간격은 접지전극으로 유입되는 최대 전류, 전위상승 허용치 그리고 그 지점의 대지저항률에 의해 결정된다.

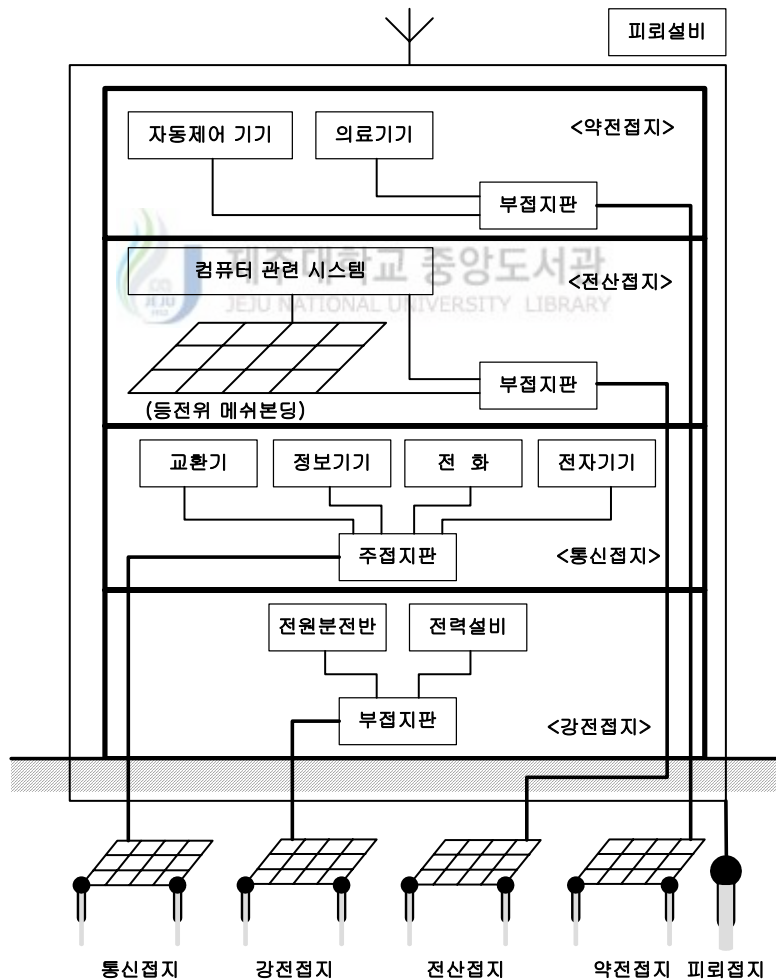


Fig. 13. Isolation grounding

그림 14는 독립접지의 전극간 간섭작용을 나타낸다. 접지전류에 접지전류가 흐르면 접지전극에서 발생하는 전위상승의 정도를 분석함으로써 간격을 계산할 수 있다. 전위상승의 허용치는 설비 및 인명의 안전에 손상이 없는 허용치이므로, 보폭 및 접촉 전압의 크기가 검토되어야 한다.(IEEE, 1986) 대지저항률이 $100\Omega\cdot\text{m}$ 일 경우 유입되는 접지전류에 따른 전위상승의 허용치와 접지 간격을 계산하면 표 4와 같다. 접지전류가 작아도 시공 위치의 대지저항률이 높으면 접지 전위는 크게 상승하므로, 대지저항률과 유입 전류에 따라 간격은 달라져야 한다. 독립접지의 간격은 단지 접지전극의 규모에 따라 결정되는 것은 아니며 접지 전위분포 계산식에 접지로 유입되는 지락전류나 서지전류와 같은 접지전류와 대지저항률을 대입하여 계산하게 된다.

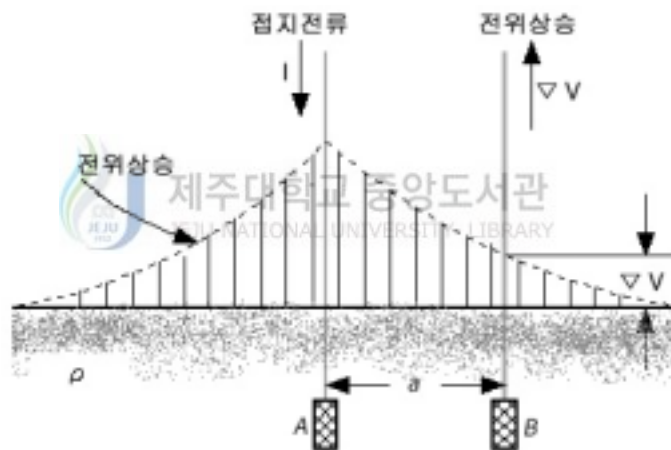


Fig. 14. Interference between the two electrodes

Table 4. Gap between the two electrodes

접지전류 \ 전위상승 허용치	2.5V	25V	50V
10A	63m	6m	3m
50A	318m	32m	16m
100A	637m	64m	32m

2) 공통접지

공통접지는 피뢰, 철탑, 보안, 통신 접지의 전극을 하나의 접지전극을 이용하여 공통으로 접속하여 사용하는 방식이다. 공통접지의 장점은 협소한 면적에 1개의 접지시스템으로 모든 접지설비를 수용할 수 있다는 점이며 이외에도 공통접지의 장점들은 다음과 같다.

- 접지선이 짧아지고 접지 배선 및 구조가 단순해져 관리가 용이
- 등 전위가 구성되어 접지설비간 전위차가 발생되지 않음
- 시공 접지봉의 수를 줄일 수 있어 경제적인 시공이 가능

여기서 주의해야 할 점은 공통접지라 하더라도 접지 연결선은 지상에서 각각 분리되어야 한다는 것이다. 그림 15는 접지선이 지상에서 연결된 경우를 나타낸다. 이 경우 한쪽 접지설비에 과도전류가 유입된다면 과도전류의 방출은 연결된 모든 접지선을 타고 대지로 방출될 것이다. 이때 각 접지 대상 설비는 유기전류에 의해 피해를 볼 수 있다. 따라서 각 설비의 접지는 지상에서 분리되어야 하며 지표면 아래 접지전극에서만 공통으로 연결되어야 한다.

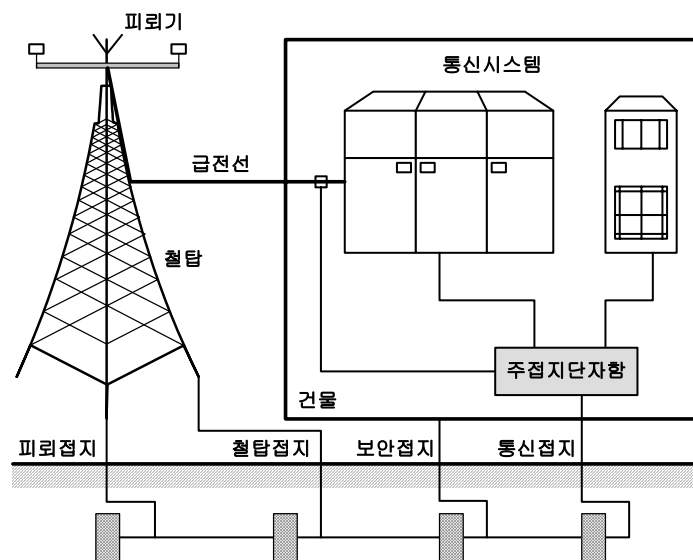


Fig. 15. Common grounding

공통접지는 모든 접지설비가 공통으로 연결되므로 접지전극의 성능이 악화되었을 경우 과도전류에 의해 연결된 모든 설비가 손상될 수 있다. 또 접지설비들을 연결시키는 접지 배선의 길이가 너무 길어지면 이로 인한 전위차가 발생할 수 있다. 따라서 유입되는 과도전류나 전위상승의 요인들을 고려하여 접지 배선을 시공해야 한다. 독립접지의 경우 접지의 기준치는 접지전극별로 차이가 있다. 그러나 공통접지의 접지 저항은 동일하다. 목표 접지저항을 얻기 위해 각각의 접지전극을 대지에 매설하고 병렬로 연결한다. 이때의 값을 측정하여 원하는 접지저항을 확보하게 된다. 보호하려는 장비의 기준이 되는 접지저항을 결정하기 위해서는 장비가 고압 회로 또는 저압 회로 인지를 판단하고 장비의 허용전류나 전위상승을 고려해야 한다. 그리고 보호하려는 설비의 기기가 전기설비기준(2002)에 관한 규칙에서 정한 규격을 따를 필요가 있으면 이에 규정된 접지저항을 기준 접지저항으로 선정해야 한다. 만일 기준이 없는 설비일 경우에는 인체에 의한 접촉전압이나 낙뢰에 의한 장비의 성능을 충분히 고려하여 기준치를 결정해야 한다.



3. 통신설비의 접지 구성

통신시스템에서의 접지 대상 설비는 통신장비, 통신 철탑, 안테나와 같은 통신시스템과 건물 및 전력설비와 같은 간접설비들이 있다. 따라서 설비 보호 및 통신시스템의 보호를 위해서는 종합적인 접지시스템의 구성이 요구된다. 특히 철탑으로 유입되어 직접 피해를 주는 낙뢰와 통신시스템의 손상이나 오동작과 같은 피해를 주는 서지, 그리고 노이즈와 같은 원하지 않는 신호는 현장 환경에 맞는 접지설비를 구성하여 충분히 예방할 수 있다.

1) 통신시스템의 배선

통신시스템에서의 접지 대상 장비에는 송·수신장비, 전송장비, 급전선 외피, 어레스터, 케이블랙 등이 해당된다. 그림 16은 통신접지의 구성을 나타낸다. 장비간 전위차를 최소화하고 노이즈의 신속한 방전을 위한 접지의 배선 구조로서 주 접지 단자함을

설치하여 접지 성능을 높인다.

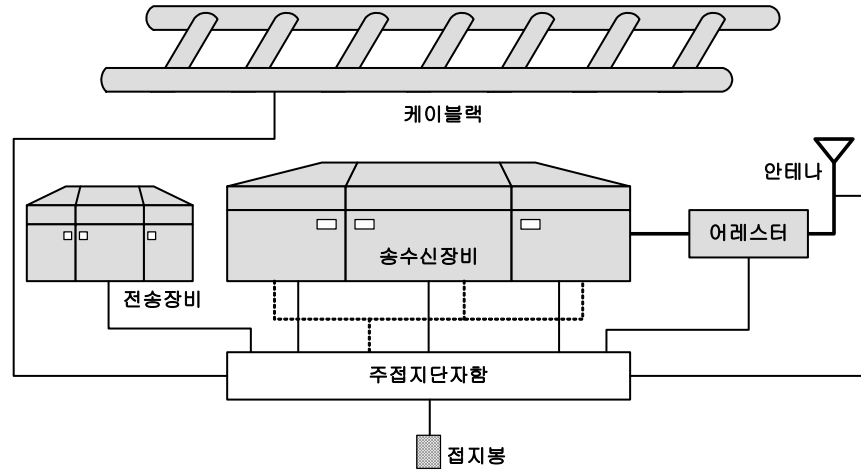


Fig. 16. Block of grounding for communication system



2) 피뢰 및 철탍 접지

철탍 및 안테나는 낙뢰 및 서지의 통로 역할을 하게 되어 직접적인 피해를 입기도 한다. 따라서 피뢰 및 철탍 접지는 낙뢰의 안전한 방전과 서지의 차단을 통해 설비를 보호한다는 측면에서 매우 중요하며 낙뢰전류의 방전경로와 지중 전위상승으로 인한 피해를 방지하기 위해 피뢰 및 철탍 접지의 설치 위치에 대한 분석이 이루어져야 한다.

3) 통신시스템 접지

통신설비의 건물 내 접지방식은 여러 설비의 접지를 단독으로 구성하는 독립접지방식으로 시공한다. 독립접지는 실제 시공 상에서의 단점은 있지만 국내의 접지규정에 준하여 시공되고 있다. 접지설비간에 접지체를 완벽하게 분리하여 시공하며 다른 접지설비와의 간섭을 방지하기 위해 충분한 거리를 갖고 전기적으로 격리되도록 설치하여야 한다. 표 5는 독립접지에서 기본적인 접지전극간 거리에 대한 전기설비기준(2002)이다.

Table 5. Electrode space and grounding resistance at isolation grounding

접지	접지저항		전극간 거리	
	독립접지	공통접지	독립접지	공통접지
통신접지	2Ω 이하	가장 낮은 접지저항	5m 이상	공용접속 (등 전위구성)
피뢰접지	10Ω 이하		10m 이상	
철탑접지	10Ω 이하		2m 이상	
보안접지	100Ω 이하		5m 이상	

독립접지의 최대 과제는 접지설비간의 독립성 확보에 있다. 접지설비간에 접속되어 있거나 접지전극이 충분한 거리로 분리되지 않았을 경우에는 낙뢰로 인해 접지 전위가 상승하여 타 접지설비에 피해가 발생할 수 있기 때문이다. 또한 한 장소에 여러 접지설비를 동시에 시공하기 위해서는 매우 넓은 면적이 필요하고, 암반과 같은 지층에서는 양호한 접지저항을 얻기 위해 많은 접지봉을 설치해야 하는 어려움이 있다. 하지만 독립접지의 장점을 활용할 수 있는 충분한 접지면적과 대지의 토양 특성이 좋은 장소에서는 독립접지를 구성하여 통신설비를 보호하고 있다.

최근에는 통신설비를 포함하여 건물 내의 다양한 설비간의 전위차를 제거할 수 있는 공통접지방식을 적용하기도 한다. 공통접지는 접지 설치면적이 좁고 접지체간의 간격 확보가 어려운 장소에서 전체 지역을 등전위화하는 방식으로 접지를 구성함으로써 설비를 보호하게 된다. 그러므로 공통접지방식은 도심지나 건물 밀집 지역과 같이 실제적으로 독립접지 구성이 불가능한 장소에서 접지체간의 전위차로 인한 간섭을 최소화하고 효율적인 접지 구성을 위해 적용한다. 공통접지는 해외 규정으로서 실제적인 설비 보호를 목적으로 하고 있다.

현장의 열악한 지질 환경과 낙뢰의 위험성이 높은 지역에서는 접지 시공면적의 축소와 접지봉 수의 감소를 통해 공사의 효율성을 높이고, 낙뢰전류 및 서지의 방전과 차단을 통해 안전하게 설비를 보호하는 접지시스템의 구성이 필수적인데, 이러한 경우 그림 17에 나타낸 부분 공통접지방식이 사용된다. 부분 공통접지방식은 낙뢰의 피해가 우려되는 열악한 화산암 지층의 장소에서 피뢰접지와 철탑접지를 공통으로 구성

함으로써 접지 효과를 높이며, 신속하고 안전한 낙뢰전류의 방전을 통한 설비 보호를 목적으로 한다.

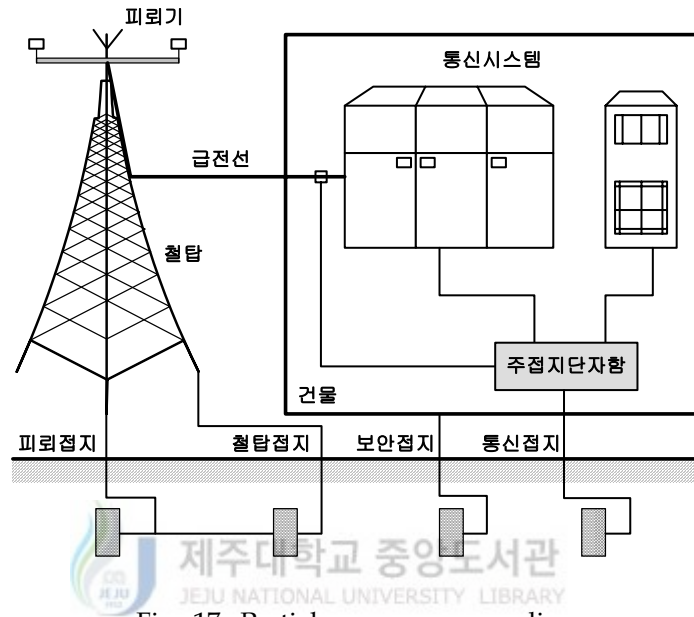


Fig. 17. Partial common grounding

IV. 대지저항률 측정 및 분석

대지저항률은 접지 설계에 있어 필수적인 요소이며 대지 파라미터들이 접지시스템에 미치는 영향과 접지 전위와 전류의 방전특성을 분석하는데 있어 대단히 중요하다. 현장의 대지저항률을 측정함으로써 현장 특성에 맞는 접지 설계 및 성능 예측이 가능하게 된다. 또한 현장에서 측정된 데이터 분석 결과가 정확할수록 설계 오류를 최소화할 수 있게 된다.

1. 제주도의 지질 구조

제주도의 지질 구조는 신생대 4기 초기의 서귀포 지층, 신생대 4기 후기의 화산쇄설성 퇴적층인 성산 지층과 신양리 지층 등의 퇴적암 지층, 현무암, 조면암질 안산암, 조면암 등의 화산암류, 기생화산에서 분출된 화산쇄설물 등으로 구성되어 있다. 화산 활동에서 용암 분출 순서에 의하여 구분된 현무암류는 광물 조성과 화학 조성으로 보아 대체로 현무암질로서 침상장석 감람석 현무암, 반상휘석 현무암, 비현정질 현무암, 하와이아이트, 뮤지어라이트, 슬레아이트 등으로 이들은 제주도 전면적의 90% 이상을 차지한다. 화산 활동의 각 분출기에 분출된 다량의 화산쇄설물의 입자 크기는 수 센티미터 정도로 조립질이고 다공질 분석이 주를 이루며 층리의 발달이 빈약한 성층 구조를 가지는 것이 일반적이다. 그렇지만, 현무암질 용암류의 단위 두께가 대체로 10m 미만을 고려한다면 용암류가 반복적으로 분포하는 성층 구조를 가진다.(이, 1994)

제주도의 지질 구조를 조사하기 위해 1998년에서 2000년까지 개발된 154곳 관정에서 일부를 그림 18과 같이 지역별 및 고도에 따라 표본으로 선정하였으며, 표본에 대한 지질조사의 결과는 표 6에 나타내었다. 20m의 깊이를 고려한 지질조사에서 분포형상은 지역과 고도에 관계없이 3종에서 5종의 암석으로 반복 구조를 보였다. 표면 지층은 대부분 토사였으며, 표면 지층 아래의 암석 분포는 현무암류인 연암, 보통암, 풍화암이 87%를 차지하였고 나머지는 화산쇄설물이 분포하였다. 세 번째의 구성 암석은

현무암류가 81%의 분포를 보였다. 접지시스템의 시공 깊이를 감안하였을 때 지질 구조는 대부분 3종류의 암석으로 형성되어 있으며 심층으로 들어갈수록 화산암과 경암이 반복 분포된 구조를 보였다. 지표면은 화산재 성분의 화산토이고 분포 두께는 대부분 1m에서 1.5m 정도의 깊이까지 형성되어 있다. 두 번째 지층은 화산쇄설물인 화산암의 송이 지층으로 2m에서 5m 정도의 두께로 형성되어 있으며, 세 번째 지층은 경암 지층으로 2m에서 3m 정도의 두께로 분포한다. 지하 심층 깊이에서는 화산암의 송이 지층과 경암 지층이 반복 분포되어 있어 토질의 전기적인 특성은 매우 열악한 특징을 지니고 있다.(제주도 지질 주상도 자료집, 2001) 따라서 대지 내에 수분 함유량이 매우 낮고 암반의 특성상 대지저항률이 매우 높다. 제주도에서의 대지저항률은 한라산을 중심으로 고도에 따라 매우 큰 차이를 보인다. 표 7은 제주도 지역에서의 실측 데이터이며 고도에 따른 대지저항률의 분포 특성이다.



Fig. 18. Sample point to the geological survey

Table 6. Result of the geological survey

표본	1	2	3	4	5	6	7	8
표고	416m	375m	310m	252m	219.3m	144m	85m	42.5m
두께1 암석명	1m 토사	2.4m 토사	1m 토사	4m 사력	0.5m 토사	1m 토사	2m 토사	1m 토사
두께2 암석명	2m 연암	8.6m 연암	3m 연암	7m 보통암	5.5m 풍화암	1m 보통암	10m 사력	4m 보통암
두께3 암석명	25m 사력	2m 풍화암	2m 사력	4m 사력	18m 보통암	6m 풍화암	6m 연암	3m 연암
두께4 암석명		17m 보통암	9m 연암	9.5m 보통암		9m 연암	15m 보통암	2m 사력
두께5 암석명			1m 토사			3m 토사		5m 보통암
두께6 암석명			3m 사력			6m 보통암		5m 연암
두께7 암석명			3m 연암					5m 보통암

Table 7. Soil resistivity for height in Jeju

해발(m)	0~50	50~100	100~400	400~1,000	1,000~
대지저항률 ($\Omega \cdot m$)	100~300	500~1,000	800~2,500	1,000~3,000	2,500~10,000

2. 대지저항률 측정

대지저항률 측정은 IEEE 규정의 웨너 4전극법을 사용하여 부지 내에서 측정 방향을 다르게 하여 2번 측정하였다. 측정 위치는 제주시 북제주군 애월읍 일대 중앙전파관리소 제주분소 신축 부지이며, 표 8은 측정 간격과 대지저항 측정 데이터를 나타낸다.

Table 8. Measured data of soil resistivity

측정 현장	측정 간격 (m)	측정 저항치(Ω)		겉보기 대지저항률($\Omega \cdot m$)	
		1차	2차	1차	2차
중앙전파 관리소 제주분소	2	217.0	193.3	2,725.5	2,427.8
	4	143.2	104.7	3,597.2	2,630.1
	8	105.6	72.9	5,305.3	3,662.5
	12	69.3	52.0	5,222.4	3,918.7
	16	51.2	43.2	5,144.6	4,340.7
	20	45.0	41.3	5,652.0	5,187.3

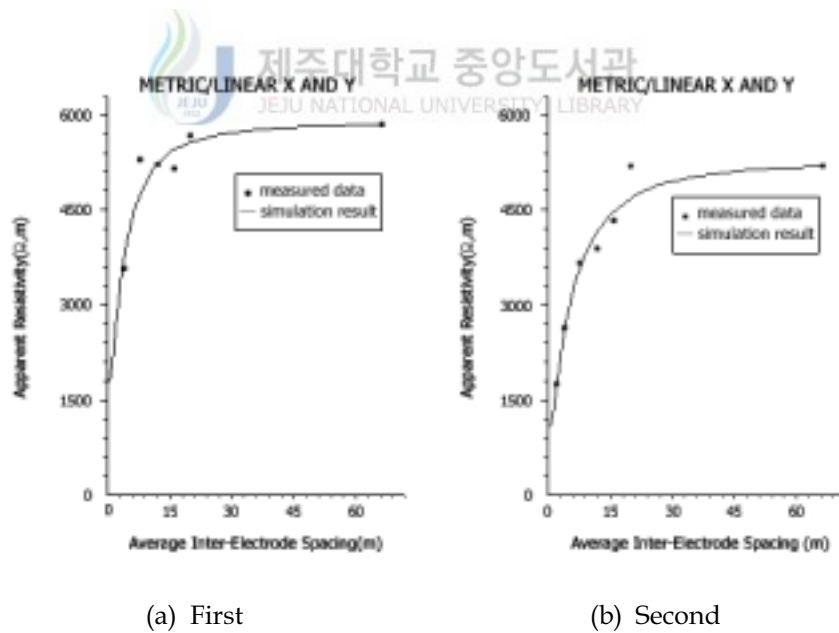


Fig. 19. Curve of soil resistivity by measured data

접지시스템이 시공될 현장을 중심으로 주위 대지를 다양하게 측정함으로써 정확한 지층 분석이 가능하다. 신축 건물 부지를 중심으로 웨너 4전극법에 의해 두 장소에서

측정된 대지저항률 데이터를 컴퓨터 분석 프로그램에 의해 분석한다. 대지저항률의 분석은 다 지층의 구조 모델로 해석이 가능하며 측정된 대지저항률의 정확한 분석을 위해 본 논문에서는 CDEGS의 RESAP 모듈을 활용하였으며 시뮬레이션에 의한 지층 분석 결과는 그림 19와 같다. 그림 19는 표 8의 대지저항률 측정 장소에서의 대지저항률 곡선으로 측정 장소 2곳에서 수평 2지층 구조를 갖는 대지 구조를 확인할 수 있으며 이것을 토대로 지층의 수, 각 지층의 대지저항률 및 두께 등의 지층 특성을 얻게 된다.

Table 9. Layer characteristics of measured places

장소	지층	대지저항률($\Omega \cdot m$)	지층 두께(m)	반사계수	대지저항률 비
1	상층	1,789.333	1.255910	-1.0000	0.17893E-16
	하층	5,877.935	∞	0.53325	3.2850
2	상층	2,427.800	4.293141	-1.0000	0.24278E-16
	하층	5,885.834	∞	0.41595	2.4243

표 9는 그림 19의 지층 특성이다. 여기서 대지저항률과 지층 두께는 시뮬레이션 결과이며, 반사계수와 대지저항률 비는 상위 지층과의 비율이다. 첫 번째 측정 장소에서의 결과는 약 1.3m의 지층 두께와 약 1,789 $\Omega \cdot m$ 의 대지저항률이며 측정치와의 오차는 5.1%을 보였으며, 두 번째 측정 장소에서의 결과는 약 4.3m의 지층 두께와 약 2,428 $\Omega \cdot m$ 의 대지저항률이며 측정치와의 오차는 5.2%을 보였다.

3. 대지저항률의 종합 분석

현장에서 측정된 대지저항률을 종합 분석함으로써 정확한 접지시스템의 설계 모델의 오차를 최소화할 수 있다. 현장의 서로 다른 장소에서 광범위하게 측정된 데이터

를 사용하여 종합 분석한 결과를 접지 설계에 적용한다. 그림 20은 1차와 2차 측정치의 종합 분석이며 동일 간격에서의 차이는 측정 장소를 분별할 수 있으며 대칭성을 보였다.

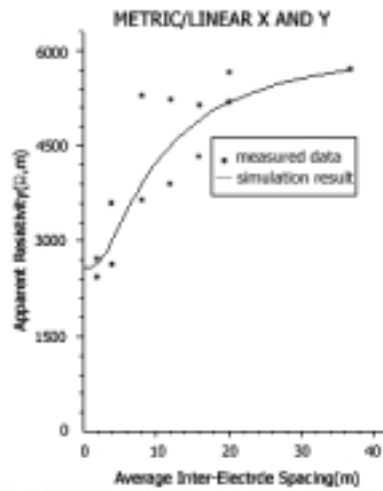


Fig. 20. Curve of soil resistivity of the spot

표 10은 수평 2지층 구조의 대지저항률 분석 결과를 나타낸다. 종합 분석한 결과는 약 3.9m의 지층 두께와 약 2,577 $\Omega\cdot m$ 의 대지저항률이며 측정치와의 오차는 개별적인 분석 결과보다 적은 2.9%을 보였다.

Table 10. Characteristics of layer

지층	대지저항률($\Omega\cdot m$)	지층 두께(m)	반사계수	대지저항률 비
상층	2,576.650	3.893151	-1.0000	0.25766E-16
하층	6,099.864	∞	0.40606	2.3674

V. 접지시스템 설계

접지시스템의 시방과 목표치가 결정되면 요구사항을 얻기 위한 접지시스템을 설계하여야 한다. 먼저 측정 분석된 현장의 대지저항률과 시공면적 그리고 접지방식을 선정하고 설계 엔지니어링을 통해 최적의 접지시스템을 구성한다. 접지시스템의 설계 과정에서는 시스템이 요구하는 기준치를 만족하도록 설계하여야 하며 최종 단계에서는 성능, 경제성, 시공성, 보전성 등을 고려하여 시스템에 가장 합리적인 접지시스템을 구축한다.

본 장에서는 여러 접지방식의 장단점을 고려해서 제주 화산암 현장에 맞는 접지시스템을 동일한 조건하에서 설계한 후에 각 접지방식에 대한 특성 비교를 통해 최적의 접지시스템을 제안한다. 설계에는 동일하게 접지저항 10Ω 이하의 대지 파라미터를 적용하였으며, IEEE의 관련 수식을 프로그램화한 CDEGS의 MALT모듈을 사용하였다.



1. 일반 접지봉 접지 설계

일반 접지봉의 병렬접지저항은 접지전극이 늘어나면 수 작업에 의한 계산이 어렵기 때문에 CDEGS 프로그램을 이용하여 설계하였다. 표 11은 구축 현장에서 분석된 수평 2지층 구조인 화산암 지층의 대지저항률을 적용하여 설계된 접지 설계 시방서이다.

Table 11. Design specification of driven rod

대지저항률	지층 두께	일반 접지봉 접지	접지봉 간격	설계접지저항
2,577 Ω ·cm(상층) 6,100 Ω ·cm(하층)	3.9m(상층) ∞ (하층)	⌀16/2,400mm×796개 + 접지선(500m×500m)	2.5m	9.7 Ω

그림 21은 표 11의 시방을 이용하여 그린 일반접지봉의 접지 설계 구조이다. 일반 접

2. 망상 접지 설계

망상 접지에서는 동선간의 간격과 설치면적 그리고 매설 깊이가 매우 중요하며, 다지층 구조의 특성을 충분히 활용할 수 없는 단점은 있지만 충분한 포설면적을 갖는다면 시공할 수 있다. 또한 전류의 방전특성을 높이기 위해 일반 접지봉과 연계하여 설계·시공하게 된다. 대지저항률은 수평 2지층 구조로 분석된 제주 화산암 현장의 대지저항률을 적용하였으며 10Ω 이하의 접지저항을 얻도록 설계하였다. 설계에서 10Ω 이하의 접지저항을 얻기 위해 100mm^2 의 나동선을 이용하였으며 설계 시방서는 표 12와 같고, 그 설계 구조는 그림 23과 같다. 그리고 시뮬레이션 결과인 3차원 전위 분포를 그림 24에 나타내었다.

Table 12. Design specification of mesh grounding

대지저항률	지층 두께	망상 접지	접지선 간격	설계접지저항
$2,577\Omega\cdot\text{cm}$ (상층) $6,100\Omega\cdot\text{cm}$ (하층)	3.9m(상층) ∞ (하층)	면적($220\text{m}\times 220\text{m}$) + 나동선	5m	9.8Ω

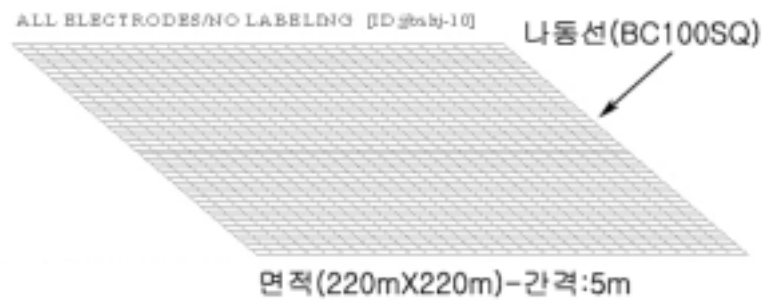


Fig. 23. Structure of mesh grounding system

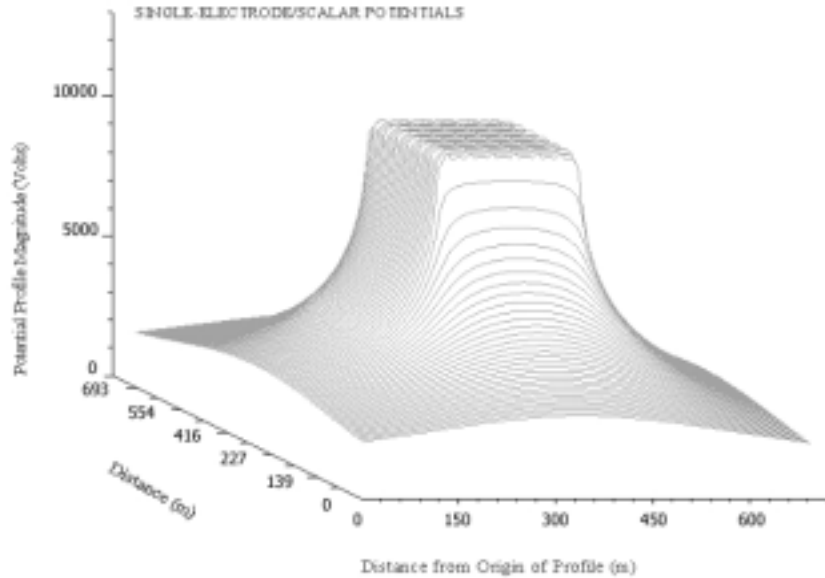


Fig. 24. Earth surface potential rise in mesh grounding



3. 전해질 접지시스템 설계

전해질 접지시스템 방식의 접지저항 계산은 일반 접지봉의 경우와 유사하게 계산할 수 있다. 두 방식에서의 차이점은 서지저감 전도체인 캐슬레이트와 보호저감제인 링크나이트의 저감 작용과 흡수저감 특성계수를 반영하여 접지저항을 계산해야 한다는 것이다. 따라서 접지 저감계수를 CDEGS 프로그램으로 계산하여 전체 전해질 접지시스템의 저항을 계산하였다. 그리고 접지봉 길이 및 배치 형태에 따른 계수의 행렬 계산은 접지시뮬레이션 프로그램을 이용하였다.

표 13은 전해질 접지봉의 설계 시방을 나타낸다. 전해질 접지봉은 천공 깊이와 접지봉간의 간격 그리고 접지봉의 배치 구조에 따라 접지 성능을 최적화할 수 있으며, 접지전류의 방전성능을 개선하기 위해 접지선은 가장 가까운 접지봉으로부터 인출한다. 그림 25는 전해질 접지시스템의 설계이고 그림 26은 시뮬레이션 결과인 3차원 전위 분포를 나타낸다.

Table 13. Design specification of electrolytic ground system

대지저항률	지층 두께	전해질 접지시스템	접지봉 간격	설계접지저항
2,577 Ω ·cm(상층) 6,100 Ω ·cm(하층)	3.9m(상층) ∞ (하층)	Φ 54/6,000mm 직선봉 \times 14개 + 접지연결선	17.7~63.6m	9.2 Ω

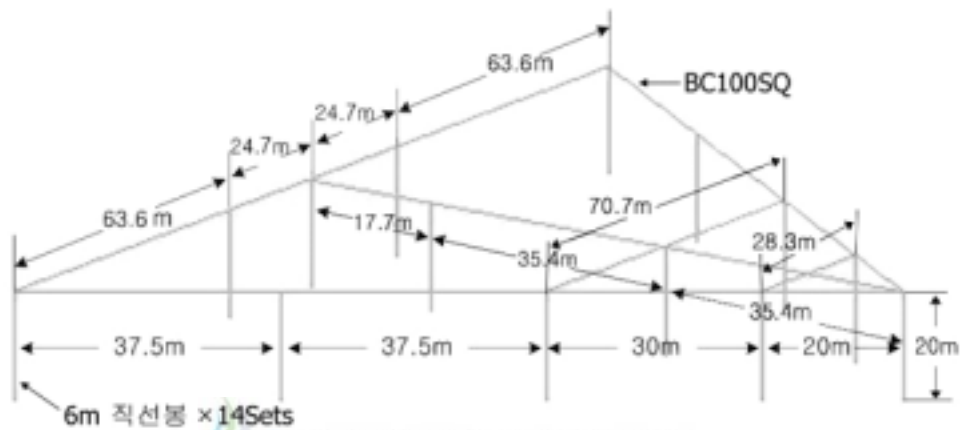


Fig. 25. Structure of electrolytic grounding system

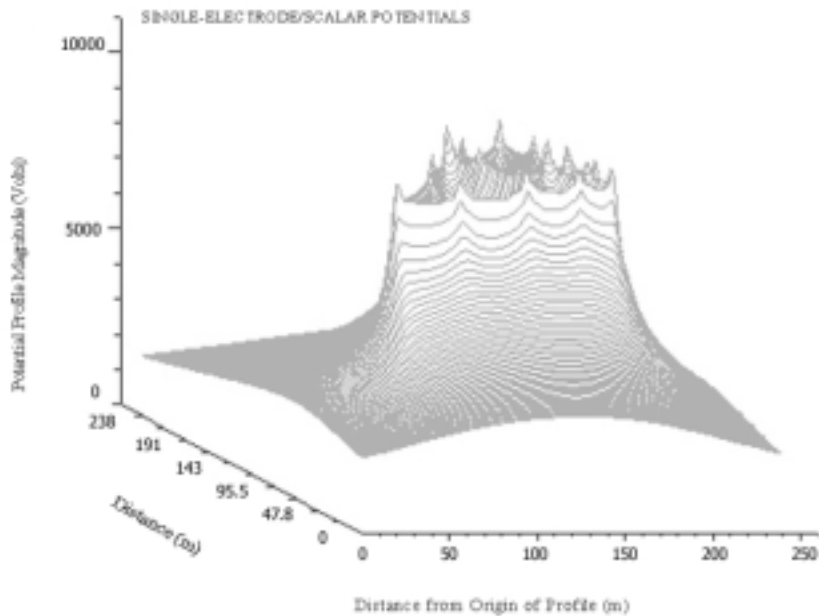


Fig. 26. Earth surface potential rise in electrolytic grounding system

설계 접지저항 10Ω을 얻기 위해 각각의 접지시스템에 대한 접지봉의 수, 시공면적, 접지선의 총 길이 등이 고려된 설계 특성을 표 14에서 비교하였다. 접지봉의 수는 일반 접지봉 접지에서 796개, 전해질 접지시스템에서는 14개의 설계 결과를 얻었다. 시공면적에 대해서는 전해질 접지시스템에서 최소 면적인 7,814m²의 설계 결과를 얻었다.

Table 14. Design result for obtaining grounding resistance(10Ω)

특성 \ 설계방식	일반 접지봉 접지	망상 접지	전해질 접지시스템
대지저항률	2,577/6,100Ω·m		
지질 특성	화산암 지층		
접지봉 수	796개(Φ16/2,400mm)	—	14개(Φ54/6,000mm)
접지선 총 길이	3,984m	19,800m	894m
시공면적	500m×500m	220m×220m	7,814 m ²
접지저항	9.7Ω	9.8Ω	9.2Ω

일반적으로 접지시스템의 시공면적은 제한적이므로 동일한 시공면적을 고려한다면 각각의 접지시스템의 접지저항은 달라지게 된다. 표 15는 표 14의 대지저항률과 지질 특성, 그리고 전해질 접지시스템의 시공면적인 7,814m²에 대한 각각의 접지시스템의 접지저항 시뮬레이션 결과이다. 일반 접지봉 접지와 망상 접지에서 접지저항은 높아졌음을 확인하였다.

Table 15. Simulation result

설계 특성 \ 설계방식	일반 접지봉 접지	망상 접지	전해질 접지시스템
접지봉 수	160개(Φ16/2,400mm)	접지선 간격 5m	14개(Φ54/6,000mm)
접지저항	25.4Ω	23.0Ω	9.2Ω

VI. 통신 접지시스템 시공 및 고찰

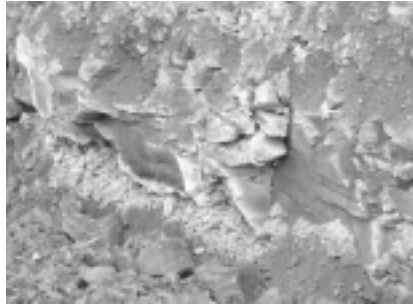
본 논문에서는 매우 열악한 지질 특성을 가지며 낙뢰의 위험성이 매우 높은 제주도 현장에서 분석된 대지 특성을 적용하여 현장에 적합한 전해질 서지저감 접지시스템을 설계하였다. 또한 낙뢰의 위험성이 높은 현장 상황을 고려하여 낙뢰로부터 통신설비를 보호하고, 서지로 인한 위험성을 최소화시키기 위해 개선된 접지시스템의 구성을 제안하였다. 최상의 접지 성능을 얻기 위해 접지 형상 및 접지봉 배치에 대한 사전 설계 및 시뮬레이션을 수행하였고, 설계된 접지시스템을 현장에 시공하여 그 결과를 비교 분석함으로써 접지시스템의 실제적인 접지 성능을 확인하였다.

1. 통신 접지시스템 시공



일반적으로 통신설비용 접지저항은 10Ω 이하로 규정되어 있으며 통신설비의 중요성과 운용 환경 그리고 현장 여건을 고려하여 기준 저항치를 설정한다. 시공에 있어서 포설형상에 따른 접지전류 및 전위 특성과 같은 설계가 없이 단순히 요구 접지저항을 만족하기 위한 접지봉의 수와 시공면적만을 고려한 접지 시공이 이루어졌고, 시공 후 목표에 미달하게 되면 접지전극을 추가로 설치하여 그 값을 맞추어 가는 방법으로 접지시스템 시공이 이루어졌다.

본 논문에서는 접지체간의 전위차 해소를 통해 낙뢰로부터 내부설비를 보호하는 접지 구조로 부분 공통접지방식을 적용하였으며, 부분 공통접지방식에 사용된 전해질 접지시스템의 시공 과정을 그림 27에 나타내었다. 그림 27a에 나타낸 암반 지층에서의 접지봉 시공은 그림 27c에서와 같이 지름 15cm로 지반을 천공하고 그 위치에 그림 27d와 같이 지름 5.5cm의 직선형 접지봉을 삽입한다. 접지봉을 삽입한 후 린코나이트를 물과 혼합하여 접지봉이 삽입된 구멍에 그림 27e에서처럼 부어넣고 접지선을 인출 후 그림 27f와 같이 발열 용접하고 마무리한다. 접지저항 측정은 그림 27g에 보이는 접지저항 측정기인 AEMC4500을 이용하였으며 측정 결과는 그림 27h와 같다.



(a) Rock layer



(b) Electrolytic rod



(c) Boring



(d) Laying electrode



(e) Lycosite mix



(f) Exothermic welding



(g) Grounding resistance measurement



(h) Result

Fig. 27. Construction work

2. 통신 접지시스템의 시공 결과 및 고찰

접지 설계 프로그램인 CDEGS로 시뮬레이션을 수행한 후 현장에 시공한 전해질 서지저감 접지시스템의 접지저항을 측정하여 그 특성을 분석하였다. 접지저항은 IEEE에 규정된 3전극법으로 측정하였으며, 측정장비는 IEEE, NEC 규정을 만족하는 접지저항 측정기 AEMC4500을 이용하였고 접지시스템의 측정 결과는 표 16과 같이 설계에서보다 나은 접지저항을 확인하였다. 또한, 현장의 가용면적, 경제성 그리고 접지 효과 면에서 최적의 접지시스템을 선택하는 것이 중요하다는 것을 확인하였다.

Table 16. Measured Result

구분 접지저항	제안된 접지시스템	측정방법
설계	9.2Ω	—
측정	7.7Ω	3 전극법
측정(2개월 후)	5.7Ω	3 전극법

VII. 결론

본 논문에서는 여러 가지 접지시스템을 확인함으로써 제주도 화산암 지층에서도 안정적이고 신뢰성 있는 접지 성능을 유지할 수 있는 효율적인 접지시스템에 대해 연구하였으며, 통신시스템과 같은 민감한 설비에 대해 적합한 접지시스템을 설계하였다. 제주도의 지질 구조는 접지시스템의 시공 깊이 20m를 감안하였을 때 제주 전역에 산재한 154곳의 지질조사를 토대로 분석한 결과, 토사와 현무암의 구성 암석인 연암, 보통암, 풍화암으로 형성되어 있었다. 토질의 전기적 특성은 수분 함유량이 낮고 암반 특성상 대지저항률이 너무 높아 매우 열악한 것으로 조사되었다. 대지저항률 측정에서도 동일한 결과를 확인하였으며 CDEGS RESAP 모듈을 이용한 대지저항률 분석으로 수평 2지층의 대지 구조를 확인하였다. 이를 통해 열악한 접지 환경에서 보다 더 효과적으로 통신설비를 보호하고 장애를 예방하며 안정적인 운용 환경을 확보할 수 있는 접지시스템을 구축하기 위해 CDEGS MALT 모듈을 이용하여 10Ω 이하의 접지 저항에 맞추어 설계하였으며, 실제 현장에 접지시스템을 설치하여 측정된 결과 7.7Ω의 접지저항을 얻었고 시공 2개월 후에는 5.7Ω의 접지저항이 측정되어 접지시스템의 효율성을 확인하였다.

설계된 접지시스템의 시공을 통해 다음과 같은 결과를 얻었다. 첫째, 접지 설계에서 설치 환경에 적합한 접지시스템의 설계가 가능하였다. 둘째, 현장의 대지저항률을 측정 및 분석하여 접지 설계에 활용함으로써 신뢰성이 향상되었다. 셋째, 접지 설계를 도입함으로써 시공 시의 오류를 최소화하였다. 넷째, 제주도 화산암 지층에서 효율적이고 뛰어난 성능을 나타내는 전해질 서지저감 접지시스템을 제안할 수 있었다.

이상과 같이 현장 환경에 맞는 정확하고 효율적인 접지시스템을 설계하고 시공함으로써 현장의 지질 특성과 관계없이 안정적이고 우수한 접지시스템을 구축할 수 있었으며, 이를 활용함으로써 통신시스템 뿐만 아니라 컴퓨터, 전력 및 제어와 같은 모든 분야의 설비 보호 및 안정적인 운용 환경을 확보할 수 있을 것이다.

참고문헌

- 최세하, 1999, 알기 쉬운 접지기술실무, 진한도서, pp.181-191.
- 최홍규, 최병숙, 송영주, 2004, 접지설비 및 설계, 성안당, pp.42-181.
- David M. Volz, 1995, "Morden Land Mobile Communications site Grounding", Telecomputer Energy World Proceeding.
- 한풍, 1998, "효율적인 765kV 변전소 접지설계", 대한전기학회 춘계학술대회논문집.
- IEEE Std. 81, 1983, Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System
- IEEE Std. 80, 1986, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding.
- 제주도 지질 주상도 자료집, 2001, 제주도 광역수자원 관리본부.
- 전기설비기준, 2002, 한국전력 기술인 협회.
- 조대훈, 정철희, 2001, "고기능 신기술의 XIT 접지시스템의 성능 비교", 한국조명·전기설비 학회지.
- 김성모, 1999, 접지기술입문, 동일출판사, 220pp.
- 이형수, 2003, 접지시스템 입문, 성안당, 173pp.
- 이형수, 김정훈, F. P. Dawalibi, J. Ma, 1997, "균질 및 2층 구조토양에서 효과적인 접지 그리드 설계", 대한전기학회 논문집 제46권 9호, pp1319-1325.
- 이문원, 1994, 제주도의 형성사와 지질 구조, 제주도청.
- 박우현, 이기식, 조대훈, 2002, "접지시스템간의 전계간섭에 관한 특성연구", 고전압방전응용기술연구회 춘계학술대회논문집.
- 신동호, 김용, 정철희, 조대훈, 김필수, 1999, "서지전류에 의한 접지계의 과도응답 특성 및 접지저항 비교", 대한전기학회 춘계학술대회논문집.
- Warren R. Jone, 1980, "Bentonite Rods Assure Ground Rod Installation In Problem Soils", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 4, pp.1343-1345.