

Estimation of Grounding Resistance by Correlation Analysing Change Factors of Soil Resistivity and Grounding Resistance

토양환경 변화와 접지저항의 상관관계 분석을 통한 접지 저항값 예측 연구

Choi Sun-Kyu, Lee Kyu-Young, Moon Young-Ho, Shim Keon-Bo
최선규, 이규영, 문영호, 심건보

Abstract

The purpose of this paper is to improve the grounding point measurement method for the maintenance of the earth resistance of the distribution line. This study defines the correlation among humidity of the soil, the earth resistivity and the grounding resistance. Based on the results of the study, the grounding resistance value measurement should be limited to the location where the earth resistivity change is large, and the measurement time and cost can be greatly reduced.

Keywords: Grounding Resistance, Soil Resistivity, Humidity in Soil, Monitoring, Estimation Methods

1. Introduction

전기에너지를 사용하는 전력설비에서 고장이나 낙뢰 현상은 필연적으로 일어나는 것이며, 특히 지락 고장이 발생하면 고장전류가 접지전극을 통하여 대지로 흘러가게 되어 전기설비의 구내 및 주변에 전위차가 나타나게 되어 전기설비 구내 및 주변에 위치하는 인체의 안전이나 설비의 절연에 위험을 초래하게 된다. 더욱이 최근에 전력사용의 수요가 급속하게 성장함에 따라 전력설비도 증대되어 전력설비의 고장용량도 증가하고 있으므로 상대적으로 고장전류에 의한 대지전위의 상승이 커져서 인체의 안전이나 전기설비의 절연 등에 미치는 위험도 증대되고 있는 실정이다. 이러한 위험에 대비하기 위한 것이 전기설비의 접지시스템(Grounding system)이다 [1][2].

접지시스템을 구축하는 목적은 전기설비 주변에 위치하는 인체와 동물의 감전사고 방지와 전력기기의 손상 등을 방지하기 위한 것으로서, 기본적으로 대지 표면의 전위상승을 억제하여야 하며, 대지표면에 나타나는 전위경도를 작게 하여야만 효과적이다. 따라서 같은 크기의 고장전류가 흐른다고 한다면 접지전극의 접지저항의 크기가 작을수록 대지표면의 전위상승도 작게 나타날 것이고, 대지표면의 전위경도도 작게 되어 인체와 동물의 안전은 물론 전력기기의 동작에 대한 안전성도 확보할 수 있게 된다 [3].

접지시스템에서 중요한 역할을 하는 것이 접지전극이 매설되는 토양의 전기적 성질인 대지 저항률로서, 토질이나 토양 내에 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 구조 등의 정보가 중요한 것이다 [4].

배전선로의 접지저항 유지 관리를 위하여 한국전력공사에서는 배전 검사지침에 일반주(고압주 및 저압주) 및 기기주(개폐기, 변압기, 입상주, 지중설비)의 접지저항 측정 기준을 명시하고 있으며, 측정 주기와 측정 방법도 제시되어 있다. 접지저항 측정 방법에는 크게 3전극법(전위 강하법, Fall-of-Potential method) 및 클램프-온(Clamp-on)식 측정기 사용법을 권고하고 있으며, 가장 많이 사용되고 있는 방법은 작업자가 활선 작업차를 이용하여 중성선 부근에서 접지선에 클램프-온식 측정기를 이용하는 방법으로 시간 및 비용이 많이 소요되는 단점이 있다. 현재 배전선 내회기준(DS-3800)에서 접지저항은 일반주 300 Ω, 기기주/변대주 25 Ω, 입상주 100 Ω 이하로 유지해야 된다고 명시되어 있다. 특히 측정주기는 일반주는 1 회/5 년, 기기주는 1 회/3 년으로 규정하고 있어 대략적인 유지관리 비용을 산정해보면, 접지저항 개소당 측정비용 20,012 원(2019년도 상반기 기준), 측정 개소는 한 지역본부당 대략 35만 개 소인데, 실질적으로는 예산부족으로 인하여 모든 개소를 측정하지 못하고 예산에 맞춰서 측정을 하고 있는 실정이다. 본 논문에서는 배전선로의 접지 유지관리 측면에서 불특정 다수의 접지 개소를 주기적으로 직접 측정하는 방법의 문제점을 개선하고자, 접지저항값에 직접적인 영향을 미치는 대지저항률의 변화인자들을 상시적으로 관측하고, 대지 저항률 변화에 따른 접지저항값을 측정 및 분석하여 토양 종류에 따른 특성을 제시하였다. 연구의 결과를 바탕으로 대지 저항률 변화가 크게 발생된 개소만 측정을 시행함으로써 접지저항 측정에 소요되는 시간 단축 및 비용 절감이 가능한 간접측정방법을 제안하였다.

Article Information

Manuscript Received October 17, 2019, Revised November 11, 2019, Accepted November 15, 2019, Published online March 30, 2020

Choi S., Lee K. and Moon Y. are with KEPCO Research Institute, Korea Electric Power Corporation, 105 Munji-ro Yuseong-gu, Daejeon 34056, Republic of Korea. Shim K. is with Dongguk University, 30 Pildong-Ro 1-gil, Jung-Gu, Seoul 04620, Republic of Korea.

Correspondence Author: Choi Sun-Kyu (Sunkyu.choi@kepco.co.kr)



This paper is an open access article licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International Public License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>. This paper, color print of one or more figures in this paper, and/or supplementary information are available at <http://journal.kepco.co.kr>.

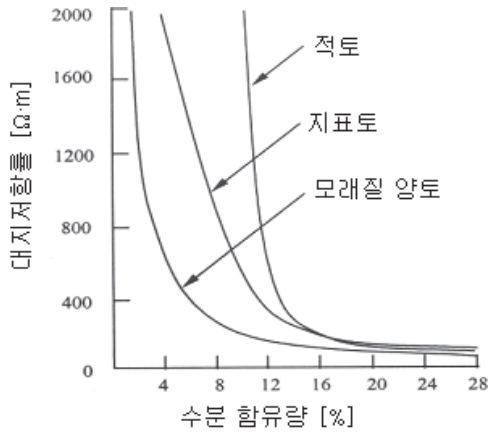


Fig. 1. 수분 함유량에 따른 대지 저항률.

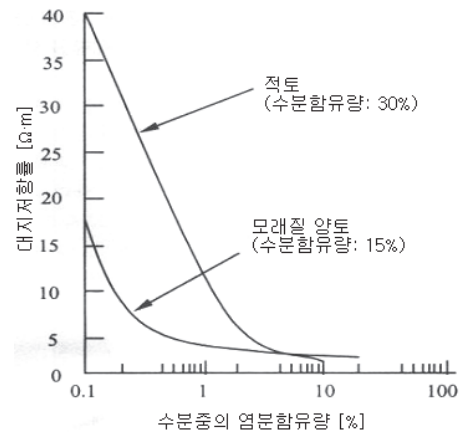


Fig. 3. 염분 함유량에 따른 대지 저항률 변화.

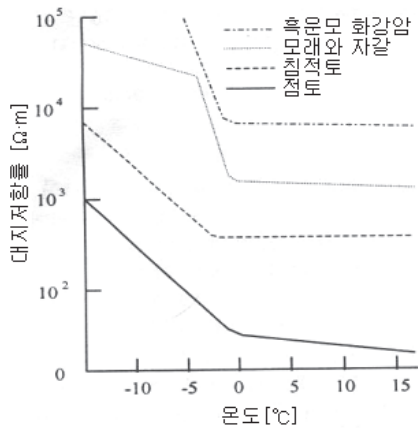


Fig. 2. 온도변화에 따른 대지 저항률.

II. 대지 저항률의 특성

일정한 지역에 매설된 접지전극의 접지저항은 접지전극의 형성과 재료, 크기, 접지전극이 매설된 대지를 구성하는 토양의 형태와 조건, 대지 구조 등에 따라 변화하며, 특히 대지 저항률의 크기에 직접적으로 영향을 받는다. 접지전극이 매설되는 지역의 토양 저항률(soil resistivity) 또는 대지 저항률(earth resistivity)이 접지의 효과를 크게 좌우하게 된다는 의미이다. 따라서 접지전극의 설계, 시공 및 유지관리 측면에 있어서 접지전극 매설 지점의 대지 저항률과 지층의 구조를 정확하게 알아내는 것은 대단히 중요하다. 접지전극이 매설된 장소의 대지 저항률은 토질이나 토양 내에 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 구조 등의 정보가 중요한 것이다 [5].

A. 토양의 전기적 성질

지구 표면 토양의 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. 따라서 대지 표면 근처의 토양의 저항률은 수분의 함량과 수분에 용해되어

있는 염분의 특성에 따라 변화하므로 토양이나 암석의 저항률을 단일의 특정한 값으로 나타낼 수는 없다.

전기적 관점에서 볼 때 토양은 다양한 모양과 크기, 다른 저항률을 갖는 물질의 혼합으로 이루어져 있으며 대지 표면에서의 전기전도는 주로 전해질에 의해 일어나고 대지 저항률의 차이는 함유되어 있는 수분의 양과 염분의 특성에 따라 다르게 나타난다 [6].

B. 대지 저항률의 변화인자

일반적으로 토양을 구성하는 성분, 입자의 크기, 분포, 균질성 및 조밀도 등에 따라 대지의 전기적 성질도 다르며, 대지 저항률은 항상 일정한 값을 가지는 것이 아니라 기후, 온도, 습도나 주위환경의 조건에 따라 변화한다. 대지 저항률의 변동에 영향을 미치는 요인으로는 토양의 종류, 토양에 용해되어 있는 화학 물질의 종류와 농도, 수분의 양, 온도, 토양을 구성하는 입자의 크기와 분포, 대지 표면으로부터 깊이에 따른 압력과 조밀도 등이 있다.

1) 수분 함유량의 영향

토양에서의 전기전도는 근본적으로 전해질 중에 함유되어 있는 이온의 이동에 의한 전기전도에 의해서 이루어지므로 토양 중에 수분이 함유되어 있으면 저항률이 저하하며, 수분의 함유량이 증가하면 대지 저항률은 급격히 감소한다. Fig. 1에 수분의 함유량에 따른 대지 저항률의 변화에 대한 예를 보였다. 토양의 종류에 따라 다르기는 하지만 수분의 함유량이 약 16% 이하에서는 수분 함유량의 증가에 따라 대지 저항률은 급격히 감소하며, 16% 이상이 되면 대지 저항률의 감소는 완만하게 나타난다. 토양에 함유되어 있는 수분의 양은 토양을 구성하고 있는 입자의 크기, 다양성 및 저밀도 등에 의존하게 된다. 균일한 토질의 토양에 매설되어 있는 접지전극의 접지저항은 대지 저항률에 직접적으로 비례하므로 토양의 종류와 수분의 함유량은 접지저항을 결정하는 핵심적 중요한 요소라고 볼 수 있다.

2) 온도의 영향

물질의 저항률은 온도에 따라 변화하며, 일반적으로 온도가 높아지면 금속의 저항률은 증가하는 데 비해서 반도체나 전해질의 저항률은 감소한다. 토양에 함유되어 있는 수분도 전해질이므로 대지 저항률은 온도 상승과 더불어 감소한다. Fig. 2에는 토양과 암반의 온도변화에 따른 대지 저항률의 변화 특성에 대한 대표적인 예를 보였다.

토양이나 암반에 함유되어 있는 수분이 증발되거나 동결

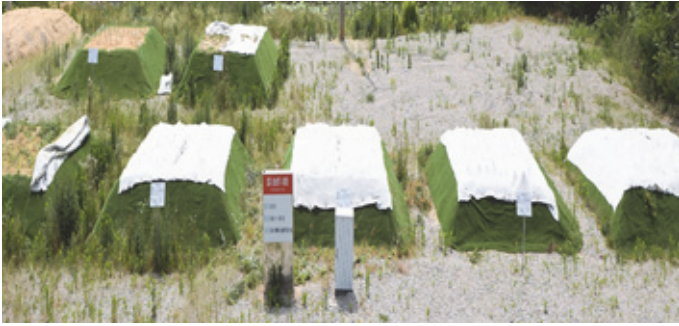


Fig. 4. 토양별 접지전극 측정 실증시험장.



Fig. 5. 대지 저항률 변화인자 모니터링 시스템.

될 정도로 높거나 낮은 온도로 변화되면 대지 저항률은 수 배 정도 변화하는 경우도 있다. 그러나 수분이 증발되지 않는 범위에서 온도가 상승하면 수분에 포함되어 있는 이온의 이동도가 증가하여 대지 저항률은 약간 감소하게 된다. 모래와 자갈의 경우에 대지 저항률이 온도가 0 °C일 때 비선형 적으로 증가하는 특성은 토양이 동결되었을 경우 대지 저항률이 급격히 증가하기 때문이다. 0 °C 이하의 온도에서의 대지 저항률의 변화율은 영상의 온도에서의 변화율보다 매우 크게 나타난다.

3) 화학적 성분의 영향

대지 저항률은 함유되어 있는 수분의 양에 따라 변화할 뿐만 아니라 토양 중에 용해되어 있는 염분, 산 및 알칼리 등 화학물질의 양이나 조성에 따라 대단히 크게 변화한다. Fig. 3에는 염분(염화나트륨)의 농도에 대한 대지 저항률의 영향에 대표적인 예를 보여주고 있으며, 토양의 종류나 수분의 함유량에 따라 염분의 영향은 크게 다르다.

III. 대지 저항률 변화인자 및 접지저항 측정

A. 대지 저항률 변화인자 측정시스템 구축

접지전극의 저항값 크기에 가장 큰 영향을 미치는 대지 저항률이며, 대지 저항률에 영향을 미치는 요소는 크게 토양의 종류, 온도, 습도 및 화학적 성분 등이다. 본 논문에서는 대지 저항률의 변화인자를 측정하기 위하여 한국전력공사의 배전선로 접지전극

TABLE 1
접지전극의 재질 및 특징

	접지동봉	심타용 용융아연도금 접지봉(심타봉)	원형 콘크리트 접지극	도전성 펠트형 접지판
형상				
재질	강봉(SS400)+ 동피복	강봉(SM45)+ 아연도금	스테인레스+ 도전성Con	도전성 펠트
점유율 [%]	92	6	1.5	0.5
특징	자재비 저렴	타격 시공	시공비 저렴	경량 시공 용이
단점	동피복 박리	표면 부식	1개 시공제한	기기주 시공 불가
단가 [원]	6,840	23,109	32,000	53,000
사용 개소	부식 우려가 없는 일반 지역	견고한 토질 등 타공법 시공 곤란 개소	일반지역, 전주 전주 시, 토양오염지역	일반지역

TABLE 2
접지전극의 재질 및 특징

항 목	센서 사양		
	온도	수분	EC (토양전도도)
측정범위	-40 ~ 60 °C	유전율 (εa) 1 (공기)-80 (수분)	0~ 23 dS/m
정밀도	±1 °C	±15% (40-80 VWC)	±10% (0-7 dS/m)
분해능	±0.1 °C	0.08% (0-50 VWC)	0.01 dS/m (0-7 dS/m)

이 매설되는 배전전주의 시설 개소에 대한 토양의 종류를 풍화토, 노상토, 산악토, 해상토, 하천토 등의 5 종류로 분류하였으며, 각각의 토양별로 TABLE 1에 보인 배전선로에 사용되는 접지전극인 접지동봉, 심타용 용융아연도금 접지봉(심타봉), 도전성 펠트형 접지판, 도전성 콘크리트 접지전극 등을 측정 대상으로 하였다.

Fig. 4는 대지 저항률 변화인자 측정을 위하여 분류한 토양별로 시험 대상 접지전극을 설치한 고창전력시험센터 내의 실증시험장을 보인 것이다. 또한, TABLE 2와 같이 각각의 토양별로 온도 및 습도, 토양 전도도 등을 측정할 수 있는 5TE 센서를 설치하였으며, Fig. 5와 같은 대지 저항률 변화인자 측정을 위한 모니터링 시스템을 구축하고, 상시적으로 측정된 데이터를 수집하였다.

B. 접지 저항의 측정

설치된 접지전극에 대한 접지저항의 측정방법에는 2 전극법 및 전위 강하법(Fall-of-Potential Method) 등의 여러 종류의 방법이 있으며, 이 중에서 전위 강하법이 가장 실용적이고, 일반적으로 사용되는 대표적인 방법이다. 그러나 접지전극의 접지저항을 측정하기 위한 여건이나 환경이 일정한 조건을 만족하지 못하는 경우에는 이 방법을 적용하기 곤란하여 다른 방법을 적용하여야 하는 경우도 있다. 특히 도심을 통과하는 배전선로에서 접지전극을 시공한 후에 접지저항의 측정이나 또는 정기적인 접지저항의 관리를 위하여 접지저항을 측정하는 경우에 전위 강하법을 이용하여 접지저항을 측정하는 것은 여러 가지의 어려운 문제점을 가지고 있다. 이러한 경우에 사용하는 방법이 클램프-온(Clamp-on) 측정기에 의한 측정법으로 간단한 원리에 의한 접지저항의 측정방법으로서 전위 강하법을 대체할 수 있는 측정법이다. 접지저항의 측정 시에 접지전극을

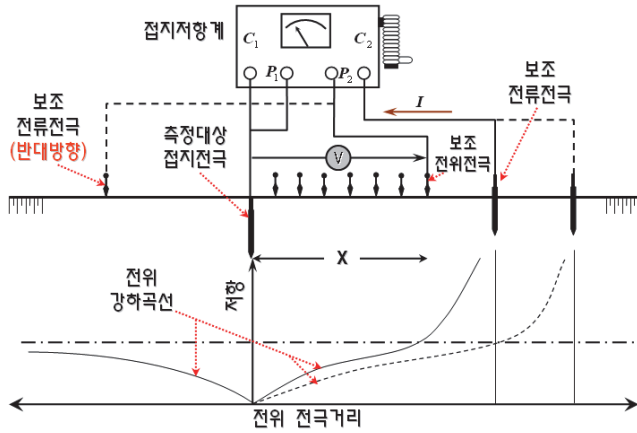


Fig. 6. 전위강하법의 측정 원리와 일반적인 측정 결과.

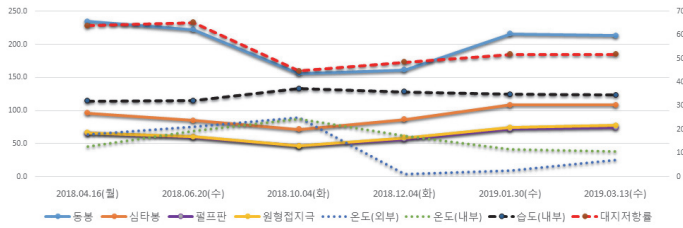


Fig. 7. 풍화토의 대지 저항률 및 접지저항 변화.

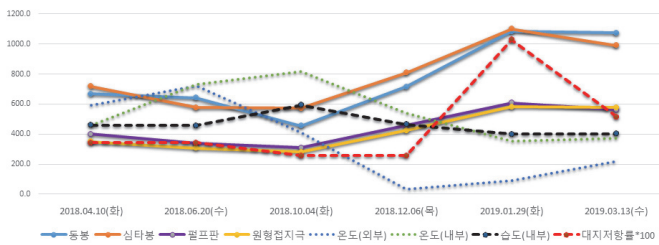


Fig. 8. 해상토의 대지 저항률 및 접지저항 변화.

설비와 분리시키지 않고 측정할 수 있으며, 접지 시스템에 연결된 모든 접지저항을 측정할 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 측정의 정확도를 높이기 위하여 Fig. 6과 같은 측정원리에 의한 전위 강하법을 적용하였으며, 측정 장비는 프랑스 CHAUVIN ARNOUX사의 C.A 6470N TERCA3 모델을 사용하였다.

C. 대지 저항률 변화인자 및 접지저항 측정 결과

본 논문에서는 대지 저항률 변화인자의 데이터와 실증시험장에 설치된 접지전극의 접지 저항값의 관계를 비교·검토하기 위하여 1-2 개월의 주기로 토양별 접지전극을 대상으로 접지저항을 측정하였다.

1) 풍화토, 노상토 및 산악토

한국전력공사의 배전선로를 구성하는 배전 전주의 시설 개소는 택지 및 임야(풍화토), 도로변(노상토), 야산(산악토) 등이 80% 이상을 차지한다. Fig. 7은 고창전력시험센터내 접지 실증시험

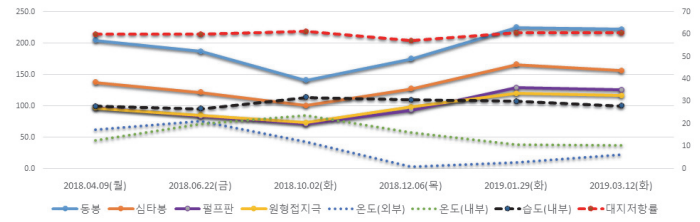


Fig. 9. 하천토의 대지 저항률 및 접지저항 변화.

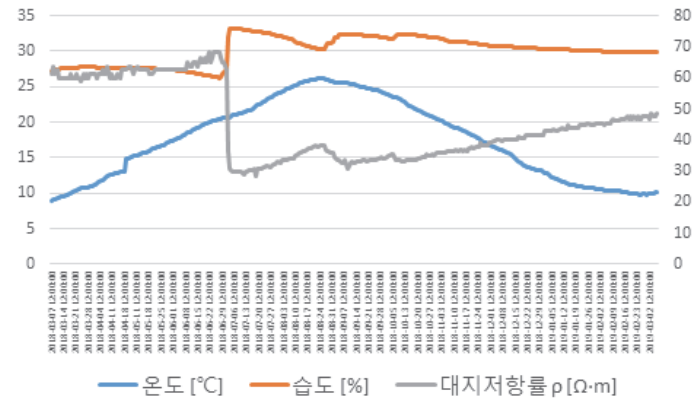


Fig. 10. 습도와 대지 저항률의 변화.

장의 풍화토에 설치한 접지전극별 접지 저항값과 온도, 습도 및 대지 저항률의 변화를 나타낸 것이다.

Fig. 7과 같이 대지 저항률의 변화는 온도와 습도의 변화에 반비례하는 경향을 나타내고 있으며, 외부 온도에 대한 토양 내부의 변화는 시기적으로 지연되어 반영되는 것을 보여주고 있음을 알 수 있다. 노상토 및 산악토에서도 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

2) 해상도 및 하천토

측정 결과를 보인 Fig. 8과 같이 해상토는 풍화토, 노상토 및 산악토의 토양 보다는 특정 계절(겨울)의 대지 저항률 변화가 크게 나타나고 있으며, 이는 해상토의 입자간 공극이 넓기 때문에 외부 온도 영향 및 습도 변화가 큰 것으로 설명할 수 있다. 접지전극 종류별로 접지저항 값의 변화는 정도의 차이가 있지만 대체로 대지 저항률의 변화와 비슷하고, 온도와 습도의 변화와는 상반되는 경향을 나타내고 있다.

하천토는 일부 날짜(2018.10.02.)의 측정값을 제외한다면, 해상토를 제외한 풍화토, 노상토 및 산악토의 토양과 유사한 경향을 보이고 있다(Fig. 9).

3) 측정결과 고찰

대지 저항률 변화인자 측정을 위하여 분류한 토양별로 시험 대상 접지전극을 설치한 고창 전력시험센터 내의 실증시험장에서 대지 저항률 변화인자 측정을 위한 모니터링 시스템에서 각각의 토양별로 온도 및 습도, 토양 전도도 등을 측정할 수 있는 센서를 이용하여 온도, 습도 및 대지 저항률을 상시적으로 측정된 데이터를 수집하였다. 접지전극의 저항값과 대지 저항률 변화가 유사한 곡선을 나타내고 있는 것처럼 Fig. 10과 같이 실제 측정시험의 결과에서 대지 저항률을 변화시키는 인자인 습도를 측정하면, 대지 저항률과 습도의 측정 결과는 반비례 관계를 나타내고 있다.

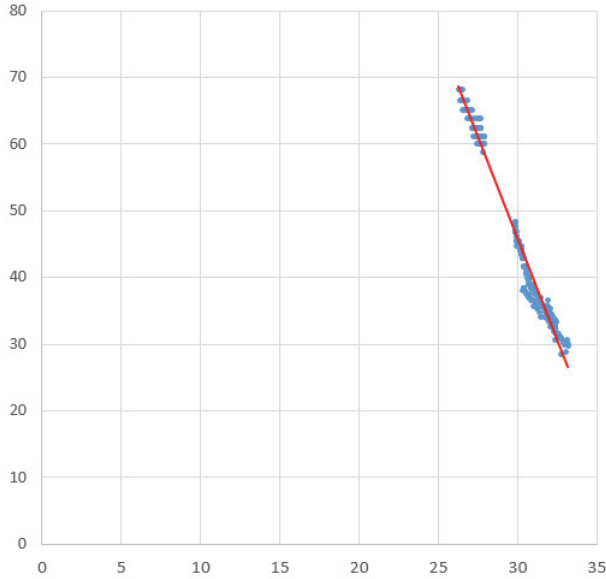


Fig. 11. 습도 및 대지 저항률의 관계.

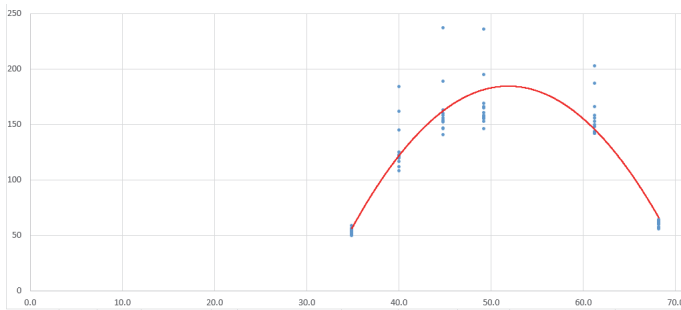


Fig. 12. 대지 저항률 및 접지저항의 관계.

IV. 대지 저항률 변화인자인 습도에 의한 접지저항의 수학적 모델

일반적으로 접지전극에 대하여 접지저항값에 대하여 토양의 습도가 대지 저항률과 접지저항값과 밀접한 관계를 가지고 있다는 것은 알려져 있으나 이에 대한 관계식은 정리된 문헌은 존재하지 않는다. 따라서 본 논문에서는 토양별로 시험 대상 접지전극을 설치한 고장 전력시험센터 내의 실증시험장에서 1년 동안의 기간에 대지 저항률 변화인자 측정을 위한 모니터링 시스템으로부터 측정된 습도와 대지 저항률의 관계(Fig. 11), 대지 저항률과 접지저항값의 관계(Fig. 12)를 확인할 수 있다. Fig. 11의 습도와 대지 저항률, Fig. 12의 대지 저항률과 접지저항값의 관계로부터 최소자승법을 활용하여 습도(H)와 대지 저항률(ρ)의 관계의 파라미터와 대지 저항률과 접지저항(R)값의 관계 파라미터를 각각 도출하였으며, 각각의 관계식을 Eq. (1)과 Eq. (2)에 보였다.

$$\rho = -6.0946H + 228.72 \quad (1)$$

$$R = -0.4459\rho^2 + 46.252\rho - 1014.9 \quad (2)$$

습도(H)와 대지 저항률(ρ)의 Eq. (1)과 대지 저항률과 접지 저항값(R)의 Eq. (2)로부터 습도(H)와 접지 저항값(R)의 관계는 Eq. (3)과 같이 정리하였다.

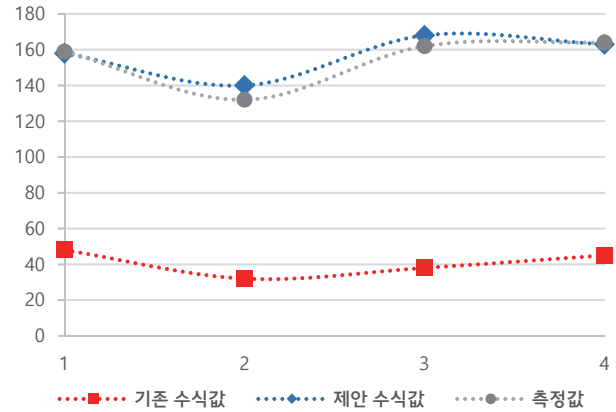


Fig. 13. 제안 모델식 및 기존 계산식의 결과 비교.

$$R = -0.5(-6.1H + 228.7)^2 + 46.3(-6.1H + 228.7) - 1014.9 \quad (3)$$

본 논문에서 제안된 대지 저항률의 변화인자인 토양의 습도를 고려한 접지 저항값 계산 모델 Eq. (3)의 효용성을 비교하기 위하여 일반적으로 길이가 L이고, 도체의 반지름이 a인 봉형 접지전극의 계산식인 Eq. (4)와 결과를 비교·분석하였으며, 그 결과를 Fig. 13에 보였다.

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\log_e \frac{2L}{a} \right) \quad (4)$$

Fig. 13에 제시된 바와 같이 실증시험장의 토양에 설치된 봉형 접지전극의 접지 저항값을 전위 강하법으로 측정한 결과(청색 실선)와 습도 및 대지 저항률, 대지 저항률 및 접지저항의 관계식을 적용한 Eq. (3)의 계산 결과(주황색 점선)가 오차범위 2-4 Ω 이내에서 일치하는 것을 확인할 수 있다. 종래에 일반적으로 접지 저항값 예측을 위해 사용된 계산식은 대규모 접지시스템의 설계를 위하여 상세한 대지 저항률이 측정되었을 경우 적용하도록 제안된 계산식으로 그래프에서 보는 것처럼 접지저항값의 오차가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다.

따라서 접지저항 측정기준의 유지관리 측면에서 접지전극과 습도를 측정할 수 있는 센서를 같이 매설하여 습도와 접지 저항값의 관계식인 Eq. (3)을 통하여 대지 저항률의 크기가 크게 변한 전주를 중심으로 저항값을 관리한다면 충분히 접지전극의 유지관리가 간편해질 수 있을 것이다.

V. Conclusion

접지시스템에서 중요한 역할을 하는 것이 접지전극이 매설되는 토양의 전기적 성질인 대지 저항률로서, 토질이나 토양 내에 함유되어 있는 화학물질, 염분, 수분의 함유량 및 토양의 온도 등에 따라 상당히 변화한다. 따라서 대지 저항률을 정확하게 결정하는 것은 주변의 환경, 토질과 지층의 구조 등의 정보가 중요한 것이다.

배전선로의 접지저항 유지 관리를 위하여 한국전력공사에서는 배전 검사지침에 일반주 및 기기주의 접지저항 측정값을 명시하고 있으며, 측정 주기와 측정 방법도 제시되어 있다. 현재 배전선 내뢰기준(DS-3800)에서 접지저항은 일반주 300 Ω, 기기주/변대주 25 Ω, 입상주 100 Ω 이하로 유지해야 된다고 명시되어 있다. 특히 측정주기는 일반주 1 회/5 년, 기기주 1 회/3 년으로 규정하고 있

어 여러 어려움이 존재하고 있는 실정이다. 본 논문에서는 배전선로의 접지 유지관리 측면에서 불특정 다수의 접지개소를 주기적으로 직접 측정하는 방법의 문제점을 개선하고자, 접지저항값에 직접적인 영향을 미치는 대지 저항률의 변화인자들을 상시적으로 관측하고, 대지 저항률 변화에 따른 접지저항값을 측정 및 분석하여 토양 종류에 따른 습도와 대지 저항률, 습도와 접지저항값의 관계식을 제시하였다. 연구의 결과를 바탕으로 대지 저항률 변화가 크게 발생된 개소만 접지 저항값 측정을 시행함으로써 접지저항의 간접측정방법에 의하여 측정에 소요되는 시간 단축 및 비용을 크게 절감할 수 있을 것으로 사료된다.

Acknowledgment

This work was supported by the Korea Electric Power Corporation under Grant R15DA18.

References

- [1] Tagg, G. F., "Earth Resistance," George Newnes Limited, 1964.
- [2] 高橋健彦, 이형수역, "接地設計 入門," 동일출판사, 음사, 1993.
- [3] 高橋健彦, 이형수역, "接地技術 入門," 동일출판사, 음사, 1995.
- [4] IEEE, "Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants", IEEE Standards, 1993.
- [5] 민찬식 외 2명, "대지 저항률 측정 이론 및 측정 사례 연구," 대한전기학회 학술대회 논문집, pp.1623-1624, 2017.
- [6] Md. Abdus SALAM, "Soil resistivity and ground resistance for dry and wet soil," 2015.