

Wenner 4축정 데이터를 이용한 다층구조 대지의 파라미터 결정

김호찬*, 부창진*, 김세호*, 오성보*, 고영수**
*제주대학교 전기공학과, ** (주)신원전기

Estimation of Multilayer Earth Model Parameter from Wenner Four-probe Test Data

Ho-Chan Kim*, Chang Jin Boo*, Se Ho Kim*, Seong Bo Oh*, Young Su Ko**
*Dept. of Electrical Engineering, Cheju National University, **Sinwon Electric Co.

Abstract - In this paper, a methodology has been proposed according to which, after carrying out a set of soil's resistivity measurements using Wenner Four-probe data, one can compute the parameters of the multilayer earth structure using a genetic algorithm(GA). The results provided by the GA constitute the indispensable data that can be used in circuitual or field simulations of grounding systems. The methodology allows to proceed toward a very efficient simulation of the grounding system and an accurate calculation of potential on the ground's surface.

1. 서 론

지하의 시스템을 설치할 때, 그 지역의 지하구조에 대한 지식은 절대적으로 필요하다. 지하시스템에 대하여 필드 또는 회로레벨의 시뮬레이션을 위하여 지층구조에 대한 파라미터들은 꼭 필요한 자료들이다. 여기서 수행된 대지저항률(soil resistivity) 측정은 대지가 2층구조 이상으로 해서 수행된다. 일반적으로 대지저항률은 연중 계절의 온도와 습도에 따라 변화하며, 여름에 대지저항률은 최고치를 나타낸다 [1]. 대지의 다층구조 분석에서 파라미터들을 구하는 것은 최적화문제로 연결된다.

본 논문에서 제안된 방법은 유전알고리즘(genetic algorithm, GA)에 기반한 것이며, 측정된 대지저항률을 이용하여 대지의 다층구조에서 파라미터들을 구한다. 일반적으로 GA를 이용한 방법은 다른 연구결과들과 비교하여 효율성이 뛰어난 것으로 알려져 있다. 따라서 본 논문에서 제안한 방법은 다층구조의 정확한 파라미터 값을 구할 수 있는 가능성을 보여준다. 이 값들은 지하시스템을 설치할 때 매우 중요한 입력 자료로 사용된다. 그리고 제안된 방법의 유용성은 대지의 층수에 상관없이 사용가능하며, 그리고 비교적 빠른 계산수렴을 하는 것이다.

본 논문에서 제안한 방법의 성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 살펴보기 위해 제주도 산간지역에서 측정된 대지저항률 값들을 기본 데이터로 사용하며, GA를 적용하여 2층과 3층 구조로 해석할 수 있는지 확인하도록 한다.

2. Wenner 4축정법을 이용한 대지저항률 측정

대지의 전기저항률은 토양의 종류, 습도, 계절 및 온도변화에 따라 큰 차이가 발생하고 있으며 대지의 깊이, 위치에 따라서 다르기 때문에 토양에 대한 전기적 특성을 결정한다는 것은 대단히 어렵다. 실제적으로 여러층으로 구분된 토양구조를 단일구조의 등가모델로 변환하여 점지설계에 적용한다. 그러나 이것은 실질적으로 토양이 균등하게 분포할 경우에만 비교적 정확한 해를 얻을 수 있어 현실에 가깝도록 2지층 또는 3지층구조로 토양을 모델링하는 것이 현실적으로 적합하다.

토양의 특성이 다양하고 복잡하여 토양의 구조를 결정하는데 많은 측정방법과 측정기술이 검토되어 왔다. 측정방법은 크게 직접측정과 간접측정의 2가지로 분류할 수 있다. 직접측정방법은 각종 깊이로 토양의 견본을 추출하여 전문화된 실험실에서 측정하는 방법으로 정확하고 직접적인 측정방법이나 값비싼 보령작업이 필요하다.

간접측정방법은 전압 V를 인가하여 대지의 응답치인 R을 측정하여 대지의 구조를 해석하는 것이다. 알려진 대지의 전기저항률 ρ와 대지 파라미터를 이용하여 가장 근접한 대지구조를 결정하는 것이다. 통상적으로 전극배열법 가운데 탐사에 사용될 수 있는 전극배열로는 단극자, 단극-쌍극자(pole-dipole), 쌍극자, Wenner 및 Schlumberger 배열을 들 수 있다 [2]. 본 논문에서는 현재 간접측정 방법으로 가장 널리 널리 쓰이는 Wenner 전극배열법의 특징에 대해 살펴보고 성능을 살펴보도록 한다.

대개의 전기저항률 측정기술은 Frank Wenner가 처음으로 제안한 등간격 4전극법을 변형시킨 기술이다. Wenner 전극배열법은 전극간격이 멀 때 전위전극에서 발생하는 전위차가 매우 작아 길지 않은 전극간격이 요구될 때 적용되어 왔다. 이 측정법은 사용되는 기기가 다양하고 측정결과와 해석방법이 간단하므로 적당한 전기저항률 측정법으로 이용되어 왔다.

Wenner 4전극법 배열은 Fig. 1과 같이 측정선 일직선상에 안쪽에 전위전극 P₁, P₂를 두고 외부에 전류전극 C₁, C₂를 설치하여

C₁-P₁, P₁-P₂, P₂-C₂의 거리 a를 등간격이 되도록 한다. 외부전류 전극(C₁, C₂)에 전류 I를 주입시키고 내부의 전위전극(P₁-P₂)간의 전위차 V를 측정하여 대지저항 R = ΔV/I(Ω)를 구한다. 이 대지저항 R은 전극간격 a일 때 겹보기 전기저항률 ρ에 비례하여 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho = K \cdot \frac{V}{I} = K \cdot R \tag{1}$$

여기서 K는 전극간격 거리계수로 Wenner 전극배열법인 경우 K=2πa 이므로 식 (1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\rho = 2\pi a \cdot R \tag{2}$$

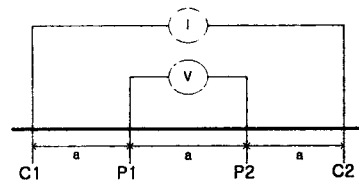


Fig. 1. Multilayer earth model.

3. 다층구조에서 대지저항률 계산

대지의 표면에 있는 점 전극으로부터 주입되는 전류 I에 의한 전위 V₀를 원통좌표계(x, θ, z)에 의해 표시하면 다음과 같은 식으로 표현 가능하다 [3].

$$V_0 = \frac{\rho_0 I}{2\pi} \int_0^\infty e^{-\lambda \cdot |z|} J_0(\lambda x) \lambda d\lambda \tag{3}$$

여기서 V₀는 영차의 첫째 종류의 Bessel 함수이다.

수평적 2층구조(대지저항률 ρ₀, ρ₂)의 Tagg 모델을 사용하면, 대지면에서 점 전극에 의해 주입되는 전류 I에 의한 전위 V는 다음과 같이 표현 가능하다 [3].

$$V(x) = \frac{\rho_1 I}{2\pi x} [1 + F_2(x)] \tag{4}$$

$$F_2(x) = 2x \int_0^\infty \frac{k_1 e^{-2\lambda h}}{1 - k_1 e^{-2\lambda h}} J_0(\lambda x) \lambda d\lambda \tag{5}$$

여기서 k₁은 위층으로부터 아래층에 대한 반발계수(reflection coefficient)이며 다음과 같이 주어진다.

$$k_1 = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \tag{6}$$

다층구조의 지층에서 표면전위를 계산방법은 Takahashi와 Kawase [4]에 의해 개발되었다. 일반적인 N층 구조의 모델에서 첫째 층의 두께와 대지저항률은 h₁과 ρ₁, 두 번째 층의 두께와 대지저항률은 h₂과 ρ₂ 그리고 마지막 층(N층)의 두께는 무한대, 그리고 그의 대지 저항률은 ρ_N이다.

점 전극에 의해 주입되는 전류 I에 의한 지표면상의 좌표 x에서의 전위는 다음의 식 (7) - (11)에 의해 표현가능하다 [4].

$$V_N(x) = \frac{\rho_1 I}{2\pi x} [1 + F_N(x)] \tag{7}$$

$$F_N(x) = 2x \int_0^\infty \frac{k_{N1} e^{-2\lambda h_1}}{1 - k_{N1} e^{-2\lambda h_1}} J_0(\lambda x) \lambda d\lambda \tag{8}$$

여기서 두 개의 연결된 지층에 관한 반발계수 k_i (1 < i < N-1)는 다음식과 같이 표현되고

$$k_i = \frac{\rho_{i+1} - \rho_i}{\rho_{i+1} + \rho_i} \tag{9}$$

$N > 2$ 과 $1 < S < N - 2$ 에서, K_{NS} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_{NS} = \frac{k_S + K_{N(S+1)} e^{-2\lambda h_{S+1}}}{1 + k_S K_{N(S+1)} e^{-2\lambda h_{S+1}}} \quad (10)$$

$$K_{N(N-1)} = k_{N-1} \quad (11)$$

많은 그룹들의 측정결과로부터 지하의 구조는 여러 층으로 되어 있음을 결론내릴 수 있다[5,6]. 결론적으로 지하구조의 파라미터들을 계산하는 방법들은 매우 필요하다는 것이다. 참고문헌에서 2층 구조 [5]와 3층 구조에 [6]에 대한 파라미터들을 구하는 방법들을 찾을 수 있다. 2층 구조의 파라미터들을 구하는 문제는 3개의 파라미터 최적화문제가 된다. 즉, 두 개 층의 대지 저항률과, 위층의 두께로 3개의 파라미터들을 찾아내는 문제가 된다. 그리고 밑층의 두께는 무한대로 가정한다. 마찬가지로 3층 구조의 파라미터들은 5개의 파라미터 최적화문제가 된다(3개 층의 대지 저항률 그리고 위 두 층의 두께, 여기서도 제일 밑층의 두께는 무한대로 가정한다). 따라서, 이를 확장하면, N 층 구조의 파라미터들을 구하는 문제는 $(2N-1)$ 의 파라미터의 최적화문제가 된다.

4. 유전알고리즘을 사용한 다층구조의 대지저항률 최적화

본 논문은 GA를 사용한 다층구조의 대지저항률 최적화문제로서 지하의 다층구조의 파라미터 값들을 찾을 수 있는 방법을 제안한다. 이 GA는 Matlab을 이용하여 구성하였으며, 이 GA는 여러 최적화 문제들에서 탁월한 결과를 보였다 [7].

겉보기 대지저항률과 대지의 파라미터 사이의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$\rho_a^c = \rho(a, \rho_1, h_1, \rho_2, h_2, \dots, \rho_N) \quad (12)$$

이때 겉보기 대지저항률을 계산하기 위해서는 대지의 층수를 결정해야 하는데, 일반적으로 Wenner 측정법을 사용하여 얻은 대지저항률 값을 Gauss-Newton 방법 [8]등을 이용하여 대지의 층수와 (ρ_a, a) 곡선을 결정하게 된다.

적합도 함수(fitness function)는 해결하고자 하는 문제에 따라 특정한 결정이 되며 일반적으로 목적 함수의 역수나 지수 함수를 사용하여 정의한다. $2N-1$ 개의 파라미터(N 층의 대지저항률과 $N-1$ 층의 두께)를 구하기 위해 본 논문에서의 적합도 함수는 다음과 같이 역문제에서 상대적 복원 오차의 역수이다 [7].

$$f_c = M \left(\sum_{i=1}^M \frac{|\rho_{ai}^m - \rho_{ai}^c|}{\rho_{ai}^m} \right)^{-1} \quad (13)$$

여기서 M 은 Wenner 측정법을 사용하여 얻은 대지저항률의 총 수를 나타낸다.

5. 컴퓨터 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 방법의 성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 살펴보기 위하여 실제현장에서 측정된 대지저항률 측정값을 활용하고, 2층 및 3층으로 나타나는 대지를 GA를 사용하여 대지의 구조 분석하도록 한다. GA에서 사용한 적합도 함수는 (13)이고 염색체는 이진 표현법을 사용했으며, 각 유전자는 12비트로 나타내었다. 따라서 한 개의 개체는 2층과 3층구조에서는 각각 36비트와 60비트의 길이로 표현된다. GA의 성능은 주로 GA에 사용된 매개변수인 유전율과 돌연변이율 및 개체군의 크기에 따라 결정되는데, 본 논문에서는 개체군의 크기는 40, 교배확률은 0.95, 돌연변이 확률은 0.01로 하고 부모 개체는 roulette wheel 선택법을 사용하였는데 GA는 10,000세대까지 구하였을 때의 결과를 나타내었다.

기존에 실제 시공된 현장의 대지 저항률 측정 DATA를 수집하였으며, 측정 계측기 및 측정방식은 YOKOGAWA 3244와 Wenner 4점법이다. 수작업에 의한 대지 고유 저항률 해석 방법은 해석자의 기술 능력과 경험에 따라 오차의 발생이 달라질 수 있으며 더구나 동일한 기술자가 똑같은 내용을 다시 해석한다 하더라도 상당한 차이를 나타낼 우려가 있다.

그러나 컴퓨터의 보급과 활용이 증대됨에 따라 대지 고유 저항률의 해석 분야에도 많은 컴퓨터 프로그램이 개발되어 시판되고 있으며 컴퓨터 프로그램의 활용 추세도 늘어나고 있는 실정이다. 최근에는 노트북 컴퓨터에 대지 고유 저항 측정 및 해석에 관련된 프로그램을 내장하고 대지 고유저항 측정기를 곧바로 노트북에 컴퓨터에 접속함으로써 측정과 동시에 지층 구조해석 결과를 현장에서 확인할 수 있는 경우도 있다.

대지 저항률을 측정하기 위한 전극배열은 일직선상에서 내부에 전위전극(P_1, P_2), 외부에 전류전극(C_1, C_2)를 설치하고, $C_1 - P_1, P_1 - P_2, P_2 - C_2$ 의 거리를 등간격이 되도록 하였다 [14]. 전극의 간격은 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 20, 25, 30[m]를 표준으로 하였다. 측정결과를 측정 계기로부터 대지저항(soil resistance)[Ω]을 읽어 기록하였다.

Fig. 2와 3은 실제 현장에서 측정된 지층의 대지저항률 측정치와 측정 파라미터를 사용하여 GA를 이용한 대지저항률 분석결과를 $\rho - a$

곡선으로 나타낸 것으로 전반적으로 측정된 대지저항률을 잘 표현함을 확인할 수 있다. Fig. 3에서 Case 1인 경우에는 2층구조로 분석할 수 있으리라 기대되고, Fig. 4에서 Case 2인 경우는 반드시 3층이상의 구조로 분석해야 함을 확인할 수 있다.

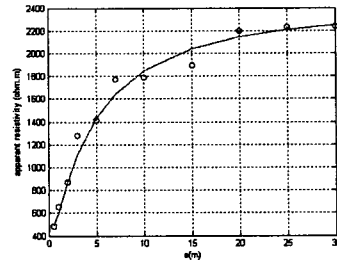


Fig. 2. Variation of soil resistivity versus the distance between the electrodes (Case1).

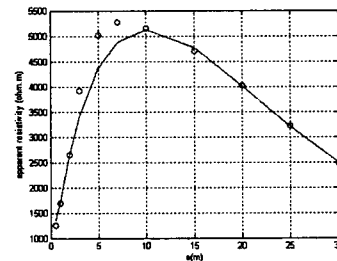


Fig. 3. Variation of soil resistivity versus the distance between the electrodes (Case2).

6. 결론

본 논문에서는 GA를 이용하여 대지의 다층구조 분석하는 방법을 제안하였다. GA는 목적함수 값만을 사용하고 알고리즘의 특성상 전역해의 탐색이 가능하므로 다층구조인 대지의 최적의 대지저항률 값을 구하는 문제에 아주 유용하게 활용할 수 있으리라 기대된다. 2개의 실제 현장의 대지저항률 측정치를 사용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였는데, 실제 대지저항률 값에 근사한 값들을 GA를 통해 구할 수 있었다. 목적함수에 가중치를 두는 문제와 4층구조 이상의 대지구조 분석에 적용할 수 있는 방법에 대한 추가 연구를 수행하고 있다.

본 논문은 전력산업연구개발사업(과제번호: R-2004 -0-164)에 의해 지원되었습니다.

7. References

- [1] Y. Sasaki, "Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation," *Geophysical Prospecting*, vol. 57, pp. 1270-1281, 1992.
- [2] A. Dey, W.H. Meyer, H.F. Morrison, and W.M. Dolan, "Electric field response of two-dimensional inhomogeneities to unipolar and bipolar electrode configuration," *Geophysics*, vol. 40, no. 4, pp. 630-640, 1975.
- [3] G.F. Tagg, 1964, *Earth Resistance*, London, U.K.: George Newnes Ltd.
- [4] T. Takahashi and T. Kawase, "Analysis of apparent resistivity in a multi-layer earth structure," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 5, no. 1, pp. 604-612, 1990.
- [5] 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. Power Del.*, vol. 8, no. 4, pp. 1890-1899, 1993.
- [6] I.F. Gonos, *Transient behavior of grounding system*, Ph.D. dissertation, Nat. Tech. Univ. Athens, Greece, 2002.
- [7] I.F. Gonos and I.A. Stathopoulos, "Estimation of multilayer soil parameters using genetic algorithm," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, no. 1, pp. 100-106, 2005.
- [8] B. Chen, *Theory and Arithmetic of Optimization*, Beijing, Tsinghua University Press, 1989.
- [9] J. Zou, J.L. He, R. Zeng, W.M. Sun, G. Yu, and S.M. Chen, "Two-stage algorithm for inverting structure parameters of the horizontal multilayer soil," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 40, no. 2, pp. 1136-1139, 2004.