

선형화를 이용한 대지저항률의 커널함수 결정

Determining Kernel Function of Apparent Earth Resistivity Using Linearization

강민제* · 부창진** · 이정훈*** · 김호찬**†

Min-Jae Kang, Chang-Jin Boo, Junghoon Lee, and Ho-Chan Kim†

*제주대학교 전자공학과

**제주대학교 전기공학과

***제주대학교 전산통계학과

요 약

Wenner의 4전극법으로 측정한 겉보기 대지저항률을 이용하여 대지저항률의 Kernel 함수를 추정할 수 있다. 이 때 커널함수를 추정하는 것은 비선형시스템을 푸는 과정으로 유도된다. 그러나 변수가 많은 비선형시스템은 해를 구하기가 쉽지 않다. 본 논문은 이 비선형시스템을 선형화하여 커널함수를 추정하는 방법을 제시한다. 마지막으로 제안한 방법을 평가하기 위하여 다양한 구조로 된 대지모델들을 시뮬레이션의 예로 사용한다.

키워드 : 겉보기 대지저항률, Kernel 함수, 비선형시스템, 선형화

Abstract

A kernel function of apparent earth resistivity can be estimated using the apparent earth resistivity measured with Wenner's 4 point method. It becomes to solve a nonlinear system to estimate the kernel function of apparent earth resistivity. However it is not simple to get solution of nonlinear system with many unknown variables. This paper suggests the method of estimating kernel function by linearizing this nonlinear system. Finally, various examples of earth structure have been simulated to evaluate the proposed method in this paper.

Key Words : Apparent earth resistivity, Kernel function, Nonlinear system, Linearization.

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. 왜냐하면 잘못 설계된 접지시스템은 고가의 장비뿐만 아니라 인명의 안전에도 보장을 할 수 없기 때문이다[1].

지층구조의 파라미터를 추정하는 방법중에서 널리 보편적으로 사용되는 것으로 Wenner의 4전극법이 있다. N층으로 구성된 대지구조 파라미터를 추정하는 문제는 $2N-1$ 의 파라미터들을 추정하는 최적화 문제로 귀결된다. N개의 저항률들과 $N-1$ 개의 지층의 두께들을 결정하면 된다[2,3].

이 문제를 풀기위한 방법으로는 다양한 최적화문제 해결

방법들이 이용되지만 그 절차는 대략 다음과 같이 비슷하다. 처음에 파라미터들에 가상의 초기치를 부여하여, 그 값들을 이용하여 겉보기 대지저항률을 계산한다. 계산한 겉보기 대지저항률이 Wenner의 4전극법을 이용하여 측정한 겉보기 대지저항률과 비슷해질 때까지 초기의 대지구조 파라미터들을 반복하여 수정하면서 해를 구해나간다.

커널함수는 대지구조 파라미터의 함수이며, 정확한 대지구조 파라미터가 정해지기 전에는 정확한 커널함수를 알 수 없는 것으로 알려져 있다. 일반적인 최적화문제 해결 방법에서는 매 번 파라미터 값들을 수정할 때마다 새로운 커널함수를 구하고, 이를 이용하여 겉보기 대지저항률을 계산한다. 즉 대지 파라미터 값들이 정확한 값에 가까워지면서 커널함수도 정확한 것에 가까워 간다[2,4].

정확한 커널함수가 대지파라미터 값들을 사용하지 않고, 측정된 겉보기대지저항률을 이용하여 비선형방정식으로 유도될 수 있다. 많은 변수들을 포함하고 있는 비선형시스템은 해를 구하기가 쉽지 않다. 이 논문에서는 비선형시스템으로 유도된 것을 선형시스템으로 변형하여 커널함수를 구하는 방법을 제시하였다. 시뮬레이션에서는 제시한 방법의 타당성을 평가하기 위하여 다양한 층의 대지구조들이 사용되었다.

접수일자: 2012년 5월 15일

심사(수정)일자: 2012년 5월 15일

게재확정일자 : 2012년 8월 3일

† 교신 저자

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (2010-0025438)

2. 겉보기대지저항률의 커널함수

2.1 Wenner의 4전극법

위에서 언급하였듯이 대지저항률을 측정하는 방법으로 가장 널리 쓰이는 것은 Frank Wenner가 1915년에 발표한 Wenner의 4전극법이다. 이 방법에서는 문제를 간략하게 하기 위하여 대지는 수평한 N 층으로 되어있고, 각 층은 동일한 저항률로 이루어진 것으로 가정한다[2,3].

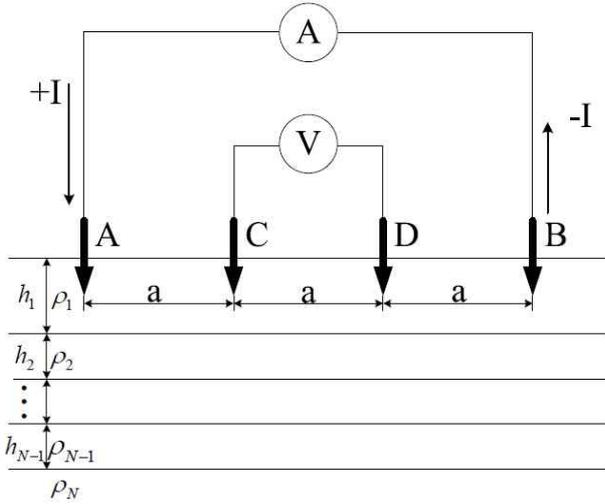


그림 1. N층 대지구조의 겉보기저항률 측정을 위한 Wenner 구성

Fig. 1. Wenner configuration for measuring apparent soil resistivity of N-layer earth structure

그림 1은 Wenner의 4전극법의 전극배치를 보여주고 있으며 전극 A와 B 사이에 전원을 연결하여 전류를 흘려보내준다. 그리고 전극 C와 D사이에서 생긴 전위차를 측정하고 측정된 전위차를 흘려보낸 전류로 나누면 저항값 $R[\Omega]$ 을 얻는다. 전극간의 간격을 a 라 하면 대지저항률 $\rho[\Omega \cdot m]$ 는 다음 식으로 구할 수 있다[5-8].

$$\rho_a^m = 2\pi a R \quad (1)$$

대지저항률을 대지표면에서 측정된 저항률이라 하여 겉보기저항률(apparent resistivity)이라고도 하는 데, 식(1)에서 ρ 의 밑첨자 a (apparent)는 겉보기 저항률을 강조하기 위한 것이고, ρ 의 위첨자 m (measured)은 측정하여 얻은 값을 표시하기 위한 것이다. 그림 1에서 h_i ($i = 1, 2, \dots, N-1$)는 토양 각층의 깊이를 나타내며 ρ_i ($i = 1, 2, \dots, N$)는 토양 각층의 대지저항률을 나타낸다.

2.2 겉보기 대지 저항률의 커널함수

N 층으로 구성된 대지구조에서 파라미터들은 각층의 깊이, h_i ($i = 1, 2, \dots, N-1$)와 저항률, ρ_i ($i = 1, 2, \dots, N$)이다. 대지저항률의 커널함수 $f(\lambda)$ 는 대지 각층의 깊이와 저항률의 함수로 다음과 같이 정의된다[2].

$$f(\lambda) = \alpha_1 - 1$$

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 1 + \frac{2K_1 e^{-2\lambda h_1}}{1 - K_1 e^{-2\lambda h_1}}, & K_1 &= \frac{\rho_2 \alpha_2 - \rho_1}{\rho_2 \alpha_2 + \rho_1} \\ \alpha_2 &= 1 + \frac{2K_2 e^{-2\lambda h_2}}{1 - K_2 e^{-2\lambda h_2}}, & K_2 &= \frac{\rho_3 \alpha_3 - \rho_2}{\rho_3 \alpha_3 + \rho_2} \\ &\vdots & &\vdots \\ \alpha_{N-1} &= 1 + \frac{2K_{N-1} e^{-2\lambda h_{N-1}}}{1 - K_{N-1} e^{-2\lambda h_{N-1}}}, & K_{N-1} &= \frac{\rho_N - \rho_{N-1}}{\rho_N + \rho_{N-1}} \end{aligned} \quad (2)$$

커널함수 $f(\lambda)$ 는 겉보기 대지저항률을 이론적으로 구하는 데 사용되며 그 식은 다음과 같다[2].

$$\rho_a^c = \rho_1 \left\{ 1 + 2a \int_0^\infty f(\lambda) [J_0(\lambda a) - J_0(2\lambda a)] d\lambda \right\} \quad (3)$$

여기서, $J_0(\lambda a)$ 는 첫째 종류의 0차 Bessel 함수이다. 겉보기 대지저항률은 식(3)에서 알 수 있듯이 두 전극간의 거리 a , 표면층의 대지저항률 ρ_1 , 그리고 커널함수 $f(\lambda)$ 의 함수임을 알 수 있다. 여기서 ρ_1 과 $f(\lambda)$ 를 알 수 있으면 Wenner 4전극법에서 두 전극간의 거리 a 에 대한 겉보기 대지저항률을 이론적으로 구할 수 있다.

ρ_a^c 의 위첨자 c (calculated)는 이론적으로 계산된 값으로 이는 식(1)의 측정된 겉보기저항률 ρ_a^m 과 구분하기 위한 것이다.

2.3 대지파라미터 추정을 위한 일반적인 방법

N 층으로 구성된 대지구조의 파라미터들을 구하는 것은 $(2N-1)$ 의 변수들을 추정하는 최적화 문제이다. 짝으로 이루어진 M 개의 데이터를 이용하여 다음의 목적함수를 최소화하는 최적화 문제이다[9].

$$F_\rho = \sum_{i=1}^M \frac{|\rho_{ai}^m - \rho_{ai}^c|}{\rho_{ai}^m} \quad (4)$$

여기서, ρ_{ai}^m 는 식(1)을 이용하여, 두 전극간의 거리는 a 일 때 i 번째 측정된 겉보기 대지저항률이며, ρ_{ai}^c 는 같은 거리에서 식(3)을 이용하여 이론적으로 계산된 겉보기 대지저항률이다.

대지구조 파라미터들을 추정하기 위하여 다양한 방법의 최적화 알고리즘들이 사용되고 있다. 처음에 가정하여 주어진 초기치 파라미터 값들을 반복적으로 수정하면서 식(4)의 목적함수를 최소화하여 나간다. 즉, 측정된 겉보기 대지저항률 값과 이론적으로 계산된 값이 근접해 가도록 파라미터 값들을 반복적으로 수정해 나간다. 여기서 파라미터 값들이 수정될 때마다 식(2)에서 알 수 있듯이 커널함수 $f(\lambda)$ 도 수정된다. 그러면 식(3)의 이론적으로 계산된 겉보기 대지저항률도 변하게 된다.

3. 선형화를 이용한 커널함수 결정

3.1 커널함수를 이용한 대지파라미터 추정

식(4)를 이용하여 대지구조 파라미터들을 추정하기 위하여 파라미터 값들을 수정할 때마다 겘보기 대지저항률을 계산해야하는데, 식(3)에서 보는 바와 같이 ρ_a^c 를 수치계산법으로 구하는 것이 그리 쉬운 것이 아니다. 즉 많은 계산과정이 필요하게 된다. 왜냐하면 Bessel 함수가 포함되어 있고, 또한 특이적분에 무한경계치가 포함되어있기 때문이다.

$$F_k = \sum_{i=1}^M \frac{|f^m(\lambda_i) - f^c(\lambda_i)|}{f^m(\lambda_i)} \quad (5)$$

그러면 파라미터를 추정하는 과정에서 Bessel 함수와 무한경계치가 포함된 특이적분을 계산할 필요가 없게 된다. 여기서, $f^m(\lambda)$ 는 측정된 겘보기 대지저항률로부터 추정된 커널함수이며, $f^c(\lambda)$ 는 식(2)를 이용하여 계산한 커널함수이다.

3.2 측정 겘보기 대지저항률을 이용한 커널함수 추정

커널함수 $f(\lambda)$ 는 식(2)에서 예상할 수 있듯이 지수함수적으로 감소함을 알 수 있으며, 다음과 같이 근사화할 수 있음을 알려져 있다[1].

$$f(\lambda) \approx \sum_{k=1}^N b_k e^{-c_k \lambda} \quad (6)$$

여기서, b_k, c_k 는 상수이다.

다음의 Lipschitz의 적분을 이용하면

$$\int_0^\infty e^{-\lambda t} J_0(\lambda t) d\lambda = \frac{1}{\sqrt{c^2 + t^2}} \quad (7)$$

식(3)의 ρ_a^c 는 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$\rho_a^c \approx \rho_1 \left\{ 1 + 2a \sum_{k=1}^N b_k \left[\frac{1}{\sqrt{c_k^2 + a^2}} - \frac{1}{\sqrt{c_k^2 + 4a^2}} \right] \right\} \quad (8)$$

측정된 겘보기 대지저항률을 이용하여 b_k, c_k 를 구하기 위하여 식(8)를 재정리하고 ρ_a^c 를 ρ_a^m 으로 대치하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sum_{k=1}^N b_k \left[\frac{1}{\sqrt{c_k^2 + a^2}} - \frac{1}{\sqrt{c_k^2 + 4a^2}} \right] = \frac{1}{2a_i} \left(\frac{\rho_{ai}^m}{\rho_1} - 1 \right) \quad (9)$$

$i = 1, 2, \dots, M$

그런데, 식(9)에서 표현층의 대지저항률(ρ_1)을 알 수만 있으면 식(9)의 우변은 결정되므로 비선형시스템으로 된다. 식(2)에서 알 수 있듯이 a 를 작게 할수록 겘보기 대지저항률 ρ_a 는 ρ_1 에 근접함을 알 수 있다. 이 성질을 이용하면

Wenner 4전극간의 거리(a)를 아주 작게하여 측정된 겘보기 대지저항률(ρ_a^m)를 ρ_1 으로 사용가능하며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sum_{k=1}^N b_k \left[\frac{1}{\sqrt{c_k^2 + a^2}} - \frac{1}{\sqrt{c_k^2 + 4a^2}} \right] = \frac{1}{2a_i} \left(\frac{\rho_{ai}^m}{\rho_{a1}^m} - 1 \right) \quad (10)$$

$i = 1, 2, \dots, M$

여기서 ρ_{a1}^m 은 Wenner 4전극간의 거리(a)중에서 가장 작은 거리에서 측정된 겘보기 대지저항률이다. 저자의 경험으로 a_1 은 약 0.1[m]에서 측정된 겘보기 대지저항률은 ρ_1 에 아주 근사한 값을 보였다.

이렇게 해서 식(9)는 식(10)처럼 비선형시스템으로 표현할 수 있으며, 비선형시스템의 해는 Newton-Raphson 방법을 위시한 다양한 반복법(iterative method)들을 이용하여 구한다[10].

3.3 비선형 시스템의 선형화

커널함수 $f(\lambda)$ 를 결정하기위해 식(10)에서 b_k, c_k 를 구할 수 있어야 한다. 그런데, 식(10)은 비선형시스템이며 또한 정확한 $f(\lambda)$ 를 구하기 위하여 상당히 많은 숫자의 b_k, c_k 를 필요로 하기 때문에 일반적인 반복법으로 구하기가 쉽지 않다.

식(2)에서 $f(\lambda)$ 를 다음과 같이 지수함수의 지수들이 일정 간격으로 증가되는 수많은 지수함수들로 이루어 졌다고 가정하면,

$$f(\lambda) \approx \sum_{k=1}^N b_k e^{-d \times k \times \lambda} \quad (11)$$

식(10)의 좌변의 괄호안의 값이 결정되므로 선형시스템으로 된다. 여기서 d 는 아주 작은 상수값이며, 다음과 같이 선형시스템으로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1N} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2N} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ A_{M1} & A_{M2} & \dots & A_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2a_1} \left(\frac{\rho_{a1}^m}{\rho_{a1}^m} - 1 \right) \\ \frac{1}{2a_2} \left(\frac{\rho_{a2}^m}{\rho_{a1}^m} - 1 \right) \\ \vdots \\ \frac{1}{2a_M} \left(\frac{\rho_{aM}^m}{\rho_{a1}^m} - 1 \right) \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서 A_{ik} 는 다음과 같이 표현되며

$$A_{ik} = \frac{1}{\sqrt{d^2 k^2 + a_i^2}} - \frac{1}{\sqrt{d^2 k^2 + 4a_i^2}} \quad (13)$$

a_i 가 상수이므로 A_{ij} 는 상수이다.

그런데 식(12)는 변수의 수(N)와 방정식의 수(M)가 일치하지 않으므로, 즉 $M \neq N$, 유일한 해를 구할 수 없다. 만약 방정식의 수가 변수의 수보다 많으면, 즉 $M > N$ 이면,

과결정(overdetermined) 시스템으로 방정식을 모두 만족하는 해를 찾을 수 없어 오차를 최소화하는 근사 값을 찾아야 한다. 그리고 위와 반대의 경우 즉 과소결정(underdetermined) 시스템에서는 많은 종류의 해가 존재한다.

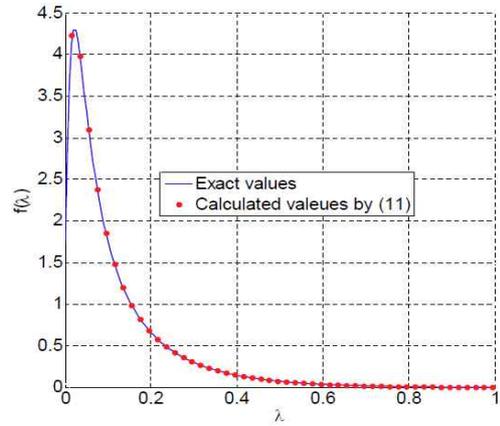
여기에서는 여러 번의 시행착오를 거쳐 $N \gg M$ 인 경우만 커널함수 $f(\lambda)$ 가 정확하게 얻게 됨을 알았다. 저자의 경험에 의하면 d^2N^2 의 값(d^2k^2 의 마지막 값)이 a_M 의 값(가장 긴 전극간 거리)의 4~5배 이상이어야 함을 알았다. 그리고 보통 겐보기대지저항률 측정회수(M)는 10~20이므로 식(11)은 일반적으로 과소결정 선형시스템이 된다. 과소결정 선형시스템을 푸는 방법으로 다양한 방법들이 있으나 널리 사용되는 방법으로는 QR 분해(factorization) 방법이 있다. 이 논문에서는 QR 분해 방법을 사용하였다[10].

4. 시뮬레이션 및 결과

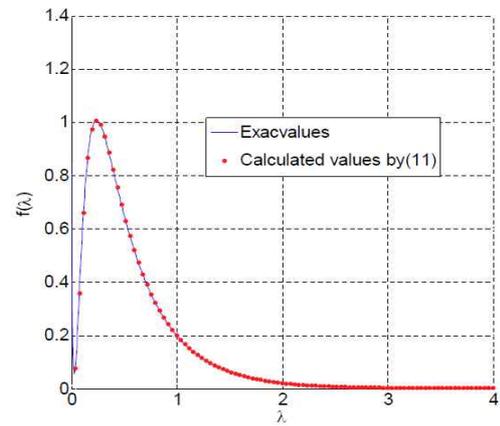
이 논문의 목적은 대지구조의 파라미터 값들을 사용하지 않고 다른 방법으로 정확한 커널함수 $f(\lambda)$ 를 구하려는 것이다. 여기에서는 측정된 겐보기대지저항률(ρ_a^m)을 이용하여 정확한 커널함수 $f(\lambda)$ 를 구할 수 있음을 보여주고자 한다.

그림 2는 2층, 3층 그리고 4층 구조의 대지 시스템의 커널함수 $f(\lambda)$ 를 보여주고 있다. 실선으로 된 $f(\lambda)$ 는 표 1, 2와 3에 나타난 대지구조의 커널함수이다. 대지구조가 이미 밝혀진 파라미터들을 식(2)에 대입하면 정확한 $f(\lambda)$ 를 구할 수 있다.

전극 간 거리 $a_i (i=1, \dots, M)$ 에 따른 겐보기대지저항률(ρ_a^m)은 Wenner의 4전극법을 이용하여 저항 R를 측정하고 식(1)를 이용하여 측정할 수 있다. 표 4, 5와 6들은 직접 대지에서 측정된 겐보기대지저항률 데이터들이 아니라 시뮬레이션을 위해 생성된 데이터들이다. 표 1, 2, 3과 같은 대지구조가 있다고 가정하고 예러없이 측정되었다고 가정하면 식(2)와 식(3)을 이용하여 계산된 겐보기대지저항률은 측정된 대지저항률과 같게된다. 이것을 이용하여 전극 간 거리 a_i 에 따른 데이터를 생성하였다. 그림 2에서 점으로 표시된 $f(\lambda)$ 는 표 4, 5와 6의 데이터를 사용하고, 식(10)과 식(11)을 이용하여 추정된 것이다.



(b)



(c)

그림 2. 정확한 $f(\lambda)$ 와 식(11)를 이용하여 계산된 것과의 비교. (a) 표 1의 대지파라미터와 표 4의 데이터이용, (b) 표 2의 대지파라미터와 표 5의 데이터이용, (c) 표 3의 대지파라미터와 표 6의 데이터이용

Fig. 2. Comparison of the exact values of $f(\lambda)$ and the calculated ones by (11). (a) The values of $f(\lambda)$ with the earth parameters in Table 1 and data in Table 4, (b) with the parameters in Table 2 and data in Table 5, (c) with parameters in Table 3 and data in Table

표 1. 2층 대지구조의 파라미터

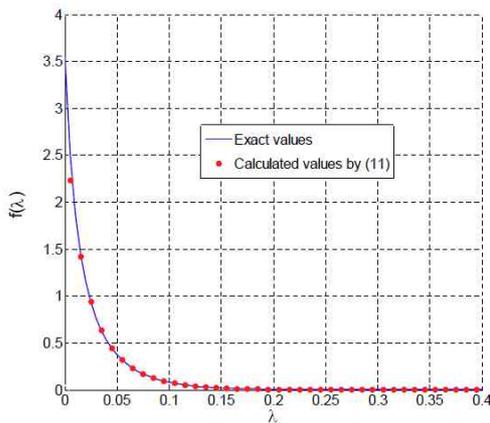
Table 1. Parameters of a two-layer earth structure

Layer No(i)	$\rho_i [\Omega \cdot m]$	$h_i [m]$
1	352	14
2	1,600	∞

표 2. 3층 대지구조의 파라미터

Table 2. Parameters of a three-layer earth structure

Layer No(i)	$\rho_i [\Omega \cdot m]$	$h_i [m]$
1	122	3.2
2	2,126	2,126
3	336	∞



(a)

표 3. 4층 대기구조의 파라미터

Table 3. Parameters of a four-layer earth structure

Layer No(<i>i</i>)	$\rho_i [\Omega.m]$	$h_i [m]$
1	68	1.08
2	627.9	1.64
3	7.3	3.98
4	125.4	∞

표 4. 측정된 겉보기 저항률 데이터

Table 4. Data for measured apparent resistivities

No	$a [m]$	$\rho_a^m [\Omega.m]$	No	$a [m]$	$\rho_a^m [\Omega.m]$
1	0.1	352.0	7	19	398.8
2	1	352.0	8	22	465.1
3	2	352.5	9	25	541.7
4	3	353.8	10	30	617.9
5	5	359.6	11	40	689.0
6	7	371.1			

표 5. 측정된 겉보기 저항률 데이터

Table 5. Data for measured apparent resistivities

No	$a [m]$	$\rho_a^m [\Omega.m]$	No	$a [m]$	$\rho_a^m [\Omega.m]$
1	0.1	122.0	9	19	637.5
2	1.5	130.2	10	22	684.1
3	3	166.9	11	25	720.1
4	5	240.3	12	30	760.4
5	7	316.4	13	40	787.9
6	11	450.3	14	50	772.9
7	14	532.4	15	70	696.6
8	17	599.9	16	90	617.0

표 6. 측정된 겉보기 저항률 데이터

Table 6. Data for measured apparent resistivities

No	$a [m]$	$\rho_a^m [\Omega.m]$	No	$a [m]$	$\rho_a^m [\Omega.m]$
1	0.1	68.0	9	10	98.9
2	0.5	71.6	10	12	79.3
3	0.7	76.6	11	14	65.4
4	1.4	104.1	12	17	53.3
5	2.3	136.9	13	20	48.3
6	3.0	152.4	14	30	51.6
7	4	160.9	15	50	71.2
8	6	149.3	16	70	71.2

그림 3은 전극간 거리(a)를 0.5[m]로 하여 측정한 겉보기 대지저항률 ρ^m 을 ρ_1 의 값으로 사용하여 그림 2.(c)의 경우를 다시 추정한 그림이다. 반면에 그림 2의 모든 경우는 전극간 거리(a)를 0.1[m]로 하여 측정한 겉보기대지저항률 ρ^m 을 ρ_1 의 값으로 사용하였다. 여기에서 알 수 있듯이 ρ_1 으로 사용하려면 겉보기대지저항률 ρ^m 은 짧은 전극간 거리에서 측정해야함을 보여준다.

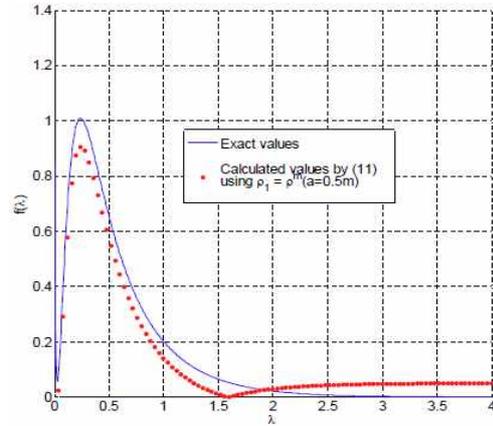


그림 3. 전극간거리 0.5[m]에서 측정된 ρ^m 을 사용하여 추정된 $f(\lambda)$

Fig. 3. The estimated $f(\lambda)$ with $a = 0.5 [m]$ using ρ^m

5. 결 론

겉보기 대지저항률의 커널함수 $f(\lambda)$ 를 Wenner 4전극법으로 측정된 데이터를 사용하여 유도하여 보았다. 유도된 식은 비선형방정식이었으며 많은 변수를 요구하고 있어 정확한 해를 구하기 쉽지 않았다. 본 논문에서는 유도된 비선형방정식을 선형시스템으로 유도하여 커널함수 $f(\lambda)$ 를 추정하였다. 유도된 선형시스템은 일반적으로 변수의 수(M)가 방정식의 수(N)보다 큰 경우로 과소결정 선형시스템이었다. 여기에서는 QR 분해 방법을 사용하여 과소결정 선형시스템의 해를 구했다. 구해진 해는 정확한 커널함수에 근사함을 보여주었다.

향후에는 과소결정 선형시스템의 해를 구하기 위해 다양한 방법들을 시도하면 더욱 정확한 값에 가까운 $f(\lambda)$ 를 추정하는 것이 가능할 것이다. 또한 여기에서 추정된 $f(\lambda)$ 를 이용하여 대기구조의 파라미터들을 추정하는 새로운 방법론들에 대한 연구도 가능할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] B. Zhang, Z. Zhao, and X. Cui, "Diagnosis of breaks in substation's grounding grid by using electromagnetic method," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 38, pp. 473–476, 2002.
- [2] B. Zhang, X. Cui, L. Li, and J. L. He, "Parameter estimation of horizontal multilayer earth by complex image method," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 20, pp. 1394–1401, 2005.
- [3] M. B. Kostic and G. H. Shirkoohi, "Numerical analysis of a class of foundation grounding systems surrounded by two-layered earth," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 8, pp. 1080–1087, 1993.
- [4] M.-J. Kang, C.-J. Boo, and H.-C. Kim, "A Kernel Function Based Estimation Algorithm for Multi-layer Soil Structure," *Lecture Notes In Bioinformatics*, vol. 6840, no. 1, pp. 276–281, 2012.

- [5] I. F. Gonos and I. A. Stathpulos, "Estimation of multilayer soil parameters using genetic algorithms," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 20, pp. 100–106, 2005.
- [6] F. Dawalibi, "Earth resistivity measurement interpretation techniques," *IEEE Trans. on Power Apparatus Systems*, vol. 103, pp. 374–382, 1984.
- [7] T. Takahashi and T. Kawase, "Analysis of apparent resistivity in a multi-layer earth structure," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 5, pp. 604–612, 1990.
- [8] F. P. Dawalibi, "Electromagnetic fields generated by overhead and buried short conductors," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 1, pp. 105–119, 1986.
- [9] 부창진, 김호찬, 강민제, "Determination of multilayer earth model using genetic algorithm," *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, vol. 7 no. 3, pp. 171–175, 2007.
- [10] S. C. Chapra, *Applied Numerical Methods with MATLAB for Engineers and Scientists, 2nd ed.* New York: McGraw-Hill, pp. 270–276, 2008.

저 자 소 개



강민제(Min-Jae Kang)
 1982년 : 서울대학교 전기공학과 공학사
 1991년 : 루이빌대 전기전산공학과 공학박사
 1992년~현재 : 제주대학교 전자공학과 교수

관심분야 : 신경회로망, 접지시스템, 풍력발전제어
 Phone : 064-754-3666
 E-mail : minjk@jejunu.ac.kr



부창진(Chang-Jin Boo)
 2001년 : 제주대학교 전기공학과 공학사
 2003년 : 제주대학교 전기공학과 공학석사
 2007년 : 제주대학교 전기공학과 공학박사
 2010년~현재 : 제주대학교 공과대학
 첨단기술연구소 연구원

관심분야 : 에너지관리, 접지시스템
 Phone : 064-754-3797
 E-mail : boo1004@jejunu.ac.kr



이정훈(Junghoon Lee)
 1988년 : 서울대학교 컴퓨터공학과 공학사
 1990년 : 서울대학교 컴퓨터공학과 공학석사
 1994년 : 서울대학교 컴퓨터공학과 공학박사
 1996년~현재 : 제주대학교 전산통계공과
 교수

관심분야 : 스마트그리드, 실시간통신
 Phone : 064-754-3594
 E-mail : jhlee@jejunu.ac.kr



김호찬(Ho-Chan Kim)
 1987년 : 서울대학교 제어계측공학과 공학사
 1989년 : 서울대학교 제어계측공학과 공학석사
 1994년 : 서울대학교 제어계측공학과 공학박사
 1995년~현재 : 제주대학교 전기공학과 교수

관심분야 : 퍼지제어, 풍력발전제어, 접지시스템
 Phone : 064-754-3676
 E-mail : hckim@jejunu.ac.kr