

터널 주변 전기비저항 토모그래피 모니터링 자료의 시간경과 역산

조인기^{1*}, 정재형², 배규진³

Time-lapse inversion of resistivity tomography monitoring data around a tunnel

In-Ky Cho, Jae-Hyeung Jeong, Gyu-Jin Bae

Abstract Resistivity tomography is very effective geophysical method to find out the resistivity distribution and its change in time around a tunnel. Thus, the resistivity tomogram can provide helpful information which is necessary for the effective maintenance of the tunnel. However, an air filled tunnel severely distorts tomography data, especially when the current or potential electrode is placed near the tunnel. Moreover, the distortion can often lead to misinterpretation of tomography monitoring data. To solve these problem, we developed a resistivity modeling and time-lapse inversion program which include a tunnel. In this study, using the developed program we assured that the inversion including a tunnel gives much more accurate image around a tunnel, compared with the conventional tomogram where the tunnel is not included. We also confirmed that the time-lapse inversion of resistivity monitoring data defines well resistivity changed areas around a tunnel in time.

Keywords: Resistivity tomography, tunnel, time-lapse inversion, monitoring

요 지 전기비저항 토모그래피법은 터널 주변의 물성분포나 그 변화를 탐지하는데 매우 효과적인 물리탐사 방법이다. 따라서 전기비저항 토모그래피 영상은 터널의 효과적인 유지관리를 위한 중요한 정보를 제공해 준다. 그러나 공기로 채워진 터널은 토모그래피 자료를 심하게 왜곡시키며, 이러한 현상은 송, 수신점이 터널에 근접할수록 심화된다. 또한 이러한 왜곡은 결과적으로 토모그래피 모니터링 자료의 해석에 오류를 가져오게 된다. 이런 문제점의 해결을 위하여 터널을 포함한 모델링 및 시간경과 역산법을 개발하였다. 개발된 프로그램을 사용하여 터널을 고려한 역산법이 기존의 역산법에 비하여 월등히 정밀한 영상을 제공함을 확인하였다. 또한 모니터링 자료에 시간경과 역산을 사용하여 보다 효과적으로 터널주변의 시간에 따른 전기비저항 변화대를 파악할 수 있었다.

주요어: 전기비저항 토모그래피, 터널, 시간경과역산, 모니터링

1. 서 론

전기비저항 탐사법은 터널 주변 지반 혹은 암반의 안정성을 조사하기 위해서는 비파괴 검사 기법인 물리탐사법이 널리 사용되고 있다(김성환과 김낙영, 2000). 다양한 물리탐사법 중에서도 전기비저항 탐사법은 터널 주변에 발달한 각종 파쇄대 등과 같은 연약대의 조사에 효과적인 방법이며, 일반적으로 터널설계 단계에서 미리 조사가 수행되어 시공비용을 절감하고 안정성을 확보하기 위한 중요한 기본 자료로 이용되고 있다. 하지만

터널은 시공 후에도 시공에 의한 터널주변부의 자연환경의 변화로 인하여 교란되어있을 가능성의 크므로 효과적인 유지관리를 위해서는 상시관측 등과 같은 정기적인 조사를 수행하는 것이 바람직하다. 특히 터널 시공에 의한 터널 주변 지하수의 유동통로 변화, 터널 내 출수 문제 등은 터널의 안전성 확보는 물론 효율적인 유지관리에 필요한 매우 중요한 정보이며, 전기비저항 탐사법은 이러한 지하수의 유동 통로를 파악하는데 가장 효과적인 방법 중의 하나로 알려져 있다.

한편 전기비저항 탐사는 라이닝의 누수 조사를 위하여 터널내에서 조사가 수행되기도 하지만(신중호 등, 2008), 주로 지표에 전류 및 전극을 설치하고 자료를 획득하는 지표탐사 방식이 널리 사용되고 있다(안희운 등, 2008). 그러나 대부분의 터널이 상당히 깊은 심도에 위

¹강원대학교 지구물리학과 교수

²한국건설기술연구원 선임연구원

³한국건설기술연구원 책임연구원

*교신저자: 조인기 (E-mail: choik@kangwon.ac.kr)

치하고 있어 지표탐사에서는 터널이 자료에 미치는 영향이 매우 미약하다는 점이다. 이를 극복하기 위해서는 측정간격을 넓게 설정하는 방법을 생각할 수 있으나, 이 경우 분해능이 저하되어 터널의 탐지가 어려워진다는 또 다른 문제점을 야기하게 된다. 이러한 문제점은 시추공을 이용하는 토모그래피 탐사를 통하여 해결할 수 있다. 토모그래피 탐사법에서는 송, 수신 전극이 터널근처에 위치하므로 가탐심도의 문제가 해결되며, 보다 정밀하게 터널 주변의 물성에 대한 정보를 얻어낼 수 있다.

전기비저항 토모그래피법은 주로 두개의 시추공 사이 영역의 전기비저항 분포 영상을 획득하는 것을 그 목적으로 한다. 측정간격이 지표탐사에 비하여 매우 작기 때문에 분해능이 뛰어나고, 자료의 수가 많기 때문에 역산 결과에서 얻어지는 영상의 신뢰도가 높아 정밀탐사 방법으로 알려져 있다. 따라서 터널의 영향은 지표탐사의 경우보다 매우 커질 수밖에 없으므로 모니터링 자료의 해석을 위한 모델링이나 역산과정에서는 당연히 터널의 영향을 고려해야 한다.

본 연구에서는 이러한 요구를 충족시키기 위하여 일차적으로 터널을 포함한 2.5차원 전기비저항 토모그래피 탐사 모델링 프로그램을 개발하였다. 또한 이를 바탕으로 최소자승법에 근거한 시간경과 역산 프로그램을 개발하고 이를 간단한 이론자료에 적용하여 그 효용성을 타진하였다.

2. 전기비저항 토모그래피 탐사

전기비저항 토모그래피법은 두 개의 시추공을 사용하여 탐사를 수행하고 두 시추공 사이 영역의 전기비저항 분포를 획득하는 지일탐사법 중의 하나로 탄성과 토모그래피와 함께 국내에서 가장 널리 적용되고 있는 지하 영상화 기법이다. 이 방법은 지표 전기비저항 탐사법에 비하여 분해능이 높기 때문에 정밀탐사를 목적으로 사용되며, 지하의 공동조사, 정밀 지반조사시 연약대 분포 조사, 지반침하의 원인 규명 등에 활발하게 적용되고 있다. 전기비저항 토모그래피에 관한 연구는 1980년대 중반에 출발하여 Shima(1992), Beasley and Ward(1988), Dailly and Owen(1991), Sasaki(1992) 등에 의해 연구가 이루어졌으며, 1990년대 들어서면서 현장에의 적용이 증가하는 추세에 있다(Sasaki and Matsuo, 1990;

Ohtomo et al., 1990). 국내에의 경우 1990년대에 전기비저항 토모그래피에 관한 본격적인 연구가 이루어졌으며(이명종 등, 1995; 김정호 등, 1997; 조인기 등, 1997a; 조인기 등, 1997b; Yi et al., 1997), 최근에는 현장적용이 활발히 이루어지고 있다(정승환 등, 1995; 김정호 등, 1999).

전기비저항 토모그래피 자료의 획득방법은 우선적으로 시추공-시추공(cross-hole) 자료가 위주가 되며, 감도가 높은 시추공 주변의 이상체를 정확히 파악하기 위한 단일 시추공(inline) 자료와 지표-시추공(hole-surface) 자료가 추가된다. 단일 시추공 및 지표-시추공 자료는 정확한 해석을 위해서 필수적인 것으로 보고되나 있다(김정호 등, 1997). 우선 시추공-시추공 자료는 송신 시추공의 일점에 전류전극을 고정시키고, 수신 시추공을 따라 전위전극을 일정 간격으로 이동시키면서 측정을 수행한다. 일단 전체 수신 시추공에서 자료가 모두 획득되면, 전류전극을 다음 위치로 이동시킨 후 다시 전위전극을 수신 시추공을 따라 이동시키면서 탐사하게 된다. 단일시추공 자료는 전류전극과 전위전극이 모두 동일한 시추공에 위치하는 탐사법으로 지표탐사와 유사하게 이루어진다. 지표-시추공 방식의 경우에도 시추공-시추공 방식과 동일하게 자료가 획득된다. 따라서 전기비저항 토모그래피 탐사에서는 매우 많은 수의 측정이 이루어지게 되므로 측정시간이 많이 걸리고 자료의 입력 및 편집 등에도 상당한 시간과 노력이 요구된다.

한편 전기비저항 토모그래피 탐사에서는 다양한 전극 배열이 사용 가능하다. 주로 단극배열이 이용되어 왔으나 분해능이 낮다는 치명적 단점이 있으며, 단극-쌍극자 배열이나 쌍극자 배열법은 단극배열에 비하여 분해능은 높지만 null-coupling 문제로 인하여 자료획득이 어려운 영역이 존재한다는 문제점을 가지고 있다. 김정호 등(1997)은 변형된 단극-쌍극자 배열을 도입하여, 높은 분해능을 유지하면서 null-coupling 문제를 해결하였다.

한편 얻어진 자료를 사용하여 두 시추공 사이의 관심 영역의 전기비저항 분포를 얻기 위해서는 역산법(inversion)이 사용된다. 이를 위하여 우선 조사 대상 영역과 그 주변을 일정한 크기의 요소로 분할하고 각 요소에서의 전기비저항이 일정하다고 가정한 다음, 반복적 방법을 사용하여 각 요소의 전기비저항을 변화시켜 이론자료와 현장 측정자료 간의 오차가 최소가 되는 지하 모델을 찾게 된다. 이론자료를 계산하는 방법으로는 주로 유한

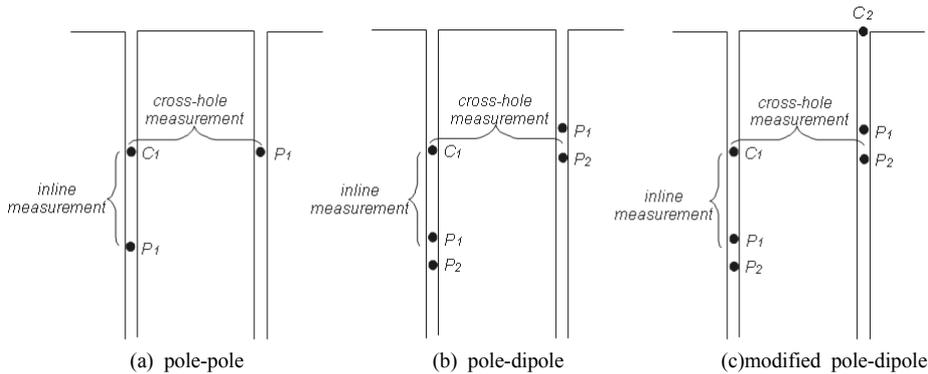


Fig. 1. Typical electrode arrays for resistivity tomography

차분법(FDM)이나 유한요소법(FEM) 등이 사용된다. 역산 방법은 대개 평활화 제한을 가한 최소자승법(least-squares method)이 사용되고 있다(이명중 등, 1995). 이상과 같이 역산을 통하여 얻어진 지하 모델의 전기비저항 분포는 등고선도 및 칼라 영상으로 작성하여 해석에 사용된다.

전기비저항 토모그래피 영상의 해석시 주의해야 할 점은 소위 커버리지의 부족으로 인한 신뢰도 저하 문제이다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 송, 수신 시추공 최하단부 사이의 영역은 다른 영역에 비하여 자료의 수가 부족하므로 커버리지가 낮을 수밖에 없으며, 결과적으로 얻어진 영상의 신뢰도를 저하시키게 된다. 이를 극복하기 위해서는 하단부에 수평으로 터널을 굴착하고 자료를 획득해야 하나 현실적으로 불가능하다. 물론 시추공 지표 방식의 자료를 얻지 않았을 경우에는 지표 근처의 영상도 커버리지 부족으로 인하여 신뢰도가 낮아질 수밖에 없다. 또 다른 하나는 단일 시추공 자료의 문제이다. 단일 시추공 자료는 토모그래피 영상을 얻기 위한 역산과정에서 시추공 근처에 존재하는 요소들의 감도(sensitivity)가 너무 높기 때문에 이들 요소의 전기비저항을 고정시켜주는 사전정보의 의미를 가진다(김정호 등, 1996). 따라서 단일 시추공 자료가 없을 경우에는 역산결과가 시추공 부근 요소들의 전기비저항 값에 좌우되는 현상이 나타나게 되며, 전체적인 분해능이 떨어지게 된다. 심한 경우에는 지질학적으로 해석 불가능한 영상을 나타낼 수도 있다. 단일 시추공 자료를 사용할 때에는 공내수에 의한 영향을 정확히 파악하여 보정을 수행하거나, 전류원과 전위전극 사이가 너무 가까워 공내수의 영향이 크게 나타나는 자료를 제외시키고 역산

을 수행해야 한다.

한편 전기비저항 토모그래피 탐사에서는 공내수(borehole fluid)가 존재해야 한다. 즉 전극을 통하여 지하에 전류를 흘려보내고, 전위를 측정하기 위해서는 전극과 지하 매질이 양호한 접지상태를 유지해야 하며, 공내수는 접지를 위해서 꼭 필요하다. 그러나 이 공내수는 동일시추공 자료의 왜곡을 유발한다. 즉 공내수와 주변 매질과는 전기비저항 대비가 매우 크기 때문에 전류전극과 전위전극이 동일한 시추공에 존재할 경우 대부분의 전류가 공내수를 따라 흐르는 전류집중현상(current channeling)이 발생하며, 이는 자료의 왜곡으로 이어진다. 이 공내수 효과(borehole fluid effect)를 보정하기 위한 다양한 연구(조인기 등, 1997b)가 이루어졌으나 아직까지는 명확한 대처방안이 없는 실정이며, 대개 자료편집 과정에서 공내수에 의해 심각하게 왜곡된 자료, 즉 전류전극과 전위전극 사이의 거리가 작은 자료를 제거하는 방법이 주로 사용되고 있다.

3. 모델링 및 시간경과 역산 이론

3.1 변분식의 유도

전기비저항 탐사 모델링에는 유한차분법(Dey and Morrison, 1979), 유한요소법(Coggon, 1971; Pridmore, et al., 1981)과 적분방정식법(Hohmann, 1975) 등이 사용된다. 특히 2.5차원 전기비저항 탐사 모델링에는 미분방정식법인 유한차분법이나 유한요소법이 사용되며, 근래에는 지형의 기복 문제를 처리하기 위하여 유한요소

법이 주류를 이루고 있다. 본 연구에서는 터널을 고려하여 요소분할해야 하므로 유한요소법을 사용하였다.

2차원 지하모형을 가정하여 주향방향 즉 y 축 방향으로 전기전도도의 변화가 없다고 가정하면, 전기비저항 토모그래피 탐사 모델링을 위한 파수영역에서의 지배방정식은

$$\begin{aligned} \nabla \cdot [\sigma(x, z) \nabla \tilde{\phi}(x, k_y, z)] - k_y^2 \sigma(x, z) \tilde{\phi}(x, k_y, z) \\ = -\frac{I}{2} \delta(x - x_s) \delta(z - z_s) \end{aligned} \quad (1)$$

로 주어진다(Dey and Morrison, 1979). 여기서 σ 는 전기전도도(conductivity), $\tilde{\phi}$ 는 파수영역에서의 스칼라 포텐셜(scalar potential)

$$\tilde{\phi}(x, k_y, z) = \int_0^\infty \phi(x, y, z) \cos(k_y y) dy, \quad (2)$$

k_y 는 y -방향의 공간파수(spatial wavenumber), δ 는 Dirac delta function, I 는 전류(current)의 크기를 나타낸다. 결과적으로 2.5차원 전기비저항 탐사 모델링은 식 (3)에 주어진 미분방정식의 해를 구하는 것으로 귀착된다. 하지만 식 (3)에서 구해지는 해는 파수영역에서의 전위이므로 이는 역 푸리에 변환을 통하여 공간영역에서의 전위로 변환되어야 한다.

식 (1)의 해를 구하기 위하여 가중잔여법을 적용하면 다음과 같은 변분식으로 간단하게 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \sigma \nabla w \cdot \nabla \tilde{\phi} d\Omega + k_y^2 \int_{\Omega} \sigma w \tilde{\phi} d\Omega \\ + \oint_{\Gamma} \sigma \alpha w \tilde{\phi} d\Gamma = \frac{I}{2} w \delta(x - x_s) \delta(z - z_s) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\alpha = k_y \frac{K_1(k_y r)}{K_0(k_y r)} \cos \theta$$

위식에서 Γ 는 영역 Ω 를 둘러싼 경계, w 는 가중함수, θ 는 전류원으로부터 경계점까지의 벡터와 경계면에 수직인 벡터가 이루는 각도이다.

이제 식 (3)을 만족하는 해를 구하기 위해서는 전체영역 Ω 를 작은 크기의 요소(element) Ω_e 로 분할하면, 요소 내의 일점에서의 전위는 형상함수(shape function) N_i 와 각 절점에서의 전위를 사용하여 다음과 같이 표현할 수 있다. 즉,

$$\tilde{\phi} \approx \sum_i N_i \tilde{\phi}_i \quad (4)$$

이때 형상함수는 각 절점에서는 1, 그 이외의 절점에서는 모두 0값을 갖는 함수이다. 또한 Galerkin 법을 적용하여 가중함수 $w = N$ 이라고 하면 식 (3)은

$$\begin{aligned} \sum_j \left[\int_{\Omega} \sigma \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) d\Omega \right. \\ \left. + k_y^2 \int_{\Omega} \sigma N_i N_j d\Omega + \int_{\Gamma} \sigma \alpha N_i N_j d\Gamma \right] \phi_j \\ = \frac{I}{2} \delta(x - x_s) \delta(z - z_s) \end{aligned} \quad (5)$$

이 된다. 식 (5)는 이제 다음과 같은 선형방정식으로 간단하게 나타낼 수 있다.

$$K \tilde{\phi} = S \quad (6)$$

식 (6)에서

$$\begin{aligned} K_{ij} = \int_{\Omega} \sigma \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) d\Omega \\ + k_y^2 \int_{\Omega} \sigma N_i N_j d\Omega + \int_{\Gamma} \sigma \alpha N_i N_j d\Gamma \\ S_i = \frac{I}{2} \delta(x - x_s) \delta(z - z_s) \end{aligned} \quad (7)$$

이다.

3.2 터널을 포함한 요소분할

전기비저항 토모그래피 탐사 모델링에서 터널을 고려하여 요소분할을 수행해야만 정확한 결과를 얻을 수 있다. 토모그래피 탐사의 경우 측정점의 위치와 터널사이의 거리가 작을 수도 있기 때문에 지표탐사의 경우보다

터널의 영향이 매우 크게 나타나기 때문이다. 하지만 터널을 고려한 요소분할은 차후의 역산을 고려하여 세심한 주의를 기울일 필요가 있다. 일반적으로 전기비저항 탐사 모델링에서 측정 사이클을 2개의 모델링 요소로 분할한다. 따라서 요소분할 시에는 역산을 고려하여 터널 상, 하부 수직방향으로 짝수 개의 요소가 존재하도록 해야 하며, 수평방향으로도 짝수 개의 요소가 존재하는 것이 바람직하다. 또한 변형된 단구-쌍극자 배열을 사용할 경우를 대비하여 x -방향의 요소의 크기를 결정하는 것이 바람직하다.

Fig. 2는 전기비저항 토모그래피 탐사에서 터널을 포함하는 요소분할의 일례를 보여준다. 터널의 형태는 타원형 모델로 가정하였으며, 시추공 외부와 전극이 설치되지 않는 시추공 상, 하부 영역은 계산시간 절감을 위하여 요소의 크기를 크게 설정하였다. 반면 조사대상 영역에서는 거의 같은 크기로 조밀한 요소를 설정하였다. 이 영역에서의 요소의 크기는 측정간격의 1/2에 해당된다.

3.3 시간경과 역산 이론

최근의 물리탐사법은 1회의 탐사에 의해 지하구조를 해석하는 방법에서 상시관측을 통하여 지하 물성의 변화를 파악하는 방법으로 발전되어 가고 있다. 이는 상시관측이 시간에 따른 지하 물성의 변화가 매우 작을 경우에도 그 변화량을 알아낼 수 있는 좋은 대안이기 때문이다. 물론 미세한 변화를 파악하기 위해서는 현장 측정의 정밀도가 보장되어야 하며, 역산과 같은 해석상의 역산

잡음(artefact)이 작아야 한다. 일반적으로 지하의 지질 구조는 시간이 흘러도 거의 변화가 없지만 물성은 변화를 보일 수 있다. 한편 이러한 상시관측 자료의 해석을 위해서는 다양한 시간에 얻어진 탐사자료를 해석할 수 있는 해석기법의 개발이 요구되고 있으며, 시간경과 역산법은 이러한 상시관측 자료의 해석에 효과적인 방법으로, 이에 대한 다양한 연구가 국내외에서 활발하게 진행 중이다(김정호와 이명중, 2006.; Kim, 2006; Day-Lewis *et al.*, 2002; LaBrecque and Yang, 2001; Slater *et al.*, 2000; Loke, 1999) 여기서는 시간경과 역산법의 이론을 간단하게 기술한다.

일반적으로 최소자승법을 사용하는 물리탐사자료의 역산에서는 다음의 목적함수 S 를 최소화하는 증분벡터 Δp 를 반복적 방법을 통하여 구하게 된다.

$$S = \| W_d(e - J\Delta p) \|^2 + \| W_m \Delta p \|^2 \quad (8)$$

여기서 Δp 는 모델증분벡터, e 는 측정자료와 이론자료 사이의 오차벡터(data misfit), J 는 Jacobian 행렬, W_d 와 W_m 은 각각 자료벡터와 모델변수에 가해지는 제한자(constraint), 즉 가중행렬(weighting matrix)이다. 최소자승역산법은 대개 1회의 측정에서 얻어지는 자료를 사용하여 지하를 구성하는 물성을 추정하는데 주로 사용되어 왔다. 최근 시간경과에 따른 지하물성의 변화를 파악하기 위한 상시관측의 중요성이 부각되고 있으며 다양한 해석기법에 관한 연구가 수행되고 있다.

시간경과 역산법은 이러한 상시관측 자료의 해석을 위한 방법으로 최초 측정자료를 역산하여 얻어진 모델을 기준모델로 하여 시간에 따른 모델변수의 변화량에 제한을 가하는 방법이다. 즉 지하 모델변수는 시간이 경과해도 거의 변화가 없다고 가정하고 시간경과에 따른 모델변수의 변화량을 최소화 시키는 방법이다. 이러한 접근법은 모델변수에 공간적 평활화 제한을 가하는 동시에 시간적 제한을 가하는 방법으로 볼 수 있다. 이러한 가정을 만족하는 목적함수는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$S = \| W_d(e - J\Delta p) \|^2 + \| W_m \Delta p \|^2 + \| W_t \delta p \|^2 \quad (9)$$

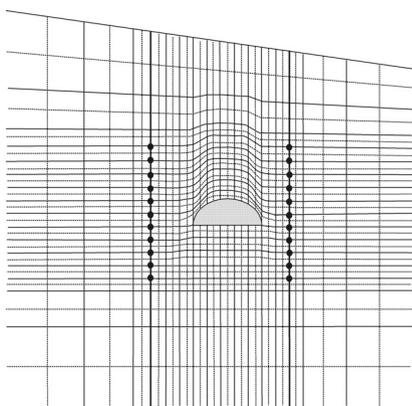


Fig. 2. Quadrilateral element used in the solution of resistivity tomography including a tunnel

식 (9)에서 첫 번째 항은 오차, 두 번째 항은 공간적 모델제한자, 마지막 항은 시간적 모델제한자에 해당된다. 마지막 항에서 p_{ref} 는 기준 모델변수라 할 때 $\delta p = p - p_{ref}$, W_t 는 시간적 모델제한자이다.

식 (9)에 주어진 목적함수를 최소화하는 증분벡터 Δp 를 구하면

$$\Delta p = (J^T W_d^T W_d J + W_m^T W_m + W_t^T W_t)^{-1} [J^T W_d^T W_d e - W_t^T W_t \delta p] \quad (10)$$

가 된다.

일반적으로 역산결과는 초기값의 설정에 의해 영향을 받으며, 특별한 사전정보가 없을 경우에는 대개 모든 모델변수에 동일한 값을 초기값으로 부여한다. 하지만 이 경우에는 이미 기준자료가 있으므로 이 기준값을 초기값으로 사용하며, 또한 기준값과 추정값 사이의 차이를 최소화하게 된다. 결과적으로 이 방법은 기준모델에 대한 모델변수의 변화량을 추정하는 것으로 해석할 수 있다. 즉 이 역산법은 기준모델과 가장 근접한 결과를 도출하게 된다. 따라서 이 방법은 역산에 수반되는 각종 잡음(artefact)은 거의 같은 수준을 유지한다고 가정하면, 시간 경과에 따른 모델변수의 변화량을 보다 정확하게 추정할 수 있을 것으로 기대된다(Loke, 1999).

상시관측 자료의 역산은 기준모델에 대한 변화량, 즉 시간에 따른 모델변수의 변화량을 보다 정밀하게 파악하는 것이 일차적인 목적이다. 따라서 시간적 변화가 있는 모델변수는 그 변화를 강조하고, 거의 변화가 없는 모델변수는 기준모델의 값과 근접한 값을 나타내는 역산법이 상시관측 자료의 해석에 효과적일 것이다. 이러한 관점에서 본다면 모델변수의 시간적 변화량 $\delta p = p - p_{ref}$ 에 가해지는 시간적 모델제한자 W_t 는 δp 가 작으면 큰 제한을 가하여 기준값에 접근하게 하고, δp 가 크면 약한 제한을 가해야 한다. 이런 조건을 만족시키는 가중함수로

$$W_t = \frac{\beta}{\sqrt{\delta p^2 + \beta^2}} \quad (11)$$

를 생각할 수 있다. 식 (11)에서 β 는 매우 작은 양수이며,

$\beta=0$ 일 경우 $W_t=0$ 이 되고, 식 (9)는 일반적인 평활화 제한법이 된다. 반면 모델변수의 시간적 변화량 $\delta p=0$ 이면 $W_t=1$ 이 되고, 해당 모델변수에 강한 제약을 가하여 기준모델 값에 근접하도록 제한한다. 또한 $0 \leq W_t \leq 1$ 의 값을 가지므로 공간적 평활화 모델제한자 W_m 도 유사한 범위를 갖도록 설정해 주면 두 가중함수 사이의 균형(balance)도 유지할 수 있다는 장점이 있다.

한편 식 (11)에 주어진 β 는 δp 와 함께 W_t 의 값을 결정하는 요소이다. 이 값이 δp 에 비하여 매우 클 경우에는 $W_t \rightarrow 1$ 이 되어 시간적 변화를 억제하게 될 것이며, 또한 너무 작게 되면 $W_t \rightarrow 0$ 이 되어 시간적 변화량에 제한을 가하는 의미를 상실한다. 따라서 적절한 β 의 결정은 역산 결과 영상에서 모델변수의 시간적 변화량을 좌우하는 중요한 역할을 하게 된다.

ACB 법에서는 모델분해행렬(model resolution matrix)과 그 분산함수(spread function)를 분석하여 공간적 모델제한자의 크기를 결정한다(Yi *et al.*, 2003). 이 경우, 모델분해능이 높은 변수에는 작은 제한을 가하고, 낮은 모델변수에는 큰 제한을 가하여 공간적으로 부드러우면서도 분해능이 향상된 영상을 도출하게 된다. 반면 시간적 모델제한자는 공간적 모델분해능이나 분산함수와는 이론적으로 관계가 없으며, 시간적 모델분해능을 산출할 수 있는 방법도 없다. 그러나 상시관측 자료와 같이 자료획득 변수가 고정되어 있을 경우에는 시간이 변해도 공간적 모델분해능이 크게 변화하지 않는다. 또한 공간적 모델분해능이 낮은 모델변수는 상대적으로 큰 평활화 모델제한자의 영향으로 주변의 모델변수 값에 영향을 많이 받게 되므로, 높은 모델분해능을 갖는 모델변수에 비하여 역산결과의 신뢰도가 낮다고 볼 수 있으며, 상시관측 자료의 역산에서도 이러한 특성은 그대로 유지된다.

이제 β 값을 설정하는 구체적인 방법에 관하여 생각해 보자. 상시관측 자료의 역산에서는 모델분해능이 낮은 모델변수는 신뢰도가 낮으므로 강한 제한을 가하여 기준모델에 근접시키고, 모델분해능이 높은 모델변수에는 약한 제한을 가하여 모델변수의 시간적 변화를 잘 나타내도록 유도하는 것이 효과적일 것으로 보인다. 앞서 설명한 바와 같이 모델변수의 시간적 변화량은 공간적 모델분해능과 무관하다. 즉 모델분해능이 높은 모델변수

라 해서 시간적으로 크게 변화하고, 낮은 모델변수라 해서 시간적으로도 변하지 않는다는 가정은 성립하지 않는다. 단지 공간적 모델분해능이 높은 모델변수가 역산 결과의 신뢰도라는 측면에서 유리할 뿐이며, 시간적 변화량은 지하모델의 특성에 의해서 좌우되므로 공간적 모델분해능을 바탕으로 시간적 모델제한자를 설정하는 데는 근본적인 제약이 따르게 된다. 따라서 시간적 변화만을 고려하여 시간적 모델제한자의 크기를 결정하는 것이 합리적인 것으로 판단된다. 즉 식 (11)에 주어진 바와 같이 시간적 변화가 작은 모델변수에는 강한 제한을 가하여 기준모델에 접근시키고, 큰 모델변수에는 약한 제한을 가하여 시간적 변화량을 강조하는 방법을 생각할 수 있다. 이제 공간적 모델제한자의 상, 하한 값을 λ_{\min} , λ_{\max} 라 하면 공간적 모델제한자와 시간적 모델제한자가 균형을 위해서 다음과 같은 방법을 사용할 수 있다.

$$\beta_j = \lambda_{\min} + \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{\delta p_{\max} - \delta p_{\min}} (\delta p_{\max} - \delta p_j),$$

$$j = 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

식 (12)는 모델변수의 시간적 변화의 크기에 따라 시간적 모델제한자의 크기를 결정하는 방법으로, 시간적 모델제한자와 공간적 모델제한자 사이의 균형을 유지시켜 준다.

4. 수치시험

4.1 터널을 포함한 전기비저항 토모그래피 자료의 독립역산

이상에서 설명한 이론적 배경을 바탕으로 전기비저항 토모그래피 모델링 및 역산 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램에서는 터널을 고려할 수 있으며, 다양한 전극 배열을 사용 가능하도록 하였다. 또한 독립역산 (independent inversion)과 시간경과역산 (time-lapse inversion)을 선택할 수 있도록 함으로써 터널 주변의 물성변화에 대한 해석이 가능하도록 개발되었다.

우선 터널을 포함한 토모그래피법의 필요성을 알아보기 위하여 터널을 고려하지 않을 경우와 터널을 고려한 경우의 토모그래피 역산을 수행하였다. 사용된 모델은 시추공의 깊이 40 m, 시추공간격 20 m, 측점간격 2 m로 설정하였으며, 배경매질의 전기비저항은 100 ohm-m로 설정하였다. 전극배열법은 비록 분해능이 낮지만 이론적 분석이 용이한 단극배열법을 사용하였다. 개발된 토모그래피 프로그램의 검증을 위하여 Fig. 3(a)에 나타난 바와 같이 두 시추공 중앙에 사각형의 전도성 이상체 ($\rho = 10 \text{ ohm-m}$)와 부도체($\rho = 10^8 \text{ ohm-m}$)가 존재할 경우에 대한 모델링을 수행하였다. 이상체의 크기는 가로 8 m, 세로 4 m 이다. Fig. 3(b)는 전도성 이상체가 존재할 경우의 토모그래피 영상이며, Fig. 3(c)는 부도체가 존재할 경우의 토모그래피 영상이다. 두 경우 이상체의 위치는 잘 추정하고 있으나 이상체의 참비저항 값과 상

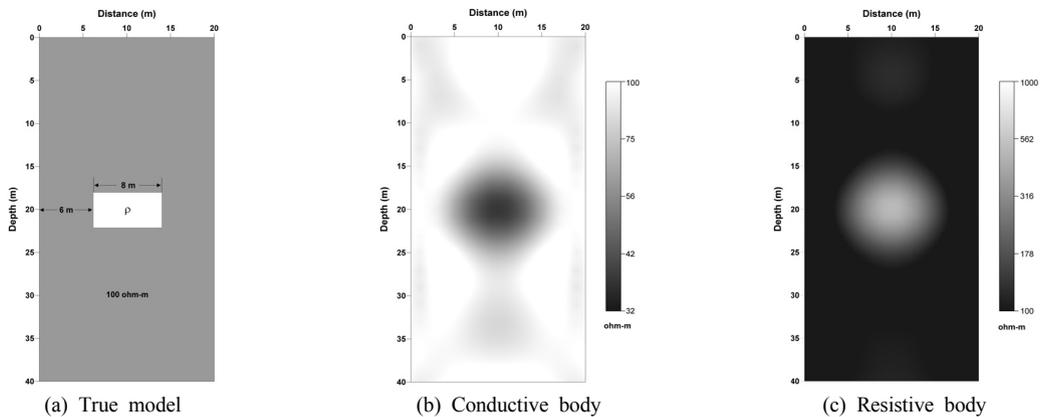


Fig. 3. Resistivity tomogram when an anomalous rectangular body is imbedded in a homogeneous half-space

당한 차이를 나타내고 있다. 이러한 현상은 사용된 전극 배열인 단극배열의 분해능이 떨어지기 때문인 것으로 생각된다.

다음은 전기비저항 토모그래피에서 터널에 의한 영향을 고찰하기 위한 분석을 수행하였다. 우선 균질매질에 터널이 존재할 경우에 대하여 모델링을 수행하고 터널을 고려하지 않은 상태에서 토모그래피 역산을 수행하였다. Fig. 4는 터널 모델 및 터널을 포함하지 않은 경우와 포함한 경우의 토모그래피 영상을 나타낸 것이다. 터널은 빈 공간이므로 전기적으로 부도체에 해당한다. 따라서 터널을 고려하지 않고 역산을 수행할 경우 Fig. 4(b)에 나타난 바와 같이 토모그래피 영상에는 터널의 위치에 고비저항 이상대가 출현하게 된다. 일반적으로 터널을 요소분할에 고려하지 않는 경우, 터널에 해당하는 부분에 $10^6 \sim 8$ ohm-m의 높은 전기비저항 값을 할당하게 된다. 물론 이 경우 할당되는 전기비저항 값에 따라 큰 차이는 없으나 계산되는 겉보기비저항은 영향을 받는다. 이러한 변화는 독립역산의 경우에는 큰 문제가 없으나 시간경과 역산의 경우에는 문제의 소지를 남기게 된다. 더 큰 문제는 터널을 고려하지 않을 경우 요소분할의 편의를 위하여 대개 지하 매질을 터널의 형태를 전혀 고려하지 않은 사각형 형태의 요소로 분할하게 된다. Fig. 4(b)의 경우에도 실제 고비저항 이상대가 실제 터널보다 넓게 퍼져서 영상이 나타나고 있다. 또한 이 경우 실제 터널과 터널을 나타내는 요소의 불일치에서 오는 오차가 나타나게 된다. 한편 해석의 편의를 위해서

는 터널주변에 아무런 이상대가 없을 경우 토모그래피 영상은 당연히 배경매질의 전기비저항을 나타내야 한다. 하지만 터널을 고려하지 않을 경우 터널에 의한 영향으로 인하여 영상의 중앙에 고비저항대가 나타나게 되며, 이는 시간경과 역산의 경우 변화대의 해석을 어렵게 하는 요인 중의 하나가 된다. 반면 Fig. 4(c)에서와 같이 터널을 고려하여 요소분할을 하게 되면 토모그래피 영상은 배경매질의 참 전기비저항 값만으로 나타나게 되므로 시간경과에 의해 이상대가 생길 경우 명확하게 비교분석할 수 있게 된다.

Fig. 5는 이러한 요소분할의 불일치에서 오는 영상의 왜곡을 극명하게 보여주는 사례이다. Fig. 5(a)는 터널의 좌측 상부에 지하수의 집적에 의한 10 ohm-m의 저비저항 이상대를 가정한 모델이다. 이 경우 터널을 고려하지 않고 역산을 수행하게 되면 Fig. 5(b)에 나타난 바와 같이 고비저항인 터널의 영향으로 실제모델과는 판이한 토모그래피 영상이 나타나게 된다. 반면 Fig. 5(c)에 주어진 바와 같이 터널을 고려한 토모그래피 영상에서는 터널 좌측상부의 저비저항 이상대가 명확하게 나타나고 있어 터널주변의 전기비저항 분포에 대한 정확한 해석이 가능해진다. 이러한 결과는 시추공 토모그래피처럼 정밀해석을 목적으로 하는 전기비저항 탐사자료의 역산에서 터널과 같은 인공적인 경계면을 반영하는 역산 요소분할이 이 얼마나 중요한가를 잘 보여주는 대표적인 사례라 할 수 있다.

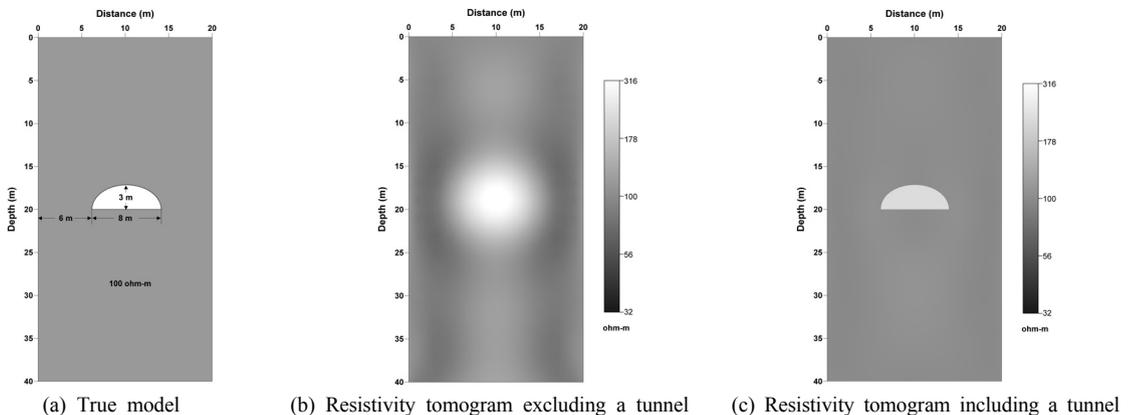


Fig. 4. Numerical example showing the effects of a tunnel in the resistivity tomography

4.2 시간경과 역산

시간 경과에 따라 모델이 변화할 경우, 변화된 영역을 효과적으로 탐지하기 위해서는 기준모델(reference model)과 시간경과 모델(time-lapse model)을 비교하여, 기준 모델에 대한 시간경과 모델의 비, 즉 몇 %나 변화하였는가를 정량적으로 분석하는 방법이 널리 사용되고 있다. 하지만 각각의 지하 모델에 대하여 얻어진 자료를 독립 역산할 경우 소위 역산잡음에 의하여 실제로 변화가 없는 영역에서도 변화비는 1이 아닌 값을 나타내어 해석을 어렵게 하는 요인이 되고 있다. 시간경과 역산법은 이러한 문제점의 해결을 위하여 도입된 역산법으로 보다 효과적으로 역산잡음을 억제할 수 있다는 특성을 갖는다. 여기서는 균질 매질내에 터널만이 존재하는 경우를 기준모델, 터널의 좌측부에 지하수가 집적되어 저비저항 이상대가 생성된 모델을 시간경과 모델로 설정하였다. 모델링을 통하여 각각의 모델에 대한 토모그래피 자료를 생성한 다음, 시간경과 역산법을 적용하여 본 연구에서 개발된 시간경과 역산법의 효용성을 타진하였다.

우선 Fig. 4(a)에 나타난 바와 같이 100 ohm-m의 균질 매질에 심도 20 m 지점에 길이 8 m, 높이 3 m 인 터널모델을 설정하고, 모델에 대한 터널을 고려한 모델링을 통하여 토모그래피 자료를 획득하였다. 이 자료에 대하여 토모그래피 역산을 수행하여 얻어진 전기비저항 분포인 Fig. 4(c)를 시간경과 역산에서 기준모델로 사용하였다. Fig. 4(c)에서는 모두 동일한 비저항을 보이는 것처럼 보이지만, 실제로는 역산잡음으로 인하여 동일

한 전기비저항 값을 나타내지는 않는다. 시간경과 모델은 Fig. 5(a)에 나타난 것처럼 동일한 터널의 좌측에 수평방향 길이 4 m, 수직방향 길이 1 m, 전기비저항 10 ohm-m인 저비저항 이상대가 지하수 집적으로 인하여 생성된 것으로 가정하였다.

Fig. 6(a)와 (b)는 각각 시간경과 역산 결과에서 얻어진 토모그래피 영상과 기준모델에 대한 비저항 변화비 영상을 도시한 것이다. Fig. 6(a)의 시간경과 역산결과가 Fig. 5(c)에 나타난 독립역산의 결과에 비하여 더욱 뚜렷하게 터널 좌측의 저비저항 이상대를 보여주고 있다. 즉 시간경과 역산의 추정값이 단독역산의 추정값에 비하여 이상대의 참 전기비저항인 10 ohm-m 에 근접한 결과를 보인다. 단지 터널의 우측 하단에 나타나는 역산잡음도 증폭되어 나타나고 있으며, 이는 요소분할의 부정확성에 오는 문제점으로 보이며, 향후 보완해야 할 점 중의 하나이다. Fig. 6(b)에 나타난 시간에 따른 전기비저항 변화비 영상에서도 터널 좌측부의 이상대가 명확하게 나타나고 있다. 물론 터널 우측 하단의 역산잡음도 당연히 나타나고 있다.

이상에서 터널주변에서 실시되는 전기비저항 토모그래피 탐사의 경우 터널을 고려하여 요소분할을 하는 것이 터널 주변의 정확한 이상대 해석에 결정적인 도움이 됨을 확인하였다. 또한 모니터링이 이루어질 경우에도 터널을 고려한 해석이 이루어져야 하며, 모니터링 자료의 처리는 시간경과 역산법이 효과적인 해석방법을 재확인 할 수 있었다.

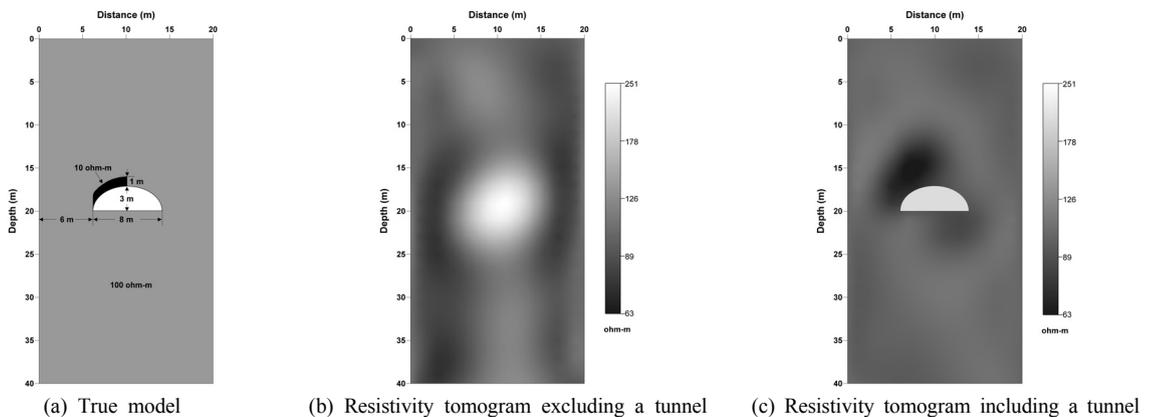


Fig. 5. Numerical example showing the effects of a tunnel in the resistivity tomography. Low resistivity zone due to water saturation is added on the top-left part of a tunnel

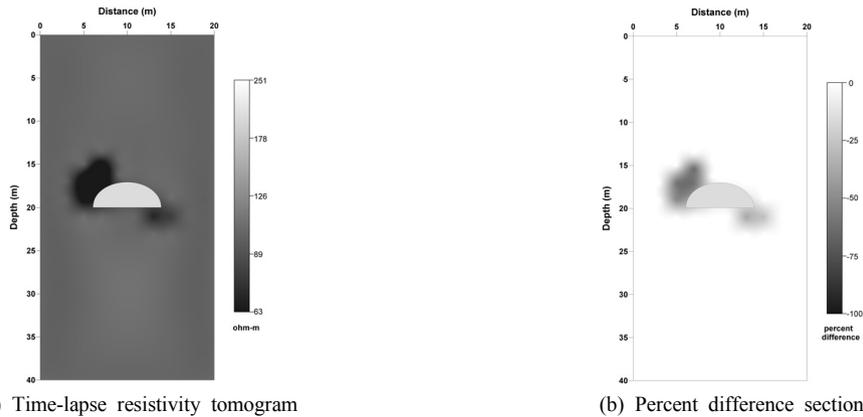


Fig. 6. The result of time-lapse inversion

5. 결 론

전기비저항 토모그래피법은 측정간격이 지표탐사에 비하여 매우 작기 때문에 분해능이 뛰어나고, 자료의 수가 많기 때문에 역산결과에서 얻어지는 영상의 신뢰도가 높아 정밀탐사 방법으로 터널 주변의 물성분포나 그 변화를 탐지하는데 매우 효과적인 방법이다. 그러나 송, 수신점과 터널 사이의 거리가 작기 때문에 공기로 채워진 터널의 영향은 지표탐사의 경우보다 매우 커질 수밖에 없다. 따라서 토모그래피 자료의 정밀한 해석을 위해서는 모델링이나 역산과정에서 당연히 터널의 영향을 고려되어야 한다.

본 연구에서는 이러한 필요성에 따라 터널을 고려한 전기비저항 토모그래피 모델링 프로그램을 개발하고, 이를 기반으로 모니터링 자료의 시간경과 역산 프로그램을 개발하였다. 개발된 전기비저항 토모그래피 모델링 및 역산 프로그램을 사용하여 간단한 모형에 대한 분석을 실시하였다. 우선 전기비저항 토모그래피 역산에서 터널이 존재할 경우 이를 고려한 경우와 그렇지 않은 경우에 대하여 결과영상을 비교 분석한 결과, 터널을 고려하지 않을 경우 실제와 매우 동떨어진 해석결과를 얻을 수도 있음을 확인하였다. 즉 터널주변의 전기비저항 분포에 관한 명확한 정보를 얻기 위해서는 터널을 고려한 역산 프로그램을 사용해야 한다. 또한 모니터링 자료에 대한 시간경과 역산결과가 단독역산에 비하여 실제 전기비저항 모델에 근접한 결과를 추정함을 확인하였다.

감사의 글

이 연구는 한국건설기술연구원의 “터널 건설 환경영향 최소화 기술개발”과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김성환, 김낙영 (2000), “고속도로 터널현황”, 터널기술, 2, pp. 6-14.
2. 김정호, 이명종 (2006), “시간에 대해 변화하는 지하구조에서 획득한 물리탐사 자료의 역산”, 대한지구물리학회, 한국물리탐사학회 공동학술대회 논문집, pp. 188-193.
3. 김정호, 이명종, 조성준, 송윤호, 정승환 (1997), “전기비저항 토모그래피와 시추공 레이더 탐사의 원리 및 응용”, 건설현장에 필요한 물리탐사기술 심포지움, 제2회 학술발표회 논문집, 한국지구물리탐사학회, pp. 92-116.
4. 김정호, 정승환, 송윤호, 조성준, 이명종, 신인철, 이영남, 정연문, 하희상 (1999), “전기비저항 토모그래피 영상법 및 토목/환경분야 적용성 연구”, 현대건설(주) 기술연구소, 96GE011.
5. 김정호, 이명종, 조성준, 정승환, 이희일 (1996), “시추공 효과가 전기비저항 토모그래피에 미치는 영향에 관한 연구”, 한국자원연구소 연구보고서, KR-96(C)-10, pp. 3-60.
6. 신종호, 신용석, 윤종열, 김호중 (2008), “전기비저항탐사를 이용한 터널라이닝 누수조사연구”, 한국터널공학회지, 10, pp. 257-267.
7. 안희윤, 정재형, 조인기, 김정호, 배규진 (2008), “터널 굴착에 따른 전기비저항 모니터링 기술 적용”, 한국터널공학회지, 10, pp. 1-16.

8. 이명중, 현병구, 김정호 (1995), “시추공간 전기비저항 탐사자료의 영상화”, 한국자원공학회지, 32, pp. 87-96.
9. 정승환, 김용태, 안대영 (1995), “전기비저항 토모그래피에 의한 지하영상화 및 적용사례”, 한국자원공학회 특별심포지움 논문집, 지반사고 예방을 위한 물리탐사의 활용, pp. 133-140.
10. 조인기, 정승환, 김정호, 송윤호 (1997a), “전기비저항 토모그래피에서의 전극배열 비교”, 한국자원공학회지, 34, pp. 18-26.
11. 조인기, 김정호, 정승환 (1997b), “전기비저항 토모그래피에서의 공내수의 영향”, 한국자원공학회지, 34, pp. 531-538.
12. Beasley, C. W. and Ward, S. H. (1988), Cross-borehole resistivity inversion, 58th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, pp. 204-207.
13. Coggon, J. H. (1971), “Electromagnetic and electric modeling by finite element method”, Geophysics, 36, pp. 132-155.
14. Daily, A. and Owen, E. (1991), “Cross-borehole resistivity tomography”, Geophysics, 44, pp. 753-780.
15. Day-Lewis, F. D., Harris, J. M. and Gorelick, S. M. (2002), “Time-lapse inversion of crosswell radar data”, Geophysics, 66, pp. 1740-1752.
16. Dey, A. and Morrison, H.F. (1979), “Resistivity modeling for arbitrarily shaped two-dimensional structures”, Geophysical Prospecting, 27, pp. 106-136.
17. Hohmann, G. W. (1975), “Three-dimensional induced polarization and electromagnetic modeling”, Geophysics, 40, pp. 309-324.
18. Kim, J. H. (2006), “Least-squares inversion of DC resistivity data acquired over dynamically changing earth model”, Proceedings of Near Surface 2006, the 12th European meeting of Environmental and Engineering Geophysics, European Association of Geoscientists and Engineers, 4-6 Sep., Helsinki, Finland, B030.
19. LaBrecque, D. J. and Yang, X. (2001), “Difference inversion of ERT data, A fast inversion method for 3-D in-situ monitoring”, Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 6, pp. 83-89.
20. Loke, M. H. (1999), “Time-lapse resistivity imaging inversions”, Environmental and Engineering Geophysical Society European Section, Meeting, Proceedings, Em1.
21. Pridmore, D. F., Hohmann, G. W., Ward, S. H. and Sill, W. R. (1981), “An investigation on finite element modeling for electrical and electromagnetic data in three dimensions”, Geophysics, 46, pp. 1009-1024.
22. Ohtomo, H., Saito, H., Shima, H. and Toshioka, T. (1990), “Application of geotomography to Civil Engineering”, The 1st SEGJ International Symposium on Geotomography, v.1, Soc. Expl. Geophys. Japan, pp. 77-88.
23. Shima, H. (1992), “2-D and 3-D resistivity image reconstruction using crosshole data”, Geophysics, 57, pp. 1270-1281.
24. Sasaki, Y. (1992), “Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation”, Geophysical Prospecting, 40, pp. 453-463.
25. Sasaki, Y. and Matsuo, K. (1990), “Surface-to-tunnel resistivity tomography at copper mine”, 60th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, pp. 550-553.
26. Slater, L., Binley, A. M. Daily, W., and Johnson, R. (2000), “Cross-hole electrical imaging of a controlled saline tracer injection”, Journal of Applied Geophysics, 44, pp. 85-102.
27. Yi, M. J. Kim, J. H., and Chung, S. H. (1997), “The borehole effect in imaging the earth using resistivity tomography”, 59th EAEG conference & Technical Exhibition, Expanded Abstracts, PO79.
28. Yi, M. J., Kim, J. H. and Chung, S. H. (2003), “Enhancing the resolving power in least-squares inversion with active constraint balancing”, Geophysics, 68, pp. 931-941.

접수일(2009.7.15), 수정일(1차: 2009.8.18, 2009.8.20), 게재확정일(2009.8.25)