3차원 전기비저항 모니터링 자료의 시간경과 역산

김연정¹ · 조인기^{1*} · 용환호² · 송성호²

¹강원대학교 지구물리학과

²한국농어촌공사 농어촌기술연구소

Time-lapse Inversion of 3D Resistivity Monitoring Data

Yeon-Jung Kim¹, In-Ky Cho^{1*}, Hwan-Ho Yong², and Sung-Ho Song²

¹Department of Geophysics, Kangwon National University

²Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

요 약: 모델변수의 증감 및 분해능을 고려하는 새로운 교차모델 제한자를 사용한 시간경과 역산 알고리즘을 개발하였다. 증감을 고려한 교차모델 제한자는 같은 변화비를 갖는 모델변수에 같은 제한을 가한다. 이 교차모델 제한자는 모델변수의 증감에 관계없이 의미 있는 변화를 보이는 모델변수들을 강조할 수 있다. 분해능 교차모델 제한자는 분해능이 낮은 모델변수에 작은 제한을 가하는 반면, 분해능이 높은 모델변수에는 큰 제한을 가한다. 따라서 분해능이 낮은 모델변수도 시간 경과에 따라 의미 있는 변화를 보일 경우 효과적으로 식별할 수 있다. 3차원 전기비저항 모니터링 자료의 수치실험을 통하여 이들 두 교차모델 제한자의 타당성을 검증하였다. 최종적으로, 방조제의 안정성 평가를 위하여 서해안에 위치한 방조제에서 얻은 3 차원 전기비저항 모니터링 자료의 처리에 개발된 시간경과 역산법을 적용하였다. 시간경과 역산의 결과 모니터링이 수행된 기간 동안 방조제에 주목할 만한 변화가 없는 것으로 해석되었다.

주요어: 3차원 전기비저항 모니터링, 시간경과 역산, 교차모델 제한자

Abstract: We developed a time-lapse inversion using new cross-model constraints based on change ratio and resolution of model parameters. The cross-model constraint based on change ratio imposes the same penalty on the model parameters with equal change ratio. This constraint can emphasize the model parameters with significant change regardless of their increase or decrease. The resolution cross-model constraint imposes a small penalty on the model parameters with poor resolution, but a large penalty on the model parameters with good resolution. Thus, the model parameter with poor resolution can be effectively identified in the inversion result if they are significantly changed with time. Through the numerical tests for 3D resistivity monitoring data sets, the performance of these two cross-model constraints was confirmed. Finally, for the safety estimation of a sea dyke, we applied the developed time-lapse inversion to the 3D resistivity monitoring data that were acquired at a sea dike located in western coastal area of Korea. The result of time-lapse inversion suggested that there were no significant changes at the sea dike during the monitoring period.

Keywords: 3D resistivity monitoring, time-lapse inversion, cross-model constraint

서 론

전기비저항 탐사는 비파괴적인 물리탐사법으로 적용성이 뛰어나 다양한 분야에서 널리 활용되어왔다(Chung *et al.*, 1992;

Yi *et al.*, 2000; Park *et al.*, 2002; Song *et al.*, 2003). 일반적으로 현장 탐사 및 해석상의 편리함으로 인하여 2차원 전기비저항 탐사가 수행되어왔다. 그러나 2차원 전기비저항 탐사 결과는 3차원적인 지하의 물성 분포와 지형에 의한 3차원 효과로 인해 왜곡된다(Cho *et al.*, 2006, 2010). 그러므로 지하의 정밀한 물성 분포를 영상화하기 위해서는 3차원 탐사가 요구된다. 최근 전기비저항 탐사는 급속하게 발달된 측정기기 및 해석 기술에 힘입어 3차원 탐사 및 모니터링 등으로 확대 발전되어 가고 있다(Slater and Sandberg, 2000; Papadopoulos *et al.*, 2006; Mitchell and Knight, 2011). 기존의 모니터링 자료에 대한 해석은 주로 단독 역산을 수행하여 그 결과를 상호 비교하는 방법으로 이루어졌다(Ahn *et al.*, 2008; Park *et al.*, 2005).

2013년 2월 12일 접수; 2013년 10월 28일 수정; 2013년 10월 29일 채택

*Corresponding author

E-mail: choik@kangwon.ac.kr

Address: Department of Geophysics, Kangwon National University

©2013, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이 경우 변화량이 작은 이상대의 탐지가 어려울 수 있으며 (Daily *et al.*, 2004; Day-Lewis *et al.*, 2005), 역산의 비유일해 특성에 기인한 다른 모델을 추정할 우려도 있다(Loke, 1999). 시간경과 역산을 수행하면 단독 역산의 단점을 개선(Nguyen and Kemna, 2005)할 수 있지만 기존의 시간경과 역산 역시 변화량이 가장 큰 변화대만 강조하여 영상화 하거나, 같은 변화량을 보이는 이상대에 대해 전기전도도가 감소한 이상대가 증가한 이상대보다 상대적으로 저평가되는 문제점이 있다(Kim *et al.*, 2008). 이에 따라 3차원 전기비저항 모니터링 자료를 보다 정밀하게 분석할 기법을 개발할 필요가 있다.

이 연구에서는 3차원 전기비저항 모니터링 자료의 정밀 분석을 위해서, 증감을 고려하는 교차모델 제한자와 분해능 교차모델 제한자를 사용한 시간경과 역산 알고리즘을 개발하였다. 개발된 시간경과 역산에 사용되는 교차모델 제한자는 전기전도도의 증감에 상관없이 같은 변화비를 보이는 모델변수에 대해 같은 제한을 가하도록 하여 전기비저항이 증가한 이상대를 효과적으로 영상화하고자 하였다. 또한, 분해능 교차모델 제한자를 사용하여 일반적으로 전기비저항 탐사 자료의 역산 수행 시 깊은 곳에 위치한 이상체는 낮은 분해능으로 인해 영상화가 어려운 점을 개선하고자 하였다. 개발된 시간경과 역산의 타당성 검증을 위해 간단한 모델에 대한 수치 실험을 실시하였으며, 방조제에서 얻은 3차원 전기비저항 모니터링 자료의 역산에 적용하였다.

시간경과 역산 이론

장주기 모니터링 자료의 시간경과 역산은 지하 모델이 긴 시간에 걸쳐 점진적으로 변화한다고 가정하며, 시간 경과에 따른 물성 분포의 변화대를 효과적으로 영상화 하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 시간경과 역산은 일반적인 전기비저항 역산에 추가적으로 시간 제한자를 사용하여 변화가 미미한 모델 변수에는 큰 제한을 가해 기존 모델에 근접시키는 반면 의미 있는 변화를 보이는 모델변수에는 작은 제한을 가하여 자료에 근거한 모델을 추정하도록 한다(Oldenborger *et al.*, 2007). 모델변수로 기존 자료와 시간경과 자료의 차 또는 비를 사용하는 시간경과 역산(LaBrecque and Yang, 2001; Kemna *et al.*, 2002; Cassiani *et al.*, 2006), 기존 모델과 추정 모델의 차이를 최소화하는 교차모델 제한자(cross-model constraint)를 사용하는 시간경과 역산(Loke, 1999; Oldenborger *et al.*, 2007; Miller *et al.*, 2008; Kim and Cho, 2011) 등의 연구가 선행된 바 있다.

전기비저항 탐사의 시간경과 역산은 주로 현장 자료와의 오차를 최소화하는 최적의 모델변수를 추정하도록 다음의 목적 함수

$$S = [\mathbf{W}_d(\mathbf{e} - \mathbf{J}\Delta\mathbf{p})]^2 + [\mathbf{W}_m\Delta\mathbf{p}]^2 + [\mathbf{W}_\tau\delta\mathbf{p}]^2 \quad (1)$$

를 최소화 시키는 모델변수를 추정한다. 여기서 $\mathbf{e}$ 는 측정 자료와 이론 자료 사이의 자료 오차, $\mathbf{J}$ 는 감도행렬(Jacobian matrix), $\Delta\mathbf{p}$ 는 모델변수 증분 벡터(perturbation vector), $\delta\mathbf{p}$ 는 시간 경과에 의한 모델변수의 변화, $\mathbf{W}_d$ 는 자료가중 행렬, $\mathbf{W}_m$ 은 모델 제한자, $\mathbf{W}_\tau$ 는 교차모델 제한자이다.

모델변수의 변화비에 따라 제한을 가하는 시간경과 역산에서 $\delta\mathbf{p}$ 는

$$\delta p = |p - p_{ref}| / p_{ref} \quad (2)$$

로 주어진다.

(1)식에 주어진 목적함수를 최소화하는 모델증분 벡터 $\Delta\mathbf{p}$ 는

$$\Delta\mathbf{p} = (\mathbf{J}^T\mathbf{W}_d^T\mathbf{W}_d\mathbf{J} + \mathbf{W}_m^T\mathbf{W}_m + \mathbf{W}_\tau^T\mathbf{W}_\tau)^{-1} [\mathbf{J}^T\mathbf{W}_d^T\mathbf{W}_d\mathbf{e} - \mathbf{W}_\tau^T\mathbf{W}_\tau\delta\mathbf{p}] \quad (3)$$

와 같다. 시간경과 역산에서 시간 제한자는 역산 결과에 지대한 영향을 미치므로 효과적인 시간 제한자의 개발은 시간경과 역산에서 매우 중요한 연구 과제 중의 하나이다.

교차모델 제한자

시간경과 역산은 기존 모델에 근접한 모델을 추정하면서 물성 변화대를 효과적으로 영상화하도록 하기 위하여 시간 제한자를 사용해 시간 경과에 따른 모델변수의 변화에 제한을 가한다. 이때 가장 널리 사용되는 시간 제한자가 교차모델 제한자이다(Loke, 1999). 변화량이 서로 다른 여러 이상대들이 분포하고 있는 장주기 모니터링 자료의 시간경과 역산 시 일률적인 제한을 가하는 교차모델 제한자를 사용할 경우에는 변화량이 크지 않은 변화대의 탐지가 어려울 수 있다. 따라서 ACB 법(Yi *et al.*, 2003)과 유사하게 모델변수의 시간적 변화량에 따라 공간적으로 다른 크기의 제한을 가하는 교차모델 제한자를 사용하는 것이 효과적이다.

Kim and Cho (2011)는 이 조건을 만족시키는 가중함수로

$$W_{\tau_j} = \frac{\tau}{\sqrt{\delta p_j^2 + \tau}} \quad (4)$$

을 제시하였다. 여기서 τ 는 매우 작은 양수이며, $j=1, 2, \dots, N$ 이다. 이 교차모델 제한자를 사용하면 비록 변화량이 작더라도 의미 있는 변화를 나타내는 모델변수도 역산 결과에서 확인할 수 있다. 그러나 이 방법은 모델변수의 변화량을 $\delta p = |p - p_{ref}| / p_{ref}$ 로 정의하므로 모델변수가 증가한 모델에 비해 감소한 모델변수가 저평가되는 문제가 있다.

이 연구에서는, 모델변수의 증감에 관계없는 변화비에 따라 모델변수에 제한을 가하고자 δp 를 다음과 같이 다시 정의 하여, 이에 따라 결정되는 교차모델 제한자를 사용하는 시간경과 역산법을 개발하였다.

$$\delta p = \begin{cases} |p - p_{ref}| / p_{ref} & \text{if } p_{ref} \leq p, \\ |p - p_{ref}| / p & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (5)$$

위 식 (5)에 의해 결정된 δp 를 (4)식에 대입하여 구한 교차모델 제한자는 모델변수의 증감을 고려하여 같은 비율로 변화한 모델변수에 같은 제한을 가한다. 증감을 고려한 교차모델 제한자는 기존의 변화비만을 고려하는 교차모델 제한자가 같은 비율로 변화한 모델변수 중 증가한 모델변수보다 감소한 모델변수에 큰 제한을 가하여 역산 결과에 감소한 모델변수가 증가한 모델변수보다 강조되지 못하는 문제를 개선할 수 있다. 모델변수에 로그를 취하면 증감에 관계없이 변화비에 따라 같은 교차모델제한을 가할 수 있으나, 증감을 고려한 (5)식을 사용하면 시간에 따라 변화한 모델변수에 더 작은 교차모델제한을 가할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 보다 미세한 변화대도 잘 영상화 하고자 증감을 고려한 교차모델 제한자를 사용하였다.

한편, 전기비저항 탐사는 일반적으로 분해능이 낮은 깊은 곳에 위치한 이상대의 영상화에 어려움이 있다. 깊은 곳에 위치한 이상대를 효과적으로 탐지하고자 분해능 교차모델 제한자를 사용하는 시간경과 역산법을 개발하였다.

분해능 교차모델 제한자는 다음과 같이 모델변수의 분해능에 따라 변화량에 가중을 가한다.

$$\omega = \begin{cases} 1 & \text{if } \delta p \leq \text{average of } \delta p, \\ 1 + R^{-2} & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (6)$$

여기서, R 은 모델변수 분해행렬(parameter resolution matrix) (Menke, 1984)과 분산함수(spread function)를 사용하여 ACB 법과 같이 각각의 모델변수 마다 분해능을 정량적으로 계산하였다.

분해능 교차모델 제한자는 위의 (6)식에 의해 계산된 가중 변화량 $\omega \delta p$ 에 따라 다음과 같이 결정된다.

$$W_{\tau_j} = \frac{\tau}{\sqrt{(\omega_j \delta p_j)^2 + \tau}}. \quad (7)$$

이와 같이 결정된 분해능 교차모델 제한자는 시간 경과에 따른 모델변수의 변화비는 물론 분해능에 의해서 결정된다. 분해능 교차모델 제한자는 의미있는 변화를 보이는 모델변수에 대해 분해능이 작을수록 큰 가중값을 모델변수의 변화량에 부여한다. 이와 같은 분해능 교차모델 제한자는 깊은 곳에 위치하여 분해능이 작은 모델변수와 얕은 곳에 위치하여 분해능이 큰 모델변수에 같은 제한을 가하여 역산 결과에 얕은 곳에 위치한 모델변수의 변화뿐만 아니라 똑같은 수준으로 깊은 곳에 위치한 모델변수의 변화도 나타나도록 한다. 분해능 교차모델 제한자를 사용한 시간경과 역산을 제안하여 기존의 전기비저항 역산 방법으로는 깊은 곳에 위치한 모델변수의 변화 감지가 어려운 문제를 개선하고자 하였다. 단, (7)식에 의해 결정된 교차모델 제한자는 1보다 큰 값을 보일 수 있으며, 이 경우 모

델 제한자와의 균형이 문제가 된다. 그러므로 $0 \leq W_{\tau} \leq 1$ 의 범위를 갖도록 선형적으로 변환해주어야 한다.

수치 실험

개발된 시간경과 역산의 타당성 검증을 위하여 간단한 단층 모델에 대한 수치 실험을 실시하였다. 아래 Fig. 1(a)와 같이 100 ohm-m의 균질 반무한 매질의 왼쪽 하부에 500 ohm-m의 고비저항대가 발달한 간단한 단층 모델을 기본 모델(base model)로 설정하였다. 고비저항대는 $x \leq 50\text{m}$, $z \leq -10\text{m}$, $-\infty \leq y \leq \infty$ 에 위치한다. 200 m 길이의 가로 측선 6개를 20 m 간격으로 x -축에 평행한 방향으로 설치하였고, 100 m 길이의 세로 측선 7개를 30 m 간격으로 y -축에 평행한 방향으로 Fig. 1(b)와 같이 설치하였다. 측정 간격은 10 m로 설정하였으며, 전극배열은 분해능이 높은 것으로 알려진 쌍극자 배열로 설정하였다. 모델링 요소는 한 측정 간격을 4개의 요소로 분할하였으며 심도 방향으로는 요소의 크기를 증가시켰다. 역산 블록은 4개의 모델링 요소를 하나의 역산 블록으로 설정하였다.

수치 실험에 사용한 기본 모델의 단독 역산 결과는 다음 Fig. 2와 같이 물성 분포가 공간적으로 급변하지 않게 제한을 가하는 역산 기법의 특성 때문에 단층대가 기본 모델과 다른 양상을 보이며 역산 잡음(artifact)이 포함되어 기본 모델과 다르다. 대개 현장에서 얻은 전기비저항 모니터링 자료의 시간경과 역산의 경우 지하의 참 모델을 모르는 상태에서 특정 시간에 얻은 자료를 단독 역산하여 얻은 겉보기비저항 자료를 시간경과 역산의 기준 자료(reference data)로 사용하고, 기준 자

Fig. 1. (a) Base model and (b) survey lines on the surface.

Fig. 2. Reference model obtained from the independent inversion of reference data. The reference data was calculated from the 3D modeling for the base model shown in Fig. 1(a).

Fig. 3. Time-lapse model. (a) 3D model, (b) plan at $z = 15$ m and (c) section at $y = 50$ m.

료의 단독 역산 결과를 기준 모델(reference model)로 사용한다. 이 연구에서도 기본 모델을 그대로 기준 모델로 사용하지 않고, 기본 모델에 대한 모델링을 수행하여 얻은 겉보기 비저항 자료를 기준 자료로 사용하고, 기준 자료를 단독 역산한 결과 얻은 지하 모델을 기준 모델 및 초기 모델(initial model)로 설정하였다.

시간경과 모델은 Fig. 3과 같이 기본 모델에 x -축 방향으로 100 ~ 110 m, y -축 방향으로 40 ~ 50 m, 심도 10 ~ 20 m 구간에 10 ohm-m의 저비저항 이상체를 추가하였고, x -축 방향으로 150 ~ 160 m, y -축 방향으로 50 ~ 60 m, 심도 10 ~ 20 m 구간에 1000 ohm-m의 고비저항 이상체를 추가하였다. 두 이상체의 크기는 모두 10 m $\times$ 10 m $\times$ 10 m 이다. 기본 모델에 추가한 이상체는 시간이 경과함에 따라 전기비저항이 감소한 영역과 증가한 영역을 의미한다.

Fig. 3의 시간경과 모델을 이용한 시간경과 자료에 대해 (a) 단독 역산, (b) 상수 교차모델 제한자를 사용하는 시간경과 역산, (c) 변화비만을 고려한 교차모델 제한자를 사용하는 시간경과 역산, (d) 증감을 고려한 교차모델 제한자를 사용하는 시간경과 역산을 수행하였다. 각각의 역산 결과를 Fig. 4의 왼쪽 열에 나타내었으며, 잡음에 의한 영향을 살펴보기 위해 시간경과 겉보기 비저항 자료에 2%의 무작위 잡음을 추가한 후 그 결과를 Fig. 4의 오른쪽 열에 나타내었다. 그 결과 저비저항 이상체는 모든 역산 결과에서 뚜렷이 관찰되는 반면 고비저항 이상체는 변화비만을 고려하는 교차모델 제한자를 사용한 시간경과 역산 결과에서는 희미하게 나타난다.

잡음이 포함된 자료의 역산 결과를 보다 직관적으로 살펴보기 위해 Fig. 5에 잡음을 더한 자료에 대해 (a) 단독 역산, (b) 상수 교차모델 제한자를 사용하는 시간경과 역산, (c) 변화비만을 고려한 교차모델 제한자를 사용하는 시간경과 역산, (d) 증감을 고려한 교차모델 제한자를 사용하는 시간경과 역산을 수행한 결과를 이상체가 위치한 15 m 깊이에서의 평면도이다. 단독 역산과 상수 교차모델 제한자를 사용한 시간경과 역산 결과에는 다수의 이상대가 분포하며, 추가한 이상체에 의한 이상대 이외의 이상대들은 잡음의 영향인 것으로 해석되어 이 두 역산법은 잡음에 취약한 것으로 판단된다. 반면 변화비와

Fig. 4. Distribution of resistivity. (a) Independent inversion, (b) time-lapse inversion with a constant cross-model constraint, (c) time-lapse inversion with the cross-model constraint based on the conductivity change and (d) time-lapse inversion with the cross-model constraint based on the change ratio. Left column show inversion result of data, right column show inversion result of data with 2% noise.

Fig. 5. Resistivity distribution at $z = 15$ m plane when inversions are performed for the data with 2% noise. (a) Independent inversion, (b) time-lapse inversion with a constant cross-model constraint, (c) time-lapse inversion with the cross-model constraint based on the conductivity change and (d) time-lapse inversion with the cross-model constraint based on the change ratio.

Fig. 6. Distribution of resistivity (left column) and iso-surface of low cross-model constraint based on the change ratio of model parameters (right column) in the inversion of the noise-free data, when iteration number is (a) 1, (b) 3 and (c) 5, respectively.

증감을 고려한 교차모델 제한자를 사용한 시간경과 역산의 결과에서는 추가된 이상체가 위치하는 곳 이외의 영역들은 기준 모델과 매우 유사하여 이 두 역산법은 잡음을 효과적으로 억제하는 것으로 판단된다. 종합적으로 기존의 역산 방법들보다 증감을 고려한 교차모델 제한자를 사용한 시간경과 역산 결과에서 두 이상체가 가장 뚜렷하게 관찰된다. 이는 개발된 증감을 고려한 교차모델 제한자를 사용한 시간경과 역산이 전기전도도의 증감에 관계없이 같은 변화비의 변화대를 뚜렷이 영상화하며 잡음 억제에도 효과가 좋아 기존의 역산 방법들보다 효과적으로 지하모형을 영상화 할 수 있음을 의미한다.

교차모델 제한자와 역산 결과의 상관성을 살펴보고자 Fig. 6에 반복 계산 횟수가 증가함에 따라 증감을 고려한 교차모델 제한자의 값이 작은 영역을 역산 결과와 함께 나타내었다. 이상체가 추가되지 않은 영역에는 매우 큰 제한이 가해지지만 추가된 두 이상체가 위치하는 곳에는 반복 계산 횟수가 증가할수록 비슷한 수준의 작은 제한이 가해진다. 추가된 이상체가 위치하지 않는 곳에는 큰 제한이 가해져 기준 모델과 근접한 모델을 추정하는 반면, 이상체가 추가된 곳에는 작은 제한이 가해져 자료에 근거한 모델을 추정하여 개발된 시간경과 역산이 모델변수의 증감에 상관없이 이상체의 영상화에 효과적임을 알 수 있다.

개발된 시간경과 역산이 깊은 곳에 위치하여 분해능이 낮은

Fig. 7. Time-lapse model. (a) 3D model, (b) plan at $z = 20$ m and (c) section at $y = 50$ m.

이상체를 효과적으로 영상화할 수 있는지 살펴보기 위해 이상체의 깊이를 달리한 시간경과 모델에 대한 역산을 실시하였다. 시간경과 모델은 Fig. 7과 같이 기본 모델에 x -축 방향으로 $90 \sim 110$ m, y -축 방향으로 $40 \sim 50$ m, 심도 $10 \sim 20$ m 구간에 10 ohm-m의 저비저항 이상체를 추가하였고, x -축 방향으로 $150 \sim 170$ m, y -축 방향으로 $50 \sim 60$ m, 심도 $20 \sim 30$ m 구간에 1000 ohm-m의 고비저항 이상체를 추가하였다. 두 이상체의 크기는 모두 $20 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 이다.

시간경과 역산에는 증감을 고려한 교차모델 제한자와 분해능 교차모델 제한자를 사용하였으며, 역산 결과 전기비저항의 분포와 교차모델 제한자가 작은 영역을 Fig. 8에 나타내었다.

증감을 고려한 교차모델 제한자는 얇은 이상체에는 작은 제한을 가하여 역산 결과에 얇은 이상체를 뚜렷이 영상화한 반면 깊은 이상체에는 큰 제한을 가하여 기준 모델에 근접한 모델을 추정함으로써 역산 결과로부터 깊은 이상체를 확인하기 어렵다. 그러나 분해능 교차모델 제한자는 깊은 이상체에도 작은 제한을 가하여 깊은 곳에 위치한 이상체를 효과적으로 영

Fig. 8. Distribution of resistivity (left column) and iso-surface of low cross-model constraint (right column) in the inversion of the noise-free data using cross-model constraint based on the (a) change ratio and (b) resolution of model parameters.

상화하고 있다. 즉 분해능 교차모델 제한자는 분해능이 낮은 이상체의 영상화에 효과적임을 알 수 있다. 그러나 분해능 교차모델 제한자를 사용하여도 이상체의 크기가 작은 경우에는 깊은 곳에 위치한 이상체의 탐지에 실패하였으며, 분해능 교차모델 제한자를 사용한 시간경과 역산은 잡음에 취약한 것으로 나타났다. 그러므로 잡음이 포함된 현장 자료의 역산에 적용할 경우 주의가 필요할 것으로 판단된다.

현장 자료의 역산

모델변수의 증감을 고려한 교차모델 제한자를 사용한 시간경과 역산을 사용하여 방조제에서 얻은 3차원 전기비저항 모니터링 자료에 대한 역산을 수행하였다. 해당 방조제는 서해안에 위치하며 안정성과 그라우팅 효과의 평가를 위해 3차원 전기비저항 모니터링이 실시되었다. 해당 방조제는 해사를 사용해 축조된 방조제이므로 전반적으로 전기비저항이 매우 낮으며, 내사면의 얇은 곳에는 식생분포를 위한 성토로 인해 염분함량이 낮다. 사면의 마루부쪽 20 m는 완만한 경사를 이루며 그 이후 구간은 평지를 이루어 지형의 굴곡이 있는 영역에서 조사가 수행되었다. 1차 탐사는 2012년 7월 12일, 2차 탐사는 2012년 8월 23일, 3차 탐사는 2012년 9월 26일에 수행되었으며, 전기비저항 모니터링이 실시되기 이전에 조사영역의 일부 구간에 그라우팅이 시공되었다. 마루부와 해측 사면에는 사석 및 포장도로가 시공되어있어 전극 설치가 쉬운 호측 사면에서 자료를 획득하였다. 조사지역의 전기비저항이 매우 낮으므로 쌍극자 배열은 신호의 크기가 작아 적용이 어려우며, 단극배열은 원거리 접지의 어려움이 있다. 이러한 문제점의 해결을 위하여 이 조사에서는 변형된 단극 배열을 사용해 모니터링 자료를 획득하였다. 축선은 Fig. 9의 축선도에 표시된 바와 같이 길이 275 m의 가로축선 4개를 15 m 간격으로 설치하였으며, 길이 55 m의 세로 축선 10개를 25 m 간격으로 설치하였다. 측정간격은 모두 5 m로 하였다. 조사영역 내에서 그라우팅은 Fig. 8의 축선도에 표시된 직선을 따라 시공되었다.

자료처리에는 각 축선별로 얻은 2차원 전기비저항 탐사 자료들을 편집한 후 모든 자료를 모아 3차원 역산을 수행하였다. 1차 탐사 자료의 역산에 사용한 자료의 개수는 2,088개이며, 2

Fig. 9. Survey lines for 3D resistivity monitoring at a sea dike.

차 탐사의 경우 2,105개, 3차 탐사의 경우 2,049개의 자료를 역산에 사용하였다. 모델링 요소는 측정 간격을 4개의 요소로 분할하였으며, 심도 방향으로는 깊이가 증가할수록 요소의 크기를 증가시켰다. 역산블록은 4개의 모델링 요소를 한 블록으로 설정하였다. 탐사 자료의 역산에 사용된 모델링 요소는 283,200개이며, 역산블록의 수는 5,310개이다. 라그랑지 곱수는 ACB법에 근거하여 0.01 ~ 1.0의 범위로 설정하였으며, 시간경과 역산에 사용한 교차모델 제한자의 범위도 0.01 ~ 1.0으로 설정하여 제한자들 사이의 균형을 맞추었다. 반복 계산 횟수는 7회로 고정하였다.

Fig. 10은 모니터링 자료의 단독 역산 및 시간경과 역산을 통하여 추정된 전기비저항의 분포를 도시한 것이다. (a)는 1차 탐사 자료의 단독 역산 결과이며, (b)는 2차, (c)는 3차 탐사 자료의 시간경과 역산 결과이다. 시간경과 역산의 기준모델로 1차 탐사 자료의 단독 역산 결과를 사용하였다.

전반적으로 전기비저항이 낮으며, 얇은 곳에 얇은 층의 높은 전기비저항대가 분포하고 있다. 또한 세 결과 모두 비슷하여 육안으로 차이점을 구별하기 어렵다. 방조제는 전반적으로 전기비저항이 매우 낮다. 또한 축조 당시 다량의 해수를 포획하여 저비저항대 임에도 안정화 된 구간은 방조제의 안정성에 문제를 유발하지 않는다. 그러므로 방조제의 안정성 및 그라우팅 시공 효과의 평가를 위해서는 단순히 저비저항대를 파악하기보다는 시간이 경과함에 따라 저비저항대 영역이 확장되거나 전기비저항이 감소하는 영역을 파악하는 것이 효과적이다. 2차 및 3차 탐사의 역산 결과에서 3 ohm-m 이하의 저비저항대 중 기준모델과 비교하여 전기비저항이 3% 이상 감소한 영역을 Fig. 11에 나타내었다. 깊은 곳의 일부 구간을 제외하고는 전기비저항 감소영역 및 그 연결성이 뚜렷하지 않은 것으로 나타났다. 그러나 일부 그라우팅 시공구간에서 전기비저항

Fig. 10. Distribution of resistivity from the inversion of apparent resistivity data set measured at (a) July 12, (b) August 23, and (c) September 26, 2012, respectively. The model shown in (a) was obtained from the independent inversion of the data measured at July 12, 2012 and the model was used as a reference model in the time-lapse inversion of data set measured at August 23 and September 26, 2012.

Fig. 11. Distribution of the zones showing low (3 ohm-m) and decreased (3%) resistivity. The model (a) and (b) were obtained from the time-lapse inversion of data set measured at August 23 and September 26, 2012, respectively. The gray plane indicates a grouting surface.

감소영역이 확장된 것이 관찰되며, 이는 시간이 경과함에 따라 그라우팅 효과가 감소한 구간으로 해석되므로 지속적인 모니터링이 요구된다.

결론

3차원 전기비저항 및 모니터링 자료의 정밀한 영상화를 위한 시간경과 역산을 개발하였다. 개발된 시간경과 역산은 증감을 고려한 교차모델 제한자를 사용하여 모델변수의 증감에 관계없이 변화비에 따라 제한을 가하도록 하였다. 증감을 고려한 교차모델 제한자를 사용하여 기존의 변화비를 고려한 시간경과 역산에서 같은 변화비를 보이는 저비저항대보다 고비저항대가 저평가되던 문제점을 개선하였다. 일반적으로 전기비저항 탐사의 역산 시 분해능이 낮은 이상체의 영상화에는 어려움이 따른다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 분해능 교차모델 제한자를 사용하는 시간경과 역산법을 개발하였다. 분해능 교차모델 제한자는 분해능이 낮은 모델변수에 작은 가중을 가하여 분해능이 낮은 모델변수를 효과적으로 영상화하고자 하였다.

수치 실험을 통해 개발된 두 교차모델 제한자를 사용한 시간경과 역산이 기존의 해석 방법들의 문제점을 개선하여 3차원 전기비저항 모니터링 자료의 변화대를 효과적으로 영상화하는 것을 확인하였다. 그러나 분해능 교차모델 제한자를 사용한 시간경과 역산을 수행하더라도 깊은 곳에 위치한 이상체의 규모가 작을 경우 이상체의 영상화에 실패하였으며, 잡음에도 취약한 것으로 나타나 현장 자료의 해석에 적용할 경우 주의가 필요하다.

방조제의 안정성 및 그라우팅 효과의 평가를 위해 3차원 전기비저항 모니터링을 실시하여 얻은 자료를 개발된 증감을 고려한 교차모델 제한자를 사용하여 시간경과 역산을 수행하였다. 그 결과 해당 방조제에는 모니터링이 수행된 기간 동안 별다른 변화가 없는 것으로 나타나 현재까지는 안정성에 문제가 없는 것으로 판단되었다. 그러나 일부 깊은 구간에서 누수 우려가 있는 저비저항대가 확장되는 영역이 관찰되므로 방조제

의 유지관리를 위하여 모니터링 등의 추가적인 조사가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구 사업임(No. 2011-0002440). 또한 본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 2012H100100062)입니다.

참고문헌

- Ahn, H. Y., Jeong, J. H., Cho, I. K., Kim, J. H., and Bae, G. J., 2008, Application of resistivity monitoring with tunnel excavation area, *Tunneling Technology*, **10**(4), 405-420.
- Cassiani, G., Bruno, V., Villa, A., Fusi, N., and Binley, A. A., 2006, A saline trace test monitored via time-lapse surface electrical resistivity tomography, *Journal of Applied Geophysics*, **59**, 244-259.
- Cho, I. K., Kang, H. J., and Kim, K. J., 2006, Distortion of resistivity data due to the 3D geometry of embankment dams, *Geophysics and Geophysical Exploration*, **9**(4), 291-298.
- Cho, I. K., Lee, K. S., and Kang, H. J., 2010, 3D Effect of embankment dam geometry to resistivity data, *Geophysics and Geophysical Exploration*, **13**(4), 397-406.
- Chung, S. H., Kim, J. H., Yang, J. M., Han, K. E., and Kim, Y. W., 1992, Delineation of water seepage in earth-fill embankments by electrical resistivity method, *The Journal of Engineering Geology*, **2**(1), 47-58.
- Daily, W., A. Ramirez, A. Binley, and D. LeBrecque. 2004, Electrical resistance tomography, *Leading Edge*, **23**, 438-442.
- Day-Lewis, F. D., Singha, K., and Binley, A. M., 2005, Applying petrophysical models to radar travel time and electrical resistivity tomograms: resolution-dependent limitations, *Journal of Geophysical Research*, **110**, B08206, doi:10.1029/2004JB003569.
- Kemna, A., Vanderborght, J., Kulesa, B., and Vereecken, H.,

- 2002, Imaging and characterization of subsurface solute transport using electrical resistivity tomography (ERT) and equivalent transport models, *Journal of Hydrology*, **267**, 125-146.
- Kim, K. J., and Cho, I. K., 2011, Time-lapse inversion of 2D resistivity monitoring data with a spatially varying cross-model constraint, *Journal of Applied Geophysics*, **74**, 114-122.
- Kim, K. J., Cho, I. K., and Jeong, J. H., 2008, Time-lapse inversion of 2-D resistivity monitoring data, *Geophysics and Geophysical Exploration*, **11**(4), 326-334.
- 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**, 83-89.
- Slater, L. D., and Sandberg, S. K., 2000, Resistivity and induced polarization monitoring of salt transport under natural hydraulic gradients, *Geophysics*, **65**(2), 408-420.
- Loke, M. H., 1999, Time-lapse resistivity imaging inversion, *Proceedings of the 5th Meeting of the Environmental and Engineering European Section*, Em1.
- Menke, M. H., 1984, *Geophysical data analysis: discrete inverse theory*, Academic Press Inc.
- Miller, C. R., Routh, P. S., Brosten, T. R., and McNamara, J. P., 2008, Application of time-lapse ERT imaging to watershed characterization, *Geophysics*, **73**, G7-G17.
- Mitchell, V., and Knight, R., 2011, Inversion of time-lapse electrical resistivity imaging data for monitoring infiltration, *The Leading Edge*, **30**, 140-144.
- Nguyen, F., and Kemna, A., 2005, Time-lapse inversion of electrical resistivity data: Fall meeting 2005, *AGU*, Abstract #H13C-1346.
- Oldenborger, G. A., Knoll, M. D., Routh, P. S., and LaBrecque, D. J., 2007, Time-lapse ERT monitoring of an injection/withdrawal experiment in a shallow unconfined aquifer, *Geophysics*, **72**, F177-F188.
- Papadopoulos, N. G., Tsourlos, P., Tsokas, G. N., and Sarris, A., 2006, Two-dimensional and three-dimensional resistivity imaging in archaeological site investigation, *Archaeological Prospection Archaeol. Prospect.*, **13**, 163-181.
- Park, S. G., Kim, J. H., and Seo, G. W., 2005, Application of electrical resistivity monitoring technique to maintenance of embankments, *Geophysics and Geophysical Exploration*, **8**(2), 177-183.
- Park, S. G., Song, S. H., Choi, J. H., Choi, B. G., and Lee, B. H., 2002, Applicability of geophysical prospecting for water leakage detection in water utilization facilities, *Proceedings of the 4th special symposium, KSEG*, 179-195.
- Song, S. H., Yong, H. H., An, J. G., and Kim, G. P., 2003, Application of electrical and small-loop EM survey to the identification of the leachate at a waste landfill in jeiu island, *Geophysics and Geophysical Exploration*, **6**(3), 143-152.
- Yi, M. J., Kim, J. H., and Chung, S. H., 2003, Enhancing the resolving power of least-squares inversion with active constraint balancing, *Geophysics*, **68**, 931-941.
- Yi, M. J., Kim, J. H., Song, Y. H., and Chung, S. H., 2000, Dam seepage investigation using two- and three-dimensional resistivity surveys, *Proceedings of the 2nd special symposium, KSEG*, 41-53.