

자료 가중을 통한 전기비저항 탐사 자료의 역산

조인기* · 이근수 · 김연정 · 윤대성

강원대학교 지질 · 지구물리학과

Inversion of Resistivity Data using Data-weighting

In-Ky Cho*, Keun-Soo Lee, Yeon-Jung Kim, and Dae-Sung Yoon

Division of Geology and Geophysics, Kangwon National University

요약: 전기비저항 탐사 자료는 다양한 잡음을 포함하고 있다. 즉 전기비저항 자료는 높은 접촉저항, 장비의 측정 오차 및 주변의 불규칙한 전기적 잡음에 의해 영향을 받는다. 전기비저항 탐사 자료의 올바른 해석을 위해서는 이들 잡음의 정확한 추정이 요구된다. 이 연구에서는 상반성 시험을 통하여 추정된 잡음을 역산시 자료 가중에 반영하는 방법론을 제안하였다. 또한 역산시 현장 자료와 이론 자료 사이의 적합 오차와 상반성 오차를 분석하고, 상반성 오차와 적합 오차를 모두 이용하는 자료 가중법을 제안하였다. 현장 자료에 제안된 자료 가중법을 적용한 결과 통상적인 역산 결과에 비하여 국지적 이상대의 출현 빈도가 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

주요어: 전기비저항, 상반성, 잡음, 자료 가중

Abstract: All the resistivity data contain various kinds of noise. The major sources of noise in DC resistivity measurement are high contact resistance, measurement errors, and sporadic background noise. Thus, it is required to measure data noise to accurately interpret resistivity data. Reciprocal measurements can provide a measure of data precision and noise. In this study, we proposed a data-weighting method from reciprocity measurement. Furthermore, a data-weighting method using both the reciprocity error and data-misfit in the inversion process was studied. Applying the data-weighting method to the inversion of 3D resistivity data, it was confirmed that local anomalies are slightly suppressed in the final inversion results.

Keywords: resistivity, reciprocity, noise, data weighting

서 론

전기비저항 탐사법은 비파괴 검사법으로서 연속적인 지하의 전기비저항 분포 양상을 제공해 줄 수 있는 효과적인 방법으로 다양한 분야에 적용되어 그 효용성이 입증된 바 있다. 또한 전기비저항 탐사는 측정 장비와 해석 기법의 급속한 발달로 그 적용 분야를 급속하게 확장해 나가고 있다. 특히 최근의 전기비저항 측정 기기들은 신호를 측정하는데 그치지 않고, 잡음 수준까지도 측정하여 제공하고 있다. 국외의 경우 잡음이 해석

결과에 미치는 영향에 대한 다양한 연구가 수행된 바 있으며, 대부분 측정된 잡음의 역수를 자료 가중 행렬로 부가하는 방법을 사용하고 있다. 국내의 경우에는 An and Cho (2009)에 의하여 잡음을 고려한 역산에 관한 연구 결과가 보고된 바 있다. 그러나 아직도 잡음은 단순히 현장에서 자료의 질을 평가 하는데 사용되고 있으며, 이를 이용한 해석 기법에 관한 연구는 그 중요성에 비하여 매우 미미한 실정이다. 본 연구에서는 잡음의 측정 방법과 이를 이용한 자료 가중 행렬의 산출 방법을 제시하고, 3차원 전기비저항 탐사 자료에 대하여 개발된 해석 기법의 효율성을 분석하였다.

전기비저항 탐사에서 잡음의 측정은 매우 중요하다. 만약 잡음을 너무 작게 추정하게 되면 역산 결과에 많은 인위적 이상 영역이(artifact) 나타나게 되며, 실제보다 크게 설정하면 너무 부드러운 영상이 나타나 분해능이 낮아지게 된다(LaBrecque et al., 1996). 따라서 잡음을 부정확하게 추정할 경우 얻어지는 역산 결과는 실제 지하 모델과 차이를 보일 수 있으며, 이는 결국 해석 결과에 오류를 가져오게 된다. 전기비저항 탐사 자료에 나타나는 잡음원은 1) 전극 접지 상태의 불량, 2) 측정

Received: 21 January 2015; Final version Received: 13 February 2015;

Accepted: 23 February 2015

*Corresponding author

E-mail: choik@kangwon.ac.kr

Address: Division of Geology and Geophysics, Kangwon National University, Chuncheon, Kangwon-do, 200-701, Korea

©2015, 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.

장비의 불규칙 잡음, 3) 조사 지역의 산발적 전기적 잡음 등이 있다(Slater *et al.*, 2000; Slater *et al.*, 2002).

전기비저항 탐사 자료의 잡음을 측정하는 방법에는 반복성 시험(repeatability test)과 상반성 시험(reciprocity test)이 있다(Binley, *et al.*, 1995; Slater *et al.*, 2000). 우선 반복성 시험은 동일한 전극을 사용하여 다수의 자료를 획득하고, 이들 자료간의 반복성 정도를 측정하는 방법이다. 반면 상반성 시험은 전류 전극과 전위 전극의 위치를 서로 바꾸어 측정을 수행하고, 두 자료간의 차이를 잡음으로 간주하는 방법이다. 상반성 시험은 반복성 시험에서는 나타나지 않는 잡음을 측정할 수 있다는 장점이 있다. 예를 들어 전류 전극의 접지상태가 불량할 경우, 전류 주입량이 작아진다. 이는 결국 신호대 잡음비(signal to noise ratio)의 감소로 이어지며, 잡음 수준에 따라 불안정한 측정값을 보이게 된다. 이 경우 전류 전극과 전위 전극을 서로 바꾸어 측정하는 상반성 시험에서는, 충분한 전류량이 확보되지만 전위 전극의 큰 접촉 저항으로 인하여 실제 대지의 저항값에 비하여 매우 큰 값이 측정된다. 따라서 상반성 시험을 통하여 전극의 접지 상태를 점검할 수 있다. 물론 4개 전극의 접지 상태가 모두 양호할 경우에는 반복성 시험에서와 유사한 결과를 나타내게 된다. 그러나 이러한 잡음 측정 방법은 측정의 정밀도(precision)를 향상하는 것이지, 측정의 정확성(accuracy)을 보장하는 것은 아니다(LaBrecque *et al.*, 1996).

한편 국내에서 널리 사용되는 대부분의 전기비저항 탐사기는 반복 측정 즉 중첩(stack) 기능을 가지고 있으며, 대개 현장 조사에서는 2 ~ 4회 정도의 반복 측정을 수행한다. 또한 측정값의 표준 편차(standard deviation)를 제공한다. 물론 잡음이 극심한 지역의 조사에서는 반복 측정 회수를 증가시킬 수 있다. 하지만 이 표준 편차는 단지 자료가 양호한지 불량한지를 평가하는 기준으로만 사용되고 있으며, 실제 해석에는 거의 사용되고 있지 않는 실정이다. 이 논문에서는 상반성 시험을 통하여 추정된 잡음과 현장 자료와 이론 자료 사이의 적합 오차(data-misfit)를 사용하는 자료 가중법을 제안하고, 시험적으로 얻어진 현장 자료에 적용하여 그 효과를 분석하고자 하였다.

역산이론

일반적으로 반복적 최소 자승법(least-squares method)을 사용하는 물리 탐사 자료의 역산에서는 매 반복 단계에서 다음의 목적 함수 S 를 최소화하는 증분 벡터 Δp 를 구하게 된다.

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

여기서 e 는 측정 자료와 이론 자료 사이의 적합 오차, J 는 감도 혹은 Jacobian 행렬, W_d 와 W_m 은 각각 자료 벡터와 모델 변수에 가해지는 가중 행렬(weighting matrix)이다. 한편 (1)식에 주어진 목적 함수를 최소화 하는 증분 벡터는 (1)식의 목적 함수를 증분 벡터에 대하여 편미분하여 구해진다(Menke,

1984).

$$\Delta p = (J^T W_d^T W_d J + W_m^T W_m)^{-1} J^T W_d^T W_d e \quad (2)$$

최근의 역산 알고리즘에서 중요한 연구 대상은 주로 모델 변수에 제한을 가하는 모델 변수 가중행렬 W_m 이다. 이 모델 변수 가중행렬을 설정하는 방법에 따라 역산법은 여러 가지 방법으로 나누어진다(Constable *et al.*, 1987; Yi *et al.*, 2003). 그러나 자료에 가해지는 가중행렬 W_d 도 역산 결과에 지대한 영향을 미친다. 일반적으로 자료 가중 행렬은 자료의 잡음 수준으로 결정된다(Constable *et al.*, 1987).

$$W_d = [W_{ii}^d] = \text{diag} \left\{ \frac{1}{\varepsilon_1}, \frac{1}{\varepsilon_2}, \dots, \frac{1}{\varepsilon_M} \right\} \quad (3)$$

(3)식에서 M 은 자료의 수이며, ε_i 는 i 번째 자료의 불확실성(uncertainty) 혹은 자료의 잡음 수준과 관련된다(Constable *et al.*, 1987). 즉 잡음을 많이 함유한 자료는 역산 과정에서 작은 가중값을 가하여 역산 결과에 미치는 영향을 작게 해야 하며, 반대로 잡음이 없는 자료는 큰 가중값을 부여하여 역산 결과에 큰 영향을 미치도록 해야 한다. 문제는 잡음을 정량적으로 산출하는 방법이다. 잡음의 측정을 위해서 앞서 언급한 바와 같이 반복성 시험과 상반성 시험이 사용된다. 반복성 시험에서 얻어진 각 자료의 표준 편차는 대개 %값으로 주어진다. 반면 상반성 시험에서 얻어진 오차는

$$\varepsilon_i^{\text{measured}} = \frac{|d_i^{\text{forward}} - d_i^{\text{reverse}}|}{(d_i^{\text{forward}} + d_i^{\text{reverse}})/2} \times 100(\%) \quad (4)$$

로 순(forward)방향 및 역(reverse)방향으로 얻어진 두 측정값의 평균값에 대한 값 차이의 백분율로 정의하면 반복성 시험과 동일한 %값을 얻을 수 있다.

한편 최소 자승 역산은 (1)식에 주어진 바와 같이 이론 자료와 현장 자료 사이의 오차를 최소화하는 모델 변수를 구하는 방법이다. (2)식에 주어진 선형 방정식에서 나타난 바와 같이 오차가 커지면 증분 벡터 Δp 의 크기도 커지게 된다. 따라서 구하고자 하는 모델 변수는 오차가 큰 자료에 의해 크게 영향을 받는다. 만약 자료에 잡음이 포함되어 있지 않다면, 참 모델 변수를 추정할 수 있지만, 측정 잡음이 큰 자료의 경우에는 잡음에 의해 오차가 증가하고, 결과적으로 역산에서 추정되는 모델 변수는 잡음에 오염된 자료에 의해 크게 영향을 받게 된다.

이론 자료와 현장 자료간의 오차가 작다는 것은 역산에서 추정한 지하 모델 즉 추정 모델이 지하 참 모델에 가깝다는 것을 의미한다. 그러나 이는 현장 자료에 잡음이 없을 경우에 국한된다. 만약 잡음에 오염된 자료의 경우에는 역산에서 추정된 모델이 참 모델에 근접한다고 해도 오차가 작게 나타나지 않는다. 대개 물리 탐사 자료의 역산에서 사용되는 모델링에서는

지하 모델에 대한 이론 자료를 매우 정확하게 계산한다. 물론 지하 모델의 차원, 요소 분할의 크기 등에 의해 이론 자료는 현장 자료와 차이를 보일 수 있으나, 이 문제는 여기서는 무시하기로 한다. 반복적 비선형 역산에서 반복 계산 회수가 증가해도 오차가 감소하지 않는 자료는 잡음에 의해 오염되어 있을 가능성이 큰 자료라 할 수 있다. 즉 역산의 관점에서는 자료의 불확실성이 큰 자료로 생각할 수 있다(Kim, 2014).

결과적으로 자료의 불확실성은 현장 자료에 포함된 잡음에 의해서 좌우되며, 이들 잡음은 역산 결과에 지대한 영향을 미치게 된다. 또한 역산 과정에 오차가 크게 나타나는 자료는 잡음에 오염된 자료일 가능성이 높다. 이러한 가정을 바탕으로 여기서는 다음과 같은 자료 가중법을 제안한다.

$$W_{ii}^d = \begin{cases} \frac{e_{rms}}{e_{rms} + |e_i - e_{rms}|} \cdot \frac{\varepsilon_{avg}}{\varepsilon_{avg} + |\varepsilon_i - \varepsilon_{avg}|}, & \text{if } e_i > e_{rms} \text{ and } \varepsilon_i > \varepsilon_{avg} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

(5)식에서 e_{rms} 는 각 반복 단계에서의 rms 오차, e_i 는 i 번째 자료의 적합 오차이며, ε_{avg} 는 상반성 오차의 평균값, ε_i 는 i 번째 자료의 상반성 오차이다. 따라서 $e_i > e_{rms}$ 이고 $\varepsilon_i > \varepsilon_{avg}$ 인 자료에는 작은 가중값을 부여하며 나머지 자료에는 $W_{ii}^d = 1$ 을 부여하게 된다. 한편 상반성 시험에서는 순방향과 역방향 자료가 존재하며, 역산에서는 대개 이중 하나의 자료를 선택하여 사용한다. 자료 선택 기준은 순방향과 역방향 자료 중 반복성 시험 오차가 작은 값을 우선적으로 사용하였으며, 그 차이가 없을 경우에는 전류 주입량이 큰 자료를 사용하였다.

자료분석

제안된 자료 가중법의 효과를 시험하기 위하여 강원도 모처에 소재하는 쓰레기 매립장에서 전기비저항 3차원 탐사를 수

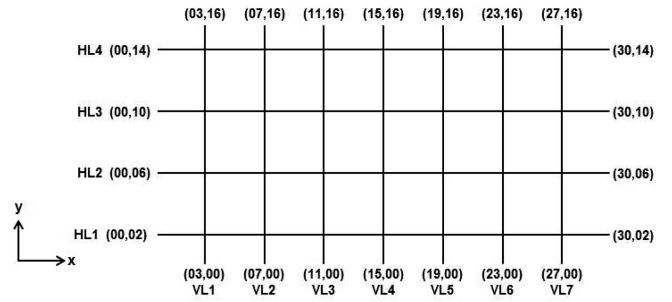


Fig. 1. Survey lines for 3D resistivity survey.

행하였다. 측선은 x 방향으로 길이 30 m인 4개 측선, 그리고 y 방향으로 길이 16 m인 7개 측선을 설정하였다. 모든 측선에서 측정 간격은 2 m, 측선 간격은 4 m로 설정하였으며, 쌍극자 배열을 사용하여 자료를 획득하였다. 모든 자료에 대하여 상반성 시험을 수행하였다. Fig. 1은 측선도를 나타낸 것이다.

Fig. 2는 상반성 오차와 최소 자승 역산에서 나타나는 자료의 적합 오차를 도시한 것이다. Fig. 2(a)는 자료 가중을 가하지 않은 일반적인 역산 결과이며, (b)는 (5)식에 의하여 자료 가중을 가한 역산 결과이다. 자료 가중을 가하지 않은 역산에서 최종 rms 오차는 4.9%로 나타났으며, Fig. 2에서 rms 오차보다 큰 적합 오차를 보이는 영역은 음영으로 표시하였다.

Fig. 2에 나타난 바와 같이 상반성 오차와 역산에서 계산된 적합 오차 사이의 상관 관계는 크지 않아 보인다. 즉 상반성 오차가 작은 자료도 큰 오차를 보일 수 있으며, 상반성 오차가 큰 자료도 작은 오차를 보일 수 있다. 그러나 Fig. 2(a)에서 상반성 오차가 10% 이상인 자료는 대개 큰 자료 적합 오차를 나타내고 있다. 즉 상반성 오차가 작다고 적합 오차가 작은 것은 아니지만, 적어도 상반성 오차가 큰 경우에는 적합 오차가 증가하는 양상을 보이고 있다. Fig. 2(b)는 (5)식에 의해 자료 가중을 가한 역산 결과이다. 이 경우에도 상반성 오차가 10% 이

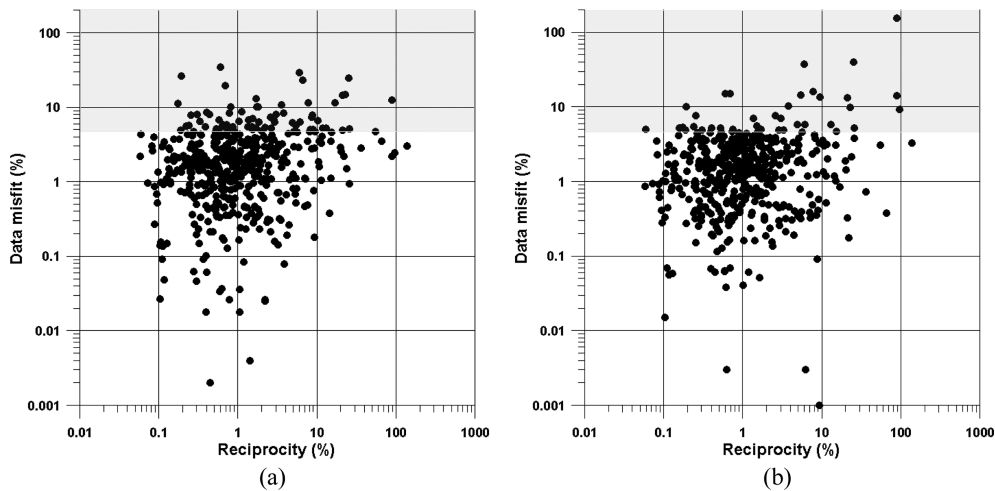


Fig. 2. Scatter plots of reciprocity error vs data misfit; (a) Conventional inversion, (b) Data-weighted inversion. The shaded region represents where data misfit is larger than the final rms error of the conventional inversion.

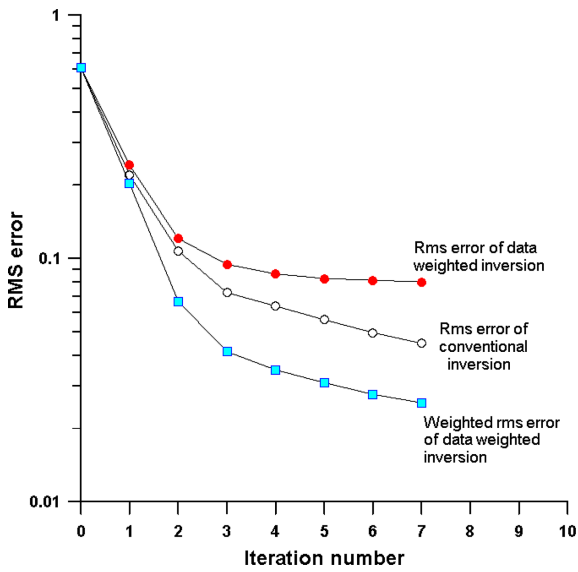


Fig. 3. Plots of RMS errors with the increase of the iteration number.

상인 자료의 상당수가 큰 역산 오차를 보이며, 이들 자료의 적합 오차는 자료 가중을 가하지 않은 역산 결과에 비하여 오히려 증가한 것을 알 수 있다. 반면 rms 오차보다 작은 적합 오차를 보이는 자료의 수는 크게 증가하였다. 결과적으로 자료 가중을 가한 역산에서는 상반성 오차 및 적합 오차가 큰 자료에 대하여 작은 가중값을 부여하였기 때문에 이들 자료 중 일부의 적합 오차는 증가한 대신에, 나머지 대다수 자료의 적합 오차는 오히려 감소한 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 각 반복 계산 회수에 따른 rms 오차를 나타낸 것이다. 자료 가중을 가하지 않은 rms 오차(4.9%)에 비하여 자료 가중을 가한 역산의 rms 오차(8.9%)가 증가한 것을 알 수 있다. 반면 가중값을 고려한 rms 오차(2.6%)는 일반적인 역산의 rms 오차에 비하여 크게 감소하였다. 이는 자료 가중을 가할 경우 몇몇 잡음에 의해 크게 오염된 자료의 영향으로 전체적인 rms 오차는 증가하였으나, 오염된 자료가 역산에 미치는 영향을 작게 할 경우에는 오히려 rms 오차가 감소함을 의미한다. 만약 자료의 편집을 통하여 이들 자료를 제거한 후 자료 가중을 가하지 않은 일반적인 역산을 수행한다면 rms 오차가 비슷하거나 오히려 더 작은 역산 결과를 얻을 수 있을 것이다. 그러나 이러한 인위적인 자료의 편집은 해석자의 주관에 크게 의존해야 하며, 3차원 역산의 경우에는 자료의 수가 매우 많기 때문에 시간이 많이 걸린다는 단점이 있다.

Fig. 4는 전기비저항 탐사 자료에 대한 3차원 역산 결과로 30 ohm-m 이상의 높은 전기비저항대를 영상화한 결과이다. Fig. 4(a)는 자료 가중을 가하지 않은 일반적인 역산 결과이며, (b)는 자료 가중을 가한 역산 결과이다. 전반적으로 두 영상이 거의 유사한 양상을 보이고 있다. 그러나 자료 가중을 가한 역산 영상이 일반적인 역산 영상에 비하여 조금 더 부드럽게 변

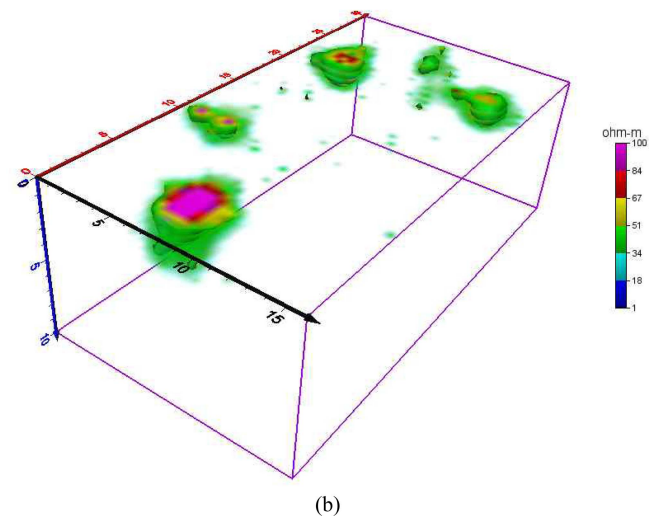
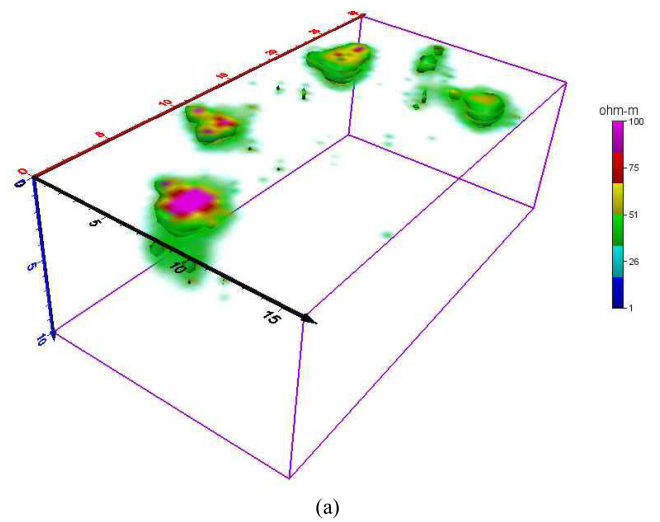


Fig. 4. Volume-rendered resistivity distribution (higher than 30 ohm-m); (a) Conventional inversion. (b) Data-weighted inversion.

화하는 것을 알 수 있으며, 국지적인 전기비저항 이상대도 줄어들 것을 확인할 수 있다. 이는 잡음에 오염된 자료가 불규칙적이기 때문에 이들 자료에 의해 생성되는 국지적인 이상대가 강력한 자료 가중에 의해 그 영향이 감소한 것으로 판단된다.

Fig. 5는 자료 가중의 효과를 분석하기 위하여 심도 0.25 m에서의 전기비저항 분포 양상을 도시한 것이다. 심부의 자료는 두 역산 결과가 거의 차이를 보이지 않아 0.25 m 심도에서의 값을 도시하였다. 일반 역산 결과인 Fig. 5(a)의 경우에 비하여 자료 가중 역산 결과인 Fig. 5(b)에서 국지적인 소규모 이상대의 발생 빈도가 어느 정도 줄어든 것을 확인할 수 있다. 또한 큰 규모의 이상대는 자료 가중을 하지 않은 경우에 비하여 응집(focused)된 영상으로 나타나고 있다. 이 경우에는 자료의 질이 좋아 그 차이가 크지 않지만 자료의 질이 나쁜 자료가 많을 경우에는 자료 가중 역산의 효과는 더 커질 것으로 기

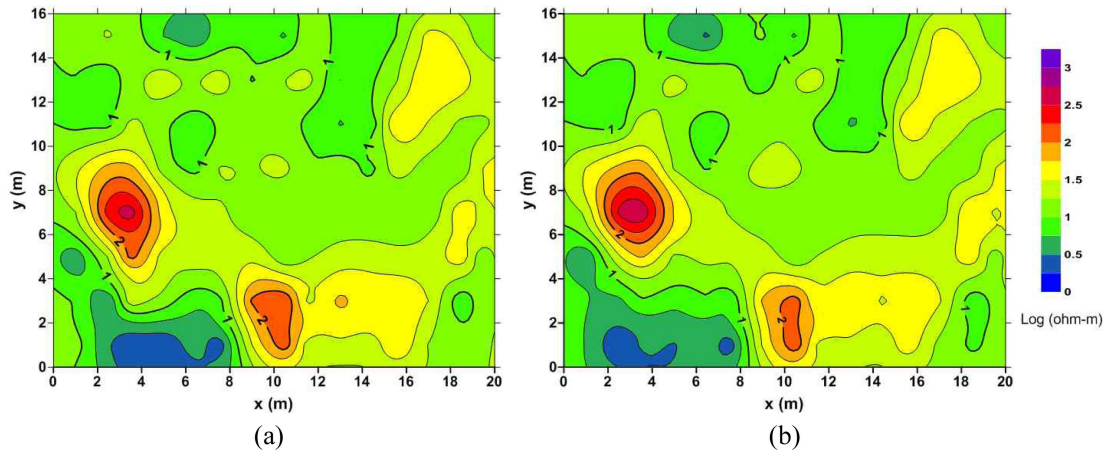


Fig. 5. Resistivity distribution at the depth of 0.25 m; (a) Conventional inversion. (b) Data-weighted inversion.

대된다.

결론

일반적으로 전기비저항 탐사 자료의 역산 이전에 편집과정을 통하여 잡음에 오염된 혹은 신뢰도가 낮은 자료를 제거하게 된다. 그러나 이러한 인위적인 자료의 편집은 해석자의 주관에 크게 의존해야 하며, 3차원 역산의 경우에는 자료의 수가 매우 많기 때문에 시간이 많이 걸린다는 단점이 있다. 이 연구에서는 자료 가중을 이용하는 전기비저항 탐사 자료의 3차원 역산을 시도하였다. 자료에 포함된 잡음 수준은 상반성 시험을 통하여 추정하였으며, 매 반복 과정에서 현장 자료와 이론 자료 사이의 자료 적합 오차를 함께 고려하는 자료 가중법을 제안하였다. 현장자료에 대한 분석 결과 상반성 오차와 역산 오차는 상관성이 거의 없는 것처럼 나타났다. 그러나 상반성 오차가 일정값 이상이 되는 자료는 대개 큰 자료 적합 오차를 나타내었다. 이는 적어도 상반성 오차가 큰 자료는 많은 잡음을 내포한 자료로 해석할 수 있는 근거가 된다. 따라서 자료 적합 오차가 크고 상반성 오차가 큰 자료는 잡음으로 판단하는 것이 효과적으로 보인다. 실제 현장 자료에 제안된 자료 가중을 적용한 결과 rms 오차보다 작은 적합 오차를 보이는 자료의 수는 크게 증가하였다. 이는 역산 결과가 많은 수의 자료에 의하여 추정된 것을 의미하며, 일부 잡음에 오염된 자료가 역산에 미치는 영향이 감소한 것으로 해석할 수 있다. 물론 자료 가중을 가하지 않은 역산 결과에 비하여 전체적인 rms 오차는 증가하는 문제점이 있다. 한편 이 연구에서 제안된 자료 가중을 정량적으로 추정하는 방법은 하나의 예이며, 다양한 방법이 적용 가능할 것으로 판단된다. 향후 다양한 자료 가중법이 개발된다면 잡음을 보다 효과적으로 처리할 수 있는 역산 기법의 개발이 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 2014년 토양·지하수 오염방지 기술개발사업에서 지원받았습니다. 또한 2014년도 강원대학교 학술연구조성비로 연구하였습니다(과제번호-C1010772-01-01).

References

- An, D. K., and Cho, I. K., 2009, Inversion of resistivity data considering data noise, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources*, **46**(5), 546-552.
- Binley, A., Ramirez, A., and Daily, W., 1995, Regularised image reconstruction of noisy electrical resistance tomography data, *The 4th workshop of the European Concerted Action on Process Tomography*, Bergen, Norway.
- Constable, S. C., Parker, R. L., and Constable, C. G., 1987, Occam's inversion: a practical algorithm for generating smooth models from EM sounding data, *Geophysics*, **52**, 289-300.
- Kim, J. H., 2014, Admittance inversion of GPR data, *4D and HD Geophysics Workshop*, KIGAM, Korea.
- LaBrecque, D., J., Milletto, M., Daily, W., Ramirez, A., and Owen, E., 1996, The effects of noise on Occam's inversion of resistivity tomography data, *Geophysics*, **61**, 538-548.
- Menke, W., 1984, *Geophysical data analysis: Discrete inverse theory*, Academic Press Inc.
- Slater, L., Binley, A., Cassiani, G., Birken, R., and Sandberg, S., 2002, A 3D study solute transport in a large experimental tank, *Journal of Applied Geophysics*, **49**, 211-229.
- 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**, 85-102.
- 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.