

## 주 대상체 강조법에 의한 소형루프 전자탐사 자료의 역산

조인기<sup>1\*</sup> · 강미경<sup>1</sup> · 김기주<sup>1</sup>

<sup>1</sup>강원대학교 지구물리학과

### Inversion of Small Loop EM Data by Main-Target Emphasizing Approach

In-Ky Cho<sup>1\*</sup>, Mi-Kyung Kang<sup>1</sup> and Ki-Ju Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kangwon National University, Dept. Geophysics

**요 약:** 지질잡음, 특히 이들이 천부에 위치할 경우 물리탐사자료의 해석에 상당한 문제가 된다. 따라서 이들 지질잡음을 효과적으로 억제해야만 조사지역내의 주된 이상체를 정확하게 탐지해 낼 수 있다. 물리탐사자료의 역산에서 천부에 존재하는 물성대비가 크지 않은 소규모 이상체는 지질잡음의 하나로 생각할 수 있다. 현재 물리탐사 자료의 역산에는 평활화 제한 최소자승법이 널리 사용되고 있다. 이 방법은 물성대비가 큰 모델변수에는 강한 제한을 가하고, 작은 모델변수에는 약한 제한을 가한다. 따라서 천부에 존재하는 소규모 이상체(지질잡음)를 제거하는 데는 한계가 있다. 본 연구에서는 큰 모델변수에는 작은 제한을, 작은 모델변수에는 강한 제한을 가하는 새로운 MTE 역산법을 개발하였으며, 이 방법은 천부의 소규모 이상체의 억제에 효과적이다. 개발된 역산 방법을 소형루프 전자탐사자료의 2.5차원 역산에 적용한 결과 천부의 소규모 이상체를 효과적으로 억제하고 주 대상체를 보다 선명하게 나타내는 영상을 얻을 수 있었다.

**주요어:** 최소자승법, MTE 역산법, 소형루프 전자탐사

**Abstract:** Geologic noise, especially located at shallow depth, can be a great obstacle in the interpretation of geophysical data. Thus, it is important to suppress geologic noise in order to accurately detect major anomalous bodies in the survey area. In the inversion of geophysical data, model parameters at shallow depth, which have small size and low contrast of physical property, can be regarded as one of geologic noise. The least-squares method with smoothness constraint has been widely used in the inversion of geophysical data. The method imposes a big penalty on the large model parameter, while a small penalty on the small model parameter. Therefore, it is not easy to suppress small anomalous boies. In this study, we developed a new inversion scheme which can effectively suppress geologic noise by imposing a big penalty on the slowly varying model parameter and a small penalty on the largely varying model parameter. We call the method MTE (main-target emphasizing) inversion. Applying the method to the inversion of 2.5D small loop EM data, we can ensure that it is effective in suppressing small anomalous boies and emphasizing major anomalous bodies in the survey area.

**Keywords:** least-squares method, MTE inversion, small loop EM

## 서 론

물리탐사자료의 역산에는 최소자승법이 널리 사용되고 있다. 하지만 대부분의 물리탐사 문제는 비선형, 비유일해 문제를 갖고 있으므로 안정적인 역산을 위해서는 모델제한자를 사용한다. 이 모델제한자는 초기에는 주로 역산의 안정적 수렴을 위하여 도입되었으나, 근자에는 보다 지질학적으로 의미 있는 결과도출을 위한 방법으로 확대 발전해 나가고 있다.

Constable *et al.* (1987)은 모델변수의 공간적 변화량을 최소화하는 평활화 제한법을 제안하였으며, Yi *et al.* (2003)은 모델변수의 분해능에 따라 공간적으로 변화하는 모델제한자 선정방법에 관하여 연구하였다. 이들 방법은 모두 공간적으로 부드럽게 변하는 모델변수를 추정하게 된다. 반면 Portniaguine and Zhdanov (1999)는 모델변수의 변화영역을 최소화하는 MGS (minimum gradient support)법을 제안하였다. 평활화 제한법이 모델변수의 공간적 변화량을 제한하여 부드러운 영상 (smooth image)을 얻는 방법인데 반하여, MGS법은 모델변수가 변하는 공간영역을 최소화하여 선명한 영상(focused image)을 얻어내는 방법이다. 이들 두 방법은 서로 상반되는 개념인 것으로 생각할 수도 있으나, MGS법이 발산을 방지하기 위한 상수 값의 크기가 작을 경우에는 평활화 제한법과 동일한 의

2006년 10월 11일 접수; 2006년 11월 8일 채택

\*Corresponding author

E-mail: choik@kangwon.ac.kr

Address: Department of Geophysics, Kangwon National University, Chunchon, Kangwon-Do, Korea

미를 가지므로(Portniaguine and Zhdanov, 1999) MGS법은 평활화 제한법의 변형된 형태로 해석할 수도 있다.

일반적으로 물리탐사에서 송수신원으로부터 가까운 거리에 있는 이상체는 물성대비가 작거나 그 크기가 작다고 해도 자료에 미치는 영향이 매우 크며, 역산결과에 과장되어 나타나기도 한다. 작은 물성대비, 소규모의 특징을 갖는 이상체는 소위 지질잡음중의 하나로 간주할 수 있으며, 이들 천부의 소규모 이상체는 결과적으로 역산결과의 해석을 어렵게 하는 요인 중의 하나가 될 수 있다. 하지만 평활화 제한법은 물성대비가 작은 경우에는 작은 제한을, 클 경우에는 큰 제한을 가하여 부드러운 영상을 얻어내는 방법이다. 따라서 천부에 존재하는 물성대비가 작은 소규모 이상체(지질잡음)에 의한 영향을 제거하는 데는 한계가 있다.

이러한 소규모 이상체의 제거에는 물성대비가 작은 이상체에는 큰 제한을 가하고, 큰 이상체에는 작은 제한을 가하는 방법이 효과적일 수 있다. 본 연구에서는 이러한 제한을 가하는 모델제한자를 기존의 ACB법에 추가하여 적용함으로써 물성대비가 작은 이상체의 출현을 억제하고 주 대상 이상대를 강조하는 MTE (main target emphasizing) 역산법을 개발하였다. 또한 개발된 MTE 역산법을 소형루프 전자탐사자료의 2차원 역산에 적용하여 그 효용성을 타진하였다.

## 역산 이론

일반적으로 최소자승법을 사용하는 물리탐사자료의 역산에서는 다음의 목적함수  $S$ 를 최소화하는 증분벡터  $\Delta p$ 를 반복적 방법을 통하여 구하게 된다.

$$S = \|\mathbf{W}_d(\mathbf{e} - \mathbf{J}\Delta p)\|^2 + \|\mathbf{W}_m\Delta p\|^2 \quad (1)$$

여기서  $\Delta p$ 는 모델증분벡터,  $\mathbf{e}$ 는 측정자료와 이론자료 사이의 오차벡터(data misfit),  $\mathbf{J}$ 는 Jacobian 행렬,  $\mathbf{W}_d$ 와  $\mathbf{W}_m$ 은 각각 자료벡터와 모델변수에 가해지는 제한자(constraint), 즉 가중행렬(weighting matrix)이다. 최근의 역산 알고리즘에서 중요한 연구대상은 주로 모델변수에 제한을 가하는 모델제한자  $\mathbf{W}_m$ 의 설정방법으로 평활화 제한법(Constable *et al.*, 1987), MGS법(Portniaguine and Zhdanov, 1999), ACB법(Yi *et al.*, 2003)등이 있으며, 이들 방법은 모두 크게는 평활화 제한법 내지는 변형된 평활화 제한법이라 할 수 있다.

한편 평활화 제한법은 근본적으로 물성대비가 큰 이상대에는 강한 제한을 가하고, 작은 이상대에는 약한 제한을 가하여 부드러운 영상을 획득하는 방법이다. 하지만 경우에 따라서는 오히려 그 반대의 경우가 보다 확실하고 선명한 영상을 제공할 수도 있다. 즉 물성대비가 작은 이상체에는 큰 제한을 가하고, 큰 이상체에는 작은 제한을 가하는 방법은 조사영역내의 물성대비가 큰 이상체의 탐지에 효과적일 수 있다. 본 연구에서는 이러한 가정을 만족하는 목적함수

$$S = \|\mathbf{W}_d(\mathbf{e} - \mathbf{J}\Delta p)\|^2 + \|\mathbf{W}_\beta\Delta p\|^2, \text{ where } \mathbf{W}_\beta = \frac{\beta}{\sqrt{\Delta p^2 + \beta^2}} \quad (2)$$

를 도입한다. (2)식에서 가중함수  $\mathbf{W}_\beta$ 는 다음과 같은 특성을 갖는다. 우선  $(\Delta p)^2 \gg \beta^2$  일 경우에는  $\mathbf{W}_\beta \rightarrow 0$ 이 되며,  $(\Delta p)^2 \ll \beta^2$  일 경우에는  $\mathbf{W}_\beta \rightarrow 1$ 이 된다. (2)식에서  $\mathbf{W}_\beta \rightarrow 0$  일 경우에는 모델변수에 제한을 전혀 가하지 않게 되며,  $\mathbf{W}_\beta \rightarrow 1$  일 경우에는 최대의 제한이 가해진다. 이는 증분벡터  $\Delta p$ 가 큰 경우에는 작은 제한을, 작을 경우에는 큰 제한을 가하는 방법이다. 따라서 미세한 변화를 보이는 모델변수의 변화는 억제하고, 큰 변화를 보이는 모델변수의 변화만을 강조하게 되므로, 보다 선명한 영상을 도출하게 된다.

하지만 모델변수의 증분벡터가 큰 값을 가진다고 해서 분해능이 높은 것이 아니기 때문에 역산과정에서 발산의 위험이 존재하게 된다. 즉 분해능이 낮고 증분벡터가 클 경우에는 모델제한자가 0값을 가지므로 발산의 위험성이 높게 된다. Portniaguine and Zhdanov (1999)는 이러한 문제점을 극복하기 위하여 인위적으로 모델변수의 상하한 값을 부여하는 방법을 도입하고 Focusing 역산법이라 명명하였다. 하지만 이 경우 지하 매질의 물성에 대한 정보가 없을 경우에는 적절한 범위를 결정하는데 어려움이 있다. 여기서는 이의 방지를 위하여 다음의 목적함수를 제안한다.

$$S = \|\mathbf{W}_d(\mathbf{e} - \mathbf{J}\Delta p)\|^2 + \|\mathbf{W}_m\Delta p\|^2 + \|\mathbf{W}_\beta\Delta p\|^2 \quad (3)$$

(3)식의 목적함수에서는 2개의 모델제한자를 적용한다.  $\mathbf{W}_m$ 은 ACB법에 의한 라그랑지 곱수 행렬이며,  $\mathbf{W}_\beta$ 는 증분벡터의 크기에 따른 모델제한자이다. 즉  $\mathbf{W}_m$ 은 모델변수의 분해능에 따른 평활화 제한자로 부드러운 영상을 도출하게 되며,  $\mathbf{W}_\beta$ 는 증분벡터의 크기에 따른 제한자로서 보다 선명한 영상의 산출에 기여하게 된다.

한편 (2)식에 주어진 바와 같이  $\mathbf{W}_\beta$ 는 각 반복계산(iteration)에서 미지수인 증분벡터  $\Delta p$ 를 분모에 포함하고 있다. 원칙적으로 따지자면 목적함수를 최소화하는 증분벡터를 구하기 위해서는  $\mathbf{W}_\beta$ 가  $\Delta p$ 의 함수이므로  $\Delta p$ 에 대한 미분을 수행해야 하지만 여기서는 계산상의 편의를 위하여  $\mathbf{W}_\beta$ 를 상수로 간주한다. 이 경우 증분벡터

$$\Delta p = (\mathbf{J}^T \mathbf{W}_d^T \mathbf{W}_d \mathbf{J} + \mathbf{W}_m^T \mathbf{W}_m + \mathbf{W}_\beta^T \mathbf{W}_\beta)^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{W}_d^T \mathbf{W}_d \mathbf{e} \quad (4)$$

가 된다.

하지만 증분벡터  $\Delta p$ 의 값이 결정되지 않았으므로  $\mathbf{W}_\beta$ 를 계산할 수 없다는 문제점이 있다. 이 문제는 ACB 역산에서 모델분해행렬(model resolution matrix)을 계산하는 과정에서 추정된  $\Delta p$ 를 사용하면 해결할 수 있다. 즉 ACB 법의 모델분해행렬 계산 시 얻어지는 증분벡터  $\Delta p$ 는

$$\Delta p = (\mathbf{J}^T \mathbf{W}_d^T \mathbf{W}_d \mathbf{J} + \lambda \mathbf{C}^T \mathbf{C})^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{W}_d^T \mathbf{W}_d \mathbf{e} \quad (5)$$

가 되며(Yi *et al.*, 2003), 이 증분벡터  $\Delta p$ 를 사용하여  $W_\beta$ 를 계산할 수 있다. 여기서  $\lambda$ 는 라그랑지 곱수,  $C$ 는 모델변수의 공간적 1차 혹은 2차 미분을 의미하는 roughness 행렬이다. 이 방법은 별도의 계산 없이 ACB법의 역산과정에 포함시킬 수 있다는 장점이 있다.

또 한 가지의 문제점은  $W_m$ 과  $W_\beta$ 의 크기를 결정하는 문제이다. (3)식에 주어진 목적함수는 두 개의 모델제한자를 사용한다. 따라서 이들 모델제한자는 서로 균형(balancing)을 이루어야 하며, 너무 한 쪽이 클 경우에는 두 개의 제한자를 사용하는 의미가 없어진다. ACB법에서 모델제한자  $W_m$ 의 범위는 대개 0.01~1.0 정도의 범위내의 값을 부여한다. 물론 양질의 자료일수록  $W_m$ 의 하한값을 작게 설정할 수 있으며, 하한값이 클수록 보다 부드러운 영상을 산출하게 된다. (2)식에서  $W_\beta$ 의 크기는  $\beta \geq 0$  일 경우 항상 0.0~1.0 사이의 값을 가지므로 두 제한자의 균형에는 크게 문제가 없을 것으로 판단된다.

$W_\beta$ 의 크기는 증분벡터  $\Delta p$ 의 크기와  $\beta$ 에 의해 결정된다. 물론  $\beta$ 가 작을수록 선명한 영상을, 클수록 부드러운 영상을 얻게 된다. 따라서  $\beta$ 에는  $\Delta p$ 가 작을 경우에는 큰 값을, 클 경우에는 작은 값을 부여해야만 선명한 영상을 얻을 수 있으며, 작은 크기의 이상을 억제할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 특성을 고려하여 다음과 같이  $\beta$ 를 결정하였다.

$$\beta_j = \lambda_{\min} + \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{\Delta p_{\max} - \Delta p_{\min}} (\Delta p_{\max} - \Delta p_j), j = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

여기서  $\lambda_{\min}$ 과  $\lambda_{\max}$ 는 ACB법에서의 라그랑지 곱수  $\lambda$ 의 범위이다. (6)식에서  $\Delta p_j = \Delta p_{\max}$ 일 경우  $\beta = \lambda_{\min}$ ,  $\Delta p_j = \Delta p_{\min}$ 이면  $\beta = \lambda_{\max}$ 되어,  $\Delta p$ 가 크면  $\beta$ 는 작은 값을,  $\Delta p$ 가 작을수록  $\beta$ 는 큰 값을 갖게 된다. 이제 (6)식에 의해 결정된  $\beta$ 를 사용하

면  $W_\beta$ 는  $\Delta p$ 가 작을 경우에는 1에 가까운 값을, 클 경우에는 0에 가까운 값을 보이게 된다. 따라서 이 모델제한자는 주변의 모델변수에 비하여 미세한 변화를 보이는 모델변수는 주변값과 유사한 값을 갖도록 억제하고, 큰 변화량을 보이는 모델변수를 강조하여 보다 선명한 영상을 제공해 준다. 결국 이 방법은 역산시 역산영역내의 미약한 이상체를 억제하고 주된 이상체의 위치를 보다 확실하게 추정할 수 있는 선명한 영상을 제공해 줄 것이다.

### 소형루프 전자탐사 자료의 역산

2.5차원 소형루프 전자탐사법 이론자료를 사용하여 역산을 수행하였다. 사용된 송수신 배열은 HCP 배열이다. 이론자료의 계산에는 확장된 Born 근사법(extended Born approximation)을 사용하였다(Habashy *et al.*, 1993; Torres-Verdin and Habashy, 1995; 조인기, 서정희, 1998; 조인기, 심현미, 1998). 모델링에서는 이상체를 1 m×1 m 크기의 정사각형 형태의 블록으로 분할하였으며, Geophex 사의 GEM2H 장비를 고려하여 송수신 간격은 2.05 m, 측정간격은 2 m, 측선의 길이는 200 m로 설정하였다. 송수신기는 모두 지표면에 위치하는 것으로 가정하였으며, 사용 주파수는 대수적으로 균등한 간격으로 1 kHz~50 kHz 사이의 주파수 10개를 사용하였다. 따라서 총 자료수는 동상과 이상성분을 모두 사용하였으므로 101×10×2개이다. 이상체는 78~80 m 지점과 120~122 m 지점의 심도 2 m에서 10 m 까지 5 ohm-m의 전도성 이상체가 100 ohm-m의 균질매질에 위치하는 것으로 가정하였다(Fig. 1).

역산에서는 수평방향은 2 m 간격으로, 심도방향으로는 심도가 증가할수록 블록의 크기를 증가시켰으며, 분할 개수는 8개

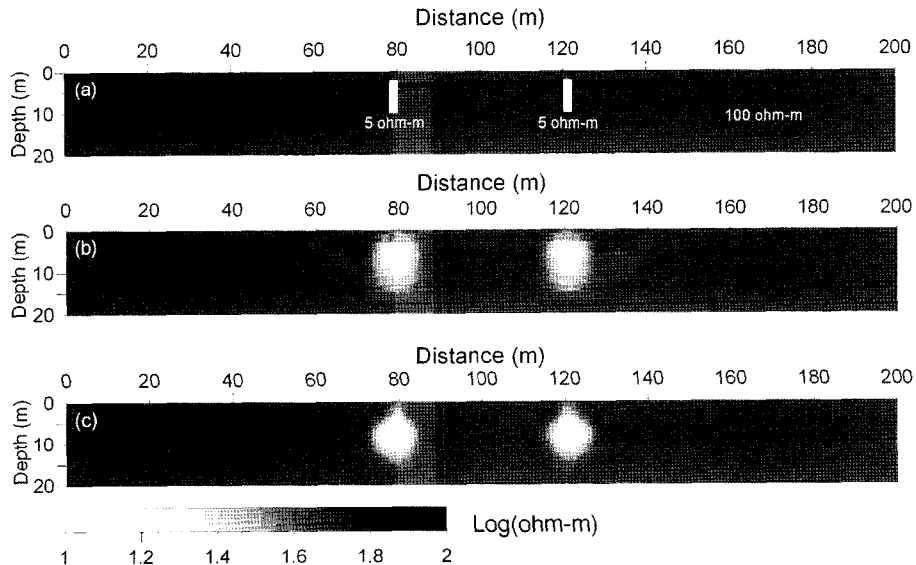


Fig. 1. True resistivity model (a) and inverted resistivity images by ACB (b) and MTE (c) approach. The image from MTE approach shows sharper boundaries and higher resistivity contrast than that from ACB approach.

이다. 축선의 양쪽 끝에는 각각 3개의 블록을 추가 설정하였다. 따라서 역산블록의 수는  $107 \times 8$  개이다. 역산에서 라그랑지 곱수의 범위는 0.05 ~ 1.0 을 부여하였으며, 적용된 역산법은 ACB법과 본 연구에서 개발된 MTE법을 모두 적용하였다. 모델링과 역산시 계산상의 편의를 위하여 무한공간(whole space)을 가정하였으므로 지표면의 영향은 고려하지 않았다. 또한 모델링과 역산에 사용된 블록 분할이 서로 다르기 때문에 이론자료에 잡음을 추가하지 않았다.

Fig. 1은 모델(a)과 ACB(b) 및 본 연구에서 개발된 MTE법에 의해 얻어진 역산영상(c)이다. 두 방법 모두 비교적 정확하게 이상체의 위치를 추정하고 있다. 하지만 ACB법의 경우보다 MTE법에 의한 영상에 이상체가 보다 선명하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 라그랑지 곱수가 클수록 보다 부드러운 영상을 나타내는 것으로 알려져 있다. 주목할 점은 본 연구에서 개발된 MTE법이 보다 모델변수에 큰 제한을 가했으므로 전체적으로는 더 큰 라그랑지 곱수를 적용한 결과임에도 불구하고 보다 선명한 영상을 제시한다는 점이다. 이는 (3)식에 주어진 목적함수에서 알 수 있듯이 물성대비가 큰 이상체를 강조하는 알고리즘상의 특성에 기인하는 것으로 해석된다. 물론 MTE법이 동일한 라그랑지 곱수를 적용할 경우 실질적으로는 ACB법 보다 큰 라그랑지 곱수를 적용하는 것이므로 ACB법에 비하여 전체 오차는 증가하지만 보다 안정적으로 수렴하게 된다.

한편 물성변화가 크지 않은 이상체도 역산결과에 지대한 영향을 미칠 수 있다. 특히 천부에 위치한 소규모의 이상체는 탐사목적에 되는 주 대상체의 해석을 어렵게 할 수도 있다. 따라서 천부 소형 이상체의 제거는 해석의 정확성을 높이고, 보다

명확하게 조사지역내에 위치한 물성대비가 큰 이상체의 해석을 용이하게 해 준다. 본 연구에서 개발된 MTE 역산법은 앞서 설명한 바와 같이 물성대비가 큰 이상체는 강조하고, 작은 이상체는 억제하는 특성을 가진다. 따라서 천부에 나타나는 물성대비가 작은 소규모 이상체의 억제에 효과적이다.

Fig. 2는 Fig 1과 동일한 모델에 추가적으로 천부에 물성차가 작은 소규모 이상체(지질잡음)이 존재할 경우의 역산결과이다. 이 이상체의 크기는  $2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  이며, 상부까지의 심도는 1 m, 전기비저항은 배경값(100 ohm-m)의 1/4이다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 ACB법(b)의 경우에는 이상체가 역산 영상에 희미하게 나타나고 있으나, MTE 법(c)에서는 거의 나타나지 않는다. 반면 물성대비가 큰 78 ~ 80 m 지점과 120 ~ 122 m 에 위치하는 5 ohm-m의 주 이상체는 MTE 법에서 보다 선명하게 나타나고 있다. 따라서 MTE 법이 ACB법에 비하여 물성대비가 작은 소규모 이상체의 억제 및 주 대상체의 탐지에 효과적임을 알 수 있다.

## 결론 및 토의

일반적으로 천부에 존재하는 주변과의 물성대비가 작은 소규모 이상체는 지질잡음 중의 하나로 대부분의 물리탐사 자료에 지대한 영향을 미친다. 이는 소규모 이상체의 규모나 물성대비가 작다고 해도 송수신기로부터의 거리가 가까기 때문이다. 특히 최근 물리탐사 자료의 해석에 역산법이 사용되면서 이들 천부 소형 이상체가 역산영상에 너무 강하게 나타나게 되어 해석을 어렵게 하기도 한다. 하지만 최근 널리 사용되고 있는 평활화 제한 역산법은 물성대비가 작은 이상대에는 작은

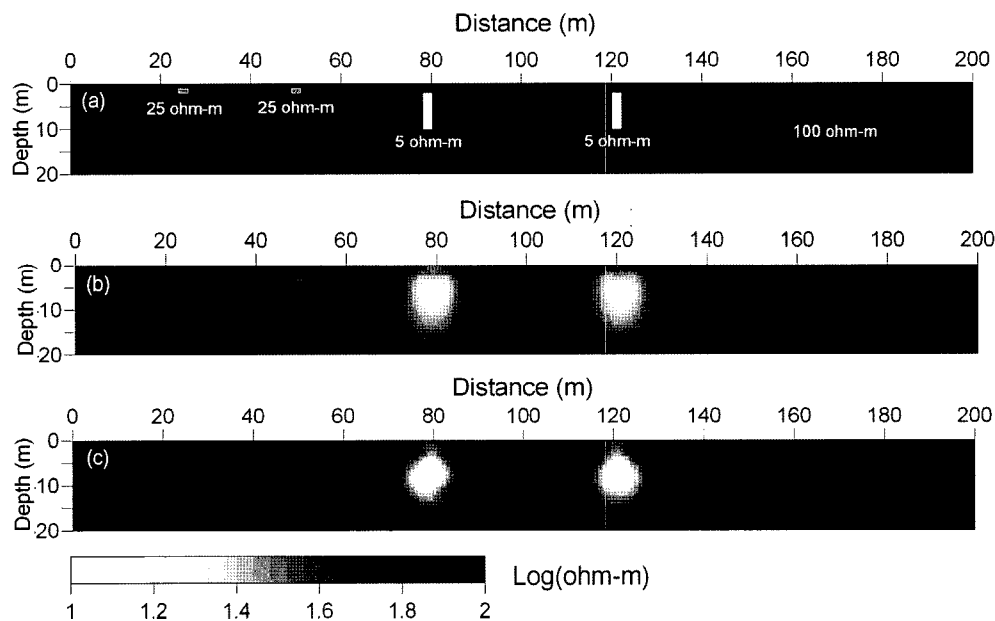


Fig. 2. True resistivity model (a) and inverted resistivity images by ACB (b) and MTE (c) approach. On the ACB image, geologic noises located at 25 m and 50 m can be seen, while they are completely suppressed on the MTE image.

제한을 가하고, 큰 이상대에 큰 제한을 가하기 때문에 이러한 천부 소형 이상대의 제거에 한계가 존재한다.

본 연구에서는 물성대비가 작은 이상대에는 큰 제한을 가하고, 큰 이상대에는 작은 제한을 가하는 역산법을 개발하였다. 이 방법은 물성대비가 작은 이상대, 즉 지질잡음과 같은 이상대를 억제하는 특성을 가지므로 MTE (main target emphasizing) 법이라 명명하였다. MTE 역산법은 평활화 제한법과 천부 소형 이상체의 억제 기능을 동시에 추가하는 방법으로 역산의 안정화와 선명한 영상의 획득을 목적으로 개발되었다. MTE 법의 효용성을 타진하기 위하여 소형루프 전자탐사자료의 2.5차원 역산에 적용한 결과, MTE 법이 평활화 제한법에 비하여 천부 소형 이상대의 억제 효과가 뛰어나고, 물성대비가 큰 주 이상대를 보다 선명하게 나타냄을 확인하였다.

### 참고문헌

조인기, 서정희, 1998, 확장된 Born 근사에 의한 시추공간 전자

탐사 2.5차원 모델링, 물리탐사, **1**, 127-135.

조인기, 심현미, 1998, 확장된 Born 근사에 의한 EM 토모그래피, 물리탐사, **1**, 155-160.

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.

Habashy, T. M., Groom, R. W., and Spies, B. R., 1993, Beyond the Born and Rytov approximations, *Journal of Geophysical Research*, **98**, 1759-1775.

Portniaguine, O., and Zhdanov, M. S., 1999, Focusing geophysical inversion images, *Geophysics*, **64**, 874-887.

Torres-Verdin, C., and Habashy, T. M., 1995, Rapid 2.5 dimensional forward modeling and inversion via a new nonlinear scattering approximation, *Radio Science*, **29**, 1051-1079.

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.