

Alpha center를 이용한 전기비저항 수치 모델링 : 현장 탐사 자료에 대한 적용 예

윤 왕 중

Numerical Resistivity Modeling Using Alpha Center Theory : A Case History for Field Resistivity Data

Wang-Jung Yoon

ABSTRACT Alpha center theory which was first proposed by Stefanescu has been proved to be effective for the detection of the location of the conductive orebody. A numerical forward modeling was conducted to verify the effectiveness of this method. Field works were carried out along the three profiles in two different areas for the purpose of finding fractured zone which might be accompanied with the presence of the groundwater. And the results were modeled by alpha center method, which was later testified by well-proven 2-dimensional finite difference inversion scheme. Field data could be successfully modeled with this alpha center algorithm, especially for the smooth-varying resistivity models. For the abrupt change of the resistivity values, the alpha center coefficients have a tendency to be negative to simulate the steep resistivity gradients. This method is quite simple and easy for the future applications. The numerical calculation can be performed very quickly with the personal computers.

1. 서 론

지하 및 지상 구조물의 건축이 이루어지기 전에 지하 암석층의 파쇄대를 감지하는 것은 구조물의 설계나 건설 후의 안전 등에 매우 중요한 일이다. 파쇄대는 특히 지하수의 부존과도 연관되는 경우가 많으며, 암반 지하수의 탐사를 위하여 간접적으로 파쇄대의 존재를 탐사하기도 한다. 이런 파쇄대의 탐사에는 전기비저항 탐사법, 전자탐사법 및 탄성파 탐사법 등이 자주 사용되고 있다.

최근에는 직류 전류원을 이용한 전기 탐사법들도 전자탐사법의 특별한 경우로 취급하는 경향이 있다. 이에 따라 전자탐사의 모델링에 자주 사용되던 유한 차분법, 유한 요소법 및 적분 방정식에 의한 방법 등을 이용한 전기비저항 탐사의 모델링에 관한 논문이 많이 발표되고 있으며, 국내에서도 수조 및 수치 모델링과 역산에 관한 다양한 많은 연구가 수행되었고, 유한 차분법을 이용한 전기비저항 역산법(김정호, 1987)은 현장에서의 전기비저항 탐사 자료의 역산에 많이 사용되고 있다.

Alpha center를 이용한 전기비저항 탐사는 Stefanescu

(1970)가 제안하였고, 또 그에 관한 기본적인 이론에 관한 연구도 수행되었다(Stefanescu and Stefanescu, 1974). 이에 따라 magneto-metric resistivity(MMR) 법에 alpha center를 적용하거나(Edwards *et al.*, 1978), 2차원 전기비저항 역산에 이용하기도 하였으며(Petrick *et al.*, 1981), 음의 값을 갖는 alpha center를 이용하여 2차원 및 3차원 역산을 시도하기도 하였다(Shima, 1990; 1992). 또 Imai 등(1987)은 지표 레이더와 함께 이 방법에 의한 역산을 이용하여 고고학적인 발굴에 성공적으로 적용한 바도 있다. 이와 더불어 국내에서도 몇 번의 연구가 발표된 바 있다(현병구 등, 1987; 김종남, 1989).

본문에서는 alpha-center를 이용하는 전기비저항 탐사법으로 지하의 파쇄대를 모형화하고, 이 결과를 현장 탐사 자료에 적용함으로써 장차 이 방법에 의한 전기비저항 탐사 자료의 역산에 대한 연구의 기초가 되고자 하였다. 현장 탐사 자료는 국내의 서로 다른 두 지점에서 지하수의 부존 가능성을 확인하기 위한 전기비저항 탐사 자료

이며, 현장 탐사 적용 사례를 검토함으로써 추후의 탐사 작업에 도움을 주고 파쇄대 탐지를 위한 물리탐사의 적용성을 예시하고자 한다.

2. Alpha center의 이론

alpha center에 관한 이론은 Stefanescu(1970), Edwards *et al.*(1978) 및 Petrick *et al.*(1981)에 설명되어 있으며 여기서는 Edwards *et al.*(1978) 및 Petrick *et al.*(1981)의 설명에 따른다. 전기 전도도가 공간의 연속 함수인 σ 이고 등방성 불균질 매질에서 전기 포텐셜 U 에 대한 직류 전도 방정식(dc conduction equation)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\nabla \sigma \cdot \nabla U + \sigma \nabla^2 U = 0 \quad (1)$$

여기서 $\sigma = \alpha^2$ 으로 치환하면 위 식은 다음과 같이 된다.

$$\alpha \nabla^2 U + 2 \nabla \alpha \cdot \nabla U = 0 \quad (2)$$

미분이 가능한 임의의 함수에 대하여 다음의 식이 성립하므로

$$\nabla^2(\alpha U) = \alpha \nabla^2 U + 2 \nabla \alpha \cdot \nabla U + U \nabla^2 \alpha \quad (3)$$

위 (2)식을 (3)식에 대입하면 다음과 같이 된다.

$$\nabla^2(\alpha U) - U \nabla^2 \alpha = 0 \quad (4)$$

parapotential을 $\Psi = \alpha U$ 라고 정의하여 (4)식에 대입하고 변수를 분리하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{\nabla^2 \alpha}{\alpha} = \frac{\nabla^2 \Psi}{\Psi} = f(m) \quad (5)$$

여기서 m 은 전 공간(whole space)에서의 임의의 점이고, $f(m)$ 은 임의의 함수이다. Stefanescu(1970)는 $f(m)=0$ 인 경우에 대한 해를 구하였으며, Stefanescu and Stefanescu(1974)는 $f(m)=k^2$ 인 경우에 대한 해를 구하였다. 또, Edwards *et al.*(1978)은 MMR 법에서 alpha center를 적용하여, 반공간(half space)에서의 해를 alpha center의 image를 이용하여 구하였고, Petrick *et al.*(1981)은 alpha center를 이용한 전기비저항 자료의 역산을 이론 자료와 현장 자료에 적용한 바 있는데, 이들에 따르면 많은 경우에 양의 상수 k 가 영에 접근하려는 경향을 보인다고 하였다.

따라서 $f(m)=k^2=0$ 인 경우에는 $\alpha(m)$ 과 $\Psi(m)$ 이 조화

함수(harmonic function)가 되며, (5)식은 다음과 같은 해를 갖게 된다.

$$\alpha(m) = B + \sum_i \frac{C_i}{R_{im}} \quad (6)$$

$$\Psi(m) = \frac{I}{4\pi r_{0m} \alpha_0} + \sum_i \frac{D_i}{R_{im}} \quad (7)$$

여기서 양의 상수 B 와 C_i 를 결정하면 공간 내의 임의의 점에서 전기 전도도를 구할 수 있다. 또 i 번째 alpha center와 점 m 사이의 거리인 R_{im} 이 커지면 (6)식에서 $\alpha=B$ 가 되므로 상수 B^2 는 매질의 배경 전도도를 의미한다. r_{0m} 은 전류 전극과 점 m 사이의 거리이며, 상수 D_i 를 구하면 parapotential을 알 수 있다. (7)식의 우변 첫째 항은 전류 I 에 의한 일차 전위와 관련이 있으며, 둘째 항은 매질의 불균질성 때문에 나타나는 이차 전위를 나타낸다.

따라서 매질 모형은 (6)식으로 결정되는데, 이 식에서 나타나는 거리의 역수라는 항의 특성상 매질의 전기 비저항 분포의 변화가 급한 경계면에 대해서는 모델링이 쉽지 않다는 단점이 있으며 alpha center가 위치한 점의 전기 전도도가 무한대가 되므로 alpha center를 전도도 중심(conductivity center)이라고 부르기도 한다. Shima(1990)는 이런 어려움을 해결하기 위해서 음의 값을 갖는 상수 C 를 도입하여 근사적인 해를 구한 바가 있다. 전극 배열이 결정되면 임의의 점에서의 전위는 (7)식으로 구할 수 있으므로, 치환 관계를 이용하면 걸보기 비저항을 쉽게 구할 수 있다. 상수 D_i 를 결정하기 위해서 각각의 alpha center 주위에 반지름이 R_{im} 인 가상의 구면(spherical surface)을 선택하여 전류 밀도에 대한 연속 방정식 ($\nabla \cdot J = 0$)을 적용하면 다음의 식을 유도할 수 있다.

$$D_i \left(B + \sum_{i(i \neq j)} \frac{C_i}{R_{ij}} \right) - C_j \sum_{i(i \neq j)} \frac{D_i}{R_{ij}} = \frac{C_j I}{4\pi \alpha_0 r_{0j}} \quad (8)$$

여기서 r_{0j} 는 전류 전극과 i 번째 alpha center와의 거리이다.

이제 두 개의 전류 전극, $p (+I)$ 와 $q (-I)$ 가 지표면에 있는 반공간(half space)에 위 식을 적용하기 위해서는 alpha center의 지표면에 대한 image를 이용하면 된다(Fig. 1). 이런 경우에는 (8)식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

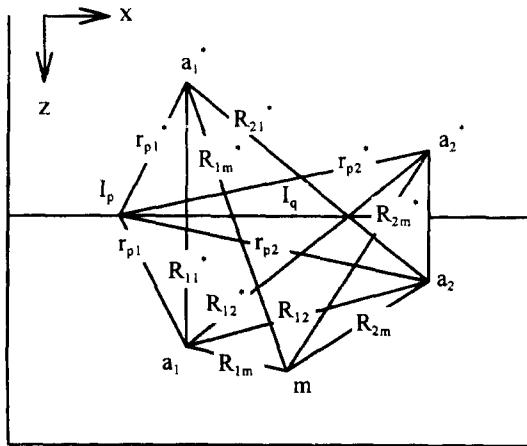


Fig. 1. Description of parameters for alpha center method for two alpha centers in half space. Two current electrodes are located at the points p and q on the surface and measuring point m may be located anywhere in the half space $z \geq 0$. α denotes the location of alpha center and the image components are denoted by asterisks. Redrawn after Petrick et al. (1981).

$$D_j \left[B + \sum_{i(i \neq j)} C_i \left(\frac{1}{R_{ij}} + \frac{1}{R_{ij}^*} \right) \right] - \quad (9)$$

$$C_j \left[\sum_{i(i \neq j)} D_i \left(\frac{1}{R_{ij}} + \frac{1}{R_{ij}^*} \right) \right] = C_j \frac{1}{2\pi} \left[\frac{1}{\alpha_p r_{pj}} - \frac{1}{\alpha_q r_{qj}} \right]$$

또 이런 경우에서 지표면에 있는 점 m에서의 parapotential $\Psi(m)$, alpha 함수, $\alpha(m)$ 및 이들로부터 구하는 전기 포텐셜, $U(m)$ 등은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\psi(m)_{pq} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{\alpha_p r_{pm}} - \frac{1}{\alpha_q r_{qm}} \right) + \sum_i \frac{2D_i}{R_{im}} \quad (10)$$

$$\alpha(m) = B + \sum_i C_i \left(\frac{1}{R_{im}} + \frac{1}{R_{im}^*} \right) \quad (11)$$

$$U(m)_{pq} = \frac{\phi(m)_{pq}}{\alpha(m)} \quad (12)$$

위의 (12)식으로 구한 지표면에서의 포텐셜들을 사용하여 각 전극 배열에 대한 걸보기 비저항을 구할 수 있다. Fig. 1은 각각의 alpha center 및 그들의 image, 전류 전극의 위치 및 측정점과의 기하학적 관계를 그린

것이다.

3. 수치 모델링 및 현장 자료 해석

수치 모델링을 위하여 alpha center의 위치를 결정할 때 alpha center가 전기비저항 단면을 구하고자 하는 평면에 위치하면 앞에서 언급한 것과 마찬가지로

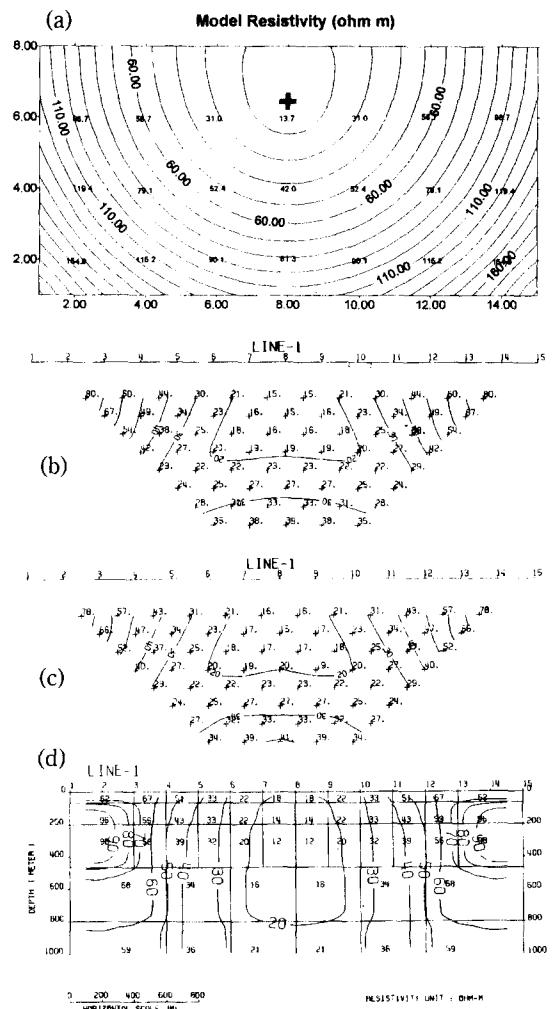


Fig. 2. Two dimensional resistivity model to verify the numerical results. (a) Resistivity model section for the string of 36 alpha centers. Mid-point of the alpha center string is marked as +. (b) Apparent resistivity section calculated by alpha center theory. (c) Apparent resistivity section calculated by 2-D finite difference method after Kim(1987) and (d) Inverted geological section after Kim(1987).

alpha center가 위치한 점에서는 전기 전도도가 무한대가 된다. 이런 문제를 해결하기 위해서는 전기비저항 분포를 구하고자 하는 평면과 다른 면상에 alpha center를 위치시켜야 한다.

본 수치 모델링의 결과를 검증하기 위하여 Petrick *et al.*(1981)의 모델링과 비교한 것이 Fig. 2이다. Fig. 2(a)는 36개의 alpha center가 전극 번호 8번 아래에 1.5 unit 심도에서 종이 면과 수직한 y-축과 나란하게 위치할 때의 전기비저항 분포 모형을 나타낸다. 각각의 alpha center들은 서로 1/3 unit 씩 떨어져 있고 1 unit=200 m이다. Fig. 2(b)는 이 모델에 대해서 지표에서 쌍극자 배열을 사용하여 측정한 걸보기 비저항 단면도로서 Petrick *et al.*(1981)의 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이 결과는 유한 차분법으로 계산한 걸보기 비저항 단면도(Fig. 2(c))와도 잘 일치하고 있다. Fig. 2(c)와 (d)는 Fig. 2(b)의 자료를 입력으로 하여 김정호(1987)에 의한 역산을 수행한 결과이다. Fig. 2(d)는 Fig. 2(b)와 같은 측정 자료로부터 구한 해당 지역의 역산 지질 단면도로서 중앙 부분은 Fig. 2(a)의 결과와 잘 맞는다. Fig. 2(d)의 심도는 5 unit에 해당한다는 점을 유의해야 한다. 그림의 가장자리 부근에서 모델과 다른 값을 보이는 것은 역산에 사용된 프로그램이 유한 차분을 이용했기 때문에 나타나는 현상으로 보인다.

이상의 결과로부터 alpha center를 이용한 모델링의 타당성을 확인하였으므로 두 곳의 현장 자료에 이 방법을 적용시켜 보고자 한다. 탐사 대상 지역은 전남 나주군과 신안군 송도 지역이며 두 곳 모두 지하수의 부존 가능성을 확인하기 위한 탐사이었다. 나주군 지역은 노년기에 접어든 화성암 지역으로서 조사 지역의 노두를 관찰하여 본 결과 화강암이 변성 작용을 받아 생성된 화강 편마암을 기저로 하는 암반층 위에 풍화층이 피복하고 있다. 따라서 이 지역에 대수층이 존재하기 위해서는 화강암 또는 화강 편마암 내부에 파쇄대가 존재해야 할 것으로 기대된다. 그러므로 이 지역에 대한 전기비저항 탐사의 목적으로 암반 중에 존재하는 파쇄대의 위치를 확인하는 것이다. 파쇄대에 지하수가 함양되면 전기 전도도가 높은 판상 광체 형태가 되므로 이의 확인을 위하여 VLF 탐사도 병행하였으나 여기서는 그 결과에 대해서 언급하지 않는다.

지표 지질 조사 결과 뚜렷한 구조선의 존재를 확인할 수 없었으므로 길이가 각각 1 km인 두 개의 탐사 측선

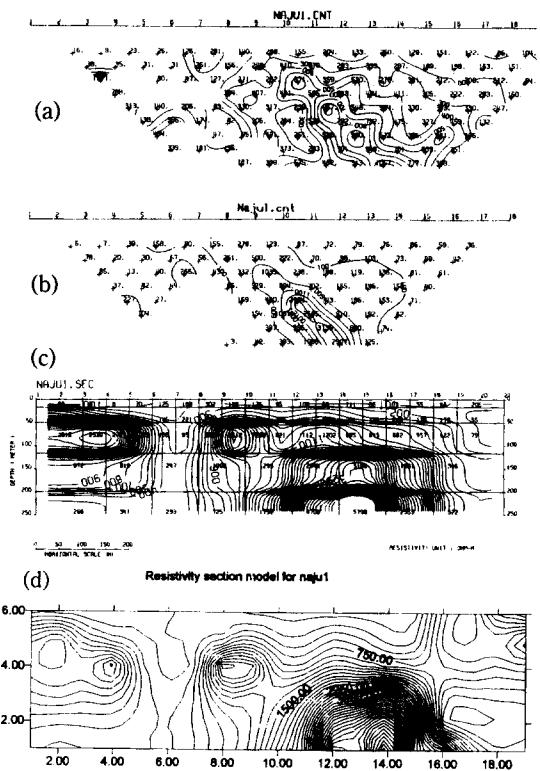


Fig. 3. Resistivity model and inversion for profile #1 of Naju area. (a) Measured apparent resistivity data section. (b) Apparent resistivity section calculated by alpha center theory. (c) Resistivity section obtained by 2-D automatic inversion algorithm after Kim(1987) and (d) Geologic model calculated by alpha center theory. Negative apparent resistivity value are obtained to simulate the abrupt resistivity change.

은 서로 직각 방향을 이루도록 설정하였다. Fig. 3(a)는 이 지역의 측선 1번에서 쌍극자 배열을 이용하여 측정한 걸보기 비저항이다. 총 전극 수는 21개이고 각 전극 사이의 간격은 50 m로 하였다. 이 자료를 alpha center를 이용하여 근사하기 위하여 측선과 평행하며 측선으로부터 1 unit 떨어진 평면상에 90개의 alpha center를 grid 형태로 배치하고 각 alpha center의 계수 C_i 를 결정하였다. 이 결과로부터 걸보기 비저항 단면도를 작성한 것이 Fig. 3(b)이다. 이들 두 그림을 비교하면 걸보기 비저항 값이 조금씩 다르다는 것을 제외하고는 전체적으로 지층 구조의 특성이 유사함을 확인할 수 있다. Fig. 3(c)는 김정호(1987)의 프로그램을 이용하여 측정 자료를 역산하여 구한 지층 전기비저항 단면도이며 Fig. 3(d)는 alpha center로부터 구한 지층의 전기비저항 단면도로

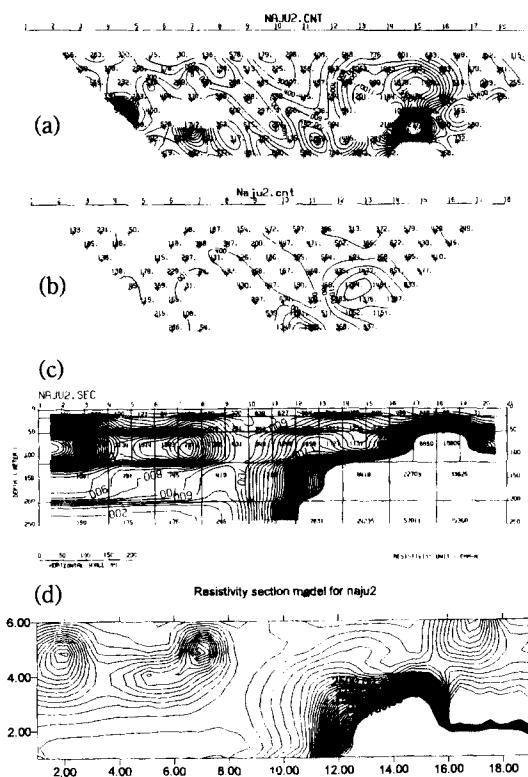


Fig. 4. Resistivity model and inversion for profile #2 of Naju area. (a) Measured apparent resistivity data section. (b) Apparent resistivity section calculated by alpha center theory. (c) Resistivity section obtained by 2-D automatic inversion algorithm after Kim(1987) and (d) Geologic model calculated by alpha center theory.

서 양자 사이의 유사성을 잘 확인할 수 있다.

Fig. 4는 Fig. 3과 같은 방법으로 동일 지역에서의 측선 2에 대하여 표시한 것이다. 여기서도 두 가지 방법으로 구한 지층의 전기비저항 단면에서 유사성을 보이고 있음을 알 수 있다. Fig. 3과 4에서 alpha center를 이용하여 구한 걸보기 비저항 단면도를 보면 자료가 비어 있는 곳이 있는데 이것은 alpha center의 계수 C_i 가 높은 비저항 지역을 나타내기 위하여 음의 값을 갖게 되고 이에 따라 이론적으로 구한 전위차가 음의 값이 되기 때문이다. 앞에서 언급한 바와 같이 alpha center는 전도도 중심의 의미를 갖게 되므로 비저항이 높은 지역을 나타내기 위해서는 alpha center 계수가 아주 작은 값을 가져야 한다. 또 전기비저항의 변화가 큰 지역을 나타내기 위해서는 계수가 음의 값을 가지려는 경향을 보인다. 그 결과로 이론적으로 계산한 걸보

기 비저항 값이 음의 값을 나타내는 구간이 주로 전기비저항이 높은 지역 부근에서 발생하고 있음을 알 수 있다. 이런 제약 때문에 Shima(1990)는 높은 비저항을 갖는 지역과 비저항 변화가 급해지는 지역에 대해서도 결과가 잘 일치하도록 음의 alpha center를 도입한 바 있다.

탐사 자료로부터 측선 1에서는 측점 7의 수직 방향에 현저하게 전기비저항이 낮은 부분이 존재하고, 이와 수직한 측선 2에서는 측점 10 하부에 거의 수직한 선을 따라 전기비저항이 낮은 부분이 존재하는 것으로부터 두 점을 잇는 방향으로 파쇄대가 존재할 가능성을 유추할 수 있으며, 여러 가지 주변 환경을 고려한 후 시추지점을 선정하고 시추 작업을 한 결과 일 200 톤 이상을 생산할 수 있는 양의 지하수가 부존하고 있음을 확인할 수 있었다.

전남 신안군 송도는 크기가 아주 작은 섬으로서 공사로 인하여 절개된 지역 등에서의 지표 지질 구조를 관찰한 결과 수십 cm 두께의 퇴적층들이 반복해서 퇴적된 구조를 확인하였다. 이 지역의 퇴적층들은 해성 기원의 세일층과 역암 및 이암층, 그리고 세일이 변성된 백운모 화강암질 편마암 등으로서, 이들이 수평 혹은 매우 작은 경사를 갖는 층을 이루고 있다. 이러한 암석 층의 상부는 기계적 풍화를 심하게 받아 각 층별로 소규모의 격자형 수직 절리들이 발생하여 암석의 강도는 매우 약하나, 하부의 암석층은 절개지를 관찰한 결과 비교적 신선한 것으로 나타났다.

Fig. 5(a)는 송도 지역에서 역시 쌍극자 배열을 이용하여 측정한 걸보기 비저항이다. 이 지역은 면적이 매우 작은 섬이기 때문에 전극 사이의 거리를 20 m로 하였으며 측선의 길이도 200~300 m 정도로 하였다. 수평 방향으로 발달한 퇴적층들 사이로 해수의 침입이 발생할 가능성이 높은 곳으로서 지역 전반에 걸쳐서 비교적 낮은 전기비저항 값을 나타내고 있으며 전기비저항의 변화도 심하지 않다는 것을 알 수 있다. 따라서 이 값들에 맞는 alpha center 계수들을 도입하여 이론적으로 구한 걸보기 비저항 단면도(Fig. 5b)에서도 음의 값을 나타내는 경우가 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 이것은 높은 전기비저항 대를 갖고 있는 나주 지역의 자료와 비교가 되는 것이다. Fig. 5(c)와 5(d)는 각각 유한 차분에 의하여 구한 지층 비저항 단면도와 alpha center를 이용하여 구한 비저항 단면도로서 그 결과가 아주 유사함을 알 수 있다.

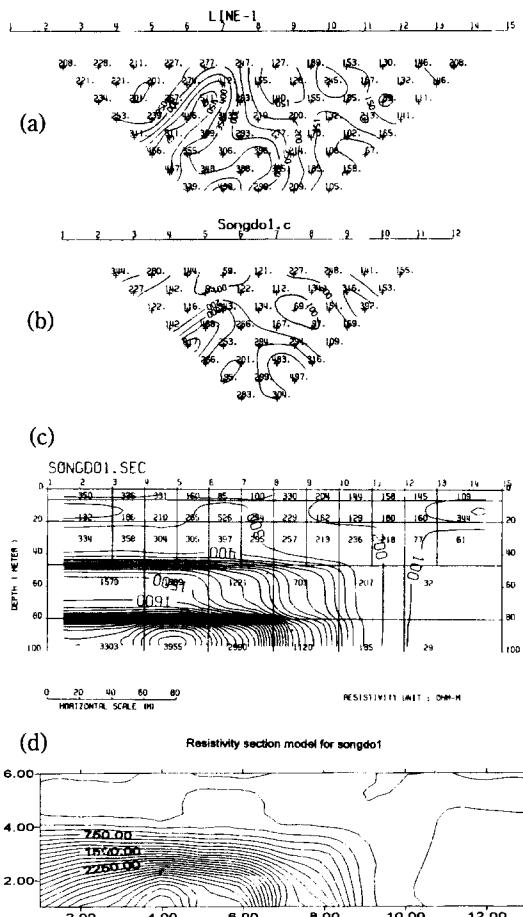


Fig. 5. Resistivity model and inversion for profile #1 of Songdo area. (a) Measured apparent resistivity data section. (b) Apparent resistivity section calculated by alpha center theory. (c) Resistivity section obtained by 2-D automatic inversion algorithm after Kim(1987) and (d) Geologic model calculated by alpha center theory. Due to the smooth resistivity variation, there is no negative apparent resistivity value from the section calculated by alpha center theory.

4. 결 론

Alpha center를 이용한 전기비저항 모델링 이론은 매우 간단하고 명확하다는 장점이 있으나 여기에 사용되는 변수들, 특히 alpha 함수 및 parapotential 등에 대한 물리적 의미를 파악하기 어렵다는 단점이 있다. 또한 alpha center는 전기 전도도를 나타내는 개념이기 때문에 전기비저항의 변화가 급한 지역에 대한 모델링이 어렵다는 것도 해결해야 할 문제 중의 하나이다.

그러나 단순한 수식들로 지층의 전기비저항 분포를 설명할 수 있으므로 걸보기 비저항이나 모델링의 계산에 필요한 시간과 노력이 많이 절약된다는 장점이 있으므로 현장에서 지층 구조나 암반 종의 파쇄대의 위치를 매우 손쉽게 확인할 수 있는 방법으로 판단된다.

두 지역에서 획득한 3개의 측선에 대한 현장 탐사 자료에 alpha center를 이용한 전기비저항 모델링을 적용한 결과 비교적 간단하게 지층의 특성을 확인할 수 있었고 파쇄대의 위치도 쉽게 판별할 수 있었다. 앞으로 가장 효과적인 alpha center의 위치를 결정하고 이에 따른 자동 역산 프로그램의 개발도 요망되며 탐사 현장에서 즉시 탐사 결과를 해석함으로써 탐사 작업의 보완이나 정밀 탐사 계획의 수립 등에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 김정호, 1987, 2차원 전기비저항 탐사 자료의 역산, 공학 박사 학위논문, 서울 대학교.
2. 김종남, 1989, Alpha-center를 이용한 전기비저항 탐사 역학 방법의 현장 자료에의 적용에 관한 연구 : 공학 석사 학위논문, 서울 대학교.
3. 정승환, 1997, 암반 지하수 자원을 위한 물리탐사, 한국 자원공학회 특별 심포지움 논문집, “지하수 자원의 개발, 보존, 관리 -개정된 지하수 법과 지하수 영향 조사를 중심으로-”, p.116-126.
4. 현병구, 조인기, 임해룡, 1987, 판상광체에 대한 강내 전기비저항 법의 모형 연구 : 대한 광산학회지, v. 24, p.157-164.
5. Edwards, R. N., Lee, H., and Nabighian, M. N., 1978, On the theory of magnetometric resistivity (MMR) methods : Geophys., v. 43, p.1176-1203.
6. Imai, T., Sakayama, T., and Kanemori, T., 1987, Use of ground-probing radar and resistivity surveys for archaeological investigations, Geophys., v. 52, no. 2, p.137-150.
7. Petrick, Jr., W. R., Sill, W. R., and Ward, S. H., 1981, Three-dimensional resistivity inversion using alpha centers : Geophys., v. 46, no. 8, p. 1148-1162.
8. Shima, H., 1990, Two-dimensional automatic resistivity inversion technique using alpha centers : Geophys., v. 55, no. 6, p.682-694.
9. Shima, H., 1992, 2-D and 3-D resistivity image reconstruction using crosshole data : Geophys., v. 57, no. 10, p.1270-1281.
10. Stefanescu, S., 1970, Nouvelles applications de la theorie des milieux alpha harmoniques a la prospection electrique en courant continu : Geophys. Prosp., v. 18, p.786-799.

11. Stefanescu, S., and Stefanescu, D., 1974, Mathematical models of conducting ore bodies for direct current electrical prospecting : Geophys. Prosp., v. 22, p.246-260.
12. Zhdanov, M. S. and G. V. Keller, 1994, *The Geoelectric Methods in Geophysical Exploration*, Elsevier Sci. B.V.