

## 혼합배열을 사용하는 시추공간 전기비저항 탐사

조인기<sup>1)</sup> · 한성훈<sup>1)</sup> · 김기주<sup>1)</sup>

### The Crosshole Resistivity Method Using the Mixed Array

In-Ky Cho<sup>1)</sup>, Sung-Hoon Han<sup>1)</sup> and Ki-Ju Kim<sup>1)</sup>

**요 약 :** 전기비저항 토모그래피는 지하의 전기비저항 분포를 영상화할 수 있는 매우 중요한 정밀 물리탐사법으로 지반 조사 및 환경 오염대의 조사에 널리 사용되고 있다. 전기비저항 토모그래피 탐사의 경우 다양한 전극배열법이 사용될 수 있으며 각 배열법은 나름대로의 장단점을 가지고 있다. 예를 들어 단극배열의 경우에는 신호대 잡음비는 높으나 분해능이 떨어지며, 쌍극자배열의 경우에는 분해능은 높지만 신호대 잡음비가 너무 낮다. 단극-쌍극자 배열의 경우에는 중간 정도의 분해능과 신호대 잡음비를 갖는다. 최근 개발된 변형된 단극-쌍극자 배열의 경우에는 단극-쌍극자 배열 수준의 신호대 잡음비와 분해능을 갖는다. 그러나 단극배열을 제외한 이들 전극배열법은 전류 및 전위 전극의 위치에 따라서는 겉보기 비저항이 발산할 수도 있다는 단점을 갖는다. 또한 단극배열의 경우에는 측정된 겉보기 비저항이 이상체의 전기비저항을 그대로 반영하지 못한다는 단점이 있다. 본 연구에서는 전류전극과 전위전극의 상대적인 위치에 따라 단극-쌍극자 배열과 변형된 단극-쌍극자 배열을 혼용하는 소위 혼합배열이라는 새로운 전극배열법을 제안하고자 한다. 이 새로운 전극배열법은 신호대 잡음비 및 분해능은 단극-쌍극자 배열의 수준을 유지하며, 측정 시추공상에서 겉보기 비저항이 발산하지 않는 특성을 갖는다. 또한 측정되는 겉보기 비저항은 항상 이상체의 전기비저항을 잘 반영한다.

**주요어 :** 전기비저항 토모그래피, 변형된 단극-쌍극자 배열, 혼합배열

**Abstract :** Resistivity tomography has become an important tool to image underground resistivity distribution. This method has been widely applied to site investigation for engineering and environmental purpose. In resistivity tomography, various electrode arrays can be used and each array has both merits and demerits. For example, the pole-pole array has high signal to noise ratio (S/N ratio), but its resolution is too low. The dipole-dipole array has low S/N ratio, but its resolution is very high. The pole-dipole array has intermediate S/N ratio and resolution. The modified pole-dipole array, recently proposed, shows reasonable S/N ratio and resolution, which are comparable to the pole-dipole array. These electrode arrays except the pole-pole array, however, have the problem that the apparent resistivity can diverge at some special electrode positions. Also, the pole-pole array may not reflect the true resistivity of an anomalous body. In this study, we propose a new electrode array, mixed array, where pole-dipole and modified pole-dipole arrays are selectively used with the relative positions of current and potential electrodes. The mixed array has the same level of S/N ratio and resolution as the pole-dipole array and the apparent resistivity does not diverge in the receiver hole. Furthermore, the apparent resistivity using the array can reflect the true resistivity of the anomalous body.

**Keywords :** resistivity tomography, modified pole-dipole array, mixed array

## 서 론

전기비저항 토모그래피 탐사에 주로 사용되는 전극 배열에는 단극(pole-pole), 단극 쌍극자(pole-dipole) 및 쌍극자(dipole-dipole) 배열 등이 있다. 이들 각 방법은 지표 전기비저항탐사에서 널리 사용되는 전극배열이지만 시추공간 조사가 필수적인 토모그래피법의 경우에는 배열 방법마다 특성을 갖는다. 우선 가장 일반적으로 사용되는 단극배열의 경우에는 신호대 잡음비(S/N ratio)가 높으며, 겉보기 비저항이 발산하지 않는다

는 장점이 있으나, 분해능(resolution)이 다른 배열법에 비하여 상당히 떨어진다는 취약점이 있다. 단극-쌍극자 배열은 단극 배열에 비하여 신호대 잡음비는 떨어지지만 분해능이 뛰어나며, 쌍극자배열의 경우에는 3가지 배열 방법 중에서 가장 높은 분해능을 갖지만, 신호대 잡음비가 가장 낮다는 단점이 있다(Sasaki, 1992). 또한 단극-쌍극자 및 쌍극자 배열은 전극의 위치에 따라서는 전류전극에 의한 1차 전위차(primary potential difference)가 0에 가까운 영역이 존재하며, 이 영역에서는 겉보기 비저항이 발산하여 음의 값을 나타내기도 한다

\*2002년 10월 15일 접수

1) 강원대학교 자연과학대학 지구물리학과

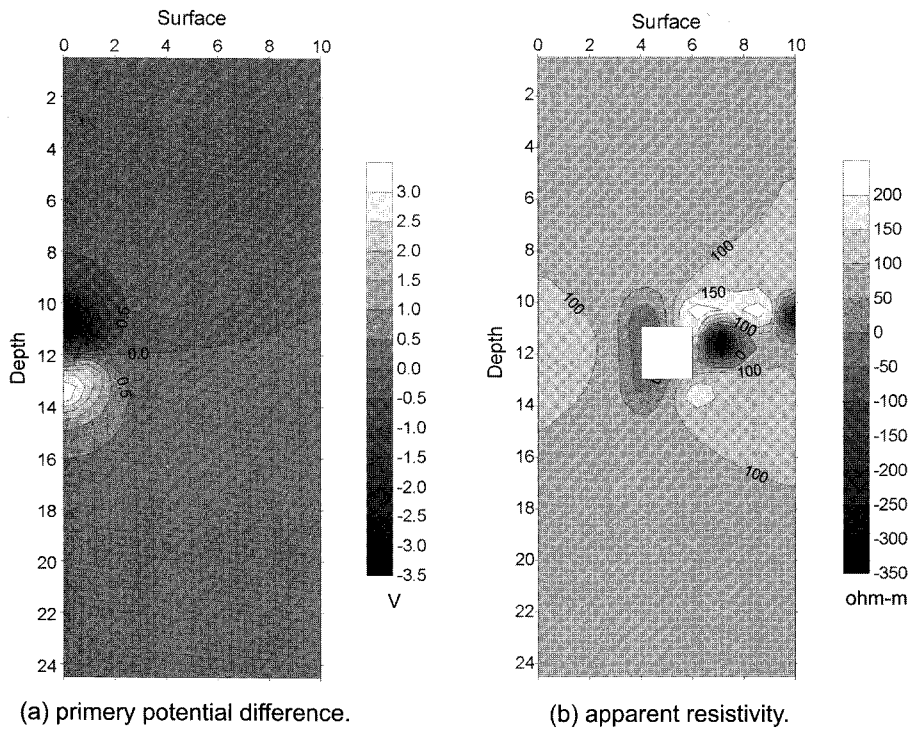
(조인기 등, 1997). 이는 시추공간 전기비저항 탐사의 경우 전류전극에 의한 1차 전기장의 방향과 측정하는 총 전기장의 방향이 서로 다르기 때문에 나타나는 현상으로 이를 겹보기 비저항 자료로 변환하여 토모그래피 역산을 수행하는 경우 심각한 문제를 야기하게 된다.

조인기 등(1997)은 신호대 잡음비를 높이고 시추공간 전기비저항 탐사에서 겹보기 비저항이 발산하는 문제를 피하기 위하여 양극자(bipole-bipole)배열을 제안하였으나, 이 방법은 분해능에 문제가 있는 것으로 밝혀졌다. 한편 김정호 등(1997)은 신호대 잡음비와 분해능을 동시에 충족시키기 위하여 변형된 단극-쌍극자(modified pole-dipole) 배열을 제안하였다. 이 방법은 음의 전류전극  $C_2$ 를 무한대가 아닌 측정 시추공의 주변에 고정시키는 방법으로, 신호대 잡음비와 분해능을 단극-쌍극자 배열의 수준으로 유지하면서, 겹보기 비저항의 발산을 억제하는 효과적인 전극배열법으로 알려져 있다. 그러나 이 전극배열법도 겹보기 비저항이 발산하는 영역이 존재하므로 이의 억제를 위한 대안이 모색되어야 한다. 본 논문에서는 기존의 전극배열법에 대한 문제점을 재검토하고 전류 및 전위 전극의 위치에 따라 단극-쌍극자 배열과 변형된 단극-쌍극자 배열을 사용하는 혼합배열(mixed array)을 제안하고자 한다. 이 방법은 두 전극배열법의 장점을 살리면서 겹보기 비저항이 발산하는 영역을 제거해 주는 특성을 가지므로 향후 토모그래피 탐사에 실질적인 적용이 기대된다.

### 통상적인 전극배열

우선 전기비저항 토모그래피 탐사에서 가장 널리 사용되는 단극배열에 관하여 살펴보자. 단극배열은 모든 배열 방법 중에서 신호대 잡음비가 높으나, 분해능이 떨어진다는 단점이 있다. 그러나 겹보기 비저항이 항상 양의 값을 보이며, 발산하지 않기 때문에 큰 문제없이 자료 획득이 가능하다는 장점으로 인하여 가장 널리 사용되는 전극배열 방법 중의 하나이다. 그러나 이 전극배열 방법은 조인기 등(2002)에 의해 주장된 바와 같이 이상체의 형상, 배경 매질과 이상체간의 전기전도도 비에 따라 2차원 이상체와 3차원 이상체가 서로 다른 양상의 겹보기 비저항을 나타내는 특성을 지니고 있다.

한편 단극-쌍극자 및 쌍극자 배열의 경우에는 절대 전위가 아닌 두 전위전극 사이의 전위차를 측정하게 된다. 이 경우 전류전극에 의한 1차 전위차가 0에 가까운 영역이 존재하며, 이 영역 근처에서는 겹보기 비저항이 발산하게 된다. 즉 이들 방법은 단극배열에 비하여 분해능은 뛰어나지만 1차 전위차가 매우 작을 경우에는 거리계수가 발산하게 되므로 겹보기 비저항이 의미를 상실하게 된다. Fig. 1은 단극-쌍극자 배열을 사용할 경우 1차 전위차 및 조인기 등(2002)에 의한 2차원 유한차분법을 사용하여 계산된 겹보기 비저항의 분포 양상을 나타낸 것이다. Fig. 1에서 전위 쌍극자 간격을 1 단위로 설정하였으며, 계산된 값은 전위 쌍극자의 중앙에 표시하였다. 물론 시



**Fig. 1.** Distributions of the primary potential difference and the apparent resistivity when the conventional pole-dipole array is used. A current electrode is fixed at (0,12) and 1 ampere current is injected through it. A conductive body (10 ohm-m) having a dimension  $2 \times 2$  unit is embedded in a uniform half-space (100 ohm-m).

추공 내에서 이루어지는 탐사를 가정하고 있으므로 전위 쌍극자의 방향은  $z$  방향이다. Fig. 1(a)와 (b)에 나타난 바와 같이 걸보기 비저항이 발산하는 양상을 보여주고 있으며, 걸보기 비저항이 발산하는 영역은 1차 전위차가 0인 등고선 주위에 집중되고 있다. 특히, Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 걸보기 비저항이 발산하는 영역이 측정 시추공상에 분포하고 있어, 역산시 이들 발산하는 자료를 제거해야 하는 번거로움이 있다.

한편 쌍극자배열의 경우에는 분해능이 여타 전극배열법에 비하여 탁월하다는 장점이 있으나 신호대 잡음비가 낮고, 단극-쌍극자 배열의 경우와 같이 1차 전위차가 0에 수렴하는 영역이 넓게 분포하므로 실질적으로 시추공간 탐사에의 적용이 어렵게 된다. 특히 전반적으로 매질의 전기비저항이 낮은 경우에는 자료획득 자체가 불가능하게 된다. Sasaki(1992)는 쌍극자 간격을 넓게 하고, 일정 수준 이하의 측정값은 배제하는 등의 대안을 제시하였으나, 전극배열이 갖는 근본적인 한계로 인하여 실질적인 적용이 매우 어렵다.

### 변형된 단극-쌍극자 배열

변형된 단극-쌍극자 배열법은 단극-쌍극자 배열의 신호대 잡음비와 분해능을 유지하면서, 걸보기 비저항의 발산을 억제하기 위한 수단으로 개발되었다(김정호 등, 1997). 또한 이 방법은 현장 여건상 원거리 접지가 곤란한 지역에서도 큰 어려움

없이 자료획득이 가능하다는 장점도 있다. 그러나 이 전극배열법은 원래 단극-쌍극자 배열에 기초하고 있으므로 단극-쌍극자 배열의 특성을 따르며, 특히 시추공 심도가 깊어지는 경우에는 거의 단극-쌍극자 배열과 비슷한 특성을 보인다. 따라서 이 배열법은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 1차 전위차가 0이 되는 영역이 존재하며, 당연히 이 근처에서는 걸보기 비저항이 발산하는 양상을 보인다. 이 방법은 시추공간 탐사의 경우 단극-쌍극자 배열(Fig. 1)이나 쌍극자배열에 비하여 걸보기 비저항이 발산하는 영역이 전류전극의 심도에 비하여 상당히 허부에 존재하므로 측정 가능한 영역이 확대된다는 장점이 있다. 따라서 하나의 전류전극에 대한 측정 구간을 제한한다면 큰 무리 없이 자료를 획득할 수 있을 것이다. 그러나 이 방법도 근본적으로 전극의 기하학적 위치에 따라서는 걸보기 비저항이 발산하는 영역이 존재하며, 실제 현장조사시 걸보기 비저항이 발산하는 영역의 판단이 쉽지 않으므로 탐사 계획 수립시 세심한 주의를 기울여야만 양질의 자료획득이 가능하다.

이러한 변형된 단극-쌍극자 배열의 문제점을 근본적으로 해결하기 위해서는 1차 전위차가 0이 되는 영역이 존재하지 않으며, 신호대 잡음비와 분해능이 뛰어난 새로운 전극배열법의 개발이 필요하다. 우선 단극-쌍극자 배열법의 경우는 1차 전위차가 0이 되는 영역은 Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 전류전극보다 얇은 심도에서 발생한다. 반면 변형된 단극-쌍극자 배열의 경우에는 Fig. 2(b)에 나타난 바와 같이 전류전극보다 깊은

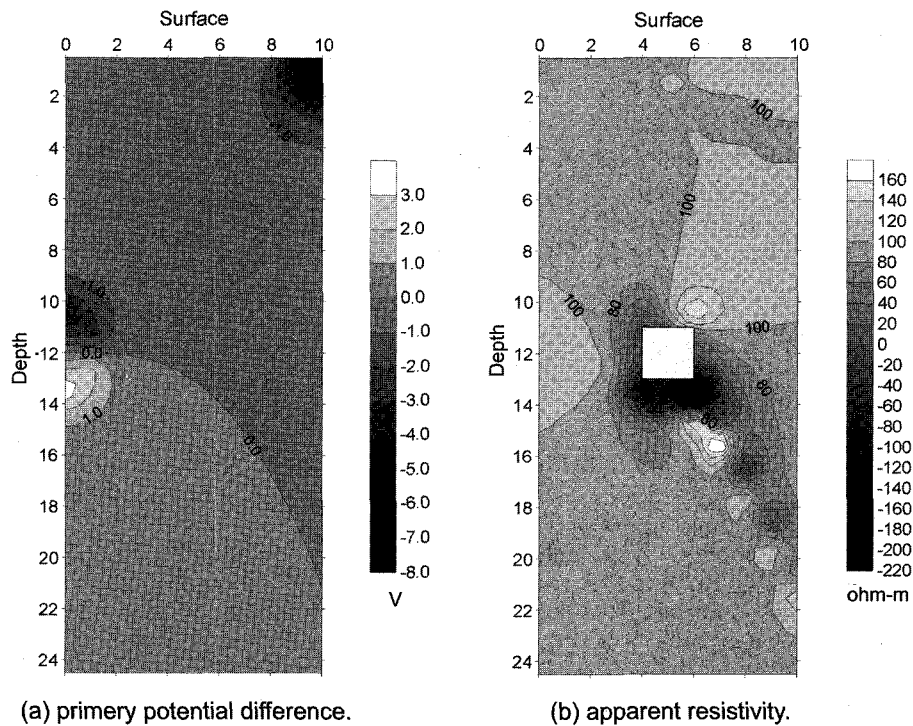


Fig. 2. Distribution of the primary potential difference and the apparent resistivity when the modified pole-dipole array is used. Current electrodes  $C_1$  and  $C_2$  are fixed at (0,12) and (10,0), respectively. A conductive body (10 ohm-m) having a dimension  $2 \times 2$  unit is embedded in a uniform half-space (100 ohm-m).

심도에서 겉보기 비저항이 발산하게 된다.

### 혼합 배열법

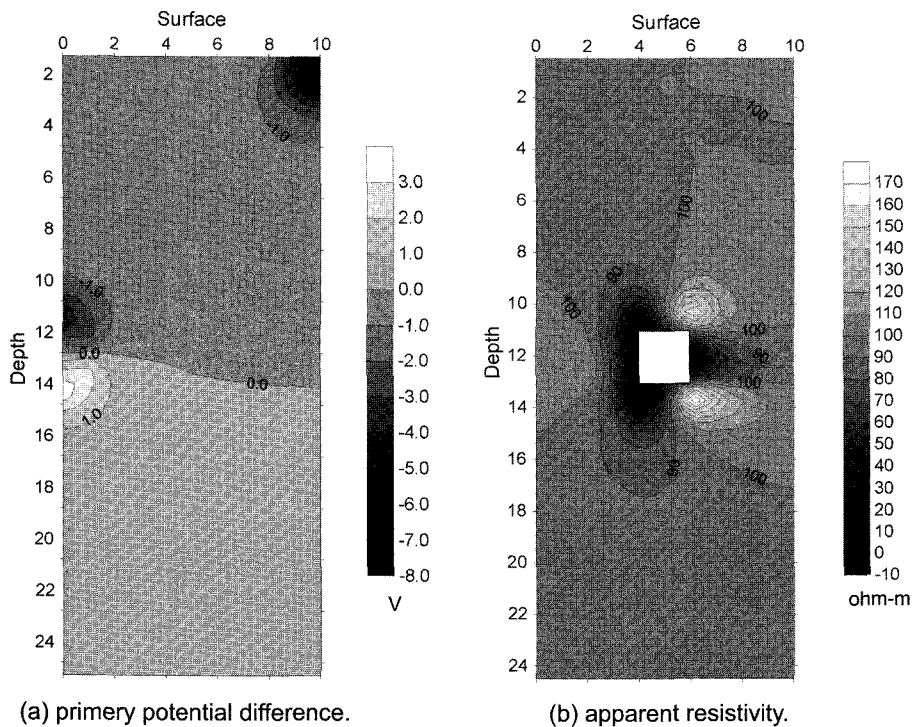
본 연구에서는 단극-쌍극자 및 변형된 단극-쌍극자 배열의 1차 전위차의 분포특성에 착안하여 상부 전위전극( $P_1$ )이 전류전극보다 얇은 심도에 위치할 경우에는 변형된 단극-쌍극자 배열을, 깊은 경우에는 단극-쌍극자 배열을 사용하는 혼합 배열법을 제안하고자 한다. 즉 이 혼합 배열법은 근본적으로 1차 전위차가 0에 수렴하는 영역을 제거하여 겉보기 비저항의 발산을 억제하고 신호대 잡음비 및 분해능은 단극-쌍극자 배열의 수준을 유지할 수 있다. Fig. 3은 혼합 전극배열에 대한 1차 전위차 및 겉보기 비저항의 분포양상을 나타낸 것이다. Fig. 3(a)에 나타난 바와 같이 이 전극 배열법의 경우에도 1차 전위차가 0에 수렴하는 영역이 분명히 나타나고 있으며, 측정 시추공에서 전류전극 심도 근처에서 1차 전위차가 나타나므로 겉보기 비저항이 당연히 발산하게 될 것이다. 그러나 Fig. 3(b)에 나타난 바와 같이 측정 시추공상은 물론 거의 모든 영역에서 겉보기 비저항은 발산하지 않고 상당히 안정적인 겉보기 비저항 분포를 보이고 있다.

이와 같이 혼합배열을 사용할 경우 분명히 1차 전위차가 0이 되는 영역이 존재함에도 불구하고 겉보기 비저항이 발산하지 않는 이유에 대하여 생각해 보자. 우선 0 전위차가 나타나

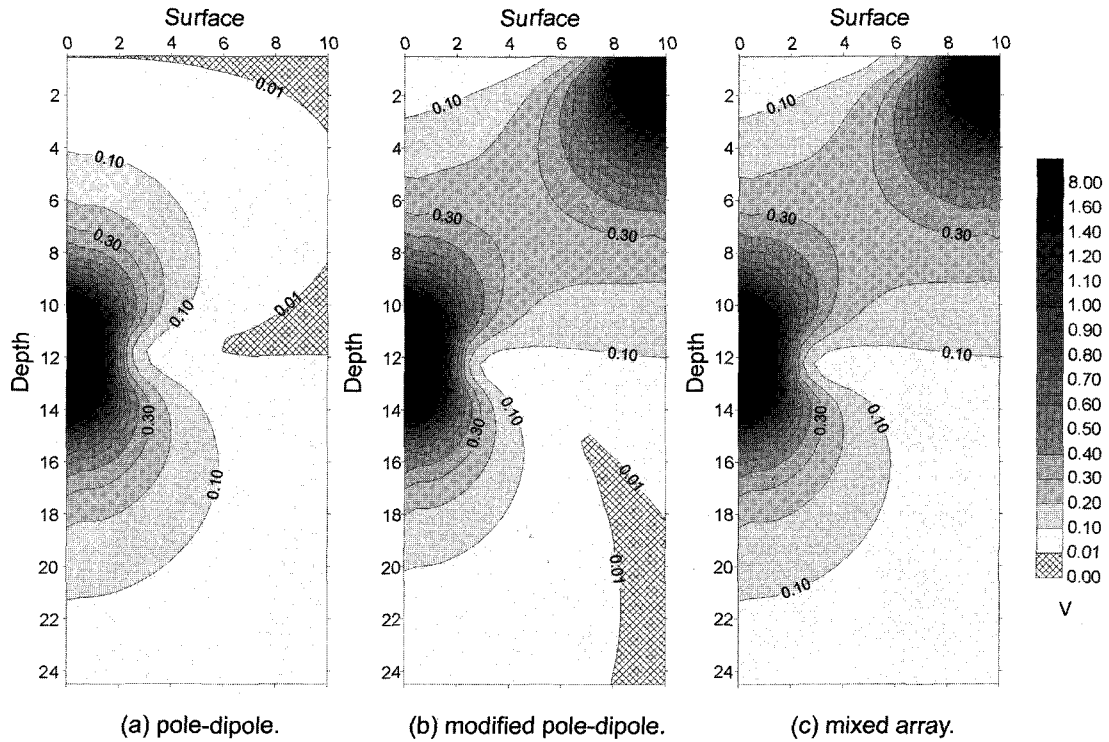
는 이유는 1차 전위차의 계산시  $P_1$  전극의 하부에  $P_2$  전극이 위치하므로 전류전극과 전위전극의 심도가 유사한 지점에서 전위차의 부호가 바뀌는 현상이 나타나며, 이로 인하여 Fig. 3(a)에서와 같이 1차 전위차가 0이 되는 영역이 나타난다. 그러나 이는 단지 등고선도를 그리기 위한 내삽과정에서 생겨난 것으로 혼합배열을 사용할 경우에는 1차 전위차가 0이 될 수 없으며, 앞서 설명한 바와 같이 1차 전위차의 부호 변화에 의해 발생하는 현상이다. 즉 혼합 배열을 사용할 경우 1차 전위차의 절대값은 수학적으로 0이 될 수 없으며, 이러한 특성 때문에 겉보기 비저항은 발산하지 않는다. 반면 단극-쌍극자 및 변형된 단극-쌍극자 배열의 경우에는 1차 전위차가 0이 되는 영역이 분명히 존재하며, 이 영역에서는 겉보기 비저항이 발산하게 된다.

전기비저항 탐사에서 안정적 측정이 가능한 전위차를 10 mV/A 라고 가정하고, 그 이하의 값에서는 겉보기 비저항이 발산할 가능성이 높은 영역이라고 생각하자. 물론 주변 매질의 전기비저항, 사용되는 측정기기 등에 따라 이 기준이 절대적인 것은 아니지만, 여기서는 하나의 판단 기준으로 제시한 값이다. Fig. 4는 단극-쌍극자, 변형된 단극-쌍극자 및 혼합배열에 의한 1차 전위차의 절대값의 분포 양상을 나타낸 것으로 측정값이 10 mV/A 이하인 영역은 빗금으로 표시하였다.

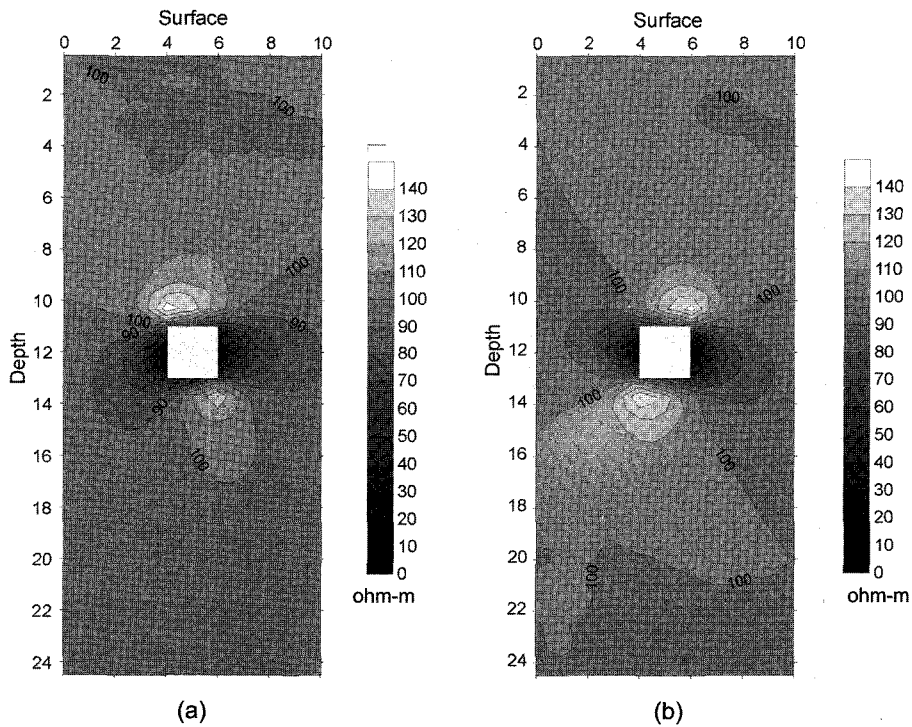
단극-쌍극자 및 변형된 단극-쌍극자 배열의 경우에는 측정값이 10 mV/A 이하인 영역이 나타나고 있는 데 반하여, 혼합배



**Fig. 3.** Distribution of the primary potential difference and apparent resistivity when mixed electrode array is used. Current electrodes  $C_1$  and  $C_2$  are fixed at (0,12) and (10,0), respectively. 1 ampere current is injected through it. Background resistivity is 100 ohm-m. The size of an anomalous body is  $2 \times 2$  unit and its resistivity 10 ohm-m.



**Fig. 4.** Distribution of the primary potential difference according to electrode arrays. A current electrode is fixed at (0, 12) and the background resistivity is 100 ohm-m. In the cases of the conventional and the modified pole-dipole array, hatched area show low potential difference zone (less than 0.01 V) where the apparent resistivity may diverge.



**Fig. 5.** Distribution of the apparent resistivity around a conductive body with the size of  $2 \times 2$  unit when a current electrode is fixed at the point (a) (0, 5) and (b) (0, 21), respectively.

열의 경우에는 항상 1차 전위차가 10 mV/A 이상의 값을 보이고 있다. 특히 단극-쌍극자 배열의 경우에는 전류전극과 전위

전극의 심도가 유사한 구간에서 걸보기 비저항이 발산할 수 있는 위험 구간이 나타나고 있다. 이들 구간에서 얻어진 자료

는 신호대 잡음비가 낮을 가능성이 높으며, 이 경우 역산시 인위적으로 자료를 제거해야 하는 번거로움이 있다.

변형된 단극-쌍극자 배열의 경우에는 위험구간이 전류전극의 심도보다 상당히 하부에 나타나며, 이 영역을 제외하면 거의 모든 영역에서 안정적인 값을 보이고 있다. 따라서 변형된 단극-쌍극자 배열은 통상적인 단극-쌍극자 배열에 비하여 자료 획득 및 해석이 용이하다는 장점을 갖는다. 그러나 변형된 단극-쌍극자 배열의 경우에도 측정 시추공 상에 위험구간이 존재하므로, 이 구간에서 얻어진 겉보기 비저항 자료는 의미가 없게 된다. 한편 혼합전극 배열법의 경우에는 1차 전위차의 분포 양상이 변형된 단극-쌍극자 배열과 유사하지만 모든 영역에서 1차 전위차가 10 mV/A 이상의 값을 보이며, 특히 측정 시추공 상에서는 위험 구간이 나타나지 않는다. 즉 전류전극보다 전위전극의 심도가 깊은 경우에는 변형된 단극-쌍극자 배열의 경우보다 높은 1차 전위차가 나타나므로 안정적인 자료 획득을 가능하게 해주는 특성이 있다.

한편 혼합 배열법의 경우에는 전류전극  $C_1$ 과 전위전극  $P_1$ 의 심도가 같은 점을 기준으로  $C_2$ 의 위치가 바뀌게 된다. 따라서 급작스런 전극배열법의 변화로 인하여 측정값이 너무 급격하게 변화한다면 자료획득이나 해석단계에서 혼란을 야기할 수도 있다. Fig. 5는 전류전극의 위치변화에 따른 겉보기 비저항의 분포양상을 나타낸 것으로 거의 모든 경우에 겉보기 비저항이 상당히 부드럽게 변화하고 있으며, 이상체 근처에서 이상체의 전기비저항을 반영하는 낮은 겉보기 비저항 이상을 보이

고 있어, 혼합배열이 단극-쌍극자 배열에 뒤떨어지지 않는 뛰어난 분해능을 보일 것임을 예측할 수 있다. 이상에서 전류전극  $C_2$ 의 위치가 바뀐다 해도 전반적인 겉보기 비저항의 급격한 변화는 발생하지 않으므로 자료획득 및 해석단계에서 혼란이 야기되지는 않는다. 물론 전기비저항 탐사에서 얻어지는 자료는 전위전극사이의 전위차이며, 혼합배열의 경우 급작스런 배열 방법의 변화에 따른 전위차의 불연속은 피할 수 없을 것으로 보인다.

Fig. 6은 이상체의 전기전도도 변화에 따른 겉보기 비저항의 변화 양상을 나타낸 것이다. 예상한 바와 같이 이상체의 전기비저항이 주변 매질보다 낮은 전도성 이상체의 경우에는 낮은 겉보기 비저항 이상이, 높은 경우에는 높은 겉보기 비저항 이상이 이상체를 중심으로 나타나고 있어, 단극배열에서 볼 수 있는 이상체의 전기비저항과 겉보기 비저항이 서로 역으로 나타나는 현상도 발생하지 않는다. 물론 이러한 특성은 단극-쌍극자 배열이나 변형된 단극-쌍극자 배열에서도 동일하며, 자료 획득 단계에서 이상체의 개략적인 전기비저항을 파악하는데 큰 도움이 된다.

### 결론 및 토의

전기비저항 토모그래피법은 정밀 물리탐사법 중의 하나로 각종 지반조사 및 환경 오염대의 파악을 위하여 그 적용이 날이 확대되어가고 있는 탐사법이다. 그러나 사용하는 전극배

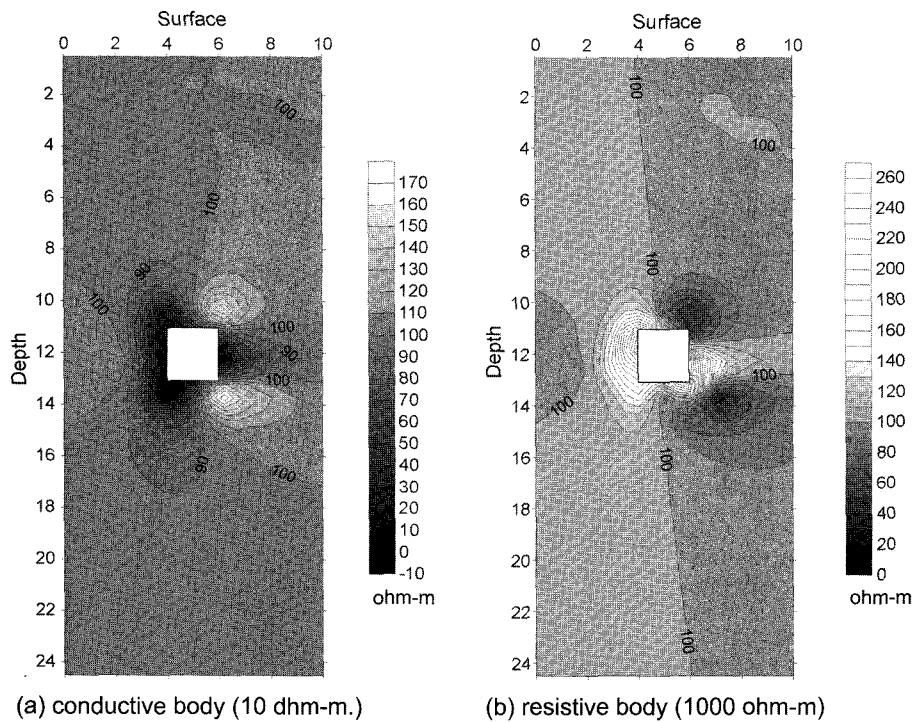


Fig. 6. Distribution of the apparent resistivity around a conductive and a resistive body with the size of 2×2 unit. A current electrode is always fixed at (0, 12) and background resistivity is 100 ohm-m.

열법에 따라 신호대 잡음비 및 분해능이 차이가 있으며, 배열법에 따라서는 현장 자료획득 자체가 불가능할 수도 있다. 본 논문에서는 현재 전기비저항 토모그래피 탐사에서 적용되고 있는 단극-쌍극자 및 변형된 단극-쌍극자 배열에 대하여 1차 전위차 및 걸보기 비저항의 분포 양상을 분석하여 각 배열의 장단점을 비교하고, 각 배열법의 단점을 보완한 혼합 전극 배열법을 제안하였다. 이 방법은 전류전극과 전위전극의 심도가 같은 점을 기준으로 낮은 심도에서는 변형된 단극-쌍극자 배열을, 깊은 심도에서는 단극-쌍극자 배열을 적용하는 방법이다. 이 새로운 전극배열법은 거의 모든 영역에서 안정적인 측정이 가능하며, 걸보기 비저항이 발산하지 않는다. 또한 단극-쌍극자 배열 수준의 신호대 잡음비와 분해능을 가지며, 단극배열의 경우와 같이 이상체의 전기비저항과 걸보기 비저항이 서로 대치되는 현상도 발생하지 않으므로 실제 현장 조사에 적용할 경우 상당히 효과적인 것으로 기대된다.

## 참고문헌

- 김정호, 이명중, 조성준, 정승환, 송윤호, 1997, 전기비저항 토모그래피의 분해능 향상에 관한 연구: 전기·전자탐사법에 의한 지하 영상화 기술연구, KR-97(C)-16, 한국자원연구소, 3-54.
- 조인기, 정승환, 김정호, 송윤호, 1997, 전기비저항 토모그래피에서의 전극배열비교: 한국자원공학회지, **34**, 18-26.
- 조인기, 김기주, 김하림, 김건수, 한성훈, 임진택, 이원경, 2002, 시추공간 전기비저항탐사에서 걸보기 비저항의 거동특성: 한국자원공학회지, **39**, 173-181.
- Cho, I. K., Kim, J. H., and Chung, S. H., 2001, Some considerations on the apparent resistivity in the cross-hole resistivity method, *63rd EAGE Conference & Exhibition, Extended Abstracts, M28*, Amsterdam, Netherlands.
- Sasaki, Y., 1992, Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation: *Geophy. Prosp.*, **40**, 453-463.