

## 2차원 전기비저항 탐사를 위한 변형된 전극배열법에 관한 연구

김정호<sup>1)</sup> · 이명종<sup>1)</sup> · 송운호<sup>1)</sup> · 정승환<sup>1)</sup>

### A Study on the Modified Electrode Arrays in Two-Dimensional Resistivity Survey

Jung-Ho Kim<sup>1)</sup>, Myeong-Jong Yi<sup>1)</sup>, Yoonho Song<sup>1)</sup> and Seung-Hwan Chung<sup>1)</sup>

**요 약 :** 2차원 전기비저항 탐사에 일반적으로 사용되는 전극배열들의 단점을 보완하기 위해 단극과 쌍극자를 사용하는 기존의 전극배열로부터 5 종류의 변형된 전극배열법을 제안하였다. 변형된 단극 배열법은 원거리 접지전극이 필요한 단극 배열법의 비효율성을 보완하기 위한 전극배열법이다. 4 종류의 쌍극자를 이용하는 변형된 전극배열법은 쌍극자 또는 단극-쌍극자 배열이 갖는 문제점, 즉 낮은 측정값에 의한 낮은 신호대 잡음비를 개선하여 높은 측정값의 획득이 가능하도록 설계하였다. 수치 모델링과 2차원 역산을 이용한 수치 실험을 수행하였으며, 전기적 잡음에 의한 영향과 분해능에 대하여 고찰하여 본 논문에서 제안된 전극배열의 효용성을 입증하였다.

**주요어 :** 변형된 전극배열, 변형된 단극 배열, 변형된 쌍극자 배열, 변형된 단극-쌍극자 배열, 전극배열, 2차원 전기비저항 탐사

**Abstract :** Five kinds of modified electrode arrays were proposed to overcome the weak points of the commonly used arrays using dipole and/or pole in two-dimensional resistivity surveys. The modified pole-pole array was suggested to overcome the inefficiency caused by distant earthing in pole-pole array. Four kinds of modified arrays using dipole were designed to enhance the signal-to-noise ratio of the conventional dipole-dipole and pole-dipole arrays through boosting up the measured potential difference. In the numerical experiments using the two-dimensional modeling and inversion, the effects of the ambient electrical noise and the resolving power were examined and the results showed the validity of the modified arrays proposed in this study.

**Keywords :** modified electrode array, modified pole-pole array, modified dipole-dipole array, modified pole-dipole array, electrode array, 2-D resistivity survey

## 서 론

전기탐사는 각종 물리탐사법 중 국내에서 가장 많이 응용되고 있는 탐사법의 하나이며, 여러 종류의 전기탐사법 중 2차원 전기비저항 탐사가 가장 많이 응용되고 있다(김정호 등, 2000). 2차원 전기비저항 탐사는 전류 및 전위전극의 공간적인 배치 형태의 변화로부터 지하 전기비저항의 2차원적 분포에 대한 정보를 획득하므로 전극배열법이 측정자료의 특성을 결정한다. 2차원 전기비저항 탐사를 위해 사용할 수 있는 전극배열은 쌍극자, 단극-쌍극자, 단극, 슬럼버저, 웨너 배열법 등이며, 이들은 각기 고유의 장점과 단점을 가지고 있다. 각 배열의 문제점을 열거하면 쌍극자 및 단극-쌍극자 배열은 전위차 측정을 위해 쌍극자를 사용하므로, 전류 및 전위 전극의 거리가 증가됨에 따라 측정 전위차가 급격하게 감소하며, 이에

의해 전기비저항이 낮은 경우, 신호대 잡음비(S/N 비, signal-to-noise ratio)가 매우 낮아진다. 또한 단극 배열은 두 지점의 원거리 접지가 필요하므로 다른 전극 배열에 비해 탐사의 효율성이 낮은 경우가 많으며 적용이 불가능할 경우 또한 발생한다. 한편 슬럼버저 및 웨너 배열은 2차원 구조를 적절하게 반영하기 힘들다는 문제점을 갖고 있다(김정호 등, 2001).

본 연구에서는 이러한 문제점 또는 단점을 극복하기 위해 5 종류의 변형된 전극배열법을 제안하고자 한다. 제안하는 전극배열법 중 변형된 단극법은 원거리 접지에 의한 탐사의 비효율성을 극복하기 위한 것이다. 또한 두 종류의 변형된 단극-쌍극자 법과 두 종류의 변형된 쌍극자 배열법은 기존의 단극-쌍극자와 쌍극자 배열법의 상대적으로 낮은 S/N 비를 향상시킴으로써 적용 가능한 환경을 확대하고자 함이다. 본 논문에서는 수치 모형 실험을 위주로 하여 새로이 제안한 변형된 전극배

\*2001년 3월 26일 접수

1) 한국지질자원연구원 탐사개발연구부(Geophysical Exploration & Mining Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)

열의 전기적 잡음에 대한 반응과 분해능 등을 살펴보고 기존의 전극배열법과 비교하여 이들의 효용성을 제시한다. 수치 모델링에 사용된 방법은 2.5차원 유한차분법(김정호, 1987)이며, 역산법은 ACB(Active Constraint Balancing; Yi and Kim, 1998)법을 채용한 평활화제한 최소화승법이다.

### 기존 전극배열법의 특성

통상적인 전극배열법 가운데 2차원 탐사에 사용할 수 있는 전극배열은 국내에서 가장 많이 사용하고 있는 쌍극자 배열을 위시하여, 단극(pole-pole), 단극-쌍극자(pole-dipole), 웨너(Wenner), 슬럼버저(Schlumberger) 배열 등을 들 수 있다. 이 가운데 슬럼버저 배열은 국내에서 주로 1차원 수직탐사에 이용되고 있으며, 2차원 탐사에 적용하는 경우에는 축점이 등간격으로 위치하므로 전극의 이동방법 또한 1차원 탐사와는 달리 등간격의 축점을 따라 이동하게 된다. 이와 같이 2차원 탐사를 위한 전극배열에서는 전극이 일정한 간격으로 이동되어야 하므로 길보기 비저항은 모두 기본 전극간격  $a$ 와 전극전개수  $n$ 으로 표시된다. 이들 전극배열은 고유의 장단점이 있으며 이에 대해서는 김정호 등(2001)에 의해 소개된 바가 있다. 논의의 전개를 위하여 각 전극배열이 가지는 고유의 장단점에 대하여 간단히 살펴보기로 하자.

현장탐사 수행시 측정되는 전위는 지하의 전기적인 반응과 전기적인 잡음의 합으로 표시할 수 있다. 전기적 잡음의 수준이 일정하다고 가정하면 측정전위가 낮아짐에 따라 신호에 대한 전기적 잡음의 상대적인 크기는 증가하므로 측정자료의 S/N 비는 감소하게 된다. 그러므로, 지반의 전기전도도가 증가할수록, 그리고 전극전개수가 증가할수록 측정 전위는 감소하므로 측정값의 S/N 비는 감소하게 된다. 이와 같은 측면에서 각 전극배열에서 측정되는 전위 또는 전위차의 상대적 크기의 차이는 측정자료의 S/N 비와 직결된다. 균질 반무한 공간에서 기본 전극간격이  $a$ 이며 전극전개수가  $n$ 이라고 할 때에, 각 전극배열에 의한 측정전위 또는 전위차는 다음과 같이 단극 배열의 전위  $V_{pp}$ 를 이용하여 표시할 수 있다.

- 1) 단극 배열 :  $V_{pp}$
- 2) 단극-쌍극자 배열 :  $\frac{1}{n+1} V_{pp}$
- 3) 쌍극자 배열 :  $\frac{2}{(n+1)(n+2)} V_{pp}$
- 4) 슬럼버저 배열 :  $\frac{2}{n+1} V_{pp}$
- 5) 웨너 배열 :  $V_{pp}$

Fig. 1은 반무한 공간에서 측정 전위가 동일한 단극 및 웨너 배열을 제외한 나머지 세 가지 전극배열의 전극전개수에 따른 측정 전위차의 변화를 위의 식을 이용하여 단극 배열에 의한

측정전위에 대한 상대적인 비로 나타낸 것이다. 세가지 배열 중 가장 높은 전위차를 측정할 수 있는 배열은 슬럼버저 배열이며, 단극-쌍극자 배열의 전위차는 전극전개수에 관계없이 슬럼버저 배열의 1/2이 된다. 2차원 탐사에서 전극전개수  $n$ 을 10까지 측정하였을 경우를 가정하면, 가장 측정값이 낮은  $n=10$ 에서의 전위차는 슬럼버저 배열의 경우 단극 배열의 약 18%, 단극-쌍극자 배열은 약 9% 정도의 수준에 그치며, 측정값이 가장 낮은 쌍극자 배열은 단극 배열의 약 1.5%에 불과하다. 이러한 점은 세 종류의 전극배열이 단극 혹은 웨너 배열에 대하여 S/N 비 측면에서 불리함을 의미하고 있으며, 특히 쌍극자 배열의 경우에는 가장 낮은 S/N 비를 나타내게 되어 큰 단점으로 지적될 수 있음을 알 수 있다.

2차원 탐사의 기본적인 목적은 지하구조를 2차원적으로 영상화함에 있다. 그러므로 전극배열의 비교에 있어서 가장 중요한 기준은 2차원 지하구조 영상화 능력이라고 할 수 있을 것이다. Fig. 2는 토양층과 한 쌍의 수직 전도체로 이루어진 지하구조에 대한 수치 모형실험 결과로서 2차원적 지하구조를 구현하는 각 전극배열법의 능력을 잘 보여주어 주고 있다. 5 종류의 전극 배열 중 단극, 단극-쌍극자, 쌍극자 배열은 전극배열에 따라 분해능의 차이는 있으나 2차원적 구조, 즉 수직 전도체의 영상을 구현하고 있다. 이 가운데 단극-쌍극자 법은 지하구조 모형이 대칭임에도 불구하고 비대칭적인 모양을 나타내고 있음을 관찰할 수 있으며, 이는 전극배열 고유의 비대칭성 때문이다. 이에 반해 슬럼버저 및 웨너 배열은 수직적인 구조를 미약하게 보여주고 있으며, 특히 웨너 배열은 수평 2층 구조에 가깝게 나타나고 있다. 이와 같은 실험 결과는 슬럼버저

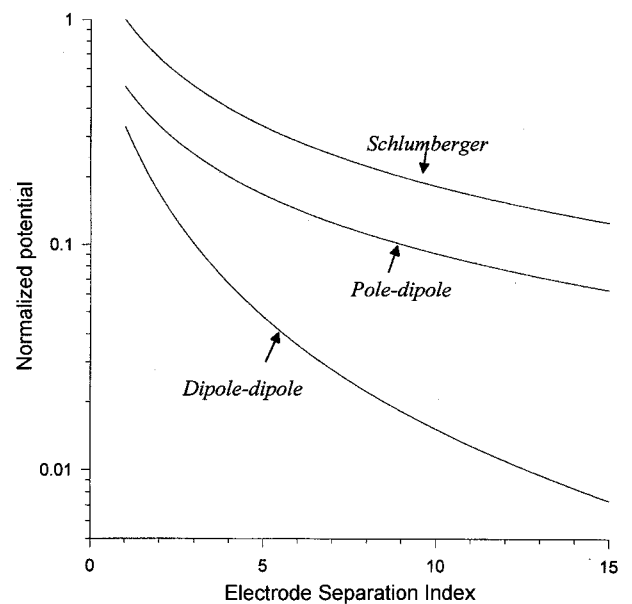


Fig. 1. Normalized potential variations of various electrode arrays in the homogeneous half-space. The potential of each array was normalized by that of the pole-pole array.

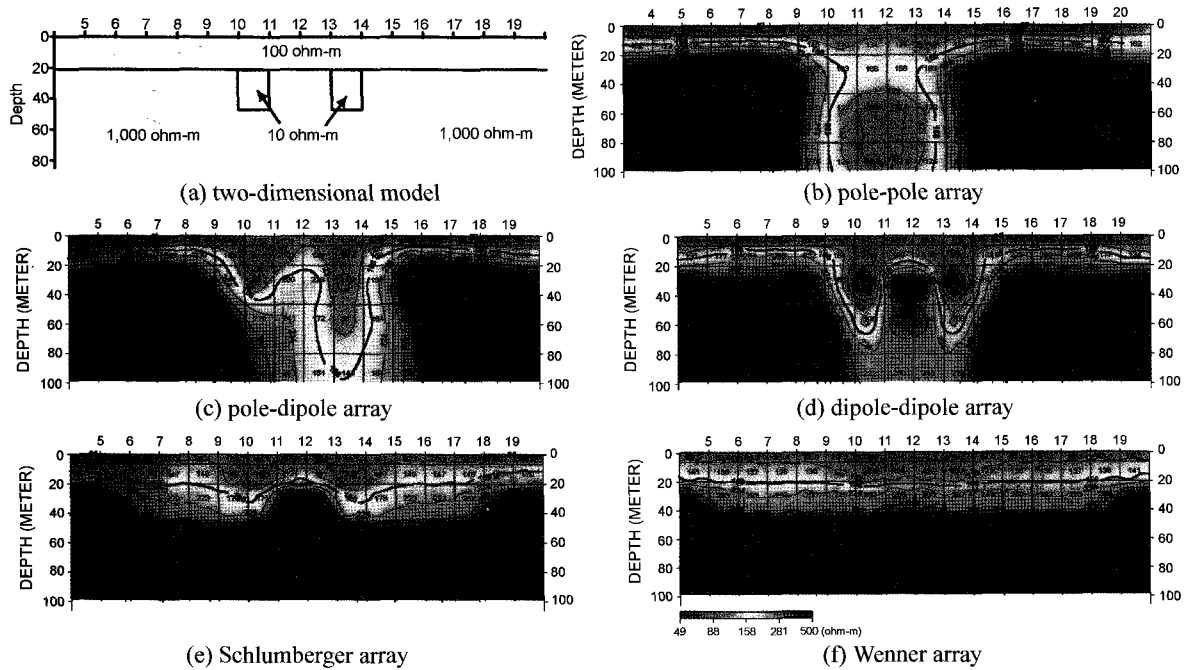


Fig. 2. Inverted subsurface resistivity images for various electrode arrays, using the synthetic data based on the vertical twin-conductor model (a).

및 웨너 배열은 2차원 탐사에, 특히 급격한 2차원적 구조적 변화를 갖는 지역에 대한 탐사에 적합하지 않으며, 층서구조를 갖는 지하구조에 적합함을 의미하는 것으로 해석될 수 있다.

### 변형된 전극배열의 제안

기존 전극배열법 중 웨너 및 슬럼버저 배열은 위의 역산실험을 통하여 간단히 예시한 바와 같이 지하 2차원 구조의 영상화라는 목적에는 적합하지 않은 전극배열로 생각된다. 웨너 및 슬럼버저를 제외한 3 종류의 단극 또는 쌍극자를 이용하는 전극배열은 그 나름대로의 뚜렷한 장·단점을 갖고 있다. 즉 쌍극자 배열은 2차원 구조의 분해능이 가장 탁월하나 전극전개수가 증가함에 따라 측정전위가 급격하게 감소하여 S/N 비가 급격하게 떨어진다는 문제점을 안고 있다. 한편 단극 배열법은 기존의 전극배열법 중 가장 높은 수준의 전위 측정이 가능하며, 전극전개수가 증가함에 따른 측정값의 감소 정도 또한 가장 낮아서 S/N 비가 가장 높은 자료의 획득이 가능하다는 장점을 갖고 있다. 그러나, 단극 배열법은 단극 또는 쌍극자를 이용하는 세 종류의 배열 중에서 가장 분해능이 낮다는 단점을 갖고 있을 뿐만 아니라 원거리 접지용 음의 전류 및 전위 전극을 설치하여야 한다는 문제점을 안고 있다. 전극의 원거리 접지는 현장 탐사의 효율성을 떨어뜨릴 뿐만 아니라, 원거리 접지 위치를 잘못 선택한 경우에는 측정자료 전체의 신뢰도에 심각한 문제점을 야기할 수 있다. 이와 같은 단극 또는 쌍극자를 이용하는 전극배열의 문제점을 보완하기 위하여 본 연구에서는 쌍극자, 단극-쌍극자, 단극 배열 등 세 종류의 전극배열

로부터 유도한 변형된 전극배열법을 제안하고자 한다.

지하에 전기를 흘리고 이상대에 의한 전기장의 찌그러짐을 측정하여 지하 구조를 규명하는 전기비저항 탐사는 원리적으로 임의의 전극배열로 전극 위치를 조합하여 탐사가 가능하며, 이와 같은 배열을 일반화된 전극배열법이라 부른다. Fig. 3은 본 연구에서 제안하는 두 종류의 변형된 쌍극자 배열, 두 종류의 단극-쌍극자 배열, 그리고 변형된 단극 배열 등, 모두 5가지의 변형된 전극배열법을 보이고 있다. 그림에서  $n$ 은 기존의 전극배열법과 동일한 전극전개수를 의미하며, 나머지  $k$  및  $l$ 은 측정 간격을 기준으로 쌍극자 간격을 정의하기 위한 상수이다.

변형된 쌍극자 배열은 기존 쌍극자 배열의 낮은 측정값에 기인하는 낮은 S/N 비를 보완하기 위하여 고안된 것으로 전류 또는 전위 쌍극자 간격을 증대시키면 측정 전위차가 증대한다는 원리를 이용한 것이다. 두 종류의 변형된 쌍극자 배열 중 배열 I은 전극전개수가 증가함에 따라 전류 및 전위 쌍극자 간격이 동일하게 증가하는 배열이다. 전극전개수가 1일 때에는 기존의 쌍극자 배열과 동일하지만 전극전개수가 증가함에 따라 쌍극자 간격 또한 동일하게 증가하므로 측정값의 감소를 능동적으로 보상해준다는 의미를 갖고 있다. 전극배열의 형태는 기존의 웨너 배열과 4개 전극의 위치에 있어서 유사하나, 웨너 배열에서의 전위측정을 위한 두 전극  $M, N$ 이 양의 전류 전극  $A$ 와 양의 전위전극  $M$ 으로, 그리고 전류원의 두 전극  $A, B$ 를 음의 전류전극  $B$ 와 음의 전위전극  $N$ 으로 대처한 점이 다르다. 이 배열에 의한 측정 전위차는 반무한 공간에 있어서 단극 배열의 1/3이며, 따라서 단극-쌍극자 배열보다 훨씬 높은

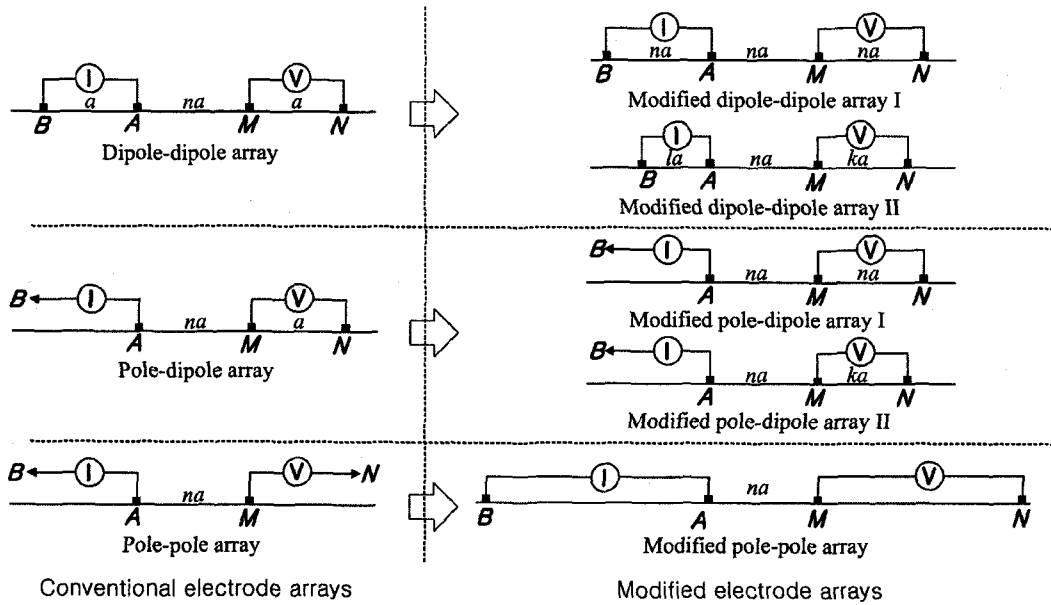


Fig. 3. Schematic view of the conventional electrode arrays and their modified arrays proposed in this study.

수준이다. 또한 단극 배열 다음으로 높은 측정값을 얻을 수 있는 슬림버저 배열과 비교하면 전극전개수가 5보다 작을 때는 슬림버저 배열보다 낮은 측정값을 보이지만, 5보다 클 때는 오히려 슬림버저 배열보다 높은 측정값을 얻을 수 있다. 일반적으로 전극전개수가 증가함에 따라 측정값이 낮아져서 탐사자료의 S/N 비가 문제가 된다는 점에서 이 변형된 쌍극자 배열 I은 높은 실용성을 갖는다고 생각된다.

한편 변형된 쌍극자 배열 II는 기존의 쌍극자 배열을 일반화시킨 것으로 그 모양은 쌍극자 배열과 동일하나 전류원 쌍극자와 전위차 측정 쌍극자의 간격이 측정간격  $a$ 의 정수배라는 점이 다르다. 그러므로 변형된 쌍극자 배열 II는 기존의 쌍극자 배열을 일반화한 것으로 볼 수 있으며, 그림에서  $k$  및  $l$ 이 모두 1인 경우는 기존의 쌍극자 배열과 동일하다. 이 배열 또한 기존의 쌍극자 배열보다 높은 S/N 비를 갖는 자료의 취득이 가능하며, 예를 들어 전류 및 전위 쌍극자 간격을 규정하는  $k$  및  $l$ 이 2인 경우, 단극-쌍극자 배열과 비슷하거나 혹은 더 높은 값의 전위차 측정이 가능하다.

변형된 단극-쌍극자 배열 또한 변형된 쌍극자 배열과 마찬가지로 쌍극자 간격을 증가시켜 측정 전위 값을 증가시킴으로써 낮은 전기비저항 환경에서도 높은 S/N 비가 가능하도록 설계한 전극배열법이다. 음의 전류전극을 원거리 접지한 것을 제외하고는 모두 전술한 변형된 쌍극자 배열과 유사하다. 변형된 단극-쌍극자 배열 I은 쌍극자 간격이 전극전개수가 증가함에 따라 비례하여 증가하며, 변형된 단극-쌍극자 배열 II는 측정간격의 정수배로 정의한 것이다. 변형된 단극-쌍극자 배열 I의 반무한 공간에서의 측정 전위차는 단극 배열의 1/2이며 따라서 슬림버저 배열보다 훨씬 높은 수준이다. 한편, 그림에서는 변형된 단극-쌍극자 배열만을 나타내었으나, 전류원 쌍극자가

실행하는 경우인 변형된 쌍극자-단극 배열 또한 가능하며, 두 전극배열을 동시에 사용함으로써 변형된 단극-쌍극자 또는 쌍극자-단극 배열의 비대칭성을 극복할 수 있다.

변형된 단극 배열은 기존의 단극 배열을 변형한 것으로 음의 전류 및 전위전극을 원거리 접지하는 대신에 축선의 양단에 각각 고정시키고 단극법과 같은 방법으로 양의 전류 및 전위전극을 이동하면서 측정하는 방법이다. 이 전극배열은 원거리 접지가 불가능한 현장에서 사용될 수 있으며, 원거리 접지가 불필요하다는 점에서 현장 탐사의 이점이 있다. 그러나 축선 양단에 음의 전류 및 전위전극을 고정시킴으로 인하여 측정되는 전위는 축선 양단 부분에서는 단극 배열보다는 낮은 값이 측정되며, 축선의 중앙 부위에서는 단극 배열에 가까울 정도의 높은 전위측정이 가능하다.

변형된 쌍극자 및 단극-쌍극자 배열법의 걸보기비저항은 전류량을  $I$ , 측정된 전위차를  $\Delta V$ 라고 할 때에 다음과 같이 계산된다.

- 1) 변형된 쌍극자 배열 I :  $\rho_a = 6\pi na \frac{\Delta V}{I}$
- 2) 변형된 쌍극자 배열 II  
:  $\rho_a = 6\pi na \frac{\Delta V(l+n)(n+k)(l+n+k)}{kl(l+2n+k)}$
- 3) 변형된 단극-쌍극자 배열 I :  $\rho_a = 4\pi na \frac{\Delta V}{I}$
- 4) 변형된 단극-쌍극자 배열 II :  $\rho_a = 2\pi na \frac{\Delta V(n+k)}{I k}$

한편, 변형된 단극 배열법에서 축선의 한쪽 끝에 고정된 음의 전류전극과 이동하는 양의 전류전극간의 간격을  $sa$ , 또 다른 축선의 한쪽 끝에 고정된 음의 전위전극과 축선상에서 이

동하는 양의 전위전극 사이의 간격을  $pa$ 라고 하였을 때, 축선의 연장은  $(s+n+p)a$ 가 되며, 길보기 비저항은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$5) \text{ 변형된 단극 배열} : \rho_a = 2\pi na \frac{\Delta V(s+n)(n+p)(s+n+p)}{I sp(s+2n+k)}$$

### 측정 전위 수준의 비교

전기비저항이  $\rho$ 인 균질 반무한 공간에서의 단위 전류 송신원에 대한 각 변형된 전극배열법의 측정전위는 위에서 기술한 길보기 비저항 계산식으로부터 다음과 같이 표현된다.

- 1) 변형된 쌍극자 배열 I :  $\frac{\rho}{6\pi na}$
- 2) 변형된 쌍극자 배열 II :  $\frac{\rho}{2\pi na} \frac{kl(l+2n+k)}{(l+n)(n+k)(l+n+k)}$
- 3) 변형된 단극-쌍극자 배열 I :  $\frac{\rho}{4\pi na}$
- 4) 변형된 단극-쌍극자 배열 II :  $\frac{\rho}{2\pi na} \frac{(n+k)}{k}$
- 5) 변형된 단극 배열 :  $\frac{\rho}{2\pi na} \frac{sp(s+2n+k)}{(s+n)(n+p)(s+n+p)}$

위의 측정전위는 기존 단극 배열의 측정전위를  $V_{pp}$ 라 할 때 다음과 같이 단극 배열의 측정전위를 사용하여 표시할 수 있다.

- 1) 변형된 쌍극자 배열 I :  $\frac{V_{pp}}{3}$
- 2) 변형된 쌍극자 배열 II :  $\frac{kl(l+2n+k)}{(l+n)(n+k)(l+n+k)} V_{pp}$
- 3) 변형된 단극-쌍극자 배열 I :  $\frac{V_{pp}}{2}$
- 4) 변형된 단극-쌍극자 배열 II :  $\frac{(n+k)}{k} V_{pp}$
- 5) 변형된 단극 배열 :  $\rho_a = \frac{\rho}{2\pi na} \frac{sp(s+2n+k)}{(s+n)(n+p)(s+n+p)}$

Fig. 4는 상기 식에 의한 변형된 전극배열법의 측정 전위차를 단극 배열의 측정전위에 대한 상대적인 비, 즉 위의 식에서  $V_{pp}$ 를 1로 하여 전극전개수의 변화에 따른 전위의 변화를 도시한 것이다. 비교를 위해서 기존의 쌍극자 및 단극-쌍극자 배열의 전위 변화를 파선으로 나타내었다. 또한 변형된 쌍극자 배열 II와 변형된 단극-쌍극자 배열 II는 쌍극자 간격을 규정하는 정수인  $l$ 과  $k$ 가 모두 3인 경우에 대하여 도시하였다.

현장탐사에서는 전극전개수가 증가함에 따라 측정전위가 감소하며 이에 따라 S/N 비가 현저하게 감소된다. 따라서 현장탐사자료 중 S/N 비가 문제가 되는 부분은 전극전개수가 클 때이다. 그러므로 전극전개수에 따른 전위의 감소정도가 낮을

수록 S/N 비가 높은 자료를 획득할 수 있으며, 전극배열 중 전극전개수 증가에 따른 측정전위 감소 정도가 가장 낮은 전극배열이 바로 단극 배열법이다. Fig. 4에서 변형된 쌍극자 배열 I 및 변형된 단극-쌍극자 배열 I은 모두 전극전개수 축에 나란한 직선을 나타내고 있으며, 이는 두 배열법에 의한 측정전위 감소 양상이 S/N 비 측면에서 가장 유리한 단극 배열법과 동일하다는 것을 의미하고 있다. 한편 지하에 홀리는 전류의 양을 높이면 측정 전위 또는 전위차는 그에 비례하여 높아진다. Fig. 4와 위의 식은 변형된 쌍극자 배열 I의 측정값은 전극전개수에 관계없이 항상 단극 배열의 1/3, 변형된 단극-쌍극자 배열 I은 단극 배열의 1/2임을 의미하고 있다. 그러므로 만약 전류의 양을 2 배 혹은 3 배 증가시킬 경우, 변형된 단극-쌍극자 배열 I 혹은 변형된 쌍극자 배열 I은 단극 배열과 동일한 수준의 S/N 비를 갖는 자료의 획득이 가능함을 알 수 있다.

변형된 쌍극자 배열 II 및 변형된 단극-쌍극자 배열 II는 위에서 논한 변형된 배열 I 보다는 측정전위의 감소율이 높으나, 쌍극자 간격을 규정하는  $l$ 과  $k$ 의 값을 크게 할수록 높은 전위차 측정이 가능하며, 이에 따른 S/N 비의 증가를 기대할 수 있다. Fig. 4에 예시한 곡선은 정수인  $l$ 과  $k$ 가 모두 3에 불과하나 변형된 쌍극자 배열 II 및 변형된 단극-쌍극자 배열 II 두 가지 모두 기존의 단극-쌍극자 및 쌍극자 배열보다 높은 전위차를 보이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4에 변형된 단극 배열법의 전위를 함께 나타내지 않은 것은 이동하는 전류 및 전위전극의 수평적인 위치에 따라서 전극전개수가 동일하더라도 측정전위의 크기가 달라지기 때문

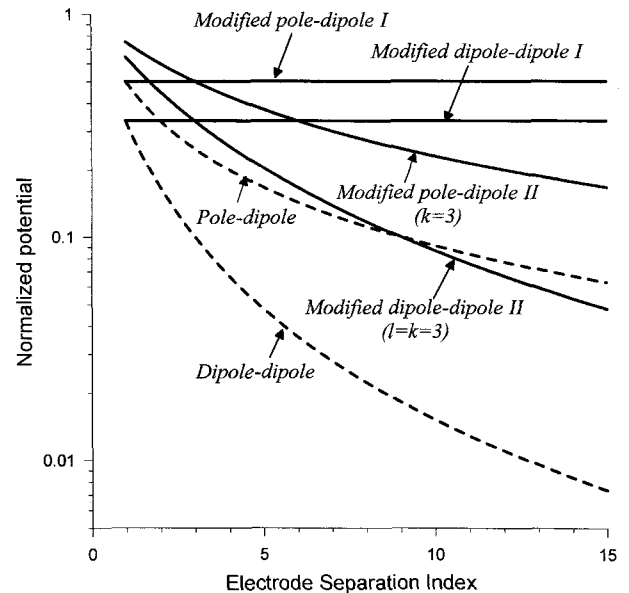


Fig. 4. Normalized potential variations of modified electrode arrays in the homogeneous half-space. The potential of each array was normalized by that of pole-pole array. Potential variations of conventional pole-dipole and dipole-dipole arrays are also plotted as dotted lines.

이다. 측정전위의 수준은 이동하는 양의 전류 또는 전위전극이 측선 양단에 가까이 갈수록 단극-쌍극자 배열의 측정값과 비슷한 수준이 되며, 또한 측선의 중앙부위에 가까이 위치할수록 단극 배열과 비슷한 수준이 된다. 그러므로 비록 변형된 단극 배열법의 측정 전위가 기존의 단극 배열법의 수준보다는 낮지만 대부분의 측정에서 기존의 단극-쌍극자 배열법의 측정전위보다 훨씬 높은 측정값을 유지할 수 있다.

### 전기적 잡음의 영향

본 논문에서 제안한 전극배열 중 변형된 쌍극자 및 단극-쌍극자 배열은 기존 배열의 낮은 전위 측정값을 극복하여 높은 수준의 S/N 비가 가능하도록 설계한 전극배열들이다. 수치 모형 실험을 통하여 주변 잡음에 대한 새로운 배열의 효과에 대하여 살펴보자.

위에서 논한 바와 같이 균질 반무한 공간에서의 전극배열에 따른 측정 전위값의 비교를 통하여 각 전극배열간의 상대적인 S/N 비를 유추할 수 있다. 그러나 이에 대한 효과를 가시화하기 위해서는 전기적인 잡음을 함유한 자료를 역산하여 그 결과 영상을 비교하여야 한다. 많은 연구에서는 잡음의 효과를 실험하기 위하여 겉보기 비저항 값에 무작위 잡음을 혼합하는 방법을 취한다. Takakura(1999) 또한 이와 같은 방법을 이용하여 잡음에 대한 2차원 전기비저항 탐사에서의 전극배열을 비교한 바 있다. 그러나, 실제 측정값에 포함되는 전기적 잡음은 겉보기 비저항 값이 아니라 측정되는 전위 또는 전위차에 포함된다. 그러므로 겉보기 비저항에 잡음을 혼합하는 수치 모델링 실험은 실제의 측정 환경을 제대로 반영할 수 없다. 본 연구에서는 이와 같은 점을 감안하여 수치 모델링으로부터 계산된 전위 또는 전위차에 무작위 잡음을 혼합하여 현장의 잡음 효과를 재현하는 방식을 채택하였다. 잡음의 수준은 최대  $\pm 5$  mV/A로 가정하였다. 이와 같은 정도의 전기적 잡음 수준은 필자의 현장경험 등에 미루어 보아 약간 높은 수준으로서 전기적 잡음에 대한 전극배열의 반응을 비교하기에 적절하다고 생각된다. 비교의 편의를 위하여 자료의 S/N 비를 높이기 위한 중합을 하지 않았다고 가정하였으며, 자료의 편집 또한 수행하지 않았다고 가정하였다.

지하의 전기비저항이 높은 경우에는 전기적인 잡음이 미치는 영향이 미미하므로 전기전도도가 높은 경우를 상정하여 전기적 잡음에 미치는 효과에 대하여 검증한다. Fig. 5는 전기적 잡음에 대한 반응을 검토하기 위한 2차원 지하구조 모형으로, 기반암의 전기비저항을 20 ohm-m로 설정하였다. 본 모형은 그 전기비저항 분포가 대단히 낮은 값을 보이므로, 국내의 경우 지반조사 현장보다는 쓰레기 처분장 등에 대응하는 모형으로 간주할 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 5에 대하여 계산된 변형된 단극, 변형된 쌍극자 배열 I, 변형된 단극-쌍극자 배열 I의 겉보기 비저항 가단면도이며, 비교를 위하여 기존의 쌍극자 및 단극-쌍극자 배열의 가단면도를 함께 나타내었다. 변형된 단극-쌍극자 배열 및 쌍극자 배열은 쌍극자 간격이 측정 간격보다 크므로 동일 측선 상에서 기존의 전극배열을 이용하여 측정할 경우보다 측정 자료의 수가 작아진다. 변형된 쌍극자 배열 I의 측정자료 수가 가장 작으며, 웨너 배열과 동일하다. 이와 같은 측정자료 수의 감소는 변형된 전극배열이 갖는 단점으로 지적될 수 있을 것이다. 한편 변형된 단극 배열은 음의 전류 및 전위 전극이 측선의 양단에 각각 위치하므로 측정 가능한 자료수는 쌍극자 배열과 동일하다. 또한 그림 (c)의 변형된 단극-쌍극자 배열의 가단면도를 보면 그 형태가 비대칭적인 모양을 보임이 특징적이다.

기존 전극 배열인 Fig. 6의 (a)와 (b)를 살펴보면 전기적 잡음의 효과가 상당히 크게 나타나 있으며 전극전개수가 증가함에 따라 겉보기 비저항에 나타나는 잡음의 효과가 급격하게 증폭된다. 특히 가장 낮은 측정값을 보이는 쌍극자 배열의 경우에는 전극전개수  $n=1$ ,  $n=2$  일 때의 겉보기 비저항 값은 어느 정도 신뢰성이 있는 것으로 보이나, 그 이하에서는 잡음의 정도가 심해져서 전극전개수  $n=7$  이하에서는 음의 겉보기 비저항까지 나타난다. 한편 본 연구에서 제안한 변형된 단극-쌍극자 및 쌍극자 배열에서는 기존의 전극배열에 비하여 잡음의 효과가 현저하게 줄어들어 있음을 알 수 있으며 새로이 제안한 변형된 전극배열법의 장점을 잘 나타내고 있다.

Fig. 7은 Fig. 6의 겉보기 비저항을 역산한 결과로써 잡음 효과를 한층 더 잘 보여주고 있다. 기존 단극-쌍극자 배열의 영상은 전기적 잡음에 의하여 지하구조가 상당 부분 찌그러진

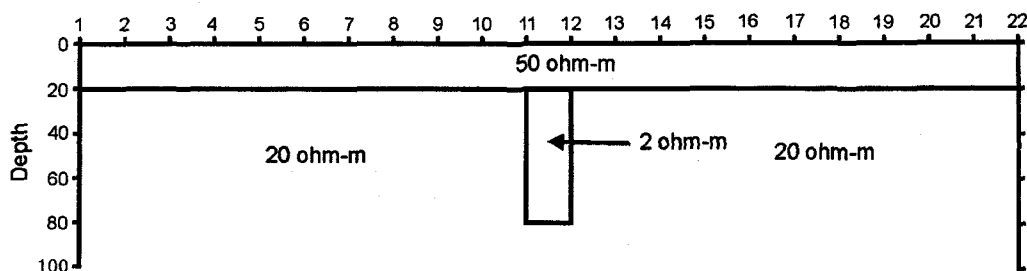


Fig. 5. Two-dimensional earth model to examine the response of electrode arrays to the electrical noise.

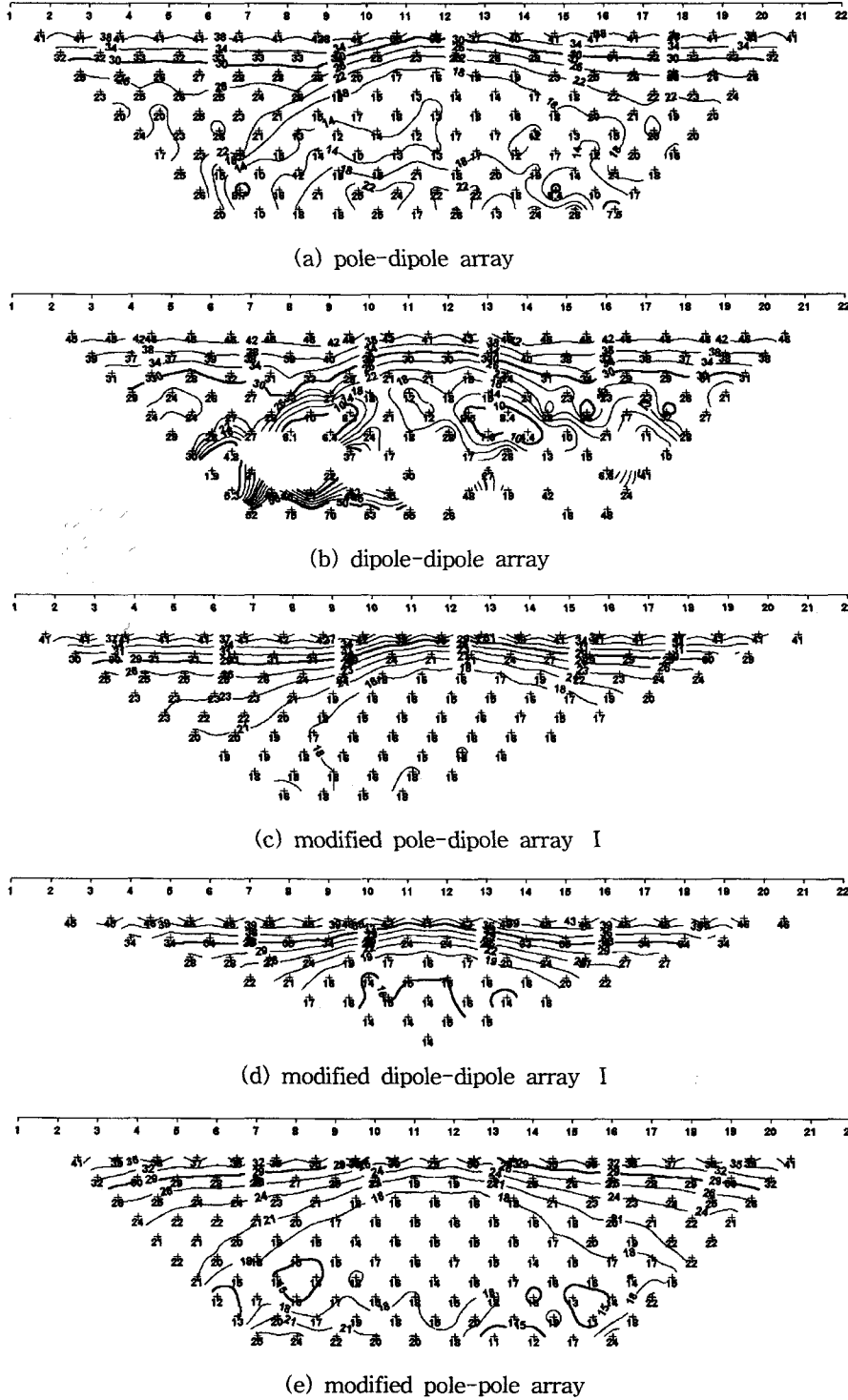


Fig. 6. Apparent resistivity pseudosections of various arrays over the model in Fig. 5. Measured voltages are contaminated by the random electrical noise having peak-to-peak value of  $\pm 5$  mV.

형태로 나타나고 있으며, 특히 기존 쌍극자 배열은 이상대인 수직 전도체의 영상을 전혀 보여주지 못하고 있다. 이와 같은 기존 배열의 약점, 즉 전기비저항이 낮은 환경에서 낮은 S/N 비를 극복하기 위해 제안한 변형된 단극-쌍극자 배열 및 변형

된 쌍극자 배열의 영상에서는 전기적 잡음이 함유되어 있음에도 불구하고 지하구조를 훌륭히 재현하고 있다. 특히 변형된 쌍극자 배열 자료의 역산은 입력자료의 수가 70개이며 역산변수의 수는 85개로서 자료의 수가 변수의 수보다 적은 under-

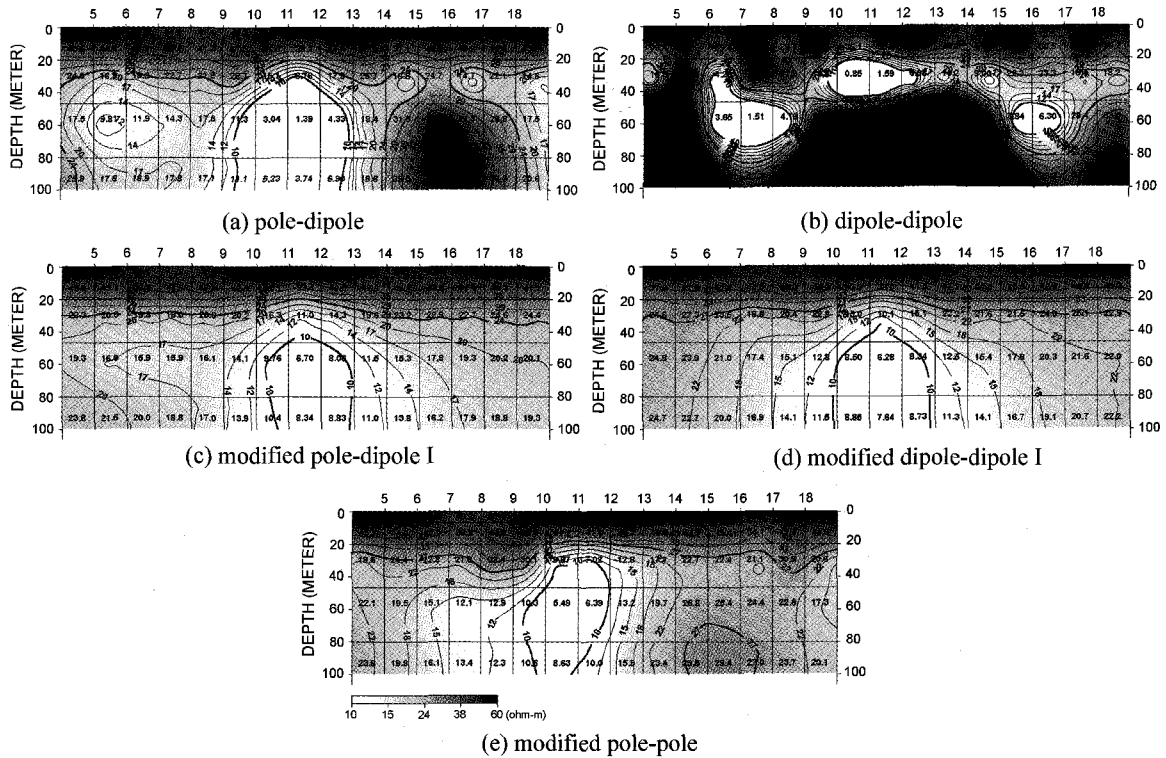


Fig. 7. Resistivity images obtained by the inversion of synthetic data shown as pseudosections in Fig. 6.

determined problem에 속한다. 이와 같은 문제점에도 불구하고 그림 (d)에서 보는 바와 같이 지하구조를 그대로 영상화하고 있다. 동일한 측정자료의 수를 이용하여 역산한 웨너 배열의 영상 Fig. 2(f)와 비교하면, 본 연구에서 제안한 변형된 전극배열법의 효율성을 알 수 있다. 한편 변형된 단극 배열법은 기존의 단극 배열법의 원거리 접지 전극을 배제함으로써 탐사의 효율성을 제고하기 위하여 제안된 것이며, S/N 비의 측면에서는 기존의 단극 배열법보다 떨어진다. 그러나 역산결과에서는 변형된 단극-쌍극자 또는 변형된 쌍극자 법보다는 전기적 잡음의 효과가 나타나 있지만 지하구조를 어느 정도 재현하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 변형된 쌍극자 배열 II를 이용하여 획득한 탐사자료를 동일축선 상에서 획득된 쌍극자 배열 탐사자료와 비교한 것으로 변형된 쌍극자 배열의 유용성을 확인한 현장자료의 예이다. 두 배열의 측정 간격  $a$ 는 공히 5m이며, 변형된 쌍극자 배열의 쌍극자 간격을 규정하는  $k$  및  $l$ 은 모두 6으로 쌍극자 간격은 30m이다. 탐사의 목적은 강 하부의 지반구조를 파악하기 위한 것으로, 강 바닥에 전극을 설치하고 탐사자료를 획득하였다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 이 지역 지반의 전기비저항은 그다지 높은 편은 아니지만, 쌍극자 배열 탐사자료의 획득이 곤란할 정도의 저비저항 지역은 아니다. 따라서 최초에는 쌍극자 배열을 이용하여 탐사가 수행되었으며 그림의

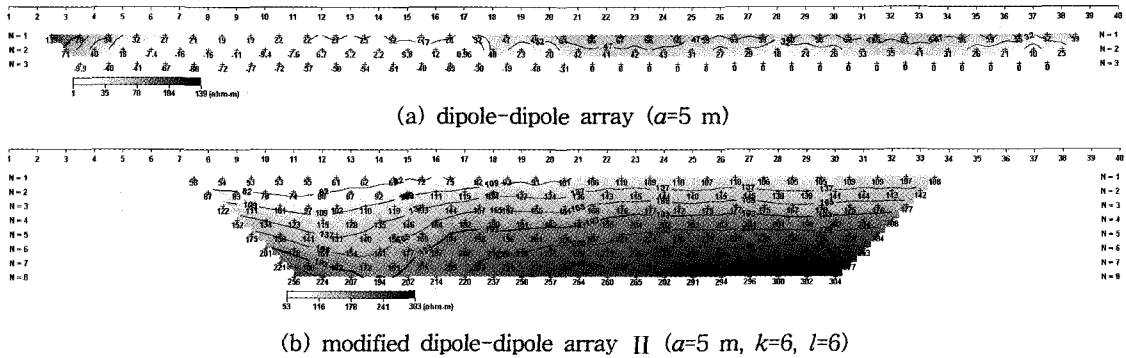


Fig. 8. Comparison of field data examples acquired at the same survey line using conventional dipole-dipole (a) and modified dipole-dipole arrays (b).



(a)는 그 자료를 도시한 것이다. 그러나, 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 쌍극자 배열 탐사자료는 전극전개수  $n=2$ 에서부터 음의 겹보기 비저항이 측정되기 시작하였으며,  $n=3$  이하에서는 거의 전 측정에서 음의 겹보기 비저항이 측정되어 탐사가 불가능하였다. 가단면도 상에  $n=3$ 까지만 나타낸 것은 쌍극자 배열에 의한 탐사가 불가능한 것으로 판단하여 탐사를 중단하였기 때문이다. 이와 같이 낮은 S/N 비를 갖는 탐사자료가 획득된 것은 강물의 흐름에 의하여 대단히 높은 유동 전위 (streaming potential)가 발생되었기 때문으로 해석되었다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 본 논문에서 제안하는 변형된 쌍극자 배열 II를 채택하여 탐사를 수행하였으며, 그 결과를 그림의 (b)에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 자료 획득 시에 매우 안정적인 측정이 이루어졌으며 S/N 비가 높은 자료의 획득이 가능하였다.

### 변형된 전극배열법의 분해능

변형된 쌍극자와 변형된 단극-쌍극자 배열은 쌍극자 간격이 기존의 쌍극자 또는 단극-쌍극자 배열보다는 커지므로 분해능은 기존의 배열보다 낮을 것으로 예상된다. 한편 변형된 단극 배열은 음의 전류 및 전위 전극이 축선의 양단에 위치하므로 기존의 단극 배열법보다는 오히려 분해능은 향상될 것으로 예상할 수 있다. 이와 같은 추론을 수치 모델링 자료를 이용하여 검증하여 보자.

Fig. 9는 Fig. 2(a)의 지하구조 모형에 대한 실험 결과로서 변형된 전극 배열법을 이용할 경우 두 전도체를 분리하여 영상화할 수 있는 가를 실험한 것이다. 단극-쌍극자 배열은 전류 전극과 전위측정 쌍극자 사이에 상반성의 원리(reciprocity principle)가 성립하지 않으므로 근본적으로 비대칭적인 배열이다(Fig. 2(c) 참조). 바로 이 때문에 변형된 단극-쌍극자 또한 그림의 (c)와 같이 대칭인 두 전도체가 비대칭적으로 나타난다. 쌍극자가 선행하는 변형된 쌍극자-단극법에도 그림에서와 같이 동일한 현상이 발생한다(Fig. 9(d)). 동일한 모형에 대한 기존의 단극-쌍극자 및 쌍극자 전극배열의 실험 결과인 Fig. 2의 (c), (d)와 변형된 전극 배열의 영상 Fig. 9(b), (c), (d)를 비교하면 전도체의 형상이 기존의 전극배열보다 약간 흐리게 나타나 있음을 알 수 있으며, 변형된 단극-쌍극자 및 쌍극자 배열이 그의 원인이 되는 기존의 전극배열에 비하여 분해능이 약간 떨어짐을 알 수 있다. 그러나 전체적으로 분리된 두 전도체를 인지하기에 충분한 영상을 제공하며, 위에서 논한 높은 S/N 비를 고려하면 변형된 전극배열의 적용성은 매우 높다고 생각된다. 한편 변형된 단극 배열은 변형된 전극배열법 중 분해능이 가장 떨어짐을 보여주고 있다. 그러나 Fig. 2(b)의 기존의 단극 배열의 결과와 비교하면 오히려 분해능이 단극 배열보다 향상되어 있음을 알 수 있다.

### 복합역산 실험

단극-쌍극자 배열은 비대칭적인 전극배열로서, 전류원인 단극이 축선상에서 전위차 측정 쌍극자에 선행하여 이동함이 통상적이다. 그러나 전위 측정 쌍극자가 전류원인 단극에 선행하여 이동하는 역 단극-쌍극자 또는 쌍극자-단극 배열의 겹보기 비저항 가단면도 및 역산결과 지하구조 영상은, 지하구조가 좌우 대칭인 경우 통상적인 단극-쌍극자 배열에 의한 결과와 완전히 좌우 반전된 결과가 얻어진다. 이와 같은 단극-쌍극자 및 쌍극자-단극 배열 탐사를 동일 축선상 같은 지점에서 동시에 측정하여 지하 이상대의 위치를 탐지하는 방법을 Bristow 법이라고 한 바 있으며(이상규, 1985; Smith, 1986; Lowry and Shive, 1990), 이는 단극-쌍극자 배열의 비대칭성을 이용하여 측정곡선 상에서 해석하는 방법을 의미한다. 그러나, Bristow 법의 개념을 현재의 역산에 응용하여 단극-쌍극자 및 쌍극자-단극 배열 탐사자료를 동일 축선상에서 모두 측정하고 이를 역산하여 영상을 구성할 수 있으며, 이를 통하여 단극-쌍극자 배열의 문제점인 영상의 비대칭성을 극복할 수 있다(김정호 등, 2001). 이와 같은 개념은 변형된 단극-쌍극자 배열에 그대로 적용할 수 있으며, Fig. 10(a)는 Fig. 9(c), (d)의 영상구성에 사용된 변형된 단극-쌍극자 배열과 변형된 쌍극자-단극 배열 자료를 복합 역산하여 구성한 영상이다. 각각의 자료를 역산한 Fig. 9(c), (d)와 비교하면 단극-쌍극자 배열의 문제점인 영상의 비대칭성이 훌륭하게 극복되어 있음을 알 수 있다.

Bristow 법은 근본적으로 독립된 전극배열로 간주하기는 어려우며, 두 종류 자료의 복합 이용, 즉 복합역산을 이용한 자료해석의 개념으로 파악하여야 한다. 그러나 Bristow 법은 단극-쌍극자 배열을 이용한 것이므로, 그 비대칭성을 극복하기 위해서는 반드시 쌍극자-단극 배열 자료와 복합 역산하여야 한다. 그러나 상반성이 성립되는 변형된 쌍극자 또는 변형된 단극 배열은 비대칭적인 단극-쌍극자 배열을 제외하고는 어떠한 전극 배열의 자료와도 복합역산이 가능하다. Fig. 10의 (b)와 (c)는 이의 예로서, (b)는 변형된 쌍극자 배열 I과 변형된 쌍극자 배열 II의 자료를 복합역산한 것으로, 변형된 쌍극자 배열 II의  $k$  및  $l$ 을(Fig. 3 참조) 모두 3으로 하여 쌍극자 간격을 측정간격의 3배로 고정한 것이다. 한편 (c)는 변형된 쌍극자 배열 I과 변형된 단극 배열 자료를 복합 역산한 결과이다. Fig. 10의 세 영상 모두 대칭인 한 쌍의 지하 전도체를 잘 구현해 주고 있다. 그러나 세 종류의 복합역산 결과 영상에서 두가지 변형된 쌍극자 전극배열법 자료를 복합 역산한 결과 영상인 (b)가 분해능이 가장 높은 것으로 나타나며, 기존 전극배열중 분해능이 가장 높은 쌍극자 배열과 비슷한 수준이다. 영상 (b)가 입력 자료의 수가 가장 적음에도 불구하고 분해능이 가장 높게 나타나는 것은 변형된 쌍극자 배열이 쌍극자 배열로부터 유도되었으므로 원래의 쌍극자 배열이 갖는 고분해능을 그대로

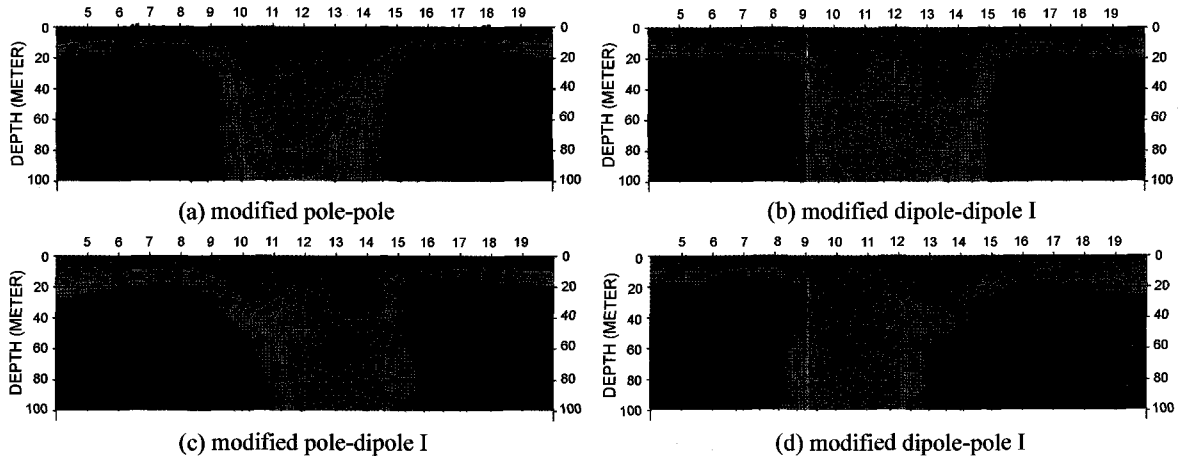


Fig. 9. Resistivity images obtained by the inversion of synthetic data using modified electrode arrays over the earth model shown in Fig. 2(a). The resolving power of the modified electrode arrays can be examined in this experiment.

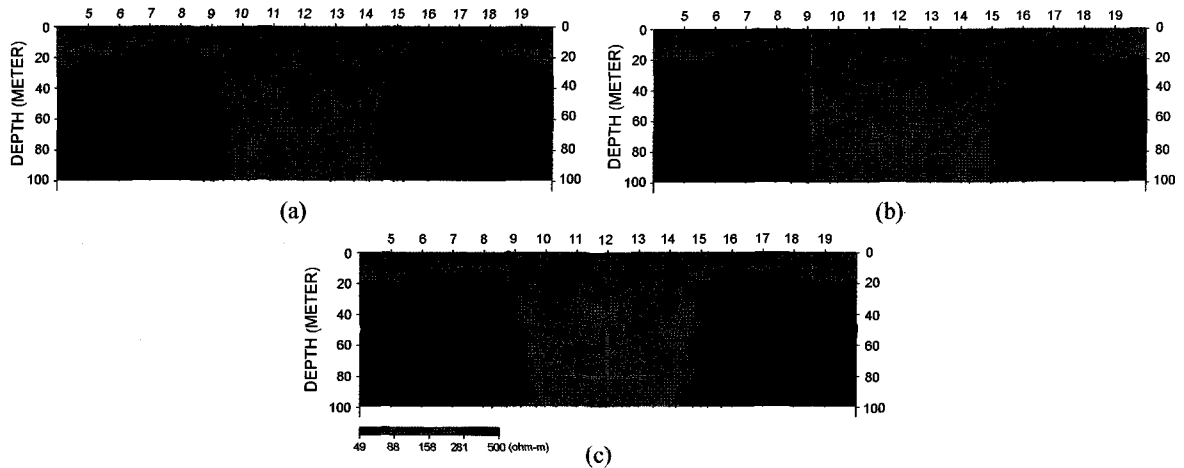


Fig. 10. Joint inversion results using three kinds of data sets.

- (a) Modified Bristow method (modified pole-dipole I + modified dipole-pole I)  
 (b) Modified dipole-dipole I + modified dipole-dipole II  
 (c) Modified dipole-dipole I + modified pole-pole arrays.

로 물려받았기 때문으로 생각된다.

## 결 론

기존의 2차원 전기비저항 탐사에 일반적으로 사용되는 전극 배열들의 단점을 보완하기 위해 단극과 쌍극자 전극을 사용하는 전극배열로부터 변형된 단극 배열, 두 종류의 변형된 단극-쌍극자 배열, 두 종류의 변형된 쌍극자 배열 등, 모두 5 종류의 변형된 전극배열법을 제안하였다. 변형된 단극 배열법은 원거리 집지전극의 필요라는 단극 배열법의 비효율성을 보완하기 위하여 음의 전류 및 전위 전극을 축선의 양단에 각각 고정시킨 전극배열법이다. 두 종류의 변형된 쌍극자 및 두 종류의 단극-쌍극자 배열법은 쌍극자 또는 단극-쌍극자 배열이 갖는 문제점, 즉 낮은 측정값에 의한 낮은 신호대 잡음비를 개선

하기 위하여 높은 측정값의 획득이 가능하도록 설계한 전극배열법이다. 수치 모델링과 2차원 역산을 이용한 수치 실험을 통하여 전기적 잡음에 의한 영향과 분해능 등에 대하여 비교·고찰하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 변형된 단극-쌍극자, 변형된 쌍극자 배열은 기존의 단극-쌍극자 및 쌍극자 배열 보다 상당히 높은 측정값의 획득이 가능하며, 높은 신호 대 잡음비의 측정값을 획득할 수 있다. 그러므로 전기전도도가 높거나 전기적 잡음이 심한 지역에서 고분해능의 영상을 획득하고자 할 때에 적용성이 높다.
2. 변형된 단극-쌍극자 및 변형된 쌍극자 전극배열은 그 원천인 단극-쌍극자 및 쌍극자 배열보다 분해능은 약간 낮다. 그러나, 변형된 쌍극자 배열은 기존의 단극-쌍극자 배열보다 분해능이 높으며, 변형된 단극-쌍극자 배열은 기존의 단극 배열 보다 높은 분해능을 보인다.

3. 변형된 단극 배열법은 기존의 단극 배열법보다 측정 전위는 약간 낮으나, 분해능은 오히려 높다. 전기전도도가 높은 지역에서 원거리 접지가 불가능한 경우 단극 배열법의 대안으로 적용할 수 있다. 또한 원거리 접지를 생략함으로써 탐사의 효율과 함께 측정값의 신호 대 잡음비를 향상시키는 목적으로도 사용할 수 있다.

4. 두 종류의 변형된 전극배열 탐사자료를 복합 역산함으로써 기존의 전극배열 중 가장 분해능이 높은 쌍극자 배열과 같은 정도의 분해능을 가질 뿐만 아니라 신호 대 잡음비가 높은 영상의 획득이 가능하다.

앞으로 전기비저항이 낮은 지역, 전기적 잡음이 심한 지역 또는 공간적인 제약으로 원거리 접지가 어려운 지역에서 고분해능 영상을 획득하고자 할 경우, 본 연구에서 제안한 전극배열법들이 유용한 수단으로 활용될 것으로 기대된다.

### 참고문헌

김정호, 1987, 전기비저항 탐사자료의 2차원 역산 : 공학박사 학

위논문, 서울대학교.

김정호, 송윤호, 정승환, 2000, 전기·전자탐사를 이용한 지반구조의 영상화: 2000년 공동 특별강연 논문집, 한국지구물리탐사학회, 한국지반공학회 지반조사 위원회, 121-154.

김정호, 이명종, 송윤호, 정승환, 2001, 2차원 전기비저항 탐사를 위한 전극배열법의 비교: 한국자원공학회지, **38**, 116-118.

이상규, 1985, 탄전지역의 공동탐사를 위한 정성적 전기탐사법의 시도: 대한광산학회지, **22**, 176-196.

Lowry, T., and Shive, P. N., 1990, An evaluation of Bristow's method for the detection of subsurface cavities: *Geophysics*, **55**, 514-520.

Smith, D. L., 1986, Application of the pole-dipole resistivity technique to the detection of solution cavities beneath highways: *Geophysics*, **51**, 833-837.

Takakura, T., 1999, Evaluation of the characteristics of various electrode arrays in 2-D electrical prospecting: *Butsuri-Tansa*, **52**, 409-420.

Yi, M.-J., and Kim, J.-H., 1998, Enhancing the Resolving power of the Least-squares inversion with Active Constraint Balancing: *68th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 485-488.