

## 하저 지반특성 규명을 위한 수상 전기비저항 탐사에 관한 연구

김정호<sup>1)</sup> · 이명종<sup>1)</sup> · 송윤호<sup>1)</sup> · 조성준<sup>1)</sup> · 이성곤<sup>1)</sup> · 손정술<sup>1)</sup> · 정승환<sup>1)</sup>

### A Study on the DC Resistivity Method to Image the Underground Structure Beneath River or Lake Bottom

Jung-Ho Kim<sup>1)</sup>, Myeong-Jong Yi<sup>1)</sup>, Yoonho Song<sup>1)</sup>, Seong-Jun Cho<sup>1)</sup>,  
Seoung Kon Lee<sup>1)</sup>, Jeong-Sul Son<sup>1)</sup> and Seung-Hwan Chung<sup>1)</sup>

**요약** : 수로는 약선대를 따라 형성되는 경우가 많으며, 특히 강을 따라 단층이 발달하는 경우가 많다. 교량과 같은 수상 구조물의 건설을 위하여 탐사의 필요성이 높음에도 불구하고 육상과는 달리 수상 전기비저항 탐사가 활발하게 적용되지 못한 것은 현장탐사와 자료해석의 어려움 때문이었다고 볼 수 있다. 그러나 무엇보다도 중요한 것은 양질의 자료 획득이며, 양질의 자료 획득이 육상 탐사보다 어려운 것은 영상화하고자 하는 지하구조가 물로 덮여 있다는 점에서 연유한다. 이 연구에서는 이와 같은 점에 중점을 두고 수치 모델링과 현장탐사 사례 분석을 통하여 수상 전기비저항 탐사 자료의 특성, 현장 탐사와 해석 방법에 대하여 논하였다. 수상 전기비저항 탐사는 전극이 물 표면에 혹은 물 바닥에 설치되어 있는가에 따라 탐사자료의 획득방법, 고려할 사항, 해석 방법이 달라지므로, 전극을 물 표면에 띄운 경우와 바닥에 설치한 경우로 나누어 논의를 전개하였다. 이를 통하여 하상 전기비저항 탐사는 수층 하부 지반을 정확하게 영상화할 수 있음을 보였다. 또한 수상 전기비저항 탐사에서 전극을 물 바닥에 설치하는 것이 물 표면에 설치하는 것보다 훨씬 더 분해능이 높은 영상을 획득할 수 있다. 그러나 두 방법 모두 육상 탐사에 비하여 지하구조에 대한 민감도는 낮고, 유동전위 등에 의하여 전기잡음이 높을 가능성이 높기 때문에 육상 탐사보다 높은 S/N 비를 갖는 현장 탐사자료의 획득이 필수적이며 가능한 한 높은 분해능을 갖는 전극배열을 선택하여야 하는 것으로 나타났다. 변형된 전극배열법은 원거리 접지가 불필요하다는 점과 아울러 그의 원천이 되는 전극배열보다 높은 신호대 잡음비를 갖는 자료 획득이 가능하다는 점에서 수상 전기비저항 탐사에 많은 활용이 기대된다.

**주요어** : 수상 전기비저항 탐사, 하저 지반조사, 변형된 전극배열.

**Abstract** : Since weak zones or geological lineaments are likely to be eroded, there may develop weak zones beneath rivers, and a careful evaluation of ground condition is important to construct structures passing through a river. DC resistivity method, however, has seldomly applied to the investigation of water-covered area, possibly because of difficulties in data acquisition and interpretation. The data acquisition having high quality may be the most important factor, and is more difficult than that in land survey, due to the water layer overlying the underground structure to be imaged. Through the numerical modeling and the analysis of a case history, we studied the method of resistivity survey at the water-covered area, starting from the characteristics of measured data, via data acquisition method, to the interpretation method. We unfolded our discussion according to the installed locations of electrodes, i.e., floating them on the water surface, and installing them at the water bottom, because the methods of data acquisition and interpretation vary depending on the electrode location. Through this study, we could confirm that the DC resistivity method can provide fairly reasonable subsurface images. It was also shown that installing electrodes at the water bottom can give the subsurface image with much higher resolution than floating them on the water surface. Since the data acquired at the water-covered area have much lower sensitivity to the underground structure than those at the land, and can be contaminated by the higher noise, such as streaming potential, it would be very important to select the acquisition method and electrode array being able to provide the higher signal-to-noise ratio (S/N ratio) data as well as the high resolving power. Some of the modified electrode arrays can provide the data having reasonably high S/N ratio and need not to install remote electrode(s), and thus, they may be suitable to the resistivity survey at the water-covered area.

**Keywords** : resistivity survey at water-covered area, site investigation at water-covered area, modified electrode array

\*2002년 10월 21일 접수

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

## 서 론

하천과 같은 수계는 약선대를 따라 형성되는 경우가 많으며, 단층 자체가 강의 유역을 형성하는 경우가 많다. 교량건설을 위한 지반조사와 같이 강 하부에 발달하는 연약대를 조사하여야 할 경우가 많은데, 강물 때문에 육안으로 관찰할 수가 없으며 시추탐사는 시추 지점에 대한 정보만을 제공하므로 물리탐사가 지반조사에서 차지하는 비중은 육상보다 오히려 높다고 할 수 있을 것이다. 최근에 들어서 이와 같은 점에 주목하여 지반조사를 위한 수상탐사에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 예를 들면 환경, 토목, 지질공학 분야에 대한 물리탐사의 적용을 주목적으로 하는 학회인 미국 EEGS(The Environmental and Engineering Geophysical Society)에서 주관한 2002년도 학술 발표 심포지움 SAGEEP 2002에서 발표된 수상 탐사에 대한 논문은 6 편에 달하며, 이를 위하여 “호수와 하상에서의 물리탐사”라는 새로운 분과가 개설될 정도로 수상 물리탐사가 많은 주목을 받고 있다(Kim *et al.*, 2002; Snyder *et al.*, 2002; Manheim *et al.*, 2002; Kurahashi, 2002; Boyce *et al.*, 2002; Snyder and Wightman, 2002). 국내에서도 지반조사에 대한 응용을 목적으로 한 하상탐사 연구와 적용사례가 발표되기 시작하고 있다(김정호 등, 2001c; 김정호 등, 2001d; 정호준 등, 2001; 김종열 등, 2001).

다양한 물리탐사법 중 전기비저항 탐사는 탐사자료의 획득이 비교적 쉽고 우리나라의 지반의 전기비저항이 높기 때문에 비교적 정확한 지하구조 영상의 획득이 가능하여 현재 국내에서는 지반조사의 목적으로 가장 많이 응용된다. 지난 20세기에는 수상 전기비저항 탐사에 대한 연구는 국내에서는 거의 찾아보기 어려웠으나 2000년대에 들어서서 수상 전기비저항 탐사에 대한 사례가 발표되기 시작하고 있다(김정호 등, 2001c; 정호준 등 2001). 수상 전기비저항 탐사는 영상화하고자 하는 지하구조를 뒤덮고 있는 수층 때문에 육상 탐사에 비하여 탐사자료의 획득에서부터 해석에 이르는 전과정이 육상 탐사에 비하여 어렵다고 할 수 있으나, 특히 양질의 탐사자료의 획득이 가장 어려운 점으로 들 수 있다. 양질의 탐사자료의 획득을 위해서는 탐사자료의 특성에 대한 이해가 선행되어야 한다. 수상 전기비저항 탐사자료의 특성을 제어하는 가장 중요한 요소는 지하 모형의 측면에서는 수층의 존재이며 자료획득의 측면에서는 전극배열법이다. 이 연구에서는 이 두 측면에 초점을 맞추어 수치 모델링과 사례 분석을 통하여 수상 전기비저항 탐사 자료의 특성에 대하여 논하고자 한다. 또한 수상 전기비저항 탐사는 전극의 위치, 즉 물 표면에 혹은 물 바닥에 설치되어 있는가에 따라 탐사자료의 획득방법, 고려할 사항, 해석 방법이 달라진다. 이러한 측면에서 전극을 물 표면에 띄운 경우와 바닥에 설치한 경우로 나누어 논의를 전개한다.

## 수상 전기비저항 탐사와 전극의 설치 위치

Fig. 1은 이 연구에서 채택한 수상 탐사의 수치모형으로 수직단층과 이를 피복하고 있는 간단한 지하구조이나, 전기비저항을 90 ohm-m로 가정한 수층이 지하구조를 뒤덮고 있음이 육상의 경우와 다른 점이다. 필자의 국내에서의 탐사 경험에 의하면 국내의 강 하부의 퇴적층은 점토의 함량이 적어 약간 높은 비저항을 나타내는 경우가 많으므로 전기비저항을 200 ohm-m로 가정하였다. 수층의 두께에 의한 효과 또한 알아보기 위하여, 물의 심도를 전극간격의 1, 2, 3, 4배, 즉 5, 10, 15, 20 m의 4가지로 가정하여 수치 모델링을 수행하였다. 수치 모형 실험에 사용한 프로그램은 2차원 전기비저항 탐사자료 해석 프로그램으로 국내에서 많이 사용되는 DIPRO for Windows와 수치 모델링 프로그램 EM2DModel이다. EM2DModel은 2.5차원 유한요소법에 기본을 두고 전기, 전자 탐사의 통합 수치 모델링을 목적으로 개발하고 있는 프로그램이며 현재 전기비저항과 IP 탐사까지 개발, 완료되어 있는 상태이다.

Fig. 2는 이 모형에 대해 전위 분포를 계산한 결과 중, 양의 전류전극이 측정 50 m에 위치한 경우의 전위 분포를 도시한 것으로, 비교를 위하여 육상 탐사, 즉 수층이 없는 경우의 결과를 함께 나타낸 것이다. Fig. 2는 측정 전극 설치지점에서의 전위분포의 찌그러짐이, 물 바닥에 전극이 설치되어 있는 경우가 물 표면에 떠 있는 경우 보다 큼을 잘 보여주고 있다. 그러나 육상 탐사의 경우에 비해서는 왜곡의 정도가 훨씬 떨어진다. 이러한 사실로부터 우리는 다음과 같은 점을 이해할 수 있다. 즉, 전극을 물 바닥에 설치한 경우가 물 표면에 띄운 경우보다 지하구조에 대한 민감도(sensitivity)가 분명히 높다. 그러나, 전극의 설치 위치에 관계없이 수상탐사의 지하구조에 대한 민감도는 육상 탐사에 비하여 상당히 떨어지며, 따라서 육상 탐사와 비슷한 정도의 영상의 분해능을 보유하기 위해서는 육상 탐사보다 분해능이 높은 방법, 즉 분해능이 높은 전극배열을 선택하여야 한다는 점을 의미한다. 나아가서 육상 탐사와 동일한 전극배열법을 채택할 경우, 측정 자료에서 나타나는 이상 정도가 육상 탐사보다 상당히 낮으므로 육상 탐사 보다 신

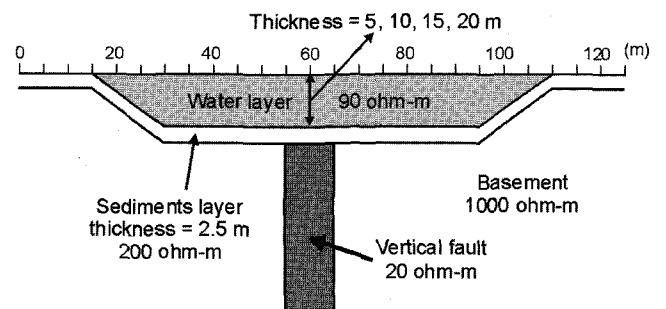
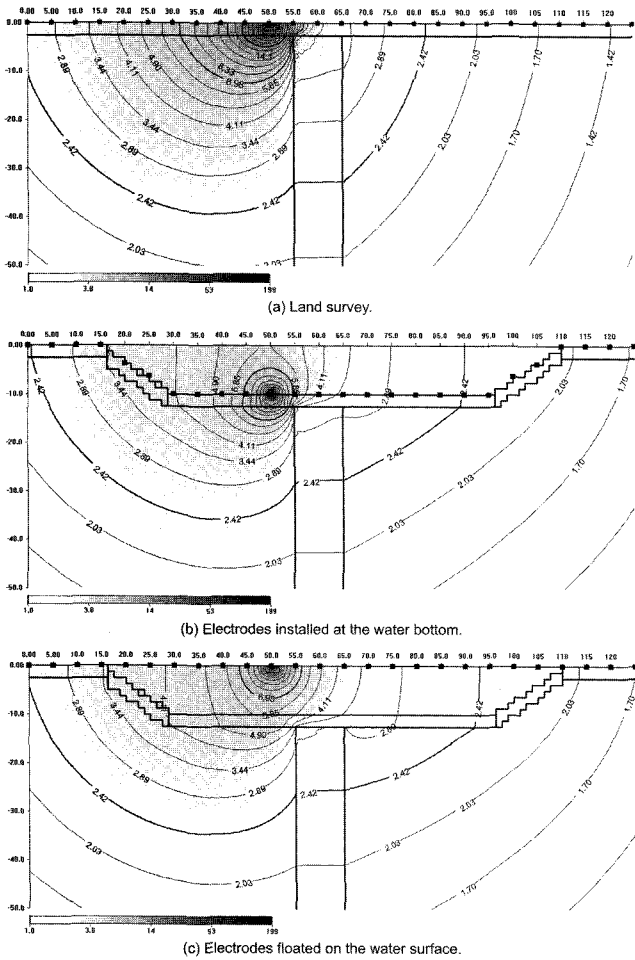


Fig. 1. Numerical model of the electrical resistivity survey at the water-covered area.



**Fig. 2.** Potential distribution variation due to the change of installation location of electrodes. Black rectangles are the measurement points or electrode positions, and the current electrode is located at 50 meter position, the center of the contour lines. The thickness of water layer in (b) and (c) is assumed to be 10 m, twice the measurement interval.

호대 잡음비(signal-to-noise ratio, S/N 비)가 높은 자료의 획득이 필요함을 유추할 수 있다.

Fig. 3은 전극의 설치 위치에 따른 역산 영상의 변화를 보인 것이다. 전극을 물 바닥에 설치한 두 영상 중 (b)는 역산 모형에 수층을 구현한 결과이며, 이에 반해 (a)와 (c)는 수층을 역산 수치 모형에 반영하지 않은 결과이다. 물 표면에 설치한 (a)와 물 바닥에 설치하고 수층을 역산 모형에 구현한 (b)를 비교하면 물 바닥에 설치한 경우가 지하구조를 훨씬 더 뚜렷하게 재현하고 있음을 잘 알 수 있다. 그러나 (a) 또한 수층을 역산 모형에 구현하지 않았음에도 불구하고 수층의 형상과 수직 전도체의 모양을 어느 정도 영상에 반영하고 있다. 한편 (c)는 수층의 형상을 거의 나타내지 못하며 지하구조 또한 제대로 반영하지 못하고 있다. 일견 수직전도체는 영상화된 것으로 보이나 그 심도가 실제와 맞지 않으며, Fig. 1의 지하구조 모형과는 달리 물 바닥이 평탄하지 않을 경우에는 물 바닥의 지형 변

화가 지하구조의 거짓 이상대로 영상화될 가능성이 매우 높다. 그러므로 물 바닥에 전극을 설치한 경우에 수심 변화를 역산 모형에 정확하게 구현하지 않으면 물 표면에 설치한 경우보다 오히려 좋지 못한 결과를 얻을 수 있다. 전극을 물 바닥에 설치하는 현장탐사 방법은 훨씬 더 분해능이 높은 영상을 얻을 수 있다는 장점을 갖는 반면에, 물 표면에 설치하는 방법은 수심 측량과 특별한 역산 모형 설정이 필수적이지 않다는 점에서 현장탐사와 자료해석 두 측면의 효율이 모두 높다는 장점을 갖는다고 할 수 있다.

### 수심 변화의 영향

전극의 설치 위치가 수상 전기비저항 탐사에서 가장 중요한 요소이기는 하지만 수심 또한 측정 자료에 매우 큰 영향을 미칠 것은 자명한 일이다. 우리가 현장에서 측정하는 자료는 전극이 설치된 위치에서의 변화이므로 수심의 변화에 따른 전극 설치 위치에서의 측정값의 변화를 고찰한다.

Fig. 4는 전류전극이 측정점 30 m 위치에 설치된 경우의 물 바닥면 혹은 물 표면에 설치된 전극에서 측정되는 단극배열 겉보기 비저항을 나타낸 것이다. 육상 탐사의 경우에는 전도체의 중심의 직상부인 측정점 60 m에서 저비저항 이상이 가장 뚜렷하게 나타난다. 수상 탐사의 경우, 전극의 위치, 수심에 관계없이 가장 낮은 겉보기 비저항은 전류전극의 위치 부근에서 나타나며, 수층의 존재가 측정자료에 끼치는 영향이 매우 큼을 의미한다. 물론 수심이 측정간격보다 얇아짐에 따라 전도체의 위치에서 더욱 뚜렷한 이상을 보여줄 것은 자명한 일이다. 전극을 물 바닥에 설치한 경우에는 전도체의 직상부에서 저비저항 이상을 보이기는 하나 수심이 깊어짐에 따라 그 정도가 줄어든다. 이러한 사실은 수심이 깊어질수록 양질의 측정자료 획득에 더욱 노력하여야한다는 점과 될 수 있는 한 분해능이 높은 전극배열을 채택하여야한다는 점을 의미한다.

전극을 물 위에 띄운 경우에는 수심이 5 m인 경우 전도체 위치에서 어느 정도의 저비저항 이상을 확인할 수 있으나, 10 m인 경우에는 겉보기 비저항 곡선상의 변곡점으로 겨우 인식할 정도로 이상대가 매우 미약해진다. 그리고 더욱 깊은 15 m 수심인 경우에는 이상대가 완전히 사라져서 겉보기 비저항으로는 전도체의 확인이 불가능하다. 그러므로, 전극을 물 표면에 띄운 경우에는 바닥에 설치한 경우보다 더욱 더 측정에 주의를 기울여야할 것이다. 또한 수심이 측정 간격의 두 배 이상인 경우에는 물 표면에 전극을 설치하여 지하 수직 전도체의 영상을 획득함은 대단히 어렵다는 점을 알 수 있다.

### 지하 이상체가 측정자료에 미치는 영향

수상탐사는 수층의 존재 때문에 지하구조에 대한 감도가 육상 탐사와는 다르며 동일한 수상탐사라 하더라도 전극이 물

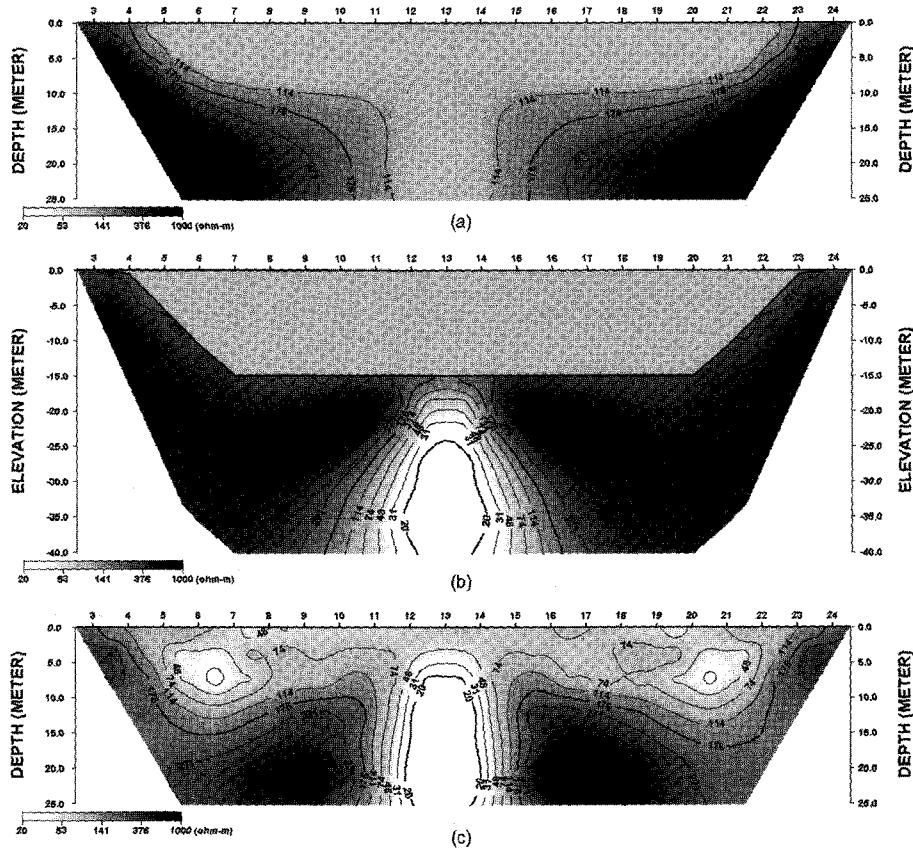


Fig. 3. Inverted subsurface images, when electrodes are floated on the water surface (a), and installed at water bottom ((b) and (c)). The dipole-dipole array is deployed and the water depth is assumed to be 15 m.

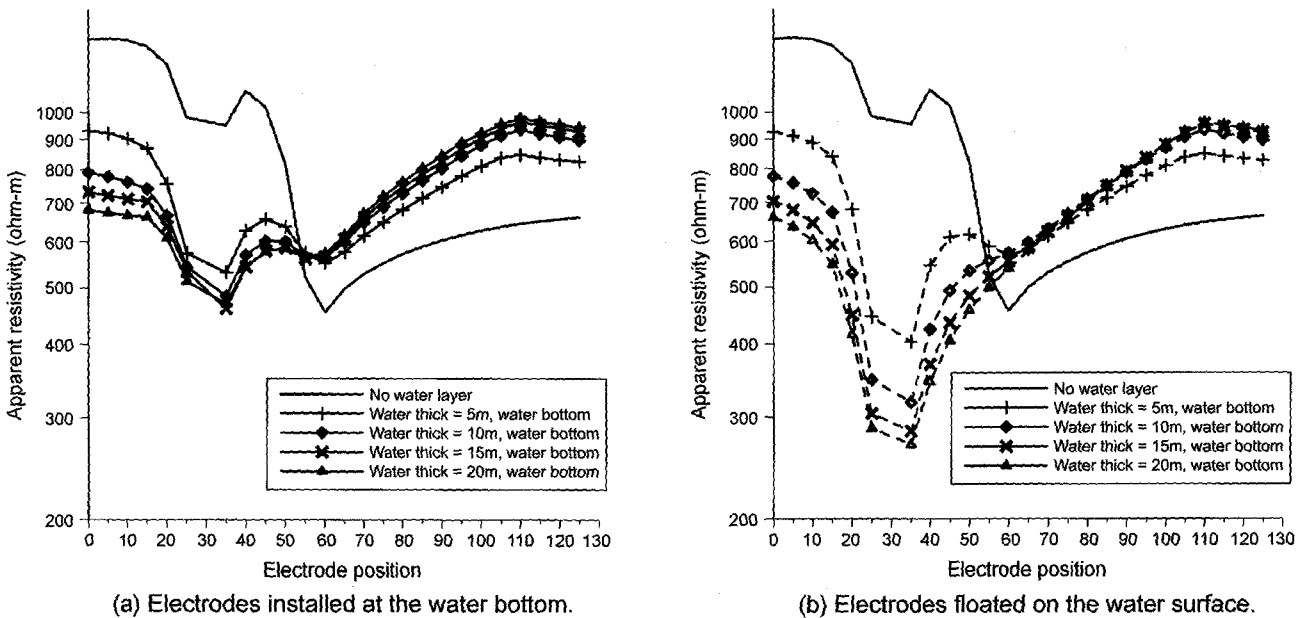
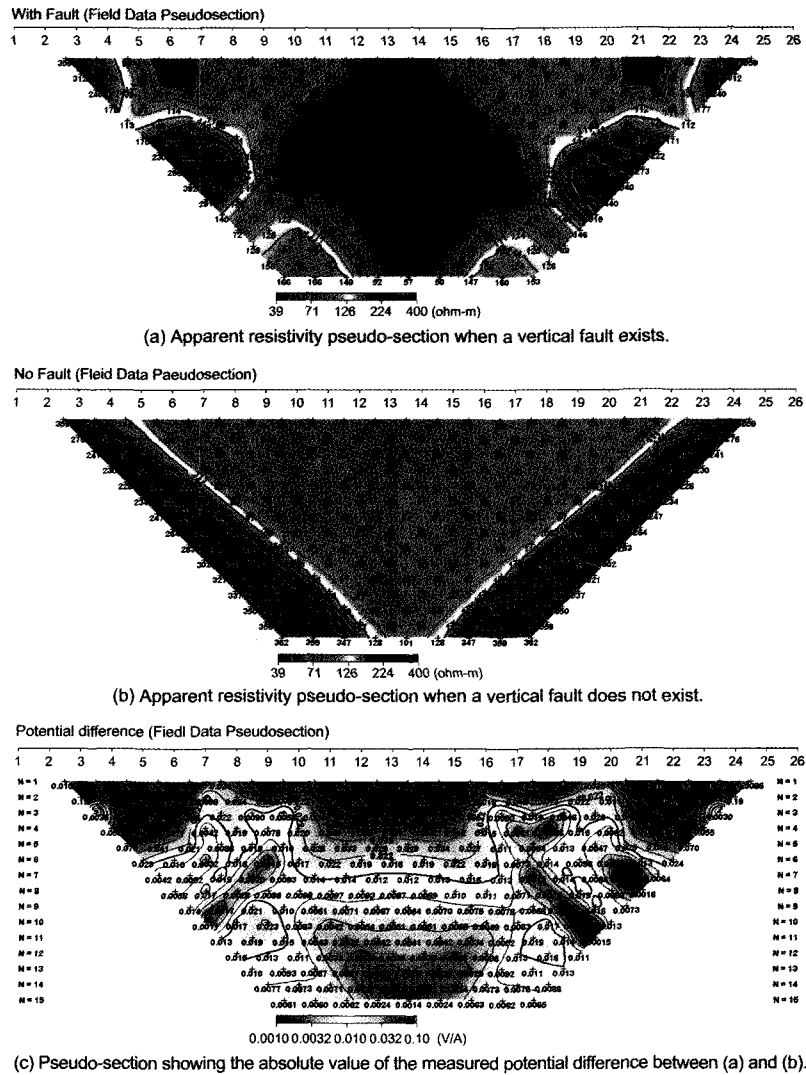


Fig. 4. Variation of apparent resistivity along the profile line depending on the change of water layer thickness. Pole-pole array is used, and the current electrode is located at 30 meter position.

표면에, 혹은 물 바닥에 위치하는가에 따라 달라질 것이다. 이를 검증하기 위해서는 지하구조 모형을 이루는 각 요소에 대하여 다양한 환경하에서 감도분석(sensitivity analysis)을 하여

야 하나, 측정 값, 즉 길보기 비저항에 따라서 달라지며 쉽게 이해하기 위한 가시화가 어렵다. 지반 탐사의 개념으로 볼 때에 Fig. 1에서 가장 중요한 이상체는 수직 단층이므로 수직 단



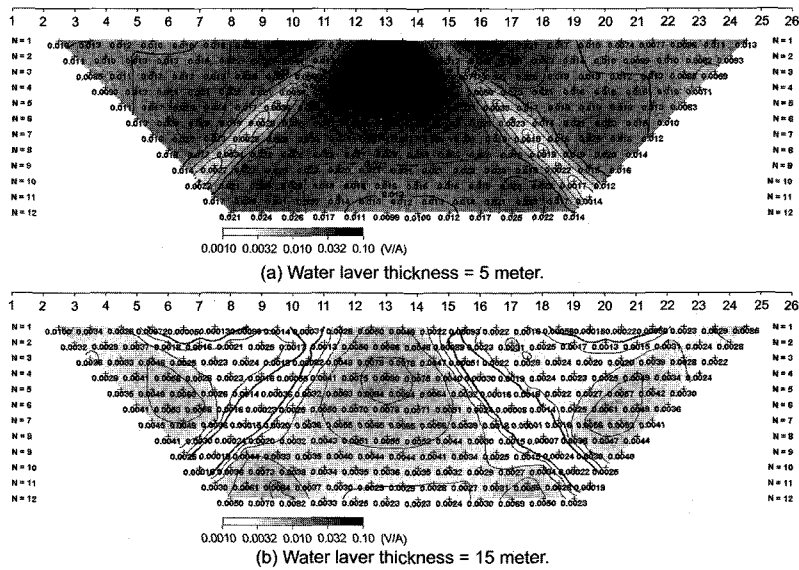
**Fig. 5.** Numerical modeling tests to show the influence of the vertical fault in the model of Fig. 1 on the measured results, when electrodes are installed at the water bottom. Dipole-dipole array is deployed, and the water layer thickness is 15 m.

층이 있을 때와 없을 때를 비교함으로써 지하구조에 대한 감도에 대하여 논한다.

현재 사용되고 있는 전극배열법 중 가장 분해능이 높은 방법은 쌍극자배열법(김정호 등, 2001a)이다. Fig. 5는 물의 심도를 15 m로 가정한 결과들을 비교한 것으로 대비를 더욱 뚜렷하게 하기 위하여 로그 스케일로 영상을 작성하였다. 수직 단층이 있을 때와 없을 때의 겉보기 비저항 가단면도 (a), (b)를 비교하면 그 차이가 확연하며 수직 단층을 뚜렷하게 영상화할 수 있을 것으로 예상할 수 있다. 그러나 현장에서 측정하는 값은 겉보기 비저항이 아니라 전위차이며, 측정 전위차가 탐사 대상을 반영할 수 있는 수준인지를 검증하여야 한다. 그림의 (c)는 (a)와 (b)의 전위차의 차이, 즉 단층이 배태되어 있는 경우와 없는 경우와의 측정값의 차이를 가단면도로 나타낸 것이다. 그림에서 붉은 색은 0.01 V/A 이상, 푸른 색은 그 이하를 의미한다. 전극전계수(electrode separation index)  $n=6$  이상에

서 거의 대부분 파란 색, 즉 0.01 V/A 이하를 나타내고 있다. 이는 이상대가 있을 경우와 없을 경우의 측정값의 차이가 대단히 작다는 점을 의미한다. 수상 탐사에서 물의 흐름에 의한 높은 유도전위가 발생할 가능성이 높다는 점을 고려하면, 하부 구조를 제대로 반영할 수 있는 자료의 측정이 대단히 어렵다는 점을 알 수 있다.

전극이 물 표면에 떠 있을 경우에는 지하구조에 대한 측정 전위의 민감도가 물 바닥에 설치한 경우보다 더욱 더 떨어질 수 있다. Fig. 6은 이에 대한 효과를 검증하기 위한 수치 실험의 예이며 수심 5 m, 15 m의 두 경우에 대하여 전극을 물 표면에 설치하였을 때, 단층이 있을 때에 측정한 전위차와 없을 때에 측정한 전위차의 차이를 나타낸 것이다. 동일한 수심에서 전극의 설치 위치가 다른 Fig. 5(c)와 Fig. 6(b)를 비교하면 물 바닥에 설치한 경우가 단층에 더 민감하게 반응함을 알 수 있다. 또한 전



**Fig. 6.** Numerical modeling tests to show the influence of the vertical fault in the model of Fig. 1 and the water layer thickness on the measured results, when electrodes are floated on the water surface. These pseudo-sections are the absolute value of the difference between the calculated potentials when the vertical conductor exists and that when it does not. The adopted array is dipole-dipole array.

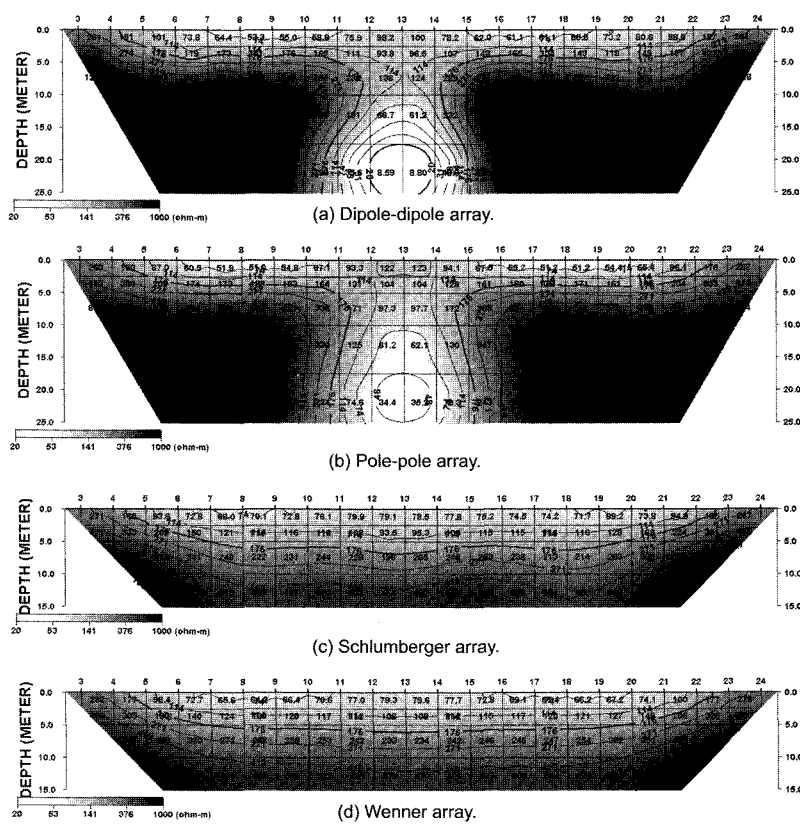
극을 똑같이 물 표면에 설치한 조건하에서는 수심이 얇은 Fig. 6(a)에서 수심이 깊은 Fig. 6(b)보다 가단면도 전체에 걸쳐 측정 전위의 차이가 훨씬 높게 나타난다. 한편 수심이 15m이며 전극을 물 바닥에 설치한 경우(Fig. 5(c))와 수심이 5m이며 전극을 물 표면에 설치한 경우(Fig. 6(a))를 비교하면, 물 바닥에 설치한 경우가 전극전개수  $n$ 이 작을 때에는 수심이 훨씬 깊음에도 불구하고 측정전위의 차이가 전반적으로 높고,  $n$ 이 클 때에는 수심이 얇은 경우인 물 표면에 설치한 경우가 높게 나타난다. 측정 전위로 볼 때에 지하구조에 대한 민감도 역시 물 바닥에 설치한 경우가 훨씬 높으며, 특히 수심이 깊은 지역에서 비교적 규모가 작은 이상대까지 탐지할 필요가 있을 때에는 반드시 전극을 물 바닥에 설치하여야 함을 이와 같은 실험으로 확인할 수 있다. 한편 수심이 얇을 때, 예컨대 수심이 측정간격의 최대 두 배를 넘지 않을 경우, 비록 전극을 물 바닥에 설치한 경우보다 지하구조에 대한 측정치의 민감도는 훨씬 떨어지나 물 표면에 전극을 띄운 탐사도 가능하다고 생각할 수 있다. 물론 이 때에는 물 바닥에 설치한 경우보다 훨씬 높은 S/N 비를 갖는 자료 획득이 가능하도록 탐사 변수를 주의 깊게 채택함이 전제되어야 한다.

**전극배열**

수상 탐사를 위해서는 육상 탐사보다 양질의 자료를 획득하여야 함은 위에서 논한 바와 같다. 이를 위해서는 가능한 한 높은 포텐셜 값을 측정할 수 있도록 현장 탐사방법을 설계함이 무엇보다도 중요하다. 측정 전위의 고저를 좌우하는 기본적인 두 요소는 전류량과 전극배열법이다. 따라서 많은 전류를 지하에 흘리기 위해서 접지저항을 가능한 한 낮추도록 노력하

여야 하며, 한편으로는 높은 측정 전위가 가능한 전극배열법을 선택하여야 한다. 또한 측정값의 대비, 즉 측정된 이상치가 육상 탐사의 경우에 비하여 훨씬 낮으므로 될 수 있는 한 높은 분해능을 갖는 전극배열법을 선택하여야 한다. 그러나 일반적으로 분해능이 높은 전극배열법일수록 측정 전위차는 낮으므로(김정호 등, 2001a), 높은 측정 전위와 가장 높은 분해능을 동시에 만족하기란 현실적으로 불가능하다. 위에서 논의한 전극의 설치 위치, 수심 변화, 그리고 주변 잡음 등과 연계하여 수상 탐사의 전극배열법에 대하여 고찰한다. 현장 탐사조건을 모사하기 위한 잡음은 김정호 등(2001a; 2001b)의 방법과 같이 측정 전위 또는 전위차에 무작위 잡음을 혼합하여 현장의 잡음 효과를 재현하는 방식을 채택하였다. 잡음의 수준은 최대  $\pm 10$  mV/A로, 중합수는 2 회로 가정하였다. 이와 같은 정도의 전기적 잡음 수준이 강물의 심한 유동 전위를 대변할 수 있는 지에 대해서는 확인할 수 없지만, 필자의 육상 탐사 현장경험 등에 미루어 보아 육상 탐사인 경우라면 상당히 높은 수준으로 생각된다.

Fig. 7은 물 표면에 전극을 설치한 현장 탐사를 상정하고 비저항 탐사의 대표적인 전극배열인 쌍극자, 단극, 슬럼버저, 웨너 배열을 채택한 자료를 이용한 역산 영상을 나타낸 것이다. 물의 표면에 전극이 위치하므로 앞 절에서와 같이 역산 모형에 수층을 구현하지 않고 수층까지 지하구조로 간주하여 역산하는 방법으로 영상을 구성하였다. 슬럼버저, 웨너 배열은 단극, 쌍극자 배열에 비하여 자료의 수가 적으므로, 단극배열과 쌍극자배열은 수직적으로 5개 층으로, 슬럼버저배열과 웨너배열은 4개 층으로 역산모형을 설정하여 역산하였다. 수층은 모든 배열에서 어느 정도 영상화되어 있으나, 수직 단층은 쌍극자와 단극의 두 배열에서만 뚜렷하게 보일 뿐, 슬럼버저나 웨



**Fig. 7.** The change of the inverted underground image depending on the deployed electrode array when electrodes are floated on the water surface. The water depth is the same as the measurement interval, 5 m. To simulate the field measurement condition, the calculated potential or potential difference is contaminated with the random electrical noise having  $\pm 10$  mV/A peak-to-peak voltage, and the number of stacks is 2.

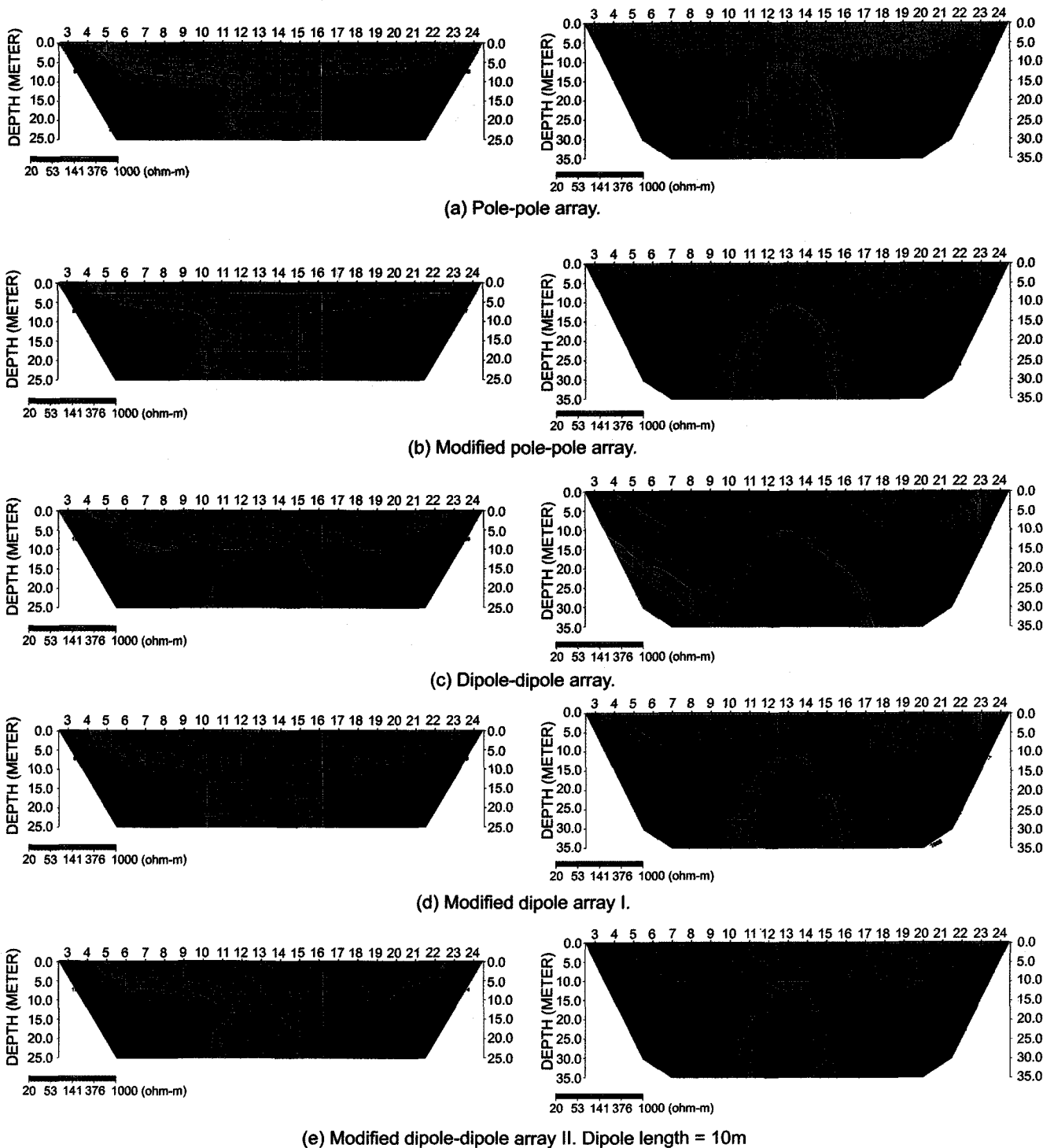
너 배열에서는 보이지 않는다. 이와 같은 결과는 육상 탐사에서 전극배열을 비교한 김정호 등(2001a)과 동일한 내용이다.

기존의 전극배열법 중 수상 탐사, 특히 수직 연대대가 주 탐사대상일 경우에 적합한 배열은 단극, 단극-쌍극자, 쌍극자 배열법 등으로 생각할 수 있다. 그러나 위에서 논의한 바와 같이 쌍극자 배열은 수심이 깊을 때 사용이 거의 불가능하며, 단극, 단극-쌍극자 배열은 원거리 접지가 필수적이거나, 수상 탐사에서는 원거리 접지 전극의 설치에 어려운 때가 많다. 또한 수상 탐사에서는 지하구조에 대한 민감도는 육상 탐사에 비하여 상당히 떨어지며 따라서 분해능이 높은 전극배열법을 채택하여야 함은 위에서 논의한 바와 같다. 여기서 전질의 논의 중, 수심이 얕을 경우에는 쌍극자배열 또한 사용이 가능하다는 점은 가장 분해능이 높은 쌍극자배열을 채택할 수 있다는 점에서 상당히 중요한 의미를 지닌다. 가령 수심이 10m 정도일 경우, 쌍극자 간격을 20m 정도로 하여 탐사를 할 수 있으며, Snyder *et al.* (2002) 또한 수층의 두께보다 넓은 쌍극자 간격을 채택하여 하상탐사에 성공한 바가 있다. 그러나, 기존의 쌍극자배열을 사용할 경우, 양질의 자료를 위하여 상당히 넓은 쌍극자 간격을 채택하여야 할 것이다. 수평 분해능은 전극배열에 좌우되지만 측정 간격에 또한 크게 의존한다. 따라서 넓은 쌍극자 간격을 채택하면 필연적으로 측정간격이 넓어지며 따라서 수

평분해능이 감소할 수밖에 없다. 이와 같은 문제점은 변형된 쌍극자배열을 사용하여 극복이 가능하다. 수상 탐사에 있어서 변형된 전극배열(김정호 등, 2001b)에 대하여 살펴보기로 하자.

Fig. 8은 변형된 전극배열법 중 원거리 접지전극을 사용하지 않는 변형된 쌍극자배열 I과 변형된 쌍극자 배열 II, 그리고 변형된 단극배열을 이용한 역산 영상으로, 수심은 측정간격의 2배, 즉 10m로 설정하였다. 수심을 Fig. 7의 실험 예 보다 깊게 가정하였으므로 무작위 잡음 또한 두 배인 최대  $\pm 20$  mV/A로 가정하였다. 전극을 물 표면에 띄운 자료는 Fig. 7의 예와 같이 수층을 역산모형에 구현하지 않고 수층 또한 지하구조로 간주하여 역산하여 영상을 구현하였다. 이에 반해 전극을 물 바닥에 설치한 경우에는 수층을 역산모형에 반영하지 않으면 올바른 영상을 획득할 수 없으므로, 수층을 역산 모형에 구현하여 역산을 수행하였다.

역산 영상 가운데 비교를 위해 함께 나타낸 쌍극자배열 영상이 가장 찌그러짐이 심하게 나타나고 있다. (b), (d), (e)의 변형된 전극배열 영상은 매우 심한 주변 잡음의 가정에도 불구하고 찌그러짐이 거의 없음을 알 수 있다. 이들 3 종류의 변형된 전극배열을 비교하면 잡음의 영향이 가장 낮은 배열은 변형된 쌍극자배열 I이다. 변형된 쌍극자배열 II와 변형된 단극배열을 비교하면 영상에서는 거의 유사하게 보이나 길보기 비



**Fig. 8.** The change of the inverted underground images depending on the adopted array. The left images correspond to the survey floating the electrodes on the water surface, whereas the right ones to that installing the electrodes at the water bottom. The water depth is 10 m, twice the measurement interval. To simulate the field measurement condition, the potential or potential difference is contaminated with the random electrical noise having  $\pm 20$  mV/A peak-to-peak voltage, and the number of stacks is 2.

저항 가단면도에서 변형된 단극배열이 잡음에 약간 강한 것으로 나타난다. 그러나, 김정호 등(2001b)이 논술한 바와 같이 변형된 단극배열 자료의 S/N 비는 단면의 중앙에서 가장 높고, 단면의 가장자리에서 가장 낮으며, 변형된 쌍극자배열 II의 S/

N 비는 채택한 쌍극자 간격에 의존하므로 두 변형된 전극배열의 S/N 비를 단정적으로 비교하여 결론지을 수는 없다. 분해능의 측면에서는 단극배열이 가장 낮으며, 변형된 단극배열, 변형된 쌍극자배열 순으로 증가함을 보여주고 있다.



변형된 전극배열의 장점은 원거리 접지가 불필요하며, 상당히 높은 S/N 비의 탐사자료를 얻을 수 있다는 것으로 요약할 수 있다. 이 두 장점은 수상탐사에서 상당한 의미를 갖는다. 특히 수상 탄성파탐사와 같이 일련의 전극이 설치된 스트리머 케이블을 이용하여 이동하면서 연속적으로 탐사를 하는 수상 전기비저항 탐사에서 매우 중요한 의미를 갖는다. Snyder *et al.* (2002)은 스트리머 전극 케이블을 이용한 연속 하상 탐사에서 쌍극자배열을 이용하였다. 연속 탐사에서는 원거리 접지를 설치할 수 없으며, 위에서 논의한 바와 같이 슬림버저, 웨너 배열은 지하구조에 대한 민감도가 상당히 낮으므로 필연적으로 쌍극자배열을 채택할 수밖에 없다. 그러나, 쌍극자배열의 상당히 낮은 S/N 비를 극복하기 위하여 상당히 긴 쌍극자 간격을 설정하여야 한다. 변형된 전극배열은 이와 같은 문제점을 모두 극복할 수 있으므로 수상 전기비저항 탐사에서, 특히 연속 수상 전기비저항 탐사에서 많은 적용이 기대된다.

### 탐사 사례 분석

지금까지 수치 모형실험을 통하여 수상 전기비저항 탐사 방법에 대하여 논의하였다. 이 장에서는 국내에서 수행한 탐사 사례를 통하여 수상 전기비저항 탐사자료의 특성에 대하여 논의하고자 한다. 이 탐사 사례는 국내에서는 최초로 시도된 하상 전기비저항 탐사로서, 탄성파, GPR 등의 다른 탐사와 함께 수행되었다. 조사지역은 경기도 양평군 양수리 부근의 북한강 유역으로 팔당호의 상부에 해당되고, 강의 수심은 10~11 m, 강을 가로지르는 축선의 연장이 약 780 m 정도로 하상 탐사구간이 상당히 넓은 지역이다. 강 하부에는 화천 북동쪽에서 경기도 발안까지 연장하는 대단층인 경강단층이 통과할 것으로 추정되고 있으며(최위찬 등, 2000), 탐사의 주 목적은 단층에 수반되는 파쇄대의 정확한 위치 및 규모 등을 조사하여 교량 하부 구조의 설계에 기본 자료를 제공함에 있었다. 탐사는 수상 구간 뿐만 아니라 양수리 쪽의 육상 구간에 대해서도 자료를 획득하여 해석하는 수록호환 환경하에서의 탐사 형식을 취하였다. 탐사 내용과 결과에 대해서는 김정호 등(2001c)과 Kim *et al.* (2002)에 서술되어 있으며, 이 논문에서는 하상구간에서 측정된 자료를 이용하여 수상 전기비저항 탐사의 특성에 대하여 고찰한다.

이 조사에서는 될 수 있는 한 높은 분해능과 신뢰도를 갖는 영상을 획득하기 위하여 전극을 강바닥에 설치하는 방법을 채택하였다. 수압하에서 충분한 방수 상태가 유지될 수 있도록 고장력 방수 포장을 이용하여 특수 다중 전선 케이블을 제작하였으며, 5 m 간격마다 전극을 부착하여 케이블을 강 바닥에 직선으로 설치하였다. DGPS를 이용하여 일정거리(50 m) 마다 납덩어리를 투하하고 이를 기준점으로 전극 케이블을 설치함으로써 전극 설치 지점의 정확성을 높였다. 전기비저항 탐사에 사용된 기기는 미국 AGI사의 자동 전극절환 장치인 Swift

smart electrode system을 이용한 Sting R1 system 이다.

수층을 역산 모형에 구현하기 위하여 따로이 수행한 수상 GPR 탐사 영상에서 하저면 반사파 도달시간을 추출하여 축선에 따른 연속적인 수심 변화 자료를 획득하였다. 4개 지점에서 얻은 공통송신점(Common Shot Profiling; CSP) 탐사 결과에서 확인된 전파속도를 이용하여 도달 주시를 수심자료로 변환함으로써 수심자료의 정확성을 기하였다. 물의 전기전도도 또한 탐사자료의 해석에 매우 중요한 요소이며, 강폭이 넓으므로 측정에 따라서 물의 전기전도도가 변화할 가능성이 크기 때문에 탐사 축선을 따라 10 m 간격으로 매일 강물의 전기전도도 변화를 측정하였다.

### 전극배열에 따른 현장 하상 탐사자료의 비교

이 조사에서는 강 중앙에 위치한 바지선 상에서 탐사자료를 측정하여 원거리 접지 전극의 설치가 대단히 어려웠으므로, 원거리 접지가 필요하지 않은 쌍극자, 슬림버저, 웨너 배열 중 단층구조를 잘 영상화할 수 있는 쌍극자배열을 이용하여 탐사를 수행하고자 하였다. 또한 조사지역에서의 탐사 착수 이전에 대전광역시 갑천 유역에서 시험 탐사를 수행하였는 바, 시험 탐사자료에서는 쌍극자배열 자료 또한 상당히 높은 S/N 비의 자료 획득이 가능한 것으로 나타났다. 그러나 탐사 초기 단계에서 측정된 자료인 Fig. 9와 10의 (a)와 같이 쌍극자 배열은  $n=3$  부터는 거의 전 측정에서 음의 전위차가 측정되는 등, 전극 전개수  $n=2$  이상에서 거의 의미가 없는 자료가 측정되었으므로 쌍극자 배열을 이용한 탐사가 불가능하였다. 북한강 유역과 갑천 유역에서의 강물의 전기비저항은 각각 90~110, 80~100 ohm-m 정도로 거의 비슷하며, 측정 걸보기 비저항으로 보아 지반의 전기비저항 값의 분포 또한 거의 비슷한 수준일 것으로 예상되었다. 두 탐사지역의 특성에 있어서 가장 뚜렷한 차이점은 수심의 차이이다. 즉 갑천유역의 수심은 1 m 내외이나, 북한강 유역은 양안부를 제외하고는 수심 10 m 이상으로 상당히 깊다. 또한 갑천유역에서는 0.01 V/A 수준의 측정 전위도 S/N 비가 높은 자료이었으나, 북한강 유역은 Fig. 10(a)에 도시된 바와 같이 0.1 V/A 이하의 측정전위는 상당히 S/N 비가 낮은 것으로 나타난다. 이러한 사실은 Fig. 10(a)에 기록된 주변잡음은 주로 유동전위에 의한 것으로 수심이 깊을수록 유동전위의 수준이 높아진다는 점을 시사하고 있다.

이에 반해 Fig. 9와 10에 예시한 바와 같이 두 변형된 전극 배열을 채택한 측정에서는 S/N 비가 어느 정도 높은 자료가 기록되었다. 그러나 변형된 전극배열 측정자료의 S/N 비 특성은 서로 다르다. 변형된 쌍극자배열은 전극전개수가 같은 자료들에서는 축선 전체에 걸쳐 비슷한 수준의 S/N 비를 보이고 있다. 이에 반해 변형된 단극배열은 동일한 전극전개수의 자료라 하더라도 측정점에 따라 상당히 심한 차이가 있으며, 축선의 가장자리에 가까워지면서 S/N 비가 상당히 낮아지고 있다. 이는 변형된 단극배열이 축선 양단에 음의 전류 전극과 전위 전

극을 고정시키는 방법이므로 측선 양단에 가까이 가면서, 단극 쌍극자 배열에 가까워지기 때문이다. 이러한 특성은 측정 전위차 가단면도인 Fig. 10에서 뚜렷하게 나타난다. 즉 변형된 쌍극자배열은 전극 전개수가 같은 자료는 거의 비슷한 전위차가 측정되나, 변형된 단극배열은 중앙부위에서 가장 높은 전위차가, 주변부에서는 상당히 낮은 전위차가 기록된다.

이와 같은 탐사 초기단계에서의 자료 결과에 의거하여 전극 배열은 변형된 단극배열과 변형된 쌍극자배열 II의 두 종류를 채택하였다. 또한 가능한 한 높은 해상도와 상대적으로 깊은

가탐 심도를 확보하기 위하여 측정 간격을 5 m와 10 m의 두 종류에 대한 자료를 모두 획득하였으며, 따라서 측선당 두 종류의 전극배열과 두 종류의 측정간격, 즉 4 종류의 자료가 측정되었다. 변형된 쌍극자배열 II의 쌍극자 간격은 측정간격이 5 m 일 때 30 m로 하였고, 10 m 일 때에는 전극전개수가 증가함에 따른 전위차 감소가 측정간격 5 m 일 경우보다 더욱 심하므로 이를 보상하기 위하여 40 m로 설정하였다. 이와 같이 많은 자료를 획득한 것은 위에서 고찰한 바와 같이 하상에서 측정되는 자료는 강물의 영향에 의해 지하 이상대에 대한 반

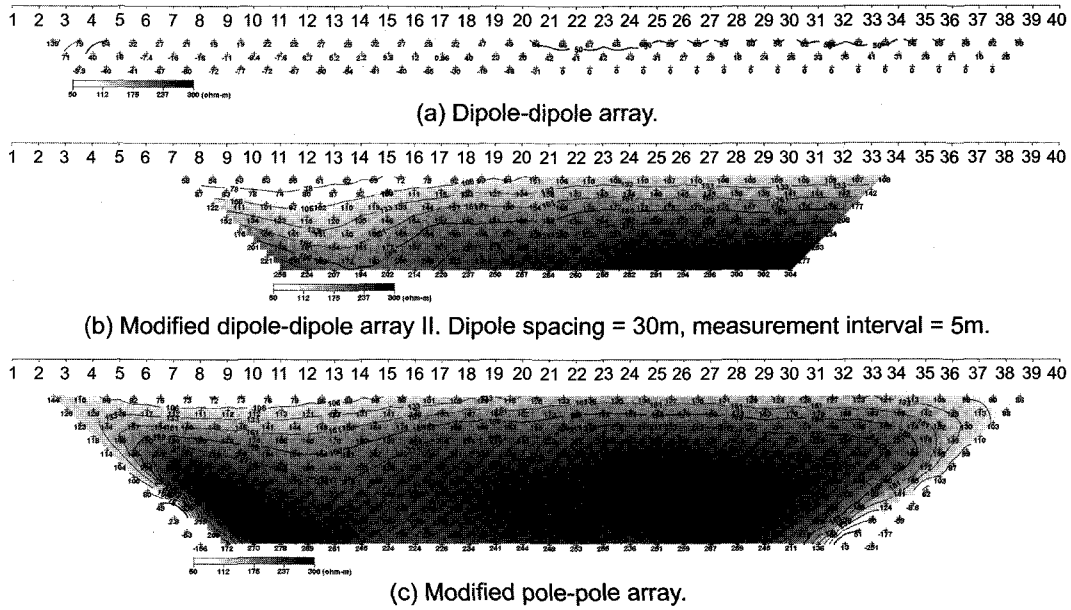


Fig. 9. Comparison of the field apparent resistivity pseudo-sections adopting different electrode arrays.

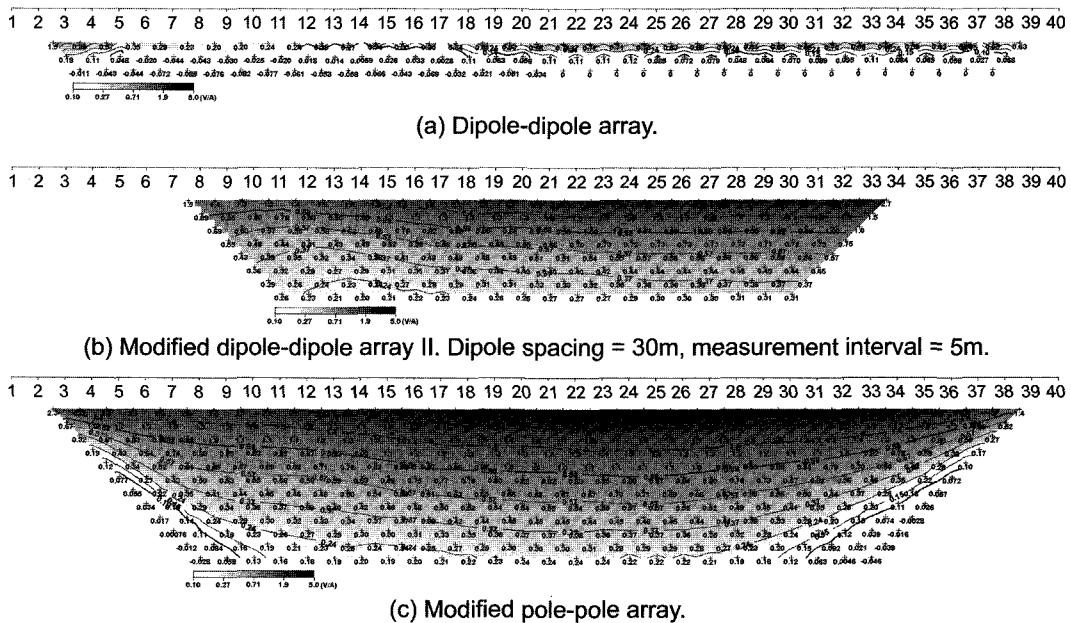


Fig. 10. Comparison of measured potential difference pseudo-sections adopting different electrode arrays. These pseudo-sections are presented in logarithmic scale.

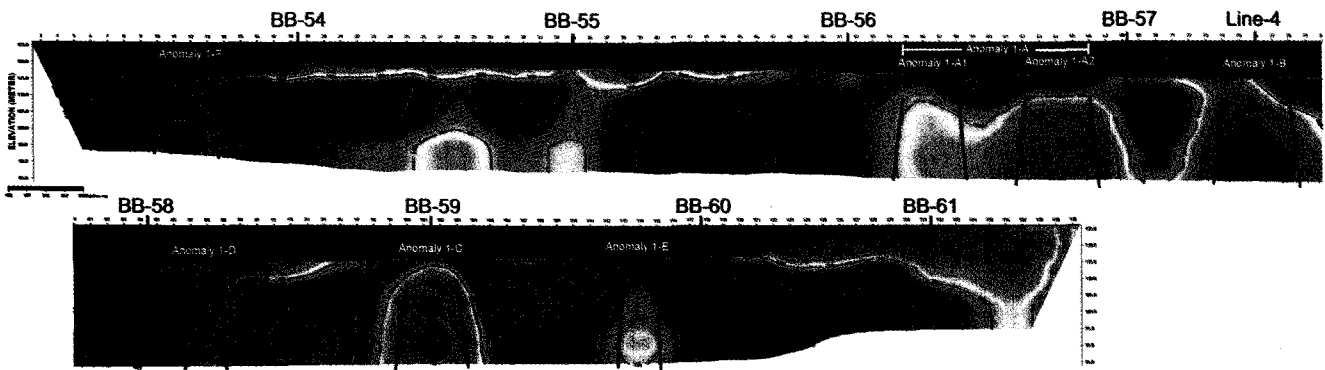
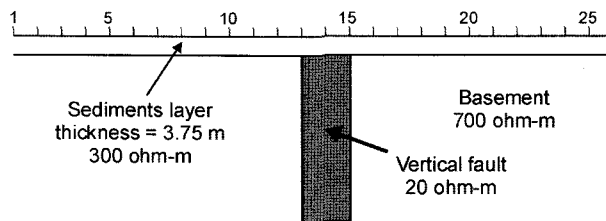
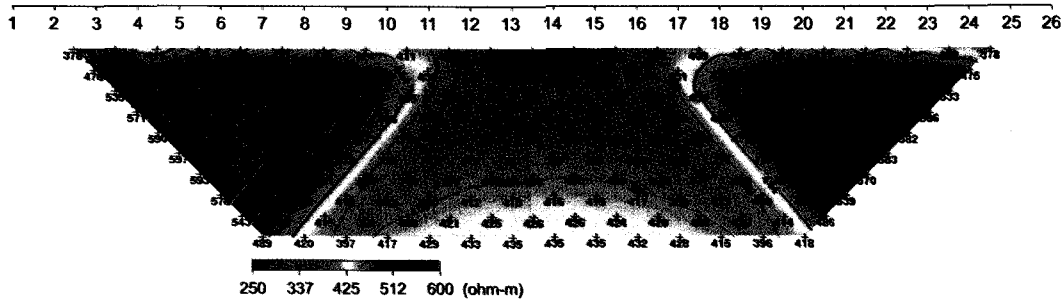


Fig. 11. Subsurface image of the survey line along the central axis of the planned bridge. The topmost blue color layer stands for the water layer. Borehole locations drilled at the planned center locations of bridge piers are indicated at the top of the image and the interpreted anomalous areas are also drawn.

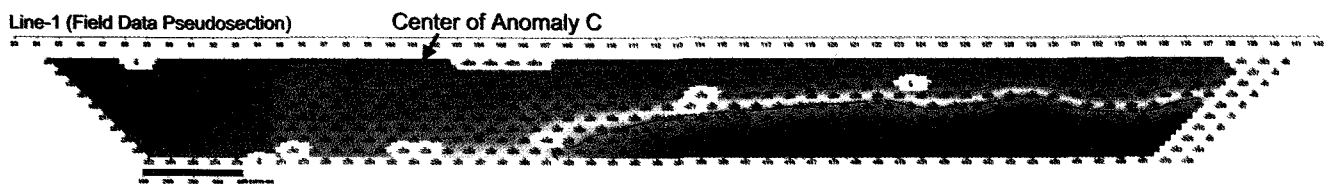


(a) A numerical model corresponding to the Anomaly-C and its vicinity of Fig. 11, assuming no water layer, that is, land survey.

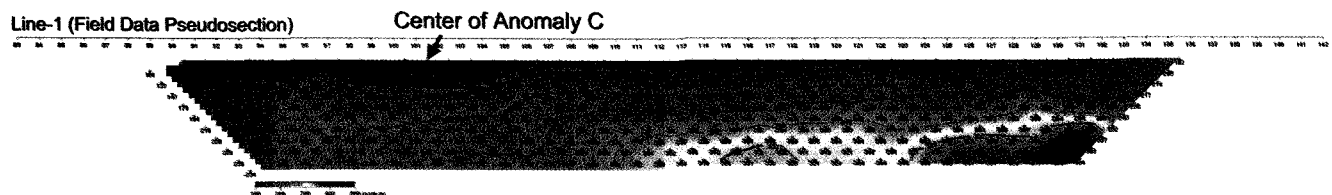


(b) Theoretical apparent resistivity pseudo-section based on the subsurface model (a).

Fig. 12. Numerical modeling experiment assuming land survey.



(a) Modified pole-pole array.



(b) Modified dipole-dipole array.

Fig. 13. Field apparent resistivity pseudo-section near the Anomaly-C of Fig. 11.

응이 육상에서 획득한 자료에 비하여 미약하므로 많은 자료 중 신뢰도가 높은 자료만을 추출하여 해석에 사용하기 위함이었다.

### 역산 영상에서 나타나는 이상대와 현장 탐사자료

Fig. 11은 교량 중심축을 따른 축선 하부의 전기비저항 영상 도로로서, 다양한 종류의 역산 영상 중 측정간격 5 m 탐사자료를 복합 역산하여 작성한 것이다. 영상에 부가하여 나타낸 시추공의 위치는 계획된 교각의 중심점에 해당된다.

Fig. 11에서 나타나는 뚜렷한 이상대 중 Anomaly-C는 가장 뚜렷한 수직구조를 보이는 이상대이다. 만약 육상 탐사의 경우라면 Fig. 12와 같이 가단면도 상에서 매우 뚜렷한 이상대가 확인되어야 할 것이다. 그러나 이와 같이 역산 영상에서 뚜렷하게 나타나는 이상대도 앞의 수치 모형 실험에서 논의한 바와 같이 지하구조를 덮고 있는 물의 영향 때문에 비록 전극을 물 바닥에 설치하였다고 하더라도 현장 탐사자료인 겐보기 비저항 가단면도(Fig. 13)에서 그다지 뚜렷한 이상이 나타나지 않는다. Fig. 13(b)의 변형된 쌍극자 배열 가단면도에서 이상대를 중심으로 하여 매우 미약한 겐보기 비저항의 찌그러짐이 확인되기는 하나 단지 이것에만 의존하여 수직 저비저항 이상대의 존재를 유추하기란 매우 어렵다. 이와 같이 하상탐사에서 이상대는 비록 전극을 강 바닥에 설치하였다고 하더라도 매우 미약한 측정자료의 차이로 나타나며, 이 논문의 전체에 걸쳐 지하구조에 민감도가 높은 방법의 채택과 S/N 비가 높은 현장 자료의 측정을 강조하는 것도 바로 이 때문이다.

Fig. 11에서 가장 명확하게 인지할 수 있는 이상대 중 Anomaly-C는 계획된 교각의 직하부에 발달하고 있다. 이 이상대의 중심 부위인 측정점 101번 부근에 작성한 시추공 BB-59에 의하면 시추 종료 심도인 30 m 부근까지 단층 파쇄대가 발달하는 것으로 나타났으며 기반암을 확인할 수 없었다. 이와 같은 사실은 이상대 Anomaly-C가 단층의 영상임을 뒷받침하며, 나아가서 이상대 Anomaly-A와 Anomaly-B 또한 Anomaly-C와 전기비저항이 비슷하고 그 형태가 유사한 것으로 보아 이상대 Anomaly-C와 같은 단층의 영상일 가능성이 대단히 높다고 판단할 수 있다. 이상대 Anomaly-B 부근에 추가 시추가 진행되었으며, 그 결과 심도 18 m에서 시추 종료 지점까지 단층 파쇄대로 구성되었음을 확인할 수 있었다(정호준 등, 2002).

한편 최상부층의 비저항 분포를 보면 수상공간 대부분에서 토양층으로서 상당히 높은 비저항치인 200 ohm-m 이상의 고비저항이 나타나며 상당부분 기반암과 구별될 수 없을 정도로 높은 고비저항이 발달함이 특징적이다. 이러한 현상은 전반적으로 기반암의 심도가 매우 얕다는 사실을 의미할 뿐만 아니라, 강 하부의 퇴적층이 박층이며 주로 전기비저항이 높은 자갈과 모래로 구성되어 있을 뿐, 점토 성분이 거의 없음을 의미한다. 이러한 해석 결과는 시추탐사 뿐만 아니라 전기비저항

탐사와 동시에 수행된 탄성과 반사법탐사 해석 결과와도 잘 일치한다.

## 결 론

전기비저항 탐사는 하상 전기비저항 탐사 사례에서와 같이 물로 피복되어 지질조사에 제약이 많은 강, 또는 호수 지역에서의 지하구조 영상화에 매우 탁월하다. 특히 층서구조가 발달하지 않는 결정질 암반지역에서 단층, 파쇄대 등을 전기적 물성으로 영상화할 수 있으므로, 국내에서의 적용성은 매우 높다고 할 수 있다. 그러나 지금까지 살펴본 바와 같이 지하구조를 덮고 있는 물 때문에 육상 전기비저항 탐사와는 다른 점이 많다.

수상 전기비저항 탐사는 전극을 물 바닥에 설치하는 방법과 물 표면에 띄워서 자료를 획득하는 두 종류의 현장 탐사방법을 상정할 수 있다. 전극을 물 바닥에 설치하는 현장탐사 방법은 훨씬 더 분해능이 높은 영상을 얻을 수 있다는 장점을 갖는 반면에, 물 표면에 설치하는 방법은 수심 측량과 특별한 역산 모형 설정이 필수적이지 않다는 점에서 현장탐사와 자료해석 두 측면의 효율이 모두 높다는 장점을 갖는다고 할 수 있다. 따라서 전극을 물 바닥에 설치하여 탐사하는 방법은 지하의 정밀 영상을 획득하기 위한 정밀탐사에 적합하며, 물 표면에 띄우는 방법은 비록 분해능이 떨어지지만 수층을 역산모형에 반영하지 않아도 어느 정도 지하구조를 반영하는 영상의 획득이 가능하기 때문에 개략탐사에 적합하다고 할 수 있다.

수심이 깊어질수록 물의 영향이 증대되므로 지하구조의 변화에 대한 감도는 감소하며, 이에 반해 유도전위를 포함한 주변 전기잡음은 증가할 가능성은 높아진다. 그러므로 수심이 깊어질 경우, 탐사방법의 설계, 탐사자료의 획득에 더욱 주의를 기울여야 한다. 육상 탐사와 비교할 때에 수상 전기비저항 탐사자료의 특징은, 전극을 물 바닥에 설치한다고 하더라도, 지하구조에 대한 민감도가 상당히 낮으며, 따라서 이상치 즉 측정값의 대비가 낮다. 그러므로 육상 탐사보다 훨씬 높은 S/N 비를 갖는 현장 탐사자료의 획득이 필수적이며, 가능한 한 높은 분해능을 갖는 현장 탐사법, 전극배열 등을 채택하여야 한다. 전기비저항 탐사에서 분해능과 자료의 S/N 비에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 채택한 전극배열이다. 채택의 전극배열 중 쌍극자배열은 가장 높은 분해능을 갖는 영상을 제공할 수 있으나, 가장 낮은 S/N 비 때문에 수상 전기비저항 탐사에서 그 적용이 극히 제한적이다. 쌍극자 간격이 수심보다 넓은 경우 쌍극자 배열의 적용이 가능하나, 낮은 S/N 비를 극복하기 위해 될 수 있는 한 전류를 많이 흘릴 수 있도록 노력하여야 한다. 변형된 전극배열법은 원거리 접지가 불필요하다는 점과 아울러 그의 원천이 되는 전극배열보다 높은 S/N 비의 자료 획득이 가능하다는 점에서 수상 전기비저항 탐사에 많은 활용이 기대된다.

참고문헌

김정호, 이명중, 송윤호, 정승환, 2001a, 2차원 전기비저항 탐사를 위한 전극배열법의 비교: 한국자원공학회지, **38**, 116-128.

김정호, 이명중, 송윤호, 정승환, 2001b, 2차원 전기비저항 탐사를 위한 변형된 전극배열법에 관한 연구: 물리탐사, **4**, 59-69.

김정호, 이명중, 정승환, 2001c, 전기비저항탐사를 이용한 단층 탐사 사례-3차원 탐사와 하상탐사를 중심으로: 단층이 토목구조물에 미치는 영향, 2001년도 한국지반공학회 암반역학위원회 특별세미나 논문집, 39-66.

김정호, 이명중, 정승환, 2001d, 수륙혼합 환경에서의 전기비저항 탐사에 관한 연구: 춘계 공동학술발표회 논문집, 한국자원환경지질학회, 한국자원공학회, 한국지구물리탐사학회, 대한지질학회, 65-67.

김중열, 김유성, Ulrich, S., 김기석, 2001, 철도교량 설계 지반조사를 위한 고분해능 수면 단성과 반사법탐사의 응용 사례: 한국지반공학회 2001 봄 학술발표회 논문집, 231-238.

정호준, 김정호, 권형석, 안희윤, 김기석, 2002, 장대교량 기초 설계를 위한 수륙혼합 전기비저항탐사 사례: 땅과 물이 만나는 곳에서의 물리탐사, 한국지구물리탐사학회 제4회 특별 심포지움 논문집, 한국물리탐사학회, 2002년 9월 25일, 서울, 126-138.

정호준, 김정호, 박근필, 최호식, 김기석, 김종수, 2001, 대규모 단층대를 통과하는 교량설계를 위한 물리탐사의 활용: 한국지반공학회 2001 봄 학술발표회 논문집, 245-248.

최위관, 최성자, 이영준, 이사로, 류충열, 송미주, 박선영, 2000, 덕소-양수간 중앙선 철도 건설공사 정밀 지질조사 보고서: 한국자원연구소, 미발간.

Boyce, J. I., Pozza, M. K., Morris, W. A., Eyles, N., and Doughty, M., 2002, High-resolution magnetic and seismic imaging of basement faulting in western Lake Ontario and Lake Simcoe, Canada: *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP 2002)*, 13GSL8.

Chung, H.-J., Kim, J.-H., Park, K.-P., Kwon, H.-S., Choi, H.-S., Kim, K.-S., and Kim, J.-S., 2001, Application of geophysical results to designing bridge over a large fault: *Geotechnical Problems in Asian Countries, Proceedings of Fourth Asian Young Geotechnical Engineers Conference*, 45-48.

Kim, J.-H., Yi, M.-J., Song, Y., Cho, S.-J., Chung, S.-H., and Kim, K.-S., 2002, DC resistivity survey to image faults beneath a riverbed: *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP 2002)*, 13IDA10.

Kurahashi, T., 2002, A seismic refraction survey conducted in the artificial lake of a working dam: *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP 2002)*, 13GSL6.

Manheim, F., Krantz, D., Snyder, D., and Sturgis, B., 2002, Streamer resistivity surveys in Delmarva coastal bays: *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP 2002)*, 13GSL5.

Snyder, D., MacInnes, S., Raymond, M., and Zonge, K., 2002, Continuous resistivity profiling in shallow marine and fresh water environments: *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP 2002)*, 13GSL4.

Snyder, D., and Wightman, W., 2002, Application of continuous resistivity profiling to aquifer characterization: *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP 2002)*, 13GSL10.