

## 저수지 3차원 구조에 의한 전기비저항 탐사자료의 왜곡

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

<sup>1</sup>강원대학교 지구물리학과

### Distortion of Resistivity Data Due to the 3D Geometry of Embankment Dams

In-ky Cho<sup>1\*</sup>, Hyung-Jae Kang<sup>1</sup> and Ki-Ju Kim<sup>1</sup>

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

**요약:** 전기비저항 탐사법은 저수지 누수구간 탐지에 매우 효과적이고 실질적인 물리탐사법이다. 일반적으로 저수지 제체의 마루에서 수행되는 전기비저항 탐사는 저수지가 2차원 구조를 갖고 있다고 가정한다. 하지만 저수지 제체에서 수행되는 전기비저항 탐사 자료는 저수지의 3차원 지형에 의해 크게 영향을 받는다. 본 연구에서는 유한요소법을 사용하는 3차원 전기비저항탐사 모델링 프로그램을 통하여 저수지의 3차원 구조가 전기비저항 탐사자료에 미치는 영향을 평가하였다. 제체의 상류사면, 상류쪽 마루, 마루중앙, 하류쪽 마루와 하류사면에 위치한 축선에서 얻어진 전기비저항 탐사자료를 비교하였다. 3차원 효과는 축선의 위치에 따라 서로 다른 양상을 보였으며, 축선이 하류사면 쪽에 위치할 경우 그 영향이 더 크게 나타났다. 또한 지형효과보다는 저수지를 구성하는 요소들의 전기비저항 값이 전기비저항 탐사자료에 더 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 마지막으로 누수구간이 존재하는 제체에 대한 3차원 모델링 자료에 대하여 2.5차원 역산을 수행하여 2차원 전기비저항 탐사법을 이용한 누수구간 탐지의 가능성을 분석하였다.

**주요어:** 전기비저항탐사, 저수지, 3차원 효과, 누수탐지

**Abstract:** Resistivity method is a practical and effective geophysical technique to detect leakage zones in embankment dams. Generally, resistivity survey conducted along the crest assumes that the embankment dam has a 2D structure. However, the 3D topography of embankments distorts significantly resistivity data measured on anywhere of the dam. In this study, we analyse the influence from 3D effects created by specific dam geometry through the 3D finite element modeling technique. We compared 3D effects when resistivity surveys are carried out on the upstream slope, left edge of the crest, center of the crest, right edge of the crest and downstream slope. We ensure that 3D effect is greatly different according to the location of the survey line and data obtained on the downstream slope are most greatly influenced by 3D dam geometry. Also, resistivity data are more influenced by the electrical resistivity of materials constituting reservoir than 3D effects due to specific dam geometry. Furthermore, using resistivity data synthesized with 3D modeling program for an embankment dam model with leakage zone, we analyse the possibility of leakages detection from 2D resistivity surveys performed along the embankment dam.

**Keywords:** resistivity method, embankment dam, 3D effect, leakage detection

## 서론

국내에 널리 분포하는 농업용 저수지는 과반수 이상이 60년 이상 된 노후 저수지로 누수의 위험성이 큰 것으로 알려져 있다(박삼규 등, 2002). 이들 노후 저수지의 제체는 세굴현상에 의해 차수를 담당하는 중심점토 내의 점토입자가 하류사면 쪽으로 유동하고 시간이 경과함에 따라 점차 확장되어 대규모

누수 및 제체의 파괴로 이어지며, 결국 대형 재해 및 인명피해를 일으킨다. 이러한 누수를 사전에 방지하기 위해서는 체계적이고 정밀한 안전진단이 지속적으로 이루어져야 한다. 국내의 경우에도 다양한 방법을 동원하여 저수지 누수구간 탐지를 위한 정밀 안전진단을 실시하고, 이에 근거하여 유지보수가 시행되고 있다(박삼규 등, 2005).

국내외에서 저수지 제체의 누수구간 탐지를 위하여 각종 물리탐사법이 널리 사용되고 있다. Ogilvy *et al.* (1969)은 자연전위법과 지온측정을 통하여 누수구간과 누수량을 규명하고자 하였으며, Butler and Llopis (1990), Titov *et al.* (2000)은 자연전위법과 전기비저항탐사법을 사용하여 다양한 댐의 누수구간 탐지 가능성을 타진하였다. Sjødahl *et al.* (2002)은 2.5차원

2006년 5월 30일 접수; 2006년 8월 2일 채택

\*Corresponding author

E-mail: choik@kangwon.ac.kr

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

전기비저항 모델링을 통하여 전기비저항 탐사 자료에 미치는 저수지의 3차원 효과와 전극배열법의 특성을 고찰하였다. Salmon and Johansson (2003)은 탄성파탐사, 지온측정법, 전기비저항탐사법, 자연전위법 등의 누수구간 탐지에 사용 가능한 다양한 물리탐사법의 적용성 및 그 한계를 실측자료를 통하여 제시하였다. 국내의 경우 정승환 등(1992)이 전기비저항 탐사에 의한 누수구간의 탐지에 관하여 발표하였으며, Song *et al.* (2005)은 저수지 누수문제에 대하여 각종 수리지질 및 지구물리 방법의 적용성을 규명하기 위하여 쌍극자 배열 전기비저항 탐사, 추적자 시험, 순간수위변화 시험, 시추공을 이용한 온도 검층, 배수에 따른 시추공의 수위 변화 및 누수량 변화 측정 및 자연전위법 등을 종합적으로 수행하였다. 이명종 등(2000)은 3차원 전기비저항 탐사 모델링을 통하여 저수지의 3차원 지형효과와 저수지 제당의 구성요소가 역산 결과에 미치는 영향을, 오석훈, 김형수(2005)는 필담의 3차원 지형효과를 3차원 모델링을 통하여 분석하였다. 박삼규 등(2002, 2005)은 저수지 안전진단을 위한 상시관측 시스템의 개발을 제안하였으며, 윤종렬 등(2005)은 하천제방에서 누수구간 위험구간 탐지를 위한 전기비저항법을 제안하였다.

이상에서 언급한 바와 같이 전기비저항 탐사는 저수지 제체의 안전진단에 가장 널리 사용되는 물리탐사법 중의 하나이다. 그러나 저수지 조사에 사용되는 전기비저항 탐사법은 주로 제체의 마루부에서 수행되는 2차원 탐사인 반면, 제체는 3차원 구조물이다. 또한 2차원 탐사자료의 역산에서는 주향방향으로 전기비저항이 일정하다고 가정하는 2.5차원 모델링 및 역산 프로그램이 주로 사용되고 있다. 하지만 실제 제체의 마루부에서 수행되는 전기비저항 탐사에서 축선의 방향은 제체와 평행한 종방향이며, 이에 수직인 횡방향으로는 물성의 변화는 물론 지형적인 변화가 크다. 따라서 해석에 사용되는 2차원 가정에 위배된다. 이러한 가정상의 모순에도 불구하고 제당 마루부에서 수행되는 전기비저항 탐사는 매우 효과적으로 누수구간의 분포양상을 제시해준다. 이러한 저수지 제체의 기하학적 형상과 2차원 가정의 위배에서 오는 전기비저항 탐사자료의 왜곡은 이미 이명종 등(2000)에 의해 분석된 바 있다. 본 논문에서는 지형을 고려할 수 있는 유한요소법 모델링을 통하여 저수지의

3차원적 형상과 저수지를 구성하는 저수지 물, 상, 하류 사면, 중심점토, 기반암의 물성 대비를 고려한 쌍극자 배열 전기비저항 탐사자료의 변화를 고찰, 분석하였다. 또한 3차원적 누수구간을 가정하고 축선의 위치에 따른 누수구간 탐지 능력을 비교, 분석하여 효과적인 탐사설계의 지침을 제시하고자 하였다.

### 3차원 지형 효과

일반적으로 농업용 저수지(embankment dam)의 제체는 주변의 토취장에서 채취된 토사를 이용하여 축조된다. 따라서 제체를 구성하는 토사는 원지반에 비하여 매우 균질하다고 볼 수 있으며, 이는 안전진단에 사용되는 전기비저항 탐사를 유리하게 하는 측면이 있다. 하지만 지형의 기복이 심할 경우 전기비저항 탐사자료는 상당한 왜곡이 발생한다. 특히 모든 저수지는 3차원 구조를 가지고 있으며 전기비저항 탐사자료는 제체의 기하학적 특징 때문에 자료의 왜곡을 피할 수 없다. 일반적으로 저수지 제체 누수구간의 탐지에는 제체 마루부에서 수행되는 쌍극자 배열 전기비저항 탐사가 널리 사용되고 있으나, 이 경우에도 3차원 구조에 기인한 자료의 왜곡이 발생한다. 또한 제체 마루부에서 제체에 평행하게 즉 종방향으로 설정된 축선에서 얻어진 자료는 대개 축선에 수직인 횡방향으로 물성 변화가 없다는 2차원 구조를 가정한 2.5차원 역산법에 의하여 해석이 이루어지고 있다. 하지만 저수지는 오히려 축선방향으로 2차원 구조를 보이지만 이에 수직인 방향으로는 물성의 변화가 매우 크다. 이러한 가정상의 모순에도 불구하고 제체 마루부에서 수행되는 전기비저항 탐사는 매우 효과적으로 누수구간의 분포양상을 제시하고 있으며, 실제 제체 누수조사에 널리 사용되고 있다. 여기서는 저수지의 3차원 구조가 쌍극자 배열 전기비저항 탐사자료에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

우선 저수지를 구성하는 요소는 저수지 물, 상류사면, 중심점토, 하류사면, 기반암등이다. 이들은 모두 서로 다른 물성을 가지며, 그 대비도 상당히 큰 것으로 알려져 있다. 우선 여기서는 저수지의 기하학적 특성에 기인한 전기비저항 탐사자료의 왜곡만을 알아보기 위하여 저수지를 구성하는 모든 요소들의 전기비저항이 일정하다고 가정하고 3차원 모델링을 수행하

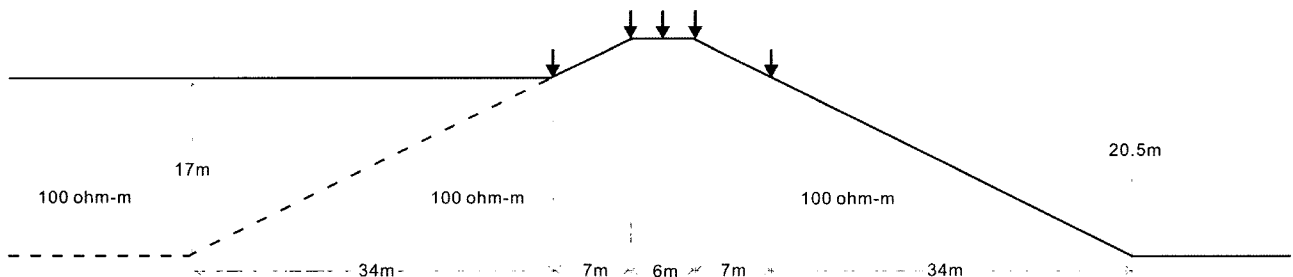


Fig. 1. The cross-section of an embankment dam. All the materials of a reservoir were assumed to have the same resistivity of 100 ohm-m to study the influence from 3D effects due to the embankment dam geometry.

였다. 편의를 위하여 전기비저항값은 100 ohm-m, 축선의 길이는 100 m, 측정간격은 5 m로 설정하였다. 유한요소법을 사용하는 모델링에서 매 측정사이를 4개의 요소로 분할하였으며, 저수지의 구조는 Fig. 1에 도시하였다. 국내의 일반적인 농업용 저수지(embankment dam)를 가정하고 제체의 경사는 상, 하류 사면 모두 1:2로, 제체의 높이는 20.5 m로 설정하였다. 제체 마루부의 너비는 6 m, 마루 상류 쪽 가장자리에서 수면까지의 수평거리는 7 m이다. 축선은 물과 상류사면의 경계면, 마루 상류 쪽 가장자리, 마루 중앙, 마루 하류 쪽 가장자리와 이로부터 하류사면 방향으로 수평거리가 7 m인 지점 등 5개에 대하여 쌍극자 배열 전기비저항 탐사자료에 미치는 3차원 지형효과를 분석하였다.

Fig. 2는 제체의 상류사면, 마루 상류 쪽 가장자리, 마루 중앙, 제체 마루 하류 쪽 가장자리와 하류사면에서 측정된 쌍극자 배열 전기비저항 탐사자료의 전극전개수  $n$ 에 따른 겉보기 비저항의 변화양상을 나타낸 것이다. 이때 측정의 위치는 축선의 중앙부이지만, 이 경우에는 제체방향의 물성변화가 없다고 가정하였기 때문에 측정의 위치에 관계없이 동일한 결과를 나타낸다. 우선 상류사면에서 얻어진 자료는  $n=1$ 일 경우에 115 ohm-m 정도의 높은 비저항을 보이며,  $n$ 이 증가할수록 감소하여  $n=10$ 일 경우에는 93 ohm-m 정도의 낮은 겉보기비저항 값을 나타낸다. 즉 천부는 고비저항, 심부는 저비저항 층을 보이게 된다. 반면 하류사면에서 얻어진 겉보기비저항은 이와는 상당한 차이를 나타낸다. 이 경우  $n=1$ 일 경우 92 ohm-m에서 시작하여 점진적으로 감소하다가  $n=6$ 일 경우에 53 ohm-m로 최소값을 보이고  $n=10$ 일 경우에 60 ohm-m로 다시 증가한다. 이러한 결과는 2차원 역산단면에서 중간 심도에 저비저항대가 나타나는 3층 구조에 가까운 결과를 나타내게 될 것이다. 또한 대부분의 전극전개수에서 50~60 ohm-m의 겉보기 비저항을 나타내고 있어 하류사면에서 얻은 자료가 제방의 3차원 구

조에 더 큰 영향을 받고 있음을 의미한다.

한편 제체의 마루 중앙에서 얻어진 결과는  $n=1$ 일 경우에서 93 ohm-m에서 시작하여 점진적으로 감소하여  $n=10$ 일 경우에 73 ohm-m가 된다. 즉 천부에는 비저항이 높은 층이 존재하여 심부로 갈수록 저비저항 층이 나타나게 된다. 물론 참 전기비저항인 100 ohm-m 보다는 더 작은 값을 보인다. 마루 상류 쪽 가장자리에서 얻어진 결과는  $n=1$ 일 때 86 ohm-m에서 시작하여  $n=4$ 일 때 90 ohm-m의 최대값을 나타낸 후 점진적으로 감소하여  $n=10$ 일 경우에 81 ohm-m를 나타낸다. 즉 중간심도에서 가장 비저항이 높은 형태의 역산단면을 나타내게 될 것이다. 마지막으로 마루 하류 쪽 가장자리에서 얻어진 결과는  $n=1$ 일 때 86 ohm-m에서 출발하여  $n=10$ 일 때 65 ohm-m로 감소한다.

이상에서 상류 쪽에 축선이 위치할 경우 3차원 효과가 적고 하류 쪽에 위치할수록 3차원 효과가 커짐을 알 수 있는데, 이는 상류부가 저수지 물 때문에 하류부에 비하여 지형적인 변화가 적어서 3차원 지형 효과가 덜 나타나기 때문인 것으로 판단된다. 일반적으로 3차원 효과는 전류전극과 전위전극 사이의 거리가 커질수록 더 크게 나타난다.

즉 쌍극자 배열 전기비저항 탐사에서 전극전개수가 클수록 지형의 기록에 의한 영향을 더 많이 받는 것으로 해석되며, 상류사면, 마루 중앙, 마루 하류 쪽 가장자리에서 얻은 결과가 이를 뒷받침해 준다. 하지만 마루 상류 쪽 가장자리 및 하류사면에서 얻어진 결과는 이와는 차이를 보인다. 마루 상류 쪽 가장자리의 결과는 겉보기비저항의 변화량은 가장 작지만 전극전개수에 대하여 겉보기비저항이 증가하다가 감소하는 양상을 보이며, 하류사면에서는 이와는 반대의 양상을 나타내고 있다.

## 구성요소의 전기비저항에 의한 영향

저수지를 구성하는 요소들의 전기비저항은 상당한 차이를 갖는다. 우선 저수지 물은 대략 50~150 ohm-m 정도의 저비저항을 보이며, 상류사면은 물로 포화되어 하류사면에 비하여 상대적으로 낮은 전기비저항 값을 나타낸다. 중심점토는 점토 광물의 함량이 높기 때문에 제체를 구성하는 요소들 중에서 가장 낮은 전기비저항을 나타낸다. 여기서는 저수지를 구성하는 각 요소들의 물성차이에 의한 영향을 분석하기 위하여 각 구성요소들의 전기비저항을 Fig. 3에서와 같이 설정하고 Fig. 1에서와 동일한 지점에 대하여 쌍극자 배열 전기비저항 탐사 모델링을 수행하였다. 유한요소법에 의한 3차원 모델링 시 쪼그러진 육면체 요소를 사용하였기 때문에 물과 상류사면, 그리고 하류사면과 기반암의 경계에서는 실제 모델은 Fig. 3과 약간의 차이는 있다. 하지만 전체적으로 각 구성요소의 형상을 잘 반영하도록 요소분할을 실시하였으며, 요소분할에 기인한 오차는 이들 요소와 송, 수신점의 거리가 크기 때문에 극히 미미할 것으로 보인다.

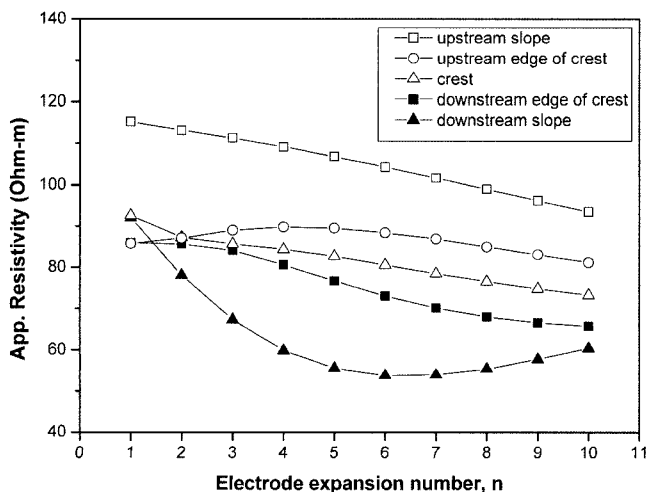


Fig. 2. Apparent resistivity variations with electrode expansion numbers due to 3D effects of the reservoir given in Fig. 1.

우선 저수지 물에서 가까울수록 전반적으로 겉보기 비저항이 낮게 나타나는 경향을 보인다. 마루 중앙에서 얻어진 결과는  $n$ 이 증가함에 따라 겉보기비저항이 단순 증가하는 양상을 나타내고 있으며, 나머지 측정에서는 겉보기비저항이 감소하다가 증가하는 양상을 보이고 있다. 이는 마루 중앙에서는 중심점토의 영향이  $n=1$ 에서 가장 크게 나타나다가  $n$ 이 증가할수록 상, 하류 사면의 전기비저항에 더 큰 영향을 받는 것으로 생각된다.

마루의 상류 쪽 가장자리에서 얻어진 결과는 모두  $n=2$ 에서 최소값을 보인다. 이는 중심점토 직상부의 전기비저항을 하류 사면과 같은 400 ohm-m로 설정하였기 때문에  $n=1$ 에서 높은 값을 보이며,  $n=2$ 에서 중심점토와 물의 영향으로 최소값을 보이며,  $n$ 이 증가함에 따라 하류사면의 고비저항대의 영향이 나타나면서 단조 증가하는 것으로 보인다. 반면 마루 하류쪽 가장자리의 경우에는 저비저항 값을 갖는 중심점토와 물의 영향으로  $n=4$ 까지 감소하다가 고비저항대인 하류사면의 영향으로 증가하는 양상을 나타내고 있다. 물론 물의 영향을 상류쪽 겉보기비저항이 더 많이 받기 때문에 전체적으로 하류쪽 겉보기비저항에 비하여 작은 값을 나타내지만  $n=4$  이상일 경우에 그 변화 양상은 거의 유사하다.

한편 하류사면에서 얻어진 결과는 하류사면의 전기비저항이 400 ohm-m로 상대적으로 높고, 저비저항인 물과 가장 멀리 떨어져 있으므로 겉보기비저항이 가장 크게 나타난다. 물론 이 측정도 중심점토와 지형에 의한 영향으로  $n=5$  정도에서 최소값을 보인다.

이상에서 알 수 있는 것은 저수지를 구성하는 각종 요소들의 전기비저항 차와 제체의 3차원 지형효과가 복합적으로 나타나기 때문에 제체의 어느 부위에서 전기비저항 탐사를 수행한다고 해도 이들의 영향에서 벗어날 수 없다는 점이다. 따라서 저수지의 3차원 지형효과와 구성 요소의 물성까지 고려하게 되면 겉보기비저항의 변화양상은 매우 복잡해지며, 이들의 영향을 보정하거나 고려하여 해석하기는 쉽지 않을 것으로 보인다. 지형의 영향만을 고려할 경우 측선의 위치가 하류사면에 위치할 경우를 제외하고는  $n=4$  이상에서 겉보기비저항이 단순

감소하는 양상을 보이는 반면, 3차원 지형과 저수지 구성요소의 물성값을 모두 고려한 경우에는 측선의 위치에 관계없이  $n=5$  이상에서 겉보기비저항이 거의 선형적으로 단순 증가하는 양상을 보인다. 이는  $n$ 이 증가할수록 지형효과에 비하여 고비저항체인 제체의 상, 하류사면과 기반암에 의한 영향이 더욱 증대되기 때문으로 해석된다.

예를 들어 하류사면에서 얻어진 결과를 보면, 지형의 효과만을 고려하였을 경우에는  $n=1$ 일 때의 겉보기 비저항값이 92 ohm-m를 보이지만  $n=6$ 일 경우에는 53 ohm-m로 급격히 감소한다(Fig. 2). 반면 물성까지 고려한 경우에는  $n=1$ 일 경우에 375 ohm-m를 보이다가  $n=6$ 일 경우에 270 ohm-m로 감소한다(Fig. 3). 즉 지형에 의한 효과만을 고려할 경우에는  $n=6$ 일 때의 값이  $n=1$ 일 때의 56 %로 지형의 효과가 매우 크게 나타나는 반면, 물성까지 고려한 경우에는  $n=6$ 일 때의 값이  $n=1$ 일 때의 72 %로 상대적으로 지형 효과가 감소되었음을 알 수 있다. 따라서 저수지에서 수행되는 전기비저항 탐사에서 저수지의 기하학적 영향보다는 구성요소의 물성에 의해 겉보기비저항이 더욱 크게 영향을 받는 것으로 해석되며, 이러한 특성이

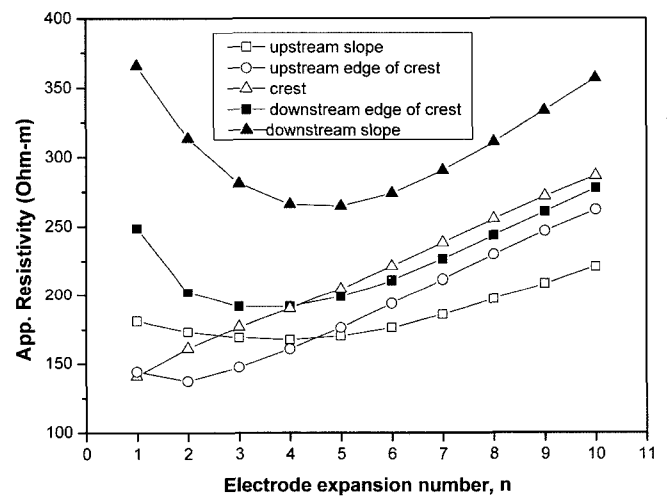


Fig. 4. Apparent resistivity variations with electrode expansion numbers due to 3D effects and material properties of the reservoir model given in Fig. 3.

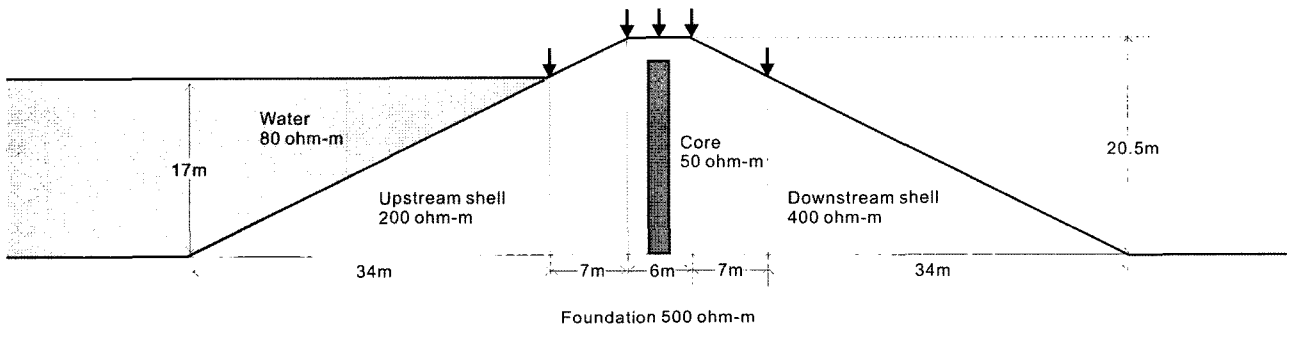


Fig. 3. The cross-section of an embankment dam with a central clay core.

전기비저항 탐사가 저수지의 안전진단에 적용 가능한 이유 중의 하나로 생각된다.

### 누수구간의 탐지능력

쌍극자 배열 전기비저항 탐사는 위에서 설명한 바와 같이 저수지의 3차원적 기하학적 특성과 저수지 구성 요소들의 물성차이로 인하여 해석에 상당한 어려움이 있음에도 불구하고 누수구간의 탐지에 널리 사용되고 있다. 이는 누수가 제당의 일부 구간에서 일어나고, 제당에 평행하게 설정된 축선에서 얻어진 자료는 누수구간에서 이상을 나타내기 때문인 것으로 해석된다. 즉 축선방향에 직교 혹은 사교하는 누수구간에서는 축선방향으로 물성변화가 발생하며, 이는 전기비저항 탐사자료의 역산 단면에서 수평방향의 저비저항 이상대로 나타나게 된다. 따라서 얻어진 전기비저항 단면에서 수직적인 변화보다는 수평적인 전기비저항의 변화가 누수구간의 탐지에 중요한 정보를 제공한다. 물론 누수구간의 수직적 위치는 지형적인 영향으로 인하여 실제 누수구간의 심도와는 차이를 보이겠지만 상대적인 수직적 위치에 관한 정보를 얻어낼 수 있다.

하지만 저수지에서 수행되는 2차원 전기비저항 탐사는 축선의 위치에 따라 얻어진 전기비저항은 서로 다른 분포양상을 나타낸다. 이는 저수지 구성 요소들의 물성값 차이와 기하학적 특성에 기인하며, 누수의 발생 형태에도 관련된다. 일반적으로

제체의 누수, 특히 제체에서 발생하는 누수는 세굴현상에 기인하는 것으로 알려져 있다. 일단 세굴현상이 시작되면, 중심점토내의 점토입자들이 하류사면 쪽으로 이동하게 된다. 중심점토의 전기비저항은 매우 낮기 때문에 점토입자들이 빠져나간 중심점토 구간은 전기비저항이 오히려 증가하게 된다. 반면 하류사면은 누수에 의한 수분함량과 점토함량의 증가로 인하여 전기비저항이 감소하게 된다. 따라서 중심점토의 전기비저항이 높아진 구간과 하류사면의 전기비저항이 낮아진 부분이 누수구간의 탐지에 중요한 표적이 된다. 한편 상류 사면은 저수지 물로 포화되어 있기 때문에 전반적으로 전기비저항이 하류사면에 비하여 낮으며, 세굴현상이 발생해도 점토함량의 증가가 없기 때문에 수분함량만의 증가에 의해 전기비저항이 감소한다. 따라서 상류사면에서의 전기비저항 감소는 그리 크지 않을 것으로 예상되며, 중심점토에서는 전기비저항의 증가, 하류사면에서는 전기비저항의 감소가 누수구간의 특성일 것으로 판단된다.

Fig. 5는 중심점토의 훼손에 의한 누수구간 모델과 3차원 모델링을 통하여 상류사면, 마루 상류 쪽 가장자리, 마루 중앙부, 마루 하류 쪽 가장자리 및 하류사면에 제당과 평행하게 설정된 축선에서 쌍극자 배열 전기비저항 탐사를 수행한 결과이다. 모든 축선에서 축점간격은 5 m이며, 축선의 길이는 100m로 설정하였다. Fig. 5에 나타낸 바와 같이 저수지 물의 전기비저항은 80 ohm-m, 상류사면은 200 ohm-m, 중심점토는 50

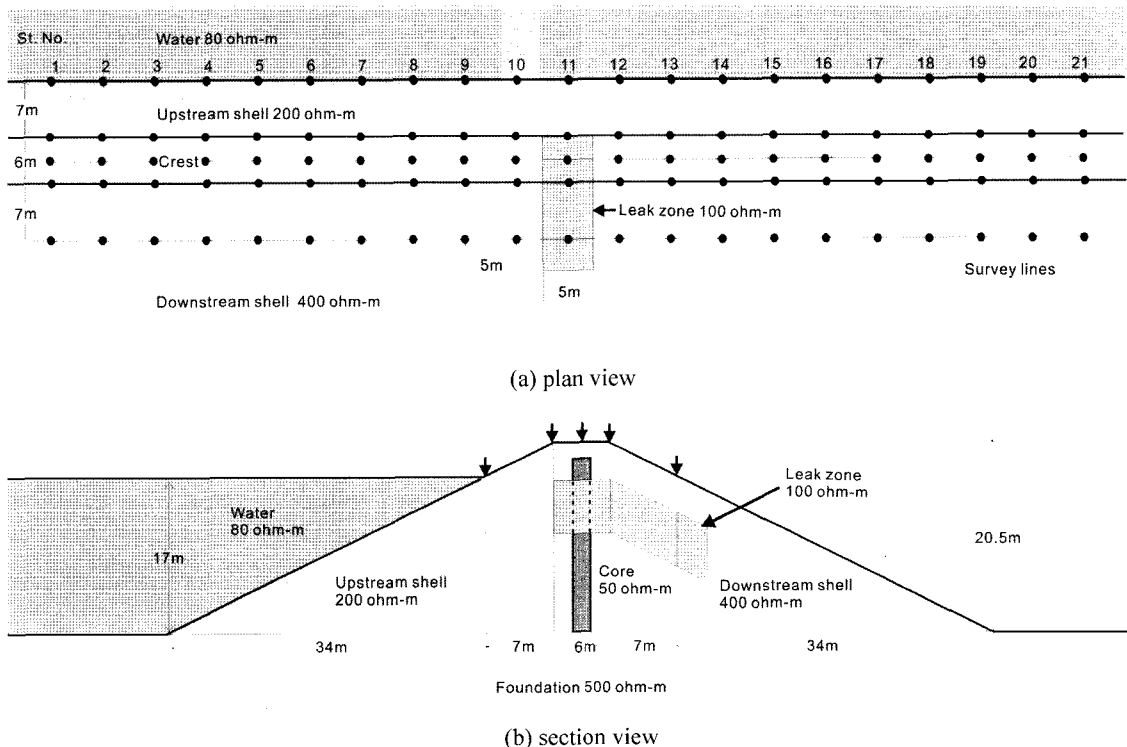


Fig. 5. The reservoir model with a leak zone at the center of the embankment and survey lines. Solid circles in the plan view (a) and dark arrows in the section view (b) indicate locations of electrodes and survey lines, respectively.

ohm-m, 하류사면은 400 ohm-m, 세굴현상에 의해 훼손된 중심점토의 전기비저항은 100 ohm-m, 그 크기는 5m × 2m × 6m로 가정하였으며, 중심점토를 기준으로 상류부와 하류부 쪽

으로 전기비저항이 감소한 모델을 설정하였다.

우선 상류부 사면에서 얻어진 결과는 낮은 전기비저항을 갖는 저수지물의 영향으로 전반적으로 낮은 전기비저항 값을 갖

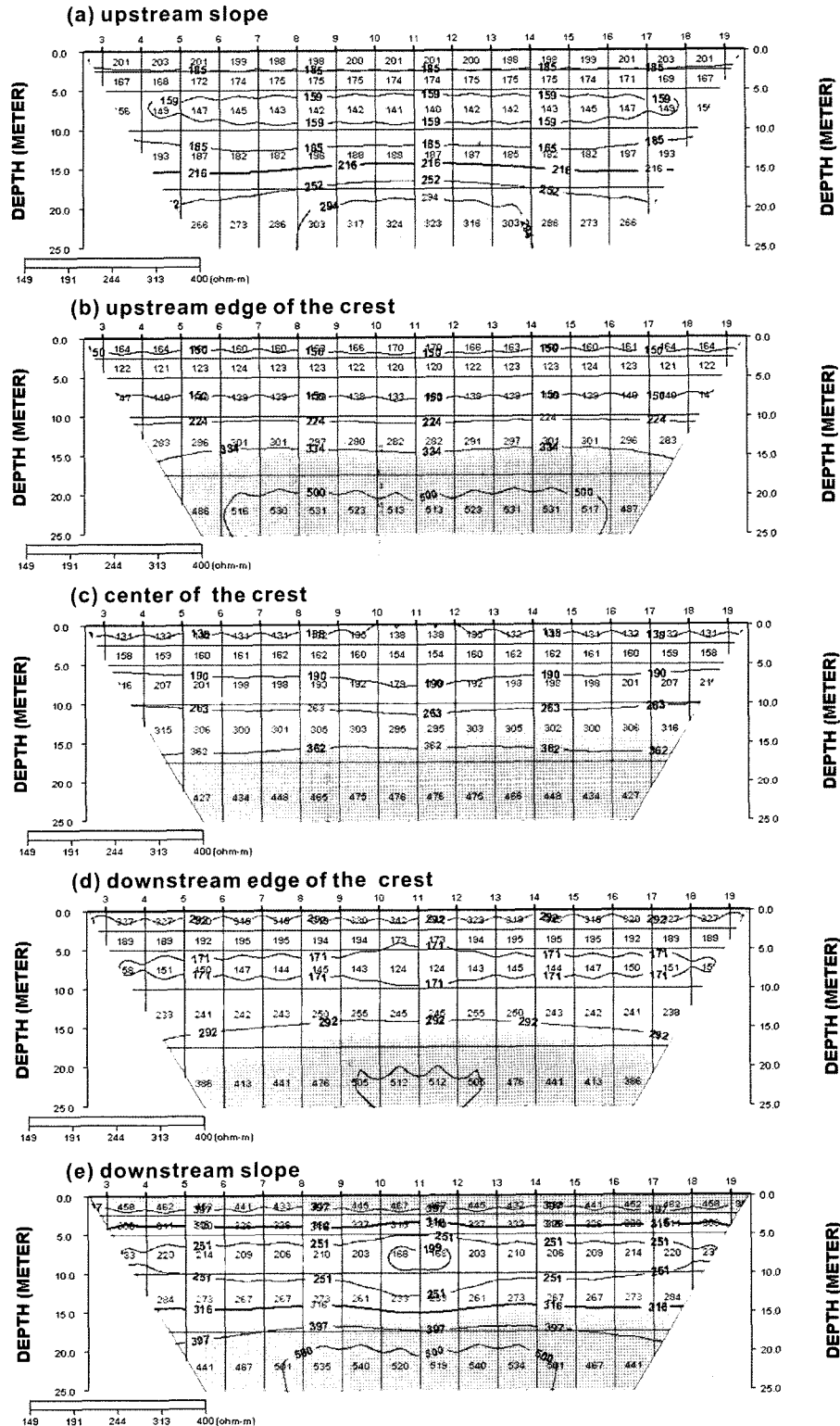


Fig. 6. Resistivity sections at the upstream slope (a), upstream edge of the crest (b), center of the crest (c), downstream edge of the crest(d) and downstream slope (e).

는다. 물론 중심점토의 영향을 많이 받는  $n=3, 4, 5$ 의 영향으로 중간정도의 심도에 저비저항대가 나타나고 있으며, 심부에서는 상대적으로 높은 비저항을 보이는 상류사면과 기반암의 영향으로 높은 비저항대가 나타나고 있다. 문제는 거의 누수구간에서 이상대가 나타나고 있지 않다는 점이다. 이는 Fig. 5에 주어진 누수구간 모델에서 상류사면 쪽의 물성 변화 구간을 크게 설정하지 않은 이유도 있지만, 훼손된 중심점토 부분의 전기비저항은 증가와 상류사면의 전기비저항 감소에 의한 효과가 서로 상쇄되어 거의 겉보기비저항이 누수구간이 존재하지 않을 경우와 유사한 값을 보이기 때문인 것으로 해석된다. 물론 상류사면과 누수구간의 물성차이가 크지 않다는 점도 누수구간 이상대가 제대로 나타나지 않은 이유 중의 하나인 것으로 보인다.

따라서 상류사면에서 얻어진 쌍극자 배열 전기비저항 탐사자료만으로는 누수대의 탐지가 어려울 것으로 해석된다. 물론 상류사면에 세굴현상에 의한 광범위한 누수대가 형성된다면 탐지가 가능할 수도 있겠지만 실질적으로 누수는 중심점토와 하류사면에서의 세굴현상으로 시작될 것이므로, 상류사면에 전기비저항 탐사로 탐지할 수 있는 정도의 누수대 즉, 전기비저항 이상대는 발달하기 어려운 것으로 판단된다. 마찬가지로 마루 상류 쪽 가장자리에서 얻어진 결과도 상류사면에서와 유사한 양상을 보인다. 단지 이 경우에는 중심점토와 거리가 가깝기 때문에  $n=1, 2$  정도의 낮은 심도에서 저비저항대가 발달하고 심부로 갈수록 전기비저항이 증가하는 양상을 보이며, 누수구간을 의미하는 뚜렷한 이상대는 나타나고 있지 않다.

마루 중앙에서 얻은 결과는 중심점토의 영향으로 상부에 저비저항층이 나타나고 하부로 갈수록 상, 하류사면의 영향이 커져서 전기비저항이 증가하는 양상을 보인다. 미세하기는 하지만 누수구간의 수직 상부에서 저비저항 이상대가 나타나고 있으므로, 물성변화가 더 커진대거나 혹은 누수구간의 크기가 커진다면 누수구간의 탐지가 가능할 수도 있을 것으로 보인다. 하지만 중심점토의 전기비저항 증가, 상류 및 하류사면 쪽의 전기비저항 감소가 서로 상쇄되는 효과가 있으므로 해석이 쉽지 않을 것으로 보이며, 전반적으로 본 시험에서 얻어진 결과만을 놓고 본다면 누수구간의 탐지는 쉽지 않은 것으로 해석된다.

반면 마루 하류 쪽 가장자리에 위치한 측선에서 얻어진 결과는 앞서 설명한 측선들의 결과와는 다른 양상을 보인다. 우선 제체의 기하학적 효과로 상부에서는 하류사면의 영향으로 얇은 고비저항층이 나타나고 있으며, 중간심도에 중심점토에 의한 중간정도의 비저항층이, 심부에는 하류사면과 기반암의 영향으로 고비저항층이 출현하고 있다. 겉보기에는 마치 상부 성토층, 중심점토, 기반암을 잘 나타내는 것처럼 보이지만 이는 저수지의 기하학적 3차원 효과에 의한 것으로 해석하는 것이 타당해 보인다. 즉 측선으로 부터의 저수지 구성요소들 사이의 거리 및 물성에 의해 나타난 현상으로 보이며, 역산단면

의 결과가 측선하부의 정량적인 구조를 반영하지는 못한다. 예를 들어 모델상의 제체의 높이는 20.5 m로 설정하였지만 역산단면에서는 15 m 정도로 나타나며, 중간심도에 나타나는 저비저항층도 중심점토의 실제 전기비저항과는 큰 차이를 보인다. 즉 전체적으로 제체의 구조를 잘 표현하고 있는 것처럼 보이지만 정량적으로는 실제 제체의 구조와는 매우 다르다. 하지만 이 측선에서 얻어진 결과는 누수구간으로 해석되는 저비저항 이상대는 매우 미약하기는 하지만 상류사면의 결과보다는 탐지 가능성이 높아 보인다.(가 잘 나타나고 있다.) 이는 하류 사면에 발달한 누수구간이 하류 사면의 물성과 대비가 크기 때문인 것으로 판단된다.

마지막으로 하류 사면에서 얻어진 결과는 위에서 설명한 모든 측선에 비하여 가장 뚜렷하게 누수구간을 나타내고 있다. 이 측선에서는 중심점토까지의 거리가 크기 때문에 상부에 나타나는 고비저항층이 비교적 두껍게 분포하며, 그 하부에 중심점토의 영향을 받은 저비저항층이, 심부에는 하류사면과 기반암에 의한 고비저항 층이 잘 나타나고 있다. 물론 이 역산 단면도 실제 제체의 정량적 구조 및 물성을 나타내지는 못하지만, 적어도 누수구간이 가장 명확하게 저비저항 이상대로 나타나므로 누수구간의 파악이 용이하다는 장점이 있다.

이상에서 저수지 수리시설물의 누수조사를 수행되는 쌍극자 배열 전기비저항탐사에서 측선의 위치는 누수구간의 탐지에 매우 중요한 요소가 된다. 이번 수치모형시험 결과에 의하면 상류부보다는 하류부에 측선을 설치하는 것이 유리하며, 특히 조사의 편의를 위하여 측선을 마루부에 설치할 경우에도 마루 하류쪽 가장자리에 측선을 설치하는 효과적인 것으로 판단된다. 또한 전기비저항 역산단면에서 얻어진 결과는 제체의 구조와 유사한 경향을 보이지만 이는 실제 구조로 보기 어려우며, 단지 정성적인 해석근거로만 사용가능한 것으로 보인다. 즉, 누수구간의 수평적 위치는 비교적 정확히 파악할 수 있지만 그 수직적 위치는 저수지 지형과 구성물질의 물성 대비로 인하여 실제값과는 차이가 존재한다.

## 결 론

국내에 산재되어 있는 수리시설물인 저수지는 대부분 노후화되어 누수의 위험을 안고 있다. 저수지의 누수는 인명과 재산에 막대한 피해를 주는 제체의 파괴로 이어질 수 있으며, 이를 방지하기 위해서는 체계적인 정밀 안전진단과, 이에 근거한 유지보수가 적기에 이루어져야만 한다. 전기비저항 탐사법은 국내외에서 제체의 누수구간을 탐지하는데 널리 사용되고 있는 효과적인 물리탐사 방법이다. 하지만 일반적으로 제체의 마루부에서 수행되는 전기비저항탐사는 2차원 지하구조를 가정한 2차원 탐사가 주로 수행되고 있다. 그러나 저수지는 제체의 기하학적 3차원 구조에 기인한 지형효과와 저수지를 구성하는 상, 하류사면, 중심점토, 기반암, 저수지 물 등의 전기비

저항 대비로 인하여 전기비저항 탐사자료는 크게 영향을 받는다. 이러한 기하학적 형상 및 2차원 가정의 위배에서 오는 자료의 왜곡은 저수지 제체에서 얻어지는 탐사자료의 해석을 어렵게 하는 요인 중의 하나이다.

본 연구에서는 저수지 제체의 3차원 효과와 구성요소들의 물성 차이가 2차원 전기비저항 탐사자료와 그 역산 결과에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 분석결과 축선의 위치에 따라 지형효과 및 구성요소들의 영향은 서로 다른 양상을 보였다. 지형효과 및 구성요소들의 영향은 서로 다른 양상을 보였다. 지형효과와 경우 축선의 위치에 따라 차이는 있으나 대개 전극전개수가 증가할수록 겉보기 비저항이 감소하는 양상을 보였다. 이는 전류전극쌍과 전위전극쌍 사이의 거리가 증가할 경우 3차원 지형효과를 더 많이 받기 때문인 것으로 해석된다. 지형과 저수지 구성요소의 전기비저항을 고려하였을 경우에는 전극전개수 변화에 따른 겉보기비저항의 변화양상은 더욱 복잡해지며, 대개 낮은 비저항을 갖는 중심점토로부터 축선까지의 거리에 의해 저비저항 층의 심도가 결정되는 것으로 해석된다. 축선의 위치에 관계없이 전극전개수  $n=5$  이상일 경우에는 겉보기 비저항은 항상 증가하는 양상을 보이는데, 이는 기하학적 영향보다는 저수지 구성요소의 물성에 의해 겉보기비저항이 더욱 크게 영향을 받는다는 것을 의미하며, 이러한 특성이 전기비저항 탐사가 저수지의 안전진단에 적용 가능한 이유 중의 하나로 생각된다.

한편 제체에 세굴현상에 의해 발생하는 누수구간의 탐지 능력은 축선의 위치에 따라 상당한 차이를 나타낸다. 일반적으로 하류사면이 물에 포화된 상류사면에 비하여 전기비저항이 높기 때문에 누수구간과 주변매질과의 물성대비가 하류사면에서 더 크기 때문에 축선의 위치는 하류사면 쪽에 위치하는 것이 누수구간의 탐지에 유리한 것으로 해석된다. 특히 조사의 편의를 위하여 제체 마루부에서 탐사를 수행할 경우에도 하류 쪽 가장자리에 축선을 설치하는 것이 누수구간 탐지에 효과적인 것으로 판단된다. 또한 제체의 구조를 보다 명확히 파악하기 위해서는 3차원 탐사가 필요하며, 이는 저수지의 3차원 구조 특성에서 오는 지형효과를 가장 효과적으로 처리하는 방법일 것이다(Kim *et al.*, 2001).

## 사 사

이 논문은 강원대학교 부설 자원개발연구소의 지원을 받아 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 박삼규, 김정호, 서구원, 2005, 저수지 유지관리를 위한 전기비저항 모니터링 기법 응용, 물리탐사, **8**, 177-183.
- 박삼규, 송성호, 최중학, 최보규, 이병호, 2002, 수리시설물의 누수탐지를 위한 물리탐사의 적용성, 땅과 물이 만나는 곳에서의 물리탐사, 한국지구물리탐사학회, 179-195.
- 이명훈, 김정호, 정승환, 송윤희, 2000, 2차원 및 3차원 전기비저항탐사를 이용한 제당 누수조사, 농업 현장에 필요한 물리탐사 기술, 한국물리탐사학회, 41-53.
- 오석훈, 김형수, 2005, 필댐의 3차원 기하효과에 따른 전기비저항 왜곡 효과 분석, 2005 공동학술대회 논문집, 한국물리탐사학회, 지구물리학회, 55-58.
- 정승환, 김정호, 양재만, 한글연, 김영웅, 1992, 전기비저항탐사에 의한 제당의 누수구간 탐지, 지질공학, **2**, 47-57.
- 윤종렬, 김진만, 최봉혁, 2005, 하천제방의 안정성 평가기법 연구, 2005 공동학술대회 논문집, 한국물리탐사학회, 대한지구물리학회, 111-116.
- Butler, D. K., and Llopis, J. L., 1990, Assessment of anomalous seepage conditions, in Ward, S. H. Ed., *Geotechnical and Environmental Geophysics II*, SEG.
- Kim, J. H., Yi, M. J., Song, Y., Seol, S. J., Chung, S. H. and Kim, K. S., 2001, Application of geophysical methods to the analysis of an earth dam, *EAGE 63rd Conference and Technical Exhibition, Amsterdam, The Netherlands*.
- Ogilvy, A. A., Ayed, M. A., and Bogoslovsky, V. A., 1969, Geophysical studies of water leakages from reservoirs, *Geophys. Prosp.*, **17**, 36-63.
- Salmon, G. M., and Johansson, S., 2003, Research on geophysical methods of detecting seepage and piping in embankment dams with case studies of geophysical measurements at two Swedish Tailings dams, *International Symposium on Major Challenge in Tailing dams, June 15, Montreal 2003, ICOLD 71st Annual Meeting*.
- Sjödahl, P., Dahlin, T., Zhou, B., and Johansson, S., 2002, Monitoring of leakage in embankment dams through resistivity measurements-A 2.5D modeling study, *Procs. 8th Environmental and Engineering Geophysics*, 169-172.
- Song, S. H., Song, Y. H., and Kwon, B. D., 2005, Application of hydrogeological and geophysical methods to delineate leakage pathways in an earth fill dam, Joint issue of *Exploration Geophysics*, **36**, *Butsuri-Tansa*, **59**, and *Mullitansa*, **9**, 92-96
- Titov, K., Loukhanov, V., and Potapov, A., 2000, Monitoring of water seepage from a reservoir using resistivity and self polarization methods: case history of the Petergoph fountain water supply system, *First Break*, **18**, 431-435.