

## 제체형태와 수위에 따른 전기비저항 반응 연구

오석훈\*

강원대학교 지구시스템공학과

### Electrical Resistivity Response Due to the Variation of Embankment Shape and Reservoir Level

Seokhoon Oh\*

Kangwon National University

**요 약:** 점토질의 중심코어부에 차수 역할을 의존하는 형식의 제체에 대한 안정성 검토에 자주 적용되는 2차원 전기비저항 탐사자료의 해석 시, 제체의 심벽 구조와 수위에 따른 왜곡 양상을 모델링을 통해 검증하였다. 3차원 구조인 제체의 해석을 주로 2차원으로 수행하는 과정에서 다양한 왜곡효과가 나타났다. 제체의 재료가 수평적으로 균질한 상태에서 수위와 연관지어 분석한 결과, 양안부보다는 제체 중앙부가 비저항 단면에서 수위선을 비교적 정확히 나타내며, 양안에 존재하는 지반 등 3차원 효과로 인해 양안부로 다가가면 수위선이 깊어지는 반응을 보였다. 또한 제체의 가장 외부구조인 채움재부의 경사가 일정할 때, 코어부의 경사가 급할수록 실제 수위와 비슷한 효과를 보였다. 코어부의 경사가 비슷할 때는, 외부 채움재부의 경사가 완만할수록 실제 수위와 비슷한 효과를 보였으며, 양안에서의 3차원 효과도 덜 나타났다. 채움재부의 경사가 급하면 2차원 역산 결과, 실제수위보다 더 깊은 위치에서 수위와 관련된 저비저항대를 지시하였으며, 양안에서의 3차원 효과가 크게 나타났다.

**주요어:** 전기비저항, 왜곡, 제체 안정성, 수위

**Abstract:** The distortion effect of electrical response for two-dimensional (2-D) DC resistivity method was verified in terms of 2-D inversion result of synthetic data obtained by three-dimensional (3-D) modeling, which is frequently applied to assess the safety of center core-type fill dam structure. The distortion effect is due to 2-D interpretation for 3-D structure. By the modeling analysis, we found that the water level is correctly described in the resistivity section around the middle part rather than each end side of the embankment due to the 3-D terrain effect, when the material of the embankment is assumed as horizontally uniform. And when we set the slope of outer rock fill part as uniform, the sharper the slope of the center core is, the more similar the resistivity section reflects. On the other hand, when the slope of the rock fill is steep, the resistivity section shows the water level at lower position than the real one, and the 3-D distortion effect at the end side of the embankment was enhanced.

**Keywords:** resistivity, distortion, safety of embankment, water level

## 서 론

최근 대규모 시설물에 대한 안정성 확보가 화두가 되고 있는 가운데, 특히 신규 중설이 어려운 수자원 시설물에 대한 객관적인 안전 점검이 중요한 문제가 되고 있다. 국내 수자원 공급의 중요한 역할을 하고 있는 각종 제체에 대한 신규 건설이나 용량 확대가 제한되고 있는 상황에서 기존 제체에 대한 안정성 검토를 위해 다양한 탐사 기법이 적용되고 있다. 이와 같

은 상황에서 물리탐사 기법은 제체의 안정성을 검토하기 위한 가장 기초적인 조사 방법으로써 인식되었으며, 특히 전기비저항 탐사 기법을 적용하기 위한 시도가 국내외에서 다양하게 수행되어 왔다(오석훈과 선창국, 2004; 조인기 외 2006; Bergstrom, 1998; Panthulu *et al.*, 2001; Song *et al.*, 2005). 일반적으로 전기비저항 탐사는 중심코어형의 제체에 대해 많이 적용되고 있는데, 이러한 형식의 제체는 차수벽 역할을 하는 수리전도도가 매우 낮은 점토(clay)를 중심부에 거의 수직에 가깝게 배치하고, 그 외부에 코어를 지탱할 수 있도록 설계기준에 따라 자갈이나 거석으로 채워놓은 필댐(fill dam)의 형식을 가지고 있다. 이와 같은 구조에서 전기비저항 탐사를 통한 안전진단은 결국 차수벽 역할을 하는 중심코어부에 대한 비저항 변화를 감시하여 제체의 안전도를 파악하고자 하는 것이다.

2008년 7월 11일 접수; 2008년 8월 19일 채택

\*Corresponding author

E-mail: gimul@kangwon.ac.kr

Address: Dept. Geosystem Eng., Kangwon National Univ.,  
Hyoja-2-dong, Chuncheon, Kangwon-do, Korea

이때 실제 제체는 3차원 구조를 가지고 있으나, 역산 해석의 편의성을 위해 대부분의 경우 축방향의 단면에 대한 2차원 해석이 이루어진다. 또한 상류부에 저수되어 있는 물은 채움재 (rock fill)에 비해 비저항이 매우 낮아, 지형효과 이외에 추가적으로 실제 코어의 비저항을 추정하는데 방해요소로 작용한다.

오석훈과 김형수(2005)는 제체의 안전진단을 위해 수행되는 2차원 전기비저항 탐사자료의 해석에서 지형효과를 고찰한 바 있는데, 본 연구에서는 조사 대상 제체의 형태를 중심코어형으로 가정하고 제체의 외형 및 코어부의 경사도에 따른 2차원 비저항 해석 반응과 수위에 따른 변화 양상을 3차원 모델링을 통해 살펴보았다.

### 제체의 2차원 해석에 의한 왜곡 효과

#### 3차원 구조인 제체의 2차원 해석

제체에 대한 전기비저항 탐사는 차수벽의 비파괴 점검을 위해 수행되는데, Fig. 1에서 볼 수 있는 바와 같이 대부분의 조사 및 해석이 제체의 정상부에서 축방향으로 전개된 축선 자료의 2차원 해석을 통해 이루어진다. 이와 같은 해석은 크게 두 가지의 문제점을 가질 수 있는데, 제체의 지형을 2차원으로 가정할 때 나타나는 왜곡 효과와 저수부에 담겨진 물의 비저항 효과를 어떻게 해석해야 할 것이냐 이다. 오석훈과 김형수(2005)는 2차원 가정에 의한 지형효과로 인해 실제보다 비저항이 20~30% 더 크게 나타나는 것으로 분석하였으며, 수위에 따라 비저항이 바뀔 것으로 예상하였다. 본 연구에서는 이와 같은 효과를 다양한 구조와 수위에 대해 고찰해 보고자 한다.

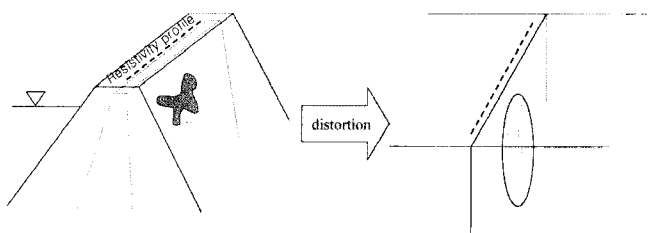


Fig. 1. Schematic of three-dimensional distortion effect for interpretation of resistivity survey performed on embankment.

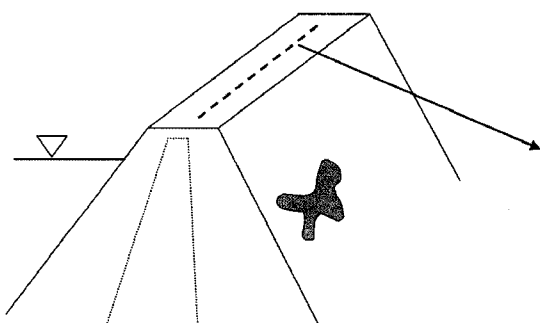


Fig. 2. An example of two-dimensional inversion result modeled by three-dimensional forward process.

#### 연구방법

Fig. 2에서 보는 바와 같이, 다양한 구조의 제체를 3차원으로 표현하여 3차원 전기비저항 정 모델링을 통해 제체의 정상부에서 관측될 수 있는 포텐셜 값을 획득하여 겉보기 비저항으로 변환하였다.

Fig. 3은 대상댐의 물성을 반영한 입력 모델을 단순화하여 나타낸 것이다. 코어를 제외한 채움재 부분과 양안부의 비저항은 2,000 ohm-m로 하였으며, 공기층과 저수부의 비저항을 각각 100,000 ohm-m와 30 ohm-m로 하였다. 3차원 전기비저항 모델 반응을 위한 프로그램은 독일 Freiberg 대학의 Spitzer 교수가 제공한 3ddcxh v.6.62를 사용하였으며(Spitzer, 1995), 격자 구조는 81(x) × 56(y) × 26(z)로 분할하여 모델링을 수행하였다.

본 연구는 모델링 연구이므로 격자의 크기가 큰 의미를 가지지는 않지만, 실제에 근사하기 위해서 Fig. 3에서 제시한 바와 같이 제체부의 크기는 장축방향 길이 125 m, 높이 40 m로 구성하였다. 제체 바깥쪽으로는 양안부가 바로 접하여 모델의 경계부까지 연장되며, 제체 정상부의 폭은 10 m, 코어의 정상부 폭은 6 m로 설정하였다. 제체 및 코어의 경사는 향후 모델링 과정에서 다양하게 주어지게 된다. 정상부에서의 전극 배열은 쌍극자 배열을 가정하였으며, 우안으로부터 10 m 떨어진 지점부터 시작하여 5 m 간격으로 전극이 배치되어 총 22개가 설치된 것으로 가정하였다. 3ddcxh 프로그램은 비균질 격자모

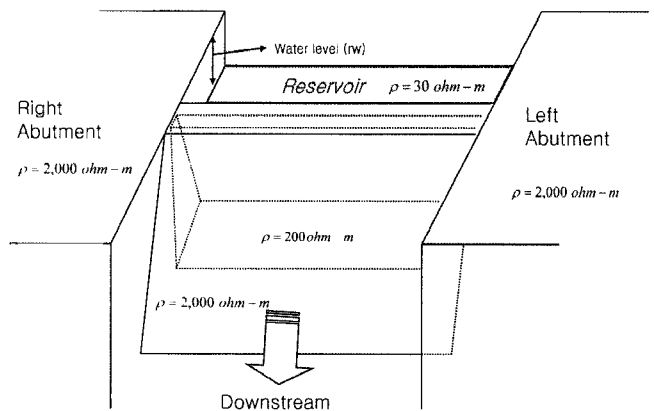


Fig. 3. Simplified model of embankment and its around structure for the input to the three-dimensional resistivity modeling.

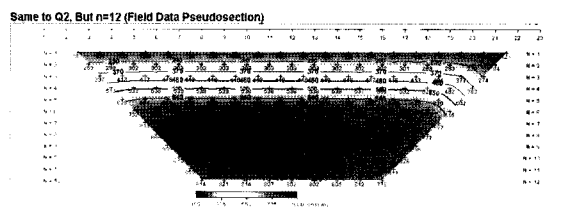


Fig. 2. An example of two-dimensional inversion result modeled by three-dimensional forward process.

텔링이 가능해 격자의 수를 효율적으로 운용할 수 있었으며, 전극간 격자의 수는 3개이다. 경계부에서의 왜곡 현상을 방지하기 위해 x, y, z 방향으로 각각 관심 대상의 크기에 대해 10 배 이상 벌려 모델링을 하였다. 3ddcxh 프로그램이 주어진 소스에 대한 포텐셜 만을 제공하므로 이를 쌍극자 배열에 의한 비저항 값으로 변환하였고, 이렇게 획득한 자료를 2차원적으로 해석하기 위해 Dipro(김정호 등, 2000)를 이용하였다.

본 연구에서는 제체의 코어부와 채움재 부분의 경사에 따른 비저항 반응을 살피기 위해, 경사계수를 Fig. 4와 같이 정의하였다. 이후 모든 비저항 단면의 U와 C는 Fig. 4와 같이 정의되며, 저수지의 수위(rw)는 제체 정상부를 0으로 하여 아래쪽으로 증가하는 것으로 설정하였다.

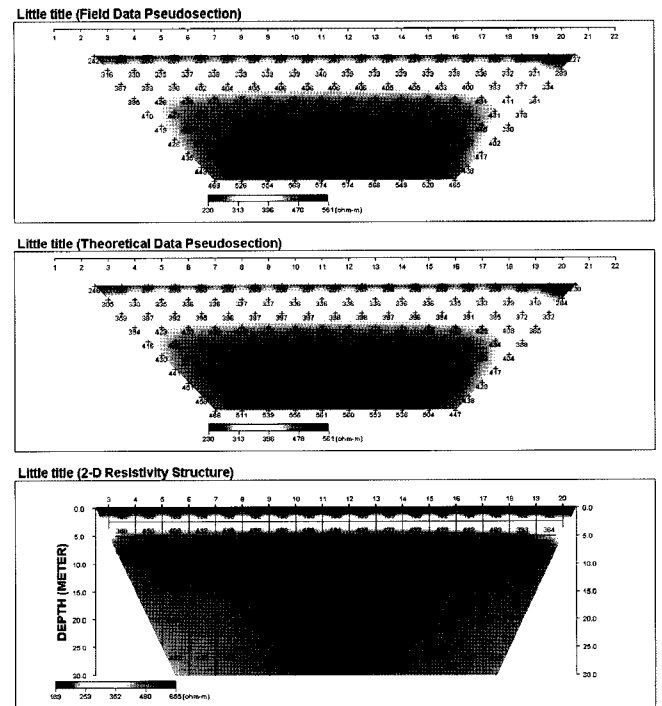
**저수부에 의한 효과**

Fig. 5는 저수부에 물이 채워져 있지 않은 경우에 대해 Fig. 3의 입력값을 적용하여 모델링을 수행할 때, 제체의 정상부에서 쌍극자-쌍극자 배열에 의해 측정되는 겉보기 비저항(위), 2차원 역산을 통해 계산된 비저항(중간), 그리고 2차원 역산 결과(아래)를 보여준다(이후 모든 비저항 단면은 이와 같은 배열로 표현한다). 제체의 경사는 가장 일반적인 형태의 하나인 U = 1.2, C = 0.3의 형태로 가정하였다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이, 3차원 효과에 의한 상하류의 빈 공간 때문에 비저항 단면이 실제 보다 고비저항대로 나타나고 있으며, 제체의 중상부에서 이러한 효과가 더욱 강해져서 비저항값이 크게 나타나고 있다. 제체의 하단부는 상대적으로 3차원 효과가 완화되어 중상부에 비해 비저항 값이 다소 낮게 나타나는 것으로 해석된다. 또한 2차원 역산 단면에서 수평적으로 비저항대가 고르게 나타나지만, 실제 코어재료의 값과는 거리가 먼 결과를 보여주고 있다.

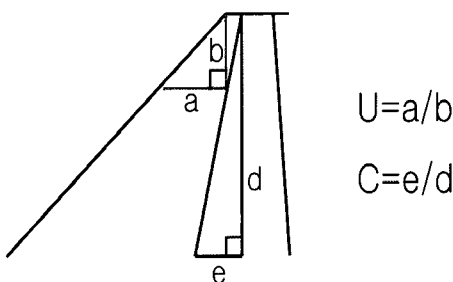
이번에는 저류부가 물로 채워져 있을 경우에 대해 살펴보고자 한다. 이때, 모델링 과정에서 상류 채움재 부분의 포화를 어떻게 처리하는지에 대해 고려를 했다. Fig. 6에서 볼 수 있는 바와 같이, 저류부에 수위가 형성이 된다면 비교적 입자의 크기가 큰 상류의 채움 재료는 저류부의 물로 포화될 것이다. 이러한 현상을 모델링 결과에서 비교한 것이 Fig. 7이다. Fig. 7은 Fig. 6과 동일한 조건이지만 채움재 부분이 포화되었을 경

우에 대한 모델링 결과이다. Fig. 7의 오른쪽은 제체의 채움재 부분이 완전 포화되어 전기적 조건이 저수부와 같은 상태의 비저항(30 ohm-m)을 갖는다고 가정한 경우이다. 다만, 모델링 격자의 한계로 인해 코어부의 포화조건은 고려하지 않았는데, 보다 정밀한 결과 해석을 위해서는 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

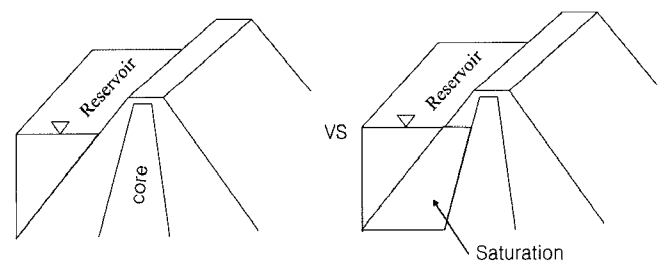
Fig. 6의 우측 그림과 같이 상류 채움 재료부분이 포화되었다고 가정하는 것이 보다 현실적인 경우라고 생각할 수 있는데, 이러한 경우 Fig. 7의 우측 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 하부에서는 저비저항대가 출현하게 된다. 실제 탐사 사례를 보면 이와 같은 현상들이 매우 잘 나타나고 있음을 알 수 있다(오석훈과 선창국, 2004). 이후 본 연구에서 제시하는 모델링 결과는, 모두 상류 채움재가 포화되었다고 가정한 결과이다. 다만, 실제로 물로 완전히 포화된 채움재의 비저항을 측정하는



**Fig. 5.** Two-dimensional resistivity section for the case that reservoir does not contain water (U = 1.2, C = 0.3). From top to bottom, each figure means the observed apparent resistivity, calculated apparent resistivity, and inverted resistivity section, respectively.



**Fig. 4.** Definition of geometrical coefficient of rock-fill part (U) and core part (C).



**Fig. 6.** Schematic of feasibility of resistivity modeling for each status of upstream rock-fill material depending on two case of unsaturated (left) or saturated (right) status with reservoir water.

것은 거의 불가능하므로, 실제 어느 정도의 값을 가질지 정확히 예측하기는 어렵다. 이와 같은 입력 물성 결정의 모호함을 해결하기 위해서는 다양한 비저항을 이용하여 모델링을 수행하고 실제 탐사 결과와 가장 유사한 것으로 이용하는 것이 타당할 것으로 생각된다. Fig. 8은 한가지의 예로써 포화된 채움

재의 비저항이 200 ohm-m이라고 가정할 때의 측정결과를 모델링을 통해 구한 것이다. Fig. 7에 비해 양안부에서의 지형효과가 다소 완화되어 하부의 저비저항대 부근이 비저항값이 다소 평평해진 것을 볼 수 있는데, Fig. 7과 Fig. 8을 비교할 때 실제 사례는 Fig. 7의 형태가 더 많이 나타나는 것으로 생각

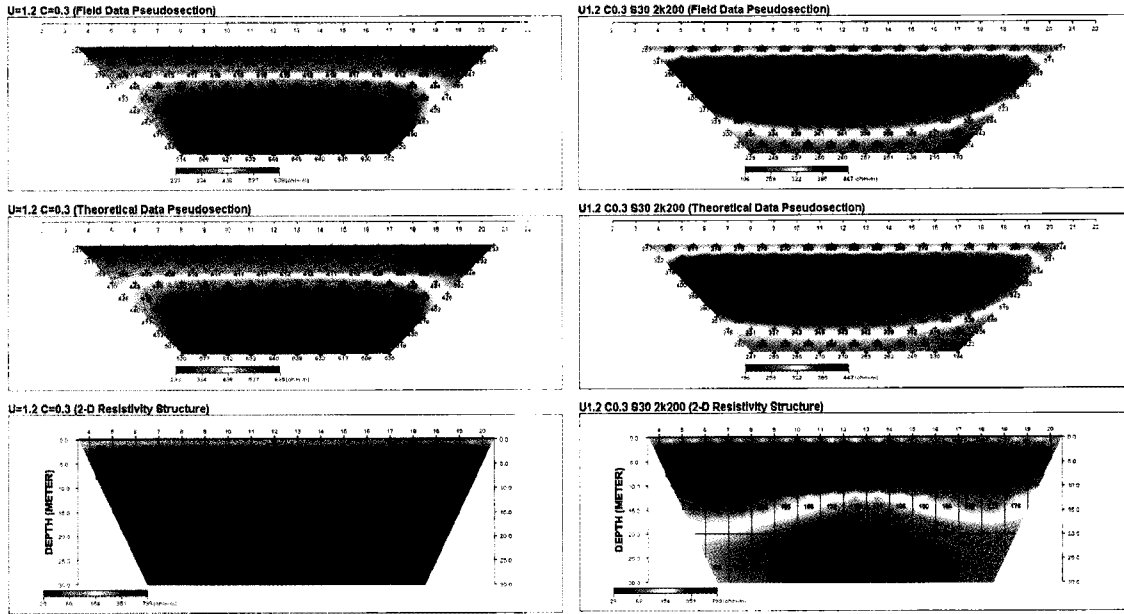


Fig. 7. Resistivity sections depending on the status of upstream rock-fill material. Left section is case of unsaturated fill material and right is the saturated case ( $U = 1.2$ ,  $C = 0.3$ ,  $r_w = 10$ , and the same resistivity scale for all the sections.). From top to bottom, each figure means the observed apparent resistivity, calculated apparent resistivity, and inverted resistivity section, respectively.

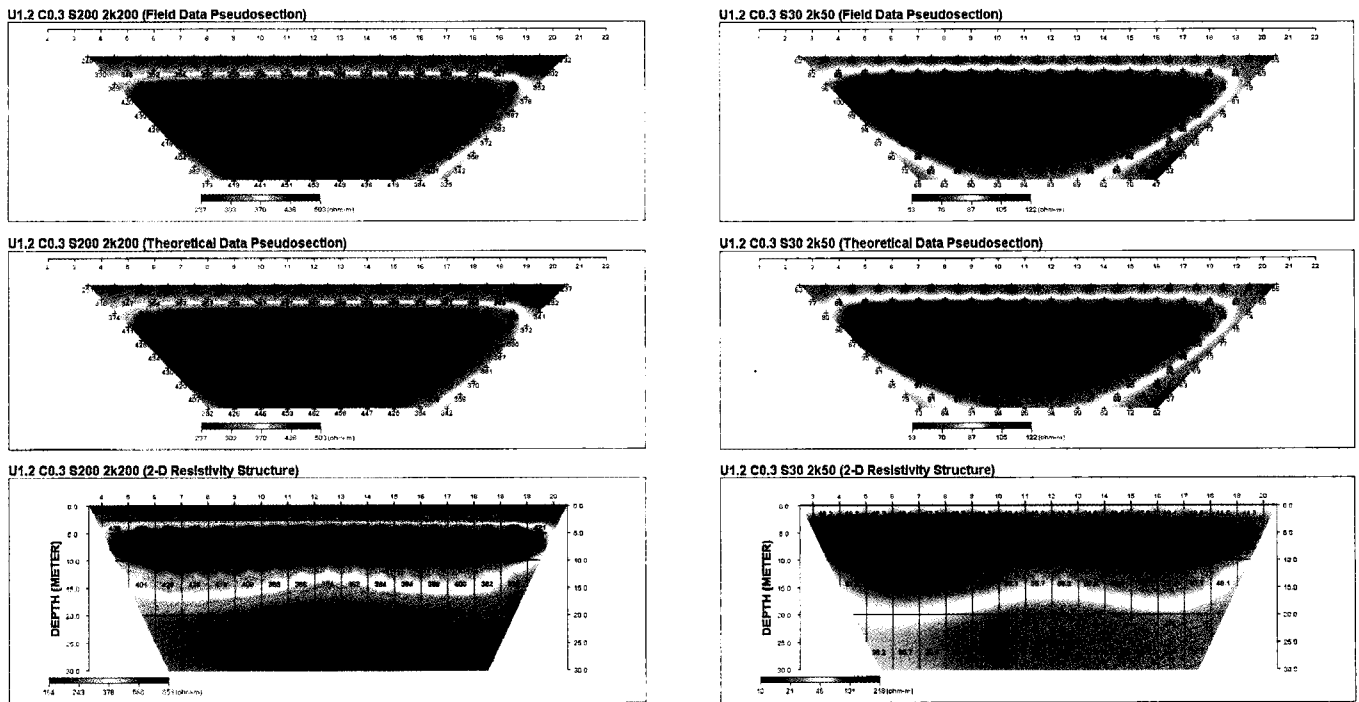


Fig. 8. Two dimensionally interpreted resistivity section when the resistivity value of the saturated rock-fill material is set as 200 ohm-m ( $U = 1.2$ ,  $C = 0.3$ ,  $r_w = 10$ ). From top to bottom, each figure means the observed apparent resistivity, calculated apparent resistivity, and inverted resistivity section, respectively.

Fig. 9. Two dimensionally interpreted resistivity section when the resistivity value of the core material is set as 50 ohm-m ( $U = 1.2$ ,  $C = 0.3$ ,  $r_w = 10$ ). From top to bottom, each figure means the observed apparent resistivity, calculated apparent resistivity, and inverted resistivity section, respectively.

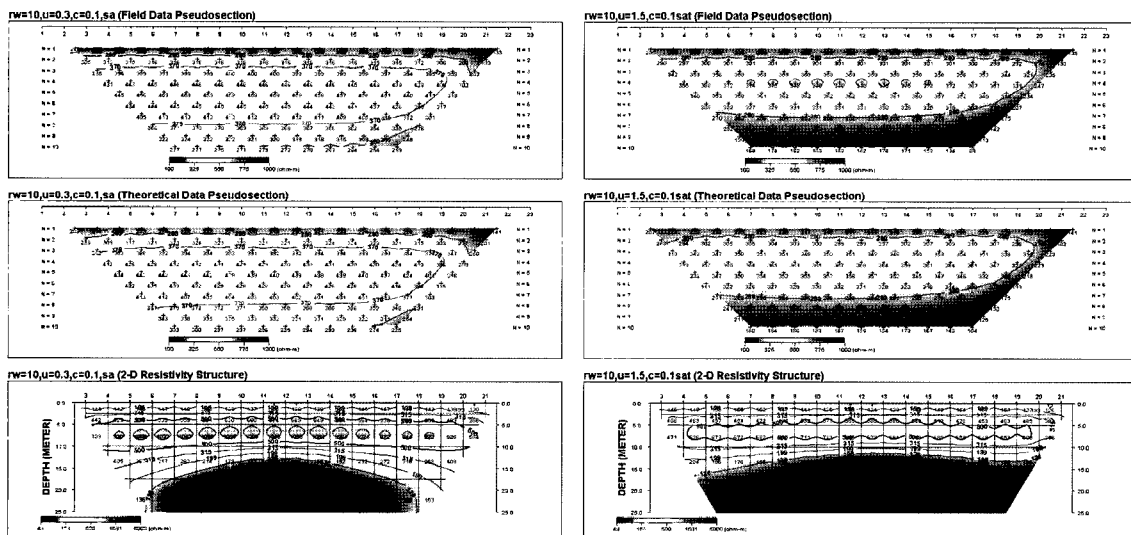
된다.

더불어 코어의 비저항이 위의 모델보다 훨씬 낮아서 저수부와 거의 유사한 수준일 경우에 대해서도 분석하였다. 다만 앞의 채움재가 포화되었을 때의 비저항에 대한 사례와 유사하게, 어느 입력값이 더 타당하나에 대한 논의 보다는 어떤 물성에서 어떤 반응이 나타나는지에 대한 경향성을 판단하는게 본 연구에서는 더 중요한 부분이다. Fig. 9는 앞의 모델과 모든 조건은 같고 코어 재료의 비저항이 50 ohm-m로 매우 낮게 가정했을 때의 비저항 단면도이다. 일반적으로 제체에 대한 전기비저항 조사를 수행할 때 비저항값의 직접적인 비교보다는 수평적인 연속성을 주로 살펴본다고 가정할 때, 앞의 모델과 큰 차

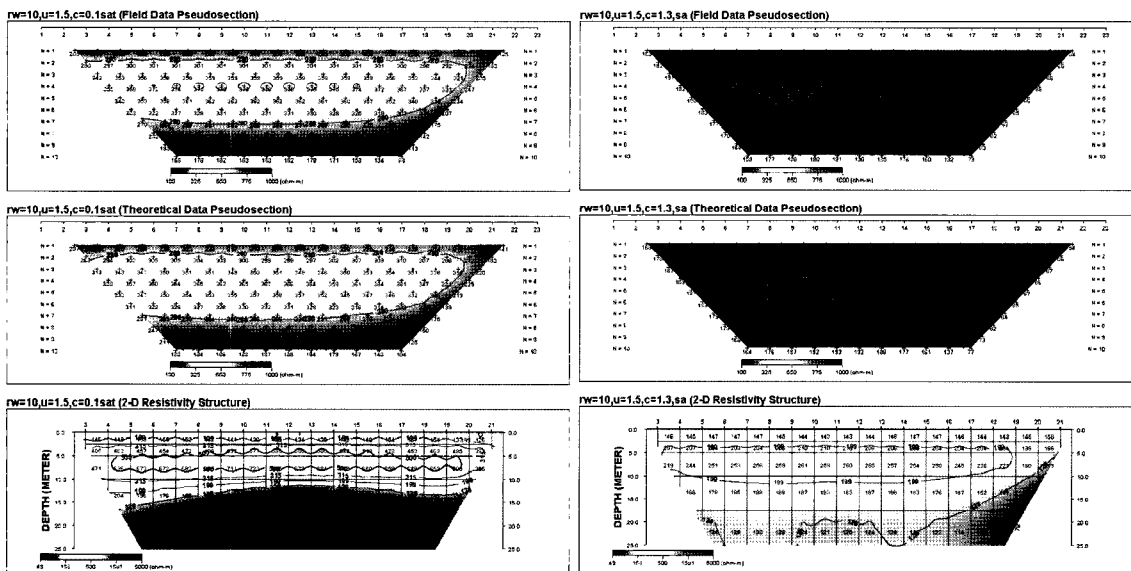
이는 보이지 않는다. 다만, 코어의 비저항이 낮아지다 보니 전체적인 비저항값이 낮은 값으로 수렴하는 경향을 보이고 있다.

**제체의 경사에 따른 비저항 반응**

Fig. 10은 제체의 코어부 경사는 동일하고( $C = 0.1$ ), 채움재 부분의 경사가 다른 경우( $U = 0.3$ 과  $1.5$ )에 대한 비저항 반응 결과이다. 수위는 모두 10으로 동일하다( $rw = 10$ ). 제체 경사에 따른 반응의 경향성을 효과적으로 살피기 위해서 실제보다는 다소 경사의 변화가 큰 차이가 나는 경우를 가정하였다. 코어부의 경사를 다양하게 변화시킴에 따라 다소 비저항 패턴의 변화는 발생하지만, 일반적으로 채움재 부분의 경사가 완만할



**Fig. 10.** Resistivity sections depending on the change of geometrical coefficient of rock-fill part. U value of left section is 0.3 and right section is 1.5 ( $C = 0.1$ ,  $rw = 10$ , and the same resistivity scale for all the cases). From top to bottom, each figure means the observed apparent resistivity, calculated apparent resistivity, and inverted resistivity section, respectively.



**Fig. 11.** Resistivity sections depending on the change of geometrical coefficient of core part. C value of left section is 0.1 and right section is 1.3 ( $U = 1.5$ ,  $rw = 10$ , and the same resistivity scale for all the cases.). From top to bottom, each figure means the observed apparent resistivity, calculated apparent resistivity, and inverted resistivity section, respectively.

때( $U = 1.5$ )가 가파를 때( $U = 0.3$ )에 비해서 양안부에 의한 왜곡효과가 다소 덜 나타나면서 전반적으로 수평적인 비저항값의 경향을 보이고 있다. 실제 제체에서 획득한 자료의 경우, 제체의 중앙 하단부에 고립된 저비저항대가 나타나는 경우가 종종 있는데, 이는 앞의 사례에서 살펴본 바와 같이 상부 채움재의 포화 효과에 의한 왜곡이 일부 반영된 결과로 보인다.

Fig. 11은 Fig. 10의 경우와 반대로 채움재 부분의 경사는 동일하고( $U = 1.5$ ), 코어부분의 경사가 다를 때( $C = 0.1$ 과  $1.3$ )의 반응이다. 역시 채움재 부분의 경사에 따라 다소 비저항 값의 변화는 있지만, 일반적으로 코어 부분의 경사가 완만할수록 비저항 단면의 값이 실제 코어의 비저항보다는 높지만 일정하게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 상하류의 빈공간으로 인해 비저항은 실제보다 높게 나타나지만, 코어의 수평상태를 평가하기에는 코어의 경사가 다소 완만한 것이 좋다는 것을 의미한다. 대조적으로 코어의 경사가 급할 때에는( $C = 0.1$ ), 저수부의 저비저항의 영향을 크게 받아서 마치 전기적 물성이 층을 이루고 있는 것처럼 나타나고 있다. 하지만, 이 경우 실제 수위( $rw = 10$ )가 측선의 중앙부에서는 비교적 정확하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이러한 분석을 통해, 실제로 코어의 경사에 따라 수위가 얼마나 코어의 비저항 반응에 영향을 미쳤는지 파악할 수 있을 것이다.

**수위와 2차원 비저항 단면의 관계**

Fig. 12는 코어의 경사( $C = 0.1$ )와 채움재 부분의 경사( $U = 0.3$ )가 모두 동일한 조건에서, 수위( $rw$ )가 각각 10과 22일 경우에 대한 비저항 단면이다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 수위에 따른 비저항의 변화가 잘 나타나고 있다. 그런데, Fig. 11과 같이 코어의 경사를 고려하여 분석하면, 경사가 급할 때는 수

위에 따른 변화가 즉각적으로 잘 나타나지만, 코어의 경사가 완만한 경우에는 수위의 효과는 잘 나타나지 않는다. 하지만 실제 시공된 제체의 경우, 코어의 경사가  $C = 0.3$  보다 작은 경우가 많다는 것을 고려한다면, 코어 상태의 해석에 있어 수위에 대한 고려가 반드시 필요하다는 것을 상기해야 할 필요가 있다.

**결론**

전기비저항 탐사를 통한 제체 코어부의 안정성 해석에 대한 신뢰도를 향상시키기 위해, 제체의 형태와 수위 변화에 따른 2차원 전기비저항 반응에 대한 모델링 연구를 수행하였다. 연구의 진행을 위해 3차원 정 모델링을 통해 일반적으로 제체 정상부에서 획득할 수 있는 겉보기 비저항 단면을 획득하고, 이를 2차원 역산하였다. 이 과정에서, 상류부의 채움재 부분이 포화되었다고 가정하고, 이 부분이 포화되어 저수부의 수위와 같은 정도의 비저항을 갖는 것으로 하였다. 이럴 경우, 실제 관측자료에서 수위선을 기준으로 하부쪽에서는 강한 저비저항대가 나타나는 것이 정상으로 판단되었다.

수평적으로 균질한 조건에서, 양안부보다는 제체 중앙부에서 수위선이 비교적 정확히 나타났는데, 이는 양안부에 의한 3차원 효과 때문이며, 양안부로 다가가면서 수위선이 깊어진다. 채움재 부분의 경사가 일정할 때, 코어부의 경사가 급할수록 실제 수위와 비슷한 효과를 보였다. 또한 코어부의 경사가 비슷할 때, 채움재부의 경사가 완만할수록 실제 수위와 비슷한 효과를 보이며, 양안에서의 3차원 효과도 덜 나타남을 확인하였다. 반대로 채움재 부분의 경사가 급하면 실제수위보다 더 깊은 위치를 지시하며, 양안에서 3차원 효과가 크게 나타났다.

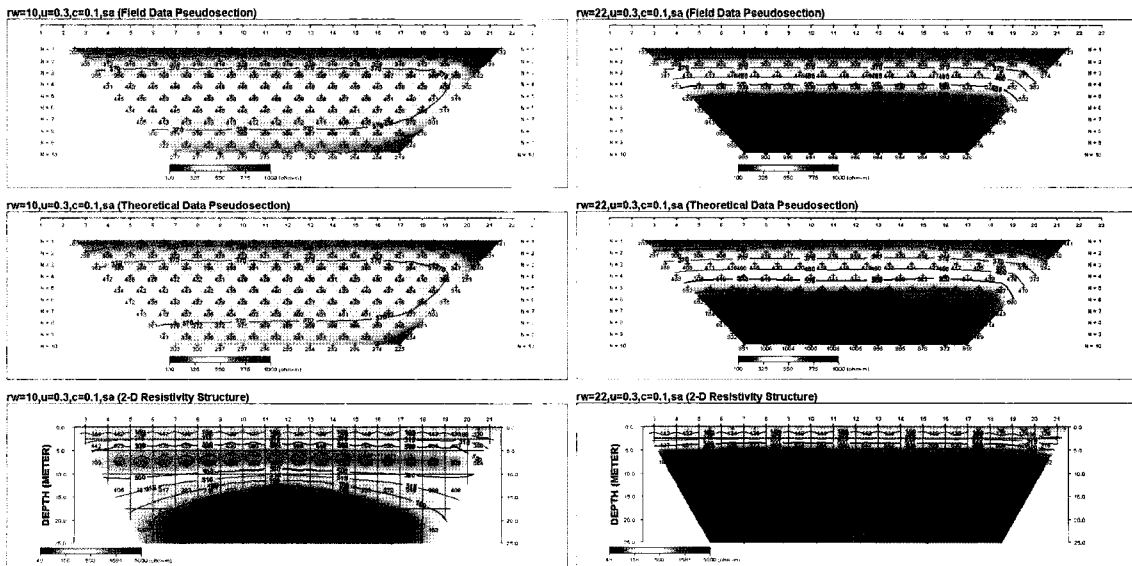


Fig. 12. Resistivity sections depending on the change of water level of reservoir ( $rw$ ). The water level of left section is 10 and right section is 22 ( $C = 0.1$ ,  $U = 0.3$ , and the same resistivity scale for all the cases). From top to bottom, each figure means the observed apparent resistivity, calculated apparent resistivity, and inverted resistivity section, respectively.

저수부의 수위에 따른 반응은 코어의 경사가 완만할 때는 수위 변화에 따른 반응이 민감하게 나타나지 않는 것으로 예상되었으나, 실제의 경우 코어의 경사가 급한 경우가 많이 이에 대한 고려가 반드시 필요하다는 점이 부각되었다.

### 사 사

이 논문은 한국학술진흥재단의 신진교수 연구지원 사업인 “지구통계학적 베이지안 방식에 의한 이중 물리탐사 및 보조 자료의 복합 역산 연구”의 지원을 받아 이루어진 연구임.

### 참고문헌

김정호, 송운호, 정승환, 2000, 전기전자탐사 기술을 이용한 지반 구조의 영상화, 2000년도 한국물리탐사학회한국지반공학회 지반조사위원회 공동특별강연논문집, pp. 121-154.

오석훈, 김형수, 2005, 필댐의 3차원 기하 효과에 따른 전기비저항 왜곡 효과 분석, 한국물리탐사학회대한지구물리학회 2005

공동학술대회.

오석훈, 선창국, 2004, 필댐 안정성 평가를 위한 물리탐사와 SPT 자료의 분석, 지구물리, 7(3), 171-183.

조인기, 강형재, 김기주, 2006, 저수지 3차원 구조에 의한 전기비저항 탐사자료의 왜곡, 물리탐사, 9, 291-298.

Bergstrom, J., 1998, Geophysical methods for investigating and monitoring the integrity of sealing layer on mining waste deposits, Licentiate Thesis, Lulea Univ. of Technology, Lulea, Sweden.

Panthulu, T. V., Krishnaiah, C., and Shirke, J. M., 2001, Detection of seepage paths in earth dams using self-potential and electrical resistivity methods, *Engineering Geology*, 59, 281-295.

Song, S. H., Song, Y., and Kwon, B. D., 2005, Application of hydrogeological and geophysical methods to delineate leakage pathways in an earth fill dam. Special issue published jointly by ASEG 36, SEGJ 58, KSEG 8: pp. 92-96.

Spitzer, K., 1995, A 3-D finite difference algorithm for DC resistivity modeling using conjugate gradient methods, *Geophys. J. Int.*, 123, 903-914.