

3차원 전기비저항 모델링을 통한 제체의 안정성 분석 연구

오 석 훈*

강원대학교 지구시스템공학과, 200-701, 강원도 춘천시 효자동 192-1

The Safety Assessment of Embankment by Three Dimensional Electrical DC Modeling

Seokhoon Oh*

Department of Geosystem Engineering, Kangwon National University, Gangwon 200-701, Korea

Abstract: Recently, the electrical DC survey has frequently been performed to assess the safety of embankment. This study showed that the damaged section of embankment could be appropriately detected by the survey only when the three dimensional effect was correctly considered. The shape of the three dimensional embankment was numerically implemented, and a proper modeling was performed to confirm the effect by analyzing the apparent and inverted true resistivity. Then, the field work was carried out. The three dimensional interpretation distinguished the erroneous weak zones from the geometrical artifact, and the embankment was ensured as safe both by the additional survey performed in rainy season and the partial excavation for direct observation.

Keywords: Electrical DC survey, embankment, three dimensional effect

요 약: 최근 제체 등의 수자원시설물에 대한 안정성 검토를 위해 전기비저항 탐사가 많이 수행되고 있다. 본 연구에서는 전기비저항 조사를 통해 제체의 안정성을 검토하고자할 때, 제체의 3차원 형상에 의한 효과를 정확히 분석하여야만 손상 구간을 파악할 수 있음을 제시하고자 한다. 이의 검토를 위해 3차원 전기비저항 모델링을 통해 3차원 형태의 제체 모양을 수치모델로 구현하고, 제체 내부의 상태에 따른 겉보기 비저항과 역산 결과를 분석하였다. 또한 실제 3차원 곡면 형태를 가진 제체에서 전기비저항 탐사를 수행하여 그 결과를 분석하였다. 그 결과, 단순히 2차원으로 해석하였을 때 이상대로 추정되었던 구간이, 실제로는 3차원 곡면에 의한 기하학적 효과였음이 밝혀졌으며, 3개월 뒤에 수행된 우기의 추가 조사와 추후 일부 굴착을 통하여 제체의 내부가 안전한 상태임을 확인하였다.

주요어: 전기비저항 탐사, 제체, 3차원 효과

서 론

제체의 적절한 안정성 검토를 위해서는 조사과정에서 제체의 손상을 최소화하면서 내부의 상태를 파악할 수 있어야 하므로, 물리탐사 기법이 널리 적용되고 있는 실정이다. 특히, 최근 환경영향 평가의 강화 등으로 인하여, 신규 수자원 시설물의 건설이 어려운 시점에서 기존의 시설물에 대한 안정평가 및 관리는 점차 그 중요성이 커지고 있다.

수자원 시설물의 안전평가를 위해 널리 이용되는

비파괴 물리탐사 방법으로 탄성과 및 전기비저항 탐사가 있으며, 특히 전기비저항 탐사는 제체의 핵심부에 해당하는 코어(core) 부분의 상태에 대한 정보를 제공할 수 있어 널리 이용되고 있다(오석훈과 선창국, 2004; 조인기 외, 2006; Song et al., 2005). 전기비저항 탐사 자료의 해석은 주로 2차원 해석으로 수행이 되는데, 이는 제체에서 3차원 조사의 수행이 어렵고 주로 제체의 축방향으로 탐사가 이루어지는 현실을 고려한 것이다. 실제 제체는 3차원 구조이지만 2차원으로 가정하고 해석한 결과에 의한 오차는 주로 깊이에 따른 비저항의 변화인 것으로 나타나고 있다(오석훈과 김형수, 2005). 이는 깊이에 따른 비저항의 변화를 고려한다면 제체의 해석을 2차원으로 수행해도 손상된 코어부를 관찰하는데 크게 지장이 없음을

*Corresponding author: gimul@kangwon.ac.kr

Tel: 82-33-250-6258

Fax: 82-33-252-5550

의미한다. 그러나 제체의 구조가 축방향으로 연속성을 가지지 않는 경우 2차원 해석 결과에 어떠한 오류가 발생할 지에 대해 논의가 되지 않았다.

본 연구에서는 만곡부의 형태를 갖는 제체에 대해 실제 탐사 및 3차원 모델링을 수행하고, 이와 같은 구조를 2차원으로 해석할 때 나타날 수 있는 문제점을 분석하고자 한다.

연구 내용

만곡부를 갖는 제체

일반적으로 전기비저항 탐사를 통하여 제체에 대한 안정성을 해석할 경우, 대부분의 제체는 폭이 좁고 긴 형태의 3차원 구조를 가지고 있으나 탐사 축선이 축방향으로 배열되기 때문에 2차원 가정에 의한 해석이 주로 이루어진다. 본 연구 대상의 경우에는 이와 같은 3차원 특성 외에 축선의 3분의 1지점이 90도 가량 휘어지는 구조를 가지고 있다. Fig. 1은 휘어지는 지점의 현장 조사 사진을 나타내고 있으며, Fig. 2는 현장의 제체를 전체적으로 표현하기 위해 나타낸 모식도이며, 그림의 좌표는 추후 수치 모델링을 위해 첫 번째 전극의 위치를 기준으로 임의로 작성한 것이다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼, 대상 제체는 일부 구간에서 급격하게 축의 방향이 틀어지고 있고, 댐마루의 폭도 약 6m 정도로 좁은 편이다. 또한 연구대상 제체는 과거 만곡부에서 제체 약화에 의한 누수 현상이 나타난 바가 있어서, 댐 마루의 중앙부분에서 탐사가 이루어지기 1년 전에 전 구간에 대해 2열 그라우팅을 수행한 바가 있다. Fig. 2의 제체에 대해 전기비저항 탐사는 5m의 전극간격으로

이루어졌으며, 만곡부가 시작되는 지점(STA 4+0)이 전극번호 10번이고, 만곡부가 끝나는 지점(STA 8+0)이 전극번호 18번에 해당한다.

본 연구에서는 이와 같은 3차원 구조의 제체를 전기비저항 탐사를 통해서 지형적 왜곡요소를 극복하고 올바르게 해석하기 위한 방법을 기존의 2차원 해석 기법과 함께 분석해보고, 전기와 우기에 각각 3개월의 차이를 두고 측정된 실제 탐사 결과를 분석하여 그라우팅 효과가 반영되고 있는 지에 대하여 검토하였다.

전기비저항 3차원 모델링

3차원 전기비저항 모델 반응을 위한 프로그램은 독일 Freiberg 대학의 Spitzer 교수가 제공한 3ddcxh v.6.62를 사용하였으며(Spitzer, 1995), 격자 구조는 $94(x) \times 60(y) \times 27(z)$ 로 분할하여 모델링을 수행하였다. 본 프로그램을 적용하는 데 있어서 스케일은 실제 댐의 형상과 동일하게 유지되었으며, 경계부에서의 왜곡 현상을 방지하기 위해 x, y, z 방향으로 각각 관심 대상의 크기에 대해 10배 이상 벌려 모델링을 하였다. 3ddcxh 프로그램이 주어진 전원에 대한 포텐셜만을 제공하므로 이를 쌍극자 배열에 의한 비저항 값으로 변환하는 프로그램을 추가하였고, 이렇게 획득한 자료를 2차원적으로 해석하기 위해 김정호 외(2000)가 개발한 Dipro™를 이용하였다. 또한 제체를 구성하고 있는 물성으로 기반암(2,000 ohm-m), 코어부(200 ohm-m), 제체 채움재(600 ohm-m)로 구분하여 적용하였으며, 조사 당시의 수위는 기반암 깊이까지 차오르지 않은 관계로 모델링에서는 고려하지 않았다.

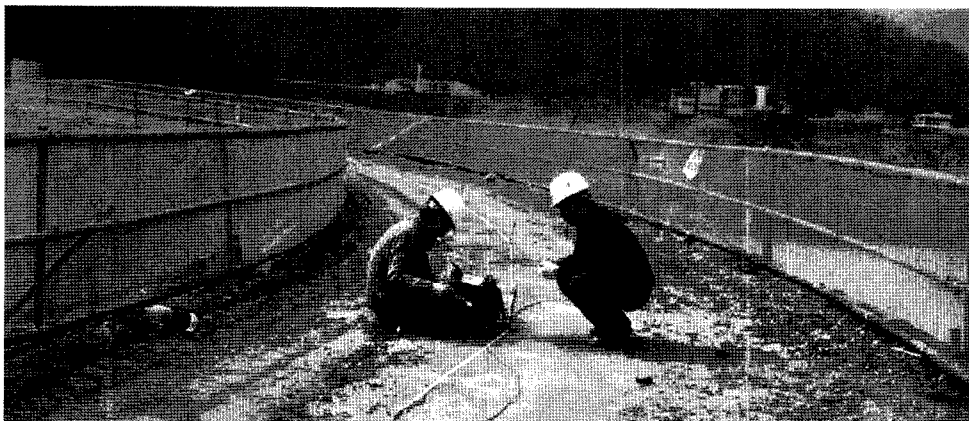


Fig. 1. Meandering structure of the target embankment.

수치 모델링 과정에서, 모든 탐사 축선은 제체의 마루 중앙부에 위치하는 것으로 하였으며, 포텐셜로 획득한 계산값은 2차원 쌍극자 배열로 변환하여 도시하였다. 또한 각 재료의 물성은 수평적으로 연속적이어서 제체가 양호한 상태인 것으로 가정하였다.

연구 결과 및 고찰

모델링 결과

Fig. 2의 모식도는 시공사에서 제공한 자료에 기반하여 작성된 것인데, 실제 코어부의 재질에 대한 상세한 정보가 제공되지 않아서 모델링을 두 가지로 나누어서 수행하였다. 즉, 코어부가 제체 채움재와 전기적 물성의 차이가 크지 않은 경우와 적절한 차수역할을 할 수 있는 점토성분이 양호하게 공급되어 채움재와 물성의 차이가 큰 경우로 구분하였다.

Fig. 3은 코어부의 전기적 물성이 채움재와 크게 차이나지 않아서 코어가 구별되지 않는 경우의 3차원 모델링 결과에 대해 2차원 역산해석을 실시한 결과이다. 앞서 수치모델링 과정에서 언급한 바와 같이, 입력 물성을 Fig. 2의 구조에 대해 수평적으로 어떤 변형도 주지 않았지만, 3차원 구조를 2차원으로 가정하여 해석한 기하학적 왜곡 효과로 인하여 만곡부

부근에서 고비저항대와 저비저항대가 반복적으로 나타나고 있음을 보여주고 있다. 이와 같은 현상은 코어부가 채움재와 전기적으로 물성의 차이가 있다고 가정한 Fig. 4에서도 마찬가지로 나타나고 있다. 만약에 이와 같은 결과를 현장에서 받아 본다면, 3차원 효과를 고려하지 않을 때 해석에 오류를 범할 수 있음을 암시한다.

Fig. 5는 실제 제체에서 수행한 탐사 자료 및 2차원 역산 해석 결과이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이, 실제 자료에서도 만곡부 부근(전극번호 10~18번)에서 고비저항대와 저비저항대가 교호하고 있는 양상을 볼 수 있다. 그 위치와 분포가 수치모델링 자료의 역산 결과와 매우 유사하게 나타나고 있으며, 수치모델링 결과 중에서 코어가 있다고 가정한 Fig. 4의 결과와 잘 부합된다. 이와 같은 결과를 고려할 때, 만곡부 부근(실측 자료 18번 부근(Fig.2 참조))에서 누수에 관한 이상 징후를 논하기는 어려운 것으로 보이며, 3차원 기하효과에 의해 이상대가 나타난 것으로 생각한다.

그라우팅 효과의 분석

전기비저항 탐사 결과를 통하여 그라우팅 효과를 분석하는 것은 매우 어려운 일이고, 모든 상황에 적

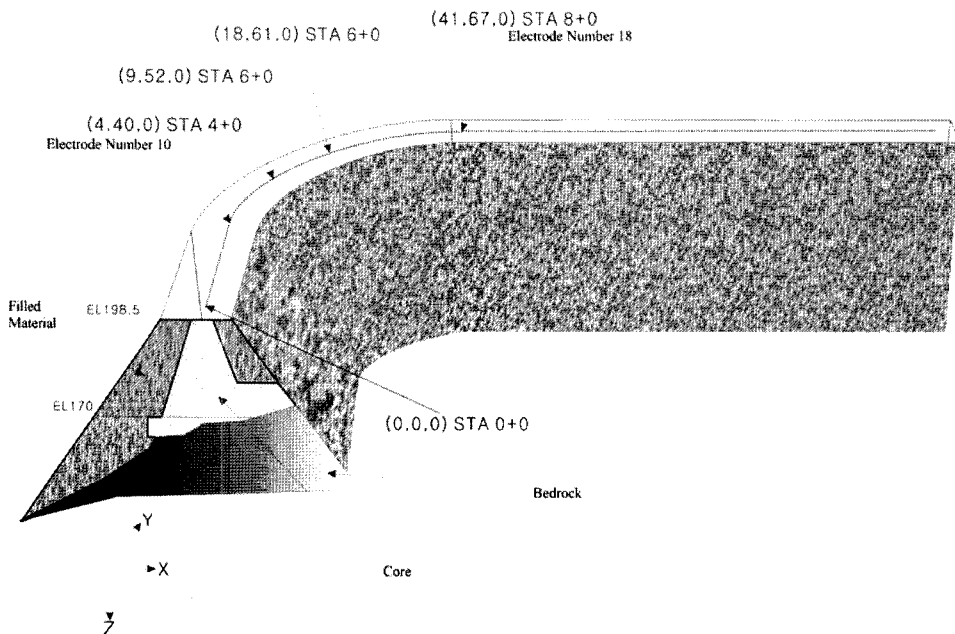


Fig. 2. The schematic of the target dam structure. The axis of the embankment is bent with a right angle at STA 6+0. The coordinate which starts at the first position of the electrode is arbitrarily given for numerical description. The survey line is located at the center of the dam crest.

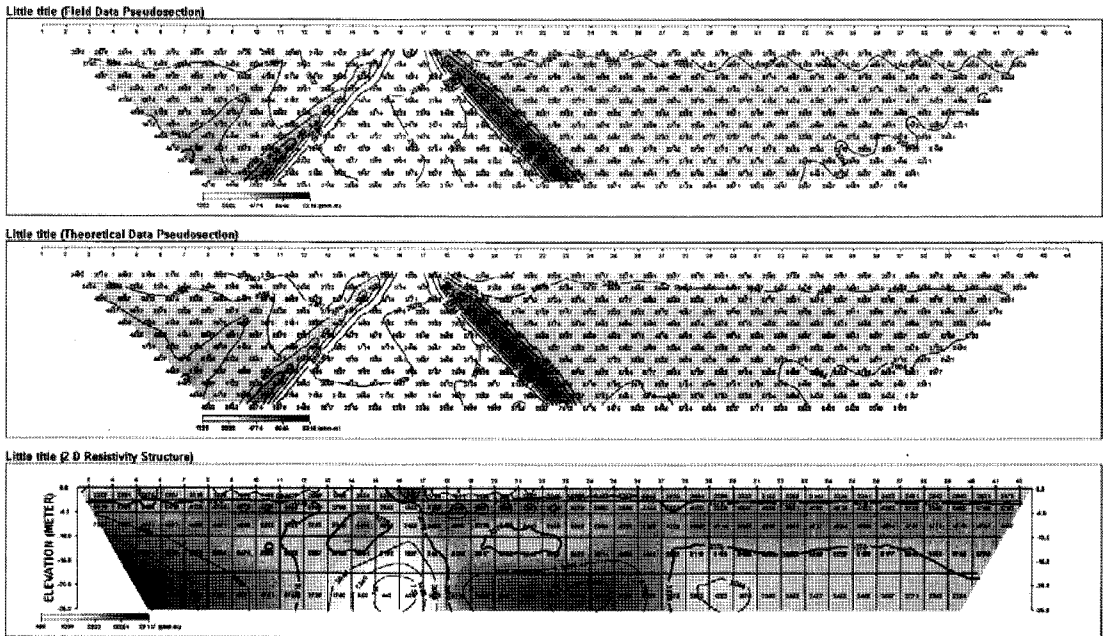


Fig. 3. Numerically calculated resistivity DC survey result based on the model of Fig. 2 without discrimination of the electrical property between the core and fill material.

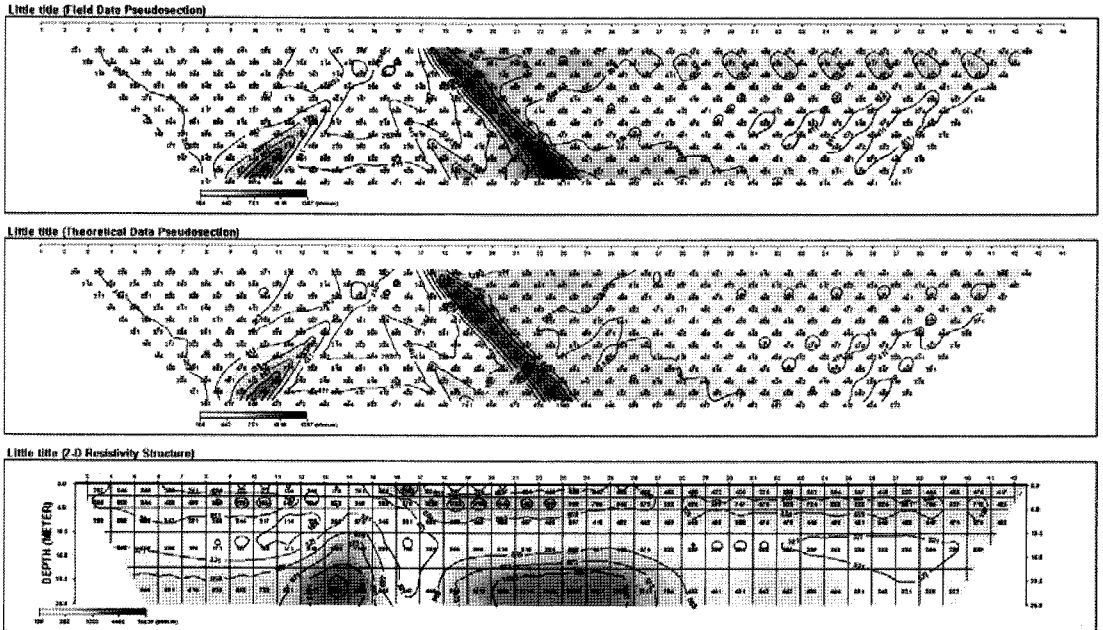


Fig. 4. Numerically calculated resistivity DC survey result based on the model of Fig. 2 considering the electrical property of the core material.

용이 가능한 것은 아니다(Ramirez et al., 1996; 김형수 외, 2002). 그러나 그라우팅 재료에 대한 전기비저항 조건을 고려하여 다른 시기에 관측한 비저항

값을 분석한다면, 간접적이지만 그라우팅 효과에 대한 분석을 할 수 있다.

송성호 외(2002)에 의하면, 물-시멘트 배합비별로

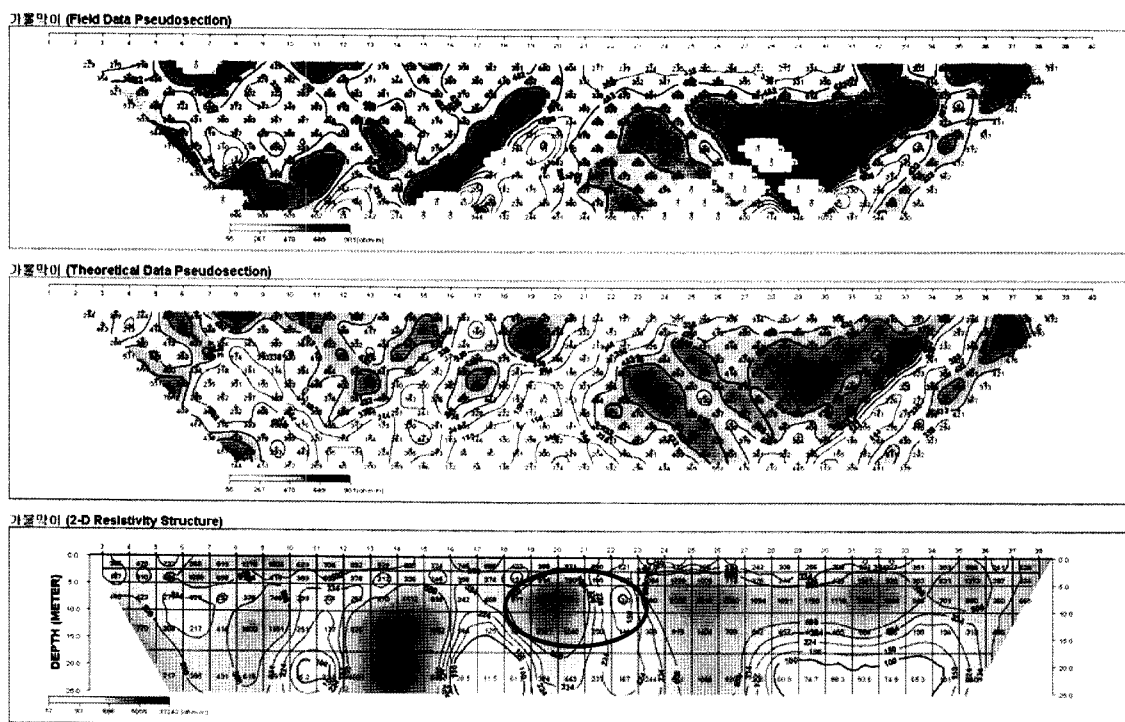


Fig. 5. The result of resistivity DC survey performed on the crest of the target embankment. The suspicious region is marked by circle around the electrode 18~23.

제조된 그라우트에 대하여 재령 변화 등 외부 조건이 동등한 조건하에서, 그라우트의 농도가 높아질수록 전도도는 높아지고 대상 매질에 그라우트가 주입되는 경우 주입 전에 비해 비저항이 낮아지는 효과가 관찰되었으며, 주입이후 시간이 지나면서 점차 비저항값은 상승하여 일정하게 유지한다. 이를 전기비저항값의 변화와 관련하여 메커니즘으로 표현하면, Fig. 6과 같다.

이상의 메커니즘에 의하면 Fig. 5에서 좌측부의 비저항대(전극번호 1~10)는 그라우팅에 의해 개선된 것으로 보이는 구간이다. 오히려 본 메커니즘에 의하면 중앙부(전극번호 19~21)의 고 비저항대가 그라우팅 효과가 잘 나타나지 않을 우려가 많은 구역으로 보인다. 측정 17, 18에서의 저비저항 대는 3차원 지형에 의한 왜곡 효과로 보인다.

전반적으로 그라우팅 효과가 반영된 것으로 보이지만, Fig. 5의 검은 실선으로 표현된 타원부분에 해당하는 측정 18~23(STA. 9+0~STA.10+0) 부분의 고비저항대에 대한 면밀한 검토가 필요했다. 이를 위해 우기에 이 구간에 대한 2차 전기비저항 탐사가 수행되었다.

2차 전기비저항 탐사 결과의 비교

윗 절에서 언급한 측정 20~22 구간의 안정성 검토를 위해 첫 번째 조사가 이루어진지 3개월이 경과한 8월 중순에 2차 전기비저항 조사가 이루어졌다. 2차 조사를 통해 추정하고자 하는 바는 다음과 같다. 즉, - 3개월의 기간 동안 안정성 의심대로 추정되었던 측정 20~22 구간에는 별다른 변화가 발생하였는가?

- 건기였던 5월 조사결과와 우기에 이루어진 2차 조사결과 사이에 주목할 만한 변화가 발생하였는가?

- 위 두 가지의 비교를 통해 측정 20~22 구간의 안정성에 대해 결론지을 수 있는가?

Fig. 7의(b)는 2차 전기비저항 조사를 통해 얻은 결과이다. 여기서 측정 1번은 1차 조사 당시의 측정 18번과 같다. Fig. 7의(a)는 비교를 위해 2차 조사와 같은 구역을 1차 조사 단면에서 추출한 것이다.

대략적으로 두 탐사 자료의 비저항 범위를 비슷하게 유지하려고 노력하였으나, 1차 조사 결과의 범위가 매우 넓어서 고비저항대가 나타난 결과를 2차 조사 결과에서는 반영할 수가 없어, 완전히 일치시킬 수 없었다. 같은 비저항 값에 대해서 상대적으로 2차 조사 결과가 비저항이 높은 것처럼 나타나고 있으나

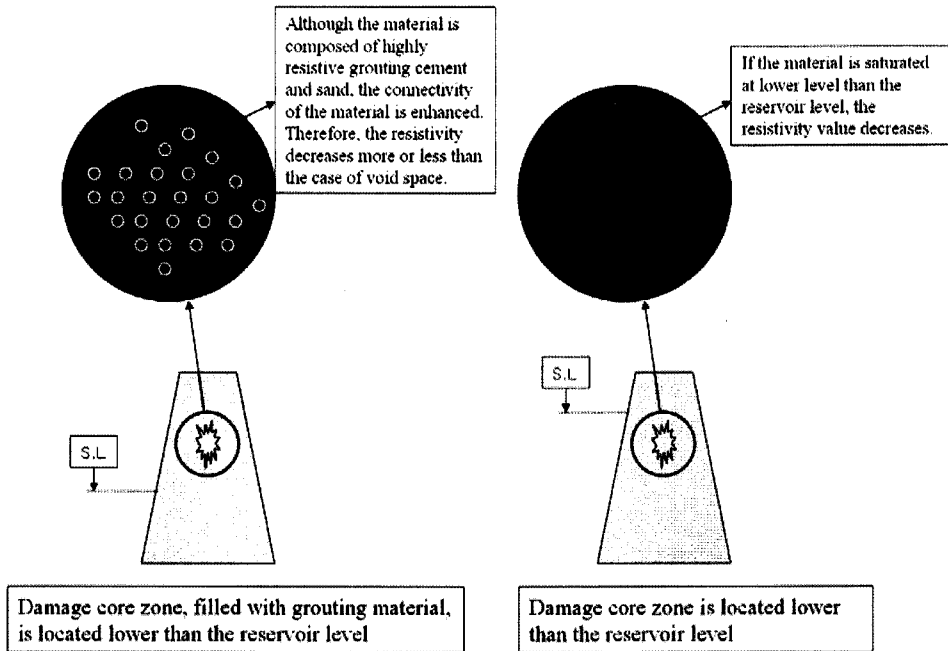


Fig. 6. A mechanism of describing variation of resistivity value after recovery of damage section by grouting.

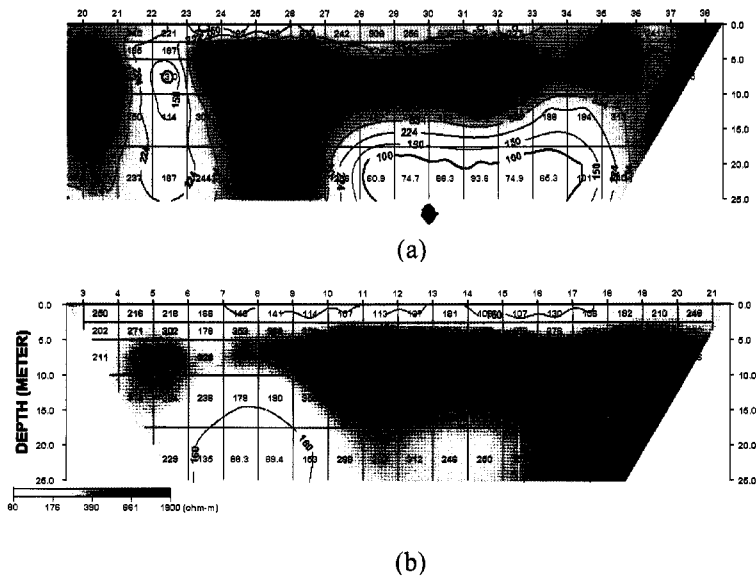


Fig. 7. The comparison of resistivity inversion result for suspected zone of the embankment obtained at (a) mild season of May (1st survey) and (b) rainy season of August (2nd survey). Two sections have the same scale of resistivity value.

실제 값은 그렇지 않다.

그림에서 볼 수 있는 바와 같이 전체적인 패턴으로 보면 두 자료는 매우 비슷한 양상을 보이고 있으나, 전기비저항 값은 2차 조사의 것이 관심 대상 지역에서 더 낮은 값을 보이고 있다. 즉, 양상은 비슷

하지만 값은 2차 조사의 것이 더 낮은 것이다.

이와 같은 양상의 변화는 긍정적인 것으로 볼 수 있다. 즉, 앞에서 살펴 본 그라우팅 실시 후의 비저항 변이 메커니즘을 고려할 때, 전기비저항의 저하가 그라우팅에 의한 보수효과에 의한 것으로 판단할 수 있다.

이와 같은 상황을 고려할 때, 대상 구조물은 재료적으로는 안정한 상태를 보이고 있는 것으로 여겨진다. 또한 일부 굴착을 통해 확인해본 결과, 이와 같은 해석이 잘 뒷받침 되었다. 다만, 사면비가 가파르며, 저수부 변동에 따른 구조적 안정성은 따로 검토되어야 할 것이다.

결 론

근본적으로 제체는 3차원 구조이므로 전기비저항 탐사를 통하여 제체의 안정성을 평가하기 위해서는 3차원 탐사와 해석이 수행되어야 한다. 그러나 실제 여건이 이러한 접근을 매우 어렵게 하기 때문에 2차원 해석을 적용할 때는 대상에 대한 심도있는 고려를 통해 되도록 현실에 근접한 결론을 내릴 수 있도록 노력하여야 할 것이다.

본 연구에서는 기존의 제체가 가지고 있는 3차원적 특성 외에, 제체의 축이 틀어진 경우의 해석을 위해 3차원 모델링을 수행하였다. 그 결과, 2차원 해석 시에는 이상대로 나타나는 구간이 실제로는 기하학적 효과에 의한 것임을 밝혀냈다. 또한 그라우팅이 실시된 구간의 시간별 탐사자료를 비교 분석한 결과, 전기비저항 탐사를 그라우팅 효과 검토에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 논문은 “2008년도 환경복원 및 청정기술 인력 양성 사업단 학술연구조성비”로 연구하였으며 또한 한국학술진흥재단의 신진교수 연구지원 사업인 “지구 통계학적 베이저안 방식에 의한 이중 물리탐사 및

보조 자료의 복합 역산 연구”의 지원을 받아 이루어진 연구임.

참고문헌

- 김정호, 송윤호, 정승환, 2000, 전기·전자탐사 기술을 이용한 지반구조의 영상화. 2000년도 한국물리탐사학회·한국지반공학회 지반조사위원회 공동특별강연논문집, 121-154.
- 김형수, 백건하, 김종열, 김유성, 손호웅, 2002, 지구물리탐사법을 활용한 질리밭달 암반지역에서의 그라우팅 효과 판정. 지구물리, 5, 175-198.
- 송성호, 장의웅, 김진호, 김진성, 김진춘, 2002, 전기비저항 수직탐사를 이용한 저수지 그라우팅 구간 평가. 지질공학회지, 12, 63-73.
- 오석훈, 김형수, 2005, 필댐의 3차원 기하 효과에 따른 전기비저항 왜곡 효과 분석. 한국물리탐사학회·대한지구물리학회 2005 공동학술대회 논문집, 55-58.
- 오석훈, 선창국, 2004, 필댐 안정성 평가를 위한 물리탐사와 SPT 자료의 분석. 지구물리, 7, 171-183.
- 조인기, 강형재, 김기주, 2006, 저수지 3차원 구조에 의한 전기비저항 탐사자료의 왜곡. 물리탐사, 9, 291-298.
- Ramirez, A., Daily, W., Binley, A., LaBrecque, D., and Roelamnt, D., 1996, Detection of leaks in underground storage tanks using electrical resistivity methods. Journal of Environmental Engineering and Geophysics, 1, 189-203.
- 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 Australian Society of Exploration Geophysicists 36, The Society of Exploration Geophysicists of Japan 58, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists 8, 92-96.
- Spitzer, K., 1995, A 3-D finite difference algorithm for DC resistivity modeling using conjugate gradient methods. Geophysical Journal International, 123, 903-914.

2008년 6월 18일 접수

2008년 7월 28일 수정원고 접수

2008년 8월 2일 채택