

전기비저항 물성 분석을 통한 제체의 안정성 검토

오석훈* · 서백수

강원대학교 지구시스템공학과

Safety Assessment of Embankment by Analysis of Electrical Properties

Seok-Hoon Oh* and Baik-Soo Suh

Department of Geosystem Engineering, Kangwon National University

제체의 안전진단을 위해 많이 적용되고 있는 전기비저항 탐사 자료 해석의 효율성을 높이기 위해, 제체의 상태에 따른 전기비저항 물성의 변화 양상을 실내시험 및 실측 자료의 분석을 통해 파악하였다. 이를 위해 제체의 심벽 재료와 유사한 성질을 가지는 kaolinite를 이용하여 압밀조건에 따른 비저항 변화를 살펴보았다. 그 결과, 일축 압축에 의하여 전단강도가 떨어지는 경우에는 함수량에 관계없이 비저항 값이 상승하는 것으로 나타났다. 이러한 사실은 제체 내의 심벽 부분에 공극이 크게 발달하는 경우, 함수량에 상관없이 비저항은 상승할 가능성이 있다는 것이다. 코어부의 누수 현상과 관련한 이러한 관측은, 단순히 비저항이 낮은 곳을 탐지하는 것이 누수대역을 조사하는데 있어 목표가 되어서는 안 된다는 것을 암시한다. 또한 전기비저항 물성이 지반 강성도와 갖는 상관성을 파악하기 위해, 제체에 대한 시추를 통해 표준관입시험을 수행하였다. 마지막으로, 제체 보강을 위해 수행된 그라우팅 효과의 검증을 위해, 그라우팅에 따른 비저항 변이 알고리즘을 제안하고, 실제 관측 자료와의 비교를 통해 알고리즘을 파악하였다.

주요어 : 제체, 비저항, 그라우팅

The variation of the electrical property of embankment material was analyzed from laboratory experiments and the result of field survey, in order to enhance the interpretation of electrical resistivity survey frequently used for safety assessment of embankment. At first, the kaolinite, showing similar physical property with core material of embankment, was used to examine the variation of the resistivity value according to degree of consolidation. The test showed that a drop of shear strength induces increase of resistivity value regardless of degree of water content. This result means that porous zones of weak core material in embankment may be appeared as highly resistive part in the electrical resistivity survey. This observation implies that it may fail to detect weak core material by electrical method, if we only try to find zones showing low resistivity value. And, we performed Standard Penetration Test (SPT) to analyze the correlation between electrical property and ground stiffness. Finally, a mechanism to describe the variation of electrical resistivity due to grouting effect was proposed and real field data were analyzed.

Key words : embankment, resistivity, grouting

서 론

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. 현재 우리나라에 존재하는 제체는 작은 규모의 소류지까지 포함하여 약 20,000여

개가 분포하고 있는 것으로 알려져 있으며, 소방방재청에서는 관련 법률의 제정을 통해 장기적으로 국내의 제체에 대한 정기적 안전진단을 수행할 것으로 알려져 있다. 이와 같은 상황에서 물리탐사 기법은 제체의 안정성을 검토하기 위한 가장 기초적인 조사 방법으로써 인식되었으며, 특히 전기비저항 탐사 기법을 적용하기 위한 시도가 국내외에서 다양하게 수행되어 왔다 (오석훈과

*Corresponding author: gimul@kangwon.ac.kr

선창국, 2004; 조인기 외 2006; Song 등, 2006; Bergstrom, 1998; Panthulu 등, 2001). 제체 안정성 조사를 위한 전기비저항 탐사의 해석은 주로 과도한 저비저항대의 탐지에 초점을 맞추어서 수행되어 왔으나, 오석훈과 선창국 (2004)에 따르면 저비저항대가 지반 강성도와 직접적으로 연관되지 않는 사례도 있음이 보고되었고, 경우에 따라 고비저항대가 clay의 유출로 인한 강성도 저하와 연관될 수 있음을 시사하였다.

본 연구에서는 조사 대상 제체의 형태를 중심 코어형으로 가정하고, 이에 대한 다양한 상태에 따른 비저항 반응을 분석하고자 하였다. 이를 위해 현장 지반정수와 비저항 값의 연관성을 분석하여 제체의 위험구역을 판단하기 위한 비저항 값의 해석에 대한 의견을 제공하고, 실제 코어를 구성하고 있는 물질과 유사한 재료를 통해 압밀정도, 습윤밀도, 건조밀도, 압축 강도 등에 따른 비저항의 분포를 실험적으로 분석하였다. 또한 그라우팅을 통한 제체 보강 이후의 비저항 반응 특성을 분석하기 위해 보강에 따른 비저항의 변화 메커니즘을 가정하고 실제 사례에 대해 그에 따른 분석을 적용하였다.

Kaolinite를 이용한 실내시험

코어재료의 공극 분포와 함수비에 따른 비저항의 변화를 분석하기 위해 코어부의 clay 재료를 지반공학적으로 가장 유사하게 모사한 Kaolinite를 이용하여 압밀에 따른 밀도 변화와 함수량에 따른 비저항 분포 및 일축 압축에 의한 전단응력 상실시의 비저항 변화를 측정하였다.

압밀시험과정

일반적으로 수행하는 압밀시험은 하나의 공시체에 대하여 하중단계를 증가 혹은 감소시켜가면서 수행하지만,

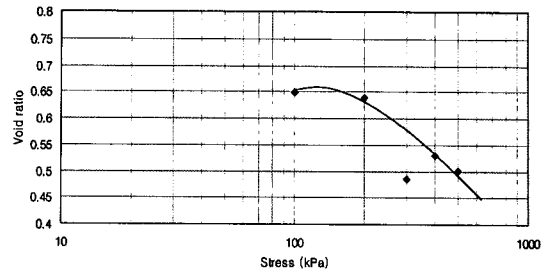


Fig. 1. The consolidation curve for the kaolinite material used for this study.

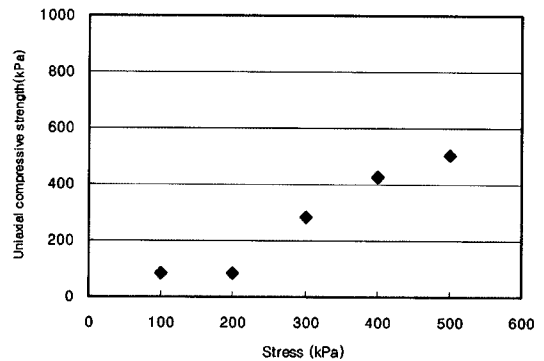


Fig. 2. The uniaxial compression strength curve for the used material.

본 시험에서는 단위건조중량 즉 간극비에 대한 비저항의 변화를 보기 위하여 각 압밀단계마다 각각 다른 공시체를 압밀하였기 때문에 다소의 오차가 존재할 것으로 판단된다 특히 300 kPa에서 다소 편차가 발생). 그 결과는 Fig. 1의 압밀곡선 그림과 Fig. 2의 일축압축 강도 그래프에서 나타나고 있다. 이 그림에서 알 수 있는 것처럼 선행압밀하중은 약 200 kPa에서 나타나고 있으며 이는 200 kPa이전의 하중인 100 kPa에서는 과압밀상태에 있으며, 그 이상의 압밀응력단계에서는 정규압밀상

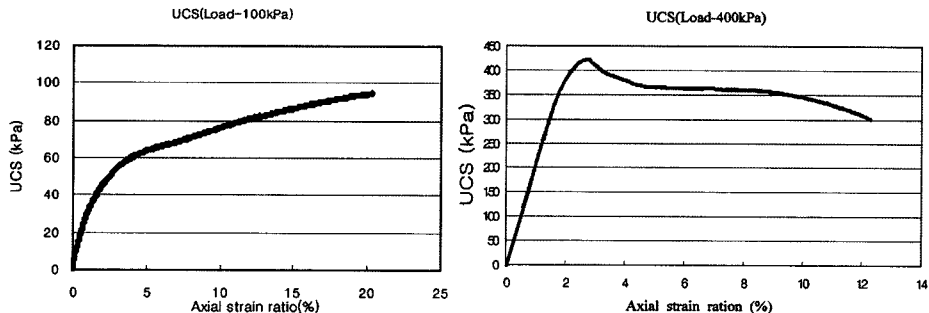


Fig. 3. Stress-strain curve for 100 kPa and 400 kPa. UCS means the uniaxial compressive strength.

태임을 의미한다. 또한, 압축지수(Cc)는 0.35로서 비교적 작은 값을 보이고 있다. 300 kPa에서의 압밀후 간극비를 무시하고 압밀곡선을 나타냈다. 또한 Fig. 3은 100 kPa와 400 kPa에서의 응력-변형을 곡선을 나타낸다. 각 압밀응력 단계에서의 응력-변형을 곡선의 분석결과 100 kPa와 200 kPa에서는 최대응력이 나타나지 않고, 나머지 응력에서는 잘 나타났다.

비저항 측정과정

Fig. 4는 밀도와 함수량에 따른 비저항의 변화를 압밀 조건 및 일축 압축 상태에 따라 표시한 것이다. 실제 코어부의 재료는 100~200 Ohm-m 내외의 매우 낮은 비저항 분포를 보이는 반면 실험에서 사용한 Kaolinite는 지반공학적으로 거동은 clay와 같지만 비저항 값은 실제 코어 재료보다는 다소 높은 300 Ohm-m 정도를 보이고 있다. 이와 같은 효과는 물의 비저항을 200 Ohm-m 보다 작다고 생각할 때 실제 현장에서의 비저항 변화와

다르게 나타날 수 있는 요소이다. 즉, Fig. 4에서는 압밀 과정을 통해 수분이 추출됨에 따라 밀도가 높아지는 현상이 Kaolinite의 순수 함량이 높아지는 효과로 나타나면서 물보다 비저항이 높은 Kaolinite의 특성으로 인해 점차 비저항이 높아지는 경향을 보이고 있다. 그러나 실제 물보다 낮은 비저항을 갖는 코어 재료를 그대로 이용한다면 상황은 반대로 나타날 것이다. 즉, 수분이 추출됨에 따라 저비저항의 코어재료 비율이 높아지면서 비저항은 다소 낮아질 것으로 예상되는 것이다. Fig. 4의 각각의 그림에서 상관계수는 다음과 같이 주어진다.

$$\rho_{x,y} = \frac{COV(x,y)}{\sigma_x \sigma_y} \tag{1}$$

Fig. 4에서 주목해야할 다른 결과는, 일축압축시험에 의한 함수비 영향 부분이다. 일축 압축에 의하여 전단강도가 떨어지는 경우에는 함수량이 가장 높은 경우에도 압밀조건일 때 함수량이 가장 낮은 경우보다도 비저항 값이

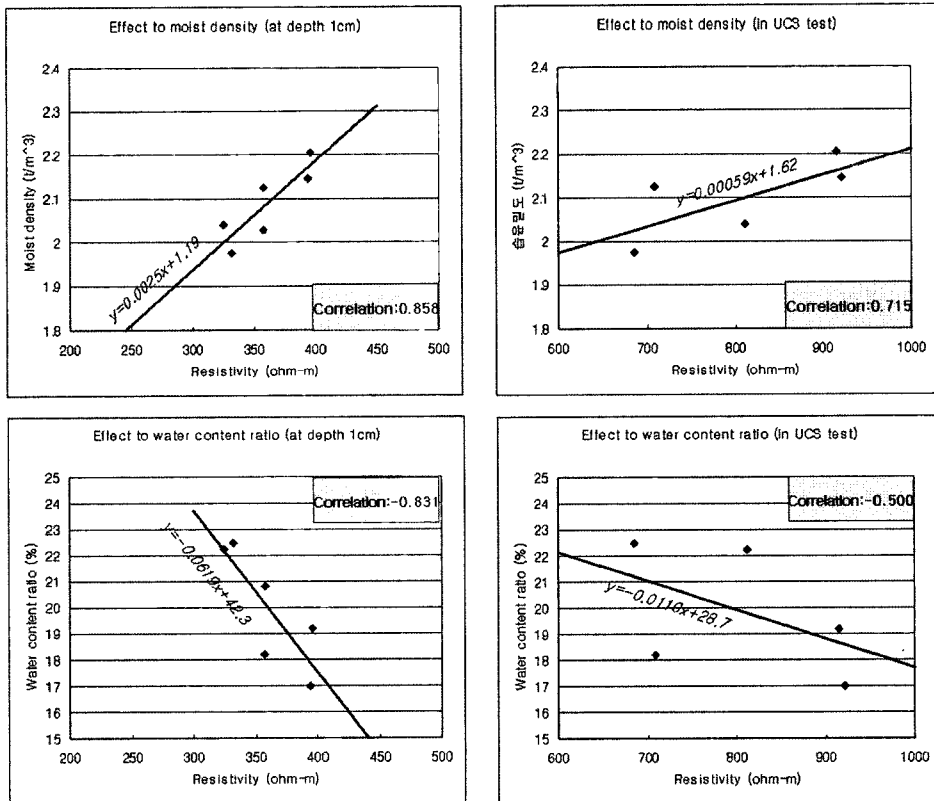


Fig. 4. Variation of resistivity value according to the condition of density and water contents. UCS means the uniaxial compressive strength.

두 배 이상 크게 나타나는 것이다. 압밀 실험 조건의 단기성으로 인해 다양한 함수량 사례에 대한 정밀한 조사가 더 필요하지만, 이러한 사실은 제체 내의 코어 부분에 공극이 크게 발달하는 경우에도, 공극을 물로 채우는 것과 상관없이 비저항은 상승할 가능성이 있다는 것이다. 코어부의 누수 현상과 관련하여 이러한 관측은, 단순히 비저항이 낮은 곳만을 탐지하는 것이 누수대역을 조사하는데 있어 목표가 되어서는 안 된다는 것을 암시한다.

표준관입시험 결과와 비저항 분포

표준관입시험은 시추현장에서 지반의 강도를 추정하는데 이용되는 조사기법으로, 시험장비가 간단하고 방법이 간편하여 보편적으로 활용되고 있으며, 시험의 결과는 정량적인 N값으로 표현된다. 만약 비저항 분포가 댐체 재료의 물성을 양의 상관관계로 반영할 수 있다면 표준관입시험 결과인 N값과도 비례 관계를 가져야 할 것이다. 그러나 중심코어 재료의 문제로 인하여, 공극이 발달하거나 파이프(piping) 등으로 인해 지수 역할을 하는 점토 입자들이 줄어드는 경우 비저항이 높아지는 경우도 생긴다. 특히 저수부의 수위가 도달하지 않는 높이에서 발생하는 고비저항 대는 이러한 효과가 가장 크게 나타날 수 있고 상세한 조사가 필요할 것이다. 이와 같은 추론은 적절한 재료로 구성된 지수대에서는 투수계수가 매우 낮아서 상당한 기간 동안 함수 상태를 유지하게 되지만, 재료가 불균질하거나 이상이 발생한 중심코어의 경우 공극이 발달하고 투수계수가 상승할 가능성이 있어 함수 상태를 유지하지 못하는 경우가 생길

수 있다는데 기인한다. 그러나 수위가 충분히 높아 공극이 물로 채워진 경우에도 중심코어의 재료가 불균질하여 세립 입자들이 빠져나갈 수 있는 조건이 되면 비저항은 상승할 수 있다(Bergstrom, 1998; Sjudahl et al, 2002). 표준관입시험 결과와 비저항 분포의 비교를 위해 시추를 수행한 대상댐은 필댐(fill dam)의 일종인 중앙차수벽 토석댐으로, 지하체에서 관리하고 있는 소규모의 용수댐이며 하류사면에서 일부 슬라이딩이 발생하여 이에 대한 보수보강 계획의 일환으로 안정성 조사를 수행한 댐이다. 본 연구에서는 대상댐을 대상으로 총 5공의 무수(無水) 시추 조사를 실시하였으며, 지표면 아래 1.5 m 간격으로 SPT를 병행하여 교란 시료를 채취함과 더불어 SPT 보간 심도에서는 단관 코어 배럴 (Single Core Barrel)을 이용한 교란 시료를 연속적으로 채취하여 구성 재료의 상태 및 특성을 평가하였다. 댐 제체의 대표 단면은 Fig. 5와 같으며, 시추 조사는 댐 정상부에서 3공 그리고 댐 하류부 소단에서 2공을 수행하였다. 댐 제체에서의 시추 조사 평면 위치는 Fig. 6과 같다. 시추 조사 결과, 코어는 실트질 점토, 필터는 실트질 모래, 토석재는 표면 부근의 자갈이나 전석과 하부의 실트질 모래, 그리고 댐 정상부 아래부터 코어재 사이를 구성하는 보조 기층은 자갈섞인 실트질 모래로 구성되어 있다. 코어 재료의 상태는 대체로 습윤 상태이었으며, 침윤선은 시추시 지하수위계를 이용하여 제한적으로 확인하였지만 시추 종료시까지 나타나지 않거나 일부 위치에서는 시추 종료부에서 나타났는데, 이를 토대로 볼 때 대상 댐의 차수 능력은 양호한 것으로 판단되었다. 그러

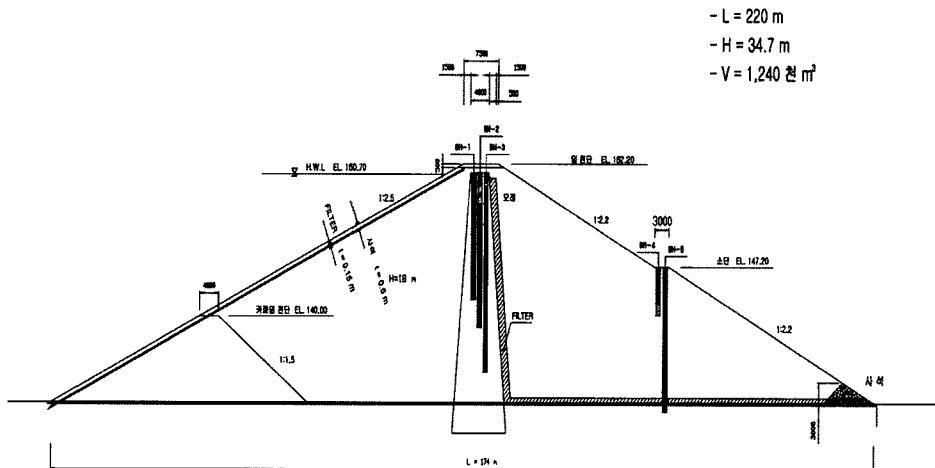


Fig. 5. The cross section of target dam.

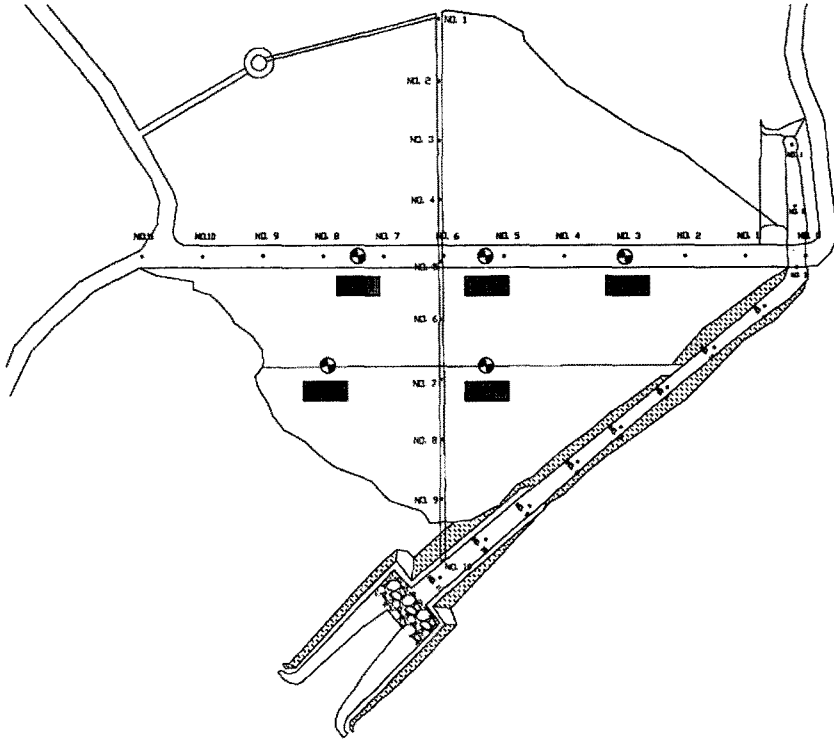


Fig. 6. The plane view of target dam and locations of borehole sites.

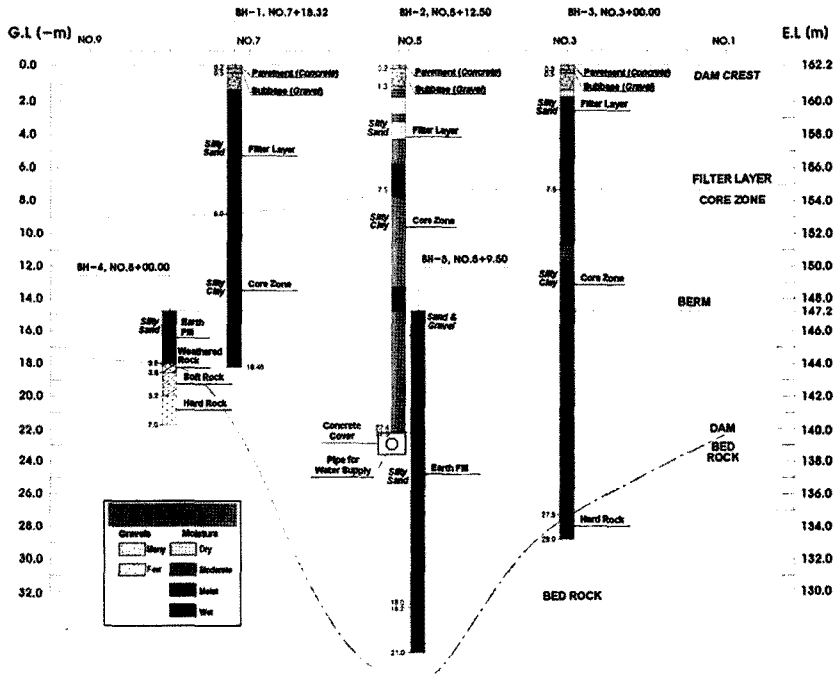


Fig. 7. The front view of basement of target dam and stratification of each borehole.

나 부분적으로 코어재의 상부에서 연약한 지층이 존재 하였으며, 그 하부로는 점진적으로 견고해 지는 지층 분포를 보였다. 전체 시추 조사 결과를 종합하여 각 조사 위치별 깊이에 따른 구성 재료 분포 및 지층 분포 상태를 확인하고 실제 기반암의 기준선을 예측한 결과, 대상 댐의 설계시 구성 형상 및 기반암 분포와 일치함을 확인하였다. 댐 정상부를 지표면 기준으로 가정하고 종합적인 지층 상태를 Fig. 7에 도시하였다. 대상 댐의 경우

코어는 정상부 중앙에서는 1.0~1.5 m 아래부터 축조되어 있지만, 본 연구에서는 여전상 정상부의 하류측 경계부에 인접하여 조사를 수행한 관계로 7.5~9.0 m 심도부터 코어 재료가 분포하는 것으로 조사되었다.

Fig. 8은 연구 대상 댐에 대한 각 시추공별 전기비저항 분포와 SPT의 N값을 함께 도시한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 우측의 보정된 N 값이 좌측의 보정되지 않은 값에 비해 비저항 분포와 더욱 일치하는 양상을

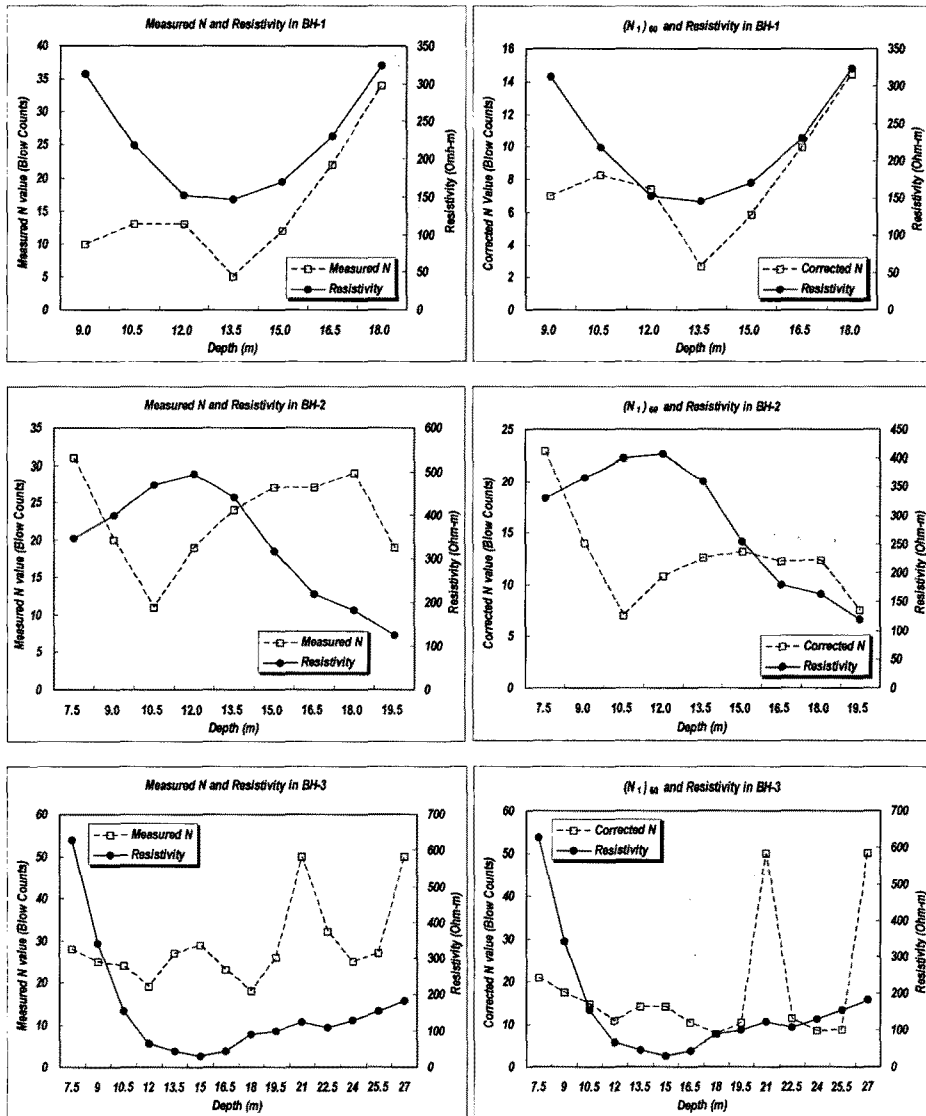


Fig. 8. SPT N Value versus Resistivity (Ohm-m) for each borehole. Left column displays the raw measured N value, while right column shows the corrected N value (N₁)₆₀. The depth for comparison starts from that corresponding to the core part in each borehole.

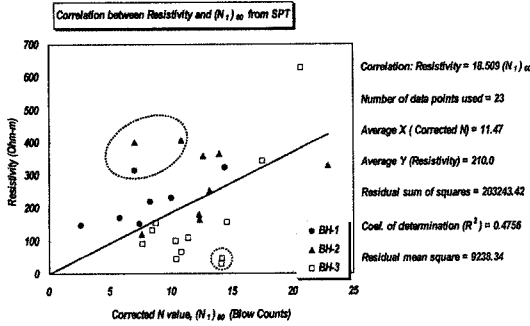


Fig. 9. Overall comparison between resistivity and corrected N values, (N1)60, from SPT. Marked points show zones where the correlation deviates from the general pattern. When we remove some deviated points that are believed to be connected to weak zone, the correlation ratio is improved.

보이고 있다. 특히 BH-1은 9 m 부근을 제외하고는 매우 좋은 상관관계를 보이고 있으며, BH-3도 21 m 부근의 과도한 N값을 제외하고는 잘 일치하고 있다. BH-3의 21 m 부근에서 나타나는 과도한 N값은 국부적 이상 대나 특이 재질에 의한 것으로 보이고 심도 27 m는 기반암에 해당한다. 전반적으로 비저항이 낮은 곳에서는 N값도 낮은 값을 보여주고 있어 좋은 상관관계를 가짐을 파악할 수 있다. 그러나 Fig. 9에서 보는 바와 같이, 일부 대역에서 N값과 비저항이 일치하지 않는 양상을 보이고 있는데, 이러한 대역에서는 이미 언급한 일반적인 경향과는 달리 비저항이 높은 곳에서 N값이 높게 나타나고 있지 않다. 즉, BH-1의 9 m 부근, BH-2의

9 m~13.5 m 부근, BH-3의 7.5 m~9 m 대역은 높은 비저항에 비해 N값은 평이한 수준이다. 특히 BH-2의 9 m~13.5 m 부근은 서로 음의 상관관을 보이고 있다. 이는 비저항이 높더라도 댐체 코어를 구성하는 재료의 안정성이 양호하지 않을 수 있다고 평가할 수 있는 증거이다. 전반적으로 전기비저항 분포는 시추자료의 습윤도와 매우 관련이 깊은 것으로 보이며, 이는 매우 타당하다. 그러나 댐 구조물의 기능적 특성상 습윤도가 댐체 코어의 안정성과 직접적으로 연관이 있다고 가정하기는 매우 어려우며, 급변 연구의 SPT 결과가 이를 반영한다.

그라우팅 처리에 대한 비저항 반응

물리탐사 방법, 특히 전기비저항 물성을 측정하여 제체의 보강 효과를 확인하기 위한 연구는 다양한 사례를 통하여 수행되었다 (Ramirez et al., 1996; Daily and Ramirez, 2000; 김형수 등, 2002). 그러나 그 결과 또한 다양하게 나타났는데, 외국에서의 연구 사례는 보강 효과의 확인은 물론, 그 범위에 대한 해석까지 성공적으로 수행한 것으로 보고되었다. 그러나 국내의 경우 보강 이전과 이후에 뚜렷한 변이 관측에 실패한 것으로 보고되었다. 이 둘 사이의 차이점은 결국 제체를 구성하는 재료의 물성과 비저항 변화 메커니즘에 대한 정확한 이해의 차이로 보인다. 즉, 보강 이전에 제체 파손 구역의 비저항 물성 특성에 대한 이해가 정확히 이루어져야 보강 효과에 대해 논할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 모델링 과정과 파손 구역의 비저항 변화 메커니즘을 분

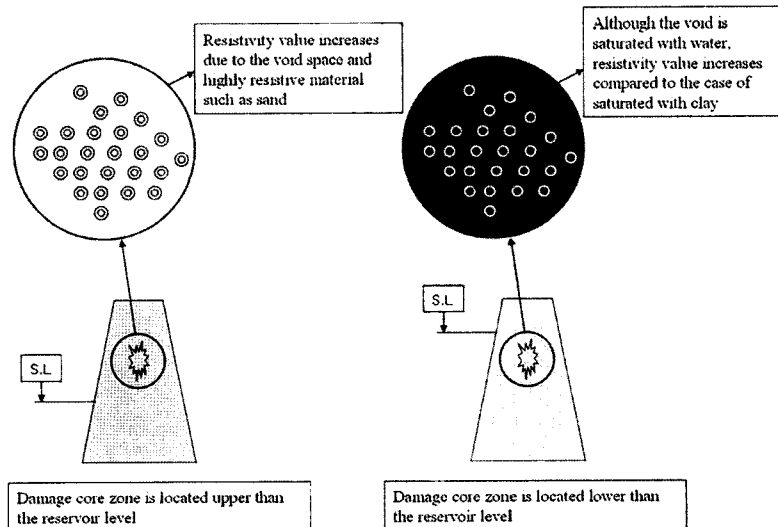


Fig. 10. A mechanism of describing variation of resistivity value due to damage of core material.

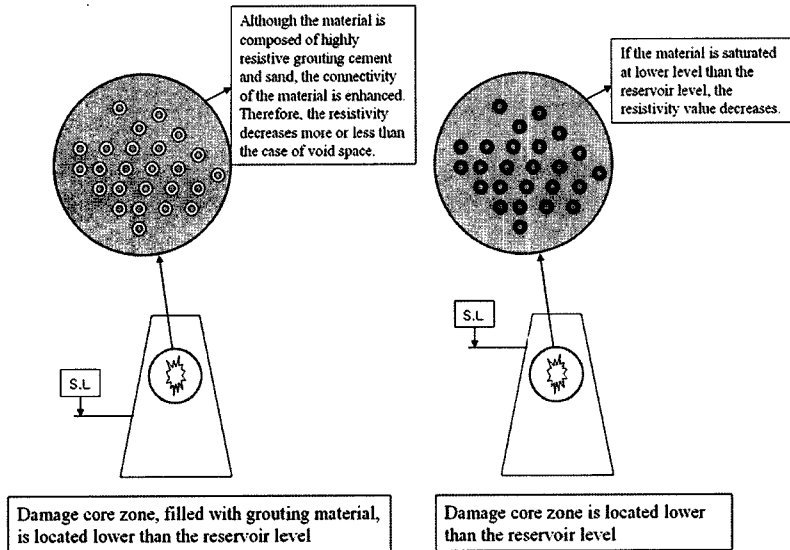


Fig. 11. A mechanism of describing variation of resistivity value after recovery of damage section by grouting.

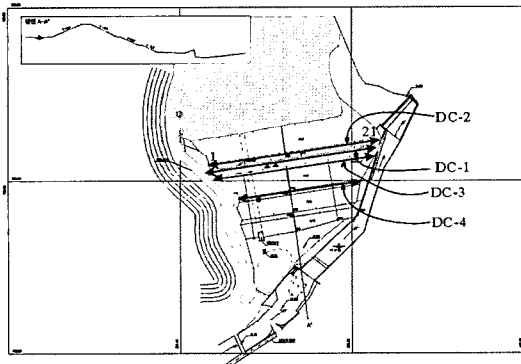


Fig. 12. Electrical DC resistivity survey profile.



Fig. 13. The leakage of core material.

석하여 (Fig. 10과 11) 보강 이전과 이후의 비저항 반응을 분석하고자 하였다. Fig. 12는 그라우팅 효과의 실측을 위해 실제 그라우팅이 수행된 제체에 대한 전기비저항 탐사를 수행한 축선의 평면도를 보인다. 대상이 된 댐은 Fig. 13에서 보는 바와 같이, 하부를 지나가는 통관부근의 심벽부에서 심벽 재료가 유출되고 있는 손상을 입은 댐이었다. 이에 대해 Fig. 14와 같은 그라우팅 처리가 이루어졌다. 본 연구에서는 그라우팅 전후로 전기비저항 탐사를 수행하여, Fig. 10과 11에서 제안한 비저항 변화 알고리즘을 적용하여 그 결과를 분석하여 보았다. 먼저 Fig. 15는 그라우팅 전후로 수행된 제체 정상부에서의 전기비저항 탐사 및 역산 해석 결과이다. 전반적으로 보강 전후에 비저항의 큰 변화는 보이지 않지

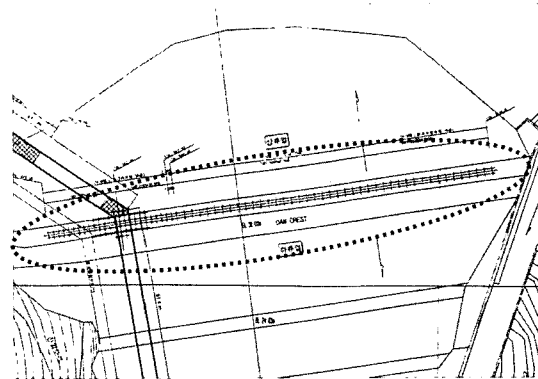


Fig. 14. Location of grouting reinforcement delineated by dashed line.

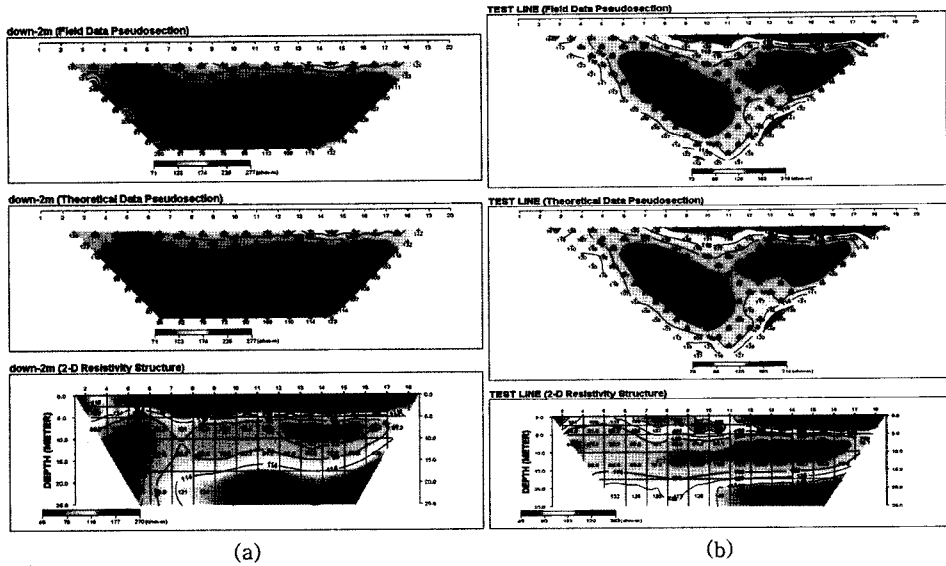


Fig. 15. Comparison of resistivity value (a) before and (b) after the reinforcement on the downslope of the embankment.

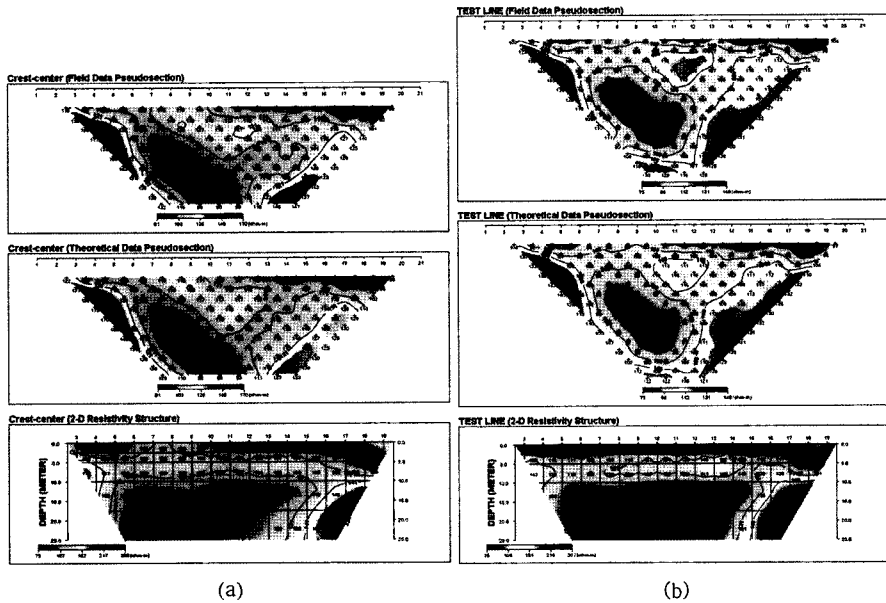


Fig. 16. Comparison of resistivity value (a) before and (b) after the reinforcement on the crest of the embankment. The reinforcement lowered the resistivity value.

만, 보강 후에 비저항 값이 다소 낮아진 것을 관찰 할 수 있다. 이는 그라우팅에 따른 비저항 변화 알고리즘에서 추측한 결과와 일치하는 것이다. Fig. 16은 제체 정상부의 하류사면 부에서 측정된 그라우팅 전후의 전기비저항 해석 결과이다. 보강 전에 하류 사면에서는 측정 7-8번

부근의 하부 통관이 지나는 구역에서 비저항 값의 불연속 특성이 나타나고 있다. 그러나 보강이 이루어진 후에는 이와 같은 불연속적 패턴이 사라졌다. 역시 그라우팅에 의한 보강 효과로 비저항값의 연속성이 향상된 결과로 보인다. 또한 Fig. 17은 상류 사면부에서의 비저항 해석

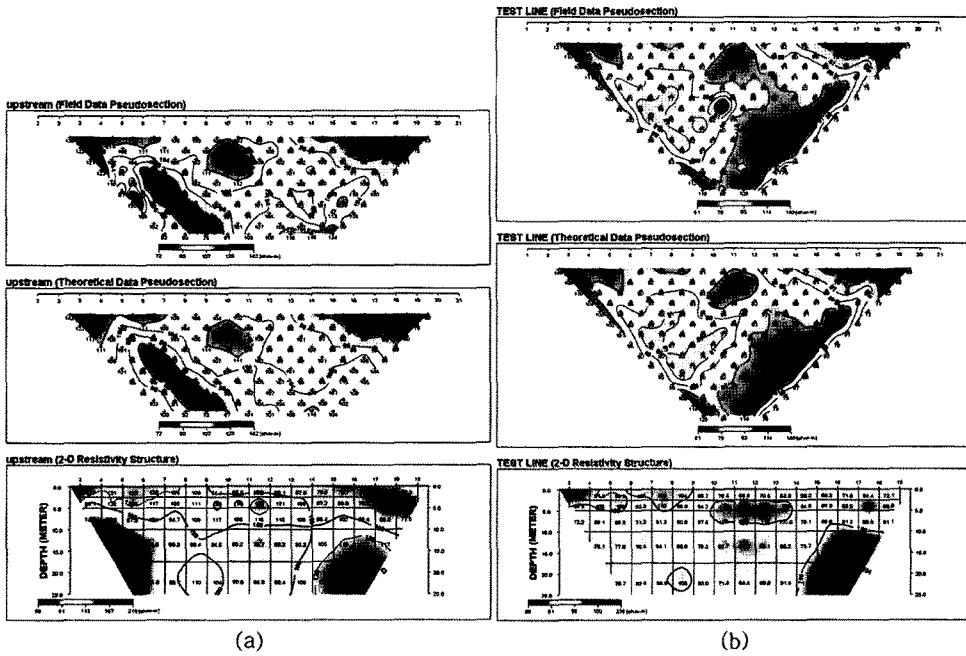


Fig. 17. Comparison of resistivity value before and after the reinforcement on the upslope of the embankment (a) before, and (b) after the grouting reinforcement.

결과를 보여주는데, 보강 전에는 원지반과의 경계부에서 불연속적 비저항 변화에 따른 저비저항 이상대가 나타나고 있다. 그러나 보강 후에는 이와 같은 현상이 사라지고 연속적인 비저항 패턴이 잘 나타나고 있다. 이와 같은 결과를 볼 때, 그라우팅에 의한 비저항 변화 알고리즘이 매우 적합하며, 이와 같은 판단에 근거하여 그라우팅 효과를 비교적 정확하게 해석할 수 있을 것으로 보인다.

결 론

필댐의 안정성을 평가하기 위해서는 지수(止水) 역할을 하는 중심코어 재료의 균질성과 이에 대한 침투수 영향을 파악하고 이해하는 것이 매우 중요하다. 중심코어의 상태를 탐지하기 위한 다양한 지구물리탐사기술 중에서도 전기비저항 탐사는 물과 제체의 비교적 뚜렷한 비저항 차이로 인해 많은 필댐에서 수행되어 왔으며, 그 결과를 토대로 보수보강 공사에 대한 설계가 이루어져 왔다 (박삼규 외, 2002; 김정호 외, 2000). 댐의 안정성을 추정하는데 비저항 탐사자료를 이용하는 것은 댐체를 구성하고 있는 재료의 물성이 비저항과 양의 상관관계를 가진다고 가정하기 때문이며, 이러한 양상을 결정하는데 함수량이 중요한 역할을 하기 때문이다. 즉, 비저항이 비

정상적으로 낮은 곳에서는 재료의 물성이 연약하거나 습윤정도가 큰 것으로 추정할 수 있으므로 이러한 부분을 파악하는 것이 매우 중요하다. 그러나 댐체 코어의 특성상, 적절하게 함수를 유지하는 재료는 낮은 비저항을 갖기 때문에 비저항이 높다고 안전하다고 할 수만은 없으며, 본 연구에서는 이에 대해 다양한 자료를 통해 그 증거를 제시하고자 하였다. 앞으로 보다 정확한 해석을 위한 다양한 비저항 변화 메커니즘이 고려되어야 할 것이다.

사 사

본 논문은 한국학술진흥재단의 신진교수 연구지원 사업인 “지구통계학적 페이지안 방식에 의한 이중 물리탐사 및 보조 자료의 복합 역산 연구”의 지원을 받아 이루어진 연구이며, 논문의 심사를 맡아주신 익명의 심사위원께 감사를 전합니다.

참 고 문 헌

김정호, 송윤호, 정승환, 2000, 전기전자탐사 기술을 이용한 지반구조의 영상화, 2000년도 한국물리탐사학회 한국지반공학회 지반조사위원회 공동특별강연논문집, pp.121-154.

- 김형수, 백건하, 김중열, 김유성, 손호웅, 2002, 지구물리 탐사법을 활용한 절리발달 암반지역에서의 그라우팅 효과 판정, 지구물리, Vol.5, No.3, pp.175-198.
- 박삼규, 송성호, 최종학, 최보규, 이병호, 2002, 수리시설 물의 누수탐지를 위한 물리탐사의 적용성, 한국물리탐사학회, 제4회 특별 심포지엄, pp.179-195.
- 오석훈, 선창국, 2004, 땀댐 안정성 평가를 위한 물리탐사와 SPT 자료의 분석, 지구물리, Vol.7, No.3, pp.171-183.
- 조인기, 강형재, 김기주, 2006, 저수지 3차원 구조에 의한 전기비저항 탐사자료의 왜곡, 물리탐사, Vol.9, pp.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.
- Daily, W. and Ramirez, A., 2000, Electrical imaging of engineered hydraulic barriers, Geophysics, Vol.65, No.1.
- 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, Vol.59, pp.281-295.
- Ramirez, A., Daily, W., Binley, A., LaBrecque, D., and Roelamnt, D., 1996, Detection of leaks in underground storage tanks using electrical resistivity methods, J. Envi. Eng. Geophys., Vol.1, pp.189-203.
- Sjodahl P., Dahlin T., Zhou B., and Johansson S., 2002, Monitoring of leakage in embankment dams through resistivity measurements-2.5D modeling study 8thmeeting of environmental and engineering geophysics, Portugal.
- 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.

2008년 5월 12일 원고접수, 2008년 9월 2일 게재승인

오석훈

강원대학교 지구시스템공학과
200-701 강원도 춘천시 효자2동 192-1
Tel: 033-250-6258
Fax: 033-252-5550
E-mail: gimul@kangwon.ac.kr

서백수

강원대학교 지구시스템공학과
200-701 강원도 춘천시 효자2동 192-1
Tel: 033-250-6254
Fax: 033-252-5550
E-mail: bssuh@kangwon.ac.kr