

논문

## 전기비저항 및 유도분극 탐사에 의한 저수지 누수지수 산출

조인기<sup>1\*</sup> · 김연정<sup>2</sup> · 송성호<sup>3</sup>

<sup>1</sup>강원대학교 지질지구물리학과

<sup>2</sup>강원대학교 대학원 지구물리학과

<sup>3</sup>한국농어촌공사 농어촌기술연구원

### Quantitative Evaluation of Leak Index from Electrical Resistivity and Induced Polarization Surveys in Embankment Dams

In Ky Cho<sup>1\*</sup>, Yeon Jung Kim<sup>2</sup>, and Sung Ho Song<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Division of Geology and Geophysics, Kangwon National University

<sup>2</sup>Department of Geophysics, Kangwon National University

<sup>3</sup>Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

#### 요약

국내에는 17,000여개의 저수지가 존재하며, 이중 85% 이상은 50년 이상 경과된 노후 저수지이다. 이들 저수지는 내부침식 및 세굴 현상에 의한 누수와, 그에 따른 붕괴의 위험에 직면하고 있다. 이들 저수지 및 댐의 붕괴를 방지하기 위해서는 누수를 조기에 파악하고 대비하는 것이 중요하다. 전기비저항 탐사는 저수지의 전반적인 상태 파악은 물론 누수의 발달여부 탐지가 가능한 비파괴, 실시간, 현장조사법이다. 이러한 장점 때문에 전기비저항 탐사법은 저수지 안전진단에 널리 사용되고 있다. 그러나 전기비저항 탐사법은 저수지의 안전도에 대한 정량적인 지수를 제공하지 못해 공식적으로 저수지 정밀 안전진단의 상태평가 항목에 포함되어 있지 못하다. 이 연구에서는 전기비저항 탐사와 유도분극 탐사를 통하여 계산된 수분함량에 근거한 정량적 누수지수 산출법을 제시하였다. 특히 일회성 탐사와 모니터링에 의한 정량적 누수지수 산출법을 개발하여 전기비저항 탐사와 유도분극 탐사가 향후 저수지 정밀 안전진단의 상태평가 항목으로 진입할 수 있는 이론적 기반을 제시하였다.

#### 주요어

저수지, 정밀안전진단, 누수지수, 전기비저항 탐사, 유도분극 탐사

#### ABSTRACT

There are 17,000 reservoir dams in Korea, of which more than 85% were built over 50 years ago. Old embankment dams are weakened by internal erosion and suffusion phenomena due to preferential leakage paths and this ongoing weakening can cause their failure. Therefore, early warning associated with leakage in an embankment dam is crucial to prevent its failure. An electrical resistivity survey is a non-destructive, real-time and in-situ technique for detecting the development of leakage zones and general conditions of embankment dams. Because of its advantages, the electrical resistivity survey is widely used for reservoir safety inspections. However, the electrical resistivity survey is still not officially included in the precise safety inspection of reservoir dams because it cannot present a quantitative index of dam safety. In this study, we propose a method for calculating the leak index according to the water content evaluated from the electrical resistivity survey and/or induced polarization survey. Particularly, by proposing a quantitative leak index calculation method from monitoring surveys and independent surveys, we provide a theoretical basis for including electrical resistivity and induced polarization surveys as components of the precise safety inspection of reservoirs dams.

#### KEYWORDS

embankment dam, precise safety inspection, leak index, resistivity survey, induced polarization survey

Received: 8 June 2022; Revised: 11 July 2022; Accepted: 20 July 2022

\*Corresponding author

E-mail: choik@kangwon.ac.kr

Address: 1 Gangwondaehak-gil, Chuncheon, Gangwon-do, 200-701, Korea

©2022, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 서론

저수지 붕괴는 풍수해, 집중호우, 지진 등 다른 재난과 함께 발생하는 복합 재난의 성격을 갖고 있어 심각한 사회경제적 피해를 유발할 수 있다(Kim et al., 2019; Park et al., 2010). 2020년 기준으로 우리나라 저수지는 총 17,106개가 있으며 이중 3,400개소는 한국농어촌공사에서, 나머지는 지방자치단체에서 관리하고 있다. 이 중에서 준공된 지 50년 이상 경과한 저수지는 약 14,600여 개(85%)로, 노후된 저수지의 개보수가 시급한 실정이다(KRC, 2020; Oh et al., 2020; Kim et al., 2021). 노후화된 저수지는 개소 수가 많을 뿐만 아니라 준공 당시 체계적인 설계나 시공기준이 부재하여 축조 당시에는 최고의 기술을 적용하였다고 해도 오늘날의 재료 및 토질 역학적 관점에서 불안정한 측면이 있으며, 필 댐의 특성상 국지성 집중호우 등에 의한 월류(over-topping)와 함께, 내부침식(internal erosion)에 의한 세굴(piping) 등에 취약하다(Shin and Lee, 2012).

저수지 붕괴의 주된 원인은 집중호우에 의한 월류이지만, 지속적 보강을 통하여 월류에 의한 피해는 감소하고 있다. 반면에 제체의 균열에 의한 누수, 내부침식에 의한 세굴, 사면 활동, 기초지반의 불안정 등에 의한 파괴 등 구조적 결함이나 노후화에 의한 불안정성 등이 붕괴의 주요 원인으로 지목되고 있다(Hong, 2004; Song et al., 2016). 실제로 댐 붕괴 사례를 분석한 결과에 따르면 대부분 집중호우가 붕괴의 주요 원인이었으나, 최근에 발생하는 중·소형 댐의 붕괴는 집중호우와 무관하게 저수지의 안전관리 미흡 및 내구연한 초과 등이 원인으로 나타나고 있다. 특히 내부침식에 의한 누수는 제체 내부에서 점진적으로 발생하기 때문에 외관조사 단계에서 탐지가 어렵다. 물리탐사는 제체의 손상없이 내부의 물성을 파악할 수 있는 효과적인 비파괴 안전진단 기법이다. 따라서 외관조사 단계에서 탐지하기 어려운 제체 내부의 구조변화나 누수대의 발생여부 및 그 확장여부를 조기에 탐지하기 위해서는 적극적인 물리탐사의 활용이 필요하다.

저수지와 댐의 붕괴 사고 예방을 위하여 한국농어촌공사, 한국수자원공사와 지자체 등은 관련 법령에 의거하여 관리주체별로 정기적인 안전관리를 수행하고 있다. 그러나 국내 저수지는 노후화로 인한 개보수가 시급함에도 불구하고 예산 부족, 관리주체의 전문 인력 부족 등의 문제에 직면하고 있다. 특히 지자체의 경우 전문 인력은 물론 예산확보에 어려움이 있다. 한국농어촌공사의 경우 저수지 및 댐을 관리하기 위한 전문 인력을 확보하고, 전국에 산재한 지사의 인력을 활용하여 관할 수리시설물을 관리하고 있다. 그러나 관리 대상 수리시설물 개소 수에 비하여 관련 예산 및 전문 인력은 여전히 부족한 실정이다. 이러한 인력과 예산상의 어려움과는 별도로 현재 수행되고 있는 정밀안전진단도 대상 저수지의 규모 및 특성이 반

영되지 못하고 있다. 정밀안전진단에 적용되고 있는 물리탐사 기법, 특히 전기비저항 탐사는 저수지 제체의 내부물성 분포를 파악하고 누수구간의 탐지에 효과적인 방법이다(Song et al., 2019; Cho and Yong, 2019). 그러나 전기비저항 탐사는 아직도 안전진단 상태평가 항목에 포함되지 못하고, 단순한 참고자료로 사용되고 있다. 이는 전기비저항 탐사가 저수지의 안전도를 정량적으로 제시하지 못한다는 한계가 있기 때문으로 판단된다.

이 연구에서는 현재 중·소규모 저수지의 정밀안전진단에 널리 적용되고 있는 전기비저항 탐사와 유도분극(induced polarization, IP) 탐사법에 의한 누수지수 산출 방법을 제안한다. 비록 유도분극 탐사법은 기존 저수지 안전진단 공정에 포함되지 않았지만 효과적인 조사방법으로 예상된다. 또한 일회성 단독 탐사는 물론 모니터링 조사에서 획득되는 자료에 대한 정량적 누수지수 산출 방법을 제시하여, 향후 전기비저항 탐사와 유도분극 탐사가 저수지 정밀안전진단의 정량적인 상태평가 항목으로 진입할 수 있는 기반을 마련하고자 한다.

## 저수지 안전진단

한국농어촌공사에서는 ‘시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법’ (약칭 시설물 안전법)과 ‘농어촌 정비법’ 제18조 및 동법 시행령 제26조 “농업생산 기반시설 관리규정” 제16조에 의거, 농업기반 생산시설 정밀안전진단 실무 세부 요령에 따라 저수지 정밀안전진단을 실시하고 있다. 저수지 정밀안전진단은 제체와 양안부 및 기초, 여수로, 취수시설물에 대하여 상태평가를 실시하고, 상태변화가 저수지 전체 구조물의 안정성에 미치는 영향 정도, 구조적 중요도에 따라 유형별로 영향계수를 부여하여 저수지의 안전등급을 판정하고 있다. 그러나 상태평가에 적용되는 기준은 1종 저수지(총저수용량 30만 m<sup>3</sup> 이상) 위주로 설정되어 있어, 대부분의 중소규모 농업용 저수지(총저수용량 30만 m<sup>3</sup> 미만)에 적용하기에는 과대 설정되어 있다. 또한 소규모 농업용 저수지의 시설 규모 및 토질재 등의 고유한 특성을 반영하지 못하고 있다. 더 심각한 문제점은 실질적으로 측정이 불가능한 하류사면의 누수량이 상태평가 항목으로 산정되어 있으며, 댐의 붕괴로 직결되는 월류에 가장 큰 영향을 미치는 제체 여유고나 여수로 용량 부족은 즉시 조치가 필요한 중대 사안임에도 불구하고 예산 부족으로 개보수 우선순위가 낮아지는 문제가 발생한다(KRC, 2014). 특히 전기비저항 탐사 등의 물리탐사는 실무지침에 안전도 평가를 위한 참고자료에 그치고 있으며, 그 중요성에 비하여 최종적인 상태평가지수 산정에 제대로 반영되지 못하고 있다. 이러한 정밀안전진단의 문제점은 시급히 개선되어야 하며, 이를 위해서는 실질적으로 안전진단에 필요한 상태평가항목이 무엇인가에 대한 근본적인 대책이 수립되어야 한다.

## 전기비저항 탐사

전기비저항 탐사법은 지하의 전기비저항 분포 영상을 제공해 주는 효과적인 물리탐사 방법으로 지하자원 조사, 지반조사, 오염대 조사 등 다양한 분야에 널리 적용되고 있다. 전기비저항 탐사는 국내의 경우 지반의 높은 전기비저항으로 인하여 신호대 잡음비(S/N ratio)가 좋은 양질의 자료획득이 용이하며, 자료획득의 자동화, 처리 및 해석기술의 발달에 힘입어 적용분야가 더욱 확대되어 가고 있다. 또한 통신기술의 발달은 전기비저항 탐사의 상시관측(monitoring) 시대를 열어가고 있다. 한국농어촌공사에서는 저수지 안전진단에 필요한 전기비저항 탐사 등 원격 자동 계측 모니터링 시스템을 구축하여 저수지의 상태 변화 및 위험도를 실시간으로 점검하는 “수리시설재해예방 계측시스템 설치사업”을 수행하고 있다. 이 사업의 일환으로 수행되고 있는 전기비저항 자동 모니터링의 경우, 제체의 상태 및 누수구간의 확대 여부에 대한 정보를 실시간으로 제공하는 매우 효과적인 안전진단 방법으로 알려져 있으며, 그 결과는 개보수 대상 저수지의 우선순위 선정에 매우 중요한 기본정보로 활용되고 있다.

현재 저수지에서 수행되는 전기비저항 자동 모니터링은 제체의 마루부(crest)를 따라 설정된 축선에서 2차원 전기비저항 탐사 자료를 매 6시간마다 측정하고 인터넷을 통하여 전송하는 방식을 채택하고 있다. 저수지에서 수행되는 모니터링의 근본 목적은 저수지 붕괴의 직접적인 원인이 되는 과도한 누수를 발생 초기에 탐지하는 것이다. 측정된 전기비저항 자료는 대개 시간경과 역산(time-lapse inversion)을 통하여 제체 하부의 전기비저항 분포 및 그 변화 양상에 대한 영상으로 변환되며, 이를 분석하여 누수구간의 생성 혹은 확대 발달 여부를 판단하게 된다. 잘 알려진 바와 같이 시간경과 역산법은 지하 매질의 시간에 따른 변화 양상을 파악할 수 있는 해석 방법이므로 저수지 상태의 시간적 변화에 대한 유용한 정보를 실시간으로 제공해 줄 수 있다. 전기비저항 탐사에서 누수구간은 대개 낮은 전기비저항 이상대로 나타나지만, 누수 발생 초기에는 이상의 크기가 매우 작기 때문에 시간경과 역산을 적용해도 초기에 누수 발생 구간을 명확하게 해석하는 것은 쉽지 않다. 따라서 통상적인 전기비저항 모니터링에서는 정밀한 자료획득 및 처리가 요구된다.

전기비저항 탐사는 저수지 안전진단에 널리 적용되어 왔으나, 경비절감과 현장탐사의 편의성 때문에 제체에 평행한 축선에 대한 2차원 탐사 위주로 수행되어 왔다(Johansson and Dahlin, 1996; Panthulu *et al.*, 2001; Park *et al.*, 2005; Song *et al.*, 2005; Oh and Sun, 2008). 그러나 저수지는 3차원 구조를 갖는 수리시설물로 2차원 가정을 만족하지 못하므로, 2차원 해석 결과는 3차원 효과(3D effect)에 의해 왜곡된다(Sjödahl *et al.*, 2006; Cho *et al.*, 2006; Cho and Yeom, 2007; Cho *et al.*, 2010; Cho *et al.*, 2013). 또한 2차원 탐사 해석 결과는 측

선 하부의 2차원 전기비저항 단면만을 제공하므로 저수지의 3차원적 구조는 물론 누수 경로의 파악에는 한계가 있다.

모니터링 자료는 지하 매질의 미세한 변화를 효과적으로 파악해야 하므로 정밀한 해석이 요구된다. 특히 모니터링 조사의 경우에는 계절적 온도변화 및 수위변화도 해석을 어렵게 하는 요인 중의 하나이다. 따라서 통상적인 독립역산(independent inversion) 결과를 서로 비교하는 방법 보다는 교차모델 역산법(cross-model inversion)이나 4차원 역산법(4D inversion)이 사용된다(Loke *et al.*, 2013). 여기서 4차원은 공간의 차원에 관계없이 시간적 변화를 고려한 방법을 의미한다. 교차모델 역산법은 기준모델과 추정모델 사이의 차를 최소화하는 역산방법으로, 시간에 따른 기준모델의 변화량을 추정하는 효과적인 해석 기법이다(Loke, 1999). 기준자료와 시간경과 자료의 차나, 혹은 그 비를 모델변수로 사용하는 시간경과 역산(LaBrecque and Yang, 2001; Kemna *et al.*, 2002; Cassiani *et al.*, 2006), 기준모델과 추정모델의 차이를 최소화하는 교차모델 제한자(cross-model constraint)(Loke, 1999; Oldenborger *et al.*, 2007; Miller *et al.*, 2008; Kim and Cho, 2011; Cho *et al.*, 2013)를 사용하는 교차모델 역산 등의 연구가 발표된 바 있다. 그러나 교차모델 역산법은 기준모델에 따라 그 결과가 달라지며, 시간에 따른 연속적인 변화량을 파악하기 어렵다는 문제점이 있다.

이러한 문제점의 해결을 위하여 Hayley *et al.* (2010)은 두 개의 시간경과 자료를 동시에 역산하는 방법을 제안하였으며, 여러 시간에서의 자료를 한 번에 역산하는 4차원 역산법도 도입되었다(Day-Lewis *et al.*, 2002; Kim *et al.*, 2009, 2013; Karaoulis *et al.*, 2011, 2013, 2014; Loke *et al.*, 2014; Cho and Jeong, 2022). 4차원 역산은 여러 개의 시간경과 자료를 하나의 자료로 통합하고, 이 통합 자료를 함께 역산하는 방법이다. 따라서 4차원 역산은 계산시간이 많이 소요된다는 단점이 있으나, 독립역산이나 교차모델 역산에 비하여 지하 매질의 시간적 변화를 효과적으로 해석할 수 있는 역산방법이다. 물론 4차원 역산은 아직도 해결해야 할 다양한 문제점이 남아 있다. 특히 미세한 시간적 변화대를 정밀하고 선명하게 영상화하기 위한 시·공간 모델제한자의 최적화는 4차원 역산의 중요한 연구 과제 중의 하나이다. 또한 시간경과에 따른 물성 변화대를 효과적으로 영상화하기 위한 다양한 모델제한자 및 새로운 역산 알고리즘의 개발이 필요하다.

이상에서 기술한 바와 같이 전기비저항 탐사는 저수지 안전진단에 효과적인 물리탐사법으로 현재 국내외에서 널리 적용되고 있다. 특히 정밀 자동측정, 통신기술의 급속한 발전과 시간경과 역산법 등 해석법의 발전은 전기비저항 모니터링이 중요한 안전진단 기법으로 자리 잡는데 기여해 왔다. 국외의 경우 유도분극 탐사를 통하여 제체의 누수구간의 수분함량과 투수도를 정량적으로 산출하는 방법론이 제기되었으며(Abdulsamad *et al.*, 2019; Soueid Ahmed *et al.*, 2020), 국내의 경우에도 전기비저항 탐사에 대한 안전도 지수에 대한 연

구결과가 보고된바 있다(Cho *et al.*, 2006). 그럼에도 불구하고 국내의 경우 전기비저항 탐사는 저수지 정밀안전진단의 실무 지침에 안전도 평가를 위한 참고자료로 사용되는데 그치고 있으며, 최종적인 상태평가지수 산정에 반영되지 못하고 있다. 이는 전기비저항 탐사에서 제공하는 최종 결과가 단순히 제체의 전기비저항 분포단면을 제공하는데 그치고 있으며, 이를 이용한 제체의 안전도를 정량화하지 못한다는 한계가 주된 원인으로 판단된다. 즉 이제까지 대부분의 연구는 제체의 전기비저항 분포 영상을 얼마나 정확하게 추정하는가에 집중되어 왔으며, 이를 이용하여 실질적인 저수지 안전진단에 필요한 정량적 정보를 제공하지 못하고 있다. 따라서 전기비저항 탐사를 통하여 획득되는 전기비저항 분포를 제체의 정량적 누수지수로 변환하는 방안이 제시된다면, 전기비저항 탐사는 저수지 안전진단에 실질적인 상태평가 항목으로 진입 가능할 것이다.

## 유도분극 탐사

유도분극 탐사는 지하 매질 내에서 발생하는 분극 현상을 측정하여 매질의 충전성 분포를 파악하는 탐사법으로 지하자원조사(Seigel *et al.*, 2007), 환경 오염대 조사(Gazoty *et al.*, 2012)에 널리 사용되고 있다.

유도분극 탐사는 전기비저항 탐사에서와 마찬가지로 지하에 전류를 주입하고, 지하 충전성 이상체에서 발생하는 분극에 의한 과전압을 측정한다. 유도분극 탐사는 측정 방법에 따라 시간영역 유도분극, 주파수영역 유도분극, SIP(spectral induced polarization) 탐사 등으로 분류되며, 각 방법에 따라 자료획득, 처리 및 해석이 달라진다. SIP 탐사법은 광중구분과 암석물리학적 특성 규명이 가능한 방법으로 알려지면서 현재 유도분극 탐사의 주된 연구 대상이 되고 있다. 그러나 주파수영역 유도분극 및 SIP 탐사는 장비가 고가이며, 현장작업이 복잡하다. 반면 대부분의 전기비저항 탐사기기에는 시간영역 유도분극 탐사 기능이 탑재되어 있어, 시간영역 유도분극 탐사는 주파수영역 유도분극 탐사에 비하여 그 적용성이 뛰어나다는 장점이 있다. 한편 유도분극 탐사는 분극을 측정하므로 금속전극을 사용할 경우 전극분극에 의해 측정값이 왜곡되므로 비분극 전극(non-polarizable electrode)을 사용해야 하는 것으로 알려져 있다. 그러나 최근에 실내 시험에 비하여 상대적으로 전극간격이 넓은 현장탐사의 경우 금속전극을 사용해도 큰 문제가 없음이 밝혀지면서(Dahlin *et al.*, 2002; Zarif *et al.*, 2017) 그 적용성이 확대되고 있다. 또한 다중 채널 기능을 탑재한 자동 측정 장비가 도입되어 모니터링 조사도 가능하게 되었다(Karaoulis *et al.*, 2011; Doetsch *et al.*, 2015).

시간영역 유도분극 탐사 자료의 역산 방법에는 선형 역산(linear inversion), 역 사상법(inverse mapping or exact formalism) 및 비선형 역산(nonlinear inversion) 등이 있으며, 이들은 모두 전기비저항 역산에 기반한다(Oldenburg and Li,

1994; Cho and Kim, 2021). 또한 모니터링 자료의 경우도 이미 개발된 전기비저항 역산 해석 방법을 적용하면 용이하게 해석 프로그램의 개발이 가능하다(Karaoulis *et al.*, 2013). 따라서 국내에서 유도분극 탐사 모니터링 자료가 획득된다면, 그 해석기술의 개발에는 큰 어려움이 없을 것으로 보인다. 한편 시간영역 유도분극 탐사를 통하여 얻어지는 충전성은 수분함량과 관련된다(Revil, *et al.* 2013). 이러한 이유로 유도분극 탐사 및 모니터링은 저수지의 누수구간 탐지는 물론, 전기비저항 탐사와 함께 저수지의 정밀안전진단에 정량적인 정보의 제공이 가능할 것으로 기대된다.

## 누수지수

일정 주파수를 갖는 교류 전류를 지하에 주입하면 지하 매질의 전기전도도는 주파수에 따라 다른 값을 보이며, 고주파 전기전도도  $\sigma_\infty$ 와 저주파 전기전도도  $\sigma_0$ 는 다음과 같이 주어진다(Revil *et al.*, 2013; Revil *et al.*, 2014; Revil *et al.*, 2017a, 2017b, 2017c).

$$\sigma_\infty = \frac{S_w^n}{F} \sigma_w + \left( \frac{S_w^{n-1}}{F\phi} \right) \rho_g B \cdot CEC, \quad \sigma_0 = \frac{S_w^n}{F} \sigma_w + \left( \frac{S_w^{n-1}}{F\phi} \right) \rho_g (B - \lambda) \cdot CEC. \quad (1)$$

여기서  $F$ 는 지층 전기비저항 계수(formation factor),  $\phi$ 는 공극률(porosity),  $S_w$ 는 공극의 수포화도(water saturation),  $n$ 은 대개의 지하 매질에서 2.0 정도의 값을 갖는 포화도 지수(saturation exponent),  $\sigma_w$ 는 공극수의 전기전도도,  $\rho_g$ 는 입자의 밀도(kg/m<sup>3</sup>), CEC는 양이온 교환 능력(cation exchange capacity, C/kg),  $B$ 는 표면전도(surface conduction)에 의한 이온의 겉보기 유동성(m<sup>2</sup>/sV),  $\lambda$ 는 분극에 의한 이온의 겉보기 유동성(apparent mobility)을 나타낸다. 식 (1)에서  $\sigma_0$ 와  $\sigma_\infty$ 는 공극수에 의한 전기전도도와 표면전도에 의한 전기전도도의 합으로 주어진다.

Archie의 법칙(Archie, 1942)에서  $F$ 는

$$F = \phi^{-m} \quad (2)$$

로 주어지며, 여기서  $m$ 은 고결지수(cementation exponent)로 1.3에서 2.5 사이의 값을 보이며, 대개의 매질에서 2에 근접한 값을 나타낸다. 한편 시간영역 유도분극 탐사에서 충전성  $M$ 은 주파수영역에서 고주파 전기비저항을  $\rho_\infty$ , 저주파 전기비저항을  $\rho_0$ 라 하면

$$M = \frac{\rho_0 - \rho_\infty}{\rho_0} = \frac{\sigma_\infty - \sigma_0}{\sigma_\infty} \quad (3)$$

로 정의된다. 충전성을 고주파 전기비저항으로 정규화한 충전성  $M_n$ 은 식 (1)로부터

$$M_n = \frac{M}{\rho_\infty} = \sigma_\infty - \sigma_0 = \left( \frac{S_w^{n-1}}{F\phi} \right) \rho_g \lambda \cdot CEC \quad (4)$$

로 주어진다(Revil *et al.*, 2013). 식 (4)에서  $M_n$ 은 공극수를 통한 전기전도도와 무관하며 단지 표면 전기전도도에 의해서 결정됨을 알 수 있다.

지하 매질내의 수분함량(water content)  $\theta$ 는 수포화도와 공극률의 곱으로 주어진다(Revil *et al.*, 2013).

$$\theta = S_w \phi \quad (5)$$

이제 식 (2), (5)를 식 (4)에 대입하고,  $\theta$ 에 대하여 정리하면

$$\theta = \left( \frac{M_n \phi^{m-n}}{\rho_g \lambda \cdot CEC} \right)^{1/(n-1)} \quad (6)$$

의 관계식을 얻을 수 있다. 만약  $m=n$ 인 매질의 경우, 식 (6)은

$$\theta = \left( \frac{M_n}{\rho_g \lambda \cdot CEC} \right)^{1/(m-1)} \quad (7)$$

로 단순화된다. 특히  $m=n=2$ 인 경우에는 수분함량은

$$\theta \approx \frac{M_n}{\rho_g \lambda \cdot CEC} \quad (8)$$

로 근사할 수 있으며, 이 경우 수분함량은 정규화된 충전성인  $M_n$ 에 비례한다. 따라서 단독 측정의 경우에는  $M_n$ 이 큰 영역은 누수 위험성이 높은 영역으로 해석할 수 있으며,  $M_n$ 의 크기에 따라 누수지수(leak index)  $\eta$ 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\eta = \frac{\ln M_n}{\text{Max} \ln M_n} \quad (9)$$

누수지수는 우선 유도분극 탐사 자료를 역산하여  $M_n$ 의 분포를 구한 다음, 식 (9)를 사용하여 계산된다. 식 (9)에서 수분함량이 가장 큰 역산 블록에서  $\eta=1$ 이 되며,  $M_n$ 이 0에 가까운 역산 블록, 즉 수분함량이 매우 작은 역산 블록에서  $\eta=0$ 이 된다. 누수지수 단면은 정규화된 충전성  $M_n = M/\rho_\infty$ 과 관련되므로 통상적인 유도분극 탐사에서 얻어지는 충전성  $M$  단면과는 달리 수분함량의 분포를 영상화하는 것으로 볼 수 있다.

반복 측정이 수행된 경우에는 수분함량과 공극률의 변화에 대한 보다 정량적인 해석이 가능하다. 시간  $t_1$ 과  $t_2$ 에서 유도분극 탐사자료가 획득되고, 각 시간에서의 정규화된 충전성을  $M_{n1}$ 과  $M_{n2}$ 라 가정하자.  $\rho_g$ ,  $\lambda$ ,  $CEC$  등의 변수가 일정하다면, 식 (8)로부터 수분함량의 변화량은

$$\Delta \theta \approx \frac{\Delta M_n}{\rho_g \lambda \cdot CEC} \quad (10)$$

로 표현되며, 이는  $\Delta M_n$ 이 수분함량의 변화량에 비례함을 의

미한다(Abdulsamad *et al.*, 2019). 또한 식 (4)로부터 정규화된 충전성의 비는

$$\frac{M_{n2}}{M_{n1}} = \left( \frac{\theta_2}{\theta_1} \right)^{n-1} \left( \frac{\phi_2}{\phi_1} \right)^{m-n} \quad (11)$$

로 주어진다. 이때  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ ,  $\phi_1$ 과  $\phi_2$ 는 각 시간에서의 수포화도와 공극률을 나타낸다. 이제 식 (11)에 로그를 취하면

$$\ln \left( \frac{M_{n2}}{M_{n1}} \right) = (n-1) \ln \left( \frac{\theta_2}{\theta_1} \right) + (m-n) \ln \left( \frac{\phi_2}{\phi_1} \right) \quad (12)$$

이 된다. 만약  $\Delta M_n$ 이 크지 않다면 급수 전개를 통하여

$$\ln \left( \frac{M_{n2}}{M_{n1}} \right) = \ln \left( 1 + \frac{M_{n2} - M_{n1}}{M_{n1}} \right) \approx \frac{\Delta M_n}{M_{n1}} = \partial \ln M_n \quad (13)$$

로 표현되며, 여기서  $\partial$ 는 편미분 연산자다.  $\theta$ 와  $\phi$ 도 마찬가지로

$$\ln \left( \frac{\theta_2}{\theta_1} \right) \approx \frac{\Delta \theta}{\theta_1} = \partial \ln \theta, \text{ and } \ln \left( \frac{\phi_2}{\phi_1} \right) \approx \frac{\Delta \phi}{\phi_1} = \partial \ln \phi. \quad (14)$$

따라서 식 (12)는

$$\frac{\Delta M_n}{M_{n1}} \approx (n-1) \frac{\Delta \theta}{\theta_1} + (m-n) \frac{\Delta \phi}{\phi_1} \quad (15)$$

로 변형된다. 결과적으로 로그 스케일상에서  $M_n$ 의 변화율은 다음과 같이

$$\partial \ln M_n = (n-1) \partial \ln \theta + (m-n) \partial \ln \phi \quad (16)$$

표현된다. 즉 정규화된 충전성  $M_n$ 의 변화율은 수분함량과 공극률 변화율의 가중합으로 주어진다. 특히  $m=n=2$ 인 경우에는 식 (8)에서와 유사하게  $\Delta M_n$ 은  $\Delta \theta$ 에 비례한다. 일반적으로 누수가 진행되면 수분함량이 증가하고 공극률도 증가한다. 결과적으로 식 (15)에 주어진  $\Delta M_n/M_{n1}$ 이 크다는 것은 누수가 확장되는 것으로 해석할 수 있다. 따라서 상시관측이 수행되는 경우, 누수지수는 다음과 같이 정의할 수 있다(Abdulsamad *et al.*, 2019),

$$\eta = \frac{\ln(M_{n2}/M_{n1})}{\text{Max} \ln(M_{n2}/M_{n1})}. \quad (17)$$

식 (15), (17)에서 정규화된 충전성 변화량  $\Delta M_n$ 이 가장 큰 역산 블록에서  $\eta=1$ 이 되며,  $\Delta M_n$ 이 0에 가까운 역산 블록에서  $\eta=0$ 이 된다. 즉 단독 측정의 경우 식 (8)에 주어진 바와 같이 수분함량의 과소에 따라 누수지수가 결정되는 반면, 상시관측의 경우에는 식 (15)에 주어진 바와 같이 수분함량과 공극률의 변화율에 의해 누수지수가 계산된다. 따라서 상시관측 누수지수는 누수량의 확대 여부를 반영하는 것으로 해석된다.

한편 전기비저항 탐사에서는 전류를 일정 시간 흘려준 상태

에서 측정이 이루어지므로 실제 측정하는 양은 순간 전위가 아니라 완전히 분극이 일어난 후의 전위라 할 수 있다. 따라서 전기비저항 탐사 결과로부터 얻어지는 전기전도도는 주파수영역의 경우에는 주파수가 0인 경우의 값인  $\sigma_0$ 에 해당된다. 이제 표면전도에 비하여 공극수를 통한 전도가 우세하다고 가정하면 식 (1)은 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$\sigma_0 = \frac{S_w^n}{F} \sigma_w + \left( \frac{S_w^{n-1}}{F\phi} \right) \rho_g (B - \lambda) \cdot CEC \approx \frac{S_w^n}{F} \sigma_w. \quad (18)$$

이러한 근사는 공극수의 염도가 높은 경우에, 즉  $\sigma_w$ 가 표면전도에 비하여 큰 환경에서 적정하며, 저수지 제체에 적용해도 큰 문제는 없다. 이제 식 (5)를 식 (18)에 대입하면

$$\sigma_0 \approx \frac{S_w^n}{F} \sigma_w = S_w^n \phi^m \sigma_w = \theta^n \phi^{m-n} \sigma_w \quad (19)$$

의 관계식을 얻을 수 있으며, 이는 직류 전기전도도가 수분함량, 공극률 및 공극수의 전기전도도에 의해 결정됨을 의미한다. 한편 저수지 제체의 경우 공극수의 전기전도도  $\sigma_w$ 는 모든 영역에서 일정한 값을 보인다. 또한 저수지 제체는 이상적 혹은 이론적으로는 동일한 토사를 이용하여 축조되므로 제체가 건전할 경우 공극률은 거의 일정한 값을 보일 것이다. 누수구간에서는 공극률이 증가할 것이며, 이는 전기전도도의 증가로 이어진다. 결과적으로 전기전도도가 크다는 것은 수분함량과 공극률이 크다는 것을 의미하며, 누수 가능성이 높음을 지시한다. 이는 저수지에서 수행되는 전기비저항 탐사에서 낮은 전기비저항 이상대를 누수구간으로 해석하는 이유이기도 하다. 특히 제체의 침윤선 하부에서는 공극의 수포화도  $S_w = 1.0$ 이므로 전기전도도의 증가는 공극률의 증가로 해석할 수 있다. 따라서 전기비저항 탐사에 의한 누수지수는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\eta = \frac{\ln(\sigma)}{\text{Max} \ln(\sigma)} \quad (20)$$

물론 식 (20)에 의한 누수지수는 전기전도도 단면과 거의 유사한 양상을 보이므로, 그 유용성에 한계가 있다. 또한 실제 저수지는 동일한 토사를 사용하여 축조되지 않은 경우도 빈번하며, 이 경우 단순히 전기비저항 값의 고저만으로 누수구간을 결정하는 것은 위험성이 있다. 이러한 문제점의 극복을 위해서는 상시관측에 의한 해석이 필요한 것으로 판단된다.

전기비저항 상시관측에서 시간  $t_1$ 과  $t_2$ 에서 측정이 수행되고, 각 시간에서의 전기전도도를  $\sigma_1$ 과  $\sigma_2$ , 수포화도를  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ , 공극률을  $\phi_1$ 과  $\phi_2$ 라 가정하자. 이 경우 식 (5)를 식 (19)에 대입하면 직류 전기전도도( $\sigma_0$ )의 비는

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \left( \frac{\theta_2}{\theta_1} \right)^n \left( \frac{\phi_2}{\phi_1} \right)^{m-n} \quad (21)$$

로 주어진다. 식 (21)에 로그를 취하고, 급수 전개하면

$$\frac{\Delta \sigma}{\sigma_1} \approx n \frac{\Delta \theta}{\theta_1} + (m-n) \frac{\Delta \phi}{\phi_1} \quad (22)$$

이 된다. 따라서 로그 스케일상에서 전기전도도의 시간적 변화율은

$$\partial \ln \sigma = n \partial \ln \theta + (m-n) \partial \ln \phi. \quad (23)$$

로 나타낼 수 있다. 따라서 전기전도도의 시간적 변화율은 수분함량과 공극률의 시간적 변화율의 가중합으로 주어지며, 이는 전기전도도의 시간적 변화율이 큰 영역이 누수의 확장 속도가 높은 영역임을 의미한다. 따라서 전기비저항 상시관측에서 누수지수는 다음과 같이 정의할 수 있다(Abdulsamad *et al.*, 2019).

$$\eta = \frac{\ln(\sigma_2/\sigma_1)}{\text{Max} \ln(\sigma_2/\sigma_1)} \quad (24)$$

한편 전기비저항 혹은 유도분극 모니터링을 통하여 얻어지는 누수지수는 역산을 통하여 계산된 충전성이나 전기전도도가 감소하는 경우에는 음의 값을 보일 수 있다. 그러나 음의 누수지수는 물리적으로 의미가 없으므로 그 값을 0으로 처리해야 한다. 또한 전기비저항 및 유도분극 탐사를 통하여 얻어지는 지하 매질의 충전성, 전기전도도는 모두 온도와 저수지 수위에 따라 다른 값을 보인다. 여기서 제시한 누수지수는 온도 및 저수위에 의한 영향을 고려하지 않았기 때문에 측정 간격이 긴 반복 측정의 경우에는 해석상의 문제점이 발생할 수도 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 방법을 통하여 누수지수를 산출할 경우에는 되도록 온도 및 저수위가 유사한 시점에 탐사를 수행해야 할 것으로 판단된다. 한편 이러한 문제점은 시간간격을 두고 얻어진 탐사 자료를 교차모델 제한을 가하여 역산할 경우에 발생한다. 만약 4차원 역산을 적용하면 이러한 문제는 상당 부분 해소 가능하며, 이를 위해서는 24시간 이내의 짧은 시간간격으로 모니터링 자료가 취득되어야 한다.

## 결론 및 토의

국내 저수지의 85% 이상은 50년 이상 경과된 노후 저수지로 붕괴의 위험에 노출되어 있으며, 이의 방지를 위한 정밀안전진단이 주기적으로 실시되고 있다. 정밀안전진단은 저수지의 위험도를 과학적이고 객관적인 자료에 근거하여 저수지에 안전등급을 부여하고, 이에 근거하여 개보수 우선순위를 결정해야 한다. 그러나 현재의 정밀안전진단 상태평가는 저수지 개별 부재 및 시설의 연결부에 나타나는 외관적 결함에 큰 가중치를 부여하고, 이들의 가중합에 근거하여 안전등급을 책정하고 있다. 이러한 안전진단 방법은 제체의 내부에서 점진적으로 일어나는 내부침식에 따른 세굴현상을 고려하지 못한다는 한

계가 있다. 또한 외관상 징후는 내부적 결함이 상당히 진척된 상황에서 발생하므로 개보수 공사의 규모가 커지고, 비용이 증가할 수밖에 없다는 문제점이 있다.

물리탐사법은 제체 내부의 물성분포에 대한 영상을 제공해주므로 제체의 전반적인 상태를 효과적으로 파악할 수 있다. 다양한 물리탐사법 중 저수지 안전진단에 널리 적용되고 있는 전기비저항 탐사법은 모니터링이 가능하므로 제체 내부물성의 시간적 변화뿐만 아니라 누수구간의 확장 여부도 파악 가능하다. 그러나 전기비저항 탐사법은 다른 물리탐사법과 마찬가지로 저수지의 상태평가 항목으로 선정되어 있지 않으며, 정성적인 참고자료로만 사용되고 있다. 이는 현재 전기비저항 탐사가 저수지의 안전도를 정량적 지수로 제시하지 못하기 때문으로 판단된다. 이 연구에서는 전기비저항 탐사와 유도분극 탐사를 통하여 저수지의 누수지수를 정량적으로 산출하는 방법론을 제시하였다. 제시된 누수지수는 전기비저항 및 유도분극 탐사 자료로부터 제체 내부의 공극률과 수분함량 분포양상을 정량화한다. 따라서 이제까지 정성적 해석에 머물러 있는 전기비저항 및 유도분극 탐사 결과를 저수지의 안전진단에 정량적 상태평가 항목으로 적용 가능할 것으로 기대된다.

한편 이 연구에서 제시된 누수지수는 이론적 고찰에 근거한 것으로 다양한 현장 자료에 대한 검증이 필요하다. 특히 누수지수의 계산과정에 다양한 가정이 포함되어 있어, 실제 현장 상황과 다를 수도 있다. 그러나 전기비저항 탐사는 정밀안전진단에 거의 대부분 적용되고 있으며, 유도분극 탐사도 전기비저항 탐사 측정 시스템을 사용하여 자료획득이 가능하므로 이들 자료를 이용하여 누수정도를 정량화하려는 노력은 지속적으로 이루어져야 한다. 향후 다양한 저수지 안전진단 결과에 자료를 비교·분석하게 되면 보다 정밀한 누수지수의 산출방법으로 발전 가능할 것이다. 따라서 이 연구에서 제시된 누수지수 산출법은 현재 전기비저항 탐사 등의 물리탐사 결과가 저수지 정밀안전진단의 상태평가에서 정성적인 참고자료로만 이용되고 있는 한계를 극복하고, 정량적 상태평가 항목으로 사용되는 이론적 근거가 될 것으로 기대된다.

## 감사의 글

이 논문은 2020년도 강원대학교 대학회계의 지원을 받아 수행한 연구임.

## References

- Archie, G. E., 1942, The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *Trans. AIME*, **146**, 54-62. <https://doi.org/10.2118/942054-G>
- Abdulsamad, F., Revil, A., Soueid Ahmed, A., Coperey, A., Karaoulis, M., Nicaise, S., and Peyras, L., 2019, Induced polarization tomography applied to the detection and the monitoring of leaks in embankments, *Eng. Geol.*, **254**, 89-101. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.04.001>
- Cassiani, G., Bruno, V., Villa, A., Fusi, N., and Binley, A. M., 2006, A saline trace test monitored via time-lapse surface electrical resistivity tomography, *J. Appl. Geophys.*, **59**, 244-259. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2005.10.007>
- Cho, I. K., Kang, H. J., Lee, B. H., Kim, B. H., Yi, S. S., Park, Y. G., and Lee, B. H., 2006, Safety index evaluation from resistivity monitoring data for a reservoir dyke, *Geophys. Geophys. Explor.*, **9**(2), 155-162. <https://koreascience.kr/article/JAKO200634515053340.page>
- Cho, I. K., and Yong, H. H., 2019, 3D resistivity survey for dam safety inspection, *Geophys. and Geophys. Explor.*, **22**(3), 99-106. <https://doi.org/10.7582/GGE.2019.22.3.099>
- Cho, I. K., and Kim, Y. J., 2021, Nonlinear inversion of time-domain induced polarization data including negative apparent chargeability data, *Geophys. and Geophys. Explor.*, **24**(4), 139-148. <https://doi.org/10.7582/GGE.2021.24.4.139>
- Cho, I. K., Ha, I. K., Kim, K. S., Ahn, H. Y., Lee, S., and Kang, H. J., 2013, 3D effects on 2D resistivity monitoring in earth-fill dams, *Near Surf. Geophys.*, **12**, 73-81. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2013065>
- Cho, I. K., and Jeong, D. B., 2022, 4D inversion of resistivity monitoring data with adaptive time domain regularization, *J. Appl. Geophys.*, **198**, 104559. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2022.104559>
- Cho, I. K., Lee, K. S., and Kang, H. J., 2010, 3D Effect of embankment dam geometry to resistivity Data, *Geophys. and Geophys. Explor.*, **13**, 397-406. <https://koreascience.kr/article/JAKO201013354299552.page>
- Cho, I. K., and Yeom, J. Y., 2007, Crossline resistivity tomography for the delineation of anomalous seepage pathways in an embankment dam, *Geophysics*, **72**, G31-G38. <https://doi.org/10.1190/1.2435200>
- Dahlin, T., Bernstone, C., and Loke, M. H., 2002, A 3-D resistivity investigation of a contaminated site at Lernacken, Sweden, *Geophysics*, **67**, 1692-1700. <https://doi.org/10.1190/1.1527070>
- Day-Lewis, F. D., Harris, J. M., and Gorelick, S. M., 2002, Time-lapse inversion of crosswell radar data, *Geophysics*, **67**, 1740-1752. [doi:10.1190/1.1527075](https://doi.org/10.1190/1.1527075)
- Doetsch, J., Fiandaca, G., Auken, E., Christiansen, A. V., Cahill, A. G., and Jakobsen, R., 2015, Field-scale time-domain spectral induced polarization monitoring of geochemical changes induced by injected CO<sub>2</sub> in a shallow aquifer, *Geophysics*, **80**(2), WA113-WA126. [doi:10.1190/geo2014-0315.1](https://doi.org/10.1190/geo2014-0315.1)
- Gazoty, A., Fiandaca, G., Pedersen, J., Auken, E., and Christiansen, A. V., 2012, Mapping of landfills using time-domain spectral induced polarization data: the Eskelund case study, *Near Surf. Geophys.*, **10**, 575-586. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2012046>
- Hayley, K., Bentley, L. R., and Pidlisecky, A., 2010, Compensating for temperature variations in time-lapse electrical resistivity

- difference imaging, *Geophysics*, **75**(4), WA51-WA59. <https://doi.org/10.1190/1.3478208>
- Hong, B. M., 2004, Problems and improvement plan of agricultural reservoir construction, *J. Korea Water Resour. Asso.*, **37**(4), 29-33.
- Johansson, S., and Dahlin, T., 1996, Seepage monitoring in an earth embankment dam by repeated resistivity measurements, *European J. Engin. Environ. Geophys.*, **1**, 229-247. [https://www.researchgate.net/publication/271190903\\_Seepage\\_monitoring\\_in\\_an\\_earth\\_embankment\\_dam\\_by\\_repeated\\_resistivity\\_measurements](https://www.researchgate.net/publication/271190903_Seepage_monitoring_in_an_earth_embankment_dam_by_repeated_resistivity_measurements)
- Karaoulis, M., Kim, J. H., and Tsourlos, P. I., 2011, 4D active time constrained inversion, *J. Appl. Geophys.*, **73**, 25-34. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2010.11.002>
- Karaoulis, M., Revil, A., Werkema, D. D., Minsley, B. J., Woodruff, W. F., and Kemna, A., 2011, Time-lapse three-dimensional inversion of complex conductivity data using an active time constrained (ATC) approach, *Geophys. J. Int.*, **187**, 237-251, [doi:10.1111/j.1365-246X.2011.05156.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05156.x)
- Karaoulis, M., Revil, A., Werkema, D. D., Tsourlos, P., and Minsley, B. J., 2013, IP4DI: a software for time-lapse 2D/3D DC-resistivity and induced polarization tomography, *Comput. Geosci.*, **54**, 164-170. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.01.008>
- Karaoulis, M., Tsourlos, P.I., Kim, J. H., and Revil, A., 2014, 4D time-lapse ERT inversion: introducing combined time and space constraints, *Near Surf. Geophys.*, **12**, 25-34. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2013004>
- Kemna, A., Vanderborght, J., Kulesa, B., and Vereecken, H., 2002, Imaging and characterization of subsurface solute transport using electrical resistivity tomography (ERT) and equivalent transport models, *J. Hydrol.*, **267**, 125-146. [doi:10.1016/S0022-1694\(02\)00145-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00145-2)
- Kim, D. H., Jang T. I., Hwang, S. W., and Cho, J. P., 2019, Assessing hydrologic impacts of climate change in the Mankyung watershed with different GCM spatial downscaling methods, *JKSAE*, **61**(6), 81-92, <https://doi.org/10.5389/KSAE.2019.61.6.081>
- Kim, J. H., Yi, M. J., Park, S. G., and Kim, J. G., 2009, 4-D inversion of DC resistivity monitoring data acquired over a dynamically changing earth model, *J. Appl. Geophys.*, **68**, 522-532. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2009.03.002>
- Kim, J. H., Supper, R., Tsourlos, P., and Yi, M. J., 2013, Four-dimensional inversion of resistivity monitoring data through Lp norm minimizations, *Geophys. J. Int.*, **195**, 1640-1656. [doi:10.1093/gji/ggt324](https://doi.org/10.1093/gji/ggt324)
- Kim, K. J., and Cho, I. K., 2011, Time-lapse inversion of 2D resistivity monitoring data with a spatially varying cross-model constraint, *J. Appl. Geophys.*, **74**, 114-122. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.04.010>
- Kim, M., Lee, C. Hwang, S. Ham, J., and Choi, J., 2021, A study on the minimization of expected casualty caused by the collapse of reservoir, *J. Korean Geograph. Soc.*, **56**(3), 277-287, <https://doi.org/10.22776/kgs.2021.56.3.277>
- KRC (Korea Rural Community Corporation), 2014, *The Improvement of Assessment Criteria and Techniques of Safety Inspection for Agricultural Infrastructures*, Research report, No. 11-5143000-000717-01.
- KRC (Korea Rural Community Corporation), 2020, *Statistical yearbook of land and water development for agriculture*, Report No. 11-138000-0000140-10
- LaBrecque, D. J., and Yang, X., 2001, Difference inversion of ERT data: a fast inversion method for 3D in situ monitoring, *J. Environ. Eng. Geophys.*, **6**, 83-90. <https://doi.org/10.4133/JEEG6.2.83>
- Loke, M. H., 1999, Time lapse resistivity imaging inversion, in Proceedings of the 5th Meeting of the Environmental and Engineering Society European Section, Em1, September 6-9, 1999, Budapest, Hungary. [doi: https://doi.org/10.3997/2214-4609.201406397](https://doi.org/10.3997/2214-4609.201406397)
- Loke, M. H., Chambers, J. E., Rucker, D. F., Kuras, O., and Wilkinson, P. B., 2013, Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method, *J. Appl. Geophys.*, **95**, 135-156. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.02.017>
- Loke, M. H., Dahkn, T., and Rucker, D. E., 2014, Smoothness constrained time-lapse inversion of data from 3D resistivity survey, *Near Surf. Geophys.*, **12**, 5-24. [doi: https://doi.org/10.3997/1873-0604.2013025](https://doi.org/10.3997/1873-0604.2013025)
- Miller, C. R., Routh, P. S., Brosten, T. R., and McNamara, J. P., 2008, Application of time-lapse ERT imaging to watershed characterization, *Geophysics*, **73**, G7-G17. <https://doi.org/10.1190/1.2907156>
- Oh, S. and Sun, C. G., 2008, Combined analysis of electrical resistivity and geotechnical SPT blow counts for the safety assessment of fill dam, *Environ. Geol.*, **54**(1), 31-42. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00254-007-0790-y>
- Oh, S. G., Lee, J. Y., Jung, J. W., Song J. T., You, S. Y., and Lee J. C., 2020, Water quality characteristic for agricultural reservoirs in Yeongsan River Basin, *J. of the Korean Soc. for Environ. Tech.*, **21**(1), 15-23. <https://doi.org/10.1190/1.2734365>
- Oldenborger, G. A., Knoll, M. D., Routh, P. S., and LaBrecque, D. J., 2007, Time-lapse ERT monitoring of an injection/withdrawal experiment in a shallow unconfined aquifer, *Geophysics*, **72**, F177-F188.
- Oldenburg, D. W., and Li, Y., 1994, Inversion of induced polarization data, *Geophysics*, **59**, 1327-1341. <https://doi.org/10.1190/1.1443692>
- Panthulu, T. V., Krishnaiah, C., and Shirke, J. M., 2001, Detection of seepage path in earth dams using self-potential and electrical resistivity methods, *Eng. Geol.*, **59**, 281-295. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(00\)00082-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00082-X)
- Park, J. Y., Joh, H. K., Lee, J. H., Kang, B. S., Yoon, C. J., and Kim, S. J., 2010, Suggestion of simple method for downstream damage evaluation by small dam break using GIS technique, Proceedings of the 2010 KSAE Annual Conference.
- Park, S. G., Kim, J. H., and Seo, G. W., 2005, Application of electrical resistivity monitoring technique to maintenance of embankments, *Geophys. and Geophys. Explor.*, **8**(2), 177-183.



- <https://koreascience.kr/article/JAKO200507921815395.page>
- Revil, A., Coperey, A., Shao, Z., Florsch, N., Fabricius, I. L., Deng, Y., Delsman, J. R., Pauw, P. S., Karaoulis, M., de Louw, P. G. B., van Baaren E. S., Dabekaussen, W., Menkovic, A., and Gunnink, J. L., 2017a, Complex conductivity of soils, *Water Resour. Res.*, **53**, 7121-7147, doi:10.1002/2017WR020655
- Revil, A., Eppheimer, J. D., Skold, M., Karaoulis, M., Godinez, L., and Prasad, M., 2013, Low-frequency complex conductivity of sandy and clayey materials, *J. Colloid Interface Sci.*, **398**, 193-209, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2013.01.015>
- Revil, A., Kessouri, P., and Torres-Verdin, C., 2014. Electrical conductivity, induced polarization, and permeability of the Fontainebleau sandstone, *Geophysics*, **79**(5), D301-D318. <https://doi.org/10.1190/geo2014-0036.1>
- Revil, A., Le Breton, M., Niu, Q., Wallin, E., Haskins, E., and Thomas, D. M., 2017b, Induced polarization of volcanic rocks. 1: Surface versus quadrature conductivity, *Geophys. J. Int.*, **208**, 826-844, doi:10.1093/gji/ggw444
- Revil, A., Le Breton, M., Niu, Q., Wallin, E., Haskins, E., and Thomas, D. M., 2017c, Induced polarization of volcanic rocks. 2: Influence of pore size and permeability, *Geophys. J. Int.*, **208**, 814-825, doi:10.1093/gji/ggw382
- Shin E. C., and Lee, J. K., 2012, Safety management improving of small agricultural reservoir, *J. Korean Geosynth. Soc.*, **11**(3), 53-58. <https://doi.org/10.12814/jkgss.2012.11.3.053>
- Sjödahl, P., Dahlin, T., and Zhou, B., 2006, 2.5D resistivity modeling of embankment dams to assess influence from geometry and material properties, *Geophysics*, **71**, G107-G114.
- Seigel, H., Nabighian, M., Parasnis, D. S., and Vozoff, K., 2007, The early history of the induced polarization method, *Lead. Edge*, **26**(3), 312-321. <https://library.seg.org/doi/abs/10.1190/1.2715054>
- 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, *Explor. Geophys.*, **36**, 73-77. <https://doi.org/10.1071/EG05092>
- Song, S. H., Yong, H. H., Lee, G. S., and Cho, I. K., 2019, Safety analysis of reservoir dikes in South Korea through the interpretation of the electrical resistivity data considering three-dimensional structure, *Geophys. and Geophys. Explor.*, **22**(3), 160-167. <https://doi.org/10.7582/GGE.2019.22.3.160>
- Song, Y. K., Kim, Y. U., Kim K., and Lee, K. S., 2016, Countermeasure on safety management of decrepit reservoir based on the comparative analysis for its collapse accidents, *Crisisonomy*, **12**(7), 15-23. <https://scholar.kyobobook.co.kr/article/detail/4010024946628>
- Soueid Ahmed, A., Revil, A., Abdulsamad, F., Steck, B., Vergniault, C., and Guihard, V., 2020, Induced polarization as a tool to non-intrusively characterize embankment hydraulic properties, *Eng. Geol.*, **271**, 105604, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105604>
- Zarif, F., Kessouri, P., and Slater, L., 2017, Recommendations for field-scale induced polarization (IP) data acquisition and interpretation, *J. Environ. Eng. Geophys.*, **22**(4), 395-410. <https://doi.org/10.2113/JEEG22.4.39>