

댐 안정성 검토를 위한 물리탐사 기법의 최근 기술 동향

Application of Geophysical Methods for Dam Safety Analysis: Recent technological trend

김기석¹⁾, Ki-Seog Kim, 김정호²⁾, Jung-Ho Kim, 박삼규³⁾, Sam-Gyu Park,
임희대⁴⁾, Hwei-Dae Lim, 조인기⁵⁾, In-Ky Cho

¹⁾ (주)희송지오테크 대표이사, CEO, Heesong Geotek Co., Ltd.

²⁾ 한국지질자원연구원 책임연구원, Principle Researcher, Getechnical Engineering Division, KIGAM

³⁾ 한국지질자원연구원 선임연구원, Senior Researcher, Getechnical Engineering Division, KIGAM

⁴⁾ 충남대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Chungnam National University

⁵⁾ 강원대학교 지구물리학과 교수, Professor, Dept. of Geophysics, Kangwon National University

개요(SYNOPSIS) : Sixteen percent of a total of 18,000 dam facilities in Korea are reported to suffer problems related to seepage. It has also been observed that the natural frequency of torrential rainfall has increased quite significantly in recent years. Seepage in man-made structures combined with natural phenomenon may make the risk of dam failure higher, and can even lead to disasters for the people residing in downstream area. Thus, the social demands for the technology to prevent these disasters are higher than ever. In this contribution, we provide a brief review of technologies that are used to evaluate the structural safety of dams. We also discuss the results of three case studies where geophysical exploration methods (e.g. resistivity survey) were employed to find possible seepage zones of dam structures.

주요어(Keywords) : seepage, geophysical exploration, resistivity survey

1. 서론

집중호우나 태풍 등의 자연재해로 인해 수리시설물이 붕괴될 경우 막대한 인적·물적 피해가 발생한다. 자연재해는 수리구조물 붕괴의 방아쇠 역할(trigger effect)로 작용할 뿐 붕괴의 직접적 원인은 구조물 자체의 안정성 부족에 기인한 것이다. 수리구조물의 안정성 저하 원인에는 여러 가지가 있으나 구조물의 노후화가 중요한 원인 중 하나이다. 왜냐하면 구조물의 특성상 시간이 경과함에 따라 자중 및 외력 등에 의해서 구조가 취약해지거나 성능이 저하되기 때문이다.

국내에서는 아직까지 수리구조물 붕괴와 관련된 대형사고는 발생하지 않았지만 농업용수 확보를 목적으로 축조된 18,000여개의 제당 중 16%가 노후화로 인한 누수현상이 발생하여 불안전 구조물로 분류되어 있으며, 이에 따라 누수대 규명의 중요성이 크게 부각되고 있는 추세이다(원종근외, 1999)

댐 및 제방에서 누수현상은 주로 체체 내부, 체체와 기초지반의 접합부, 기초지반을 통해서 발생할 수 있으며, 파이핑 현상을 유발하여 체체의 붕괴를 초래할 수도 있다. 댐을 안전하게 관리하기 위해서는 안전한 댐을 건설하는 것이 최선의 방법이겠으나, 운영 중인 댐은 지속적인 유지관리가 필수적이다. 성공적인 유지관리는 무엇보다도 조사, 점검, 진단 및 대책이 정확하게 이루어 질 때 가능하며 지금까지의 댐에 대한 안정성 조사는 일반적으로 정기적인 외관조사, 계측자료 분석과 시추조사를 위주로 구조물에

대한 안전진단을 시행하여왔다.

한편, 최근 들어 댐의 누수대 규명을 위한 조사기법 중 제체에 손상을 최소화 할 수 있는 물리탐사 기법에 대한 연구가 증가추세에 있다. 특히, 정밀안전진단과 누수구간 탐지에 효과적인 물리탐사 방법으로서 전기비저항 탐사의 활용도는 매우 높은 것으로 보고되었으며 현재까지는 주로 댐이나 제당의 마루에서 댐축과 평행한 측선을 설치하여 2차원 전기비저항 탐사를 주로 수행하고 있다.

본 논문에서는 댐 및 제당의 안정성 평가를 효과적으로 평가할 수 있는 물리탐사 기술을 국내적용사례 위주로 살펴보고자 한다.

2. 댐 안전도 조사를 위한 기술 동향

일반적으로 댐 안전도 조사를 위한 기술은 그림 1에 표현한 바와 같은 흐름으로 이루어진다. 현장조사는 크게 댐체의 내구성 조사 및 변위측량, 퇴사량 조사같은 기타조사로 분류되며, 외관조사, 재료품질시험 등을 종합 수행하여 종합적으로 해석한 후 안전성 평가를 하게 된다. 이 중 댐체의 외관 조사는 댐마루와 상류사면, 하류사면 및 댐체 내부로 구분하여 점검 항목에 대한 외관조사를 실시하며 이 밖에도 기초지반, 여수로, 감세공 등의 기타 구조물에 대해서는 주로 바닥과 이음부의 균열, 세굴상태에 대한 조사가 이루어진다.

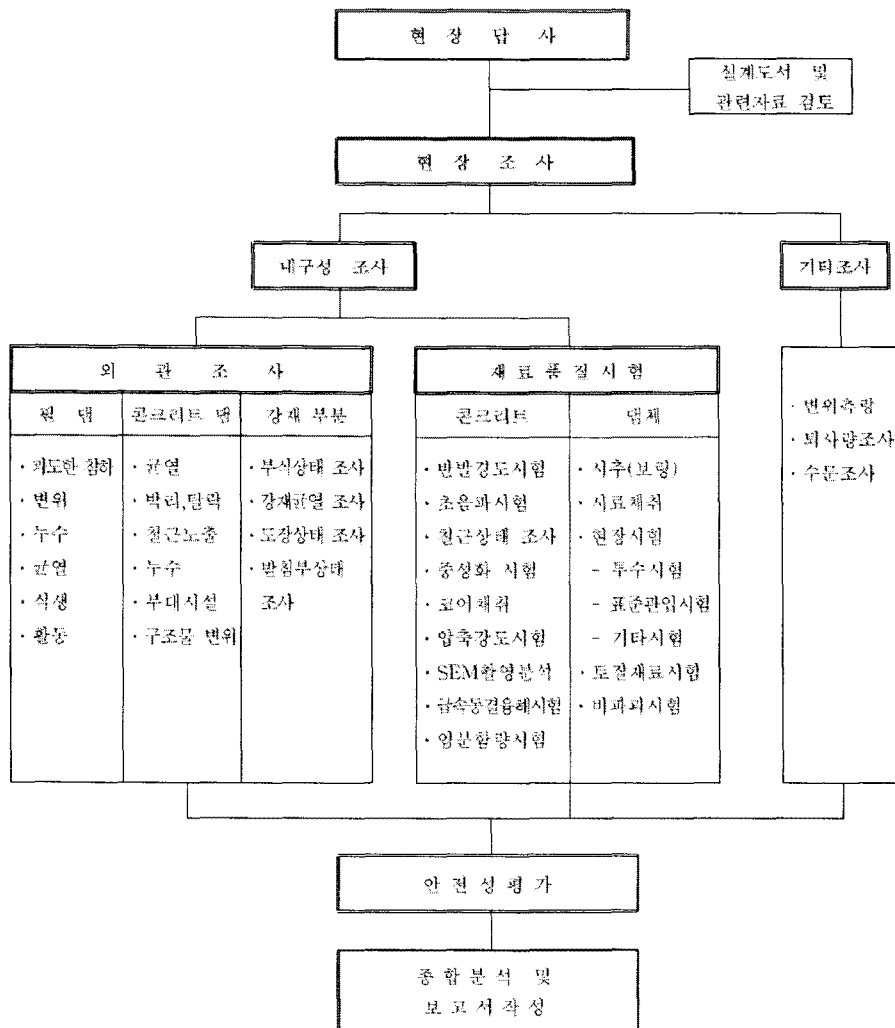


그림 1. 댐의 안전진단 흐름도

댐 계측의 목적

댐은 시공 중은 물론 최초 담수 기간 및 장기 유지관리 기간 동안 지속적으로 안전이 보장되어야 하며, 계측 모니터링은 이러한 보장 및 안전평가의 효과적인 수단이다. 일반적으로 댐의 계측은 댐의 거동 분석과 안전평가를 위해 필요한 정량적 또는 정성적인 자료의 입수를 목적으로 실시한다. 또한 계측은 댐의 안전검사 및 감시 프로그램을 보완하고 댐 사고의 원인을 규명하는데 필요한 정보를 제공해 준다. 축적된 계측자료는 댐의 거동에 대한 파악과 댐 사고 징후를 예측 및 대피하는데 필요하며, 이상 징후가 예측될 경우 사전에 조치를 취함으로써 막대한 인명 및 재산상의 피해를 줄일 수 있다.

표면변위 측정

일반적으로 댐의 표면에 나타난 침하, 변위, 균열 등의 외부 변위는 댐의 안정성을 나타내는 가장 유용한 지표이며, 이는 댐의 사면안정, 내부 침식, 파이프과 같은 내부변위와도 밀접한 관련이 있다. 댐체의 외부에 미소한 변위가 발생했다하더라도 체체 내부에는 심각한 변위가 발생했다는 증거일수 있으므로 지속적이고 세밀한 관리가 필요하다.

현재 국내·외로 사용되어지는 표면변위 측정방법은 다음과 같다.

측정방법	내 용	적용 가능지역
GPS를 이용한 측량	GPS를 이용하여 외부변위 측정	필댐, 콘크리트댐
경사계(Tiltmeter)	경사계를 이용하여 외부 사면변위 측정	필댐, 콘크리트댐
Crack gauges / Surface extensometer	댐 표면의 균열 폭과 인장응력을 측정	콘크리트댐
다중촬영에 의한 변위판독	서로 다른 각도에서 촬영한 사진을 3차원으로 분석하여 변위측정	필댐, 콘크리트댐
인공위성 영상	댐 하류 사면의 식생분포 영상을 이용하여 변위및 누수지역 유추	필댐
원격 비디오 모니터링	CCTV를 이용하여 체체 원격 감시	필댐, 콘크리트댐

내부변위 측정

일반적으로 댐의 변위는 축조 재료, 댐체의 분대(zoning), 다짐, 축조 속도 및 기초 저면의 상태, 지하 수위의 변화 조건과 같이 다양한 요소에 대해 영향을 받으며 이는 최종적으로 내부 및 외부의 변위로 나타난다. 내부변위는 외부변위와 달리 육안확인이 곤란하며, 대부분 계측기의 측정값에 의존하고 있다. 콘크리트댐의 경우 내부 갤러리(gallery)를 통해 부분적으로 육안확인이 가능하나, 필댐의 경우 거의 대부분 계측장치에 의존하고 있다. 내부변위 계측기는 시공당시 매설하는 경우가 대부분이므로 장비의 노후화와 운영기간중의 고장 등이 발생하게 된다. 근래 들어 추가 시추공을 이용한 계측방법과 물리탐사를 이용한 내부변위 측정방법이 연구되고 있다.

현재 국내·외적으로 사용되어지는 내부변위 측정방법은 다음과 같다.

측정방법	내 용	적용 가능지역
경사계(Inclinometer)	설치지점의 표고별 수평변위 측정	필댐
층별침하계	설치지점의 표고별 침하량	필댐
수평변위계	동일 표고 상에서 상대적인 수평변위량	필댐
개도계	시공이음부의 상태파악	콘크리트댐
플럼라인	저수위변동에 따른 댐체의 휨거동 파악	콘크리트댐
시추공 변위 측정계	시추공 내부의 변위를 측정	필댐
실시간 변위 모니터링	광섬유, 동축케이블을 이용한 실시간 변위 모니터링	필댐, 콘크리트댐

누수량 측정

필댐의 경우 제체 및 기초로부터의 누수를 완전히 차단하기 힘들기 때문에 지반 및 제체 침투수에 의한 누수가 일정량 발생하게 된다. 특히 필댐에서의 침투는 파이핑 현상에 의한 파괴의 원인이 될 수 있으므로 누수량, 누수경로 및 탁도 등에 대한 지속적인 관측은 안전관리 상 매우 중요한 요소이다.

현재 국내·외적으로 사용되어지는 누수 측정방법은 다음과 같다.

측정방법	내 용	적용 가능지역
침투량계(삼각웨어)	댐체 및 기초를 통과한 침투수의 량	필댐, 콘크리트 댐
열감지 모니터링	제체의 함수비에 따른 열변화를 측정	필댐, 콘크리트 댐
저류수와 침투수의 이온비교	저류수와 침투수의 이온비교, 시멘트의 리칭현상 분석	필댐
생물학적 측정	수위별 미생물분포를 이용하여 누수가 발생하는 수심예측	필댐
삼중수소 측정	빗물이나 지하수에 의한 유입량 결정	필댐
추적자 시험	추적자 용액을 이용하여 침투 경로와 침투시간등을 분석	필댐, 콘크리트 댐

댐의 누수량 증가는 파이핑 현상을 유발하여 댐체의 파괴를 초래할 수 있다는 심각성으로 인하여 지반공학 기술자들에 의하여 누수 메커니즘에 대한 연구와 누수대 규명을 위한 연구가 활발히 수행되어 왔다. 누수량 증가에 의한 댐 파괴가 계속 발생하자 이에 대한 관심을 갖게 되었으며, 세계 여러 학자들이 댐의 누수에 대한 연구결과를 세계 대댐 학회에 발표하였다.

국내에서는 한국수자원공사의 댐 운영처가 SEED의 번역 발간에 이어 1989년에는 미국 콜로라도주의 Engineer's Office에서 발생한 Dam Safety Manual을 번역 발간한 바 있다. 1991년에는 미 개척국에서 발생한 Dams and Public Safety를 번역 발간하여 이용하고 있다.

건설교통부에서는 '댐 시설기준(1993)', '댐 시설 유지관리 기준(1994)' 및 '댐 설계기준(2005)'을 발간하여 댐 시설을 안전하고 경제적으로 관리할 수 있도록 하고 있다. '댐 시설 유지관리 기준'은 댐 시설 및 부대시설의 안전 및 유지관리와 평가에 대한 기준을 제시하며 세부적인 사항에 대해서 구체적으로 명시하고 이를 따르도록 하고 있다.

댐은 구조적인 특수성 때문에 시추와 같은 파괴적인 방법을 이용한 조사법은 극히 제한적일 수밖에 없으며, 따라서 비파괴 조사법인 물리탐사 기법의 적용이 필수적으로 요구되고 있다. 가까운 일본에서 1997년에 발표된 자료를 토대로 댐의 유지관리 단계에서 수행되었던 항목을 표 1과 같이 정리하였다.

이 표에서 누수문제와 관련된 조사를 위해서는 전기비저항 물성을 이용한 탐사법의 적용이 가장 많은 것으로 나타나는데 이는 전기비저항 물성이 물에 대해 가장 민감하게 반응하는 물성이기 때문이다.

표 1. 일본에서 댐의 유지관리 단계에서 자주 이용되는 물리탐사 방법

주요조사목적	지표탐사				시추공을 이용한 탐사				해설			
댐의 유지관리 단계 <댐본체의 안정성평가>	굴 절 법 탄 성 과 탐 사	전 기 탐 사	레이 다 탐 사	미 진 동	열 적 외 선 탐 사	탄 성 과 토 모 그 래 피	전 기 비 저 항 토 모 그 래 피	음 파 검 측	전 기 검 측	지 하 수 검 측	온 도 검 측	
콘크리트 표면성능저하	△				○							열적외선은 시간별 기온차의 효과적 측정 가능
누수문제		○				◎		○	○	○		전기비저항탐사는 물의 유동과 직접적으로 감지 가능
댐체체의 연중변화	○	○		△	○	○	○	○				S파 속도변화를 측정하는 것이 효과적

- ◎ 적용을 필히 검토해야할 탐사법
- 현지조건에 따라서는 적용가능한 탐사법
- △ 과거에 적용실적이 있는 탐사법

한편, 국내에서는 정승환(1992)등이 사력댐의 누수구간 진단에 전기비저항 탐사가 효율적임을 입증한 바 있으며, 이 밖에도 지온탐사를 이용하여 해당의 누수구간 예측 탐사 기법(박삼규, 1999), SP 탐사와 전기비저항 탐사를 복합 적용하여 효과적인 누수구간 탐지(송성호, 2000)등이 발표되었다.

국내에서는 전기탐사가 주로 이용된 반면에 외국의 경우는 다양한 물리탐사 기법이 응용되어 왔다. 예를 들면 Calrston 등(1999)은 탄성과 탐사와 전기비저항 탐사를 이용하여 사력댐과 콘크리트 댐을 조사한 바가 있으며, Karastathis(2001)는 지진 발생이후 댐의 안정성 검토를 위하여 전기비저항 탐사, 탄성과탐사, GPR 탐사등을 적용하였다.

누수가 댐의 안정성에 영향을 미치는 경우가 보고되기 시작한 1990년대 후반부터 댐의 누수대 규명을 위한 조사기법에 관심을 가지게 되었다. 물리탐사 기술적인 관점에서 과거에는 누수구간의 진단만을 목적으로 2차원 전기비저항 탐사만을 수행하였으나, 최근에는 정밀영상의 획득, 종합적이고 정량적인 해석 기술의 개발을 목적으로 3차원 전기비저항 탐사(김정호, 2001), 모니터링 기법의 활용(조인기외, 2006), 누수 유로 탐지 토모그래피(조인기, 2007) 등의 기법들이 연구 발표되고 있다.

3. 댐에서 안정성 검토를 위한 물리탐사 기술

댐은 댐체와 기초암반과의 접촉면에서 물성변화가 크게 나타나고, 장기간에 걸쳐 시공이 되는 바 시공중에 댐체 코아재 사이에 물성변화가 발생할 수 있다. 이와 같이 물성변화가 심한 곳이나 공극, 균열 등에서 임의의 수평단면에 대한 수직방향으로 작용하는 내부수압인 양압력이 발생하며, 이는 댐의 안정을 저해하는 가장 중요한 외력이다.

댐 손상원인 중 가장 많은 사례는 댐 누수이며, 누수가 하류사면에 나타났을 때는 이미 상당한 손상이 진전된 상태이므로, 외부적으로 나타나는 손상에 대한 육안조사와 함께 댐체에 매설된 간극수압계, 토압계, 누수량측정계 등의 계측기의 변화를 관찰하여 사전에 이에 대한 보강을 수행하고 있다. 일반적으로는 보강방법으로는 댐체 내부의 누수부위를 메우는 그라우팅 방법이 주로 사용되는데, 경제적인 그라우팅 설계를 위해서는 댐체 내부 지반에 대한 정보가 요구된다.

댐체 안전진단을 위한 현장조사 방법으로는 양안부 지표 지질조사, 댐체 상세 외관조사, 계측자료 분석, 지구물리탐사, 시추 및 토질조사, 변위측량조사 등이 있다. 일반적으로 댐체 내부 지반에 대한 정보는 댐체에 매설된 계측기 기록과 손상부위에 대한 시추조사 등을 통해 주로 획득되는데, 시추조사의 경우 댐체에 손상을 줄 수 있기 때문에 최근에는 댐체에 손상을 주지 않는 지구물리탐사가 널리 적용되고 있다.

지구물리탐사는 지표 및 시추공에서 전기 및 진동 등을 통해 댐체의 이상대를 탐지하는 방법으로 지표에서 비파괴적으로 수행하는 자연전위탐사, 전기비저항탐사, 전자탐사, 굴절법 탄성과 탐사와 표면파 탐사 등이 있으며, 시추공을 이용하여 시추공간 매질에 대한 정밀영상을 획득하는 방법으로 탄성과 토모그래피와 레이더 토모그래피 등이 있다. 먼저 자연전위 탐사는 누수부위에서 자연전위가 증가하는 특성을 이용하여 누수부위를 탐지하는 효과적인 탐사법이나 댐체 내부 지반에 대한 영상은 제공하지 못하는 단점이 있다. 이에 반해 전기비저항 탐사는 댐체 표면에 전극을 설치하여 전류를 흘려준 후 전위분포를 측정하여 전기비저항 분포 단면을 작성하는 탐사법으로, 댐체 내부에 대한 영상을 제공해주기 때문에 댐체 안전진단에서 가장 널리 사용되고 있다. 다음으로 굴절법 탄성과 탐사와 표면파 탐사는 진동을 측정하여 댐체 내부 지반에 대한 영상을 획득하는 방법으로 누수나 균열이 발생한 곳에서는 댐체의 물성이 다소 이완되기 때문에 진동이 늦게 전달되는 특성을 이용하여 이상대를 탐지하는 방법이다. 마지막으로 탄성과 및 레이더 토모그래피 탐사는 의학에서 사용되는 컴퓨터 단층 촬영(CT)기법을 지반조사에 적용한 방법으로 두개의 시추공을 이용하여 두 시추공간 매질에 대한 매우 정밀한 영상을 획득하는 탐사방법이다.

4. 사례 1 - 제체의 안정성 평가를 위한 물리탐사 기술의 적용(김정호외, 2001; 임희대 외, 2004)

조사지역은 국내의 용수공급을 목적으로 축조된 한 사력 댐의 댐마루 부분에서 함몰 현상이 발생하였으며, 이로 인해 댐의 안정성에 대한 심각한 문제가 제기되었다. 문제가 발생한 댐을 중심으로 종합적인 물리탐사를 실시하였으며 조사의 목적은 댐 내부 구조를 영상화함으로써 안정성 확보를 위한 정밀안전진단의 기본자료를 제공함에 있었다.

문제가 발생한 사력댐의 안정성 검토를 위하여 전기비저항 탐사, GPR, CSMT(Controlled Source Magneto-telluric)의 3 종류의 전기/전자탐사와 탄성과 굴절법 탐사, 토모그래피의 두 종류의 탄성과 탐사 등 5 종류의 물리탐사법을 종합적으로 적용하여 함몰이 발생한 부분의 정밀 영상의 획득으로부터, 중심점토를 포함하는 댐체 내부, 하부 지반의 구조, 댐체 하류부의 구조까지 등을 포함함으로써 현재의 상태는 물론 문제 발생의 원인까지 규명하고자 하였다.

전기비저항 탐사는 제체의 안전진단에 가장 널리 사용되는 물리탐사법 중의 하나이다. 그러나 전기비저항 탐사법은 주로 제체의 마루부에 수행되는 2차원 탐사인 반면, 제체는 3차원 구조물이다. 한편, 2차원 탐사자료의 해석은 주향방향으로 전기비저항이 일정하다고 가정하는 2.5차원 모델링 및 역산 프로그램이 주로 사용되고 있다. 하지만 제체의 마루부 수행되는 전기비저항 탐사에서 축선의 방향은 제체와 평행한 종방향이며, 이에 수직인 횡방향으로의 물성 변화는 물론 지형적인 변화가 또한 크다. 따라서 해석에 사용되는 2차원 가정에 위배된다. 이러한 가정상의 모순에도 불구하고 마루부에서 수행되는 전기

비저항 탐사는 매우 효과적으로 누수구간의 분포양상을 제시해준다. 이러한 제체의 기하학적 형상과 2차원 가정에서 위배되는 전기비저항 탐사자료의 왜곡은 이미 이명종 등(2000)에 의해 분석된 바 있다.

따라서 이러한 문제를 해결하고 제체의 수평적 누수 유로 탐지 및 수직적 물성변화를 정밀하게 파악할 수 있는 3차원 전기비저항 탐사가 요구된다. 그러나 조사지역과 같이 한정된 측선과 자료를 이용하여 댐의 3차원 구조를 반영한 3차원 역산을 수행하기 위해서는 그림 2와 같은 유한요소 격자 모형과 역산 모형을 설정하여 해석하였다. 이러한 방법은 역산 수행시 탐사의 주 대상이 되는 측선 하부의 중심점도 부분의 전기비저항 영상이 이를 싸고 있는 필터존에 의한 효과가 포함되어 있는 왜곡된 영상을 제거할 수 있다는 점에서 커다란 장점을 갖는다.

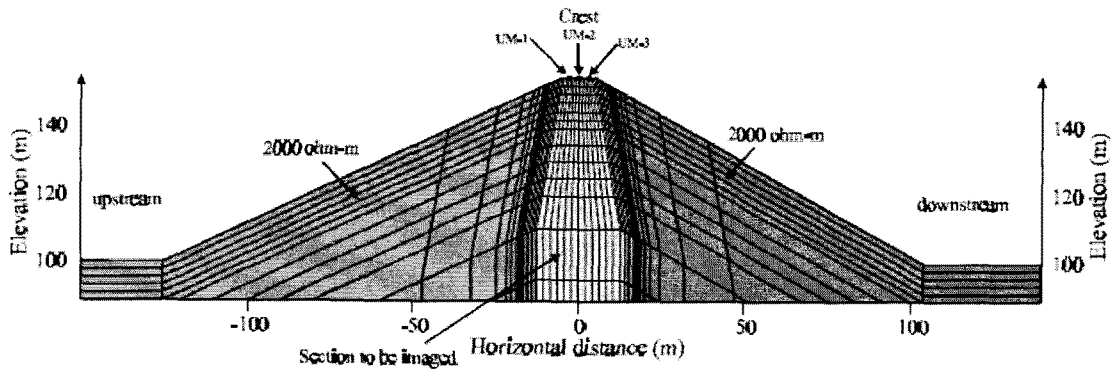


그림 2. 전기비저항 탐사자료의 3차원 해석을 위한 유한요소 격자 및 역산 모형의 단면도

탄성과 탐사와 전기, 전자 탐사는 탄성과 속도와 전기비저항이라는 서로 다른 물리적인 성질로 지하를 영상화하므로 두 영상의 비교에 의하여 좀 더 정확한 지하 매질의 상태에 대한 유추를 가능하게 한다. 그림 3은 3차원 전기비저항 탐사 영상과 탄성파 토모그래피 결과가 매우 잘 부합되고 있음을 보이고 있다. 특히 물의 포화도가 낮은 저수수위 부근의 높은 전기비저항과 그 하부의 경계면과 700 m/sec와 1,300 m/sec 탄성파 속도의 경계면이 거의 일치하고 있을 뿐 아니라 심부의 1,800 m/sec의 고속도층과 1,600 m/sec의 경계면과 160 ohm-m 전기비저항 등고선의 모양이 거의 동일하게 나타나고 있다.

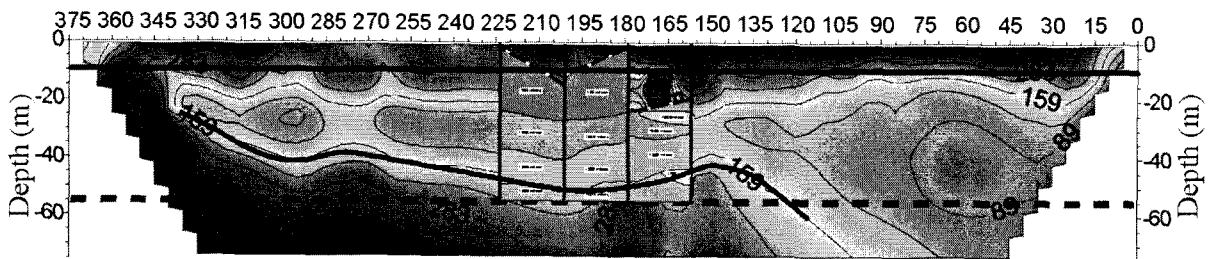


그림 3. 전기비저항 탐사자료를 3차원 역산하여 얻은 전기비저항 영상(a)과 탄성파 토모그래피 결과 얻어진 속도 분포와 결과비교(b). 그림에서 점선은 터파기선을, 실선은 탐사 당시의 저수수위를 의미한다(김정호외, 2001).

그림 4는 각종 물리탐사에서 확인된 이상대의 분포를 함께 도시한 것으로 모든 물리탐사방법이 모두 동원된 댐마루 부분에서는 개개의 물리탐사에 의해 드러난 이상대의 위치가 거의 일치하고 있다. 이상대의 분포는 연약지반이 위치한 부분과 상당한 규모의 함몰이 발생한 댐의 중앙부분으로 나눌 수 있다. 이러한 결과로서 댐의 안정성 검토를 위하여 다양한 방법의 물리탐사를 종합적으로 적용함이 매우 효과적임을 알 수 있었다.

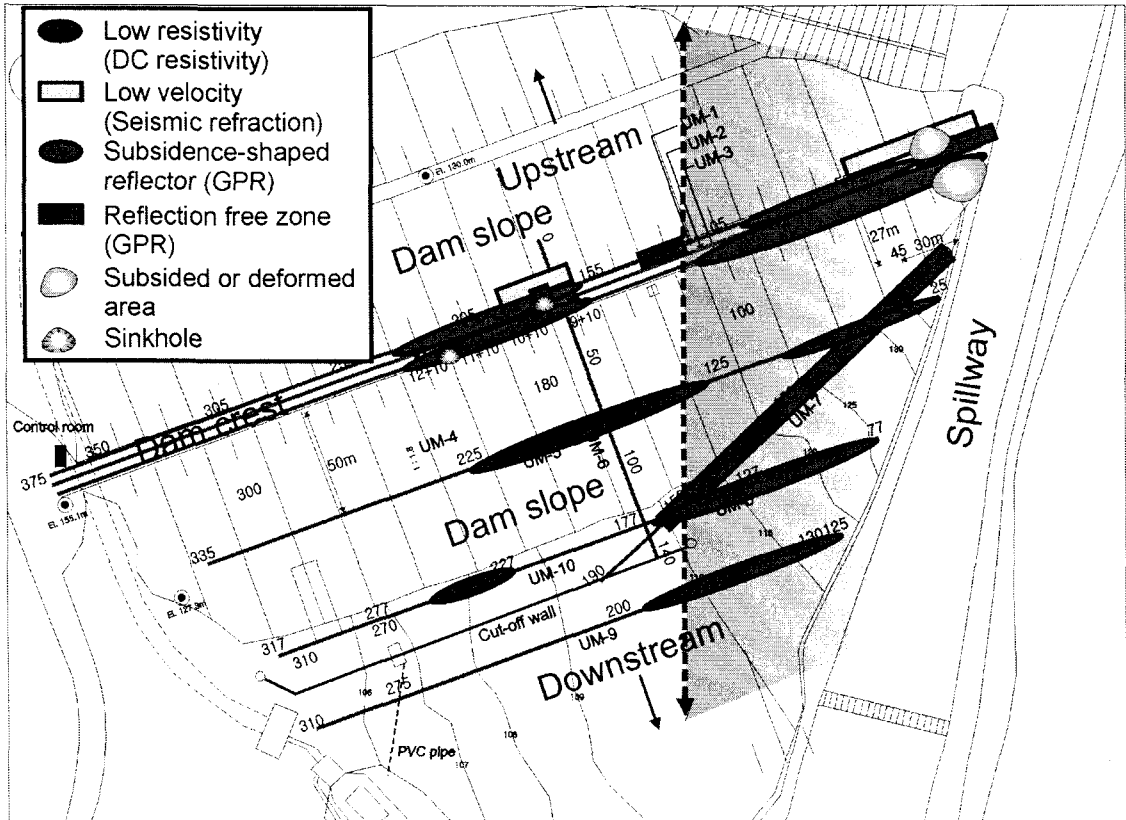


그림 4. 종합 물리탐사 결과에서 나타난 이상대의 분포.

5. 사례 2 - 저수지 유지관리를 위한 전기비저항 모니터링의 응용(박삼규외, 2005)

정기적으로 실시되는 정밀안전진단은 누수현상 등을 조기에 발견하기 어렵고, 누수현상이 계속 진행됨에 따라 제체의 안정성에도 큰 영향을 미치게 된다. 또한 누수현상이 상당히 진행된 후에 발견이 되면 이를 방지하기 위한 대책 공사비가 증가되어 경제적으로 큰 손실을 가져오게 된다. 이러한 관점에서 볼 때, 노후화된 저수지의 누수현상을 조기에 발견하여 자연재해를 사전에 예방하고, 수리시설물의 보수 및 보강대책을 조기에 수립함으로써 개보수 공사비를 절감하는 유지관리 체계가 절실히 요구되고 있다. 따라서 노후화된 저수지를 대상으로 전기비저항 등 측정 시스템을 설치하여 주기적으로 측정된 결과를 비교 분석하여 제체의 누수현상 및 진행상태를 파악하여 조기에 보수·보강대책을 마련함으로써 자연재해를 사전에 방지 할 수 있을 것이다.

이 연구내용은 전기비저항/SP 측정 시스템을 제체의 상부에 설치하고, 측선상에 사전조사에서 제체 중에 누수가능성이 높거나 취약한 부분을 중심으로 수위계, 간극수압계, 지중경사계 등을 매설하여 그 결과를 전기비저항 탐사 결과와 함께 해석한 사례로서 최근의 물리탐사 기법인 모니터링 기법을 적용하여 제체의 안정성 검토에 활용한 사례이다(박삼규외, 2005).

그림 5은 3회에 걸쳐 전기비저항을 측정된 결과를 나타내고 있다. Phase 1은 2004년 8월 21일, Phase 2는 2004년 10월 4일, Phase 3은 2004년 11월 19일에 전기비저항을 측정하여 얻은 자료를 역 해석을 통해 구한 전기비저항 영상이다. 이들 영상에 의하면 제체 댐마루에서 지반의 경계부까지 성토로 구성된 층에서는 저비저항대가 형성 되어 있으며, 좌측하단에 원 지반으로 판단되는 영역에서는 상대적으로 높은 전기비저항을 나타내고 있다. 또 Phase 1과 Phase 2의 전기비저항 분포도에서는 그 값의 차이가 거의 없지만, Phase 3에서는 전반적으로 전기비저항이 낮아지는 경향을 보인다. 이러한 전기비저항 변화를 정확하게 분석하기 위하여 Phase 1을 기준으로 Phase 2와 Phase 3에 대해서 전기비저항 변화비(resistivity ratio)를 구하여 그림 6에 나타내고 있다.

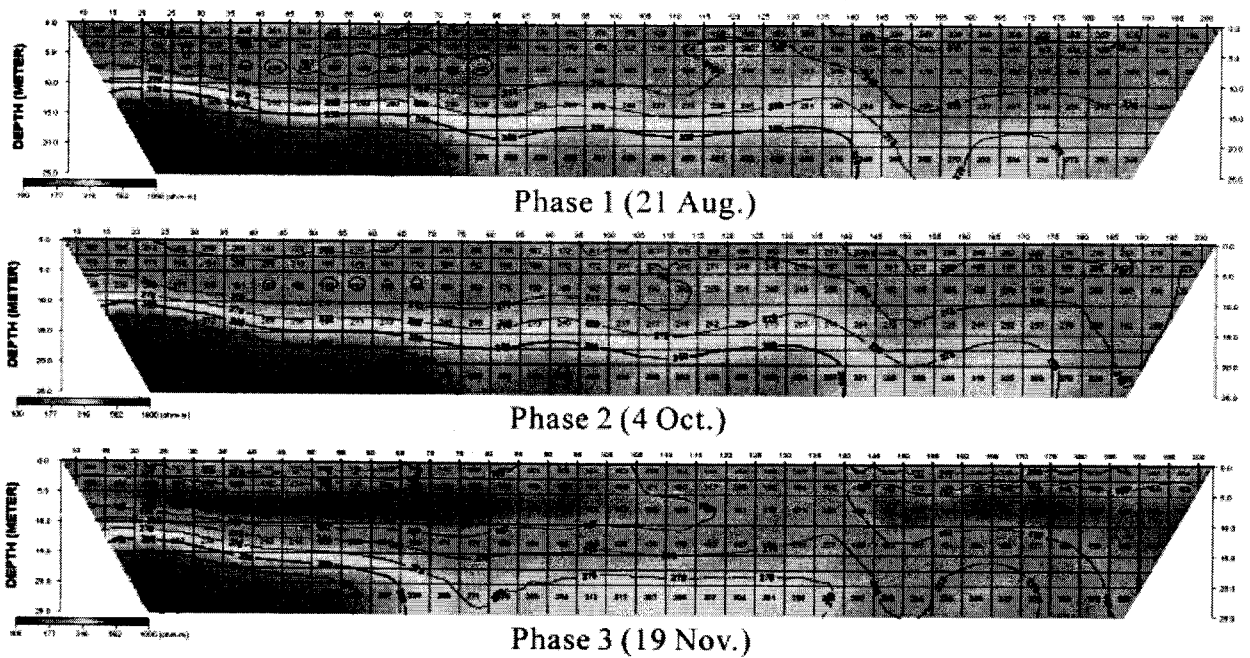


그림 5. Phase 별 전기비저항 영상(박삼규외, 2005)

그림 6에서 전기비저항의 변화비는 Phase 2를 Phase 1로 나눈 것으로 그 값이 1이면 전기비저항의 변화가 없는 것을 의미하고, 1보다 크면 전기비저항이 높아진 것이고, 1보다 작으면 전기비저항이 낮아진 것이다. Phase 2를 Phase 1로 나눈 것을 보면 전체적으로 전기비저항이 거의 변화가 없다. 그러나 Phase 3을 Phase 1로 나눈 것을 보면 전체적으로 전기비저항 변화비가 1보다 작은 값을 나타내고 있어 전기비저항이 감소했음을 알 수 있다. 특히, 측정거리 65~95 m 구간의 성토 층과 지반의 경계부에서는 전기비저항이 약 30% 정도 감소한 것으로 나타난다. 전기비저항이 감소한 것에 대해서는 여러 가지 원인으로 생각할 수 있지만, 체체 전체의 전기비저항이 감소하고 있어 강우나 저수위 상승에 의한 체체의 함수비 변화가 그 원인으로 나타났다.

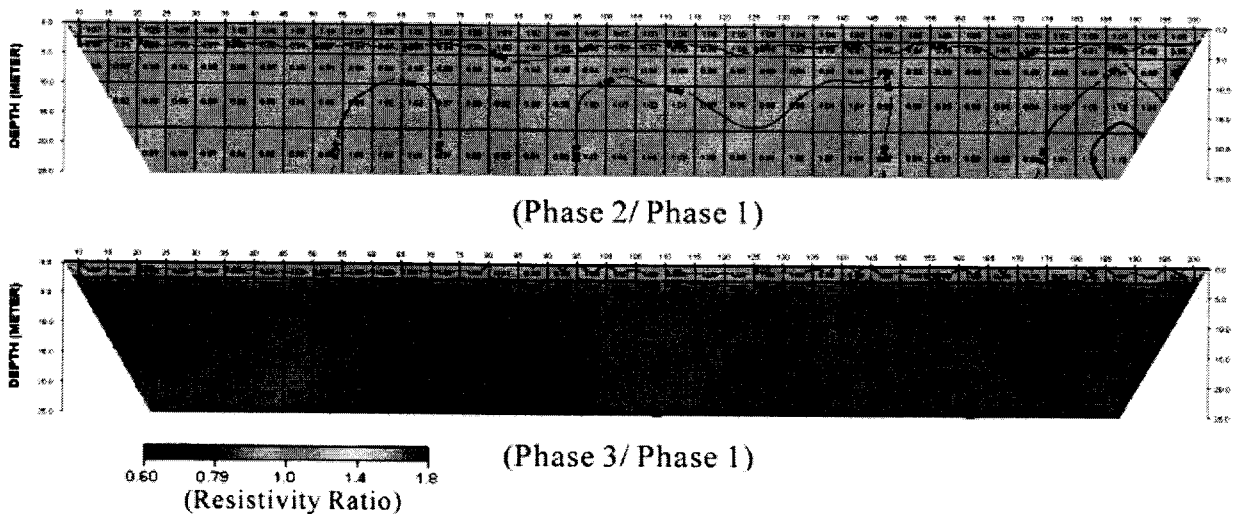


그림 6. 전기비저항 변화비

한편, 전기비저항 모니터링 측선 상에 설치한 체체 수위 및 간극수압의 계측결과는 초기 값을 기준으로 Phase 1에서 Phase 3으로 갈수록 수위가 약간 상승하고 있으며, 이에 따라 간극수압도 같이 상승

하고 있다. 이들 계측기는 제체 댐마루의 담수 외측에 설치되어 있다. 또한 전기비저항 모니터링 측선 상에 설치되어 있는 지중경사계의 계측결과에서 댐마루의 깊이 20 m까지의 변위량이 $\pm 5\text{mm}$ 이내의 범위로 분포하고 있어 계측기의 오차범위($\pm 6\text{ mm per } 25\text{ m}$) 안에 속하고 있다.

따라서 전기비저항 모니터링 결과에 의하면 Phase 3에서 전체적으로 전기비저항이 낮아지고 있는데, 이러한 원인이 제체의 누수현상과는 무관할 것으로 판단된다. 그 이유는 일반적으로 저수지 제체의 누수현상은 일부 구간에서 좁은 범위로 발생되어 점점 확장되어 가는데 비해서 Phase 3의 전기비저항 모니터링 결과는 전체적으로 전기비저항이 낮아지고 있는데, 이것은 계측 결과에서 누수현상과 관련된 간극수압의 증가 및 지중변위량이 관측되지 못했기 때문이다.

6. 사례 3 - 저수지 누수유로 파악을 위한 측선간 전기비저항 토모그래피 탐사 (조인기 외, 2007)

그림 7은 일반적인 저수지의 구조를 나타낸 것이다. 상류 및 하류 사면은 주로 주변의 토취장에 채취된 토사로 시공되며, 저수지에서 가장 중요한 중심점토는 투수율이 낮은 점토로 시공된다. 이제까지 저수지 누수조사는 제체의 마루부에서 수행되는 쌍극자 배열 전기비저항 탐사를 위주로 수행되었으나, 이 결과는 측선하부의 전기비저항 분포단면만을 제공하므로 누수유로의 평면적 분포를 파악하기에는 한계가 있다. 한편 토모그래피 탐사는 두 개의 수직방향으로 굴착된 시추공 사이의 물성 분포 영상을 획득하는 방법이다. 하지만 제체의 누수유로 탐지를 위해서는 제체의 상류부와 하류부 사이의 영역에 대한 평면적 전기비저항 분포를 파악하는 것이 효과적이므로 여기서는 평면에서 수행되는 측선간 전기비저항 토모그래피법에 관하여 기술하였다(조인기, 2007). 측선간 토모그래피 조사를 위해서는 x-y 평면상에 제체의 내제사면과 외제사면에 제체에 평행하게 2개의 측선을 설정하였다. 이 때 내제사면의 측선은 저수지 물과 사면의 경계부에 설치되며, 외제사면의 측선은 내제사면의 측선과 가능하면 유사한 수직적 위치에 설치였다.

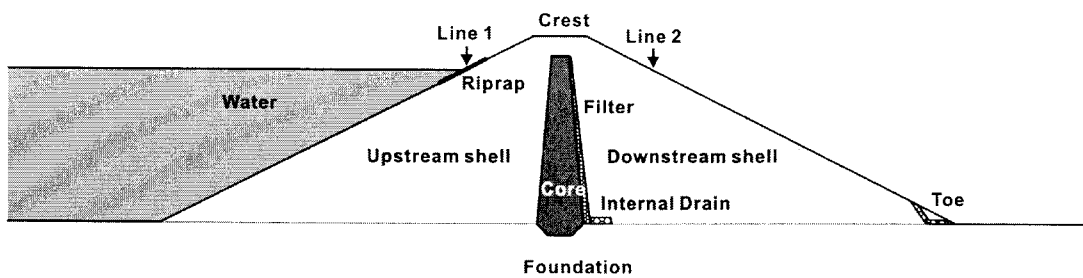


그림 7. 측선간 토모그래피 측선 및 저수지 단면도

측선간 토모그래피 탐사의 목적은 이 두 측선 사이 영역의 전기비저항 분포 영상을 획득하는 것이다. 앞서 설명한 바와 같이 전기비저항이 z-방향으로 변화가 없다고 가정하고, 영상법(image method)을 적용하면 무한공간 내에서의 토모그래피법에 해당된다. 따라서 조사 방법은 일반적인 시추공 토모그래피 방법과 유사하게 inline과 crossline 탐사로 이루어진다.

제체 내부의 전기비저항의 평면적 분포 양상을 파악하기 위하여 강원도에 소재한 ○○저수지에 측선간 전기비저항 토모그래피법을 적용한 사례이다. 제체의 길이 300 m, 제고 20 m 인 농업용수 저수지로 중심점토가 시공되어 있으며, 아직까지는 대량 누수가 일어나지 않는 건전한 제체지만 국지적으로 누수의 징후가 외관조사에서 확인된 바 있다. 제체의 크기 및 탐사변수는 표 2에 정리하였다.

표 2. 제체의 크기 및 탐사 변수

Dam specification		Survey parameters			
Length (m)	Height(m)	Date of survey	Line length(m)	Dipole spacing(m)	Line spacing(m)
300	20	July, 9, 2005.	185	5	20

2차원 전기비저항 탐사를 통하여 누수경로를 탐지하는 경우에는 통상적으로 제체에 평행한 여러 개의 측선에 대한 2차원 전기비저항 탐사를 실시하고, 각 2차원 전기비저항 단면의 누수 구간을 연결하여 누수경로를 해석하게 된다. 그러나 그림 8에 나타난 바와 같이 상류사면, 제체 마루, 하류사면에서 얻어진 전기비저항 단면에서는 저비저항대의 연결성을 찾기가 쉽지 않다. 이는 제체의 구성물질 예를 들어 중심점토나 사면 보호를 위하여 설치된 사석 등이 각 측선에서 획득되는 전기비저항 자료에 미치는 영향이 서로 다르기 때문인 것으로 생각된다. 즉 상류사면에서 측정된 전기비저항은 저수지물과 사석의 영향을 많이 받게 되며, 하류사면의 전기비저항은 사면을 구성하는 토사와 원지반의 영향이 크게 작용한다. 또한 제체 마루의 전기비저항은 중심점토의 영향을 가장 많이 받는 측선일 것이다. 이와 같은 이유 때문에 비록 평행하게 설정된 측선이지만 이상대의 연결성이 부족할 수밖에 없으며, 이는 누수경로의 파악을 어렵게 하는 주된 요인 중의 하나가 된다.

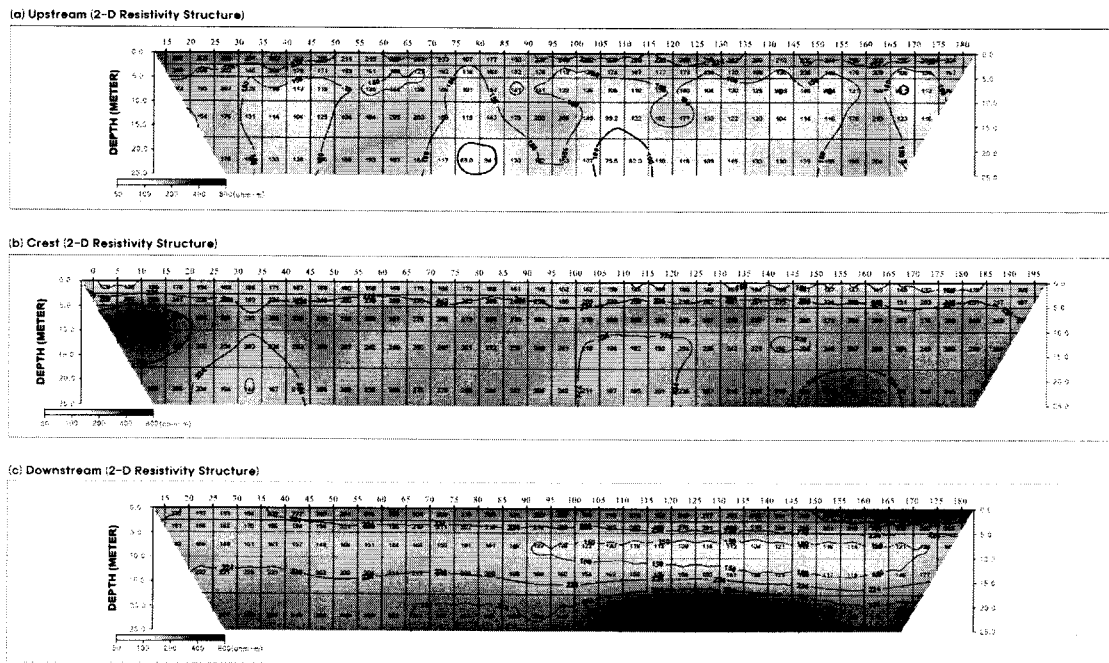


그림 8. 측선별 전기비저항 영상 (a)상류사면, (b)제체 마루, (c)하류사면

그림 9는 저수지 상류사면과 하류사면에 설치된 측선에서 crossline과 inline 조사를 통하여 획득된 전기비저항 탐사자료를 역산하여 얻은 전기비저항 토모그래피 영상이다. 전반적으로 중앙부에 중심점토로 해석되는 100 ohm-m 이하의 저비저항대가 제체에 평행하게 분포하고 있다. 이 중심점토는 제체의 차수효과를 높이는 중요한 역할을 하므로 중심점토의 파손은 저수지의 누수가 증가함을 의미하며, 25~40 m 구간 및 95~105 m 구간에서 중심점토의 연결성이 손상되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 중심점토가 훼손된 구간은 제체 마루에서 수행된 전기비저항 탐사결과에서는 저비저항대로 나타나고 있다. 특이한 점은 제체마루에서 얻어진 전기비저항 단면에서는 누수 위험구간이 저비저항 이상대로 나타나는데 반하여 측선간 토모그래피 영상의 중심점토 부분에서는 오히려 고비저항대로 나타나고

있다. 이는 중심점토의 유실로 인하여 점토함량이 감소하기 때문이며, 중심점토에서 유실된 점토는 하류사면 쪽으로 분산되어 하류사면의 점토함량을 증가시키며, 중심점토의 차수효과 저하로 인하여 함수율이 증가가 예상된다. 점토함량과 함수율의 증가는 모두 전기비저항을 감소시키는 역할을 하게 된다.

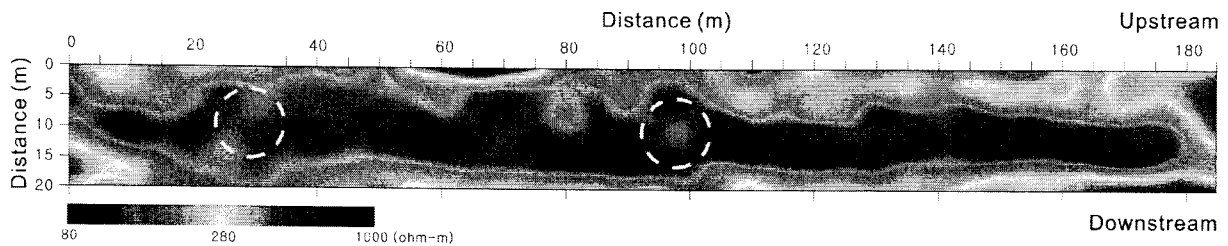


그림 9. 축선간 토모그래피 탐사 결과 (Cho and Yoem, 2007)

이 제체의 경우에는 상류부 30~40 m 지점에서 하류부 25m 지점을 연하는 경로와 상류부 95~105 m 지점에서 하류부 105 m 지점을 연결하는 선상을 따라 주된 누수유로가 발달된 것으로 해석된다. 물론 내제 사면의 경우에는 거의 물에 의해 포화되어 있기 때문에 누수가 특정 지점을 통하여 이루어지는 않을 것이지만, 중심부분에서는 중심점토가 훼손된 부분을 통하여 집중적으로 누수가 일어날 것으로 예상된다. 일단 중심점토를 통과한 누수는 하류사면으로 들어와서는 다시 넓게 분산되어 흐르는 것으로 해석된다. 이 제체의 경우 외관조사 결과, 하류부 25 m 지점을 중심으로 습지식물이 군락을 이루고, 지면의 습윤도가 다른 지역에 비하여 높은 누수 징후가 뚜렷하게 나타나고 있으며, 차후에 트렌치 작업을 통하여 대규모 누수를 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 전기비저항 탐사에서 얻어진 결과와 잘 일치하고 있어 제체 누수문제에 전기비저항 탐사의 효율성을 뒷받침해 준다고 볼 수 있다.

7. 향후의 전망

지금까지 간략하나마 누수탐지에 효과적으로 적용되고 있는 물리탐사 분야 중 전기비저항탐사 위주로 최신 적용 사례에 대하여 살펴보았다. 국내에 산재되어 있는 수리시설물인 저수지 및 제방은 대부분 노후화되어 누수의 위험을 안고 있다. 누수는 인명과 재산에 막대한 피해를 주는 제체의 파괴로 이어질 수 있으며, 이를 방지하기 위해서는 체계적인 정밀안전진단과 이에 근거한 유지보수가 적기에 이루어져야 한다.

누수탐지에 널리 사용되고 있는 2차원 전기비저항탐사법은 매우 효과적인 방법임에는 틀림없다. 그러나 제체의 기하학적 3차원 구조에 기인한 지형효과 및 제체를 구성하고 있는 물성대비로 인하여 해석상에 왜곡된 결과로 해석을 어렵게 할 수 있는 요인이 있을 수 있으므로 보다 효과적으로 해석하기 위해서는 3차원 탐사 또는 모니터링 기법 등으로 발전되어야 한다.

한편, 외국에 비해 국내의 경우, 아직까지 댐, 제방등의 안정성 평가를 위해 다양한 조사가 이루어지고 있지 않다. 보다 정량적인 결과 도출을 위해서는 물리탐사 뿐만 아니라 물리탐사 및 계측 외에 다양한 방법으로 접근함으로써 안정성 및 유지관리 측면에서 그 효과가 클 것으로 기대된다.

선진 외국의 경우 댐의 안전도 조사 기법 중 물리탐사 기법들은 어느 정도 규정화 되어 관리되고 있는 실정이나 국내의 경우는 전기비저항 탐사 이외에 뚜렷한 규정화가 되어 있지 않아 지구물리탐사의 신뢰성을 저하시키고 있으며, 품질관리도 전혀 이루어지지 않고 있는 실정이다. 이에 우선적으로 표준화가 이루어져야 할 것이라고 판단된다.

참고문헌

1. 건설교통부(1993), “댐 시설기준”
2. 건설교통부(1994), “댐 시설 유지관리 기준”
3. 건설교통부(2001), “댐 설계기준”
4. 박삼규, 김정호, 서구원(2005), 저수지 유지관리를 위한 전기비저항 모니터링 기법 응용, 물리탐사, Vol. 8, No. 2, p. 177~183.
5. 송성호, 이규상, 김진호, 장의웅(2000), “SP 및 단극배열 전기비저항 탐사를 이용한 방조제 누수지점 탐지”, 한국지구물리탐사학회 2000년 농업 현장에 필요한 물리탐사 기술 심포지움, pp.19~40
6. 원종근, 송성호(1999), “제방누수조사에의 물리탐사기법의 활용(쌍극자배열 전기비저항탐사와 SP탐사를 중심으로)”, 한국지구물리탐사학회 1999년도 제2회 학술발표회 건설현장에 필요한 물리탐사기술 심포지움, pp. 240~257
7. 이명종, 김정호, 정승환, 송윤호(2000), 2차원 및 3차원 전기비저항탐사를 이용한 제방 누수조사, 한국 물리탐사학회 제2회 특별심포지움 논문집, p. 41~53.
8. 임희대(2003), “사력댐의 안정성 분석을 위한 물리탐사 기법 응용 및 보수방안” 댐안전 국제심포지움, 한국대담회
9. 정승환, 김정호, 양재만, 한규언, 김영웅(1992), 전기비저항 탐사에 의한 제방의 누수구간 탐지, 지질 공학, 2, p. 47~57.
10. 조인기, 강형재, 김기주(2006), 저수지 3차원 구조에 의한 전기비저항 탐사 자료의 왜곡, 물리탐사, Vol. 9, No. 4, p. 291~298.
11. 한국수자원공사 운문댐관리단(2000), “경북 청도군 운문댐 정밀안전진단 보고서”,
12. 한국수자원공사 댐관리부(1988), “기존댐의 안전도 평가”
13. 한국수자원공사(1989), “댐안전도 지침”
14. Carlsten, S., Johansson, S. Worman, A.(1995), "Radar techniques for indicating internal erosion in embankment dams", Journal of Applied Geophysics, 33, pp.143~156
15. Frasher. A., Nishani. P., Kapllani. L., Xinxo. E., Canga B. and Dhims. F.(1998), "Seismic and geoelectric tomography surveys of dams in Albania" The Leading Edge, Dec, 1384~1388
16. Huei-Dae Lim, Ki Seog Kim, Jung ho Kim, Hyoung-Seok Kim and Byung-hyun Oh(2004), "Electrical Resistivity Imaging For Comprehensive Evaluation of Earth Rock Dam Seepage and Safety", ICOLD 72nd Annual Meeting ,May 16-22, 2004 Seoul, Korea, pp.19.
17. In-Ky Cho and Ji-Yeon Yeom(2007), Crossline resistivity tomography for the delineation of anomalous seepage pathways in an embankment dam, Geophysics, Vol. 72. No.2, p. G31~G38.
18. Jong-Ho Kim, Myeong-Jong Yi, Yoonho Song, Soon Jee Seol(2001), “Application of Geophysical Methods to The Safety Analysis of an Earth Dam”, EAGE 63th Conference & Technical Exhibition, Amsterdam, The Netherlands, pp. 11~15
19. Karastathis, V. K., Karmis, P. N., Drakatos, G. K., and Stavrakakis, G. N(2001), "Example of the Marathon Dam by the use of geophysical methods", EAGE 63th Conference & Technical Exhibition, Amsterdam, The Netherlands, pp. 134