

저수지의 유지관리를 위한 전기비저항모니터링 기법 응용

박삼규¹⁾ · 김정호¹⁾ · 서구원²⁾

Application of Electrical Resistivity Monitoring Technique to Maintenance of Embankments

Sam Gyu Park¹⁾, Jung-Ho Kim¹⁾ and Goo Won Seo²⁾

요 약 : 이 논문에서는 수리시설물을 효율적으로 유지관리하기 위하여 저수지 제체에 계측 시스템을 설치하고, 전기비저항, 수위, 간극수압 및 지중변위를 주기적으로 모니터링하여 그 결과를 분석함으로써 제체의 누수현상 및 안정성 평가를 시도하였다. 저수지 제체의 댐마루에 설치된 전기비저항 측정 시스템으로부터 측정된 각 단계별 전기비저항의 변화영상을 구하고, 변화추이를 비교분석함으로써 누수현상을 정확하게 파악할 수 있었고, 수위, 간극수압 및 지중변위량의 자료를 종합적으로 해석함으로써 제체의 안정성을 평가할 수 있었다. 이러한 결과로부터 종래의 일시적으로 실시한 전기비저항탐사 결과로부터 누수현상을 파악하는 것보다 전기비저항 등 모니터링 계측시스템을 설치하여 운용하는 것이 수리시설물을 효율적이고 경제적으로 유지관리하기 위한 방법임을 알았다.

주요어 : 저수지, 누수탐지, 전기비저항, 모니터링 계측시스템

Abstract : The subject of this paper is research into the application of electrical resistivity monitoring to detecting the water leakage of water utilization facilities. For this purpose, we installed a comprehensive monitoring system consisting of resistivity measurement, inclinometer, piezometer, and water gauge at an embankment. Using this monitoring system, we monitored the various kinds of measurement data and compared the resistivity structures and that of hydrological and engineering data in order to investigate the water leakage and stability of the embankment. The variant images of electrical resistivity at the embankment were provided from the monitoring data and we could accurately locate the portion of which resistivities have sharply changed. Furthermore, we could estimate the stability of the embankment more effectively and quantitatively by jointly interpreting the monitoring data of resistivity, water level, pore water pressure, and subsurface displacement. The monitoring experiments in this study led us to the conclusion that for the efficient maintenance of the water utilization facilities, monitoring the resistivity data and hydrological data would be much more preferable to performing the just one-time measurements.

Keywords : embankment, water leakage detection, electrical resistivity, monitoring measurement system

서 론

우리나라는 옛날부터 농경문화가 발달되어 농업용수를 확보하기 위한 많은 저수지를 축조해 왔다. 국토의 약 70%가 산지이기 때문에 지형이 비교적 험한 우리나라는 강우의 유출이 빨라 토지의 보수력이 낮기 때문에 저수지는 농업용수를 안전하게 확보하는 수단이었다. 그러나 현재는 축조 후 오래된 수리시설물이 많고, 이들 대부분의 제체가 노후화 되어 누수현상으로 그 안정성이 우려되고 있는 실정이다.

실제로 저수지의 17,913개소 중 9,706개소(54%)가 해방 이전에 축조된 시설물로 상당히 노후화 되어 있다. 이렇게 노후화된 수리시설물은 집중호우 및 태풍에 취약하여 연평균 약

612억원의 피해가 발생되고 있다(농림부, 2001). 수리시설물의 피해 양상도 해마다 규모가 점점 증가하고 있으며, 이러한 원인은 지구온난화현상과 관련된 기상이변으로 국지성 폭우 등으로 자연재해가 늘어나고 있기 때문으로 생각된다.

수리시설물은 그 특성상 시간이 경과함에 따라 자중 및 외력 등에 의해서 노후화 되어 구조가 취약해지거나 성능이 저하되고 이에 따라 시설물의 안전성에 문제가 발생된다. 수리시설물의 안정성에 가장 큰 영향을 미치는 누수현상은 제체 전면에 걸쳐 일어나기보다는 국부적으로 일어나는 경우가 대부분이고, 제체의 파괴나 대규모 누수 등에 의한 재해에 직접적으로 영향을 미치는 침투수는 총상으로 존재하기보다는 수맥상으로 존재하는 경우가 많다(박삼규, 김희준, 1999). 수맥은

*2005년 4월 21일 접수

1) 한국지질자원연구원 지반안전연구부(Geotechnical Engineering Division, Korea Institute of Geoscience and Resources (KIGAM))
samgyu@kigam.re.kr

2) 농업기반공사(Korea Agricultural & Rural Infrastructure Corporation (KARICO))

평상시에는 주변의 제체에 아무런 영향을 미치지 않지만, 집중 호우나 태풍 등으로 수위가 급상승하게 되면 수맥 내의 수압도 상승한다. 이러한 수맥 내의 수압 상승은 수맥을 둘러싸고 있는 체류성의 물을 매개로 하여 주변토괴에 높은 간극수압을 발생시키고 국부적으로 흙 입자의 이동을 일으킨다. 이러한 현상을 파이핑(piping)이라 부르는데, 발생초기에는 국부적으로 일어나지만 점차적으로 대규모의 누수 및 제체의 파괴까지 발전하여 큰 재해를 유발시킨다. 수리시설물 제체의 누수현상을 탐지하기 위해 각종 물리탐사법이 적용되고 있는데 국내에서는 주로 전기비저항탐사가 사용되어 왔다(정승환 등, 1992; 이명중 등, 2000; 송성호 등, 2000, 2001; 박삼규 등, 2002).

물리탐사에 의한 저수지의 누수탐지는 일시적으로 탐사를 실시하여 전기비저항의 분포양상을 해석하여 누수구간을 판정하고 있었지만, 제체의 누수현상에 대해서 정밀하게 분석하여 보수·보강 대책을 세우기에는 부족한 점이 많다. 특히 제체의 중심부는 함수상태가 높은 중심점토의 분포로 저비저항대를 보여 이 구간에 대한 누수여부를 판정하기가 어렵다. 따라서 시추조사와 육안관찰로 누수구간을 확인하여 이들 자료를

종합적으로 해석하여 누수구간을 판정하고 있는 실정이다. 또한 조사 당시 누수현상을 발견한다 하더라도 과거의 누수시기와 앞으로의 누수구간 진행상태에 대해서 예측하기가 어려워 일반적으로 누수구간을 과대하게 설정하여 보수·보강 대책을 세우는 경우가 많아 경제적이고 효율적인 유지관리 기법 개발의 필요성이 요구되고 있다.

이 논문은 수리시설물을 효율적으로 유지관리 하기 위하여 저수지 제체에 계측 시스템을 설치하여 주기적으로 전기비저항, 수위, 간극수압 및 지중변위량의 자료를 모니터링하고, 그 결과를 분석함으로써 제체 누수현상 등 안정성을 평가한 사례에 대해서 보고하고자 한다.

저수지의 유지관리 체계

정밀안전진단

현재 저수지는 규모와 크기에 따라 1종, 2종 및 3종의 수리시설물로 구분하고 있으며, 안전점검 및 정밀안전진단을 실시하고 있다. 안전점검은 1종, 2종 및 3종 수리시설물을 대상으

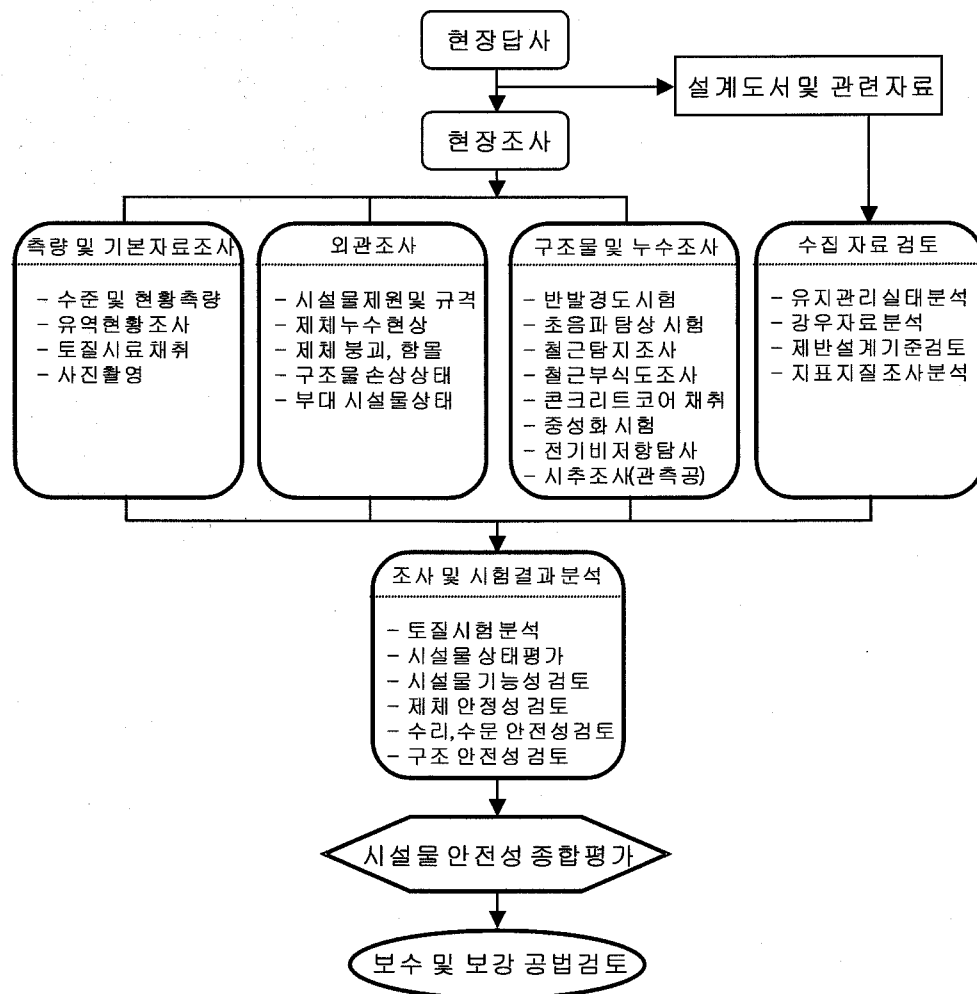


Fig. 1. Flowchart for the periodical investigation of embankment stability.

로 일상점검, 정기점검 및 긴급점검으로 구분하여 실시하고 있으며, 그 결과 재해 발생이 우려되어 긴급보수 및 보강이 필요한 시설에 대하여는 우선적으로 대책을 수립한다.

정밀안전진단은 1종 수리시설물을 대상으로 5년에 1회 이상 정기적으로 실시하고 있으며, 진단항목 및 흐름도는 Fig. 1에서 표시한 바와 같다. 현장답사로부터 조사계획을 수립하고 현장조사로 측량 및 기본 자료조사, 외관조사, 구조물 및 누수조사 등을 실시하여 조사 및 시험결과를 종합적으로 평가하여 안전상태가 양호한 시설과 개보수가 요구되는 시설로 판정한다.

정밀안전진단에 있어서 제체의 누수현상은 외관조사, 전기비저항탐사의 결과로부터 누수 취약구간을 추정하여, 시추조사 및 추적자시험 등으로 누수범위 및 유동경로를 확인한다. 노후화된 저수지의 경우 제체를 통한 누수현상은 대부분 육안조사로 확인할 수 있으며 누수부위가 저비저항대를 형성하고 있을 것으로 판단하여 누수 취약구간을 추정하고 있다. 그러나 침투수의 유로가 제체와 기반암의 경계면을 따라 형성되어 있을 때는 외관조사로서는 관찰할 수 없으며 전기비저항탐사 결과로 누수취약구간을 추정하여 시추조사로 확인한다. 시추조사에서는 표준관입시험 (SPT; Standard Penetration Test) 등을 통하여 제체의 토질특성을 조사함과 동시에 투수시험과 수위관찰 등으로 수리특성을 파악하고, 경우에 따라서는 추적자 시험으로 침투수의 유동경로를 추정한다.

제체의 누수특성

저수지는 농업용수를 확보하기 위해서 유수지 및 수혜면적이 넓고, 댐 터의 적지조건을 만족하는 곳에 제체를 축조하게 된다. 일반적인 제체의 구조는 Fig. 2에 표시한 바와 같이 기반암의 상부에 성토재를 이용하여 축조하고, 제체 내에 중심점토층을 형성시켜 제체의 안정성과 담수효과를 높인다. 저수지의 수위가 관리수위 이상으로 상승하게 되면 제체의 성토재는 불투수층이 아니기 때문에 저수지의 물이 성토재를 통해서 하류사면 쪽으로 흐르게 된다. 이 때 중심점토층을 통과한 침투수가 필터층을 통과하면서 침윤선이 급격히 떨어져 제체의 하

부로 흐르기 때문에 평상시의 제체 내의 침투수 흐름에 의해서는 사면붕괴 등의 위험이 없다.

우리나라의 저수지는 1945년 이전에 축조된 제체가 많고, 상당히 노후화 되어 침투수에 의한 누수현상이 발생하는 경우가 많다. 매년 실시하고 있는 저수지의 정밀안전진단 결과를 분석해보면, 주로 누수현상이 발생되고 있는 곳은 다음과 같이 크게 세 가지로 나눌 수 있다; (1) 기초지반과 성토층의 경계부, (2) 복통(저수지의 물을 빼내는 통로) 주변부, (3) 제체 양쪽 끝의 지반과 성토층의 경계부.

이러한 누수현상의 원인은 과거에 제체를 축조하는 과정에서 기초지반처리가 미흡했던 점을 들 수 있으며, 또한 저수지 구조물과 성토층의 경계부나 성토층과 지반의 경계부가 제체 특성상 취약한 부분이기 때문이다.

보수 · 보강대책

제체의 누수는 제체파괴나 사면붕괴 등 재해를 유발시키며, 영농이 곤란하게 되므로 근본적으로 누수를 차단하기 위한 적절한 보수 · 보강대책을 마련해야 한다. 일반적으로 제체의 누수대책으로는 제체단면의 확대, 차수벽 설치, 그라우팅 등을 고려할 수 있으며 기초지반을 통한 누수대책으로는 투수층에 차수판을 설치하던가 그라우팅을 하는 방법 등이 있다. 국내에서는 주로 그라우팅에 의한 보수 · 보강이 대부분이며, 많은 시공사례를 축적하고 있지만, 시공효과의 판정이 어려운 단점을 가지고 있다.

계축 시스템 설치

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 조기

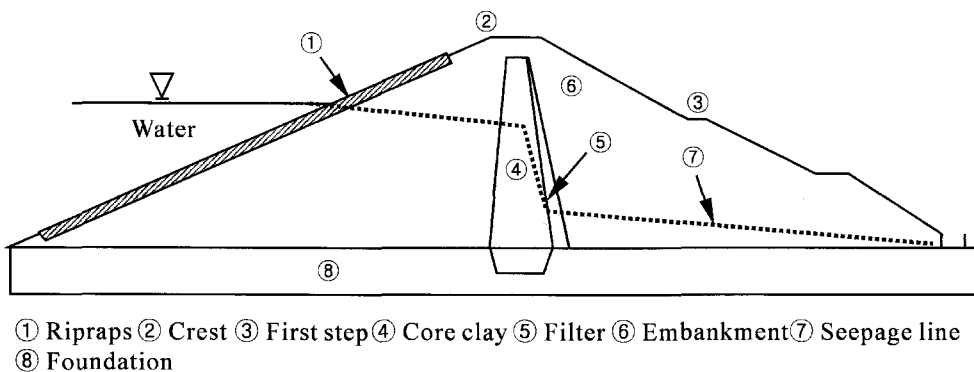


Fig. 2. Cross section of the embankment.

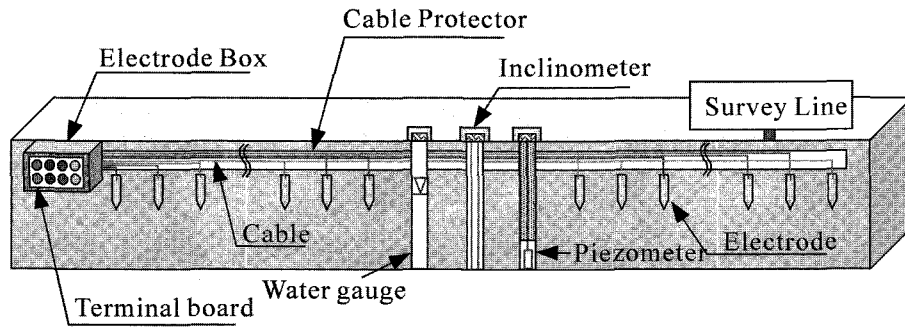


Fig. 3. Schematic view of the resistivity monitoring system in the embankment.

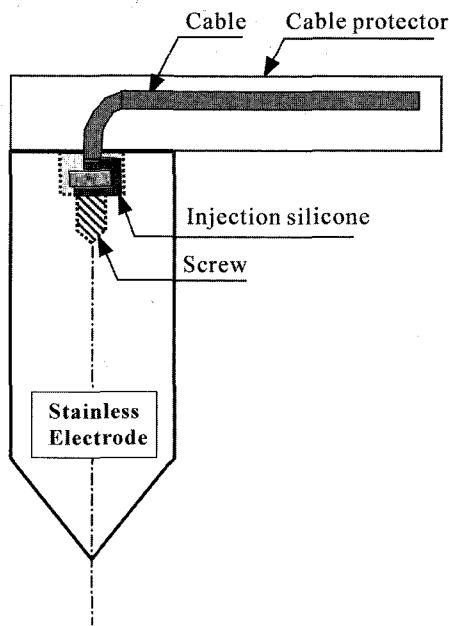


Fig. 4. Connection of the electrode with cable.

에 수립함으로써 개보수 공사비를 절감하는 유지관리 체계가 절실히 요구되고 있다. 따라서 노후화된 저수지를 대상으로 전기비저항 등 계측 시스템을 설치하여 주기적으로 측정된 결과를 비교 분석하여 체체의 누수현상 및 진행상태를 파악하여 조기에 보수·보강대책을 마련함으로써 자연재해를 사전에 방지할 수 있을 것이다.

Fig. 3은 저수지 체체에 설치한 전기비저항 시스템을 포함한 계측 시스템을 나타내고 있다. 우선 전기비저항탐사 및 현장답사의 사전조사를 통하여 전극간격과 계측기의 설치위치를 결정하였다. 실제 시스템 설치에 있어서는 저수지 체체 상부에 깊이 30 cm로 굴착하여 그 바닥에 전극을 5 m 간격으로 설치하고, 각 전극에 전선을 연결하여 전선보호관을 통하여 터미널 보드에 접지시켰다. 전극과 전선의 연결부는 공기와 물에 의한 부식을 방지하기 위하여 Fig. 4와 같이 실리콘으로 절연 및 방수처리를 하였으며, 모든 전극이 설치된 후에 굴착한 흙으로 뒤 메움을 하였다(Fig. 5). 전기비저항 측선상의 계측기는 사전조사에서 체체 중에 누수가능성이 높거나 가장 취약한 부분을

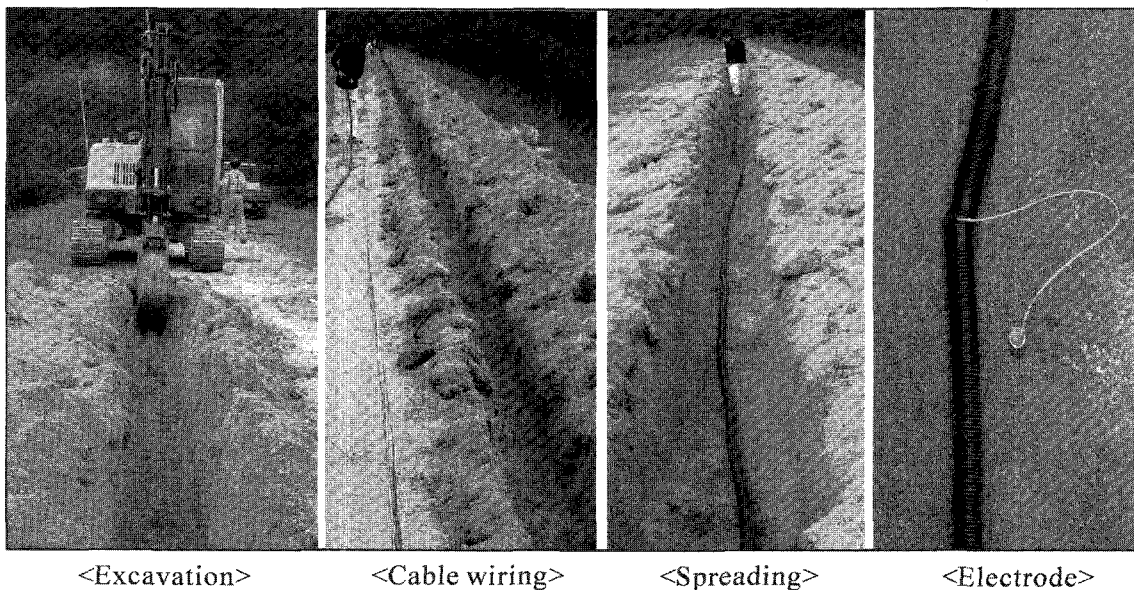


Fig. 5. Photos of the cable spread and electrodes.

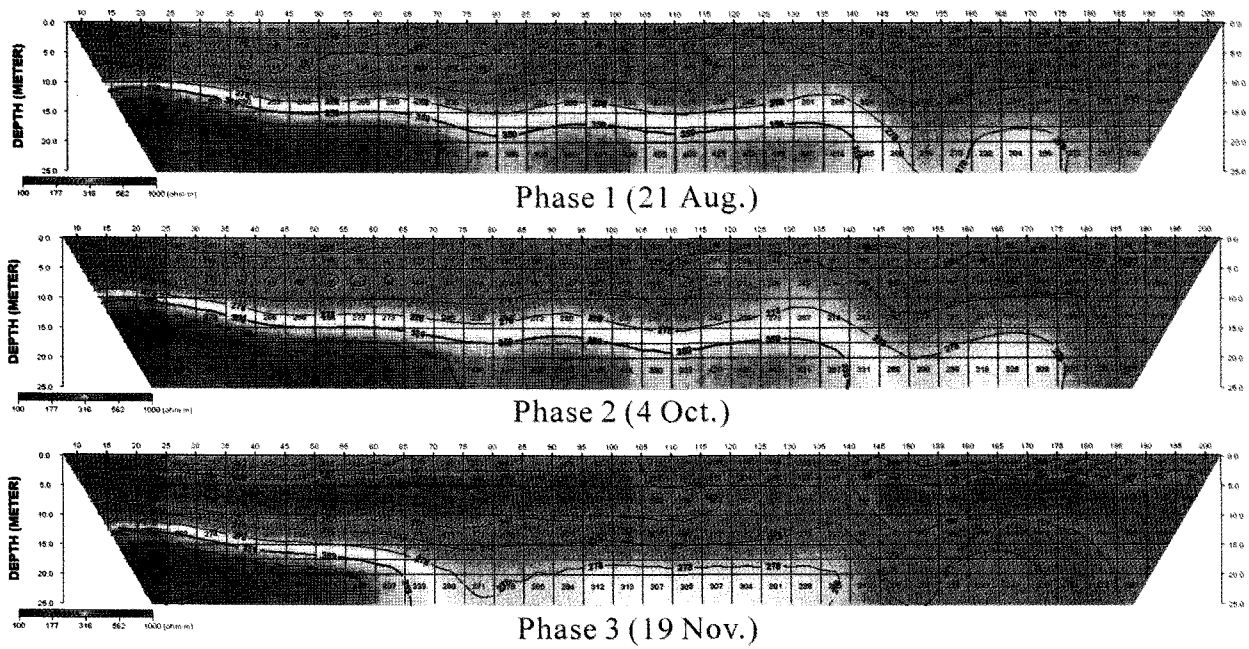


Fig. 6. Resistivity structures for each phase.

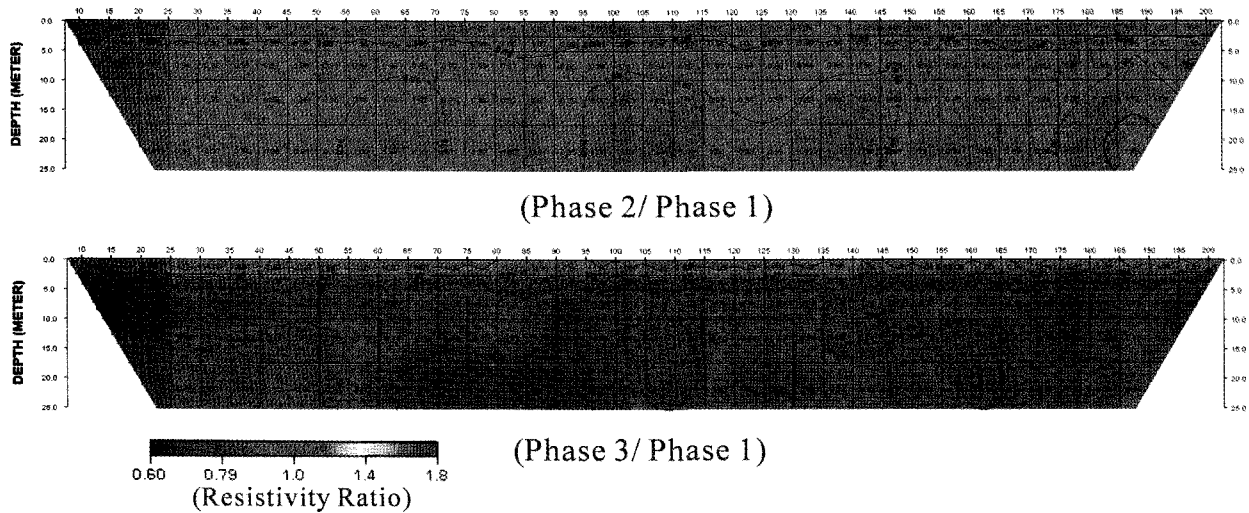


Fig. 7. Ratio of resistivity variations between each phase.

중심으로 수위계, 간극수압계, 지중경사계를 설치했다. 수위계와 간극수압계는 제체 중에 형성되어 있는 침윤선의 수위와 간극수압을 측정하기 위하여 설치했으며, 지중경사계는 누수현상 등으로 제체 사면의 슬라이딩에 의한 지중변위를 계측하기 위하여 설치했다.

계측 결과 및 해석

자료해석에서는 앞에 설명한 전기비저항 시스템과 계측기로부터 자료를 주기적으로 획득 분석함으로써 제체의 누수현상 및 안정성을 검토하였다. Fig. 6은 3회에 걸쳐 전기비저항을

측정한 결과를 나타내고 있다. Phase 1은 2004년 8월 21일, Phase 2는 2004년 10월 4일, Phase 3은 2004년 11월 19일에 전기비저항을 측정하여 얻은 자료를 역해석을 통해 구한 전기비저항 분포도이다. 이들 분포도에 의하면 제체 댐마루에서 지반의 경계부까지 성토로 구성된 층에서는 저비저항대가 형성되어 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 전기비저

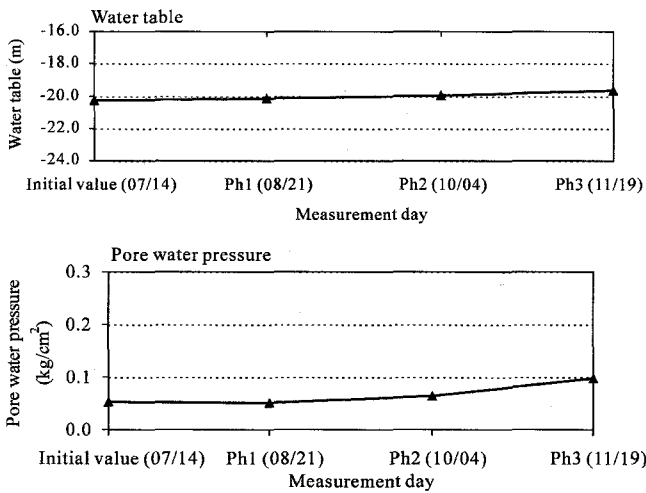
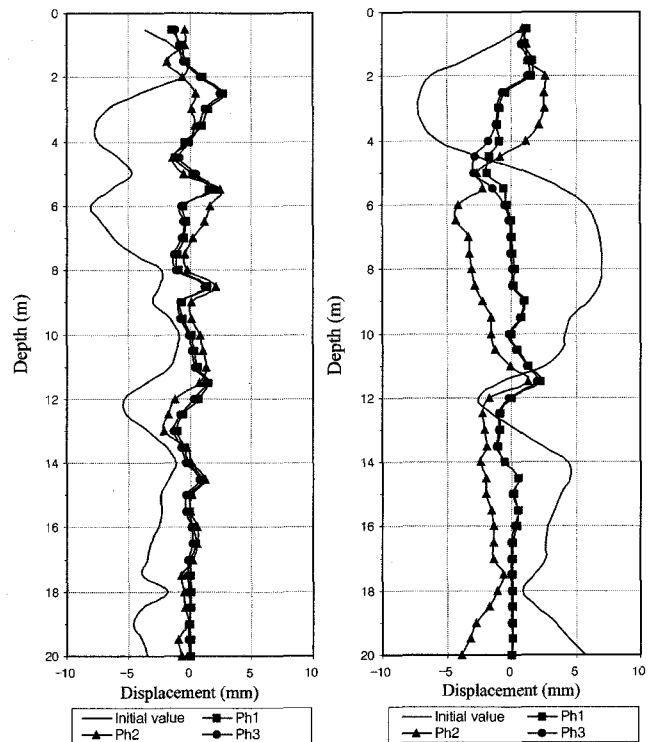


Fig. 8. Variations of the water table and pore water pressure in each phase.

항 변화비를 구하여 Fig. 7에 나타내고 있다.

Fig. 7에서 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, 제체 전체의 전기비저항이 감소하고 있어 강우나 저수위 상승에 의한 제체의 함수비 변화가 그 원인으로 생각된다.

Fig. 8은 전기비저항 모니터링 측선 상에 설치한 제체 수위 및 간극수압의 계측결과를 나타내고 있다. 초기 값을 기준으로 Phase 1에서 Phase 3으로 갈수록 수위가 약간 상승하고 있으며, 이에 따라 간극수압도 같이 상승하고 있다. 이들 계측기는 제체 댐마루의 담수 외측에 설치되어 있다. 이 곳은 Fig. 2에서 필터 층이 존재하는 곳으로 저수지의 수위가 상승하더라도 침윤선이 급격히 떨어지기 때문에 수위 및 간극수압이 큰 변화를 보이고 있지 않다. 또한 전기비저항 모니터링 측선 상에 설치되어 있는 지중경사계의 계측결과를 Fig. 9에 나타내고 있다. 여기서 (a)는 초기 값에 대한 제체 길이방향의 지중 변위량을 도시하였고, (b)는 초기 값에 대한 제체 횡단방향의 초기 값에 대한 지중 변위량을 도시하고 있다. 제체의 사전조사에서 누수에 가장 취약한 구간으로 판단되는 곳에 지중경사계를 설치한 것으로, 댐마루에서 깊이 20.0 m까지의 변위량이 ±5 mm 이내의 범위로 분포하고 있어 계측기의 오차범위(±6 mm per 25 m) 안에 속하고 있다.



(a) Longitudinal direction of the embankment (b) Transverse direction of the embankment
Fig. 9. Variations of underground displacement in each phase.

전기비저항 모니터링 결과에 의하면 Phase 3에서 전체적으로 전기비저항이 낮아지고 있는데, 이러한 원인이 제체의 누수 현상과는 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. 그러나 Fig. 7에서 설명한 바와 같이 측정거리 65~95 m 구간의 성토 층과 지반의 경계부에서는 전기비저항의 감소가 현저하게 나타나고 있어 앞으로의 계측결과에 주목해야 할 것으로 생각되며, 현재로서는 누수 현상에 가장 취약한 구간으로 생각된다.

토 의

국내에서 수리시설물의 누수탐지를 위해 전기비저항탐사가 주로 이용되고 있으며, 많은 사례축적으로부터 그 적용성이 입증되어 왔다. 그러나 제체의 구조 및 토질특성으로 볼 때 단기적으로 실시한 전기비저항탐사 결과로부터 상대적으로 저비저항대가 누수취약구간이라고 판단하기에는 어려운 점이 있다. 그 이유는 대부분의 저수지 제체는 불투성 역할을 하는 중심점토가 들어가 있으며, 함수상태의 중심점토는 상대적으로 저비저항을 나타내기 때문에 누수현상과 관계없이 제체 중심부

는 저비저항을 나타낼 수 있기 때문이다. 또한 지반의 전기비저항을 좌우하는 요인들이 많고, 이들 요인이 복합되어 전기비저항을 표시하고 있기 때문에 어떤 요인이 얼마만큼의 영향을 미치고 있는지 정확하게 파악해야 할 필요가 있다.

저수지 제체의 경우는 비교적 균질한 성토로 구성되어 있기 때문에 전기비저항을 좌우하는 요인 중에서 함수비와 세립분의 함량이 가장 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다. 박삼규(2004)에 의하면, 흙 시료의 경우 함수비가 증가함에 따라 전기비저항은 크게 저하되고 있으며 함수비가 최적함수비보다 높으면 시료의 전기비저항이 일정하게 유지되는 경향을 보이고 있다. 또한 점토 등의 세립분이 포함되어 있는 시료의 전기전도는 간극수 자체의 이온전도 외에 미립의 점토입자와 간극수의 경계면에서 생기는 전기화학적인 표면전도에 의한 영향을 받기 때문에 세립분의 함량이 높을수록 전기비저항은 낮아지는 경향을 보이고 있다.

이러한 점을 고려할 때 일시적으로 실시한 전기비저항탐사 결과로부터 저비저항대가 누수취약구간이라고 하는 해석보다는 동일 축선 상에서 전기비저항을 주기적으로 측정하여, 그 값의 변화양상을 구하여 누수구간 및 확장여부를 해석할 필요가 있다.

결 론

이 연구는 저수지 등의 수리시설물을 효율적이고 경제적으로 유지관리하기 위하여 전기비저항 및 계측 모니터링 시스템을 저수지 제체에 설치하여 주기적으로 얻은 자료를 분석하여 누수현상 등의 제체 안정성에 대해서 검토했다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 저수지 제체에 설치된 전기비저항 모니터링 시스템으로부터 주기적으로 전기비저항을 얻을 수 있었고, 3회의 측정 자료를 이용하여 전기비저항의 변화 양상을 구하여 제체의 누수현상을 평가했다.

2) Phase 1과 Phase 2에서는 제체의 전기비저항 변화가 거

의 없었으나, Phase 3에서는 전체적으로 전기비저항이 낮아지는 경향을 보였다. 수위, 간극수압 및 지중변위량의 자료를 종합적으로 해석한 결과, 제체 누수현상과는 관계가 없는 것으로 판단되었다.

3) 저수지 제체에 단기적으로 실시한 탐사 결과보다는 전기비저항 모니터링 결과를 이용하여 주기별 전기비저항의 변화 양상을 보는 것이 누수현상 등 제체의 안정성 관리에 유효한 방법임을 알 수 있었다.

4) 저수지, 필드 맵 등의 대형 수리시설물을 효율적이고 경제적으로 유지관리하기 위해서는 전기비저항 등 모니터링 계측시스템의 필요성이 요구된다.

참고문헌

- 농림부, 2001, 여름철 농업재해대책, 미발간 보고서.
- 박삼규, 김희준, 1999, 지온탐사에 의한 저수지 제방의 누수조사, 자원환경지질, **32**, 169-175.
- 박삼규, 송성호, 최종학, 최보규, 이병호, 2002, 수리시설물의 누수탐지를 위한 물리탐사의 적용성, 한국지구물리탐사학회 제4회 특별 심포지움 논문집, 한국지구물리탐사학회, 한국과학기술회관, 179-195.
- 박삼규, 2004, 지반의 전기비저항을 좌우하는 물성요인, 물리탐사, **7**, 130-135.
- 송성호, 이규상, 김진호, 권병두, 2000, 방조제 누수지점 탐지를 위한 SP 및 단극배열 전기비저항탐사의 적용, 자원환경지질, **33**, 417-424.
- 송성호, 권병두, 최종학, 김경만, 2001, 저수지 누수문제에 대한 수리지질 및 지구물리 방법의 적용, 한국자원공학회지, **38**, 292-300.
- 이명중, 김정호, 송윤호, 정승환, 2000, 2차원 및 3차원 전기비저항탐사를 이용한 제방 누수조사, 한국지구물리탐사학회 제2회 특별 심포지움 논문집, 한국지구물리탐사학회, 농업기반공사, 41-53.
- 정승환, 김정호, 양재만, 한규언, 김영웅, 1992, 전기비저항탐사에 의한 제방의 누수구간 탐지, 지질공학회지, **2**, 47-57.