

수리시설물의 누수탐지를 위한 물리탐사의 적용성

박삼규¹⁾, 송성호²⁾, 최중학¹⁾, 최보규¹⁾, 이병호¹⁾,

1) 농업기반공사 지하수사업처, 2) 농업기반공사 농어촌연구원

Applicability of Geophysical Prospecting for water leakage detection in water utilization facilities

Sam-Gyu Park, Sung-Ho Song, Jong-hak Choi, Bo-Gyu Choi, Byoung-Ho Lee
Korea Agricultural & Rural Infrastructure Corporation

요 약: 본 문은 수리시설물의 누수탐지를 위한 물리탐사의 적용성에 대해서 검토했다. 저수지 및 방조제의 누수탐지를 위해서 전기비저항탐사 및 자연전위 (SP)탐사가 실시되고 있으며, 많은 사례추적으로부터 그 적용성이 입증되고 있다. 그러나, 향후 수리시설물을 보다 정확하게 누수지점을 탐지하고, 효율적인 유지관리를 위해서는 다음과 같은 사항이 요구된다.

1) 단일 탐사보다는 전기비저항탐사와 자연전위탐사를 병용 실시하여 종합적으로 해석함으로써 보다 신뢰성을 높일 수 있다. 2) 전기비저항탐사 결과로부터 누수취약구간을 정확하게 파악하기 위해서는 제체의 전기비저항을 좌우하는 토질의 물성을 잘 파악하는 것이 무엇보다도 중요하다. 3) 측정치의 보다 높은 신뢰성을 얻기 위해서는 3차원 탐사의 도입이 시급하다. 4) 수리시설물을 효율적이고 경제적으로 유지관리하기 위해서는 모니터링 계측시스템의 필요성이 요구된다.

주요어: 수리시설물, 누수탐지, 전기비저항탐사, 자연전위 (SP)탐사, 모니터링 계측시스템

Abstract: This paper examined the applicability of geophysical prospecting for water leakage detection of the water utilization facilities. Electrical resistivity survey and spontaneous-potential survey were carried out for the water leakage detection of dike and embankment, and the applicability was confirmed from many case studies. However, in order to efficiently maintain and detection of the more accurate water leakage points in the embankment, the requirements are as follows; 1) It is necessary to use the electrical resistivity survey jointly with the spontaneous-potential survey in order to improve the reliability of water leakage information. 2) It is important to understand physical properties of the soil which influences the electrical resistivity of embankment in order to accurately grasp the water leakage points from the result of the electrical resistivity survey. 3) It is necessary to introduce the three-dimensional prospecting in order to improve the reliability of the measured value. 4) Introductions of the monitoring measurement system are necessary in order to efficiently and economically maintain of the water utilization facilities.

Keywords: dike and embankment, water leakage detection, electrical resistivity survey, spontaneous-potential survey, monitoring measurement system

1. 서 론

우리나라는 옛날부터 농경문화가 발달되어 농업용수를 확보하기 위한 많은 저수지와 간척 사업으로 방조제를 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 안전성이 우려되고 있는 실정이다. 실제로 저수지의 경우는 17,913개소 중 9,706개소 (54 %)가, 방조제는 1,654개소 중 759개소 (46 %)가 해방 이전에 축조된 시설물로 상당히 노후화 되어 있다. 이렇게 노후화 된 수리시설물은 집중호우 및 태풍에 취약하여 연평균 612억원의 피해가 발생되고 있다 (농림부, 2001). 수리시설물의 피해 양상도 Fig. 1에서 보여주는 것과 같이 최근 들어 피해 규모가 증가하고 있다. 이러한 원인은 지구온난화현상과 관련된 기상이변으로 국지성 폭우 등으로 자연재해가 늘어나고 있기 때문으로 생각된다. 저수지 및 방조제 등의 수리시설물이 파손되면 농업용수 공급이 어려워 영농을 계속할 수 없으므로 피해가 확산되고, 특히 방조제의 경우는 해수침투에 의해서 경작지가 염해를 입으면 장기간 영농이 곤란하게 된다.

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 수맥 상으로 존재하는 경우가 많다. 이러한 수맥은 평상시에는 주변의 제체에 아무런 영향을 미치지 않지만, 집중호우나 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 불리고, 발생초기에는 국부적으로 일어나지만 점차적으로 대규모의 누수 및 제체의 파괴로까지 발전하여 큰 재해를 유발시킨다.

제체의 누수현상을 탐지하기 위해서 여러 가지 물리탐사법이 적용되고 있다. 국내에서는 주로 전기비저항탐사가 사용되어 왔으며, 많은 사례가 축적되어 있다. 그러나, 방조제의 경우 해수침투에 의한 영향으로 제체의 전기전도도가 높아 상용탐사기로 누수탐지를 하는데 어려운 점이 있다. 이러한 점을 개선하기 위해서 방조제의 누수탐지에 자연전위 (SP)탐사를 적용시키는 사례가 늘고 있으며, 그 적용성이 입증되고 있다 (송성호, 2000).

본 논문에서는 수리시설물의 유지관리에 있어서 물리탐사의 적용성에 대해서 사례를 중심으로 검토하고, 향후 수리시설물의 유지관리체계에 있어서 물리탐사를 이용한 발전방향에 대해서 보고한다.

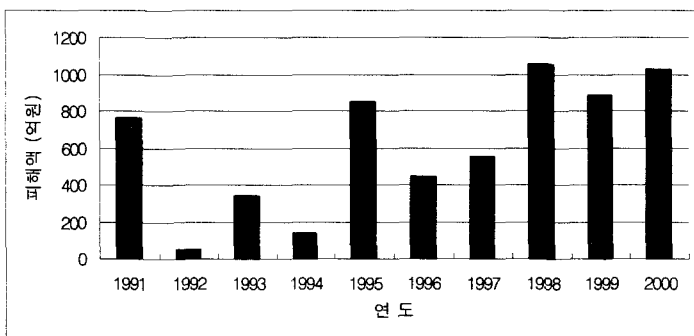


Fig. 1. Amount of damage of water utilization facilities.

2. 수리시설물의 구조 및 누수현상

2.1. 저수지

저수지는 농업용수를 확보하기 위해서 유수지 및 수해면적이 넓고, 댐 터의 적지조건을 만족하는 곳에 제체를 축조하게 된다. 일반적인 제체의 구조는 Fig. 2에 표시한 바와 같이 기반암의 상부에 성토체를 이용하여 축조하고, 제체 내에 중심점토층을 형성시켜 제체의 안정성과 담수효과를 높인다. 저수지의 수위가 관리수위 이상으로 상승하게 되면 제체의 성토체는 불투수층이 아니기 때문에 저수지의 물이 성토체를 통해서 하류사면 쪽으로 흐르게 된다. 이 때 중심점토층을 통과한 침투수가 Sand drain층을 통과하면서 침윤선이 급격히 떨어져 제체의 하부로 흐르기 때문에 평상시의 제체 내의 침투수 흐름에 의해서는 사면붕괴 등의 위험이 없다.

2.2. 방조제

방조제 구조는 축조재료 및 물막이구간, 해상조건, 기초지반의 토질, 축조공법에 따라 차이가 있으나, 일반적으로 성토공, 사석 피복공, 기초공, 필터공, 바닥다짐공으로 구분되며 구조 및 명칭은 Fig. 3과 같다. 방조제의 제체 구조는 저수지의 제체와는 달리 성토체로만 형성되어 있지만, 제체 폭이 넓고 조위차에 의한 해수위와 담수호의 수위로부터 침윤선이 일정하게 유지할 수 있도록 설계되어 있다.

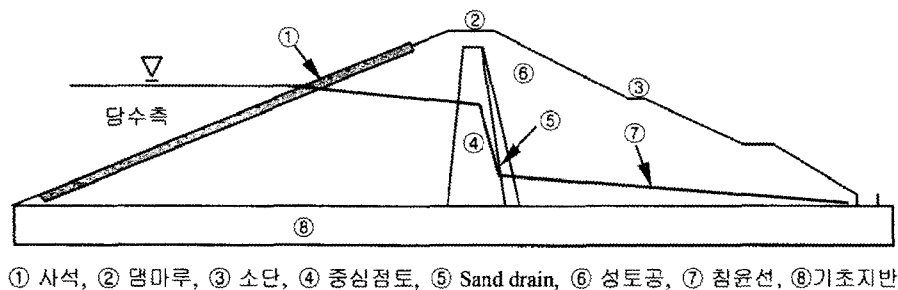


Fig. 2. Cross section of the reservoir dike.

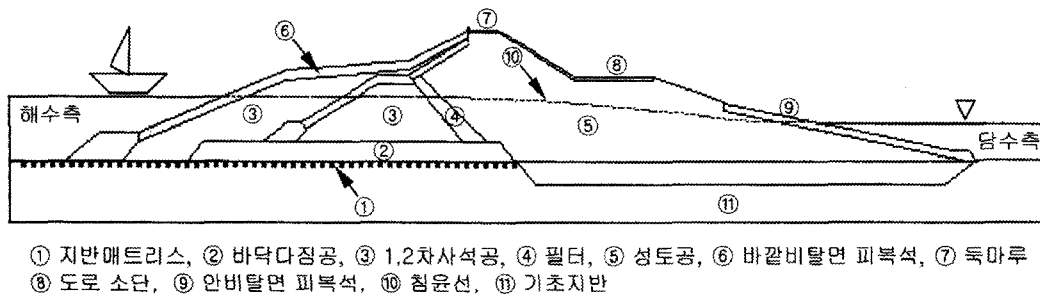


Fig. 3. Cross section of the tide embankment.

2.3. 제체의 누수특성

저수지의 경우 1945년 이전에 축조된 제체가 많고, 상당히 노후화 되어 있어 침투수에 의한 누수현상이 발생하는 경우가 많다. 매년 실시하고 있는 정밀안전진단 결과를 분석해보면, 주로 누수현상이 발생되고 있는 곳은 아래와 같이 크게 세 가지로 나눌 수 있다.

- 1) 기초지반과 성토층의 경계부
- 2) 복통 (저수지의 물을 빼내는 통로) 주변부
- 3) 제체 양단의 지반과 성토층의 경계부

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

방조제의 경우는 저수지와 축조방식이 다르고, 밀물과 썰물이 반복되는 과정에 축조하기 때문에 제체의 양단보다는 최종체절구간 (끝막이 구간)이 누수에 취약한 경향이 있다. 또한 저수지와 마찬가지로 방조제 구조물과 성토층이 접하는 부분과 파력에 의해서 사석이 떨어져 나가 장시간에 걸쳐 성토재를 유실시켜 누수경로를 형성시키는 경우도 많다. 일반적으로 누수취약구간은 아래와 같다.

- 1) 최종체절구간
- 2) 구조물과 성토재의 접합부
- 3) 바깥비탈면 피복석이 약한 구간

3. 수리시설물의 관리체계

현재 수리시설물은 규모와 크기에 따라 1종, 2종 및 3종의 시설물로 구분하고 있으며, 안전점검 및 정밀안전진단으로 수리시설물을 관리하고 있다. 안전점검은 1종, 2종 및 3종 수리시설물을 대상으로 일상점검, 정기점검 및 긴급점검으로 구분하여 실시하고 있으며, 그 결과 재해 발생이 우려되어 긴급보수 및 보강이 필요한 시설에 대하여는 우선적으로 대책을 수립한다.

정밀안전진단은 1종 및 2종 수리시설물을 대상으로 5년에 1회 이상 정기적으로 실시하고 있으며, 진단항목 및 흐름도는 Fig. 4에서 표시한 바와 같다. 현장답사로부터 조사계획을 수립하고 현장조사로 측량 및 기본자료조사, 외관조사, 구조물 및 누수조사 등을 실시하여 조사 및 시험결과를 종합적으로 평가하여 안전상태가 양호한 시설과 개보수가 요구되는 시설로 판정한다.

3.1. 누수현상 파악

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

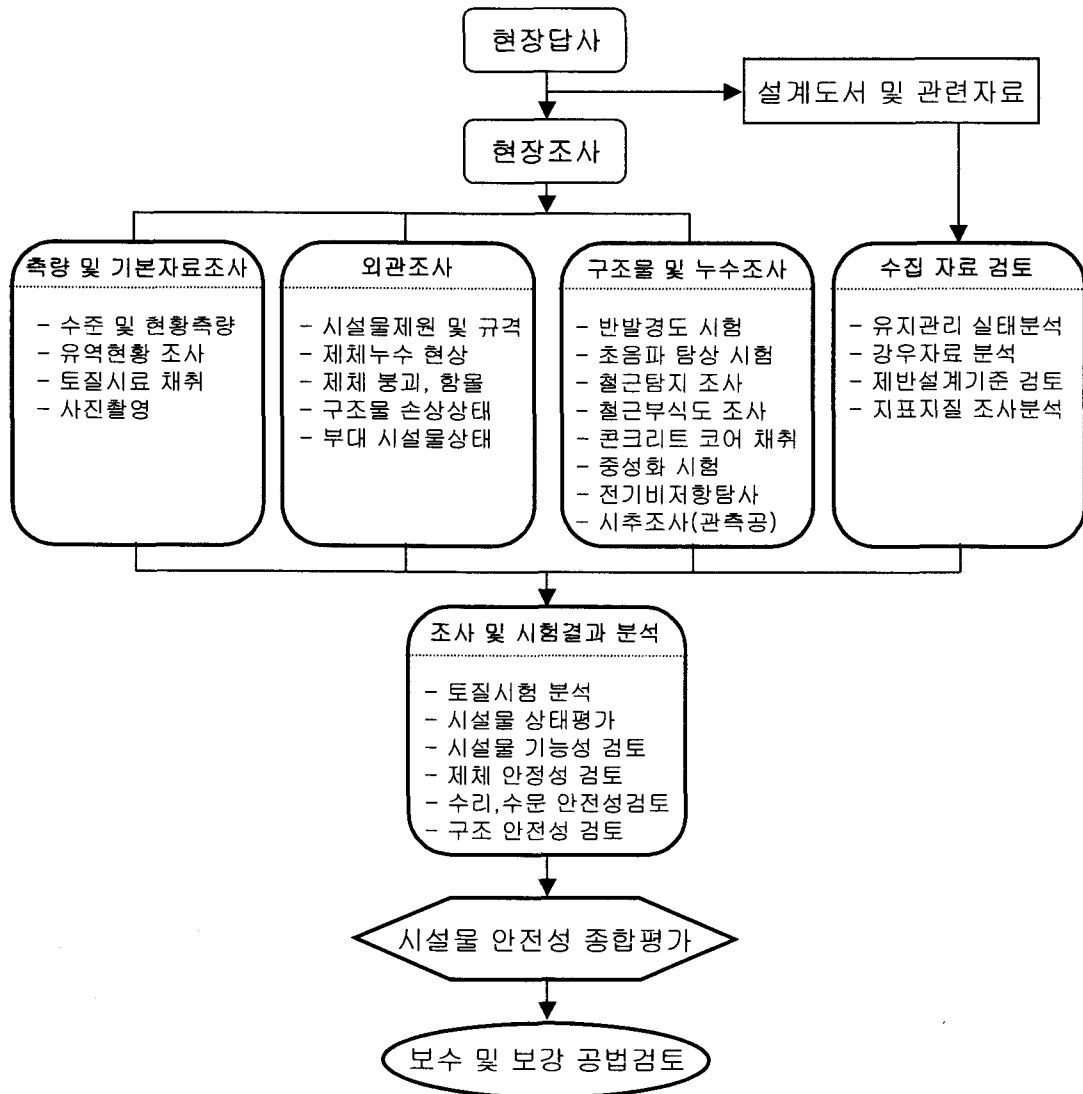


Fig. 4. Flow chart of safety checkup in embankment.

방조제의 경우에는 대부분 제체가 담수호와 접해 있기 때문에 육안으로 누수현상을 관찰하기는 어렵다. 그래서, 내제사면의 담수호를 따라 물의 전기전도도, 염분 및 온도를 측정하여 상대적으로 비교 분석하여 해수침투에 의한 누수가능성 구간을 파악한다. 전기비저항탐사는 일반적으로 내제사면 (담수호측)의 소단부에 측선을 설치하여 실시하고 그 결과 저비저항대를 누수취약구간으로 추정한다. 내제사면의 담수호를 따라 측정한 물의 전기전도도와 전기비저항탐사 결과로부터 누수에 가장 취약한 구간에 시추위치를 설정하여 시추조사를 실시한다. 특히, 방조제는 시추 조사공에 관측공을 설치하고, 만조시와 간조시의 수위변화 및 수심에 따른 전기전도도 변화를 관측하여 누수상태를 확인한다.

3.2. 보수 · 보강대책

제체의 누수는 제체파괴나 사면붕괴 등 재해를 유발시키며, 방조제의 경우는 내측 유수지의 염분농도 증가로 인한 농작물 피해 등의 원인이 되므로 근본적으로 누수를 차

단하기 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.

4. 누수탐지에 적용되는 물리탐사법

4.1 전기비저항탐사

전기비저항탐사는 수리시설물의 누수탐지에 유용하게 적용되고 있으며 많은 사례의 축적으로부터 저수지에 대한 적용성이 입증되고 있다 (송성호외, 2001). 주로 쌍극자배열을 이용하여 저수지의 댐마루 (제체의 정상부)와 하류사면부에 측선을 설정하여 탐사를 실시하고, 그 결과의 전기비저항분포로부터 누수취약구간을 추정하고 있다. 일반적으로 제체 내의 저비저항 분포대를 누수취약구간으로 추정하고 있다. 이러한 원인은 정확하게 규명되어 있지는 않으나, 거의 균질한 제체 내에서 누수에 의해 함수비가 높으면 전기비저항이 낮을 것이라는 판단에 근거를 두고 있다. 제체의 전기비저항을 좌우하는 요인으로는 공극율, 간극수의 전기전도도, 세립분의 함량, 함수비 등을 들 수 있다. 제체의 누수취약구간은 건전구간에 비해서 상대적으로 공극율 및 함수비가 높아지고 이에 따라 전기비저항이 낮게 나타날 것으로 생각된다.

방조제의 경우는 해수침투에 의해서 제체의 전기전도성이 높아 전기비저항탐사를 실시할 경우 몇 가지 주의해야 한다. 일반적으로 많이 사용하고 있는 전기비저항탐사 쌍극자배열은 심부로 갈수록 안정된 측정값을 얻지 못하는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위해서 정현기의 (2001)에 의해서 고출력의 전기비저항탐사가 개발되어 있으며, 김정호외 (2001)에 의해서 새로운 전극배열이 제안되어 있다. 또한 탐사의 분해능이 떨어지지만 S/N비가 높은 단극배열을 이용하기도 한다 (송성호외, 2000). 방조제의 제체가 해수침투에 의해 거의 포화되어 있으며, 상대적으로 전기비저항이 낮게 나타날 것으로 생각된다. 이러한 이유는 Archie(1945)의 경험식으로부터도 알 수 있듯이 간극수의 전기전도도가 해수보다 높은 경우에는 제체의 전기비저항은 간극수의 전기전도도와 공극율에 의해서 크게 좌우되기 때문이다.

<저수지 적용사례>

조사 저수지는 1964년에 축조되었으며 제당길이가 460 m, 제체의 높이가 20.8 m이고, 총 저수량은 1,460,000 m³이다. 본 저수지의 정밀안전진단을 위한 지질조사로서 전기비저항탐사와 시추조사를 실시했으며 조사항목 및 흐름도는 Fig. 5와 같다. 현장에서 외관조사로 제체부의 변형, 붕괴 및 누수조사를 실시한다. 또한 전기비저항탐사를 실시하여 저비저항대를 추출하여 외관조사 결과와 비교 분석하여 누수취약구간을 추정하고, 시추조사로 확인하기 위해서 시추위치를 설정한다. 그 다음으로 시추조사를 통하여 제체의 토질특성과 투수시험 등을 통하여 누수현상을 확인하고 필요에 따라서는 추적자시험 등을 추가로 실시한다.

Fig. 6은 실제 저수지의 댐마루 및 하류사면에서 전기비저항탐사를 실시한 결과이다. 댐마루 측선에서의 전기저비항은 40~200 Ωm의 범위로 분포하고 있으며, 지표부근은 전기비저항이 상대적으로 높고, 하부로 갈수록 전기비저항이 낮게 나타나고 있다. 전기비저

항 분포도에 의하면 123 Ωm를 경계로 상부와 하부는 토질 및 함수비의 차이가 전기비저항에 큰 영향을 미친 것으로 판단된다. 즉 상부의 성토 및 중심점토 구간은 침윤선의 상부로 함수비가 낮고 1~2 cm 크기의 자갈이 섞인 점성토로 구성되어 있으며, 현장투수 시험 결과 투수성이 높은 것 등의 복합적인 요인에 의해 전기비저항이 상대적으로 높게 나타나는 것으로 판단된다. 이것에 비해서, 하부의 중심점토 구간은 점토성분이 우세한 토질로 구성되어 있으며 함수비가 높아 상대적으로 전기비저항이 낮게 나타나는 것으로 판단된다.

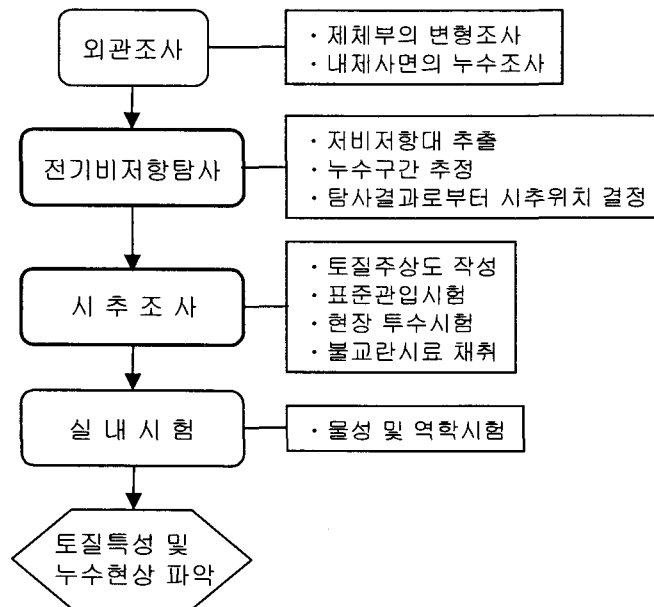


Fig. 5 Flow chart of geology survey.

하류사면 측선에서의 전기저비항은 30~270 Ωm의 범위로 분포하고 있으며, 지표부근에서는 전기비저항이 상대적으로 높고, 성토층과 원지반의 일부구간에서 63 Ωm이하의 저비저항을 나타내고 있다. 저비저항대는 거리 25~35 m의 구간과 80~170 m의 구간으로 원지반에 해당하며 부분적으로 저비저항이 나타나는 것은 지반의 함수비와 밀접한 관계가 있을 것으로 생각되고 댐마루 측선의 저비저항대와 연결성이 뚜렷하다. 따라서 전기비저항 63 Ωm 이하의 저비저항대는 제체의 누수현상에 의한 것으로 판단되며 누수취약구간으로 추정된다.

누수취약구간을 대상으로 2공의 시추조사를 하였다. 제체의 토질특성을 파악하기 위하여 표준관입시험과 비교란 시료를 채취하였으며, 투수성을 파악하기 위하여 변수위 투수시험을 실시했다. 그 결과 본 저수지 제체의 토질특성은 제체상부로부터 성토층, 중심점토층과 원지반으로 구성되어 있다. 제체상부의 성토층은 자갈이 섞인 점토질 모래로 구성되어 있으며, 비교적 다짐이 양호하여 투수성이 낮다. 그 하부는 중심점토 구간에 해당하고 주로 점토로 구성되어 있으나 1~2 cm의 자갈이 섞여 있다. 표준관입시험의 N치가 8~21타의 범위에 속하고 표준관입시험으로부터 얻은 시료에 의하면 중심점토로서 양호한 토질로 보인다.

한국지구물리탐사학회 제4회 특별 심포지움 (2002. 9. 25) p. 179-195.

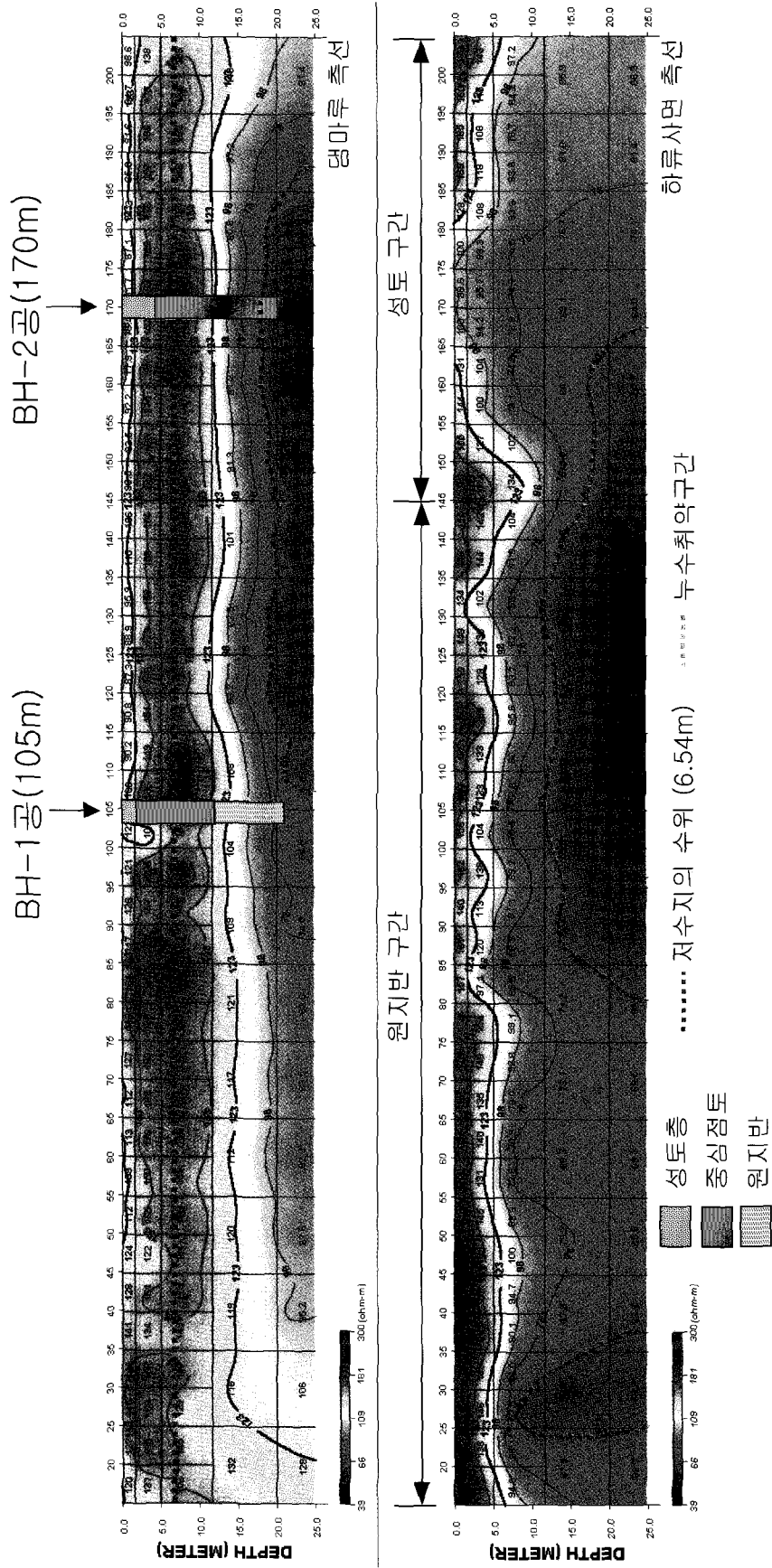


Fig. 6. Resistivity distribution of the reservoir dike.

원지반은 BH-1공의 심도 12.5 m부터 나타나며 적색 세일과 사암의 풍화토로 구성되어 있다. 원지반의 상부에는 약간의 전담토가 보이며 전체적으로는 점토질 모래로 구성되어 있다. Fig. 7은 시추조사 결과에 의하여 추정된 제체의 지층단면도이다.

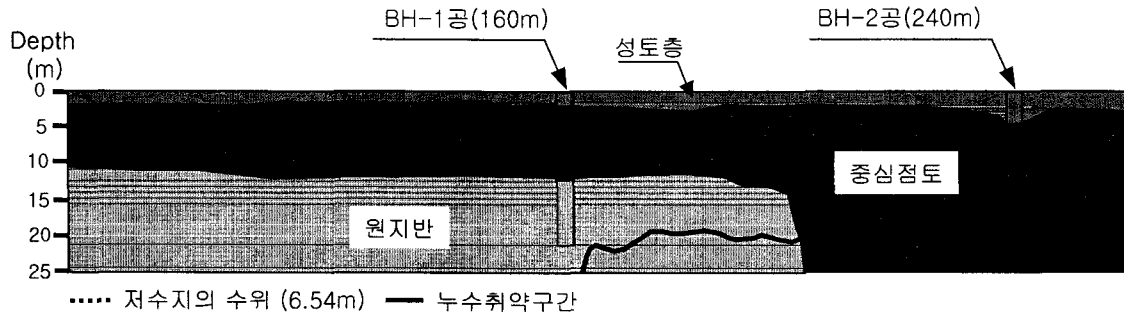


Fig. 7. Soil section of the embankment estimated from boring survey.

시추공을 이용한 현장투수시험 결과 제체상부에서는 1.6×10^{-5} cm/sec의 투수계수가 나타났으나, 중심점토에 해당하는 구간에서는 $5.3 \times 10^{-3} \sim 3.9 \times 10^{-3}$ cm/sec로 나타났다. 제체상부는 자갈 섞인 점토질 모래이지만 다짐이 잘 되어 있어 상대적으로 투수계수가 낮은 것으로 생각된다. 중심점토 구간은 자갈 섞인 점성토로 투수성이 높게 나타난 것은 크게 두 가지로 생각된다. 한가지는 원래 중심점토로서의 토질이 적합하지 않았거나, 다른 한가지는 수십 년 간 누수현상 등으로 점토분이 유실되었을 가능성을 들 수 있다. 조사당시 육안관찰 등으로 하류사면에 누수현상은 발견할 수 없었으나, 제체의 일부가 변형 및 함몰되어 있는 점을 고려할 때 과거의 누수현상과 밀접한 관련이 있고, 그 결과 점토분이 유실되어 제체의 투수성이 높은 것으로 판단된다.

본 저수지의 댐마루와 하류사면에서 실시한 전기비저항탐사 결과와 시추조사를 종합하면 중심점토 구간의 하부와 원지반에서 나타나고 있는 전기비저항 63 Ωm이하의 저비저항대는 누수현상에 의한 것으로 판단되며, 댐마루의 저비저항대와 연결성을 가지고 있어 침투수의 경로를 형성하고 있을 것으로 보인다.

<방조제 적용사례>

조사 방조제는 최근에 축조된 것인데 비해 해수침투에 의한 누수현상이 현저하여 외관조사에서 누수구간을 확인할 수 있는 곳이다. 본 방조제의 누수탐지를 위한 조사로서 1차적으로 외관조사와 함께 담수호측의 물의 전기전도도를 측정해서 배경치에 비해서 전기전도도가 높은 구간을 파악했다.

전기비저항탐사는 쌍극자배열을 이용하여 담수호측의 하류사면부에 측선을 설정해서 전극 및 케이블을 고정시켜 동일 측정 조건 하에서 만조시와 간조시의 전기비저항을 측정했다. Fig. 8은 전기비저항탐사 결과를 나타내고 있다. 내제사면의 제체 상부 (깊이 0~5 m)는 10~800 Ωm의 범위로 분포하고 있으며, 그 하부는 만조시 해수가 접하는 부분으로 전기비저항이 10 Ωm이하의 범위로 분포하고 있다. 본 조사지 해수의 전기비저항은 0.213 Ωm(온도 25 °C) 정도이고, 해수침투에 의해서 제체의 간극수가 해수에 의해서 포화되어 있을 때 제체의 전기비저항은 Archie (1942)의 경험식으로 구할 수 있다.

한국지구물리탐사학회 제4회 특별 심포지움 (2002. 9. 25) p. 179-195.

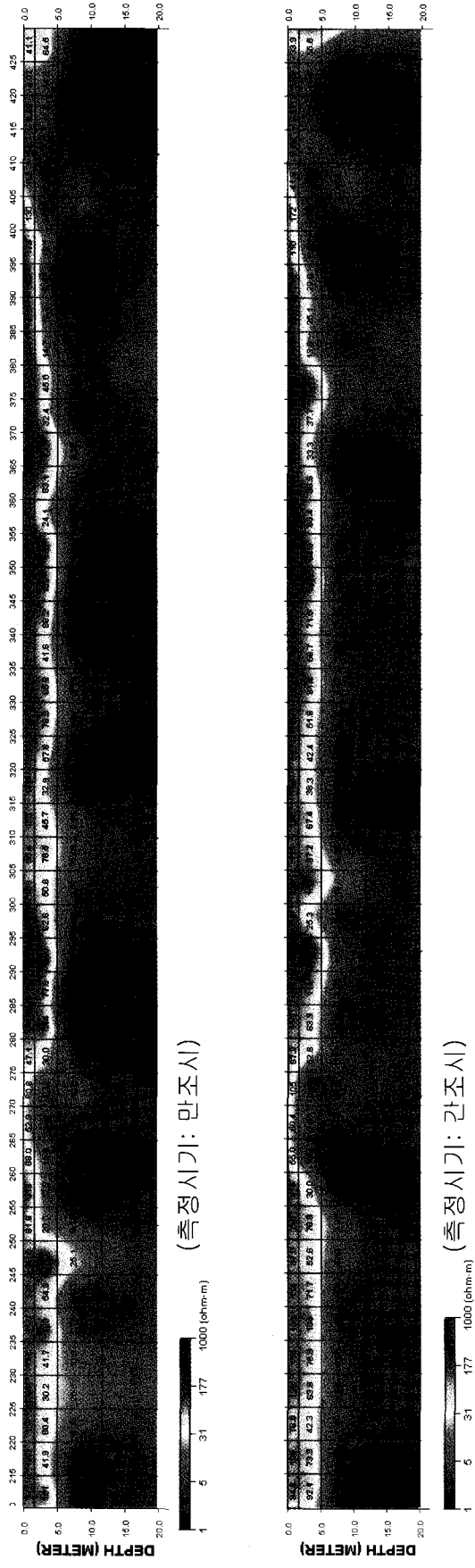


Fig. 8. Resistivity distribution of the tide embankment.

$$\rho_o = a \psi^{-m} \rho_w \quad (1)$$

여기서, ρ_o 는 지반의 전기비저항 (Ωm), ψ 는 지반의 공극율, ρ_w 는 간극수의 전기비저항이다. a 는 실험상수로서 0.6~3.5의 범위이고, m 은 Cementation factor로 불리며 간극의 기하학적 형태와 고결 정도에 따라 다르지만 경험적으로 1.4~2.2의 범위이다. 흙의 전기비저항 실내실험에 의하면, 간극수의 전기비저항이 해수보다 낮을 때는 Archie의 경험식이 일반적으로 적용되고 있다.

Archie의 경험식을 이용하여 해수에 의해서 제체가 포화되어 있을 때 제체의 전기비저항을 구한 결과 a 와 m 의 실험상수 값에 따라 다르지만 1.33~2.78 Ωm 의 범위이다. 이때 공극율 ψ 는 토질시험에서 구한 값의 평균인 44 %를 적용했으며, ρ_w 는 해수의 전기비저항을 적용했다. 이 결과를 바탕으로 제체의 전기비저항이 3 Ωm 이하로 분포하는 구간은 해수에 의해서 거의 포화되어 있을 것으로 생각된다.

탐사결과로부터 누수구간을 판정하기 위하여 만조시와 간조시의 전기비저항 차이를 비교검토 했다. 동일 측정조건에서 탐사한 결과이기 때문에 제체 중의 해수 포화도가 크면 클수록 전기비저항은 낮을 것이다. 따라서 제체가 해수 침투에 의해 포화된 상태라면, 간조시에 비교하여 만조시의 전기비저항이 낮게 나타날 것이라는 점을 착안하여 조석차에 의한 전기비저항 변화구간을 추출했다. 그 결과 3 Ωm 이하의 저비저항대 중에서 만조시와 간조시의 전기비저항 차이가 뚜렷한 구간과 큰 변화가 없는 구간으로 대별된다. 만·간조시에 전기비저항의 변화가 약한 구간은 제체 중의 침투수 유속이 느려 서서히 유동하고 있는 것으로 생각된다. 한편, 간조시와 만조시의 전기비저항 변화가 크고, 1 Ωm 이하의 저비저항대가 넓게 형성되어 있는 구간은 만조가 된 후에는 침투수 누출현상이 현저하게 일어나고 있으며, 일부 구간에서는 토립자의 유실도 보이고 있어 파이핑 현상의 초기로 추정된다.

4.2 자연전위 (SP)탐사

자연전위탐사는 금속광체의 산화환원반응에 의한 광체전지와 이온을 많이 포함하고 있는 유체가 흐를 때 발생하는 유동전위 등으로 발생된 전위를 두 개의 비분극 전위전극만을 이용하여 전위를 측정하는 비교적 간단한 탐사기법으로 제당 및 방조제 등의 누수지점을 찾는 데 이용되고 있다. 국내에서 자연전위법은 송성호 (2001)에 의해서 체계적으로 연구되었으며 저수지 및 방조제의 조사사례로부터 수리시설물의 누수탐지에 유효성이 입증되고 있다.

아래의 저수지 및 방조제의 적용사례는 송성호의 (2000)에 의해서 발표된 내용의 일부를 소개한다.

<저수지 적용사례>

조사지는 농업용수 공급을 목적으로 건설된 저수지로 제체의 길이가 165 m, 제체의 높이는 6 m로 기초조사에 의해 제체 중심부로부터 우측부 전체구간에서 약 20 m³/일 정도의 누수가 발생되고 있어 그라우팅에 의한 지수대책이 계획된 곳이다. 그라우팅을 실시하기 전 후에 댐마루에서 전기비저항탐사와 자연전위탐사를 실시하여 누수구간에 대한 탐사기법 적용성 및 그라우팅 효과를 검토했다. 본문에서는 자연전위탐사만을 서술한다.

SP탐사는 제체의 전체구간 165 m에 대하여 그라우팅 전후에 기준점 고정방식으로 실시

하였는데, 기준점은 제체로부터 약 250 m 외곽부에 설치하여 탐사 전후에 기준 값을 측정하여 실제 탐사자료의 잡음요소를 보정하였다. Fig. 9는 자연전위탐사 결과를 나타내고 있다. 자연전위분포에 의하면, 그라우팅 이전에 실시한 결과는 제당 중심부로부터 제체의 좌측부인 0~90 m 구간에서는 45~65 mV 사이에서 안정된 경향을 나타내는데 비하여, 우측부인 90~165 m 구간에서는 33~40 mV로 전체적으로 감소되는 양상을 보여준다. 이에 비하여 동일지점에 대한 그라우팅 이후의 탐사결과는 제체의 우측부인 90~165 m 구간에서 전반적으로 증가되는 경향이 나타나는 것으로 볼 때 자연전위 값의 증가는 누수량 감소에 의해 나타나는 것으로 판단된다.

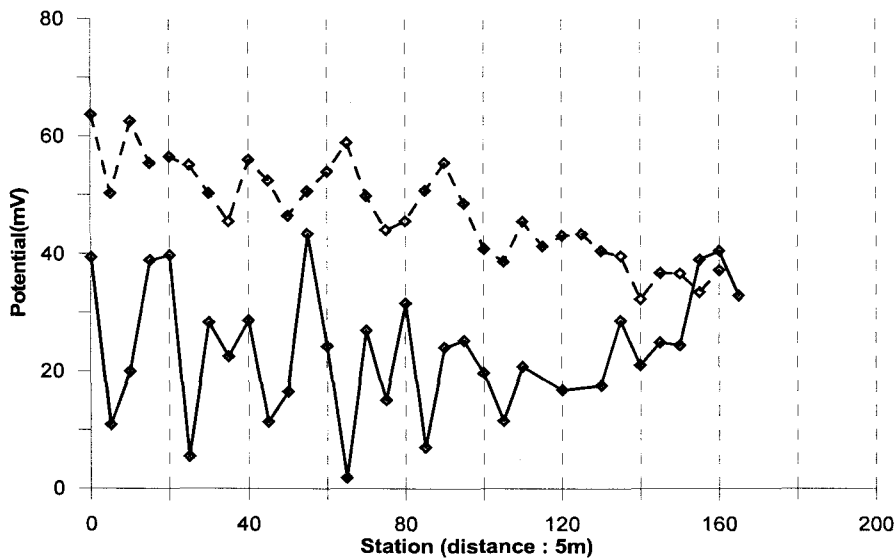


Fig. 9. SP profiles at the crest along of the reservoir dam (송성호외, 2000).

Dot line : SP profile before grouting.

Solid line : SP profile after grouting.

<방조제 적용사례>

본 방조제는 길이가 5400 m, 높이가 8 m인 농업용 수리구조물로 내측부는 농경지로 이용되고 있으며, 방조제 내측부를 따라 자연적으로 조성된 농업용수로가 형성되어 있다. 본 조사에서는 일차적으로 외관조사를 실시하여 만조시에 방조제 내측부로 누수가 발생하는 지점을 조사대상으로 선정하였다.

탐사는 해수의 누수구간을 포함하는 60 m 구간에 대하여 전기비저항탐사 (단극배열, 전극 간격 3 m)를 실시하였고, 동일한 위치에 대하여 24시간 동안 1시간 간격으로 SP 모니터링을 수행하였다. SP탐사는 전기비저항탐사의 전극지점에 대한 기준점 고정방식으로 실시하였고, 외부로부터의 잡음을 제거하기 위하여 측정 전후에 기준점 전위를 측정하여 실제 측정값을 보정하였다.

Fig. 10에 전기비저항탐사 및 SP탐사 결과를 나타내고 있다. 전기비저항탐사 결과를 보면, 깊이 약 6 m 이상에서는 전체적으로 1 Ωm 이하로 해수에 의해 포화된 것으로 나타났다. 특히 No.3~No.5 구간에서는 0.3Ωm의 매우 낮은 저비저항대가 나타나는데, 이러한 전기비저항은 해수와 유사하므로 제체가 해수에 의해 완전히 포화된 것으로 판단된다. SP탐사의 결과는 전체적으로 전위차가 0~+20 mV 사이로 나타나는 반면, 측정점 No.3~No.6의 4개 지점의 측정결과는 -20~-50 mV의 부(-)의 이상이 나타나고 있다. 이 구간은 전기비저항탐사에서

0.3 Ωm 내외의 저비저항대와 일치하고 있으며, 만조시 누수가 발생하는 구간이다.

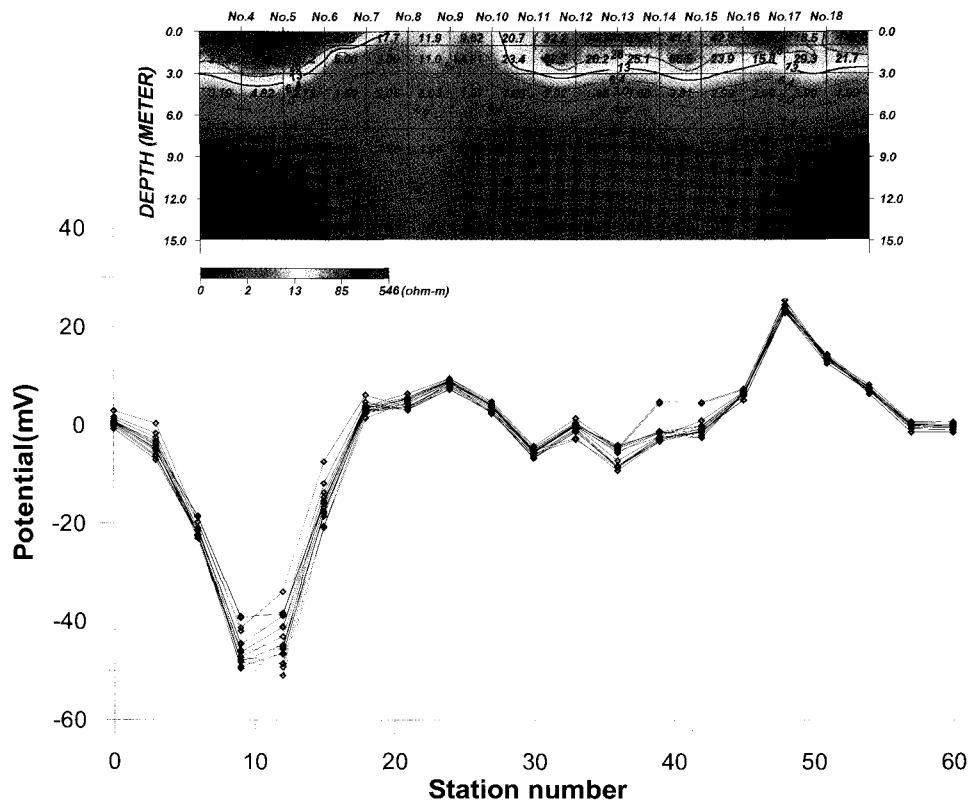


Fig. 10. Resistivity distribution (upper) and SP profiles (lower) along the tide embankment (Song et al., 2000).

5. 모니터링에 의한 유지관리체계

현재 시행되고 있는 1종 및 2종의 수리시설물은 일반적으로 5년에 1회 정밀안전진단이 실시되고 있다. 진단결과 제체에 누수현상이 발견되거나 안정성에 영향을 미치는 결함부분이 있을 경우에는 보수 및 보강대책이 마련되고 이에 따른 개보수를 실시하게 된다. 정기적으로 실시되는 정밀안전진단은 5년에 1회 실시하기 때문에 누수현상 등을 조기에 발견하기 어려운 점이 있고, 누수현상이 계속 진행됨에 따라 제체의 안전성에도 큰 영향을 미치게 된다. 또한 누수현상이 상당히 진행된 후에 발견이 되면 이를 방지하기 위한 지수대책비가 증가하게 되어 큰 경제적 손실을 가져오게 된다. 이러한 관점에서 볼 때, 노후화된 중요 수리시설물(저수지, 방조제)의 누수현상을 조기에 발견하여 자연재해를 사전에 예방하고, 수리시설물의 보수 및 보강대책을 조기에 수립함으로써 개보수 공사비를 절감하는 유지관리 체계가 절실히 요구되고 있다.

필자 등은 노후화된 중요 저수지 및 방조제를 대상으로 상시 모니터링 시스템을 도입하여 효율적으로 수리시설물을 유지 관리하는 체계를 구상하고 있다. 이러한 시스템의 목적은 제체의 전기비저항 및 자연전위를 상시 계측하여 비교 분석하여 제체의 누수현상 및 진행상태를 파악하여 조기에 대책을 마련함으로써 자연재해를 사전에 방지 하고자 하는데 그 목적이 있다. Fig. 11은 상시 모니터링에 의한 수리시설물의 유지관리체계를 나타내고 있다. 구체적으로는 제체에 전기비저항, 자연전위 및 수위관측 시스템을 설치하고 상시 모니터링 결과로

부터 위험요소가 발견이 되면 정밀안전진단을 실시하여 보수 및 보강대책을 수립한다. 장기 모니터링 시스템은 Fig. 12에 표시한 것과 같이 자동계측 시스템을 이용하여 실시간으로 수리시설물 제체의 누수현상을 파악하는데 그 목적이 있다.

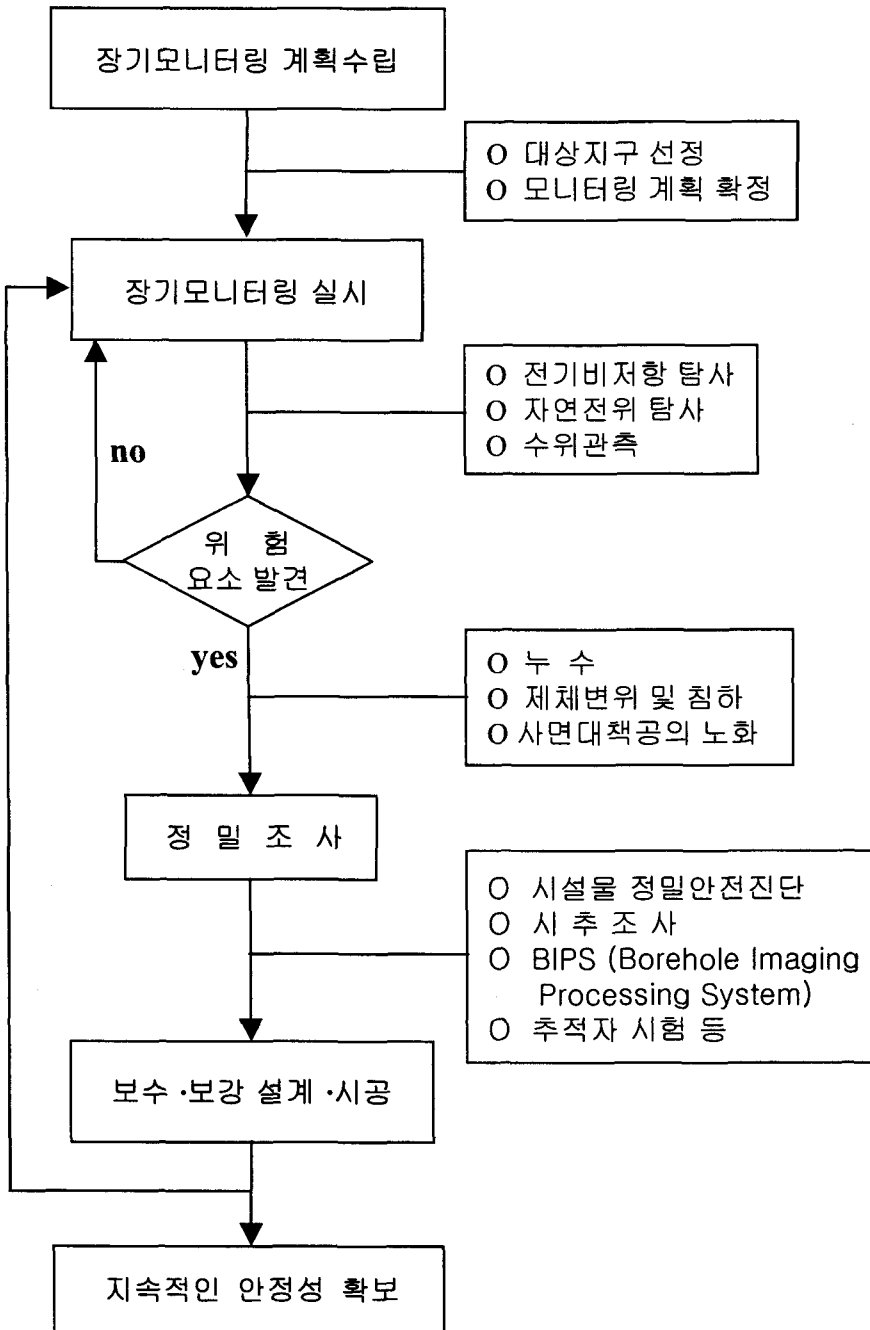


Fig. 11. Maintenance of water utilization facilities by monitoring measurement system.

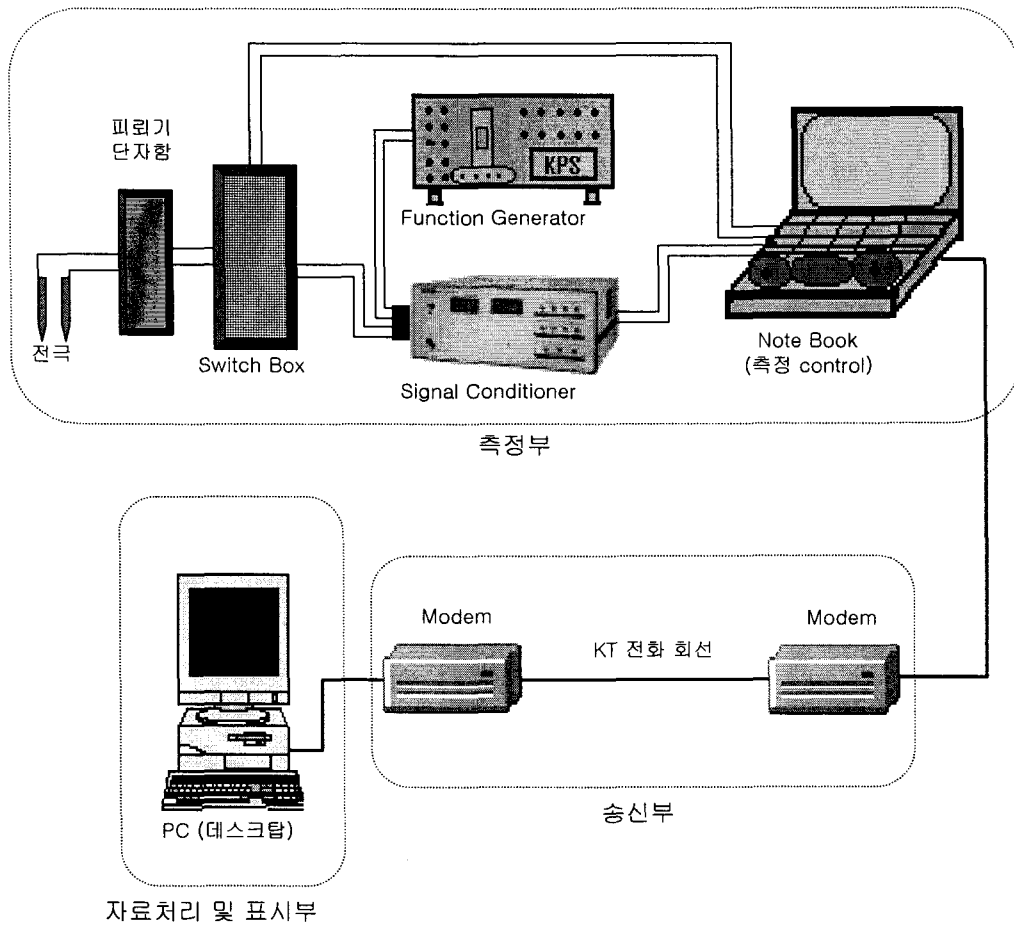


Fig. 12. Schematic of resistivity and spontaneous-potential monitoring system.

6. 토의 및 결론

국내에서 수리시설물의 누수탐지를 위해 전기비저항탐사와 자연전위탐사가 주로 이용되고 있으며, 많은 사례축적으로부터 그 적용성이 입증되어 있다. 그러나 제체의 구조 및 토질특성으로부터 현재 실시되고 있는 2차원 전기비저항탐사로서는 중심점토의 제체를 가로 지르는 방향으로의 발달형태를 정확히 영상화하기 어렵고, 제체내의 불균질한 영역에 대한 영상획득에 있어서도 비교적 전기비저항 대비가 큰 부분의 경우는 정확한 영상화가 가능하나, 그 차이가 적은 경우에는 구조를 제대로 파악하기 어려운 점을 지적하고 있다 (이명중외, 2000). 또한 현재 제체의 토질특성이 균질 하다는 가정 하에서 상대적으로 저비저항대가 누수취약구간이라는 일관된 해석을 모든 제체에 적용하고 있다. 그러나, 실제로 지반의 전기비저항을 좌우하는 요인이 많고, 이들 요인이 복합되어 전기비저항을 표시하기 때문에 어떤 요인이 얼마만큼의 영향을 미치고 있는지 정확하게 파악해야 할 필요가 있다. 예를 들면, 저수지 제체의 경우는 간극수의 전기비저항이 대체로 높기 때문에 제체의 전기비저항을 좌우하는 요인 중에서 세립분의 함량이 가장 큰 영향을 미칠 것으로 생각된다. 한편, 방조제의 경우는 간극수의 전기비저항이 해수정도이기 때문에 제체의 전기비저항은 간극수를 많이 포함할수록 제체의 전기비저항은 낮을 것이다. 다시 말하면, 공극율이 크면 클수록 체적함수율이 높기 때문에 전기비저항을 낮추는 역할을 하고 있다. 이러한 배경은 흙의 전기비저항 실내실험으로 밝혀져 있다.

Fig. 13은 여러 가지 흙 시료를 이용해서 간극수의 전기비저항을 변화시키면서 측정된 시료의 전기비저항을 나타내고 있다. 모든 흙 시료는 간극수의 전기비저항이 높아짐에 따라 전기비저항이 증가하는데, 그 증가의 폭은 시료의 특성에 따라 약간의 차이가 있다. 입자가 절연체인 Glass beads (G)와 표준사 (TS) 등은 간극수의 전기비저항이 증가함에 따라 비례적으로 전기비저항도 증가하고 있다. 그러나, 실트(M)의 경우는 간극수의 전기비저항이 10 Ωm 이상의 영역에서는 간극수의 전기비저항이 증가함에 따라 전기비저항의 증가폭이 작아지는 경향이 있다. 이것은 흙의 전기비저항이 간극수의 전기비저항뿐만 아니라 세립분의 영향을 받기 때문이다.

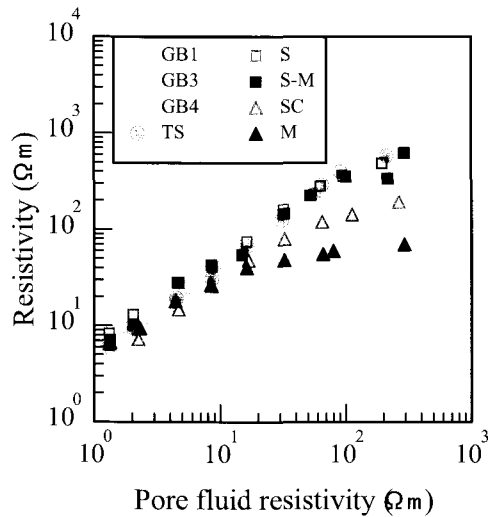


Fig. 13. Relationship between resistivity and pore fluid resistivity of soils (Park, et al., 1999).

Fig. 14는 지하수에 포화된 흙 시료를 이용해서 공극율을 변화시키면서 측정된 시료의 전기비저항을 나타낸 것이다. 시료에 따라 다소 차이는 있지만 전체적으로 공극율이 증가함에 따라 시료의 전기비저항이 감소하는 경향을 보이고 있다. 이것은 포화된 시료는 공극율이 크면 체적함수율이 증가하게 되고 이에 따라 전기비저항이 낮아진다.

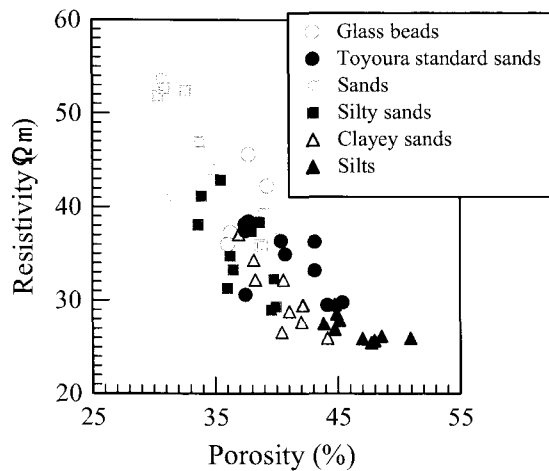


Fig. 14. Relationship between resistivity and porosity of saturated soils (Park, et al., 1999).

이상에서 수리시설물의 누수탐지를 위한 물리탐사의 적용성에 대해서 검토했다. 저수지 및 방조제의 누수탐지를 위해서 주로 사용되고 있는 물리탐사는 전기비저항탐사와 자연전위탐사이고, 많은 사례축적으로부터 그 적용성이 입증되고 있다. 그러나, 향후 수리시설물을 보다 정확하게 누수지점을 탐지하고, 효율적으로 유지관리를 하기 위해서는 다음과 같은 사항이 요구된다.

1) 단일 탐사보다는 전기비저항탐사와 자연전위탐사를 병용하여 종합적으로 해석하는 것이 보다 신뢰성을 높일 수 있다.

2) 전기비저항탐사 결과로부터 누수취약구간을 정확하게 파악하기 위해서는 제체의 전기비저항을 좌우하는 토질의 물성을 잘 파악하는 것이 무엇보다도 중요하다.

3) 측정치의 보다 높은 신뢰성을 얻기 위해서는 3차원 탐사의 도입이 시급하다.

4) 수리시설물의 효율적이고 경제적으로 유지관리하기 위해서는 모니터링 계측시스템의 필요성이 요구된다.

참고문헌

- 김정호, 이명종, 송윤호, 정승환: 2차원 전기비저항 탐사를 위한 변형된 전극배열법에 관한 연구, 물리탐사, **4**, 59-69.
- 송성호, 이규상, 김진호, 권병두, 2000, 방조제 누수지점 탐지를 위한 SP 및 단극배열 전기비저항탐사의 적용, 자원환경지질, **33**, 417-424.
- 송성호, 2001, 자연전위법을 이용한 수리시설물 누수탐지, 교육학박사 학위논문, 서울대학교.
- 송성호, 권병두, 최종학, 김경만, 2001, 저수지 누수문제에 대한 수리지질 및 지구물리 방법의 적용, 한국자원공학회지, **38**, 292-300.
- 이명종, 김정호, 송윤호, 정승환, 2000, 2차원 및 3차원 전기비저항탐사를 이용한 제당 누수조사, 농업현장에 필요한 물리탐사 기술, 한국지구물리탐사학회 특별심포지움, 2000년 9월 1일, 41-53.
- 정현기, 이동구, 주형태, 2001, 고출력 쌍극자 비저항탐사에 의한 갯벌하부 지반조사, 춘계 공동학술발표회 논문집, 한국물리탐사학회, 2001년 4월 27-28일, 69-73.
- Archie, G.E., 1942, The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *Trans, A.I.H.E.*, **146**, 54-67.
- Sam-Gyu Park, Hiroshi Fujiwara, Mi Kyung Park, Tamotsu Matsui, 1999, Fundamental study on resistivity of soils, *Butsuri-tansa*, **52**, 299-306. (Japanese)