원격탐사, 전기탐사, 전자기탐사 및 시추공영상의 융합적 분석을 통한 서산지역 방조제 누수구역 판별

홍성인¹ · 이동익² · 백광현³ · 유영철⁴ · 임국묵⁵ · 유재형^{1*}

¹충남대학교 지질환경과학과, ²한국농어촌공사 충남지역본부, ³(주) 지에스이

⁴중원대학교 산학협력단, ⁵(주) 한세지반엔지니어링

Investigation of Water Leakage in Seosan A-Region Sea Wall using Integrated Analysis of Remote Sensing, Electrical Resistivity Survey, Electromagnetic Survey, and Borehole Survey

Seong-in Hong¹, Dongik Lee², Gwanghyun Baek³, Youngcheol Yoo⁴, Kookmook Lim⁵ and Jaehyung Yu^{1*}

¹Department of Geology and Earth Environmental Sciences, Chungnam National University

²Chungnam Regional Headquarters, Korea Rural Community Corporation

³GSE CO., LTD.

⁴Industrial Research Center, Jungwon University

⁵Hanse GeoEngineering CO., LTD.

This study introduces integrated approach on detection of a leakage in a sea wall based on remote sensing, electric resistivity survey, electromagnetic survey, and borehole survey for the Seosan A-Region sea wall. The satellite temperature distribution from Landsat ETM+ data identifies water leakage distribution and period by analyzing temperature mixing patterns between sea water and fresh water. Electric resistivity survey provides both horizontal and vertical anomaly distributions over the sea wall showing below average electric resistivity. Electromagnetic survey(electrical conductivity survey) reveals the potential possible leakage areas with minimal background impact by comparing electrical conductivity values between high and low tides. Borehole image processing system confirmed the locations of anomalies identified from the other survey methods and distributions of vertical fracture zones. The integrated approach identified 41.7% of the sea wall being the most probable area vulnerable to water leakage and effectively approximated both horizontal and vertical distribution of water leakage. The integrated analysis of remote sensing, electric resistivity survey, electromagnetic survey and borehole survey is considered to be an optimal method in identifying water leakage distribution, period, and extent of fractures knowledged from the boreholes.

Key words : remote sensing, electric resistivity survey, electromagnetic survey, borehole survey, integrated approach, Seosan A sea wall

본 연구에서는 원격탐사, 전기비저항탐사, 전기전도도탐사(전자기탐사), 시추공 영상촬영법을 융합하여 효과적인 제방의 안정성 및 누수 평가 방법을 서산 A지구 방조제에 적용하여 제시하였다. Landsat ETM+열적외선 밴드를 사용하여 방조제 부근에서 다른 온도의 해수와 담수가 혼합되는 양상을 통해 누수의 존재, 규모 및 기간을 유추하였다. 전기비저항탐사를 방조제를 따라 실시하여 평균비저항 값 83.197 $\Omega\cdot m$ 이하를 보이는 이상대의 수평적 수직적 분포를 확인하였다. 간조와 만조 시의 전기전도도 값의 분석을 통해 배경치의 영향을 최소화한 수평적 이상대 분포를 확인하였다. 시추공영상촬영을 통해 파쇄대의 수직적 분포양상과 기존 탐사법의 정확도를 확인하였다. 그 결과 전체 제방의 연장 중 41.7%에서 세 수평적 이상대 탐사법의 중첩구간이 확인되었으며, 시추공에서 확인된 수직적 파쇄양상을 고려할 때 누수구간이 제방단면의 중심부를 따라 상당부분 수평적으로 연장이 되어 방대한 양의 누수가 존재할 가능성이

*Corresponding author: jaeyu@cnu.ac.kr

높을 것으로 사료된다. 네 탐사법의 융합적 접근은 각 탐사방법이 가지고 있는 장점을 부각하고 단점을 보완하여 수평적 및 수직적인 누수구간과 기간의 확인 및 판별이 가능하고, 시추공에서 확인된 수직적 파쇄양상의 수평적 연장성을 예측하는데 높은 신뢰도를 보인다 할 수 있다.

주요어 : 원격탐사, 전기비저항탐사, 전자기탐사, 시추공영상촬영, 융합적 접근, 서산 A방조제

1. 서 론

최근 물 수요 증대 및 자연재해와 관련해 국내 수자원 공급에 중요한 역할을 하는 수리시설구조물 관리의 필요성이 제기됨에 따라 각종 제체에 대한 안정성 검토의 중요성이 부각되고 있다(Song *et al.*, 2000; Oh and Suh, 2008). 시설구조물은 자연재해 및 시간의 경과에 따른 하중의 작용으로 인하여 외형이나 성능이 저하되므로 이를 지속적으로 관리하기 위해 정밀안전진단이 연차적으로 시행되고 있다(Song *et al.*, 2000; Shon and Lee, 2003). 시설구조물의 안정성에 위해한 요소는 누수와 내부 침식이 고려되어 왔으며 따라서 댐과 저수지, 방조제, 하천제방 등 다양한 수리시설구조물 안정성 평가에 이들 요소의 존재 여부를 진단하기 위한 연구가 다각도로 이루어져 왔다(Kim and Jo, 1999; Shon and Lee, 2003; Oh and Suh, 2008). 염수와 담수가 혼재하는 전이대에서 해수침투에 대한 피해가 빈번하여 구조물의 안정성에 보다 지속적인 안전평가가 요구된다(Shin and Byun, 2010). 특히, 방조제의 경우 총 1,586개소 중 80% 이상이 조석의 영향이 큰 서해안 지역에 집중되어 있어 해수침투의 영향에 기인한 이들 구조물의 안정성 저하에 대한 지속적이고 체계적인 조사가 필수적이다(Song *et al.*, 2000).

현재까지 해수침투 및 누수의 영향에 대한 조사방법으로는 전기비저항 탐사, 전기전도도 측정, 시추공영상촬영이 수행된 바 있다. 쌍극자배열 전기비저항 탐사가 전북 부안지역과 충남 청양지구 소재의 제당의 누수 여부를 확인하는데 사용된 바 있다(Chung *et al.*, 1992). 이 외에도 다채널 연속 온도 모니터링 장비와 시추공영상촬영을 통해 울산소재 흙댐과 전라남도 영광군 일대에서 댐의 상하부 및 여러 지점의 온도 분포를 파악하거나 구간별 담수주입시험을 실시하여 그 효과를 모니터링 하여 파쇄대 확인에 유용하게 사용된 바 있다(Oh *et al.*, 2010; Shin and Byun, 2010). 유주형 등(2009)은 Landsat TM/ETM+과 NOAA 자료를 사용한 원격탐사를 바탕으로 새만금방조제 완공 후 내측의 하구갯벌 환경과 외측의 해양환경이 분리되어 발생하는 조류의 변형을 공간적 변화로 확인하였다.

이처럼 다양한 연구방법이 시설구조물 누수구역 판별에 시도된 바 있다.

그러나 기존의 연구방법은 원격탐사의 경우 공간해상도가 낮아 누수 판별의 유무나 대체적인 위치만을 유추하는 단점이 있고, 쌍극자 전기비저항탐사는 지표 천부의 수평적전기전도도 변화에 대단히 민감하여 이상대 해석에 어려움이 있다. 또한 다채널온도모니터링의 경우 계절에 따른 온도 변화가 심하여 이에 따른 보정이 요구된다. 시추공영상촬영은 일정한 양수를 유지해야 하고 지하수에 이수의 영향이 클 경우 촬영이 불가할 뿐 아니라, 수평적인 안정도를 판별하기에는 비용이 많이 요구되는 단점이 있다.

1995년 8월 14일 국토확장 및 간척농지 증대를 목표로 서산 A지구 방조제가 15년 3개월의 공사기간을 거쳐 완공되었다. 이 사업으로 해안선이 110 km에서 8 km로 단축되었으며 2억 4천만 톤의 추가적인 수자원을 확보하였다. 서산 A지구방조제는 충남 홍성군 서부면 궁리와 서산시 부석면 간월도리 일원을 연결하는 방조제로, 해수침투에 따른 안정성 저하의 환경에 놓여 있다. 또한 근래에 실시된 제체 투수시험 결과 전량이 누수되어 제방 안정성과 해수의 침투에 따른 지하수 염수화의 문제가 제기되었다. 따라서 본 연구에서는 충남 홍성군 서부면 궁리와 서산시 부석면 간월도리 일원에 이르는 3 km의 방조제 구간에서 원격탐사(Remote Sensing), 전기비저항 탐사(Electrical Resistivity Survey), 전기전도도 탐사(Electromagnetic Survey), 시추공영상촬영(Optical Borehole Imager : OBI)의 융합적 분석을 통해 누수구역의 위치 및 규모를 보다 정확하게 예측하고자 한다.

2. 지형 및 지질개요

본 연구지역은 충청남도 홍성군 서부면 궁리와 서산시 부석면 간월도리 일원으로 1 : 50,000 축적의 「서산」 도폭 하단과, 「홍성」 도폭의 좌측에 해당된다. 연구지역인 방조제의 주변 산계는 표고 100 m 이내로 낮고, 서로 뚜렷한 연결성이 없으며, 지형은 침식 윤희상 노년기에 해당한다. 수계는 방조제 내측에 넓은 간

Fig. 1. Location map of the study area.

척농지와 간월호가 있고, 외측에는 천수만이 위치한다 (Fig. 1).

연구지역의 지질은 선캄브리아기의 서산층군에 해당하는 편암류와 태안층, 고생대 무량리층과 이를 관입하는 중생대 흑운모화강암으로 구성된다(Fig. 2). 선캄브리아기의 서산층군(편암류)은 연구지역의 동남부와 서남부에 넓게 분포되어 있으며 이들과 부정합의 관계로 태안층은 연구지역의 북서부에 분포한다. 선캄브리아기 암석을 고생대 폐름기의 무량리층이 부정합으로 피복하여 동측에 소규모로 분포하고 있다. 이를 관입하는 중생대 주라기 흑운모 화강암은 연구지역의 북부와 북동부에 넓게 분포한다. 그리고 신생대 제4기 충

적층은 연구지역의 북부와 북서부지역에서 모든 암석을 부정합으로 고루 피복하고 있다(Fig. 2). 선캄브리아기의 변성퇴적암류는 편암류 등으로 나뉘는 고변성퇴적암과 태안층으로 불리는 저변성퇴적암으로 나뉜다. 선캄브리아기의 편암류에서 가장 많이 분포하고 있는 것은 운모편암과 석영 장석질 편암이며 대호지층이라고도 불리는 태안층은 사질과 이질이 교호되어 저변성 퇴적암으로 구성된다(Chang and Lee, 1982; Cho *et al.*, 2006).

고생대 폐름기의 무량리층은 적색사암과 셰일, 슬레이트, 유백색 조립질 사암, 암회색 역암 등으로 이루어져 있다. 중생대의 관입암류인 흑운모 화강암은 조립

Fig. 2. Geologic map of the study area. Modified from Chang and Lee(1996).

질 내지 중립질의 조직을 보이며 연구지역의 북부 및 북동부에 분포하며 이 지역의 대부분의 암석을 관입하고 있다(Kim *et al.*, 1995; Cho *et al.*, 2006). 또, 이 암석의 절대연령이 1억 8천만년으로 알려짐에 따라 연구지역에서의 구조활동이 쥐라기 초중엽에 일어났음을 지시한다(Chang and Lee, 1982; Song *et al.*, 1992; Cho *et al.*, 2006). 신생대 제 4기 충적층은 방조제 하류부의 하천변을 따라 분포하며 준고화나 이토질 상태로 실트, 모래, 자갈 등으로 구성된다.

3. 연구 방법

본 연구에서는 누수의 유무와 누수구역의 수평적 및 수직적 판별을 위해 원격탐사, 전기비저항 탐사, 전기전도도 탐사, 그리고 시추공영상분석을 실시하였다. 기존의 연구에서 원격탐사는 위성영상 자료를 이용하여 광범위한 육상이나 해양환경의 거시적인 변화를 연구하는 데에 보편적으로 사용되어 왔으며, 근래에는 해상도의 증가에 따라 호수의 온도변화와 같은 일시적이며 국부적인 환경에 대한 연구에도 수행된 바 있다(Lee and Han, 2005). 본 연구에서는 Landsat ETM+ 영상을 사용하여 누수의 유무 및 대략적인 누수지역을 정의하였으며, 전기비저항 탐사와 전기전도도 측정법을 통해 연구지역의 지하구조의 수평적 누수구간을 더욱 정밀히 유추하였다. 또한 원격탐사, 전기비저항 탐사 및 전기전도도 탐사로 판별된 누수구역에 대해 시추공영상촬영을 수행하여 누수구역의 확인과 수직적인 누수구간 분포를 판별하여 연구결과의 신뢰도를 높였다.

본 연구의 연구대상인 서산 A 방조제는 충청남도

홍성군 서부면 궁리와 서산시 부석면 간월도리를 연결하는 약 3 km 길이의 방조제로 너비와 높이는 각각 약 26.6 m, 26 m이다. 탐사의 효율성과 누수구간 정의의 편의를 위해 본 연구에서는 방조제 전체구간을 1000 m 간격으로 나누어 각각 A, B, C구간으로 표기하였으며, 이들을 다시 50 m간격으로 60개의 소구간으로 나누어 A, B, C구역을 각각 No. 0~20(1000 m), No. 20~40(1000 m), No. 40~60(1000 m)으로 표기하였다(Fig. 3).

3.1. Landsat 위성관측수온 분석

원격탐사는 전지구적인 규모의 지구온난화나 해수면 표층수온의 변동과 같은 장기적인 변화뿐만 아니라 국부적인 하천 또는 호수에서의 단기적인 표층수온 변화에 대한 연구에 효과적으로 사용되어 왔다 (Malm and Jonsson, 1993; Huh and Sim, 1987; Emery *et al.*, 2001; Lee and Han, 2005). 일반적으로 방조제에 누수가 없는 경우, 방조제 내측에 있는 담수호의 온도가 상대적으로 방조제 외측에 존재하는 해수의 온도와 차이를 보이게 되는데, 방조제에 균열이 생겨 누수가 있을 경우, 누수구간에서 두 개의 다른 온도 분포를 보이는 해수와 담수가 혼합되어 상대적으로 불균질한 수온분포를 보일 것이며, 이는 원격탐사를 통해 감지할 수 있다. 따라서 본 연구에는 Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper Plus(ETM+)위성영상의 열감지밴드 (band 6)를 이용해 10.4~12.5 μm 의 파장대에서 획득한 복사량으로 표층수온을 추출하였다. Landsat 7 ETM+의 열적외선 밴드의 경우 상대적으로 높은 공간해상도 (60 m)를 가지고 있어 소규모의 변화를 감지

Fig. 3. Survey sections and sub-divisions of electrical resistivity survey, electromagnetic survey and boreholes.

할 수 있는 장점이 있으나, 센서에서 감지되는 열적외선이 대기를 통과하여 도달하게 되어 대기의 영향을 받게 된다. 특히 Landsat 7 ETM+의 열적외선 센서의 파장영역이 대기 중의 H_2O 에 의해 약 10%의 흡수된 방사에너지를 기록하게 되므로 대기보정이 없을 경우 실제 온도보다 다소 낮은 ($2\sim3^{\circ}C$) 온도분포를 보이는 단점이 있다 (Jeong and Yoo, 1999). 그러나 본 연구의 경우 절대 온도의 분포보다는 상대적인 온도분포와 이들의 혼합양상을 찾는 데 주안점을 두었으며, 영상이 얻어질 당시의 대기현상이 영상에 분포하는 모든 지역에 동일한 조건으로 상대온도분포를 관찰하는데 적합하여, 대기효과에 대한 보정없이 DN(Digital Number) 값을 위성온도로 계산하였다.

본 연구에서는 방조제의 균열에 의한 누수를 확인하기 위해 준공된 후 약 6년 후의 영상인 2001년도 9월 23일 만조 시(오전 10~11시)에 획득한 영상(ID: LE71160352001266EDC00, Figs. 4a and 4b)과 약 17년 후의 영상인 2012년도 6월 17일 간조가 진행되던 오전 10~11시에 촬영한 구름의 영향이 거의 없는

깨끗한 영상(ID: LE71160352012169EDC00, Figs. 4c and 4d)을 미국 USGS Earth Resources Observation and Science Center (<http://glovis.usgs.gov/>)에서 획득하여 방조제 양측에 분포하는 담수호인 간월호와 해수인 천수만의 온도분포를 비교·분석하였다. 2012년에 촬영된 영상의 경우 (Fig. 4c) 2003년 Landsat ETM+ 센서의 Landsat-7 Scan Line Corrector (SLC)-off의 영향으로 위성영상에 스트립이 있으나, 스트립의 영향이 연구지역에 나타나지 않으므로 (Fig. 4d) 본 연구에 영향을 미치지 않았다.

Landsat ETM+의 열적외선 밴드는 low gain과 high gain으로 구성되어 2개의 열적외선 영상을 제공한다. 따라서 각 열적외선 밴드의 DN 값을 위성온도로 변환하는데 서로 다른 영역의 방사휘도 (spectral radiance) 범위 값을 사용한다. 기존 연구(Lee and Han, 2005)에 의하면 두 밴드의 온도차가 평균 $0.5^{\circ}C$ 이하로 어느 밴드를 사용하여도 연구결과에 큰 영향을 미치지 않아, 본 연구에서는 low gain 열적외선영상을 위성온도변환에 사용하였다. 열적외선 영상의 DN값은

Fig. 4. True color composite (B, G, R) of Landsat ETM+ images employed in this study; a) Landsat ETM+ image acquired in 2001, b) Zoom-in image of the study area from Landsat ETM+ image acquired in 2001, c) Landsat ETM+ image acquired in 2012, and d) Zoom-in image of the study area from Landsat ETM+ image acquired in 2012.

Table 1. Details of the Electrical resistivity survey lines

Line name	Section number(No.)	Pole distance(m)	Method	Exploration depth(m)	Length(m)
R-1	5~13	5	Modified Pole-Pole array	25	400
R-2	13~21				
R-3	21~29				
R-4	29~37				
R-5	37~45				
R-6	45~53				
R-7	53~61				
R-8	61~65				
					160

Chander and Markham(2003)의 수식을 따라 방사휘도(Radiance)로 변환하였으며, 분광파장의 최소에너지값(LMIN)은 $0.0(w/m^2*sr*\mu m)$, 최대에너지값(LMAX)은 $17.04(w/m^2*sr*\mu m)$ 를 각각 사용하였다. 아래의 식에서 QCAL은 열적외선 영상의 DN값, QCALMIN은 DN의 최소값으로 0, QCALMAX는 DN의 최대값으로 255를 사용하였다.

$$L(\lambda) = \frac{(LMAX(\lambda) - LMIN(\lambda))}{(QCALMAX - QCALMIN)} \times (QCAL - QCALMIN) + LMIN(\lambda) \quad (1)$$

위의 수식(1)에 의해 계산된 복사에너지 값은 다시 NASA에서 제공하는 온도산출 경험식(2)을 바탕으로 위성온도(T)로 변환하였다. K_1 과 K_2 는 온도식에 사용되는 보정계수 값으로 $666.09(w/m^2*sr*\mu m)$ 와 1282.71(Kelvin)을 각각 사용하였다.

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (2)$$

T = effective-satellite temperature(Kelvin)

K_2 = calibration constant 2(Kelvin)

K_1 = calibration constant 1(Kelvin)

3.2. 전기비저항 탐사(Electrical Resistivity Survey)

과거 전기비저항 탐사는 수리시설물의 노후화로 인한 누수나 자연재해로 인한 균열 등을 탐지하는데 보편적으로 사용되어 왔다(Chung *et al.*, 1992; Kim and Jo, 1999; Shon and Lee, 2003; Oh and Suh, 2008). 본 연구에서는 신호 대 잡음비가 높고 자료의 해석이 간편한 변형된 단극배열(Modified Pole-Pole Array) 전기비저항 탐사법을 실시하였다. 염수에 의해 포화되어 높은 전기전도도를 갖는 대상 매질의 특성상

방조제에서는 상대적으로 안정된 측정값을 얻을 수 있다(Song *et al.*, 2000). 단, 방조제의 특성상 구조물의 한 쪽에 위치하는 수문이 전기비저항 탐사에 영향을 미칠 수 있으므로, 본 탐사에서는 수문이 위치하지 않는 No. 5과 No. 60사이의 구간에서 변형된 단극배열법을 적용해 연구를 수행하였다. 이 배열법은 축선의 양단에 음의 전류 및 전위전극을 고정시키고 양의 전류 및 전위전극을 이동시키면서 측정함에 따라 원거리 접지가 생략되어 탐사의 효율성과 측정값의 신호 대 잡음비(Signal to Noise Ratio, S/N ratio)를 향상시킨다(Kim *et al.*, 2001).

본 탐사에서는 연구지역의 가탐심도(25 m)를 고려하여 전극 간격을 5 m로 설정한 후 총 8개의 축선을 사용하여 탐사를 실시하였다. 본 연구에 사용된 총 8개의 축선 중 1번에서 7번 축선의 전극개수는 90개로 400 m의 결과단면을 유추하였고, 8번 축선의 전극개수는 40개로 160 m의 결과단면을 유추하였다(Table 1, Figs. 3 and 5).

변형된 단극배열법의 겉보기 비저항(Apparent Resistivity, ρ_a)은 전류량을 I, 측정된 전위차를 ΔV , 음과 양의 전류전극간의 간격을 sa , 음과 양의 전위전극간의 간격을 pa , 축선의 연장을 $(s+n+p)a$ 라 할 때 경험식(3)에 따라 산출된다(Kim *et al.*, 2001).

Fig. 5. Schematic View of the Modified Pole-Pole Array Electrical Resistivity Survey.

$$\rho_a = 2\pi na \frac{\Delta V(s+n)(n+p)(s+n+p)}{I \quad sp(s+2n+k)} \quad (3)$$

3.3. 전기전도도 탐사(Electromagnetic Survey/Electrical Conductivity(EC) Survey)

전기전도도는 용액이 전류를 운반할 수 있는 정도를 말하며, 그 단위는 $\mu\text{m}/\text{cm}$ 또는 mS/m 를 사용하고 전기비저항의 역수를 띤다. 화학적으로 순수한 물은 전기전도도가 매우 낮은 일종의 절연체이지만 소량의 고용물이 혼합되면 고용물질이 물속에서 서로 각각 다른 전하를 가지는 이온으로 분리되어 전기가 흐르게 되므로 전기전도도는 지하수의 염농도 및 분포, 오염물질의 이온강도를 나타내는 지표로 사용할 수 있다(Shin *et al.*, 2005; Hwang *et al.*, 2006). 따라서 방조제 내부의 담수에 외부의 해수가 유입될 경우 누수구간의 전기전도도가 다른 지역에 비해 상대적으로 높다.

전기전도도 탐사는 전기전도도(Electrical Conductivity), 염도(Salinity), 총용존고형물(Total Dissolved Solids, TDS), 수온(Temperature) 등을 측정하는 다항목 수질 측정기를 이용하여 해수의 조고가 가장 낮은 간조 때(2012년 7월 24일 13:42)와 해수의 조고가 가장 높은 만조 때(2012년 7월 24일 19:04)에 각각 1회씩 실시하였다. 이는 조석운동, 담수의 배출 및 함양에 의해 수두의 변화 및 담수와 해수의 혼재양상이 영향을 받을 수 있음을 고려한 것이다(Freeze and Cherry, 1979). 본 탐사는 방조제의 내측 담수호에서 방조제를 따라 수평방향으로 배로 이동하면서 서산시 간월도리 방향으로 No. 0구간과 No. 60 구간에 이르는 연장 3000 m의 구간을 연속적으로 측정·기록하였고 염도와 수온도 같은 방법으로 수행하였다. 또, 현장에서 정확한 위치파악을 위하여 GPS측량을 병행하여 1초 간격 위치, 전기전도도, 염도 및 수온을 측정하였으며 시험장비는 Lutron사의 CD-4317SD를 사용하였다.

3.4. 시추공영상촬영법(Borehole Image Processing System, BIPS)

시추공영상촬영은 시추공벽의 형태의 촬영을 통해 단층대 및 절리의 방향성 등을 직접적으로 관찰하여 지하 불연속면을 가시화함으로써 제한된 영역의 정보만을 획득하는 지표지질조사의 문제점을 보완할 수 있는 효율적인 대안으로 수행되어 왔다(Song and Park, 2002). 본 연구에서는 심도에 따라 시추공벽을 촬영하면서 시추공벽의 색을 연속적으로 재현하여 암종을 구분하는 광학시추공영상촬영법(Optical Borehole Imager,

OBI)을 사용하였다(Song and Park, 2002).

시추지점은 방조제 하부 포화대 및 누수 취약 구간을 파악하기 위하여 Landsat 7-ETM+ 위성영상 분석에서 나타난 이상대 구간과 전기전도도 측정에서 나타난 불규칙한 전기전도도의 상승구간 및 전기비저항 탐사의 저비저항 이상구간이 공통적으로 나타나는 구간을 선정하였다.

따라서 상기된 탐사결과 얻어진 이상대 구간 중 No. 8, No. 37, No. 43, No. 50, No. 54에 각 1공씩 총 5개 공(BH-1~BH-5)을 시추하였고, 그 중 이상대의 존재 가능성이 높은 세 구간(No. 8, No. 37, No. 43)의 시추공(BH-1~BH-3)에 대해 시추공영상촬영을 수행하였다(Fig. 3). BH-1, BH-2, BH-3, BH-4공의 시추심도는 0~30 m이며 BH-5공의 시추심도는 24 m이다. BH-1, BH-2, BH-3공에서 시추공영상촬영 구간은 각각 0.9~30 m, 0.9~25.3 m, 0.9~29.7 m으로 측정심도 전 구간에서 퇴적물의 암상 및 파쇄대에 대한 조사를 실시하였다.

시험장비는 일본 OYORKSML OBI를 사용하였다. 본 장비는 공벽, 화상, Probe, Centralizer 및 Geologger-3에 탑재된 Module로 구성되어 검층용 Winch 및 심도 측정용 Sheave를 조합하여 사용한다. 이 장비는 다목적 Data Logger인 Geologger-3(Model-3970)에 Video신호 처리회로와 Control Software를 조립하여 공벽화상 Probe(Model-3854)로 촬영된 보링공의 공벽화상을 검층용 Cable로 송신하여 360도 전개화상을 표시·기록한다.

4. 결 과

4.1. 위성영상분석

누수구간의 유무와 규모를 판별하기 위해 Landsat ETM+의 열적외선 밴드를 사용하여 2001년과 2012년에 촬영된 영상에 대해 방조제 내측의 담수호와 외측의 해수의 온도분포를 살펴보았다. 2001년도 9월 23일 만조시인 오전 10~11시에 촬영된 위성영상에서 방조제 외측의 해수는 균질하게 높은 온도분포를 보이는 반면, 내측의 담수호의 온도는 높은 온도와 낮은 온도가 혼재해 있는 양상을 보인다(Fig. 6a). 본 영상이 촬영될 당시의 조수방향은 방조제 외측의 해수에서 방조제 내측의 담수호로 유동하는 방향이며, 기상청의 지상관측자료에 따르면 기상상태는 지상 평균 기온 16.2°C에서 8.1°C로 급격히 낮아진 환경이었다. 방조제 외측의 해수의 수온분포는 대부분의 지역에서 275.9~

Fig. 6. At-satellite temperature distribution of the study area from the Landsat ETM+ thermal band acquired on September 23, 2001(a), and June 12, 2012(b).

276.0 K의 온도분포를 보이며, 일부분에서 약간의 276.0~276.6 K와 275.3~275.5 K의 수온분포가 산발적으로 분포한다. 275.3 K보다 낮은 수온은 극히 제한된 지역에서 소규모로 관찰된다. 그러나 방조제 내측에 위치한 담수호의 수온분포는 해수보다 낮은 수온인 275.5~275.9 K가 가장 넓은 영역에 분포하며, 해수에 비해 275.3 K보다 낮은 수온을 보이는 지역의 분포가 상당히 넓게 나타난다(Fig. 6a). 또한 해수의 온도분포를 방조제에서 담수호 방향으로 살펴보면 방조제와 인접한 지역에서 276.0 K이상의 수온분포가 주를 이루며 담수호 방향으로 진행함에 따라 높은 수온과 낮은 수온의 혼재양상이 심해진다. 또한 방조제에서 멀어질수록 낮은 수온의 분포가 주를 이룬다. 이는 균질한 해수온도로 이루어져 있을 때 방조제의 누수가 없을 경우 수온분포는 대체적으로 균질할 것으로 예상되나, 담수호의 수온분포는 상대적으로 높은 수온의 해수가 방조제의 누수구간을 따라 담수호로 유입됨을 지시한다. 또한 방조제와 인접한 높은 수온 분포구간으로 이루어져 있을 때 방조제의 누수구간은 상당한 규모일 것으로 예상된다. 담수호 내 수온분포로 유추한 방조제의 누수구간은 No. 15~21, No. 25~45, No. 45~55 구간에서 각각 300 m, 1000 m, 500 m의 규모로 확인되었다. 특히 No. 25~45구간이 다른 구간에 비해 용출량이 많은 것으로 보아 상대적으로 규모가 큰 이상대가

존재할 것으로 예측된다.

2012년도 6월 17일 간조 시인 오전 10~11사이에 촬영된 위성영상은 방조제 내측의 담수호가 상대적으로 균질한 높은 수온 분포를 보이는 반면 외측의 해수는 낮은 수온분포와 높은 수온분포가 혼재된 양상을 보인다. 이는 조석에 따른 물의 유동방향이 담수호에서 바다로 나가는 방향임을 고려할 때 담수의 방조제를 통한 해수로의 유출을 지시한다. 방조제 내측의 담수호의 수온은 모든 지역에서 276.5 K이상의 온도분포를 보이며, 276.5 K에서 278.4 K의 수온분포가 고르게 위치하는 반면, 해수의 온도분포가 276.5 K 이상을 보이는 지역은 방조제와 인접한 지역에 매우 제한적으로 관찰되며, 275.5 K보다 낮은 수온이 거의 모든 해수지역에 분포한다(Fig. 6b). 그러나 방조제로부터 해수방향으로의 온도분포는 방조제로부터 멀어짐에 따라 온도의 감소가 확연히 관찰된다. 2001년의 영상과 비교해 수온의 혼재양상이 상대적으로 작은 규모인 것은 방조제 외측에서 해수의 유동이 활발하고 유량 또한 담수호보다 상당히 많기 때문인 것으로 사료된다. 해수의 수온분포를 통해 미루어 본 방조제의 누수구간은 방조제 전역에 걸쳐 관찰되며, 특히 고온의 온도분포가 No. 15~21, No. 25~45, No. 45~55구간에서 각각 300 m, 1000 m, 500 m의 규모로 나타났다. 한편, No. 50구간에서 담수의 유동량이 다른 구간에 비해 상대적으로 많은 것으로 나타났는데 이는 보조갑문의 영향을 받은 것으로 고려된다(Fig. 6b).

2001년과 2012년에 촬영한 두 위성영상을 비교 분석한 결과 수온분포에 따른 누수예상구간이 상당히 일치하며 특히 No. 15~21, No. 25~45, No. 45~55구간에서 각각 300 m, 1000 m, 500 m의 규모의 이상대가 존재할 것으로 예측된다. 또한 두 영상의 촬영시점이 2001년과 2012년인 점을 고려하면, 방조제의 누수가 10여년 이상의 상당한 시간동안 발생하고 있었음을 지시한다. 따라서 원격탐사를 이용한 방조제의 안정성 평가는 누수구간 유추 및 누수시기의 판별에 있어 비용대비 매우 효과적인 것으로 생각된다.

4.2. 전기비저항 탐사

총 연장 3 km의 방조제 구간 중 갑문의 영향이 없는 No. 5~60 구간에서 총 2,950 m의 연장에 대하여 전기비저항탐사를 실시하였으며, 각 구간에서의 전기비저항 평균치를 도출하였고(Fig. 7), 취득된 자료를 2차원 역산을 통해 2차원 비저항 단면도를 작성하였다(Fig. 8). 단, No. 57구간에서 측정된 전기비저항의 평

Fig. 7. Averaged electrical resistivity(ER) values for each survey sub-division.

Fig. 8. Vertical profiles of electric resistivity distribution inverted from the modified Pole-Pole electrical resistivity survey.

균값은 $3941.566 \Omega\text{-m}$ 로 이 구간의 표준화된 잔여 값이 95%의 신뢰구간을 벗어남으로써 가외치(Outlier)로 판단되어 연구자료에서 제외하였다. 전기비저항 탐사결과 총 2,950 m의 탐사구간 중 65% 이상의 구간에서 전기비저항이 낮은 저비저항 이상대로 분포되는 양상을 보였다. 전체 탐사구간의 평균 전기비저항값은 $83.197 \Omega\text{-m}$ 이며, A, B, C구간의 평균 비저항값은 각각 $71.710 \Omega\text{-m}$, $97.878 \Omega\text{-m}$, $94.946 \Omega\text{-m}$ 으로 A구간의 평균비저항 값이 다른 두 구간에 비해 현저히 낮은 비저항치를 보인다.

A구간의 경우 다른 구간에 비해 전체적으로 낮은 전

기비저항 분포를 보이며, 특히 No. 12구간에서 No. 20구간으로 이르는 상당히 넓은 지역에 걸쳐 평균이하의 전기비저항 값을 보인다. No. 15구간에서 No. 18구간의 경우 전기비저항값이 24.457 (No. 18)에서 36.859 (No. 15) $\Omega\text{-m}$ 을 보여 연구지역 전체에서 가장 낮은 비저항값을 보이는 지역이다(Fig. 7). 비저항 단면에 나타난 이들 저비저항 이상대의 깊이는 심도 20~25 m에 이르는 깊은 심도에서 저비저항값이 집중된 양상을 보인다(Fig. 8).

또한, B구간에서는 전체 평균 비저항이 $97.878 \Omega\text{-m}$ 로 다른 지역에 비해 상대적으로 높는데 이는 No. 25

에서 No. 29구간에서 상당히 높은 비저항값을 보이기 때문인 것으로 사료된다. 특히 No. 28구간의 경우 비저항값이 407.019 Ω -m로 전체 평균값의 5배에 이르는 고비저항대가 분포한다. B구간에서의 저비저항대는 연장성이 상대적으로 적고, 평균이하의 저비저항과 고비저항지역이 서로 교호하여 저비저항 이상대가 산발적으로 분포한다(Fig. 7). 구간별 평균 비저항에 따른 이상대는 No. 21~22, No. 24~25, No. 31~33, No. 35~36, No. 39~40이며 이 중 No. 36에서 29.707 Ω -m로 가장 낮은 비저항값을 보였으며, No. 31과 No. 24에서 각각 46.016 Ω -m와 47.398 Ω -m의 비저항값을 보인다(Fig. 7). 그러나 B구간에서 전체 평균에 의해 정의한 이상대와 단면을 통해 유추한 이상대에는 약간의 차이가 발견되는데 이는 구간평균의 경우 전체 심도의 평균을 이용하므로 고비저항대와 저비저항대가 다른심도에서 공존할 경우 서로 상쇄되어 이상대의 판별이 모호해지기 때문이다. 비저항단면도를 통해 유추한 이상대는 구간별 평균에 비해 상당히 광범위한 이상대를 지시한다. 단면도에 따르면 비저항이상대는 No. 23에서 No. 40에 이르는 광범위한 지역 중 No. 25와 No. 27을 제외한 모든 구간에서 관찰된다. 이들의 심도는 No. 29에서 No. 40의 구간에서 10 m에서 20m까지 25 m에 이르는 상당히 넓고 깊은 이상대의 분포를 지시하며, No. 23에서 No. 28구간은 15 m 이상의 상대적으로 깊은 심도에서 이상대가 분포한다(Fig. 8).

C구간에서 구간별 평균값에 기준한 비저항 이상대는 주로 No. 42~52구간에서 확인되었으며 이 구간 역시 저비저항대와 고비저항대가 교호하는 양상을 보인다.

특히 No. 46~48구간은 35.290~45.584 Ω -m로 가장 넓은 저비저항 이상대를 보인다(Fig. 7). 그 외 No. 43, 44, 51구간에서 저비저항 이상대를 확인하였다. B구간과 마찬가지로 C구간도 구간별 평균값에 따른 이상대와 단면도에 따른 이상대에는 큰 차이를 보인다. 단면도에 따르면 No. 40에서 No. 55구간에서 일부를 제외하고 거의 모든 구간에서 매우 광범위한 구간에 25 m의 심도까지 이상대의 분포를 지시한다(Fig. 8). 특히 No. 48, 50, 53, 54, 55구간에서는 15 m심도에서 25 m심도까지 이상대가 상대적으로 깊은 심도에서 분포하나 나머지 지역은 최소심도 5 m에서 이상대가 시작되는 매우 광범위한 심도에서 이상대가 분포함을 확인하였다(Fig. 8).

4.3. 전기전도도 측정

본 조사지역의 전기전도도 측정은 간조시간(2012년 7월 24일 13시 42분)과 만조시간(2012년 7월 24일 19시 04분)에 맞추어 배를 이용하여 No. 0~60구간에서 수행하였으며 각 구간에서 나타난 전기전도도값의 변화양상을 그래프로 도시하였다(Fig. 9). 전 구간의 전기전도도 평균값은 만조시와 간조시에 각각 1.885 mS와 1.874 mS이었으며 A구간에서의 전기전도도 평균값은 만조 때와 간조 때가 각각 1.881 mS, 1.896 mS, B구간에는 만조와 간조시 평균값은 1.891 mS, 1.868 mS, C구간에서 만조와 간조시에 각각 1.894 mS, 1.857 mS로 C구간에서 만조와 간조의 전기전도도값에 변이가 가장 심하며, B구간과 A구간 순으로 변이가 감소한다. 만조 시에는 물의 유동방향이 해수에서 담수

Fig. 9. Averaged electrical conductivity(EC) values for each survey sub-division.

방향으로 해수의 침투가 많을 경우 상대적으로 높은 전기전도도값이 예상되는 반면, 간조 시에는 물의 유동방향이 담수에서 해수방향으로 전기전도도 측정치가 해수의 영향을 적게 받은 담수의 전기전도도 값으로 예상된다. 따라서 간조와 만조 시의 전기전도도값의 변화가 심할수록 해수의 침투가 더 많은 것으로 고려된다(Hwang *et al.*, 2000).

A구간에서는 전체적으로 만조 시의 전기전도도 값이 간조 시의 값보다 작은 경향을 보이며, No. 6~10구간에 서만 만조 때의 전기전도도 값이 0.013 mS, 0.028 mS, 0.047 mS, 0.058 mS, 0.050 mS의 규모로 간조 시보다 높아 이상대가 분포할 것으로 사료된다(Fig. 9). 갑문이 위치한 No. 0~2 구간에서는 전 구간의 평균이나 A구간의 평균과 비교했을 때, 만조시와 간조시가 각각 1.997 mS, 2.152 mS으로 다소 높은 전기전도도 값을 나타내는데, 이는 갑문이 해수의 유입에 간접적인 영향을 받고 있음을 예측할 수 있다. B구간의 경우 No. 20~25를 제외한 모든 구간에서 만조 시 전기전도도 값이 간조 때의 전기전도도 값보다 높게 형성되었다. 특히 No. 33구간에서 만조 시에 2.108 mS으로 나타났지만 간조 시에는 1.908 mS을 보여 만조와 간조 시 평균차는 0.110 mS으로 전 구간에서 가장 높게 측정되었고, No. 32구간에서 No. 38구간의 경우 다른 이상대보다 높은 전기전도도 값의 변화를 보여, 상당한 규모의 이상대가 분포할 것으로 예측된다(Fig. 9). C구간은 No. 47과 No. 48구간과 사이의 지역을 제외한 모든 구간에서 만조 시의 전기전도도 값이 높은 가장 광범위한 이상대의 분포를 보인다(Fig. 9). 특히, 보조갑문이 위치한 No. 50와 No. 51 구간에서는 간조 시에 각각 1.852 mS, 1.866 mS로 전체구간의 평균(1.885 mS)에 비해 낮았으나, 만조 시에는 1.921 mS, 1.935 mS로 측정되어 전체구간의 평균(1.874 mS)에 비해 상당히 높은 전기전도도를 가진다는 점을 확인할 수 있었다. 따라서 만조 시에만 전기전도도 값이 높아지는 경향을 보이는 No. 50와 No. 51 구간은 해수의 유입에 직접적인 영향을 받고 있음을 지시한다.

4.4. 시추공영상촬영 탐사

이상대 구간에 대한 존재의 확인과 그 수직적 분포를 파악하기 위해 No. 8, No. 37, No. 43, No. 50, No. 54에 각 1공씩 총5개 공(BH-1~BH-5)을 시추하였고, 그 중 세 구간(No. 8, No. 37, No. 43)의 시추공(BH-1~BH-3)에 대해 시추공영상촬영을 수행하였다. 시추공영상촬영 결과 본 연구지역의 토사층은 심도에

따라 매립층, 퇴적층, 풍화대로 구성되어 있으며 풍화암 및 흑운모화강암과 편암이 기반암을 이루고 있음을 확인하였다. 층후는 매립층이 7.3~22.6 m, 퇴적층은 3.0~5.0 m, 풍화대가 2.2~9.6 m, 풍화암은 1.5~10.2 m로 나타났으며, 그 이하 심도는 기반암의 연암으로 확인하였다. 시추공영상촬영으로 기초지반인 퇴적층, 풍화토층 구간에서 누수 취약구간 발달을 확인하였다(Figs. 10-12). No. 8구간에서 BH-1 시추공의 영상을 촬영한 결과 매립층으로 이루어진 5.1~5.8 m구간과 실트질 모래로 구성된 풍화토층의 14.8~15.5 m구간에서 누수에 취약한 파쇄대를 확인되었고, 이는 전체 시추심도 30 m 중 1.3 m 구간에서 누수가 있을 확률이 높음을 지시한다(Fig. 10). No. 37구간에 위치한 BH-2 시추공의 경우 파쇄대가 전체적으로 매우 광범위하게 분포하고 있었으며 심도에 따라 매립층인 4.5~5.2, 6.2~6.7, 9.6~10.2, 13.3~13.6, 13.7~14.2, 14.7~15.2, 16.0~16.5, 16.7~17.3, 18.4~18.6, 18.8~19.0, 19.2~19.7 m에 이르는 전체 시추심도 30 m구간 중 5.1 m의 구간이 누수에 취약한 것으로 판명되었다. 특히 파쇄구간의 수직적 분포가 0.2 m에서 0.6 m의 규모의 파쇄구간이 불연속적으로 다수 분포하는 것이 특징이라 할 수 있다(Fig. 11). No. 43구간에서 30 m심도로 시추공영상을 촬영한 BH-3공에서는 매립층인 3.3~4.3, 6.6~7.2, 8.7~8.9, 9.7~10.4, 10.5~11.0, 12.5~13.1, 14.8~15.3 m 구간과 매립층과 퇴적층의 교호하는 16.5~17.3 m구간에서 누수에 취약한 파쇄대 구간을 확인하였다(Fig. 12). 이는 총연장 30 m의 15%에 해당하는 구간으로 No. 37구간에 비해 파쇄구간이 0.5 m 적은 반면 파쇄규모는 0.5 m에서 1 m에 이르러 상대적으로 큰 파쇄규모를 보인다. 제방에서 파쇄대의 연장성이 존재한다고 가정할 때 본 탐사결과에 의하면 제방의 중심부에서 누수 가능성이 가장 높으며 A구간의 누수규모가 다른 구간에 비해 상대적으로 적을 것으로 예상된다.

5. 고 찰

본 연구에서는 제방의 안정성 및 누수위험의 평가에 사용되는 다양한 탐사를 통해 각 탐사방법이 가지고 있는 장점을 부각하고 단점을 보완할 수 있는 융합적 연구방법을 제시하였다. 원격탐사는 열적외선밴드를 사용하여 해수와 담수의 수온차에 의한 혼합양상을 분석하여 제방의 누수판별 및 대략적인 누수구간을 확인하였다. 또한 원격탐사의 경우, 과거의 위성자료를 활용

Fig. 10. Borehole image profiles of BH-1 located at sub-division No. 8 imaged from the borehole imager where dotted rectangles define fracture zones.

하여 누수의 시기 및 기간을 인지할 수 있는 장점과 자료의 처리 및 분석에 있어 상대적으로 적은 비용으로 누수를 탐지할 수 있는 장점이 있음을 확인하였다. 전기비저항탐사는 제방을 이루는 물질의 물성특징과 누

수가 있을 경우 상대적인 비저항값이 작은 점을 인지하여 누수구간의 수평적인 분포 뿐 아니라 수직적인 분포를 유추할 수 있다. 전기전도도 탐사의 경우, 만조와 간조간의 전기전도도 값의 변화를 통해 각 위치에

Fig. 11. Borehole image profiles of BH-2 located at sub-division No. 37 imaged from the borehole imager where dotted rectangles define fracture zones.

따른 해수의 담수로의 유입에 따른 만조 시기의 전기 전도도 상승을 간조시기의 담수의 전기전도도와 직접적으로 비교함으로써 배경치의 이상요소를 제거 할 수 있고 국지적인 변화를 감지할 수 있는 장점이 있다. 또한 시추공 영상촬영은 가장 확실하게 누수의 가능성

을 확인 할 수 있는 방법으로 수직적인 누수구간의 인지에 있어 탁월한 방법이다. 따라서 각 탐사법이 가지고 있는 장점을 융합할 경우 수평적 및 수직적인 누수구간의 확인 및 판별이 가능하고, 시간적인 요소도 함께 고려할 수 있으며, 시추공에서 확인된 수직적 파쇄

Fig. 13. Integrated analysis for water leakage detection of the Seosan-A sea wall based on vertical profiles of anomalies detected from remote sensing(RS), electrical conductivity survey(EC), electric resistivity survey(ER), and borehole image processing system(BIPS). Vertical exaggeration: 50x.

어 전체 60구간 중 26개 구간이 두 탐사에 의해 누수가 존재할 확률이 높은 구간으로 사료된다(Fig. 13). 누수구간의 수평적 분포와 수직적 분포를 유추할 수 있는 전기비저항 탐사는 전체 60구간 중 36구간에서 이상대가 존재함을 지시하였으며, 이는 총연장의 60%에 해당한다. 전기비저항 탐사결과 이상대로 판명된 전체 36구간 중 각각 26개의 구간이 원격탐사 및 전기전도도 탐사와 서로 중첩되며, 세 탐사법이 모두 이상대로 지시한 구간은 25개 구간으로 전체 제방 중 41.7%가 누수의 확률이 매우 높은 것으로 예상된다(Fig. 13). 또한 전기비저항 탐사의 의해 유추된 수직적인 누수구간의 분포는 대체로 깊은 심도에 넓은 지역에 걸쳐 분포한다. 시추공영상촬영결과는 누수구간의 수직적 분포가 낮은 심도에서 상대적으로 깊은 심도까지 상당한 연장으로 발달되어 있음을 지시하였고, 또한 파쇄대의 불연속성을 확인하였다. No. 37과 No. 43에서 시추공영상촬영결과 확인된 9.6 m의 파쇄대구간 중 약 43%가 전기비저항탐사에서 누수구간으로 유추된 지역과 중첩되었으나, 전기비저항탐사의 수직적 파쇄구간의 신뢰도는 상대적으로 높지 않다. 특히 파쇄구간이 적은 No. 8구간에 분포하는 시추공의 경우 원격탐사와 전기비저항탐사 모두 파쇄구간의 인지에 실패하였으나, 전기전도도탐사의 경우 이상대가 존재함을 지시하였다. 따라서 네 탐사법을 종합하여 보면 시추공영상촬영 없이 수직적 파쇄대의 구간을 명확하게 밝혀내기는 어려움이 있으나 수직적으로 상당한 구간의 파쇄가 있을 경우 이를 세 탐사법을 사용하여 매우 높은

신뢰도로 인지 할 수 있으며, 이러한 파쇄구간의 연장성 또한 상대적으로 적은 비용으로 예측할 수 있다. 서산A방조제의 경우 상당한 파쇄구간이 전체 3 km의 연장 중 1 km이상 존재할 것으로 생각되며, 이 파쇄구간을 통해 방대한 양의 해수가 담수로 유입되고 있는 것으로 사료된다.

6. 결 론

본 연구는 충남 홍성군 서부면 궁리와 서산시 부석면 간월도리 일대를 잇는 서산 A지구 방조제에서 원격탐사, 전기비저항 탐사와 전기전도도 탐사, 그리고 시추공영상 촬영을 실시하여 누수구역의 발생위치 및 분포양상을 수평적 및 수직적으로 규명하였다. 원격탐사결과 2012년에 촬영된 만조 시의 온도분포는 해수의 유동방향에 따라 방조제 외측의 해수는 상대적으로 균질한 높은 온도분포(275.9~276.0 K)를 보이는 반면 내측의 담수호는 방조제에서 담수호방향으로 276.0 K 이상의 높은 수온에서 낮은 수온(275.5~275.9 K)으로 온도변화하며 높은 수온과 낮은 수온의 혼재양상이 관찰된다. 한편 2012년에 촬영된 간조 시의 온도분포는 방조제 내측의 담수호가 상대적으로 균질한 높은 수온분포(276.5~278.4 K)를 보이는 반면 외측의 해수는 낮은 수온분포(275.5 K이하)와 높은 수온분포(276.5 K)가 혼재된 양상을 보인다. 이는 만조 시에는 방조제 외측의 해수가 담수로 유입됨을, 간조 시에는 방조제 내측의 담수가 외측의 해수로 유출됨을 지시하여, 전체 3 km

구간 중 약 1.8 km구간에서 누수가 있음을 예측하였다. 또한 두 영상의 촬영시점이 2001년과 2012년인 점을 고려하면, 방조제의 누수가 10여년 이상의 상당한 기간 동안 발생하고 있었음을 지시한다.

전기비저항 탐사를 통해 취득한 구간별 전기비저항 평균값과 2차원 비저항 단면도는 이상대의 수평적 및 수직적 분포에 대한 정보를 제공한다. 전기비저항 탐사결과 전체 구간의 평균 전기비저항값은 83.197 $\Omega\cdot\text{m}$ 이며 전체 탐사구간 중 65%이상의 구간이 평균비저항보다 낮은 이상대로 확인되었다. 그러나 구간별 평균값에 따른 전기비저항 이상대는 높은 비저항과 낮은 비저항이 동일 구간 다른 심도에 공존 할 경우 서로 상쇄되어 단면도를 기초하여 얻어진 이상대의 분포와 차이를 보이며, 이상대분포를 확인하는 용도로는 전기저비저항 단면도를 기초로 하는 것이 보다 효과적일 것으로 사료된다. 전기비저항 단면도에 따른 이상대의 심도는 대부분의 이상대에서 심도 15~25 m에 이르는 상대적으로 깊은 심도에 이상대가 존재함을 지시하며 구간에 따라 5 m내지 10 m 심도에서 이상대가 시작되는 지역도 존재한다. 전기비저항탐사를 바탕으로 유추한 누수구간은 전체 연구구간에서 상당한 너비와 심도에 걸쳐 매우 광범위하게 분포하는 것으로 예상된다.

간조시간과 만조시간에 걸쳐 방조제 내측의 담수호에서 실시된 전기전도도 탐사는 만조 시와 간조 시에 각각 1.885 mS와 1.874 mS의 평균값을 보인다. 만조 시의 전기전도도가 간조 시 전기전도도 보다 높은 해수의 유입가능성이 높은 지역은 전체 연구구간의 약 52%에 이르며, 변이의 크기는 최대 0.110 mS로 상당한 구간에서 배경치의 영향을 최소화한 전기전도도탐사에서 수평적 이상대의 존재를 확인하였다. 이상대 구간에 대한 존재의 확인과 그 수직적 분포를 파악하기 위해 실시한 시추공영상촬영 결과 모든 시추공에서 파쇄대의 존재를 확인하였고, 파쇄대는 기초지반인 퇴적층 및 풍화토층 구간에서 발견되었다. 기존의 탐사법에 의해 이상대의 존재 확률이 높은 구간의 시추공에서 상대적으로 광범위한 파쇄대가 확인되었다. 세 개의 시추공에서 발견된 파쇄대는 전체 30 m심도 중 5.1 m, 4.6 m, 1.3 m 의 연장에 이르며, 또한 파쇄구간의 분포는 0.2~1.2 m범위에서 파쇄대가 불연속적으로 나타난다. 제방에서 파쇄대의 연장성이 존재한다고 가정할 때 본 탐사결과에 의하면 수직적으로 제방의 중심부에서 누수의 가능성이 가장 높을 것으로 예상된다.

원격탐사, 전기비저항탐사, 전기전도도탐사와 시추공영상촬영을 융합하여 서산A지구방조제의 수평적 및 수

직적 누수구간을 분석하였다. 원격탐사의 결과는 전체 방조제 구간 중 약 60%의 구간, 전기전도도 탐사는 약 52%의 구간에서, 전기비저항탐사는 60%의 구간에서 누수의 위험성이 있음을 확인하였으며, 세 수평적 이상대 탐사법의 중첩구간은 전체 60구간 중 25개 구간에 이르러 전체 제방 중 41.7%가 누수의 확률이 매우 높은 것으로 예상된다. 또한 전기비저항 탐사의 의해 유추된 수직적인 누수구간의 분포는 시추공영상촬영 결과에서 나타난 파쇄대구간과 소규모로 중첩되어 상대적으로 수직적 분포를 정확히 예측하는 데는 한계가 있음이 확인되었다. 따라서 각 탐사법이 가지고 있는 장점을 융합할 경우 수평적 및 수직적인 누수구간의 확인 및 판별이 가능하고, 시간적인 요소도 함께 고려할 수 있으며, 시추공에서 확인된 수직적 파쇄상의 수평적 연장성을 예측하는데 높은 신뢰도를 보여 누수구간의 판별에 매우 효과적인 방법이라 사료된다.

사 사

본 연구의 수행에 많은 자료와 도움을 주신 한국농어촌공사 충남지역본부에 감사드립니다. 또한 본 논문을 심사해 주신 익명의 심사위원들에게 감사드립니다. 본 연구는 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행되었다(2012R1A1A1041589).

참고문헌

- Chang, T.W. and Lee, S.Y. (1982) Geologic map of Seosan-Mohang, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources.
- Chander, G. and Markham, B. (2003) Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Post-calibration Dynamic Ranges. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v.41, p.2674-2677.
- Cho, D.L., Kim, Y.J. and Richard, A. (2006) SHRIMP U-Pb geochronology of detrital zircons from iron-bearing quartzite of the Seosan Group: Constraints on age and stratigraphy. The Journal of the Petrological Society of Korea, v.15, p.119-127.
- Chung, S.H., Kim, J.H., Yang, J.M., Han, K.E. and Kim, Y.W. (1992) Delineation of water seepage in earth-fill embankments by electrical resistivity method. The Journal of Engineering Geology, v.2, p.47-57.
- Emery, W.J., S. Castro, G.A. Wick, P. Schuessel, and C. Dolon. (2001) Estimating sea surface temperature from infrared satellite and in situ temperature data. Bulletin of the American Meteorological Society, v.82, p.2773-2785.
- Freeze, R.A. and Cherry, J.A. (1979) Ground Water: Pre-

- tice Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ. 601p.
- Huh, O.K. and Sim, T. (1987) Satellite observation of surface temperature and flow patterns, Sea of Japan and East China sea, late march 1979. *Korean Journal of Remote Sensing*, v.22, p.379-393.
- Hwang, H.S., Lee, S.K., Ko, D.C., Kim, Y.S. and Park, I.H. (2000) Detection of sea-water intrusion caused by tidal action using DC resistivity monitoring. *Geophysics and Geophysical Exploration*, v.3, p.1-6.
- Hwang, S.H., Park, Y.S., Shin, J.H. and Park, K.G. (2006) Detection of inflow permeable zones using fluid replacement conductivity logging in coastal aquifer. *Geophysics and Geophysical Exploration*, v.9, p.225-230.
- Jeong, J.C. and Yoo, S.J. (1999) The analysis errors of surface water temperature using Landsat TM. *Korean Journal of Remote Sensing*, v.15, p.1-8.
- Kim, K.S. and Jo, K.T. (1999) A Study on the Estimation of Leakage and the probing Leakage in the River Bank. *Korean Journal of Korean Society of Soil and Ground water Environment*, v.6, p.213-217.
- Kim, J.H., Yi, M.J., Song, Y.H. and Chung, S.H. (2001) A study of the modified Electrode arrays in two-dimensional resistivity survey. *Geophysics and Geophysical Exploration*, v.4, p.59-69.
- Kim, P.K., Song, M.Y. and Kim, Y.C. (1995) A comparative study between soil mechanics and geophysical prospecting of soft ground in Sosan recalculation land(II). *Journal of Korean Earth Science Society*, v.16, p.292-298.
- Lee, H.Y. and Han, H.S. (2005) Analysis of lake water temperature and seasonal stratification in the Han river system from Time-series of landsat images. *Korean Journal of Remote Sensing*, v.21, p.253-271.
- Malm, J. and L. Jonsson. (1993) A study of the Thermal Bar in Lake Ladoga Using water surface temperature data from satellite images. *Korean Journal of Remote Sensing*, v.44, p.3.
- Oh, S.H., Suh, B.S. and Kim, J.R. (2010) An analysis of geophysical and temperature monitoring data for leakage detection of earth dam. *Journal of Korean Earth Science Society*, v.31, p.563-572.
- Oh, S.H. and Suh, B.S. (2008) Safety Assessment of Embankment by Analysis of Electrical Properties. *The Journal of Engineering Geology*, v.18, p.245-255.
- Ryu, J.H., Yoon, S., Min, J.E., Ahn, Y.H., Lee, S. and Won, J.S. (2009) Monitoring of the sea surface temperature in the Saemangeum sea area using the thermal infrared satellite data. *Korean Journal of Remote Sensing*, v.25, p.339-357.
- Shin, J.H., Hwang, S.H., Park, K.G., Park, Y.S. and Byun, J.M. (2005) The Development of Multi-channel Electrical Conductivity Monitoring System and its Application in the Coastal Aquifer. *Geophysics and Geophysical Exploration*, v.8, p.156-162.
- Shin, J.H. and Byun, J.M. (2010) Fresh water injection test in a fractured bedrock aquifer for the mitigation of seawater intrusion. *Economic and Environmental Geology*, v.43, p.371-379.
- Shon, H.W. and Lee, D.K. (2003) A study of the safety analysis of rock fill dam(I). *Geophysics and Geophysical Exploration*, v.6, p.165-177.
- Song, M.Y., Lee, E.D. and Kim, P.K. (1992) A comparative study between soil mechanics and geophysical prospecting of soft ground in Sosan recalculation land(I). *Journal of Korean Earth Science Society*, v.13, p.145-155.
- Song, M.Y. and Park, C.S. (2002) Practical visualization of discontinuity distribution in subsurface using bore-hole image analysis. *The Journal of Engineering Geology*, v.12, p.23-24.
- Song, S.H., Lee, K.S., Kim, J.H. and Kwon, B.D. (2000) Application of SP and pole-pole array electrical resistivity surveys to the seawater leakage problem of the embankment. *Economic and Environmental Geology*, v.33, p.417-424.