

방조제 누수지점 탐지를 위한 SP 및 단극배열 전기비저항탐사의 적용

송성호* · 이규상** · 김진호* · 권병두***

Application of SP and Pole-pole Array Electrical Resistivity Surveys to the Seawater Leakage Problem of the Embankment

Sung-Ho Song*, Kyu-Sang Lee**, Jin-Ho Kim* and Byung-Doo Kwon***

ABSTRACT: We applied SP monitoring and resistivity surveys using the pole-pole electrode array to seawater leakage problems in the Youngsan estuary dam and the Eoeun embankment to estimate and detect the zone of seawater leakage. The embankment is generally affected by tidal variation and has low resistivity characteristics due to the high saturation of seawater. For this reason, SP monitoring and the pole-pole array resistivity surveys, which are relatively more effective to the conductive media, were carried out to delineate the leakage zones of sea water through the embankment. We checked out electrical conductivity (EC) and temperature variations along the inner part of Youngsan estuary dam to detect the zone of seawater leakage and found that the measured EC value agreed to that of seawater in the leakage zone and the temperature was lower than that of the vicinity of leakage zone. SP monitoring results were coincided with tidal variations at each embankment. At the leakage zones in the Youngsan estuary dam and the Eoeun embankment, SP anomalies are in the range of -60~-85 mV and -20~-50 mV, respectively, and true resistivity values obtained by 2-D inversion are 3~15 ohm-m and below 0.3 ohm-m, respectively. Both SP monitoring and the pole-pole array resistivity method are found to be quite effective for investigation of seawater leakage zones in the embankment.

Key words : leakage problems, pole-pole array resistivity surveys, SP monitoring, tidal variation, electrical conductivity

주요어 : 누수지점, 단극배열 전기비저항탐사, SP 모니터링, 유동전위, 조석변화

서론

최근 물 수요의 증대 및 자연재해와 관련하여 수리 시설구조물들에 대한 지속적인 관리의 필요성이 제기되고 있으며, 이와 관련하여 농업용 제당 및 방조제에 대하여 1990년대 들어 정밀안전진단이 연차적으로 시행되고 있다 (송성호 등, 1999; 농업기반공사, 2000). 수리시설구조물은 그 특성상 시간이 경과함에 따라 하

중의 작용, 시설물의 구조변경 및 주변환경의 여건 변화 등으로 구조가 취약해지거나 성능이 저하되고 이에 따라 시설의 안전성에 문제가 발생되는데, 특히 방조제의 경우는 총 1,586개소 중 약 82% (원종근, 송성호, 1999)가 조석의 영향이 큰 서남해안에 집중되어 있어 해수침투의 영향에 대한 지속적이고 체계적인 조사가 필수적으로 요구된다.

외국의 경우 제당 및 방조제의 누수구간을 확인하기 위한 방법으로 자연전위 (SP: Self Potential 또는 Spontaneous Potential) 탐사 및 전기비저항탐사를 이용한 방법이 주로 이용되어 왔으며 (Ogilvy *et al.*, 1969; Corwin and Butler, 1989; Furgerson *et al.*, 1997; Sirles, 1997), 국내의 경우는 정승환 등 (1992), 조진동 등 (1996), 원종근, 송성호 (1999) 및 송성호 등 (2000)에 의해 일부 적용된 사례가 있다.

* 농업기반공사 농어촌연구원 (Rural Research Institute, KARICO, Ansan 420-174, Korea) E-mail: shsong@karico.co.kr

** 농업기반공사 지하수사업처 (Department of Groundwater Project KARICO, Anyang 430-600, Korea)

*** 서울대학교 지구과학교육과 (Department of Earth Science Education, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

본 연구에서는 조석변화가 큰 두 곳의 방조제에 대하여 SP탐사 및 단극배열 (pole-pole array) 전기비저항탐사를 수행한 결과와 탐사축의 전기전도도 측정값의 비교를 통하여 누수지점을 확인할 수 있었으며, 조석변화에 따른 SP 모니터링을 수행함으로써 방조제의 누수상황을 정확히 파악할 수 있었다.

자연전위탐사

자연전위탐사는 1900년대 초부터 금속광상이나 황화광상의 탐사에 이용되었던 매우 간단하고 고전적인 탐사방법으로, 대부분의 물리탐사법이 신호를 인공적으로 대지에 보내 그 결과를 측정·해석하는데 비하여, 본 탐사법은 자연적으로 발생하는 지하의 전위차를 측정·해석함으로써 이상대를 찾는 비교적 간단한 탐사기법이다.

자연전위는 발생 메카니즘이 명확하게 밝혀지지 않았지만 크게 전기화학적 (electrochemical), 전기역학적 (electrokinetic) 및 열전기적 (thermoelectric) 효과 등 세가지로 구분되는데, 전기화학적 효과 (Sato and Mooney, 1960; Corry, 1985)를 제외한 전기역학적 효과와 열전기적 효과는 지금까지도 연구가 진행되고 있는 실정이다 (Fitterman, 1979 (a); (b); Fitterman, 1983; Sill, 1983; Corwin and Butler, 1989; Ishido *et al.*, 1997). 따라서 전도성 유체의 흐름, 지열원, 지층의 압력, 지온의 변화 및 화학적 농도차이에 의해 발생하는 이온의 흐름 등 다양하고 복합적인 발생 메카니즘으로 인한 측정자료의 정량적인 해석의 어려움으로 현장 적용에 한계가 있어왔으나, 최근들어 장기 관측용 다중채널 SP탐사기가 개발되면서 제한적으로 지하수의 유동전위 (streaming potential)를 이용한 양수시험 및 제방·방조제의 누수부위 탐사에 적용되고 있다 (정현기 등, 1989; 조진동 등, 1990; 원종근, 송성호, 1999).

Corwin and Butler (1989)는 자연전위탐사를 실시하는 경우, 전극의 검증과 장기모니터링의 안정성, 자료 획득 방법, 그리고 탐사자료의 정량적인 해석 등 세 가지의 중요한 기준을 제시하였다. 특히 그들은 장기 모니터링이나 현장탐사 시 전극과 접지된 토양의 국부적인 상태 때문에 발생하는 전위가 제방 및 방조제의 누수에 의해 발생하는 유동전위보다 클 수 있고, 시간변화에 따른 전위가 누수에 의한 전위보다 클 수 있기 때문에 탐사 시 원거리 기준점을 이용한 잡음 (noise) 제거 등의 필요성을 제안하였다. 따라서 본 연구에서는 기

준점을 조석의 영향을 비교적 받지 않는 방조제 외측부에 설치하여 조석 영향에 의해 발생될 수 있는 잡음의 영향을 최소화하였고, 측정되는 전위는 유동전위에 의한 것으로 가정하여 탐사를 실시하였다.

본 연구에서 사용한 탐사기는 ABEM사의 SAS-300C Terrameter 장비이고, 사용된 전극은 자연적으로 발생하는 미약한 전위의 측정을 목적으로 비분극전극 (non-polarizing electrode)을 사용하였다. 사용된 비분극전극은 초벌구이컵 (porous pot)을 이용한 Pb-PbCl₂로서, 이는 기존의 다른 비분극전극에 비해 분극현상에 대해 장시간의 안정성이 있는 것으로 보고된 전극이다 (Petiau *et al.*, 1980; Perrier *et al.*, 1997).

단극배열 전기비저항탐사

단극배열 전기비저항탐사법은 전기비저항탐사 배열 중 신호 대 잡음 (S/N)이 가장 높은 방법으로 자료의 해석이 간편하지만 지하의 정보가 지나치게 단순화되는 단점이 있어 지금까지 일반적인 수리지질구조 조사에서는 적용이 상대적으로 많지 않았지만, 본 연구지역인 방조제의 경우처럼 대상 매질이 염수에 의해 포화되어 전기전도도가 높은 경우에는 안정된 측정값을 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다 (김정호 등, 1999).

단극배열 전기비저항탐사는 하나의 전류전극 (C₁ 또는 C₂)과 하나의 전위전극 (P₁ 또는 P₂)을 그 영향을 무시할 수 있을 정도로 매우 먼 곳에 위치시키며, 나머지 각각의 전류 (C₂ 또는 C₁) 및 전위전극 (P₂ 또는 P₁)만으로 지하의 전기적 물성을 탐사하는 방법이다 (Fig. 1). 이때 전류전극 (AB)과 전위전극 (MN) 중 무한전극의 거리는 이론적으로 AM거리의 20배 이상의 거리에 위치시키는 것이 효과적으로 제시되었지만 (Robain *et al.* 1999), 일반적으로는 약 10배 이상으로 사용되고 있다 (형병구 등, 1995).

본 연구에서는 연구대상 지구 방조제의 높이가 간조시의 해수면으로부터 약 10 m 이내이므로 전극간개수 (n)를 8로 설정하였고, 무한전극의 거리를 20배 이상으로 위치시켜 탐사의 질을 향상시키고자 하였다. 탐사

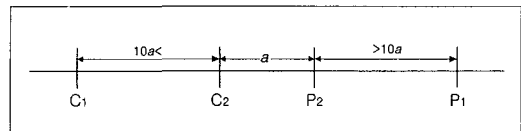


Fig. 1. Schematic current and potential electrodes configuration in a pole-pole array electrical resistivity survey.

에 이용된 기기는 ABEM사의 SAS-1000이다.

자료취득, 처리 및 해석

본 연구에서는 전남 목포에 위치한 영산강하구둑과 전북 군산에 위치한 어은방조제에 대하여 일차적으로 육안조사 및 전기전도도 측정으로 누수구간이 확인된 지점을 대상지역으로 선정하였다. 일차적으로 누수구간을 포함하여 축선별로 단극배열 전기비저항탐사를 실시하였고, 동일한 위치에 대하여 24시간 동안 SP 모니터링을 수행하였다. 이때 전극간격은 영산강하구둑의 경우 5 m, 어은방조제의 경우는 3 m로 각각 설정하였고, SP 모니터링 결과와 조석의 관계를 규명하기 위하여 각 지점별로 농업기반공사에서 설치 운영 중인 조석측정소의 관측자료를 이용하였다.

영산강하구둑

본 지구는 전라남도 목포시에 위치한 하구둑으로 농업개발계획의 일환으로 건설된 길이 4.4 km, 높이 19.5 m로 250백만 m³의 담수를 저장할 수 있는 수리구조물이다. 본 연구에서는 하구둑 내측 호수를 따라 일차적으로 육안조사, 전기전도도 및 수온을 측정하여 네 지점의 누수구간을 확인하였고, 이 지점들을 포함하는 340 m 구간에 대하여 단극배열 전기비저항탐사를 실시하였다. SP탐사는 전기비저항탐사와 동일축점에 대하여 조석의 영향을 고려하기 위하여 간조 및 만조 시간 각 2회와 간만조의 중간시간 각 2회씩 총 8회의 측정을 실시하였다.

탐사의 전 단계로 본 연구지역의 내측 영산호를 따라 실시한 전기전도도 (EC)의 측정 결과 전체 구간에서 2,500~5,000 μS/cm의 범위에 해당되는데, No.22~

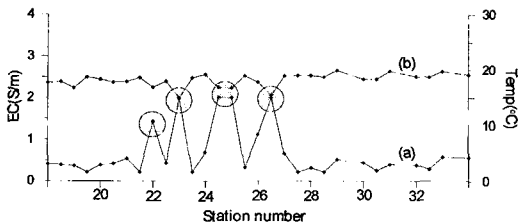


Fig. 2. Variations of electrical conductivity and temperature at the water surface of the Youngsan Lake along estuary dam at 15:00 in May 18, 2000. (a) Electrical conductivity in S/m and (b) temperature in °C. Shaded circles indicate high electrical conductivities for the leakage zone

Table 1. Groundwater classification based on total dissolved solids (after Freeze and Cherry, 1979).

Category	Total Dissolved Solids (mg/l)
Fresh Water	0~1,000
Blackish Water	1,000~10,000
Saline Water	10,000~100,000
Brine Water	>100,000

No.26 사이의 4개 구간에서는 17,000 μS/cm 이상으로 측정되었다 (Fig. 2). 이러한 전기전도도값을 Hem (1992)이 제시한 아래식

$$TDS = (0.59 \times EC) \pm 100$$

에 적용하면 TDS (Total Dissolved Solids)가 10,000 mg/l 이상에 해당되어, 이 같은 값은 Freeze and Cherry (1979)의 분류에 의한 해수의 영역에 해당된다 (Table 1). 또한 전기전도도와 동시에 측정한 수온 결과는 No.22~No.26 사이의 4구간에서 15~17°C로 전체 평균 18.7°C 보다 상대적으로 낮아 본 구간에서 하구둑 바다측으로 부터 해수의 유입이 있는 것으로 판단된다.

단극배열 전기비저항탐사는 No.21+15~No.28+05 구간 340 m에 대하여 전극간격 a 를 5 m, 전극전개수 n 은 8로 설정하였고, 무한 전류전극 (C_1) 및 전위전극 (P_1)은 축선 좌우측 마지막 전극 No.21+15와 No.28+05으로 부터 800 m 거리에 각각 설치하였다. 탐사는 입력전류를 50~100 mA로 측정하였고, 결과는 길보기 비저항 가단면도와 2차원 비저항 단면도로 나타내었다 (Fig. 3). 현장 측정값을 이용하여 얻어진 길보기 비저항 값의 범위는 전극전개수 (n) 3과 6에서 각각 30.1~210.6 ohm-m과 20.6~207.3 ohm-m로 전체적인 가단면도상의 값보다 상대적으로 낮게 나타난다. 2차원 역산을 이용하여 얻어진 전기비저항 분포 단면도에 의하면 전극전개수 3 또는 6과 대응되는 심도에서 No.22+10, No.23+20, No.24+30, No.25+25 및 No.26+15 주변 구간에서 3~15 ohm-m 범위의 매우 낮은 저비저항대가 나타나는데, 이러한 범위의 전기비저항은 해수에 의한 포화로 판단된다 (조진동 등, 2000). 특히 No.22+10, No.23+20 및 No.25+25 지점은 하구둑 상부 표면으로부터 10 m 이내의 지점에 저비저항대가 나타나므로, 방조제의 높이가 간조시를 기준으로 해수면으로부터 10 m 이내인 점을 고려하면 조석에 의한 직

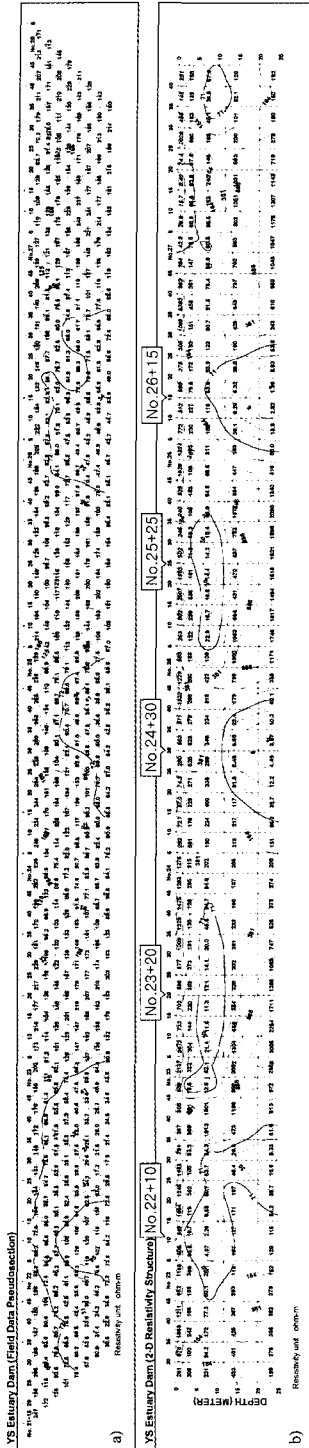


Fig. 3. Result of the pole-pole array resistivity survey along the Youngsan Estuary Dam using the electrode spacing of 5 m. a) apparent resistivity pseudosection, b) two-dimensional resistivity structure as a result of inversion.

접적인 영향을 받을 것으로 예상된다.

연구대상 지구에 대한 SP탐사는 단극배열 전기비저항탐사의 전극지점에 대하여 기준점 고정방식으로 실시하였고, 조석 및 일변화 등 기준점에 대한 외부로부터의 잡음을 제거하기 위하여 매 측선에 대한 측정 시 6번의 기준점 전위를 측정하여 실제 측정값을 보정하였다. 본 지구의 조위는 농업기반공사 영산강하구둑 관리소의 측정 자료를 이용하였고, 측정된 기준점의 전위를 시간별로 도시한 결과 조석의 영향을 받지 않았음을 알 수 있었다 (Fig. 4). No.21+30으로 부터 No.27+30까지 300 m 구간에서 실시한 SP탐사 자료는 No.22~No.22+10 및 No.25+25~No.25+30 구간에서 -60~-85 mV의 이상대가 나타나는데 이는 전기비저항탐사의 결과와 일치하고 있다 (Fig. 5). 특히 이들 구간은 조위변화에 따라 SP값도 함께 변화하는 양상을 보여주고 있는데, 앞서의 전기비저항탐사 결과로 나타난 10 m 이내의 천부 이상대와 일치하며 조위 변화에 따른 의한 해수의 유입양상을 뚜렷이 보여주고 있어 SP 모니터링으로 단순히 누수 지점의 확인 뿐만 아니라 누수 상황의 변화도 탐지할 수 있음을 나타낸다 (Fig. 6).

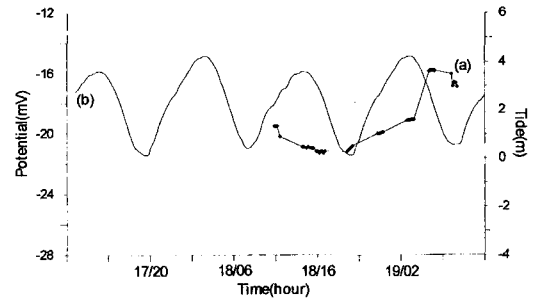


Fig. 4. Variation of reference SP measurements superimposed on the seawater level at the Youngsan estuary dam during May 18-19, 2000. (a) SP variations at reference point, (b) Tidal variations at the gauging station

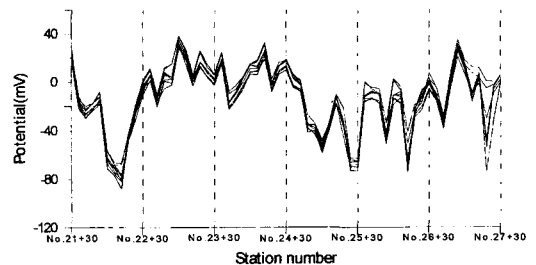


Fig. 5. SP profiles along the Youngsan estuary dam during May 18-19, 2000.

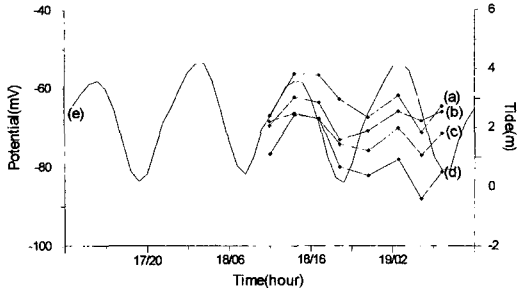


Fig. 6. Variations of SP at the Youngsan estuary dam during 18-19 May, 2000. SP variations at the sites No.22+05(a), No.25+25(b), No.22+10(c), and No.22+15(d) are shown as compared with the tidal variation at the gauging station(e).

어은방조제

본 지구는 전라북도 군산시에 위치한 방조제로 길이는 5.4 km, 높이는 8 m인 농업용 수리구조물이다. 수리구조물의 내측부는 농경지로 이용되고 있으며, 방조제 내측부를 따라 자연적으로 조성된 농업용 수로가 형성되어 있다. 본 연구에서는 일차적으로 방조제 내측부에 대한 육안조사로부터 만조시에 방조제 내측부로 누수가 발생하는 지점을 연구대상으로 선정하였다.

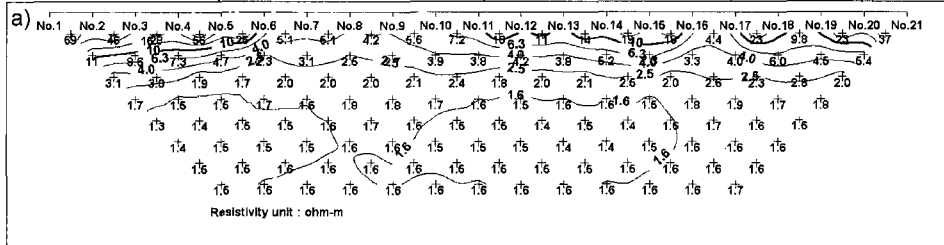
탐사는 영산강하구둑과 마찬가지로 누수구간을 포함

하는 60 m 구간에 대하여 일차적으로 단극배열 전기비저항탐사를 실시하였고, 동일한 위치에 대하여 24시간 동안 SP 모니터링을 수행하였다.

단극배열 전기비저항탐사는 No.1~No.21 사이 60 m 구간에 대하여 전극간격 a 를 3 m, 전극전개수 n 은 8로 설정하였고, 무한 전류전극 (C_1) 및 전위전극 (P_1)은 측선 좌우측 마지막 전극 No.1과 No.21으로 부터 450 m 거리에 각각 설치하였다. 탐사는 입력전류를 100~200 mA로 측정하였고, 결과는 겉보기 비저항 가 단면도와 2차원 비저항 단면도로 나타내었다 (Fig. 7). 현장 측정값을 이용하여 얻어진 겉보기 비저항값의 범위는 전극전개수 3 이상에서 5 ohm-m 이하로 매우 낮은 값을 보여주며, 2차원 역산법을 이용하여 얻어진 단면도를 살펴볼 때에도 심도 약 6 m 이상에서는 전체적으로 1 ohm-m 이하의 낮은 전기비저항을 갖는다. 특히 No.3~No.5 구간에서는 0.3 ohm-m 의 매우 낮은 저비저항대가 나타나는데, 이러한 전기비저항은 해수의 평균값인 0.2 ohm-m (Telford *et al.*, 1990)와 비교할 때 본 구간은 해수에 의해 완전하게 포화된 것으로 판단된다.

SP탐사는 전기비저항탐사의 전극지점에 대한 기준점 고정방식으로 실시하였고, 외부로부터의 잡음을 제거하기 위하여 측정 전후에 기준점 전위를 측정하여 실

Eoeun embankment (Field Data Pseudosection)



Eoeun embankment (2-D Resistivity Structure)

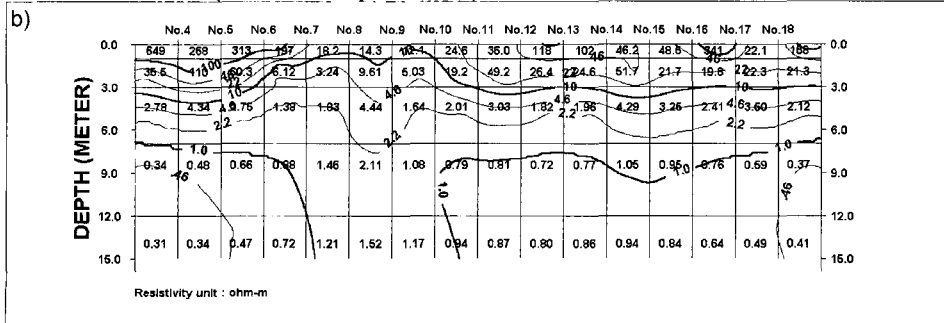


Fig. 7. Result of the pole-pole array resistivity survey along the Eoeun embankment using the electrode spacing of 3 m. a) apparent resistivity pseudosection, b) two-dimensional resistivity structure as a result of inversion.

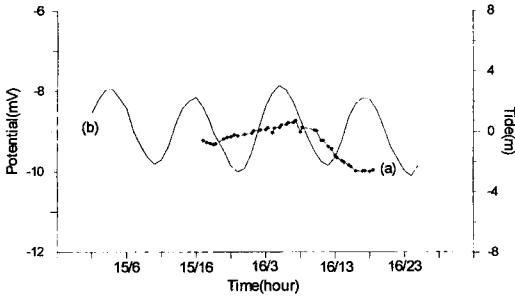


Fig. 8. Variation of reference SP measurements superimposed on the seawater level at the Keumgang estuary dam during June 15-16, 2000. (a) SP variation at the reference point, (b) Tidal variations at the gauging station

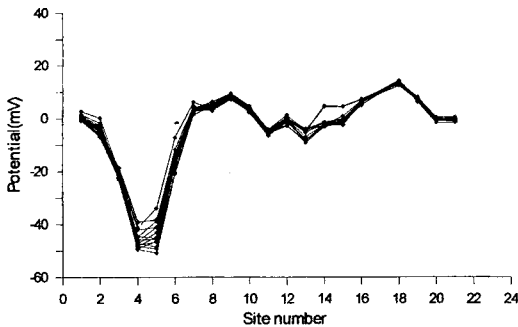


Fig. 9. SP profiles along the Eoeun embankment during June 15-16, 2000.

제 측정값을 보정하였다. 본 지구의 조위는 인근의 농업기반공사 금강하구둑 관리소의 측정 자료를 이용하였고, 시간별로 측정된 기준점의 전위를 도시한 결과 이 지점 역시 조석의 영향을 받지 않았음을 알 수 있었다 (Fig. 8). 본 구간에서 실시한 SP 전위값은 전체적으로 0~+20 mV 사이로 나타나는 반면, No.3~No.6의 4개 지점의 측정결과는 -20~-50 mV의 부 (-)의 이상이 나타나는데, 이는 만조 시 누수가 발생한 구간과 일치되며 (Fig. 9), 또한 전기비저항탐사에서 0.3 ohm-m 내외의 저비저항대와 일치하고 있다.

이들 4개 지점에 대한 시간별 SP 측정값을 조위변화와 비교한 결과 전체적으로 조석에 의한 영향을 보여주지만, No.3 및 No.6 지점에서의 SP값의 변화가 No.4 및 No.5 지점에서의 변화보다 약 20 mV 높게 측정되었고 변화폭도 상대적으로 적은 것으로 볼 때 조석에 의해 발생한 유동전위 영향이 상대적으로 큰 No.4 및 No.5 지점을 통해 해수가 유입된다고 판단된다 (Fig. 10).

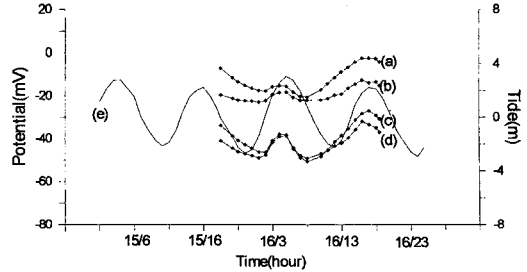


Fig. 10. Variations of SP at the Eoeun embankment during June 15-16, 2000. SP variations at the sites No.6(a), No.3(b), No.5(c), and No.4(d) are shown as compared with the tidal variations at the gauging station (e)

토의 및 결론

최근까지 지하수 조사 및 토목지질 조사 등의 목적으로 사용된 물리탐사 방법은 주로 전기비저항탐사로 암석이나 광물의 종류, 구성입자간의 공극에 들어있는 전해질의 이온농도와 온도 또는 지질환경에 따라서 각기 달리 나타나게 되는 전기비저항의 분포차를 이용하여 지하의 지질구조를 밝히는 방법으로, 쌍극자배열 전기비저항탐사 및 수직탐사가 주로 이용되어 왔다.

그러나 본 연구지역과 같이 해수의 영향으로 전기전도도가 높은 방조제의 경우는 전기비저항의 값이 낮아 안정된 측정값을 얻지 못하는 문제가 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서는 단극배열을 이용함으로써 측정 전위값을 크게 만들어 높은 S/N비를 확보하고자 하였다. 본 연구지역인 방조제의 경우와 같이 대상 매질이 염수에 의해 포화되어 전기전도도가 매우 높은 경우에는 누수구간 파악을 위한 전기비저항탐사는 지하의 정보가 단순화되는 단점에도 불구하고 단극배열을 사용함이 효과적임을 확인할 수 있었다.

또한 단극배열 전기비저항탐사에 대한 복합탐사로 방조제를 통한 누수에 의해 발생하는 유동전위를 대상으로 SP 모니터링을 실시한 결과와 조석변화를 비교한 결과, SP값의 변화가 조위 변화와 일치되어 나타나므로 SP탐사가 누수지점의 탐지와 더불어 누수 추세를 밝히는 데 효과적임을 알 수 있었다. 따라서 방조제에 대한 누수조사 시에는 단극배열 전기비저항탐사를 통한 누수 지점 확인과 병행하여 SP모니터링을 수행함으로써 누수 상황에 대한 종합적 해석을 시도함이 추천된다.

영산강 하구둑 및 어은 방조제에 대한 누수조사 결과에서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 영산강 하구둑 내측 영산호를 따라 실시한 전기

전도도 측정 결과는 4개 구간에서 TDS가 10,000 mg/l 이상으로 해수에 해당되며, 동시에 측정한 수온의 경우 15~17°C로 전체 평균 18.7°C 보다 상대적으로 낮아 본 구간에서 하구둑을 통한 해수의 유입이 있는 것으로 판단된다.

2. 영산강 하구둑에서 실시한 단극배열 전기비저항 탐사 결과 4개 구간에서 하구둑 표면으로부터 10 m 이내의 지점에서 3~15 ohm-m 범위의 매우 낮은 저비저항대가 나타나고, SP탐사에 의한 전위값이 -60~-85 mV의 부 (-)의 이상이 나타나는 것으로 볼 때 본 구간이 해수의 누수유로로 판단된다.

3. 어은방조제에 대한 단극배열 전기비저항탐사 결과 약 6 m 이하 심도에서의 침비저항이 전체적으로 1 ohm-m 이하이고, 특히 No.3~No.5 구간에서는 0.3 ohm-m 의 매우 낮은 저비저항대가 나타나며, SP탐사 결과 본 구간에서 -20~-50 mV의 부 (-)의 이상이 나타나는 것으로 볼 때 본 구간이 해수의 누수유로로 판단된다.

사 사

본 연구는 농업기반공사 자체연구과제의 일부로 수행되었으며, 심사 과정에서 좋은 의견을 주신 충북대학교 김지수 교수님과 한국자원연구소의 황학수 박사님께 감사 드립니다.

참고문헌

김정호, 이명중, 정승환 (1999) 2차원 전기비저항 탐사를 위한 전극배열법의 비교. 1999년도 추계총회 및 제73회 학술발표회 논문집, 한국지질공학회, p. 134-138.
 농업기반공사 (2000) 기반조성사업: 2000년 사업현황, p. 487-488.
 송성호, 이기철, 김정희, 원종근, 최종학 (1999) SP탐사를 이용한 제당 및 방조제 누수지점 탐지기법 연구 (I). 농업기반공사.
 송성호, 이규상, 김진호, 장의웅 (2000) SP 및 단극배열 전기비저항탐사를 이용한 방조제 누수지점 탐지. 한국지구물리탐사학회 2000 정기총회 및 특별심포지움, p. 19-40.
 원종근, 송성호 (1999) 제방누수조사에의 물리탐사기법의 활용 (쌍극자배열 전기비저항탐사와 SP탐사를 중심으로). 건설현장에 필요한 물리탐사기술 심포지움, 1999년도 제2회 학술발표회, 한국지구물리탐사학회, p. 240-257.
 정승환, 김정호, 양재만, 한규언, 김영웅 (1992) 전기비저항탐사에 의한 제당의 누수구간 탐지. 지질공학, 2권, p. 47-57.
 정현기, 최종호, 김정호, 정승환, 신인철 (1989) 자동연속 기록 및 PC전송 가능한 디지털 SP측정기 개발 및 용

용연구. KR-89-(B)-26, 한국동력자원연구소.
 조진동, 정현기, 정승환, 김정호 (1996) 방조제 누수부위 확인을 위한 SP/VLf 탐사법의 적용성. 자원환경지질, 29권, p. 623-627.
 조진동, 정현기, 최종호, 정승환, 김정호 (1990) 128채널 자동연속 SP Monitor System 개발 및 응용연구. KR-90-(B)-18, 한국동력자원연구소.
 조진동, 황학수, 이철우, 박인화 (2000) 해수침입으로 오염된 지역에 대한 고분해능 TEM 탐사. 지질확회지, 36권, p. 39-46.
 현병구 외 (1995) 물리탐사 용어사전. 선일문화사, p. 205-206.
 Corry, C.E. (1985) Spontaneous polarization associated with porphyry sulfide mineralization. Geophysics, v. 50, p. 1020-1034.
 Corwin, R.W. and Butler, D.K. (1989) Geotechnical applications of the self-potential method, report 3, Development of self-potential interpretation techniques for seepage detection. Technical Report REMR-GT-6. US Army Corps of Engineers, Washington, DC.
 Fitterman, D.V. (1979a) Theory of electrokinetic-magnetic anomalies in a faulted half-space. Journal of Geophysical Research, v. 84, p. 6031-6040.
 Fitterman, D.V. (1979b) Calculation of self-potential anomalies near vertical contacts. Geophysics, v. 44, p. 195-205.
 Fitterman, D.V. (1983) Modeling of self-potential anomalies near vertical dikes. Geophysics, v. 48, p. 171-180.
 Freeze, R.A. and Cherry, J.A. (1979) Groundwater. Prentice-Hall, 84p.
 Furgerson, R., Corwin, R.W., and Wright, J. (1997) Seepage characterization during dewatering activities - Bradbury Dam, California. Proceedings of the symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems. SAGEEP '97, p. 333-344.
 Hem, J.D. (1992) Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. 3rd ed. U.S Geological Survey Water-Supply Paper 2254, p. 67.
 Ishido, T., Kikuchi, T., Matsushima, N., Yano, Y., Nakao, S., Sugihara, M., Toshi, T., and Ogawa, Y. (1997) Repeated self-potential profiling of Izu-Oshima Volcano, Japan. J. Geomag. Geoelectr., v. 49, p. 1267-1278.
 Ogilvy, A.A., Ayed, M.A., and Bogoslovsky, V.A. (1969) Geophysical studies of water leakage from reservoirs. Geophysical Prospecting, v. 17, p. 36-62.
 Perrier, F.E., Petiau, G., Clerc, G., Bogorodsky, V., Erkul, E., Jouniaux, L., Lesmes, D., Macnae, J., Meunier, J.M., Morgan, D., Nascimento, D., Oettinger, G., Schwarz, G., Toh, H., Valiant, M.J., Vozoff, K., and Yazici-Cakin, O. (1997) A one-year systematic study of electrodes for long period measurements of the electric field in geophysical environments. J. Geomag. Geoelectr., v. 49, p. 1677-1696.
 Petiau, G. and Dupis, A. (1980) Noise, temperature coefficient, and long time stability of electrodes for telluric observations. Geophys. Prospect., v. 28, p. 792-804.
 Robain, H., Albouy, Y., Dabas, M., Desclotres, M., Camerlynck, C., Mechler, P., and Tabbagh, A. (1999) The location of infinite electrodes in pole-pole electrical surveys: Consequences for 2D imaging. Journal of

- Applied Geophysics, v. 41, p. 313-333.
- Sato, M. and Mooney, H.M. (1960) The electrochemical mechanism of sulfide self potentials. *Geophysics*, v. 25, p. 226-249.
- Sill, W.R. (1983) Self-potential modeling from primary flow. *Geophysics*, v. 48, p. 76-86.
- Sirles, P. (1997) Seepage investigation using geophysical techniques at Coursier Lake Dam, B.C., Canada. Proceedings of the symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems. SAGEEP '97, p. 321-331.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., and Sheriff, R.E. (1990) *Applied geophysics*. 2nd ed. Cambridge University Press. Cambridge. 285p.
-

2000년 7월 27일 원고접수, 2000년 9월 29일 게재승인.