

# SP 및 단극배열 전기비저항탐사를 이용한 방조제 누수지점 탐지

송성호<sup>1)</sup>, 이규상<sup>2)</sup>, 김진호<sup>1)</sup>, 장의웅<sup>1)</sup>

1) 농업기반공사 농어촌연구원, 2) 농업기반공사 지하수사업처

## A Study to Estimate the Seawater Leakage Zone of the Embankment using SP and Pole-pole Array Resistivity Survey

Sung-Ho Song, Kyu-Sang Lee, Jin-Ho Kim, Eui-Woong Jang  
(Korea Agricultural & Rural Infrastructure Corporation)

**요약:** 본 연구에서는 해수에 의한 누수지점 파악을 위하여 방조제 4개소에 대해 단극배열 전기비저항탐사, SP탐사 및 SP 모니터링을 실시하였고, 해석 자료들을 조석변화와 비교한 결과 본 방법들이 방조제 누수지점 파악에 효과적임을 확인하였다. 저수지의 경우는 그라우팅 보강공사가 계획된 1개소에 대하여 그라우팅 보강 전후에 각각 쌍극자배열 전기비저항탐사와 SP탐사를 실시하여 누수구간에 대한 탐사기법 적용성 검토 및 그라우팅 효과를 비교한 결과 저수지의 경우에도 SP탐사의 적용성이 높음을 알 수 있었다. 방조제의 경우는 해수의 영향으로 안정된 전기비저항 값을 얻기 어려워, 단극배열을 이용하여 측정전위값을 크게 만들어 높은 S/N비를 확보한 결과 지하의 정보가 단순화되는 단점에도 불구하고 적용성이 높음을 확인하였고, 방조제 체체를 통한 누수에 의해 발생하는 유동전위를 대상으로 SP 모니터링을 실시한 결과와 조석변화를 비교한 결과, SP값의 변화가 조위 변화와 일치되어 나타나므로 SP탐사가 누수지점의 탐지 뿐만 아니라 누수 추세를 밝히는데 효과적인 탐사법으로 판단된다.

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

**Abstract :** We applied both SP monitoring and pole-pole array resistivity surveys and SP survey and dipole-dipole array resistivity survey to leakage problems in several embankments and dike, respectively, to estimate and detect the zone of leakage. The embankment is generally affected by tidal variation and has low resistivity characteristics due to the high saturation of seawater. According to this situation, SP monitoring and resistivity survey using pole-pole electrode array, which is 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 the embankment 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 coincide with tidal variations at each embankment. Based on the survey results, it is concluded that both SP monitoring and the pole-pole array resistivity method are quite effective for investigation of seawater leakage zones in the embankment.

**Keywords:** leakage problems, pole-pole array resistivity surveys, SP monitoring, tidal variations, electrical conductivity

## 1. 서 론

최근들어 집중호우나 해일 등 자연재해로 인한 수리시설구조물의 붕괴로 농어촌을 비롯한 국토의 많은 부분에서 인명과 재산피해가 발생하고 있다. 이러한 문제들은 일차적으로 부실공사 등에 기인하는바 크지만, 시설물 축조를 위한 기초조사의 부실 및 체계적이고 지속적인 관리의 부족으로 인한 경우도 문제점으로 지적되고 있다.

저수지 제당 및 방조제 등 농업용 수리시설구조물은 주로 사회간접자본의 개념으로 설계 및 시공된다. 이러한 기본적인 시설물은 설계에서 유지·보수까지의 일련의 과정이 필요한데 1990년대 들어 정밀안전진단이 연차적으로 시행되고 있다 (송성호 등, 1999). 수리시설구조물은 그 특성상 시간이 경과함에 따라 하중의 작용, 시설물의 구조변경 및 주변환경의 여건 변화 등으로 구조가 취약해지거나 성능이 저하되고 이에 따라 시설의 안전성에 문제가 발생되는데, 특히 방조제의 경우는 총 1,625개소 중 약 90%가 민간관리로 체계적인 조사가 필수적으로 요구된다.

지금까지 수리시설구조물에 대한 안전진단은 정기적으로 외관조사, 쌍극자배열 전기비저항탐사 및 제한된 시추자료를 위주로 전체의 구조물에 대한 진단 및 보강을 시행하고 있으나, 방조제의 경우는 해수의 영향에 의한 매우 낮은 비저항으로 전기비저항탐사의 문제점이 발생되고, 시추의 경우는 구조물에 대한 새로운 불안정성을 발생시킬 수 있으므로 상대적으로 편리하고 안정적인 방법을 이용한 누수구간 및 유로를 효율적으로 탐지해 내는 기법이 요구된다. 따라서 소위 비파괴검사의 일종인 물리탐사 기법 중 수리시설구조물의 용도 및 특성을 기초로 누수구간과 누수유로를 파악할 수 있는 기술적이고 실용적인 방법을 제시하고자 한다. 특히 방조제의 경우는 1차적으로 담수측의 전기전도도 측정을 통하여 해수유입 구간을 파악한 후 전기비저항탐사 배열 중 신호 대 잡음비(S/N)가 가장 높은 방법으로 단극배열(pole-pole array) 전기비저항탐사를 적용하였으며, 조석변화에 따른 자연전위(SP ; Self Potential) 모니터링을 실시하였다.

외국의 경우 제당 및 방조제의 누수구간을 확인하기 위한 방법으로 자연전위(SP ; Self 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) 및 원종근, 송성호(1999)에 의해 일부 제당 및 방조제에 대하여 SP 및 전기비저항탐사를 이용한 누수부위 탐지에 적용된 사례가 있다.

본 연구에서는 저수지 제당 1개소에 대하여 보강공사(그라우팅) 전후에 각각 쌍극자배열 전기비저항탐사 및 SP탐사를 실시하였고, 탐사자료 해석 및 비교 결과 SP탐사가 누수지점에 대한 적용성이 높음을 확인할 수 있었다. 또한 방조제 4개 지구에 대하여는 SP탐사 및 단극배열(pole-pole array) 전기비저항탐사를 수행한 결과와 담수측의 전기전도도 측정값의 비교를 통하여 누수지점을 확인할 수 있었으며, 조석변화에 따른 SP 모니터링을 수행함으로써 방조제의 누수상황을 파악할 수 있었다.

## 2. 농업기반시설의 현황

우리나라의 수리시설구조물 중 농업기반시설인 저수지와 방조제는 총 19,657개소(1998년 기준)로서 이 중 저수지는 18,032개소, 방조제는 1,625개소로 구성되어 있다 (원종근, 송성호, 1999; 농업기반공사, 2000). 그 중 저수지의 경우는 대부분이 시·군 및 정부에 의한 관리가 이루어지고 있고, 제고가 20m 이상 또는 관개면적이 500ha이상인 1종 시설물 총 448개소 중 약 15%인 69개소가 누수와 관련되어 보강을 실시한 상황이다. 방조제의 경우는 총 1,625개소 중 약 11%인 183개소가 정부관리의 방조제로서 나머지 약 90%에 달하는 민간관리 방조제에 대한 체계적인 조사가 미흡한 실정이다. 특히 약 95%인 1,546개소가 1980년대 이전에 준공되어 조석에 의한 지속적인 하중의 작용, 시설물의 구조변경 또는 주변환경의 여건변화 등으로 구조 및 성능이 저하되어 시설물의 안전성에 문제가 있을 것으로 판단된다 (Table 1).

Table 1. Total number of embankments in Korea (by Karico, 2000)

년도별	계		정부관리		민간관리	
	개소수	면적(ha)	개소수	면적(ha)	개소수	면적(ha)
'46~'60	177	6,329	39	3,777	138	2,552
'61~'69	1,136	17,215	58	7,634	1,078	9,581
'70~'79	233	18,072	50	6,837	183	11,235
'80~'89	63	9,199	25	5,266	38	3,933
'90~'98	16	24,923	11	12,035	5	12,888
계	1,625	75,738	183	35,549	1,442	40,189

## 3. 탐사기법 고찰

### 3.1. 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 제당 및 방조제 등의 누수지점을 찾는 비교적 간단한 탐사기법이다.

자연전위의 발생원인은 그 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; Corwin et al. 1981; Sill, 1983; 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 어려움으

로 현장 적용에 한계가 있어왔으나, 최근들어 장기 관측용 다중채널 SP탐사기가 개발되면서 제한적으로 지하수의 유동전위(streaming potential)를 이용한 양수시험 및 제당·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 제시하였는데, 특히 장기 모니터링이나 현장탐사 시 전극과 접지된 토양의 국부적인 상태 때문에 발생하는 전위가 제당 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 주의가 필요하다고 밝혔다. 따라서 본 연구에서는 기준점을 가능한 한 조석의 영향을 비교적 받지 않는 방조제 외측부에 설치하여 조석 영향에 의해 발생할 수 있는 잡음의 영향을 제거하였고, 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 자체제작된 비분극전극(non-polarizing electrode)을 사용하였다. 사용된 비분극전극은 초벌구이컵(porous pot)을 이용한 Pb-PbCl<sub>2</sub>로서, 이는 기존의 다른 비분극전극에 비해 분극현상에 대해 장시간의 안정성이 있는 것으로 보고된 전극이다 (Petiau et al., 1980; Perrier et al., 1997).

### 3.2. 단극배열 전기비저항탐사

단극배열 전기비저항탐사법은 전기비저항탐사 배열 중 신호 대 잡음비(S/N)가 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 전류전극과 하나의 전위전극을 그 영향을 무시할 수 있을 정도로 매우 먼 곳에 위치시키며, 나머지 각 각의 전류 및 전위전극만으로 지하의 전기적 물성을 탐사하는 방법이다. 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 (현병구 등, 1995).

본 연구에서는 연구대상 지구 방조제의 높이가 간조시의 해수면으로부터 약 10 m 내외이므로 전극전개수( $n$ )를 5~8로 설정하였고, 무한전극의 거리를 20배 이상으로 위치시켜 탐사의 질을 향상시키고자 하였다. 탐사에 이용된 기기는 ABEM사의 SAS-300C와 SAS-1000이다.

## 4. 자료취득, 처리 및 해석

본 연구에서는 일부구간 누수로 인하여 체체에 대한 보강공사가 실시된 경기 시흥 소재 매화저수지에 대하여 그라우팅 보강 실시 전후에 쌍극자배열 전기비저항탐사와 SP탐사를 실시하여 누수구간에 대한 탐사 적용성 및 그라우팅 효과를 파악하였다. 방조제의 경우는 충남 당진 소재의 대호방조제, 전남 목포 소재의 영산강하구둑, 전북 군산 소재의 어은방조

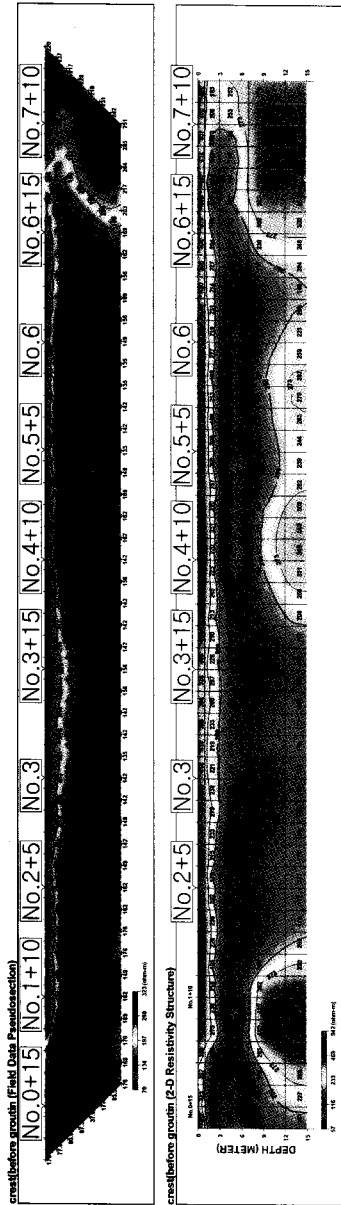
제 및 전남 광양 소재의 광양방조제에 대하여 일차적으로 육안조사 및 전기전도도를 측정하여 누수구간이 확인된 지점을 대상지역으로 선정하였다. 매화저수지의 경우는 제당 길이 165 m 전체 구간에 대하여 그라우팅 전후에 쌍극자배열 전기비저항탐사를 실시하였고, 동일한 전극 위치에 대하여 SP탐사를 실시하였다. 전극간격은 그라우팅 이전에는 3 m로 이후에는 5 m로 각각 설정하였다. 방조제의 경우는 먼저 누수구간을 포함하여 측선별로 단극배열 전기비저항탐사를 실시하였고, 동일한 위치에 대하여 24시간 동안 SP 모니터링을 수행하였다. 이때 전극간격은 대호방조제의 경우는 5 m, 영산강하구둑의 경우 5 m, 어은방조제의 경우는 3 m 및 광양방조제의 경우는 3 m로 각각 설정하였고, SP 모니터링 결과와 조석의 관계를 규명하기 위하여 농업기반공사에서 설치 운영 중인 조석측정소가 있는 영산강하구둑, 어은방조제 및 광양방조제의 경우는 조석 관측자료를 이용하였고, 대호방조제의 경우는 자동수위관측기(Hermit-2000)를 이용하여 조위변화를 측정하였다.

#### 4.1. 매화저수지

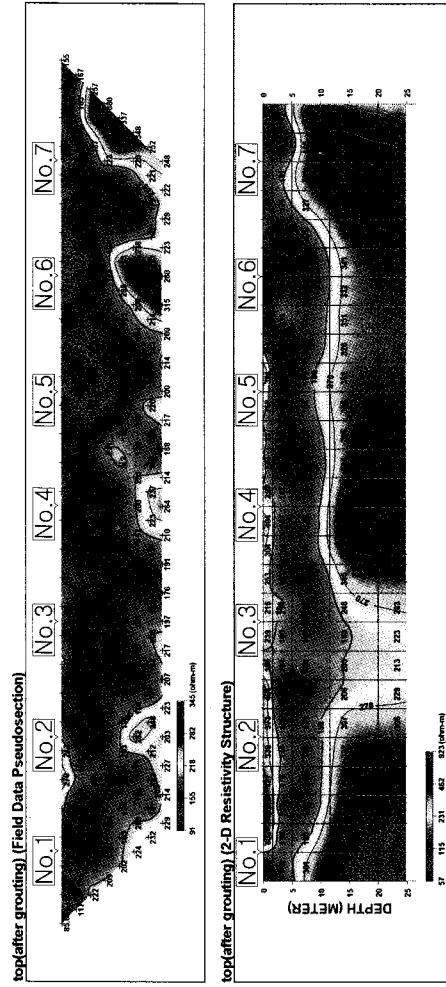
본 저수지는 경기도 시흥시에 위치한 농업용수 공급 목적으로 건설된 수리시설물로서 제당의 길이는 165 m, 제고는 6 m로 기초조사에 의해 제당 중심부로부터 우측부 전체구간에서 약 20 m<sup>3</sup>/일 정도의 소량의 누수가 보고된 지구이다. 그러나 지속적인 누수로 하류부의 피해를 최소화하기 위하여 누수방지 그라우팅을 이용한 보강공사가 계획되어 본 연구에서는 보강공사 전후에 제정부에 대하여 쌍극자배열 전기비저항탐사와 SP탐사를 실시하여 누수구간에 대한 탐사기법 적용성 검토 및 그라우팅 효과를 비교해 보고자 하였다.

쌍극자배열 전기비저항탐사는 제정부 전체 구간 165 m에 대하여 보강공사 이전에는 전극간격  $a$ 를 3 m, 전극전개수  $n$ 은 8로, 보강공사 이후에는 전극간격  $a$ 를 5 m, 전극전개수  $n$ 은 8로 설정하였고, 탐사 결과는 각 경우에 대하여 겉보기 비저항 가단면도와 2차원 비저항 단면도로 나타내었다 (Fig. 1). 전기비저항탐사 결과를 기초로 2차원 역산을 이용하여 얻어진 전기비저항 분포 단면도는 그라우팅 전후에 제정부로부터 심도 3~10 m 구간에서 수평방향으로 저비저항대가 우세하게 나타나 본 구간이 누수와 관련이 있는 것으로 판단되며, 기초조사에서 밝혀진 제당 중심부로부터 우측부의 비저항 분포가 그라우팅 전에 77~144 ohm-m인데 비하여 그라우팅 이후에는 110~195 ohm-m로 비저항 값이 약 40~50 ohm-m 증가되었고, 육안 관찰에 의한 누수량이 거의 없으므로 볼 때 그라우팅에 의한 효과적인 보강이 있었던 것으로 판단된다.

SP탐사는 쌍극자배열 전기비저항탐사 결과와의 복합적인 해석을 위해 같은 구간에 대하여 그라우팅 전후에 기준점 고정방식으로 실시하였는데, 기준점은 제체로부터 약 250 m 외곽부에 설치하여 탐사 전후에 기준값을 측정하여 실제 탐사자료의 잡음요소를 보정하였다. 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 33~40mV로 전체적으로 감소되는 양상을 보여준다 (Fig. 2). 이에 비하여 동일지점에 대한 그라우팅 이후의 탐사결과는 제체의 우측부인 90~165 m 구간에서 전반적으로 증가되는 경향이 나타나는 것으로 볼 때 자연전위값의 증가는 누수량 감소에 의해 나타나는 것으로 판단된다.



(a)



(b)

Fig. 1. Result of dipole-dipole array resistivity survey at the crest along the dam of Maehwa reservoir using the electrode spacing of 3 m and 5 m both before and after grouting respectively.  
 (a) apparent resistivity pseudosection and 2-D resistivity distribution as a result of inversion before grouting  
 (b) apparent resistivity pseudosection and 2-D resistivity distribution as a result of inversion after grouting.

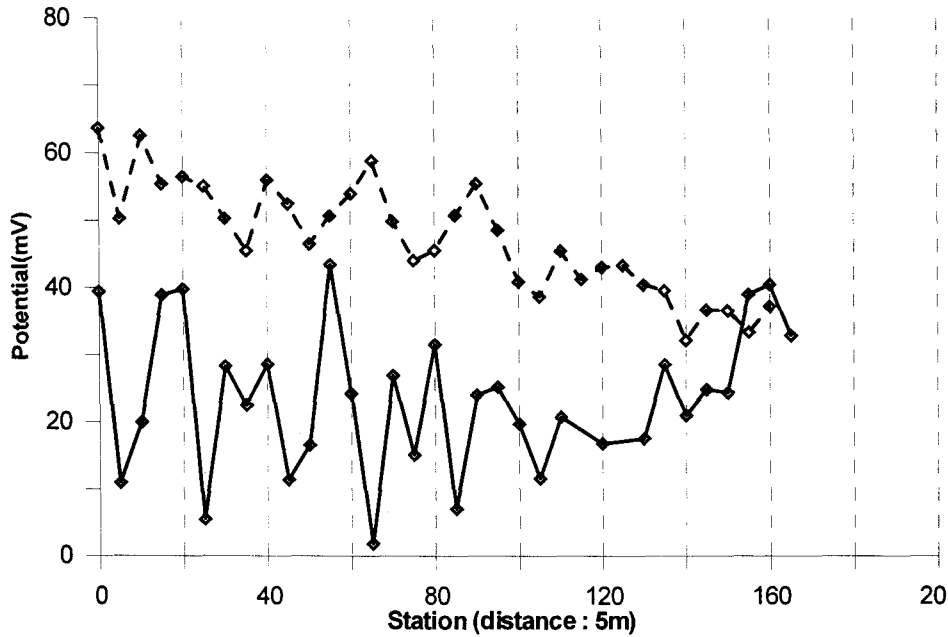


Fig. 2. SP profiles at the crest along the Maehwa reservoir dam.

Dot line : SP profile before grouting.

Solid line : SP profile after grouting.

#### 4.2. 대호방조제

본 지구는 충청남도 당진군에 위치한 총길이 7.8 km, 제정표고 8.0 m로 2개조의 방조제로 구성된 수리구조물이다. 본 연구에서는 1호 방조제 내측 호수를 따라 일차적으로 육안조사, 전기전도도 및 수온을 측정하여 No.20 지점 주변에서 누수구간을 확인하였고, 이 지점들을 포함하는 350 m 구간에 대하여 단극배열 전기비저항탐사를 실시하였다. SP탐사는 전기비저항탐사와 동일측점에 대하여 조석의 영향을 고려하기 위하여 간조 및 만조 시간 각 2회와 간만조의 중간시간 각 2회씩 총 8회의 측정을 실시하였다.

단극배열 전기비저항탐사는 No.18~No.25 사이 350 m 구간에 대하여 전극간격  $a$ 를 5 m, 전극전개수  $n$ 은 8로 설정하였고, 무한 전류전극( $C_1$ ) 및 전위전극( $P_1$ )은 측선 좌우측 마지막 전극 No.18과 No.25으로 부터 850 m 거리에 각각 설치하였다. 탐사는 입력전류를 100~200 mA로 측정하였고, 결과는 겉보기 비저항 가단면도와 2차원 비저항 단면도로 나타내었다 (Fig. 3). 현장 측정값을 이용하여 얻어진 겉보기 비저항값의 범위는 전극전개수 3 이상에서 10 ohm-m 이하로 낮은 값을 보여주며, 2차원 역산법을 동원하여 얻어진 단면도를 볼 때 심도 약 10 m 이하에서는 전체적으로 1~2 ohm-m 이하로 해수에 의해 포화된 것으로 여겨진다. 특히 No.20번 지점 주변에서는 0.3~0.9 ohm-m 의 매우 낮은 저비저항대가 나타나는데, 이러한 전기비저항값은 해수의 평균값인 0.2 ohm-m (Telford et al., 1990)와 비교해 볼 때 해수에 의해 완전하게 포화된 것으로 판단된다.

SP탐사는 외부로부터의 잡음을 제거하기 위하여 방조제 외측부인 약 1.2km 거리에 기준점을 설정하였고, 실제 탐사과정에서 측정 전후에 기준점 전위를 측정하여 실제 측정값을 보정하고자 하였다. 또한 본 지구의 조위변화는 자동수위측정기(Hermit-2000)를 이용하여 실시간 측정을 실시하였다. 그러나 측정된 조위변화를 시간별로 측정된 기준점의 전위와 도시한 결과 기준점의 전위값이 조위변화의 영향이 나타나 본 연구에서는 기준점의 전위값을 보

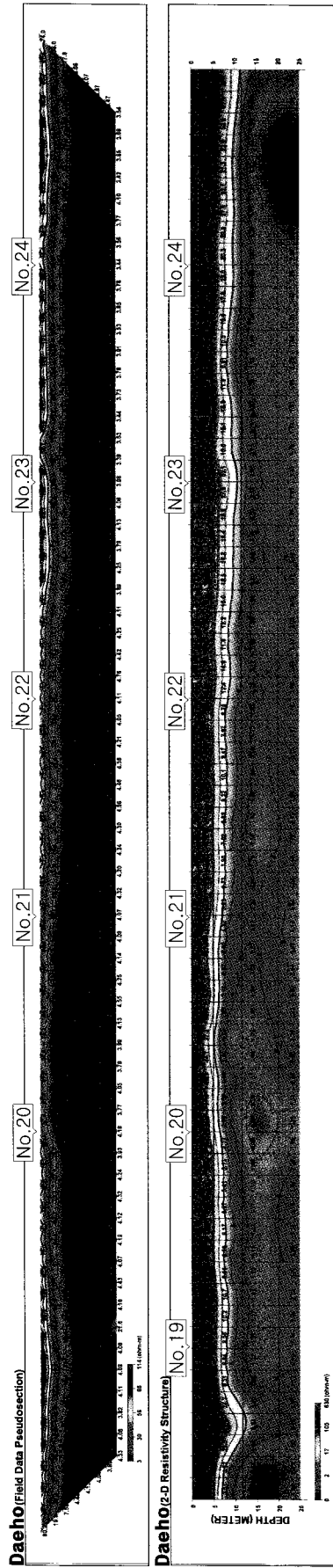


Fig. 3. Result of the pole-pole array resistivity survey along the Daeho embankment using the electrode spacing of 5m  
 Upper : apparent resistivity pseudosection.  
 Lower : two-dimensional resistivity distribution as a result of inversion.



정한 결과를 기초로 SP 측정값의 단면도만을 도시하였다 (Fig. 4). 본 구간에서 실시한 SP 전위값은 전체적으로  $-20 \sim +60$  mV 사이로 나타나는 반면, No.20 주변에서의 측정결과는  $-40 \sim -100$  mV의 부(-)의 이상이 나타나는데 이는 전기비저항탐사에서  $0.3 \sim 0.9$  ohm-m 내외의 저비저항대와 일치하고 있다 (Fig. 5).

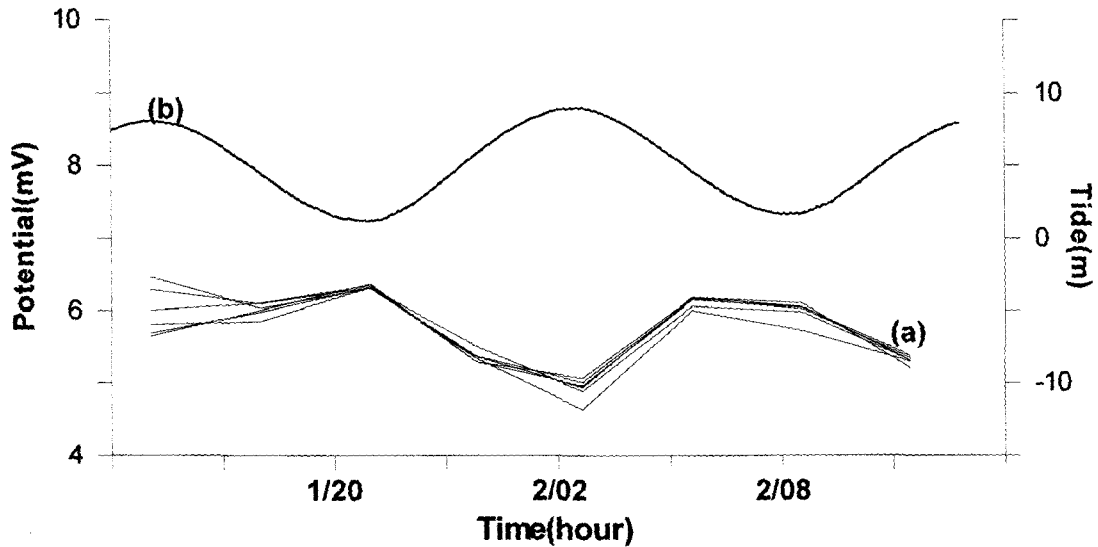


Fig. 4. Variation of reference SP measurements superimposed on the seawater level at the Daeho embankment during June 1-2, 2000.  
 (a) SP variations at reference point.  
 (b) Measuring tidal variations using Hermit-2000 at the Daeho embankment.

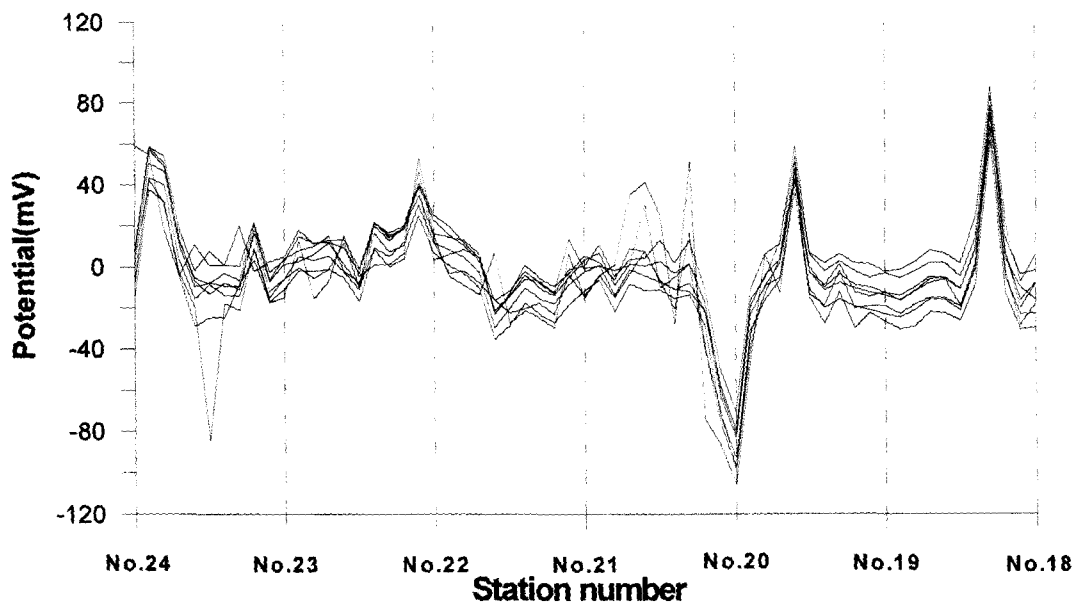


Fig. 5. SP profiles along the Daeho embankment during June 1-2, 2000.

### 4.3. 영산강하구둑

본 지구는 전라남도 목포시에 위치한 하구둑으로 농업개발계획의 일환으로 건설된 길이 4.4 km, 높이 19.5 m로 250백만<sup>m</sup>의 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 동일측점에 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)와 수온 측정 결과 전기전도도는 전체 구간에서 2,500~5,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 범위에 해당되는데, No.22~No.26 사이의 4개 구간에서는 17,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  이상으로 측정되었다. 이러한 전기전도도값을 Hem(1992)이 제시한 아래식에 적용하면

$$\text{TDS} = (0.59 \times \text{EC}) \pm 100$$

TDS (Total Dissolved Solids)가 10,000 $\text{mg}/\ell$  이상에 해당되어 Freeze and Cherry(1979)의 분류에 의한 해수의 영역에 해당된다 (Table 2; Fig. 6). 또한 전기전도도와 동시에 측정된 수온 결과는 No.22~No.26 사이의 4구간에서 15~17  $^{\circ}\text{C}$ 로 전체 평균 18.7  $^{\circ}\text{C}$  보다 상대적으로 낮아 본 구간에서 하구둑 바다측으로 부터 해수의 유입이 있는 것으로 판단된다.

Table 2. Groundwater classification based on total dissolved solids.  
(after Freeze and Cherry, 1979)

Category	Total Dissolved Solids( $\text{mg}/\ell$ )
Fresh Water	0~1,000
Blackish Water	1,000~10,000
Saline Water	10,000~100,000
Brine Water	>100,000

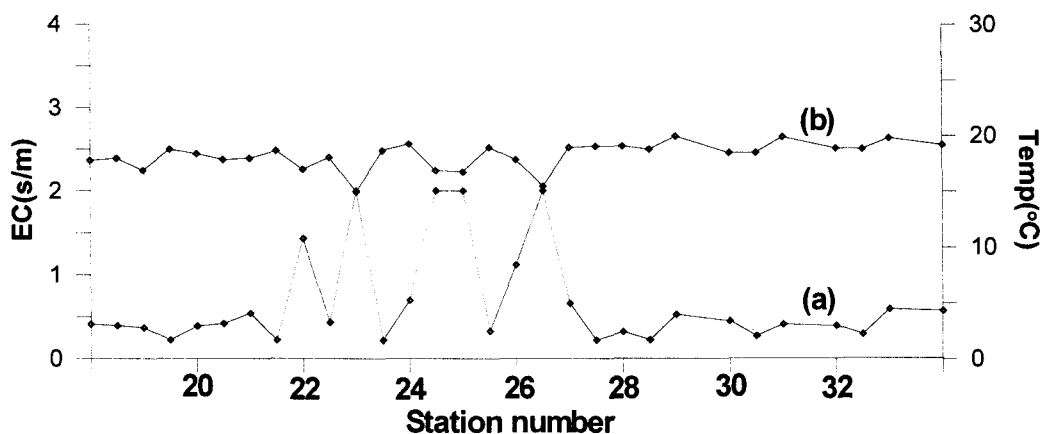


Fig. 6. Variations of electrical conductivity and temperature at the water surface of the Youngsan Lake along estuary dam at 15:00 in May 18, 2000.  
(a) Electrical conductivity in S/m and (b) temperature in  $^{\circ}\text{C}$ .

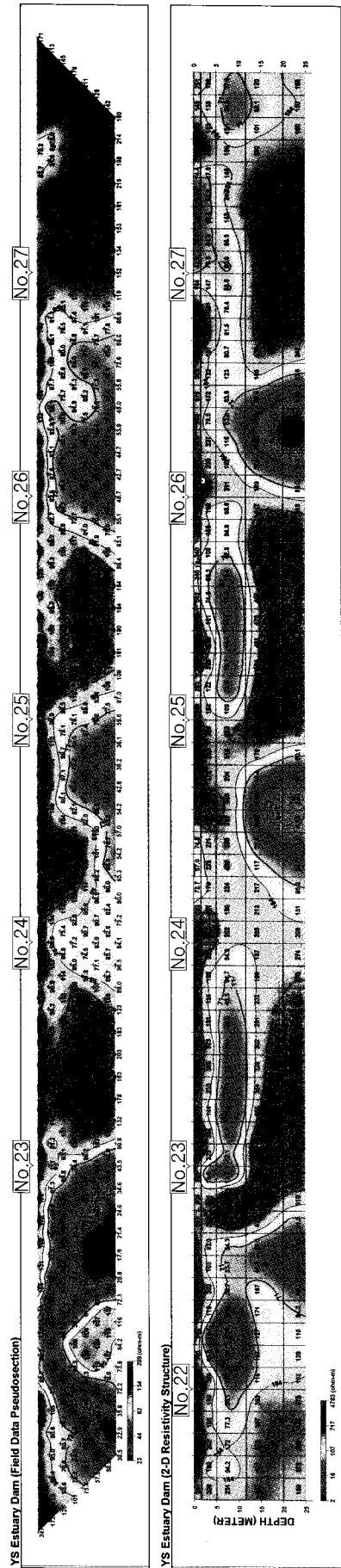


Fig. 7. Result of the pole-pole array resistivity survey along the Youngsan Estuary Dam using the electrode spacing of 5m  
 Upper : apparent resistivity pseudosection.  
 Lower : two-dimensional resistivity distribution as a result of inversion.

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 측선 좌우측 마지막 전극 No.21+15와 No.28+05으로 부터 800 m 거리에 각각 설치하였다. 탐사는 입력전류를 50~100 mA로 측정하였고, 결과는 겉보기 비저항 가단면도와 2차원 비저항 단면도로 나타내었다 (Fig. 7). 현장 측정값을 이용하여 얻어진 겉보기 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 조석에 의한 직접적인 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. 8).

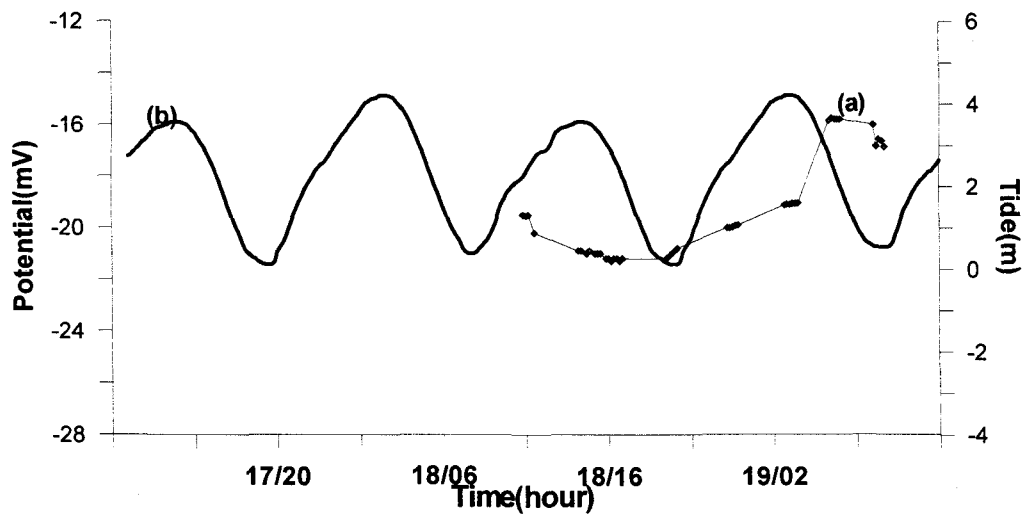


Fig. 8. Variation of reference SP measurements superimposed on the seawater level at the Youngsan estuary dam during May 17-19, 2000.

(a) SP variations at reference point.

(b) Tidal variations at the Youngsan estuary dam gauging station.

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 일치하고있다 (Fig. 9). 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. 10).

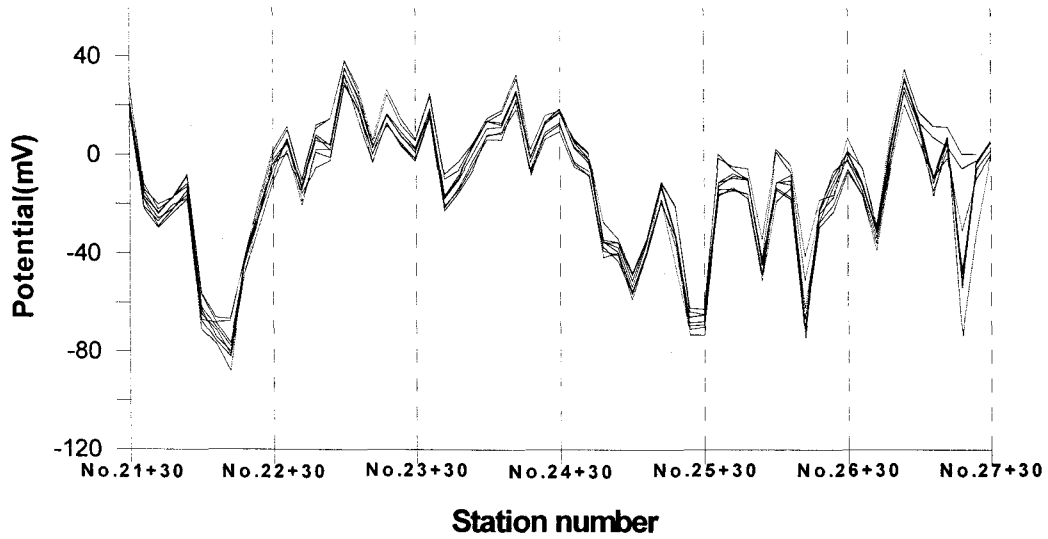


Fig. 9. SP profiles along the Youngsan estuary dam during May 18-19, 2000.

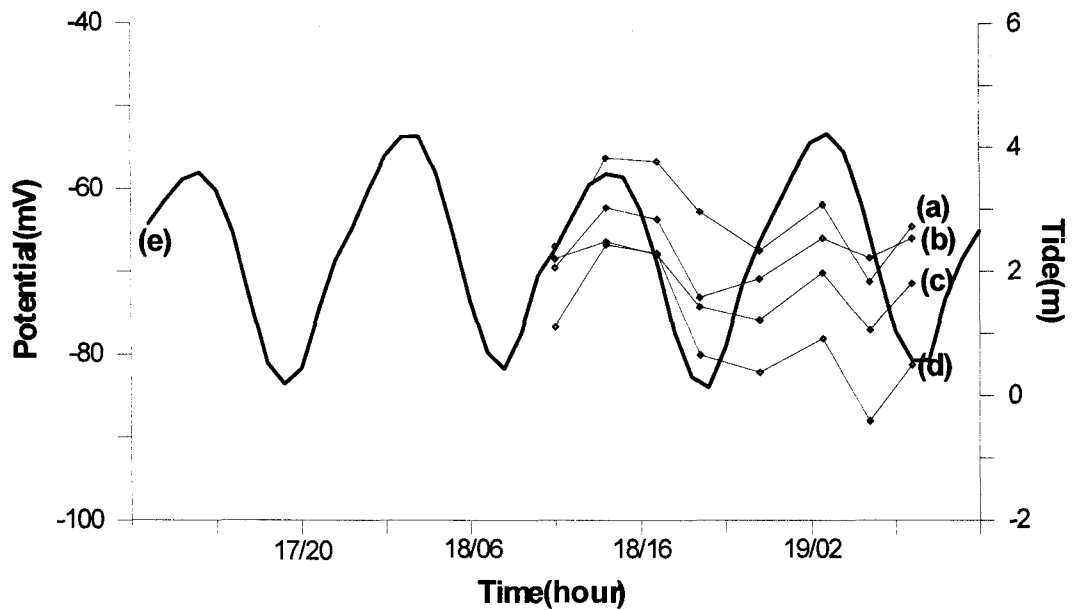


Fig. 10. Variations of SP at the Youngsan estuary dam during May 18-19, 2000. SP variations at the stations No.22+05(a), No.25+25(b), No. 22+10(c), and No.22+15(d) are shown as compared with the tidal variation at the Youngsan estuary dam gauging station(e).

#### 4.4. 어은방조제

본 지구는 전라북도 군산시에 위치한 방조제로 길이는 5.4 km, 높이는 8 m인 농업용 수리구조물로 내측부는 농경지로 이용되고 있으며, 방조제 내측부를 따라 자연적으로 조성된 농업용 수로가 형성되어 있다. 본 연구에서는 일차적으로 방조제 내측부에 대한 육안조사로

부터 만조시에 방조제 내측부로 누수가 발생하는 지점을 연구대상으로 선정하였다.

탐사는 영산강하구둑과 마찬가지로 누수구간을 포함하는 60 m 구간에 대하여 일차적으로 단극배열 전기비저항탐사를 실시하였고, 동일한 위치에 대하여 24시간 동안 1시간 간격으로 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 가단면도와 2차원 비저항 단면도로 나타내었다 (Fig. 11). 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 이하로 해수에 의해 포화된 것으로 나타났다. 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)과 유사하므로 해수에 의해 완전하게 포화된 것으로 판단된다.

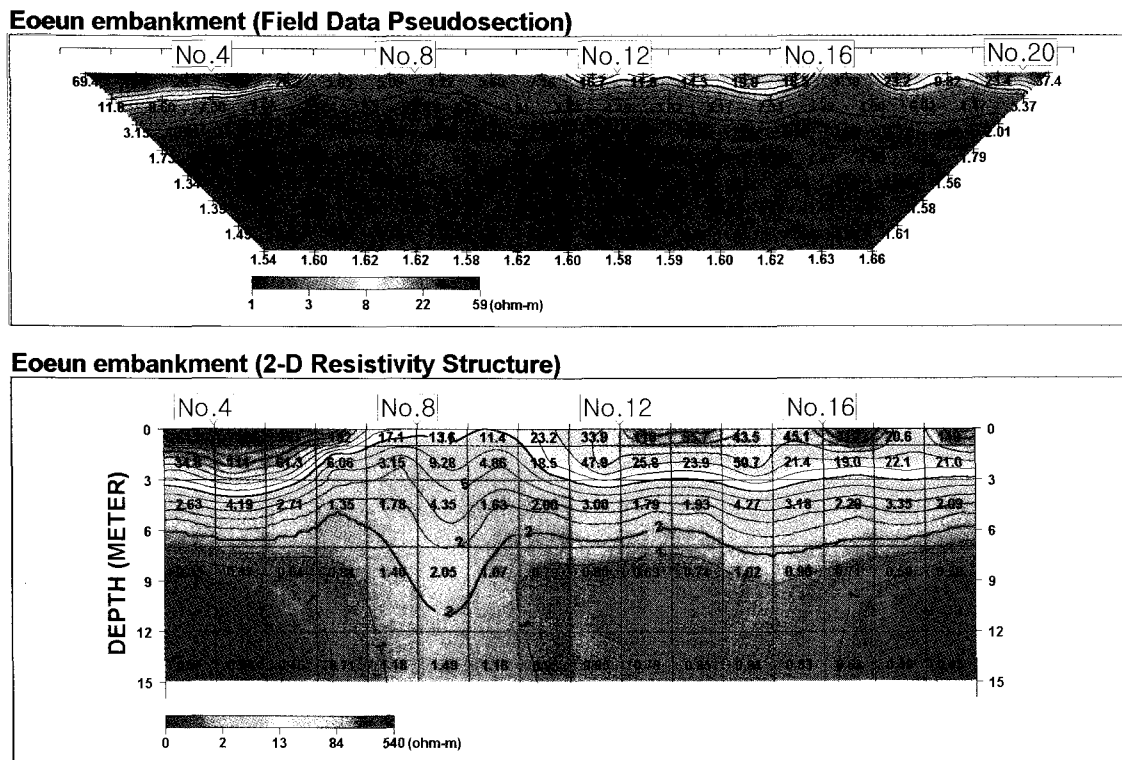


Fig. 11. Result of the pole-pole array resistivity survey along the Eoeun embankment using the electrode spacing of 3m.

Upper : apparent resistivity pseudosection.

Lower : two-dimensional resistivity distribution as a result of inversion.

SP탐사는 전기비저항탐사의 전극지점에 대한 기준점 고정방식으로 실시하였고, 외부로부터의 잡음을 제거하기 위하여 측정 전후에 기준점 전위를 측정하여 실제 측정값을 보정하였다. 본 지구의 조위는 인근의 농업기반공사 금강하구둑 관리소의 측정 자료를 이용하였

고, 시간별로 측정된 기준점의 전위를 도시한 결과 이 지점 역시 조석의 영향을 받지 않았음을 알 수 있었다 (Fig. 12). 본 구간에서 실시한 SP 전위값은 전체적으로 0~+20 mV 사이로 나타나는 반면, No.3~No.6의 4개 지점의 측정결과는 -20~-50 mV의 부(-)의 이상이나 나타나는데 이는 만조 시 누수가 발생된 구간과 일치되며 (Fig. 13), 또한 전기비저항탐사에서도 0.3 ohm-m 내외의 저비저항대와 일치하고 있다.

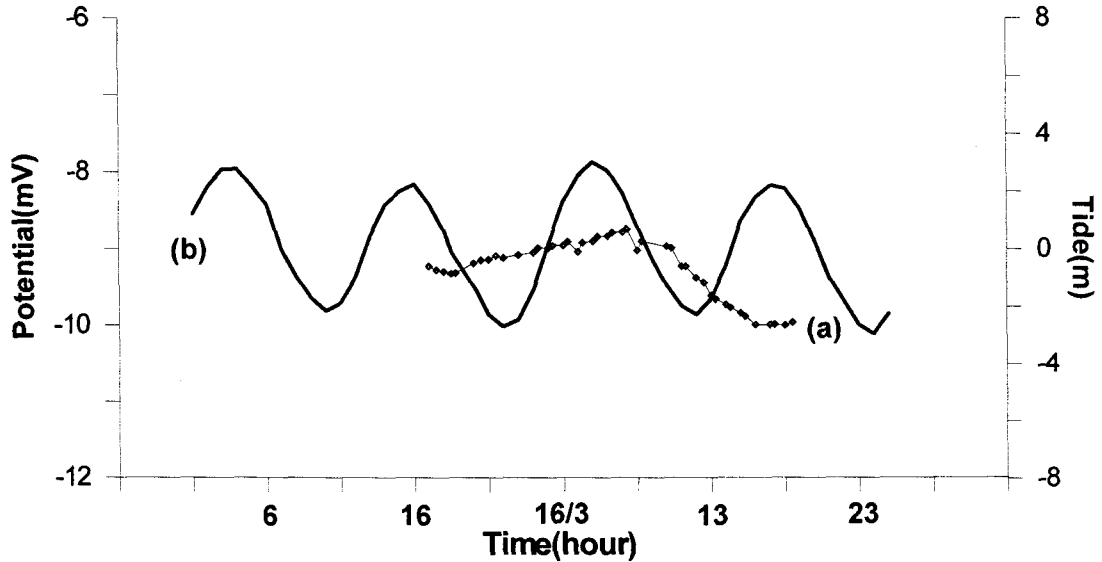


Fig. 12. Variation of reference SP measurements superimposed on the seawater level at the Keumgang estuary dam during June 15-16, 2000.  
 (a) SP variation at the reference point.  
 (b) Tidal variations at the Keumgang estuary dam gauging station.

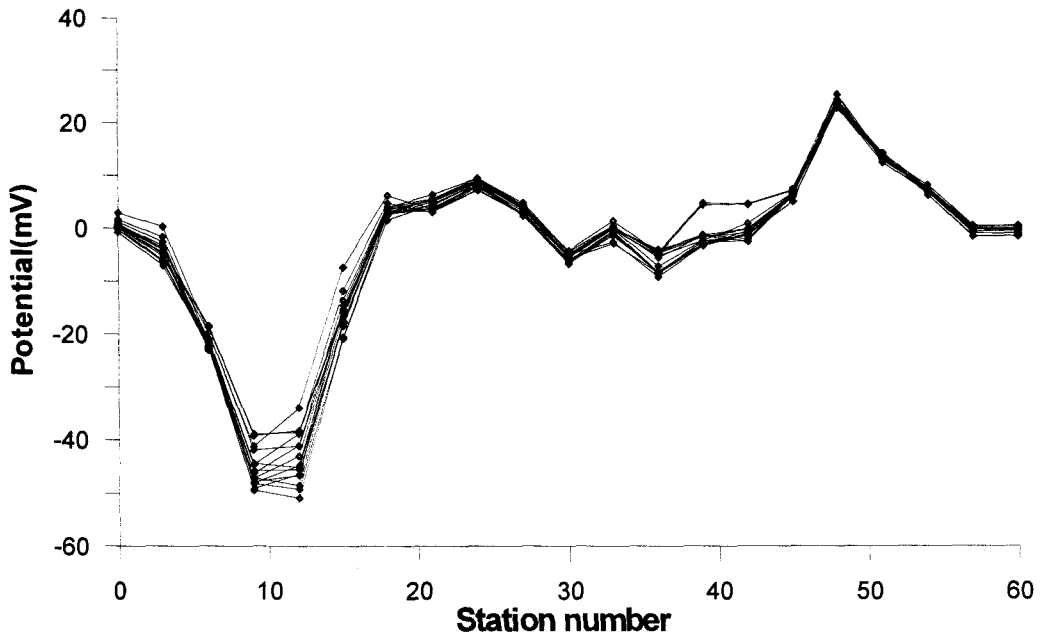


Fig. 13. SP profiles along the Eoeun embankment during June 18-19, 2000.

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 No.4 및 No.5 지점을 통해 해수가 유입된다고 판단된다 (Fig. 14).

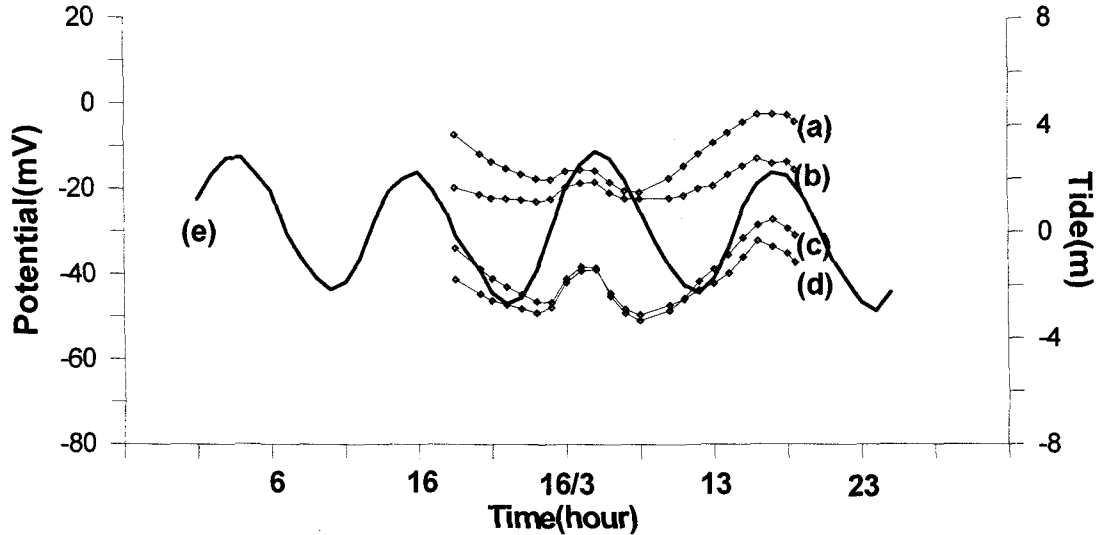


Fig. 14. Variations of SP level at the Eoeun Embankment during June 15-16, 2000. SP variations at the stations No.6(a), No.3(b), No.5(c), and No.4(d) are shown as compared with the tidal variations at the Keumgang estuary dam gauging station(e).

#### 4.5. 광양방조제

본 지구는 전라남도 광양시에 위치한 방조제로 길이는 5.5 km, 높이는 4.3 m인 농업용 수리구조물로 내측부는 담수호와 농경지로 이용되고 있다. 본 연구에서는 일차적으로 방조제 내측부 담수호에 대한 육안조사, 전기전도도 및 온도를 측정된 결과 전기전도도와 온도의 상관관계가 분명하게 나타나는 5지점의 누수지점을 확인하였고, 이 중 누수구간이 집중되어 있는 No.94~No.98까지의 약 200 m 구간을 연구대상으로 선정하였다.

탐사의 전 단계로 실시한 전기전도도(EC)와 수온 측정 결과 전기전도도는 전체 구간에서 5,000~8,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 범위에 해당되는데 비하여 5개 지점에서는 25,000~33,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 Table 1에서 제시된 해수의 영역에 해당된다 (Fig. 15). 또한 전기전도도와 동시에 측정된 수온은 5구간에서 10~17  $^{\circ}\text{C}$ 로 전체적인 30  $^{\circ}\text{C}$  보다 현저히 낮아 본 구간이 해수 유입의 주된 통로로 판단된다.

단극배열 전기비저항탐사는 No.94~No.98 구간 200 m에 대하여 전극간격  $a$ 를 3 m, 전극전개수  $n$ 은 5로 설정하였고, 무한 전류전극( $C_1$ ) 및 전위전극( $P_1$ )은 측선 좌우측 마지막 전극 No.94와 No.98으로 부터 600 m 거리에 각각 설치하였다. 탐사는 입력전류를 50~100 mA로 측정하였고, 결과는 겉보기 비저항 가단면도와 2차원 비저항 단면도로 나타내었다 (Fig. 16). 2차원 역산을 이용하여 얻어진 전기비저항 분포 단면도에 의하면 제체하부 5~10 m 구간의 No.95+15, No.96, No.97 및 No.98+6 주변에서 25~40 ohm-m 범위의 저비저항대가 나타나는데, 이는 전기전도도 측정에 의한 누수구간과 일치된다. 그러나 저비저항대의



구간이 제체 높이 4.3 m 보다 낮은 지점에 위치하고, 육안조사에서 간조시에도 내측 호수부에서 소량의 누수가 관측되므로 조석에 의한 직접적인 영향보다는 방조제 제체 하부를 통한 지속적인 누수의 영향을 받을 것으로 판단된다.

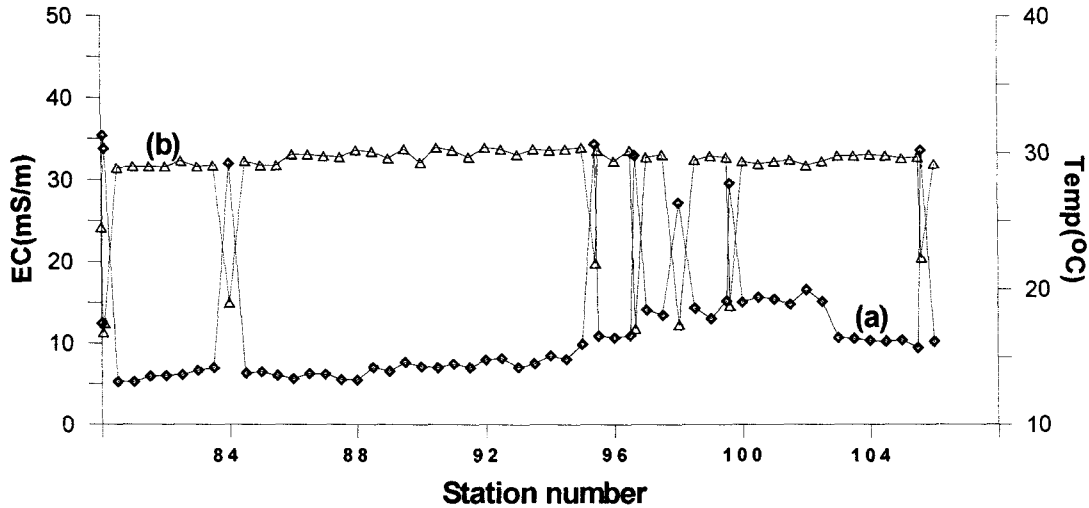


Fig. 15. Variations of electrical conductivity and temperature at the water surface of the Kwangyang Lake along embankment at 15:00 in August 3, 2000.

(a) Electrical conductivity in mS/m and (b) temperature in ° C.

본 지구에 대한 SP탐사는 단극배열 전기비저항탐사의 전극지점에 대하여 기준점 고정방식으로 실시하였고, 조석 및 일변화 등 기준점에 대한 외부로부터의 잡음을 제거하기 위하여 매 측선에 대한 측정 전후에 기준점 전위를 측정하여 실제 측정값을 보정하였다. 본 지구의 조위는 인근 국립해양조사원 광양조위측정소의 측정 자료를 이용하였고, 측정된 기준점의 전위를 시간별로 도시한 결과 조석의 영향을 받지 않았음을 알 수 있다 (Fig. 17).

No.93+49로부터 No.98+3까지 204 m 구간에서 실시한 SP탐사 자료는 전체적으로 10~20 mV 전후의 전위값을 나타내는데 비하여 No.95+15~No.95+45 구간에서 -5~+5 mV의 이상대가 나타나는데 이는 전기비저항탐사에서의 저비저항대와 일치하는 결과를 보여준다 (Fig. 18). 이들 구간 중 No.95+15와 No.95+27 지점에 대하여 조위변화에 따른 SP값의 변화를 도시한 결과는 조위변화에 따라 SP값이 약 6시간 정도의 시차를 두고 대체적으로 일치하는 양상을 보여주고 있는 것으로 볼 때, 전기비저항탐사 결과에서 제시된 대로 본 구간의 누수는 조석에 의한 직접적인 영향 보다는 제체 하부를 통하여 일정정도의 시간차를 두고 조위변화에 따라 해수의 유입양상이 나타난다고 판단된다 (Fig. 19).

## 5. 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.

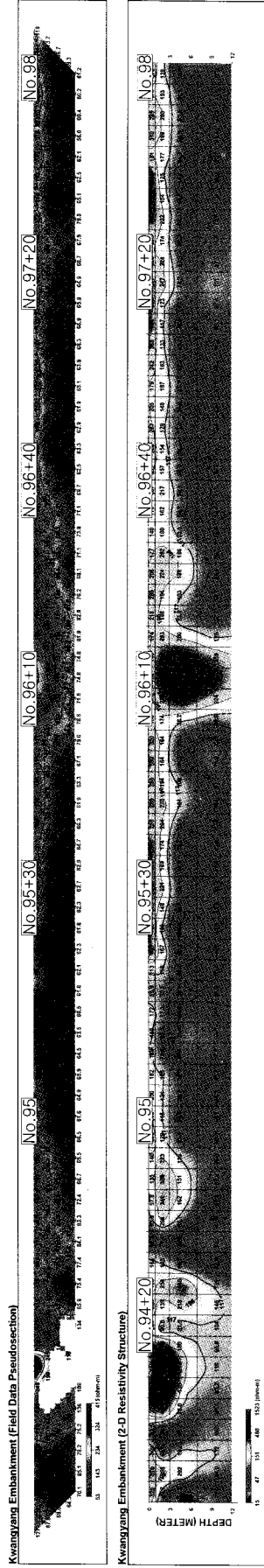


Fig. 16. Result of the pole-pole array resistivity survey along the Kwangyang embankment using the electrode spacing of 3m  
 Upper : apparent resistivity pseudosection.  
 Lower : two-dimensional resistivity distribution as a result of inversion.

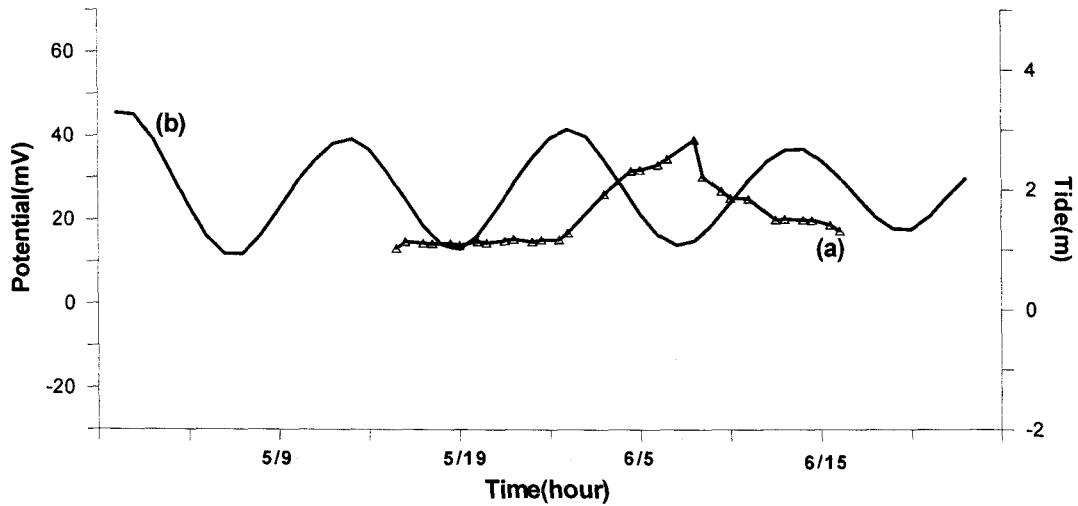


Fig. 17. Variation of reference SP measurements superimposed on the seawater level at the Kwangyang gauging station during August 5-6, 2000.

(a) SP variation at the reference point.

(b) Tidal variations at the Kwangyang gauging station.

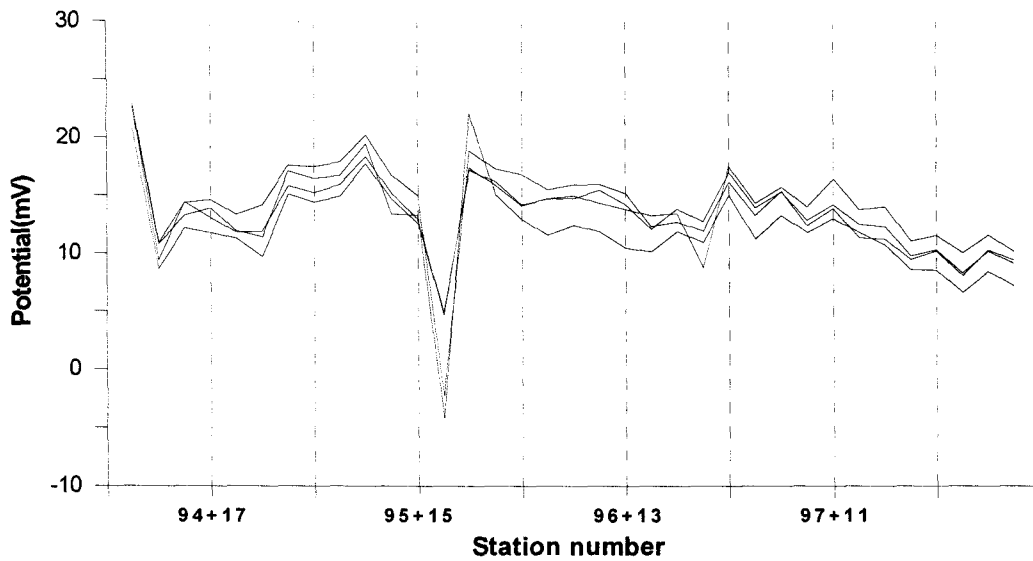


Fig. 18. SP profiles along the Kwangyang embankment during August 5-6, 2000.

본 연구에서는 누수가 보고된 저수지 1개소에 대하여 그라우팅 보강 전후에 각 각 쌍극자배열 전기비저항탐사와 SP탐사를 실시하여 누수구간에 대한 탐사기법 적용성 검토 및 그라우팅 효과를 비교한 결과 저수지의 경우에도 SP탐사가 효과적임을 확인할 수 있었다. 또한 해수의 영향으로 전기전도도가 높은 방조제의 경우는 전기비저항의 값이 낮아 안정된 측정값을 얻지 못하는 문제가 발생됨에 따라, 본 연구에서는 단극배열을 이용하여 측정전위값을 크게 만들어 높은 S/N비를 확보하고자 하였다. 본 연구지구인 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.

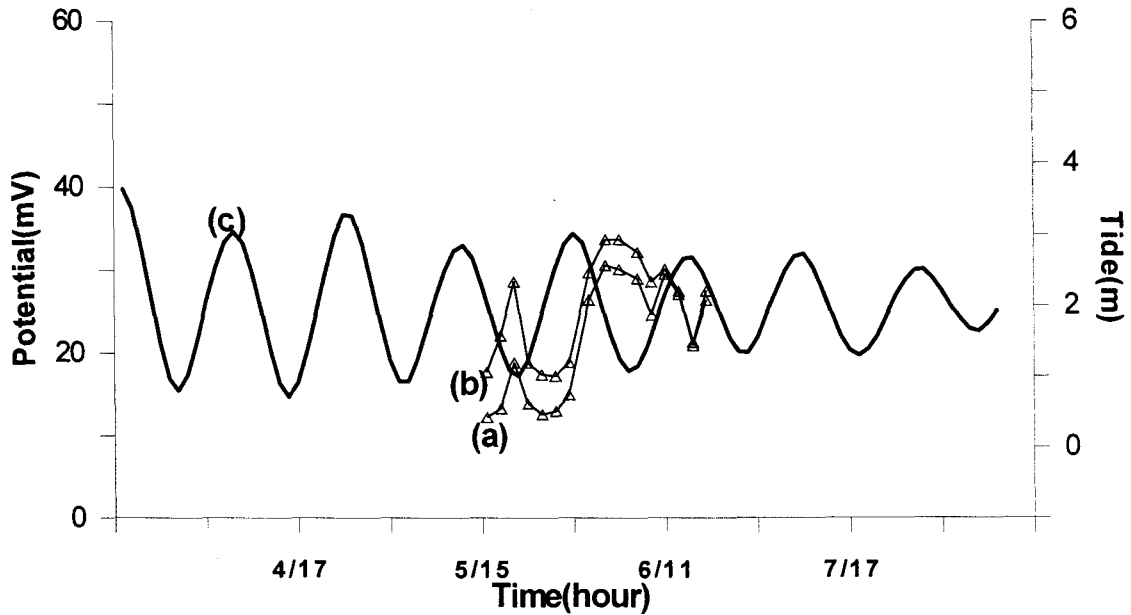


Fig. 19. Variations of SP level at the Kwangyang embankment during August 5-6, 2000. SP variations at the stations No.95+15(a) and No.95+27(b) are shown as compared with the tidal variations at the Kwangyang gauging station(c).

또한 단극배열 전기비저항탐사에 대한 복합탐사로 방조제를 통한 누수에 의해 발생하는 유도전위를 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 누수지점 확인과 병행하여 SP모니터링을 수행함으로써 누수 상황에 대한 종합적 해석을 시도함이 추천된다.

저수지 1개소와 방조제 4개소에 대한 누수조사 결과에서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 매화저수지에 대하여 그라우팅 보강공사 전후에 실시한 쌍극자배열 전기비저항탐사 결과는 누수구간에서 전기비저항의 분포가 보강공사 후에 약 40~50 ohm-m 증가되었고, 본 구간에서 복합적으로 실시한 SP탐사는 누수구간에서 보강공사 후에 전위값의 상승경향이 뚜렷하게 나타나므로 누수구간에 대한 적용이 효과적이라고 판단된다.

2. 대호방조제의 경우 단극배열 전기비저항탐사 결과 심도 약 10 m 이하에서 참비저항값이 전체적으로 1~2 ohm-m 이하이고, 특히 No.20번 지점 주변에서는 0.3~0.9 ohm-m의 매우 낮은 저비저항대가 나타나며, SP탐사 결과 역시 No.20번 지점 주변에서 -40~-100 mV의 부(-)의 이상이 나타나므로 본 구간을 통해 해수의 유입이 있는 것으로 판단된다.

3. 영산강 하구둑 내측 영산호를 따라 실시한 전기전도도 측정 결과는 4개 구간에서 TDS가 10,000mg/l 이상으로 해수에 해당되며, 동시에 측정된 수온의 경우 15~17 °C로 전체 평균 18.7 °C 보다 상대적으로 낮아 본 구간에서 하구둑을 통한 해수의 유입이 있는 것으로 판단된다. 또한 단극배열 전기비저항탐사 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.

4. 어은방조제에 대한 단극배열 전기비저항탐사 결과 약 6 m 이하 심도에서의 참비저항이 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.

5. 광양방조제의 경우 내측호수에서 실시한 전기전도도(EC)와 수온 측정 결과 누수지점에서의 TDS가 15,000~20,000mg/l 로 해수에 해당되며, 수온 또한 10~17 °C로 전체적인 30 °C 보다 현저히 낮아 본 구간이 해수 유입의 주된 통로로 판단된다. 단극배열 전기비저항탐사 결과에 의하면 25~40 ohm-m 범위의 저비저항대가 제체하부 5~10 m 구간에서 나타나는데, 이는 전기전도도 측정에 의한 누수구간과 일치된다. 그러나 저비저항대의 구간이 제체 높이 4.3 m 보다 낮은 지점에 위치하고, 육안조사에서 간조시에도 내측 호수부에서 소량의 누수가 관측되며, SP 모니터링에서 얻어진 값과 조위변화를 도시한 결과 약 6시간 정도의 시차를 두고 두 변화가 대체적으로 일치하는 양상을 보여주고 있는 것으로 볼 때, 본 구간의 누수는 조석에 의한 직접적인 영향 보다는 제체 하부를 통하여 일정정도의 시간차를 두고 조위변화에 따른 해수의 유입양상이 있는 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- 김정호, 이명중, 정승환, 1999, 2차원 전기비저항 탐사를 위한 전극배열법의 비교: 한국자원공학회 1999년도 추계총회 및 제73회 학술발표회 논문집, 134-138.
- 농업기반공사, 2000, 기반조성사업: 2000년 사업현황, 487-488.
- 송성호, 이기철, 김정희, 원종근, 최종학, 1999, SP탐사를 이용한 제당 및 방조제 누수지점 탐지기법 연구(I): 농업기반공사.
- 원종근, 송성호, 1999, 제방누수조사에의 물리탐사기법의 활용(쌍극자배열 전기비저항탐사와 SP탐사를 중심으로): 건설현장에 필요한 물리탐사기술 심포지움, 한국지구물리탐사학회 1999년도 제2회 학술발표회, 240-257.
- 정승환, 김정호, 양재만, 한규언, 김영웅, 1992, 전기비저항탐사에 의한 제당의 누수구간 탐지: 지질공학, 2, 47-57.
- 정현기, 최종호, 김정호, 정승환, 신인철, 1989, 자동연속기록 및 PC전송 가능한 디지털 SP측정기 개발 및 응용연구: 한국동력자원연구소, KR-89-(B)-26.
- 조진동, 정현기, 정승환, 김정호, 1996, 방조제 누수부위 확인을 위한 SP/VLF 탐사법의 적용성: 자원환경지질, 29, 623-627.
- 조진동, 정현기, 최종호, 정승환, 김정호, 1990, 128채널 자동연속 SP Monitor System 개발 및 응용연구: 한국동력자원연구소, KR-90-(B)-18.
- 조진동, 황학수, 이철우, 박인화, 2000, 해수침입으로 오염된 지역에 대한 고분해능 TEM 탐사: 지질학회지, 36, 39-46.
- 현병구 외, 1995, 물리탐사 용어사전: 선일문화사, 205-206.
- Corry, C. E., 1985, Spontaneous polarization associated with porphyry sulfide mineralization: *Geophysics*, 50, 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: *J. Geophys. Res.*, **84**, 6031-6040.
- Fitterman, D. V., 1979b, Calculation of self-potential anomalies near vertical contacts: *Geophysics*, **44**, 195-205.
- Fitterman, D. V., 1983, Modeling of self-potential anomalies near vertical dikes: *Geophysics*, **48**, 171-180.
- Freeze, R. A., and Cherry, J. A., 1979, Groundwater, *Prentice-Hall*.
- 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)*, 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*, 67.
- Ishido, T., Kikuchi, T., Matsushima, N., Yano, Y., Nakao, S., Sugihara, M., Tosha, T., and Ogawa, Y., 1997, Repeated self-potential profiling of Izu-Oshima Volcano, Japan: *J. Geomag. Geoelectr.*, **49**, 1267-1278.
- Ogilvy, A. A., Ayed, M. A., and Bogoslovsky, V. A., 1969, Geophysical studies of water leakage from reservoirs: *Geophys. Prosp.*, **17**, 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.*, **49**, 1677-1696.
- Petiau, G., and Dupis, A., 1980, Noise, temperature coefficient, and long time stability of electrodes for telluric observations: *Geophys. Prosp.*, **28**, 792-804.
- Robain, H., Albouy, Y., Dabas, M., Descloitres, M., Camerlynck, C., Mechler, P., and Tabbagh, A., 1999, The location of infinite electrodes in pole-pole electrical surveys : Consequences for 2D imaging: *J. Appl. Geophys.*, **41**, 313-333.
- Sato, M., and Mooney, H. M., 1960, The electrochemical mechanism of sulfide self potentials: *Geophysics*, **25**, 226-249.
- Sill, W. R., 1983, Self-potential modeling from primary flow: *Geophysics*, **48**, 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)*, 321-331.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., and Sheriff, R. E., 1990, Applied geophysics, 2nd ed.: *Cambridge University Press*.