

수리시설물 누수탐지에 대한 자연전위법 적용 및 수치 해석

송성호¹⁾ · 권병두²⁾ · 양준모³⁾ · 정승환⁴⁾

Application of SP Survey and Numerical Modeling to the Leakage Problem of Irrigation Facilities

Sung-Ho Song¹⁾, Byung-Doo Kwon²⁾, Jun-Mo Yang³⁾ and Seung-Hwan Chung⁴⁾

요 약 : 이 연구에서는 수리시설물의 누수 문제에 대한 자연전위법의 적용성을 규명하기 위하여 현장 탐사와 수치모델링을 수행하였다. 이 연구를 수행한 저수지들의 경우는 일반적인 흙 댐의 손상 형태 중 제체 양안 접합부를 통한 누수, 파이핑 형태의 제체를 통한 누수, 사면의 활동파괴와 다짐불량에 의한 구조물 자체 변위가 복합적으로 작용하는 누수가 관찰되었다. Sill(1983)이 개발한 자연전위 모델링 코드를 이들 수리시설물에 적합하도록 변형 개선시켜 누수 모델에 적용한 결과 야외 탐사자료와 유사한 자연전위 이상곡선을 얻을 수 있었다. 따라서 저수지의 경우 누수 유형을 구분한 후 자연전위 모델링을 수행하면 누수 구간 및 누수 유로에 대한 효과적인 규명이 가능한 것으로 밝혀졌다. 방조제의 경우는 해수 유입으로 발생하는 유동전위에 대한 자연전위 모니터링 결과를 조석 변화와 대비 검토한 결과, 변화양상이 서로 일치되어 나타나므로 누수 지점 탐지와 더불어 누수 추세를 밝히는데 모니터링 기법이 효과적임을 알 수 있었으며, 자연전위 모델링을 수행한 결과는 해수 유입에 의한 자연전위 이상이 잘 재현됨을 확인하였다.

주요어 : 자연전위법, 누수문제, 수치모델링, 수리시설물

Abstract : We have carried out integrated research including field survey and numerical modeling to appraise the applicability of SP method to the leakage problems of irrigation facilities. The leakage pattern of the dike studied here can be classified into the three categories: leakage through the abutment, leakage by piping through dike, and leakage due to the composite effects of landslide and distortion of the dike structure. For the numerical modeling to interpret quantitatively SP survey results acquired at dike, we have modified the computer code proposed by Sill (1983) to apply to the leakage problems. The numerical studies match the characteristic patterns of SP anomalies according to the leakage types and appear to be very useful to interpret the leakage zone and path. The SP monitoring results were also well coincided with tidal variations observed at every embankment so we found the SP method is quite effective not only to detect the leakage zone but also to determine the leakage trend. The numerical modeling results also reproduced the SP anomalies due to seawater leakage in the embankment.

Keywords : SP method, leakage problems, numerical modeling, irrigation facilities

서 론

우리나라에 분포하는 수리시설물 중 저수지는 총 17,913 개소로 이 중 약 89%인 15,960 개소가 축조된 후 30년이 경과된 노후한 상태이다. 이들 중 1종 저수지는 총 781 개소로 약 52%인 408 개소에 대하여 1995년 농업기반시설 관리규정 시행에 따른 정밀안전진단이 수행되었다(농업기반공사, 2001). 방조제의 경우는 총 1,654 개소 중 약 90%인 1,546 개소가 1980년대 이전에 준공되었고, 82%가 조석의 영향이 큰 서해

와 남해에 집중되어 있어서 방조제를 통한 누수 유형은 만조시 해수의 유입 형태로 나타난다.

이 연구에서는 저수지의 경우 누수유형별로 자연전위법을 이용하였으며, 방조제의 경우는 누수구간에 대하여 조위 변화에 따른 자연전위 모니터링을 실시하고 다양한 수리지질학적 방법과 전기비저항을 이용한 탐사 및 검증 등을 적용하여 자연전위법의 결과와 상호 비교하였다. 이러한 결과와 수리시설물에서 누수로부터 발생한 자연전위 자료들을 수치모델에 적용하여 누수 구간 및 누수 유로에 대한 깊이, 누수량, 누수 경

*2002년 9월 30일 접수

1) 농업기반공사 농어촌연구원(Rural Research Institute, KARICO)

2) 서울대학교 지구과학교육과(Department of Earth Science Education, Seoul National University)

3) 기상청 기상연구소(Marine Meteorology and Earthquake Research Lab., Meteorological Research Institute)

4) 한국지질자원연구원 탐사개발연구부(Geophysical Exploration and Mining Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resource)

로 및 누수 유형 등 물리적인 성질에 대한 정량적인 해석을 실시하였고, 얻어진 결과를 다른 조사 결과와 상호 비교함으로써 자연전위법의 효용성을 검토하였다. 이러한 수치모델링을 위하여 Sill (1983)의 연구 결과를 기초로 모델링 코드를 변형 개편시킨 수치모델을 각 누수 모델에 적용하였다(양준모, 2001).

이론적 고찰

일반적으로 다공질 매질을 통한 유체의 흐름은 전위를 발생시키는데, 이러한 전위를 유동전위(streaming potential) 또는 자연전위(self-potential)라 하며, 자연전위법이란 이러한 자연적으로 발생하는 전위를 측정하여 지하광체나 지하수 유동을 탐지하는 방법이다. 일반적으로 자연전위값의 크기는 전기비저항, 유전상수, 유체의 점도, 유체와 매질간의 결합계수(coupling coefficient) 등과 관련이 있으며, 특히 저수지 체체의 경우는 균질한 매질로 축조되었기 때문에 저수지의 표면에서 누수에 의해 발생하는 유동전위의 이상을 연속적으로 측정하므로 구조물의 일부구간을 통한 누수유로의 탐지가 가능하다(송성호 등, 2001).

일반적으로 지열탐사 및 지질공학적인 연구에서 수행된 자연전위 자료 해석에는 대개 분극된 구(sphere)나 양극 전류원(line dipole sources) 등에 기초를 두지만(Meiser, 1962), 이러한 방법들은 주된 전위 발생원의 성질에 대한 정보를 주지 못한다. Nourbehecht(1963)는 일차류(primary flow)에 의해 결합되는 자연전위 발생 기구를 지질학적으로 설명이 가능한 세 가지 이상인 전기역학 전위, 열전기 전위 및 확산 전위로 제시하여 정량적인 계산을 실시하였다. 그러나 계산 결과가 이들 전위와 이에 영향을 미치는 온도, 압력 등 각각의 전위가 합쳐진 총 전위를 계산함에 따라 실제적으로 적용하기가 어려웠다. 또한 이러한 방법은 이들 전위 및 각각의 전위가 같은 경계조건을 만족하는 경우에는 적용이 가능하지만, 그렇지 않은 경우에는 적용이 어려워지는 단점이 있다. Sill(1983)은 이러한 문제점을 해결하기 위하여 기존의 일차류에 의해 결합되는 자연전위 발생 기구 가운데 전위에 영향을 미치는 온도, 압력 등이 같은 경계조건을 만족하지 못하는 경우 각각의 요소들을 분리하여 일차 전위의 발생원인으로 설정하였고, 온도와 압력을 구분하여 이를 수치적인 방법으로 결합시키는 모델링 방법을 제시하였다. 이는 지하에서 열이나 유체의 흐름과 같은 일차류는 대류 전류(convection current)를 발생시키고, 이러한 대류 전류가 지하의 전기적인 구조와 상호작용을 일으켜 전위를 발생시킨다는 것이다.

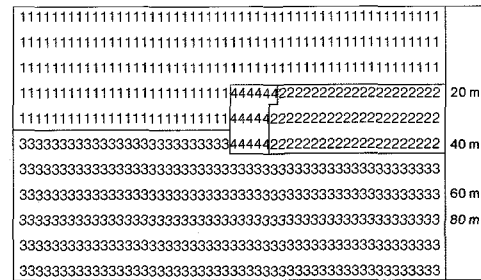
저수지 누수 유형별 자연전위법 적용

제체 양안 접합부를 통한 누수 유형

이 경우는 송성호 등(2001)에 의해 제체 양안 접합부(abut-

ment)를 통한 누수로 보고된 수리시설물에 적용된 사례로서, 개략적인 누수 구간 파악을 위한 쌍극자배열 전기비저항 탐사와 시추공을 이용한 온도검층, 누수유로 파악을 위한 추적자시험, 수리전도도 파악을 위한 순간수위변화시험 등과 정확한 누수 유형 및 누수 유로를 검증하기 위한 방법으로 저수지 담수를 방류하면서 각 시추공에 대한 수위강하량을 측정하였다. 또한 제체 댐마루와 사면에 대한 자연전위법을 적용하여 제체 우측 접합부를 따라 나타나는 강한 음의 이상구간이 하부로 갈수록 증가되는 결과로서 누수유로를 확인하였다.

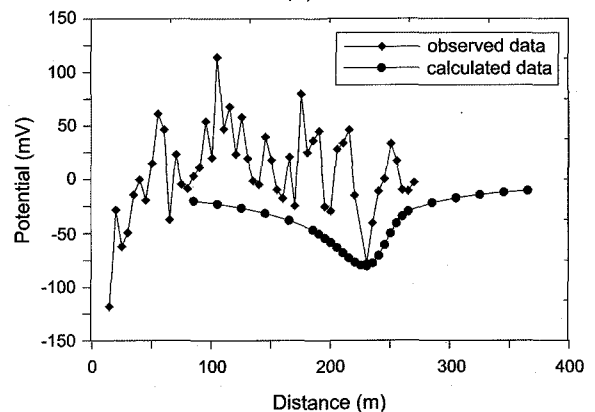
이 연구에서는 이러한 누수 문제의 정량적인 해석을 위하여 자연전위 탐사 결과를 기초로 2차원 모델링을 수행하였다. 입력자료는 송성호 등(2001)의 결과를 기초로 30 m 이하를 전기비저항 1,000 ohm-m인 기반암으로 설정하였고, 저수지 제체 우측 접합부의 경계부에 누수원으로 10 ohm-m, 우측 접합부 풍화암층에 대하여는 500 ohm-m를 적용하였다. 또한 모델에 입력한 누수량은 누수지점에서 현장 측정된 평균 약 164 m³/



(a)

Property code	Permeability (millidarcy)	Coupling coefficient (mV/atm)	Resistivity (ohm-m)
1	0.01	15.0	100.0
2	0.08	15.0	500.0
3	0.001	10.0	1000.0
4	0.01	150.0	10.0
5	0.01	20.0	10.0

(b)



(c)

Fig. 1. Modeling result applied to the pattern of leakage through the abutment. (a) Input data used in modeling for quantitative interpretation. (b) Input model parameter used in 2-D SP forward modeling. (c) Comparing result between observed data and calculated data by 2-D SP forward modeling.

day를 3개의 절점에 대하여 적용하였다. 현장 측정자료와 모델링 결과를 비교하면 전체적으로 음의 이상대의 경향은 일치하고 있으나, 모델링 결과는 최대 이상치를 경계로 완만하게 증가되는 경향이 나타난다(Fig. 1). 이는 수평 2층 구조에서 상부가 결함 지역이고 하부가 상대적으로 결함이 적은 지역에서 누수원이 하부에 존재하는 경우가 상부에 존재하는 경우에 비하여 이상이 작게 나타나는 현상으로(양준모, 2001), 이 경우는 기반암과 제체의 경계에서 수평적으로 물성의 변화가 너무 커서, 수평으로 발달되는 주도적인 흐름이 우세함에 따라 나타나는 것으로 판단된다.

파이핑 형태의 누수 유형

이 누수 유형은 저수지 제체 외측사면에서 파이핑 형태의 누수가 발생한 사례로, (송성호, 2001)에 의해 저수지 댐마루와 사면부에 대하여 쌍극자배열 전기비저항 탐사, 시추조사 및 투수시험, 전기비저항 토모그래피, 전기비저항 탐사 측정과 동일 지점에 대하여 자연전위 탐사를 수행하였다(송성호, 2001). 댐마루에서 실시한 자연전위 탐사 결과 155 m 지점을 전후로 음의 이상이 나타나며, 사면부에서는 160 m 지점으로 연결되어 나타났다. 이러한 결과는 쌍극자배열 전기비저항 탐사에서 얻어진 저비저항 구간과 일치되어 나타나므로, 누수 유로가 댐마루의 155 m 지점과 외제사면부 160 m 지점을 통과한 사선 방향으로 형성되어 있음을 알 수 있다(Fig. 2).

이러한 누수 문제를 정량적으로 해석하기 위하여 심도 5~10 m 사이에 누수원을 설정하여 전기비저항을 50 ohm-m, 결합계수를 100으로 적용하였으며, 모델에 입력한 누수량은 현장에서 측정된 평균 약 52 m³/day를 4개의 절점에 대하여 적용하였다. 현장측정 자료와 모델링을 수행한 결과를 비교한 결과 전체적인 경향은 일치하며, 모델링의 결과 170 m 지점을 중심으로 155 m와 180 m 지점의 이상대가 대칭적으로 나타난다. 이는 제체의 누수 형태가 수평적인 변화보다는 수직적인 물성

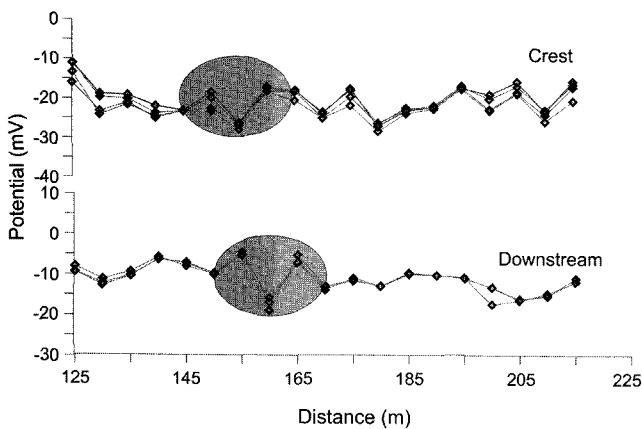
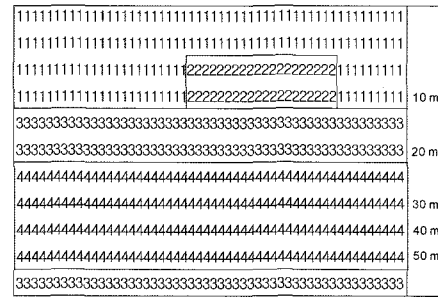


Fig. 2. Result of total field SP using "fixed-base" configuration. Shaded areas indicate negative anomaly points corresponding to the leakage path.



(a)

Property code	Permeability (millidarcy)	Coupling coefficient (mV/atm)	Resistivity (ohm-m)
1	0.01	15.0	150.0
2	0.04	100.0	50.0
3	0.01	15.0	200.0
4	0.001	10.0	1000.0
5	0.04	100.0	50.0

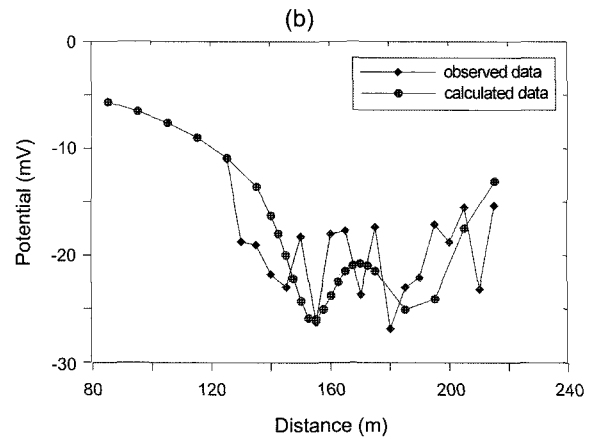


Fig. 3. Modeling result applied to the pattern of leakage by piping through dike. (a) Input data used in modeling for quantitative interpretation. (b) Input model parameter used in 2-D SP forward modeling. (c) Comparing result between observed data and calculated data by 2-D SP forward modeling.

의 변화가 반영되었기 때문으로, 저수지 제체 내의 수직적인 물성 변화가 유동전위 발생에 주도적인 파이핑 형태의 누수로 발생하는 것이 입증된다(Fig. 3).

복합적 요인에 의한 누수 유형

이 누수 유형은 저수지 전체 구간에서 사면의 활동파괴와 다짐불량에 의한 구조물 자체 변위가 복합적으로 나타난 경우로, 송성호(2001)에 의해 댐마루와 사면부에 대한 쌍극자배열 전기비저항 탐사, 시추조사 및 전기비저항 탐사의 측정과 동일한 지점과 사면에 대한 자연전위법이 적용되었다. 자연전위 탐사 결과 제체 우측부의 60~120 m 구간에서 댐마루로부터 하부까지 전반적으로 음의 이상대가 나타남에 따라 이 구간을 통한 누수 유로가 형성된 것으로 판단된다(Fig. 4).

이러한 누수문제에 대한 정량적인 해석을 위하여, 제체 좌측부와 중앙부의 누수원에 대하여 전기비저항 50 ohm-m, 결합계수를 120과 150으로 각각 입력하였으며, 적용한 누수량은

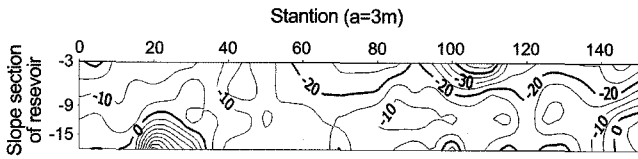
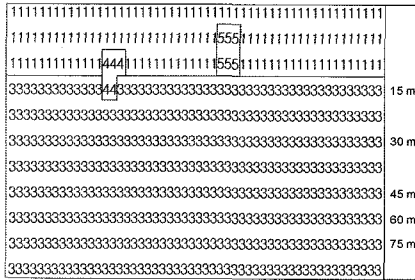


Fig. 4. Interpolated map of self-potential obtained by systematic array of non-polarizable electrodes at crest and slope at Kagog reservoir dike. Strong negative anomaly of SP is seen near surface at the crest and widespread to toe of downstream.

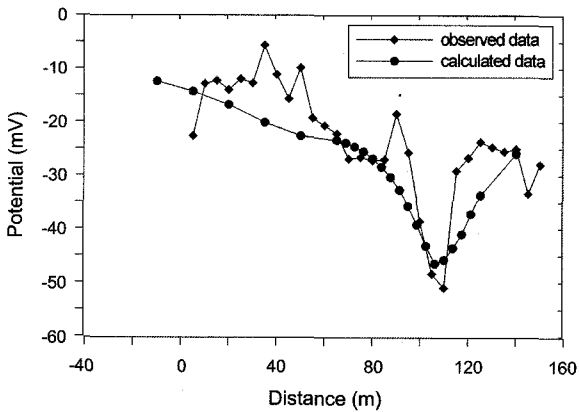
현장에서 측정된 값으로 각각 약 $10 \text{ m}^3/\text{day}$ 와 약 $70 \text{ m}^3/\text{day}$ 를 3개의 절점에 적용하였다. 현장측정 자료와 모델링을 수행한 결과 전체적인 경향은 일치하며, 모델링의 결과 100~120 m 구간에서 날카로운 음의 이상대가 나타난다(Fig. 5). 이는 제체 내의 물성의 수평적인 변화가 주도적이어서 지하 10 m 부근에 수평적으로 상당히 다른 구조가 존재할 가능성이 있음을 나타



(a)

Property code	Permeability (millidarcy)	Coupling coefficient (mV/atm)	Resistivity (ohm-m)
1	0.01	15.0	300.0
2	0.01	50.0	200.0
3	0.001	10.0	1000.0
4	0.1	120.0	50.0
5	0.3	150.0	50.0

(b)



(c)

Fig. 5. Modeling result applied to the pattern of leakage due to the composite effects of landslide and distortion of the dike. (a) Input data used in modeling for quantitative interpretation. (b) Input model parameter used in 2-D SP forward modeling. (c) Comparing result between observed data and calculated data by 2-D SP forward modeling.

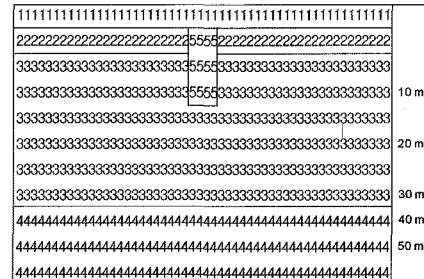
내며, 이 저수지의 사면 활동과괴로 인하여 중심점토 유실 등의 문제 발생과도 관련이 있는 것으로 판단된다.

방조제 누수 구간에 대한 자연전위법 적용

방조제에 대한 자연전위법의 적용은 송성호 등(2000)이 제시한 두 곳의 연구 결과에 대하여 시추자료를 추가하여 만조시에 방조제 내측부로 해수가 유입되는 지점에 대하여 적용하였다.

영산강 하구둑

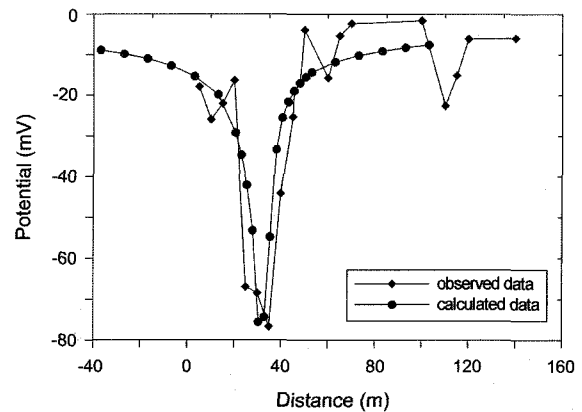
이 하구둑에 대한 수치모델링을 위하여 시추조사 결과를 토대로 제체를 5 종류의 매질로 설정하였고, 현장조사에서 얻어진 결과를 기초로 모델구역 중앙부 2.5~10 m 사이에 누수원을 위치시켰다. 또한 단극배열 전기비저항 탐사에서 얻어진 비저항값으로 10 ohm-m, 결합계수를 150로 입력하였다. 영산강 하



(a)

Property code	Permeability (millidarcy)	Coupling coefficient (mV/atm)	Resistivity (ohm-m)
1	0.01	15.0	200.0
2	0.1	30.0	100.0
3	0.01	30.0	50.0
4	0.0001	10.0	1000.0
5	0.01	150.0	10.0

(b)



(c)

Fig. 6. Modeling result applied to the pattern of seawater leakage at Youngsan estuary dam. (a) Input data used in modeling for quantitative interpretation. (b) Input model parameter used in 2-D SP forward modeling. (c) Comparing result between observed data and calculated data by 2-D SP forward modeling.

구둑은 국가지정 방조제로서 축조 후 체계적인 관리로 상대적 인 해수의 유입이 적어 모델에 적용한 누수량은 2개의 절점에 대하여 평균 약 40 m³/day로 적용하였다. 현장측정 자료와 모델링을 수행한 결과를 비교하면 두 결과가 매우 잘 일치하며, 30 m 지점을 중심으로 대칭적으로 나타난다(Fig. 6). 이는 하구둑의 특성상 수평적인 물성 변화보다는 수직적인 물성 변화가 우세하기 때문에 발생된다고 판단된다.

어은 방조제

해수 유입 구간에 대한 모델링을 위하여 방조제 제체는 시추조사 결과에 따라 5 종류의 매질로 설정하였고, 현장조사에서 얻어진 결과를 기초로 모델구역의 중앙부 4~12 m 사이에 누수원을 위치시켰다. 또한 단극배열 전기비저항 탐사에서 얻어진 비저항값으로 2 ohm-m, 결합계수를 180으로 입력하였으며, 조석에 의한 해수유입의 영향으로 누수량 적용은 3개의 절

점에 대하여 평균 약 130 m³/day로 적용하였다. 현장측정 자료와 모델링을 수행한 결과를 비교하면 두 결과가 일치하는 것으로 나타났으며, 누수원 부근에서는 현장 측정값이 더욱 날카롭게 나타난다(Fig. 7). 이는 모델에서 가정한 누수원의 영역이 더욱 강력하고 복잡하게 나타남을 의미하며, 이러한 경우는 전체적인 형태에 대한 누수원을 추정하는 것이 필요하다.

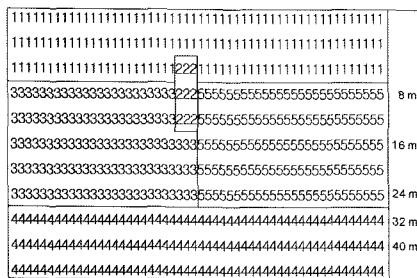
결 론

자연전위법은 기존의 물리탐사법 중 신호대 잡음 비가 매우 작은 반면 자료의 측정이 매우 간편한 방법으로, 체계의 물리적 성질이 균질한 저수지의 경우 유동전위를 이용한 자연전위법이 누수유형별로 적용성이 높음을 확인하였다. 방조제의 경우는 장기 모니터링으로 누수 구간에서 시간에 따른 자연전위 변화와 조위 변화가 일치되는 결과를 이용하면 누수 지점의 탐지와 더불어 누수 추세를 밝히는데 효과적인 것으로 밝혀졌다. 이러한 자연전위법의 정량적 해석을 위하여 Sill(1983)이 개발한 자연전위 모델링 코드를 변형 개선시켜 누수 모델에 적용한 결과 야외 탐사자료와 매우 유사한 자연전위 이상곡선을 얻을 수 있었다.

따라서 저수지에서는 누수 유형별로 얻어진 자연전위값을 이용하여 자연전위 모델링을 수행하는 경우 누수구간 및 누수 유로에 대한 효과적인 규명이 가능하며, 방조제의 경우는 자연전위 모니터링 결과를 조석변화와 대비하여 누수 지점과 누수 추세를 밝히고 자연전위 모델링을 수행하는 경우 해수 유입에 의한 자연전위 이상이 잘 재현됨을 확인하였다.

참고문헌

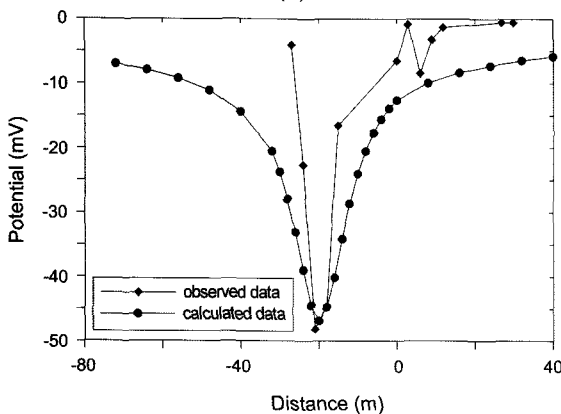
농업기반공사, 2001, 농업기반시설안전진단 종합보고서.
 송성호, 이규상, 김진호, 권병두, 2000, 방조제 누수지점 탐지를 위한 SP 및 단극배열 전기비저항탐사의 적용: 자원환경지질, **33**, 417-424.
 송성호, 2001, 자연전위법을 이용한 수리시설물 누수 탐지: 교육학박사학위논문, 서울대학교.
 송성호, 권병두, 최종학, 김경만, 2001, 저수지 누수문제에 대한 수리지질 및 지구물리 방법의 적용: 한국자원공학회지, **38**, 292-300.
 양준모, 2001, 수리시설물의 SP발생 메커니즘 규명 및 해석 알고리즘 개발 연구: 교육학석사학위논문, 서울대학교.
 Meiser, P., 1962, A method for quantitative interpretation of self-potential measurements: *Geophys. Prosp.*, **10**, 203-218.
 Nourbehecht, B., 1963, Irreversible thermodynamic effects inhomogeneous media and their application in certain geoelectric problems: Ph.D. thesis, *M.I.T.*, Cambridge.
 Sill, W. R., 1983, Self-potential modeling from primary flow: *Geophysics*, **48**, 76-86.



(a)

Property code	Permeability (millidarcy)	Coupling coefficient (mV/atm)	Resistivity (ohm-m)
1	0.001	15.0	50.0
2	0.15	180.0	2.0
3	0.1	30.0	50.0
4	0.001	20.0	1000.0
5	0.1	30.0	30.0

(b)



(c)

Fig. 7. Modeling result applied to the pattern of seawater leakage at Eoeun embankment. (a) Input data used in modeling for quantitative interpretation. (b) Input model parameter used in 2-D SP forward modeling. (c) Comparing result between observed data and calculated data by 2-D SP forward modeling.