

전기, 전자탐사법을 이용한 간척개발 사업지구 내 방조제 안전점검

Safety Inspection of Sea Dike in Reclamation Project Area Using Electrical and Electromagnetic Survey

송 성 호* 성 백 옥** 김 영 규***
Song, Sung-Ho · Seong, Baek Uk · Kim, Young-Gyu

Abstract

We applied electrical resistivity survey using modified pole-pole array and small-loop electromagnetic survey to delineate the zone of seawater inflow through a tide embankment. The tide embankment is generally affected by tidal variation and has low resistivity characteristic due to the high saturation of seawater. For this reason, the electrical resistivity survey using modified pole-pole array, which is relatively more effective to the conductive media, was carried out to detect the inflow zone of seawater and small-loop electromagnetic survey using multi-frequency with 300 to 20,010 Hz was conducted. As a result of both electrical resistivity survey using modified pole-pole array and small-loop electromagnetic survey, these survey methods are found to be quite effective for investigation of seawater inflow zone in the sea dike.

I. 서 론

최근 들어 자연재해로 인한 수리시설물의 붕괴 또는 누수로 재산상의 손해와 함께 인명피해가 발생하는 경우가 증가하는데, 이러한 문제의 근원은 자연재해와 더불어 수리시설물 축조

이전뿐만 아니라 축조 후의 관리부실도 중요한 문제점으로 지적되고 있다. 대부분의 수리시설물들은 축조 후 시간이 경과함에 따라 하중의 작용, 시설물의 구조변경 및 주변 환경의 여건 변화 등으로 구조가 취약해지거나 성능이 저하되어 안정성에 문제가 발생하므로 지속적인 안정

* 한국농촌공사 농어촌연구원 책임연구원(shsong@ekr.or.kr)

** 한국농촌공사 농어촌연구원(seongbaekuk@hanmail.net)

*** 한국농촌공사 농어촌연구원(311kyg@hanmail.net)

키워드 : 방조제, 해수유입, 변형된 단극배열
전기비저항탐사, 소형루프 전자탐사

평가와 관련된 체계적인 조사가 필요하지만, 우리나라의 경우 정밀안전진단은 1990년 이후에 정기적으로 시행되고 있는 실정이다³⁾.

우리나라에 분포하는 수리시설물 중 방조제는 총 1,654개소로, 이 중 약 90%인 1,546개소가 1980년대 이전에 준공되었으며, 약 82%가 조석의 영향이 큰 서해와 남해에 분포하고 있다³⁾. 이러한 분포에 따라 만조 시 방조제 제체를 통한 해수의 유입 가능성이 상존하고 있기 때문에, 지속적이고 체계적인 조사가 필수적이다. 최근 들어 방조제 제체를 통한 해수유입 방지를 위하여 시트파일 시공 또는 시멘트 그라우팅 등이 수행되고 있으나 이 경우에도 시공 효과에 대한 검증 작업에 어려움이 있어 시공 이전 단계에서 해수유입 구간의 정확한 위치 및 유입경로 등을 파악하고, 시공 이후에 동일지점에 대한 확인 작업이 필요하다.

본 연구는 간척개발을 위한 사업지구 내의 방조제 내측부의 성토 다짐구간에 대한 안전점검을 목적으로 소형루프 전자탐사의 향후 적용성을 확인하기 위하여 탐사를 실시하였으며, 이 중 일부구간에 대하여는 소형루프 전자탐사의 정확성을 검증하기 위하여 변형된 단극배열(modified pole-pole array) 전기비저항 탐사를 병행하였다.

II. 탐사개요

1. 소형루프 전자탐사

소형루프 전자 탐사는 지표 또는 시추공 내에서 전기장 또는 자기장을 측정하여 지하 지질구조의 위치, 크기 및 물리적 성질 등에 대한 정보를 밝혀내는 물리탐사 기법이다.

전자 탐사의 방식은 송신 코일에 교류 전류를

흘려주면 Ampere 법칙에 의해 자기장(1차장, primary field)이 발생하며, 이러한 자기장이 지하매질 또는 이상대를 통과하면서 지하매질 또는 이상대 내부에서 유도전류(induction current)를 발생시키게 된다. 이상대 내부에서 발생된 유도전류는 2차 자기장 및 전기장(secondary field)을 발생시키며, 전자 탐사에서는 2차장을 수신기에서 측정하고, 이를 해석하여 지하의 전기전도도 분포를 규명하는 방법을 이용한다(Fig. 1).

만약 지하에 이상체가 존재하는 경우 유도전류는 전자기 유도에 의해 이상체 내부에 발생하는 맴돌이 전류(vortex current) 및 이상체와 주변 매질이 전기적으로 접촉됨으로써 존재하는 전도 전류(conduction current)가 복합된 산란 전류(scattering current)로 나타나게 되며, 이것은 적용 주파수, 이상체의 형상 및 전도도 차이에 따라 복잡한 양상이 나타나 전자 탐사의 정확한 모델링 및 해석을 상대적으로 어렵게 하는 요인이 된다. 그러나 지하에 유도되는 유도전류의 크기는 지하 매질의 전기전도도의 변화에 의해 크게 영향을 받기 때문에 연구대상인

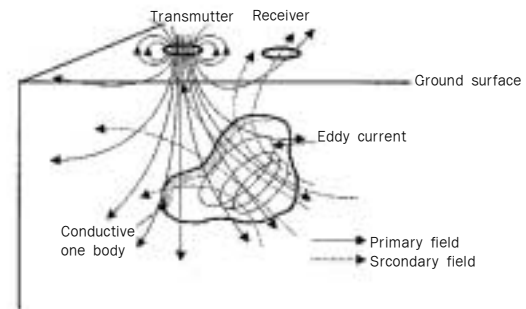


Fig. 1. Schematic diagram of electromagnetic survey

방조제의 경우 내부 성토층의 전기전도도가 높기 때문에 단면의 이상구간을 탐지하는데 상대적으로 유리하다.

전자탐사 방법은 송수신기 배치 및 운용방식, 시간 및 주파수 이용 등 다양한 방법이 있지만, 최근 국내외에서 가장 많이 사용되는 방식은 송수신기 고정방식의 주파수 영역(frequency domain) 전자 탐사 방법이다. 현장에서 사용된 탐사 방법은 일정 주파수를 갖는 교류전류를 코일 등의 송신원에 공급하여 1차장을 생성시킨 후 이로 인해 발생하는 이상체에서의 2차 자기장을 수신기에서 측정하여 지하의 수리지질 구조를 해석하는 방법으로, 특정 주파수를 사용하므로 필터링 기법을 통해 신호대 잡음비를 높일 수 있는 장점이 있다.

전자기파는 사용 주파수 및 지하 매질의 전기비저항 값에 따라 침투할 수 있는 침투심도 또는 표피심도(skin depth)가 달라지며, 이는 아래 식 (1)과 같다. 이때 ρ 는 전기비저항(ohm-m), f 는 사용 주파수 (Hz)이다.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \approx 500 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \text{ (m)} \quad (1)$$

위 식에 의하면 전기전도도가 일정하다고 가정하는 경우 주파수가 높아짐에 따라 침투심도가 작아지며, 이와 반대로 주파수가 낮아지면 침투심도가 커지는 것을 알 수 있다. 이러한 원리로부터 고주파수의 자료는 천부의 정보를, 저주파수의 자료는 심부의 정보를 나타낼 수 있으며, 이번 연구에서 이용된 장비와 같이 광대역의 주파수를 이용하는 경우는 지하의 심도별 전기전도도의 변화에 대한 정보를 얻어낼 수 있다. 현장 조사에서 사용된 GEM-2는 330 ~ 20,010 Hz 사이의 상대적으로 광대역의 주파수

대역을 사용하지만 탐사의 편의를 위하여 송수신기 사이의 거리가 1.66 m로 고정되어 있어, 가탐심도가 10 m 이내의 천부에 한정되는 제한이 있지만 10 개 내외의 다수의 주파수를 사용하므로, 고분해능의 영상을 제공하여 주는 특징이 있다⁵⁾(Fig. 2).

탐사에서 얻어지는 자료는 2차장의 동상 성분(in phase) 및 이상 성분(out of phase: quadrature)을 1차장에 대한 ppm 단위 및 겹보기 전기전도도의 형태로 출력한다. 이러한 겹보기 전기전도도는 측정되는 지하하부에 존재하는 모든 이상체에 대한 영향이 반영되어 나타나는 값으로, 지하 매질의 실질적인 전기전도도를 의미하지 않지만 계산이 간편하여 지하 구조의 변화나 이상체의 존재 유무를 손쉽게 확인할 수 있다는 장점이 있다. 이때 이상체의 위치나 정확한 전기전도도의 분포를 알아내기 위해서는 적절한 자료처리 및 역산법의 적용이 필수적이다.

본 연구에서 전자탐사는 전체 735 m 구간을 4개 구간(51+00~55+00, 55+00~59+00, 59+00~63+00, 63+00~65+35)으로 구분하여 기존에 실시한 그라우팅 시공선을 기준으로 해측과 내측을 10 m 간격으로 평행하게 매 2 m 씩 탐사하였다.

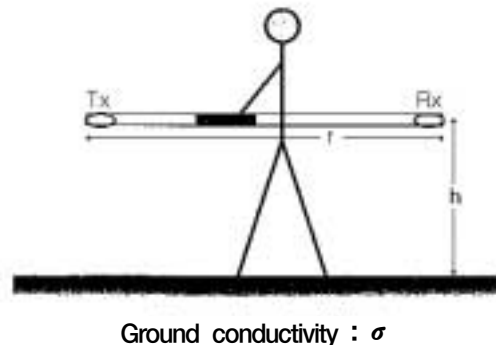


Fig. 2. GEM-2 in a horizontal coplanar coils configuration (after Won et al., 1996)

2. 전기비저항 탐사

전기비저항 탐사는 지반을 구성하고 있는 물질의 전기적인 물성의 차이에 의해 나타나는 반응을 지표 또는 시추공을 이용한 토모그래피 등의 기법을 이용하여 지하구조를 영상화하는 탐사법으로, 우리나라에서 가장 많이 이용되는 물리탐사법 중의 하나이다. 이 탐사법은 과거에는 지층의 층서구조 및 수평적인 구조 파악을 위하여 수직탐사 및 수평탐사법이 주로 이용되어 왔으나, 최근 전산기술의 발달에 따라 지표에서의 전극배열에 의한 2차원의 공간적인 단면을 획득하기 위한 2차원 탐사법의 이용이 일반화되고 있는 추세이다.

2차원 전기비저항 탐사에 사용 가능한 배열법 중 수직적인 구조를 밝히기 위한 경우에는 단극, 단극-쌍극자 및 쌍극자 배열이 적합한 것으로 제시하였으며, 특히 쌍극자 배열법의 분해능이 가장 높은 것으로 알려져 있다. 그러나 실제 현장에서 전기비저항 탐사를 수행하는 경우 측정되는 전위는 지반의 전기적인 반응과 잡음이 합쳐진 형태로 측정된다. 따라서 잡음이 일정하다고 가정하면 측정전위가 낮아짐에 따라 측정자료의 신호대 잡음비가 상대적으로 낮아진다. 따라서 지반의 전기전도도가 증가할수록 측정전위가 감소하므로 신호대 잡음비가 낮아지게 된다. 그러므로 동일한 지반 상태를 가정할 때 전극배열 차이에 따라 측정되는 전위차가 달라지므로, 측정 전위차를 높이는 방법을 이용하는

경우 신호대 잡음비가 커지므로 상대적으로 탐사 결과를 얻는데 유리하다.

이번 현장과 같은 방조제의 경우는 해안지역에 위치하므로 제체 구성물질의 전기전도도가 높기 때문에 기존의 쌍극자 배열법을 이용하는 경우 전극전개수가 증가함에 따라 측정값이 매우 작아지므로, 신호대 잡음비가 매우 낮아 적용이 불가능한 방법이다. 이에 비해 단극배열은 신호대 잡음비가 높기 때문에 적용성이 높지만, 원거리 접지를 이용하여야 하므로 불편한 배열법이다⁸⁾. 이에 따라 본 연구에서는 원거리 접지를 측선 양쪽 끝의 전극을 이용하는 변형된 단극배열을 이용함으로써, 이러한 문제를 극복하여 양질의 탐사 자료를 획득하였다(Fig. 3).

본 연구에서는 현재 육안으로 누수가 관찰되어 정밀 탐사를 요청한 두 구간(51+30~53+10, 56+30~60+00)을 포함시키기 위하여, 기존 그라우팅 실시 구간을 포함한 두 구간(50+45~55+10, 55+30~61+15)에 대하여 탐사하였다.

III. 탐사결과

1. 조사위치

연구대상 지역은 충청남도 소재 ○○방조제로서 2002년에 정기안전진단의 일환으로 전기비저항탐사와 시추조사가 수행되었지만²⁰⁾, 본 연구에서는 당시에 조사되지 않았던 구간에 대하여 물리탐사를 수행하였다(Fig. 4).

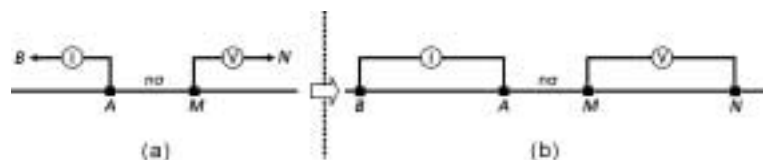


Fig. 3. Schematic comparison diagram of surface electrical resistivity survey between conventional (a) and modified pole-pole array (b)

2. 탐사결과

가. 51+00~55+00 구간

이 구간에서는 해측과 내측의 두 측선을 10 m 간격으로 평행하게 각 측선별로 2 m 간격으로 전자 탐사를 실시하였으며, 탐사방식은 탐사장비와 측선이 평행한 동일면(in-line)배열 방식을 사용하였다. 탐사결과는 동상성분과 이상성분 중 이상성분을 대상으로 4개 층으로 가정하여 10개의 주파수를 대상으로 Marquardt's damped least square 방식의 1차원 역산을 수행하였으며, 역산 결과는 2차원 단면도 작성을 위한 kriging의 입력 자료로 활용하여 측선 단면도를 작성하였다.

이 측선의 전자탐사 결과는 Fig. 5에서 나타난 바와 같이 해측측선의 51+10~51+25 구간의 -5 m 이하 깊이에서 상대적으로 1 ohm-m 이하의 저비저항 구간으로 나타나는데, 이때의 전기비저항은 전기전도도의 역수로서 비저항이 낮아질수록 해수에 의한 포화 영향이 큰 것을 의미한다. 또한 내측측선의 51+15~52+10 구간

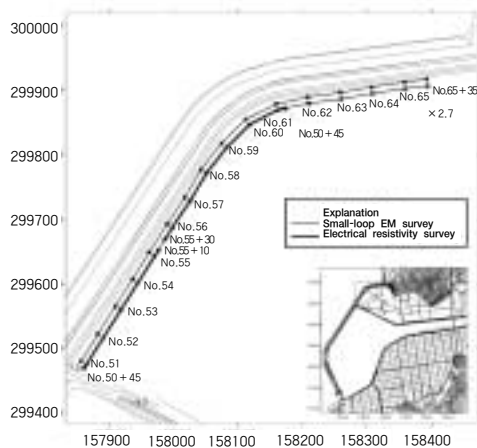


Fig. 4. Location map of electromagnetic and electrical resistivity survey

과 52+25~54+20 구간은 약 5 m 깊이에서 1 ohm-m 이하의 비저항대가 나타나므로 해측측선의 51+10~51+25 하부 구간의 비저항대와 연속성을 가지고 나타난다. 따라서 해수의 유입은 해측측선의 51+10~51+25 구간으로 통해 내측 구간 전체로 확산되는 것으로 판단된다.

Fig. 6은 내측측선의 51+00~55+10 구간에 대한 전기비저항 탐사 2차원 역산 결과로 전체적으로 성토재로 다짐된 지표부근에서는 전기비저항이 높지만, 깊이 약 5 m 이하 구간 전체적으로 1 ohm-m 이하의 이상구간이 나타나므로 해수에 의한 침투현상이 의심된다. 이 결과는 앞서의 동일한 측선에 대한 전자탐사의 결과와 일치됨에 따라 전체구간에 대한 보강이 필요한 것으로 나타났다.

나. 55+00~59+00 구간

이 구간에 대한 전자탐사 결과 해측측선에 대한 결과는 56+10~56+30구간, 57+00구간, 58+00~59+00구간에서 1 ohm-m 이하의 낮은 비저항대가 나타나며, 내측측선에서도 해측측선의 결과와 거의 일치됨에 따라 56+10~56+30구간, 57+00구간, 58+00~59+00구간을 통한 해수의 유입이 예측된다(Fig. 7).

Fig. 8은 55+30~61+00 구간에 대한 전기비저항 탐사 결과로 앞선 구간과 마찬가지로, 깊이 약 5m 이하 구간 전체적으로 1 ohm-m 이하의 이상구간이 나타나므로 탐사구간 전체적으로 해수에 의한 침투현상이 의심된다.

다. 59+00~63+00 구간

Fig. 9는 이 구간의 전자 탐사 결과로 해측과 내측 모든 구간에서 심도 -5 m 이하에서 전체적으로 약 1 ohm-m 이상의 매우 낮은 비저항 값이 나타남에 따라 앞선 55+00~59+00 구간

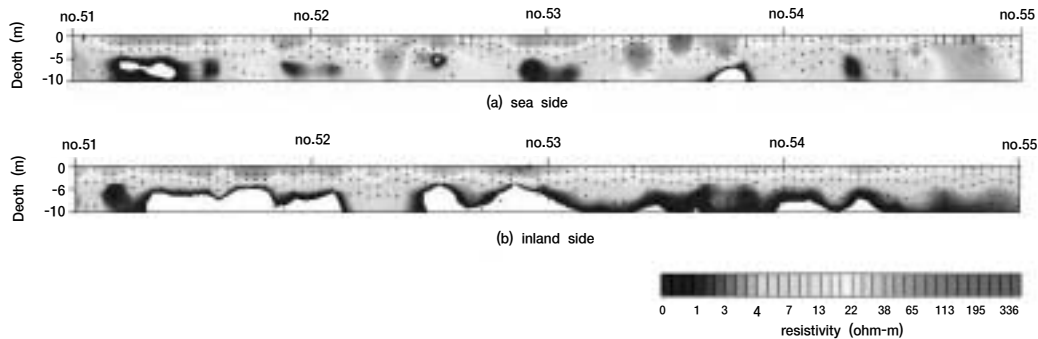


Fig. 5. Inversion results of electromagnetic survey for the section between No.51+00 and No.55+00 (a) seaside, (b) inland side

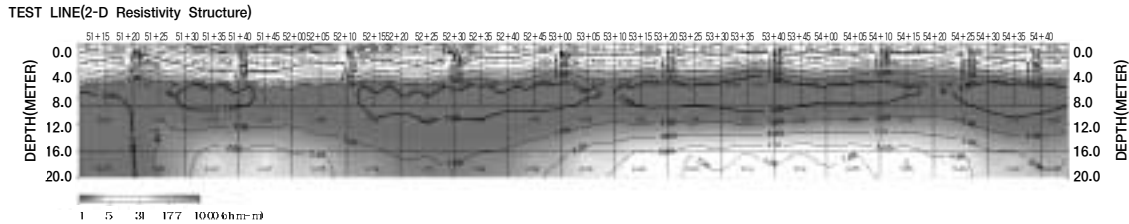


Fig. 6. Inversion result of electrical resistivity survey using modified pole-pole array for the section between No.51+00 and No.55+10

에서 나타나는 해수침투 영향이 연장되는 것으로 판단된다. 이 결과는 Fig. 8의 전기비저항 탐사 결과와 일치되므로 탐사구간 전체적으로 해수에 의한 침투현상이 의심된다.

라. 63+00~65+35 구간

본 구간은 방조제의 종료지점 부근으로 전자탐사 결과 내측측선의 63+00~64+00구간에서 1 ohm-m 이하의 저비저항 구간이 나타나는데, 이는 60+00~62+00 구간을 통해 유입된 해수침투의 영향으로 판단되며, 64+00 이후 구간의 경우는 원지반의 영향으로 안전한 것으로 나타났다(Fig 10).

IV. 토의 및 결과

본 방조제에 대한 정기안전진단 보고서²⁾에

의하면 외측 해수의 전기비저항은 0.213 ohm-m(25℃ 기준)으로 제시되어 있으며, 매질의 공극이 해수로 포화되어 있는 것으로 가정하면 아래와 같은 Archie(1942)의 경험식으로부터 제체의 전기비저항을 계산할 수 있다⁴⁾.

$$\rho_0 = \alpha \psi^m \rho_w \dots\dots\dots (2)$$

여기서, ρ_0 는 제체의 전기비저항(ohm-m), ψ 는 제체의 공극율, ρ_w 는 공극수의 전기비저항이다. 또한 α 는 실험상수로서 0.6~3.5, m 은 고결계수로 1.4~2.2로 알려져 있다. 많은 실험결과에 의하면 공극수의 전기비저항이 해수보다 낮은 경우에는 Archie의 경험식이 일반적으로 적용되고 있다.

정기안전진단 시 토질시험에서 구한 성토재,

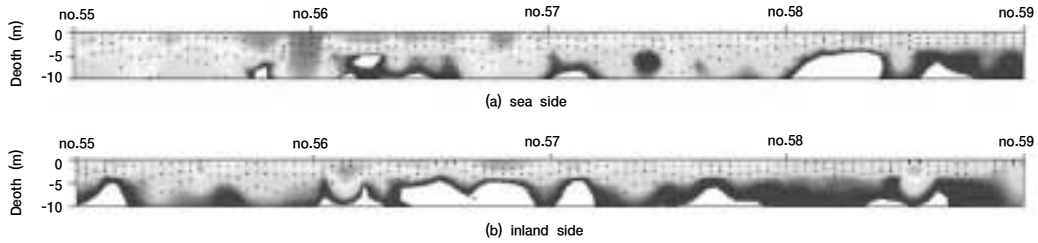


Fig. 7. Inversion results of electromagnetic survey for the section between No.55+00 and No.59+00 (a) seaside, (b) inland side

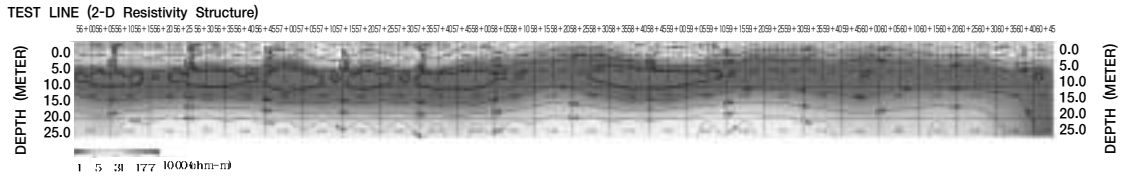


Fig. 8. Inversion result of electrical resistivity survey using modified pole-pole array for the section between No.55+30 and No.61+00

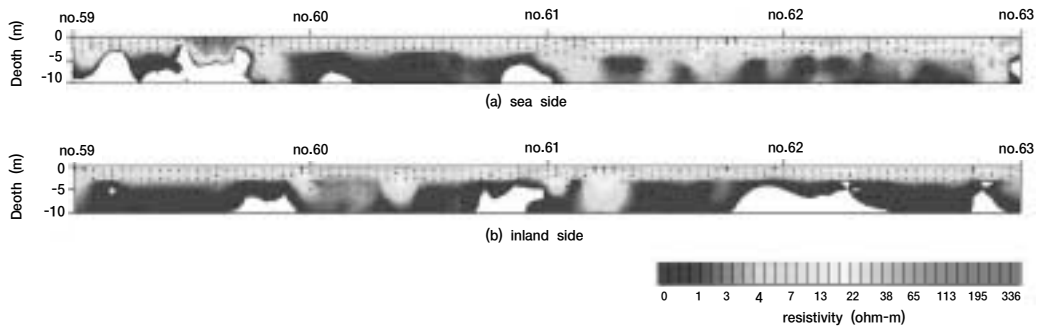


Fig. 9. Inversion results of electromagnetic survey for the section between No.59+00 and No.63+00 (a) seaside, (b) inland side

모래질 및 실트질의 공극율 평균값인 44%를 기초로 식(2)를 이용하여 제체의 매질이 해수에 포화되어 있는 경우를 계산하면, 실험상수와 고결계수에 의해 일정하지는 않지만 1.33~2.78 ohm-m 범위의 결과가 얻어진다. 따라서 본 방조제의 경우 3 ohm-m 이하의 전기비저항이 나타나는 경우는 해수의 유입이 있는 것으로 판단된다.

이러한 결과를 기초로 앞서의 소형루프 전자탐사와 변형된 단극배열 전기비저항탐사 결과를 종합하면, 다음과 같은 결론을 추정할 수 있다. 소형루프 전자탐사 결과 해측측선의 51+10~51+25, 56+10~56+30, 57+00, 58+00~63+00 구간을 통해 광범위하게 해수유입 현상이 나타나는 것으로 판단되며, 내측측선의 전체

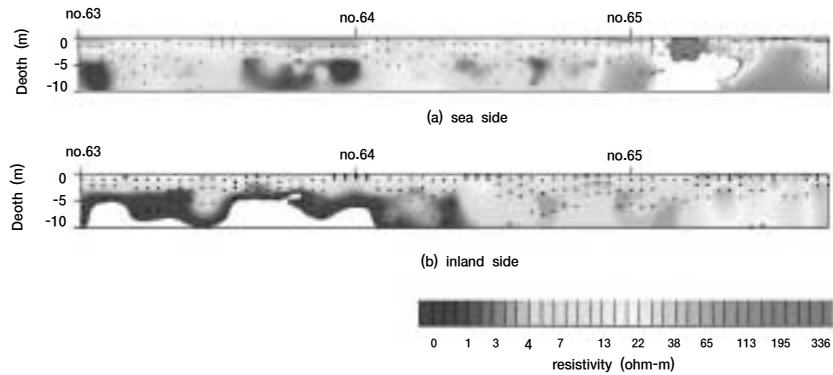


Fig. 10. Inversion results of electromagnetic survey for the section between No.63+00 and No.65+35 (a) seaside, (b) inland side

구간에 영향을 주는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 기초로 51+00~55+10구간과 55+30~61+00구간에 대해 수행한 변형된 단극배열을 이용한 2차원 전기비저항 탐사 결과 지표 하 15~20 m 심도까지 전체적으로 3 ohm-m 이하의 전기비저항 값이 나타남에 따라 해수유입이 광범위하게 나타나는 것으로 판단된다. 따라서 이 지역의 원지반 심도가 지표 하 약 12~16 m 범위에 해당하므로 해수유입 심도는 원지반 경계까지 해당됨을 알 수 있다.

V. 결론

본 연구에서는 방조제를 통한 해수유입 구간 및 심도를 결정하기 위하여 소형루프 전자탐사와 변형된 단극배열법을 이용한 전기비저항탐사를 복합적으로 적용하였다. 방조제의 경우 하부 구성물질이 해수에 의해 포화되어 있고, 조석 변화에 직접 영향을 받기 때문에, 전기비저항 탐사는 신호대 잡음비가 높은 변형된 단극배열법을 이용하였으며, 소형루프 전자탐사는 300~20,010 Hz 주파수 대역을 이용하였다. 현장 적용 결과 두 가지 탐사법은 충분한 현장

적용성이 있음을 확인하였으며, 특히 각 방조제 별로 토질시험 결과로 얻어진 전기비저항값과 탐사자료 역산결과 얻어진 전기비저항을 복합적으로 해석하는 경우 정량적인 해석이 가능함을 확인하였다.

참고문헌

1. 김정호, 이명중, 송운호, 정승환, 2001, 2차원 전기비저항 탐사를 위한 변형된 단극배열법에 관한 연구, 물리탐사, 4, pp.59-69.
2. 농업기반공사, 2002, ○○지구 간척개발사업 ○○방조제 정기안전점검 보고서.
3. 송성호, 이규상, 김진호, 권병두, 2000, 방조제 누수 지점 탐지를 위한 SP 및 단극배열 전기비저항탐사의 적용, 자원환경지질, 33, pp.417-424.
4. Archie, G.E., 1942, The electrical resistivity log as an aid in determining source reservoir characteristics, AIME Tech, 146, pp.54-62.
5. Won, J.J., Keiswetter, D.A., Fields, G.R.A., and Sutton, L.C., 1996, GEM-2: A New Multifrequency Electromagnetic Sensor: Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 1, pp.129-137.

본 연구는 농업기반시설 안전진단사업비 지원으로 수행된 「방조제의 안전진단 및 해수 침투 방지 조사」 연구 결과의 일부임.