

물리탐사 결과 복합해석을 통한 방조제 제체 정밀안전진단 사례

송성호¹⁾, 성백욱²⁾, 김영규²⁾, 강미경²⁾, 이규상²⁾, 김양빈²⁾

¹⁾한국농촌공사 농어촌연구원, shsong84@hanmail.net

²⁾한국농촌공사 농어촌연구원

Case History for Safe Diagnosis of Embankment Dike using Composite Analysis of Various Geophysical surveys

Sung-Ho Song¹⁾, Baekuk Seong²⁾, Young-Gyu Kim²⁾, Mi-Kyung Kang²⁾,
Gyu-Sang Lee²⁾, Yang-Bin Kim²⁾

¹⁾Rural Research Institute, KRC

²⁾Rural Research Institute, KRC

Abstract: To establish the reinforce region and technique through the embankment dike after identifying the region of seawater inflow, we carried out small-loop electromagnetic (EM) survey, electrical resistivity survey and refraction seismic method. We also analyzed the distribution of electrical conductivity in reservoir with depth every two month and monitored water level variations with tidal variation in four observation wells located at seaside and reservoir side in order to analyze the relationship with survey results. From both the cross-correlation between tidal and water level variation at four wells and the distribution of electrical conductivity in reservoir with depth, the major portion of seawater inflow are identified through the embankment dike. From electromagnetic and electrical resistivity survey results, it was found that the seawater inflow were happened through several small regions at seaside and became wider near reservoir side. The 2-D inversion sections of refraction seismic method showed that the pebble-bearing sand layer is spread over the whole region with two to four width. From the this study, small-loop EM, electrical resistivity and refraction seismic surveys accompany with the distribution of electrical conductivity in reservoir with depth and the monitoring results for water level variations are revealed to be effective to identify seawater inflow pathway through embankment dike and to establish the reinforce region and technique through the embankment dike.

Keywords: embankment dike, small-loop electromagnetic survey, electrical resistivity survey, refraction seismic method, seawater inflow

1. 서론

방조제 제체를 통한 해수유입 예상구간 및 범위 확인과 더불어 향후 보강공사 구간

과 보강기법 수립을 위하여, 본 연구에서는 소형루프 전자탐사, 전기비저항 탐사 및 굴절법 탄성파탐사를 복합적으로 수행하였다. 물리탐사 이전 단계로 내측 담수호 9개 지점에서 2개월 간격으로 심도별 전기전도도를 측정하여, 방조제 전체 구간에 대한 해수유입 구간을 추정하였다. 또한 제체 내 4곳의 수위관측공을 대상으로 조위변화에 따른 수위변화를 측정하였으며, 측정된 수위 변화는 인근의 조위관측소의 조위 변화와 상관성을 분석하여, 방조제 제체의 수리지질학적 특성을 파악하였다. 이러한 방조제 제체 누수탐지를 위하여 제체의 수리지질 특성 파악을 근거로 물리탐사 결과를 검증하는 접근방식은 송성호 등(2007)에 의해 기 제시된 바 있다. 본 조사에서 이용한 소형루프 전자탐사는 광대역 이동 송수신 방식을 이용한 GEM-2를 이용하였으며, 전기비저항탐사는 변형된 단극배열(modified pole-pole array) 방법으로 Sting R1과 Swift system을 이용하여 측정하였다. 굴절법 탄성파탐사는 제체 하부의 지반특성 파악을 위하여 SmartSeis 24ch 장비를 이용하였다.

2. 탐사기법

2.1. 소형루프 전자탐사

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) 전자탐사법이다. 본 연구에서 이용된 GEM-2 장비는 330 ~ 20,010Hz 사이의 상대적으로 광대역의 주파수 대역을 사용하며, 탐사 결과는 2차장의 동상성분(in-phase)과 이상성분(out-of-phase)을 1차장에 대한 ppm 단위로 출력한다. 이러한 결과는 푸리에 변화를 이용한 고주파수 차단 필터(high-cut filtering)로 제거한 후, 겐보기 비저항 및 1차원 역산을 수행하여 지표 하부의 심도별 전기전도도 분포를 알아낸다. 그러나 본 장비는 탐사의 편의를 위해 송수신기 사이의 거리가 1.66 m로 고정되어 있어, 가탐심도가 10 m 이내의 천부에 한정되는 제한이 있다 (Won *et al.*, 1996).

2.2. 전기비저항탐사

일반적으로 2차원 전기비저항 탐사에 사용 가능한 배열법 중 수직적인 구조를 밝히기 위한 경우는 단극, 단극-쌍극자 및 쌍극자 배열이 적합하며, 이 중에서도 특히 쌍극자 배열법의 분해능이 가장 높은 것으로 알려져 있다. 그러나 지반의 전기전도도가 증가할수록 측정전위가 감소하여 신호대 잡음비가 낮아지므로, 측정 전위차를 높이는 방법을 이용하는 경우 상대적으로 탐사 결과를 얻는데 유리하다. 방조제의 경우는 해안지역에 위치하므로 제체 구성물질의 전기전도도가 높다. 따라서 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 배열법이다(김정호 외, 2001). 이에 따라 본 연구에서는 원거리 접지를 측선 양쪽 끝의 전극을 이용하는 변형된 단극배열을 이용하므로, 이러한 문제를 극복하여 양질의 탐사 자료를 획득하였다.

2.3. 굴절법 탄성파탐사

굴절법 탄성파 탐사는 속도가 서로 다른 지층의 경계에서 굴절되어 지표로 되돌아 오는 파를 기록하여 지하의 속도 구조를 해석하는 방법으로, 심부로 갈수록 지반의 탄성파 속도가 달라진다는 가정을 전제로 한다. 대부분의 경우 이와 같은 지반 조건을 만족하므로, 굴절법 탐사는 댐 기초 암반의 평가나 터널 주변의 지반 상황 파악 등의 토목 분야의 많은 조사에 폭 넓게 이용되고 있다. 탄성파탐사에서 얻어지는 속도구조는 지질 분포, 강도 또는 균열의 정도, 풍화변질대 등의 지질 상황, 단층 파쇄대의 유무 및 규모 등의 지질구조를 파악하는데 이용된다. 본 연구에서는 굴절과 주시 토모그래피(refraction travel-time tomography)방법을 이용하여, 초동주시와 가장 잘 맞는 속도모델로 부터 지하구조를 파악하는 방법을 이용하였다.

3. 탐사결과

3.1. 담수호 수질 모니터링

방조제 완공 후 조성된 담수호 내의 9개 지점에 대하여, 2006년 4월 이후 2개월 간격으로 표면, -1m, -2m 심도별로 전기전도도를 측정하여 분석하였다<Fig. 1>. 분석 결과 강수량이 많은 2006년 8월을 제외하고는 전체적으로 15,000 uS/cm 내외로, blackish water에 해당되는 것으로 나타났다. 또한 전기전도도 등농도선에 따르면 방조제 제체 방향으로 고농도의 범위가 나타나며, 심도별로 측정값이 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 제체를 통한 해수유입이 광범위하게 이루어지는 것으로 해석된다.

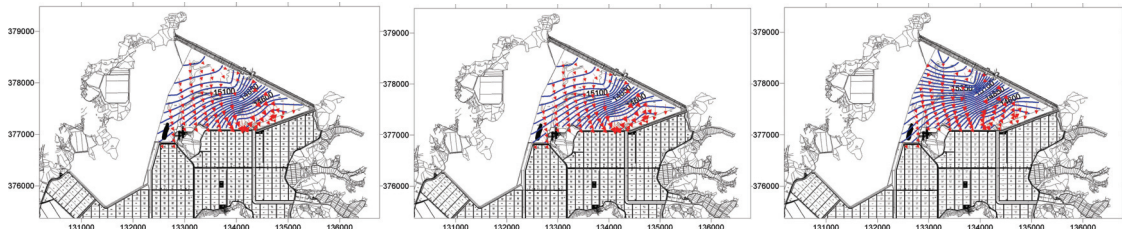


Fig. 1. Electrical conductivity distribution with depth at surface(left), -1m depth(middle) and -2m depth(right) in Mar. 2007.

3.2. 조위변화에 따른 지하수위 변화 모니터링

누수가 관측되는 2개 지점에 대하여 바다쪽과 담수호쪽에 수위관측공을 각각 설치하여, 약 2개월 동안 지하수위 변화를 측정하였다. 측정결과를 조위변화와 교차상관 분석한 결과 담수호쪽 1개 지점을 제외하고, 조위변화와 시간지연 없이 수위변화가 나타나는 것으로 분석되었다<Fig. 2>. 이러한 결과는 제체를 통한 해수유입이 광범위하게 나타나는 것으로 판단된다.

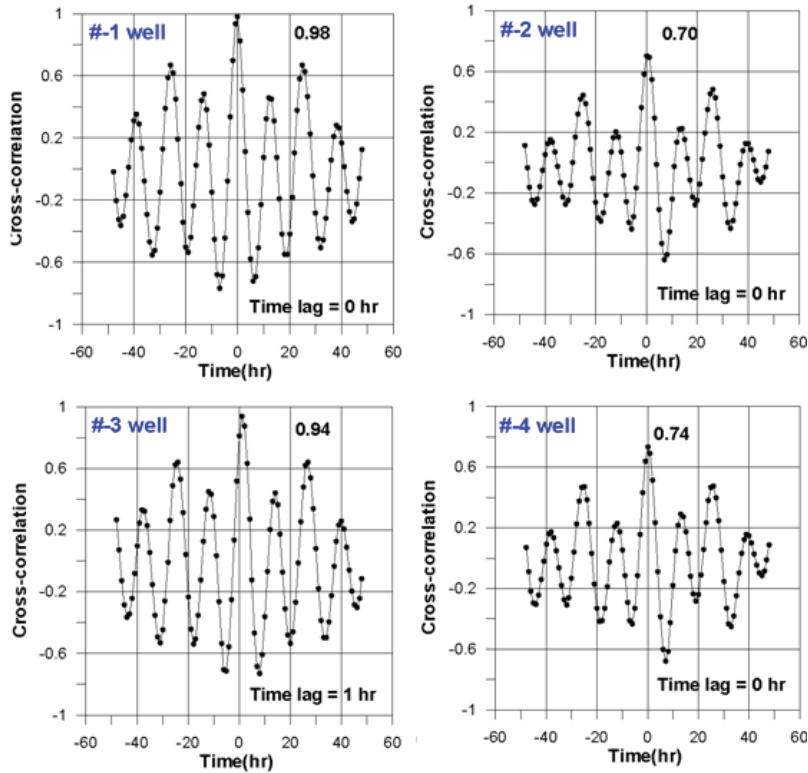


Fig. 2. Cross-correlations of water level at 4 wells due to the tidal variation.

3.3. 소형루프 전자탐사

소형루프 전자탐사는 전체구간에 대하여 바다쪽과 담수호쪽을 10m 간격으로 평행하게 실시하였다. 탐사결과를 1차원 역산 후 단면도로 작성한 결과 담수호쪽의 측선에서 약 2 ohm-m 이하의 저비저항대가 폭넓게 분포하는데, 이 결과는 3차례 탐사에서 동일하게 나타났다. 이러한 결과는 담수호의 경우 약 -0.5m로 관리수위를 일정하게 유지시키지만, 조위변화는 약 +4~-4m 범위로 변함에 따라 전기전도도가 높은 담수호 물의 영향으로 판단된다<Fig. 3>.

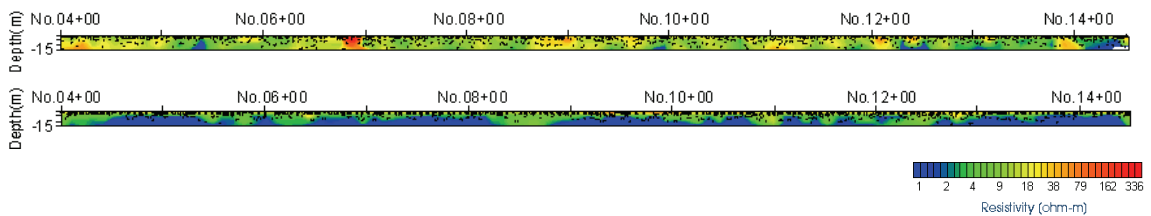


Fig. 3. Inversion results of EM survey along seaside(upper) and reservoir side(lower).

3.4. 전기비저항탐사

변형된 단극배열 전기비저항탐사는 일차적으로 동일한 구간에 대하여 조위변화에 따라 일정시간별로 측정하였는데, 해석결과 조위변화에 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 전극간격(a=5m)에 비해 지하수위 변화가 상대적으로 적기 때문으로

판단된다. Fig. 4는 바다쪽 측선 전체구간에 대한 2차원 역산 결과로, 제체를 통한 누수지점인 No.6, No.8, No.14 지점에서 1 ohm-m 이하의 저비저항대가 광범위하게 존재하는 것으로 나타났다.

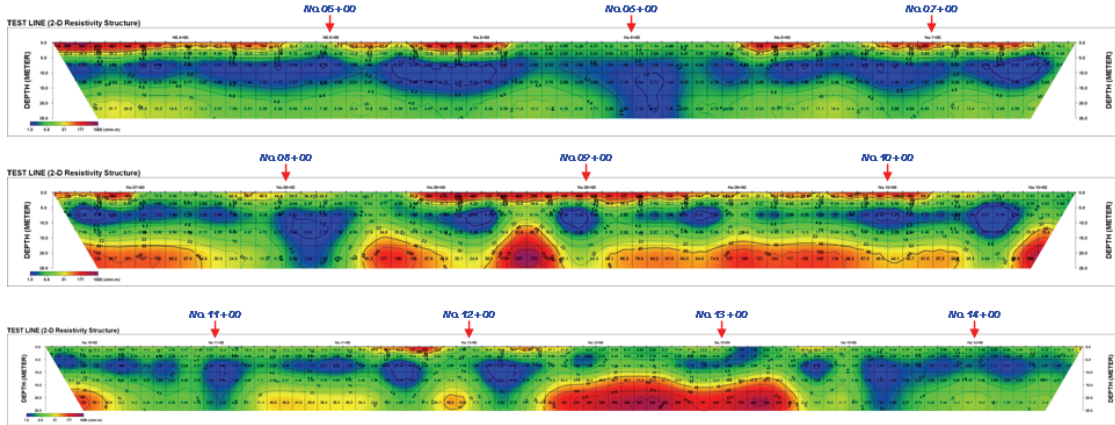


Fig. 4. Inversion results of electrical resistivity survey along seaside.

3.5. 굴절법 탄성파탐사

본 탐사는 2003년 방조제 안전진단을 위하여 수행된 시추조사 결과, 일부지점에서 나타난 혼전석의 공간적인 분포 파악을 목적으로 수행되었다. 탐사구간은 혼전석이 나타난 시추공 주변과, 혼전석이 없는 것으로 나타난 시추공 주변 각 120m 구간에 대하여 실시하였다. Fig. 5는 2차원 역산결과로 혼전석 구간의 경우 1.0~1.5km/s 속도 범위의 층이 수평적으로 발달하지만, 혼전석이 없는 구간의 경우는 동일한 속도 층이 거의 없는 것으로 나타났다. 이 역산결과를 시추주상도와 대비한 결과, 탐사결과 신뢰성이 높은 것으로 판단된다.

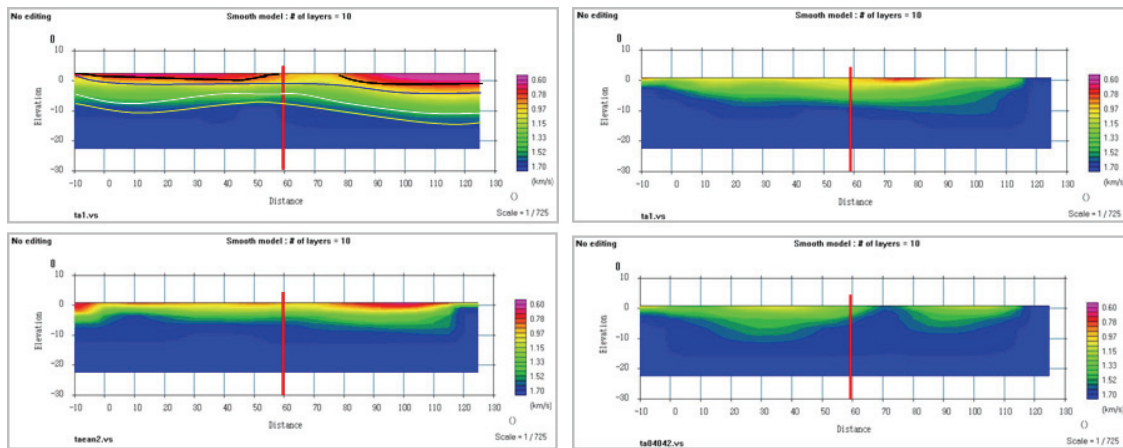


Fig. 5. Results of velocity tomograms with pebble-bearing sand layer(left) and without pebble-bearing sand layer(right).

4. 결론

연구결과 본 방조제의 해수유입은 담수호의 수질 분포와 조위변화에 따른 지하수위 관측 결과를 토대로 방조제 체체를 통해 발생하는 것으로 확인되었다. 소형루프 전자탐사와 전기비저항탐사 결과 바다쪽 체체의 일부 구간을 통해 유입된 해수는 담수호쪽에서 광범위하게 유출되는 것으로 나타났으며, 일부구간에서는 해수유입이 방조제 하부 약 30m 이하 까지 확장된 것으로 나타났다. 체체 하부의 구성물질 파악을 위해 수행된 굴절법 탄성파탐사 결과 혼전석층은 전체 구간에 2~4m 두께로 나타나는데, 이 경우 탐사결과의 확인을 위하여 향후 일부 지점에 대한 시추조사가 필요한 것으로 판단된다.

참고문헌

- 김정호, 이명중, 송운호, 정승환, 2001, 2차원 전기비저항 탐사를 위한 변형된 전극 배열법에 관한 연구, 물리탐사, 4, 59-69.
- 송성호, 이규상, 김영규, 성백옥, 김양빈, 김동호, 2007, 방조제 해수유입 구간 탐지를 위한 전기, 전자탐사 적용, 한국지구시스템공학회지, 심사중.
- Won, I.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, 129-137.