지구물리학적 방법을 이용한 방조제 유지·관리 체계 제안

용환호¹ · 조인기² · 송성호^{1*}

¹한국농어촌공사 농어촌연구원

²강원대학교 지구물리학과

Suggestion for the Maintenance Program of the Sea Dike Using Geophysical Methods

Hwan-Ho Yong¹, In-Ky Cho², and Sung-Ho Song^{1*}

¹Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

²Department of Geophysics, Kangwon National University

요약: 방조제는 간척사업을 위한 중요한 시설물로서 방조제 내측의 담수 확보를 위한 중요한 기능을 담당한다. 정밀안전진단 과정에서는 전기비저항 탐사, 자연전위 탐사 등 지구물리학적 방법들이 일부 반영되고 있지만, 그 중요성에 비하여 적용방법과 획득된 자료의 해석기술에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 현재 진행되고 있는 육안조사 위주의 방조제 안전점검, 정밀안전진단 등 유지·관리 체계의 문제점을 파악한 후, 정밀안전진단의 조사방법에 대한 개선 방안으로 지구물리학적 방법들에 대해 고찰하였다. 한편 주변 환경적 변화에 의한 제한적 요소들(조위변화에 따른 제체의 압력변화, 성토재의 다짐 특성, 제체 표면의 피복상태)을 고려하여 방조제 환경에 따른 맞춤형 지구물리학적 방법들을 제시하였다.

주요어: 방조제, 지구물리학적 방법, 정밀안전진단, 유지·관리

Abstract: The sea dike is the most important facility of reclamation projects, and plays an important role in securing freshwater in the reservoir. Systematic research on practical approaches and data analysis techniques are lacking even though some geophysical methods such as electrical resistivity and self-potential surveys are included within the inspection processes. Hence, geophysical methods were considered for improvement of precision safety diagnosis methods after problems in the maintenance system have been identified, such as safety checks and precision safety diagnoses. In addition, geophysical methods customized according to variations in ambient environmental limiting factors such as pore pressure changes by tidal fluctuation, compaction characteristics of the fill materials, and the surface condition of the embankment were suggested.

Keywords: sea dike, geophysical methods, precision safety diagnosis, maintenance

서론

방조제는 간척개발사업에 필요한 외곽시설로 해안의 조석 영향을 차단하고, 내수위 조절을 통한 간척지의 안정적 확보에 중요한 시설물이다. 또한 농업용수 확보 및 공급, 염해방지의 기능과 함께 해안가의 교통수단으로도 큰 역할을 하고 있다.

최근 물 수요의 증대 및 기상이변에 의한 자연재해의 발생빈도가 높아져 수리시설 구조물들에 대한 지속적인 관리의 필요성이 제기되고 있으며, 이와 관련하여 농업용 저수지 및 방조제에 대하여 정밀안전진단이 연차적으로 시행되고 있다(MAFRA and KRC, 2012). 방조제는 시공과정의 품질관리 및 적절한 유지 과정을 통해 안정성을 확보하고 있지만, 우리나라에 축조된 총 1,654개소의 약 90%인 1,546개소가 1980년대 이전에 준공되었고, 82%가 조석의 영향이 큰 서해와 남해에 집중되어 있어 방조제 제체를 통한 만조 시 해수의 유입이 발생하고 있다(Song *et al.*, 2007). 따라서 방조제의 안정적인 유지를 위해서는 지속적인 정기점검과 발생 가능한 제체의 침하, 함몰, 해수 유입 등의 가능성 분석을 통한 적절한 유지관리 대책 수립이 필요하다. 그러나 지금까지 시행되고 있는 안전점검은 주로 육안조사 위주의 정기점검, 긴급점검 위주로 되어있고, 정기점검 또는 긴급점검 결과 정밀점검을 실시할 수 있으

2013년 11월 8일 접수; 2013년 11월 22일 수정; 2013년 11월 26일 채택

*Corresponding author

E-mail: shsong84@hanmail.net

Address: Rural Research Institute, KRC, 870, Haean-ro, Sangrok-gu Ansan city, Gyeonggi, Korea

©2013, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

며, 필요시 정밀안전진단을 요청하여 시행하고 있다. 이러한 정밀안전진단에서도 방조제 제체에 대한 육안 조사와 일시적인 조사 및 시험이 주를 이루며, 방조제 일부구간에 대하여 전기비저항 탐사가 시행되고 있지만, 정밀안전진단 주기에 따라 한시적이고 제한적으로 적용되고 있는 실정으로 방조제 안전진단에서 전기비저항 탐사의 제한적 적용에 대한 해결방안을 모색하기 위한 지구물리학적 방법들을 제안하였다.

방조제의 유지 · 관리 현실

방조제는 「시설물의 안전관리에 관한 특별법」 제13조 및 동법 시행령 제13조에 따라 시설물의 안전점검 및 정밀안전진단의 실시방법 · 절차 등에 관한 필요사항을 정하여, 이에 따른 안전점검 및 정밀안전진단을 실시하도록 함으로써 시설물의 기능과 안전을 유지하고 재해 및 재난 예방을 목적으로 하는 시설물 중에 하나이다(MOLIT, 2013). 방조제의 유지 · 관리를 위해서는 관리주체와 규모에 따라 안전점검과 정밀안전진단을 진행하고 있는데, 농업기반시설관리규정에 의하면 안전점검은 1종, 2종 및 3종 시설을 대상으로 정기점검, 긴급점검 및 정밀점검으로 구분하여 실시하고 있다(MAFRA and KRC, 2012).

정밀안전진단은 1종 시설과 2종 시설 중 일정규모 이상의 중요 구조물을 대상으로 실시하고, 다만, 1종 시설 중 준공 후 10년 이상 경과된 시설은 5년에 1회 이상 정기적으로 실시해야 한다. 정밀안전진단결과 안전상태가 양호한 시설과 정밀안전진단결과 개보수가 요구되는 시설을 개보수하여 안전하다고 인정되는 시설에 대하여는 다음 1회에 한하여 정밀안전진단을 생략할 수 있는 것으로 규정되어 있다.

정기점검은 농업생산기반시설의 운전조작 및 정비, 장애물 제거 등을 위하여 분기별 1회 이상 실시하되, 영농기 전에는 반드시 실시하게 되어있다. 긴급점검은 정기점검 외 재해나 사고 발생 등으로 시설물 안전에 이상 징후가 있을 때 실시한다. 정밀점검은 정기점검 또는 긴급점검을 실시한 결과, 시설의 기능 유지 및 안전상 재해 위험이 있어 시설물 보수가 필요한 때 실시하되, 필요시 1종, 2종 시설은 정밀점검을 생략하고 정밀안전진단을 실시할 수 있다.

정밀점검은 정기점검 및 긴급점검에서 발견할 수 없는 결함상태를 발견하기 위하여 면밀한 육안검사와 필요한 측정 및 시험을 실시하여 결함부위 등 주요부위에 대한 외관조사도 작성과 시설물 상태평가를 실시하고 결함에 대한 보수 · 보강 방법 등을 제시하는 것으로 해당 분야 기술자가 시험가동, 육안검사 및 간단한 시험 · 조사 등을 통해 실시할 수 있다.

정밀안전진단은 안전점검을 실시한 결과 시설의 재해예방 및 안전성 확보 및 시설의 기능성 증진 등을 위하여 시설관리자가 필요하다고 인정하거나 시설의 물리적, 기능적 결함을 발견하고, 이들 시설에 대한 신속하고 적절한 조치를 위하여 구

Fig. 1. Flow chart for precision safety diagnosis of agricultural infrastructure.

조적 안정성 및 결함의 원인 등을 조사, 측정 및 평가하여 보수, 보강 등의 방안을 제시하는 것을 말한다(MAFRA and KRC, 2012).

시설관리자는 유지 · 관리로서 안전점검 또는 정밀안전진단 결과에 의해 시설의 개보수계획을 수립해야 하는데, 안전성 평가를 위하여 다음과 같이 시설물 종류 및 구조적 특성에 따라 계측, 측정, 조사 및 시험 등을 선택하여 실시해야 한다(MOLIT, 2013). 평가 대상은 통상적으로 방조제의 경우 둑마루, 해측사면, 호측사면으로 나누어 평가한다. 시설물 외관조사 및 재료조사 결과를 토대로 한 시설 상태 평가 부문과 기능성 및 안정성을 검토하는 안전성 평가 부문을 종합하여 시설물 전체에 대한 종합평가 결과로부터 안전등급을 지정한다.

이와 같이 방조제 제체의 안전관리는 안전점검의 경우 육안조사 위주로 진행되고 있으며, 성능저하 현상들이 추상적이고 포괄적으로 기재되어 점검자의 주관에 의해 방조제 정밀안전진단의 순위가 정해지는 실정이다. 특히 정밀안전진단에서도 안정성평가 과정에서 과학적 조사방법들이 열거되어 선택적으로 결정되는 경우가 대부분이며, 그 중에서도 지구물리학적 방법들은 극히 일부에 해당된다. Fig. 1은 정밀안전진단 시 현장조사 결과의 검토 및 분석, 평가를 통한 안전등급 산정 체계를 정리한 흐름도로, 안전성 평가 부분만을 제외하면 안전점검 중 긴급점검, 정밀점검의 체계와 동일하다(KRC, 2010).

방조제 안전진단을 위한 연구 사례

방조제 안전진단 및 해수침투 방지대책에 관한 연구에 의하면 기존 안전점검 체계의 문제점과 개선방안에 대하여 방조제의 특성상 조수간만의 차 또는 내수면의 관리수위 변화에 따라 기존의 안전점검 뿐만 아니라 별도의 제체 누수조사 방법의 필요성이 보고된 바 있다(KRC, 2006). 이러한 연구결과는 방조제 안전관리에 필요한 조사 방법 및 시기 등 방조제 안정성에 관한 과학적인 조사가 필요한 것으로 요약된다.

최근 국내에서 가장 취약한 부분 중 하나인 제체의 침투수

에 의한 안정성 문제를 개선하기 위한 방안으로 지구물리 탐사법의 적용이 가장 현실적인 대안으로 제안한 사례가 있다 (Yu and Lee, 2012). 제안 내용에 의하면 제체의 안전성 검사 방법으로 다양한 지구물리학적 방법의 필요성을 역설하고, 통합 물리탐사 방법을 일본의 토목연구소의 사례를 통해 구체적으로 언급하였다. 또한 댐 안정성 검토를 위해 각종 계측 방법과 함께 물리탐사의 최근 기술 동향에 대해 정리한 내용에 따르면, 지리정보 시스템(GPS), 경사계, 인공위성영상, 사진촬영 등을 이용한 댐의 표면변위 측정방법과 층별침하계, 시추공 변위 측정계, 광섬유 및 동축케이블을 이용한 실시간 변위 측정계 등을 이용한 내부변위 측정방법을 소개하였다.

누수량 측정방법과 관련하여 침투량계, 열감지 센서, 저류수와 침투수의 수질측정, 추적자 시험 등이 필요하며, 누수에 대한 정밀안전진단 중 상세 외관조사, 계측자료 분석, 시추 및 토질조사, 변위측량 조사 등과 함께 지구물리 탐사의 표준화에 대한 중요성이 제기된 바 있다(Kim *et al.*, 2007). 특히 방조제의 경우, 안정성 평가를 위한 지구물리학적 방법을 통한 접근은 국내의 경우 방조제 누수지점 탐지를 위해 자연전위 및 전기비저항 탐사를 복합적으로 적용한 사례가 있으며(Song *et al.*, 2000), 방조제 제체를 통한 해수유입 방지를 위해 시공된 그라우팅 구간과 만조시 내측사면에서 관측되는 해수유입 구간에 대해 해수유입 가능성 및 유입 구간 확인을 위한 소형루프 전자 탐사와 전기비저항 탐사를 수행한 사례가 있다(Song *et al.*, 2007). 또한 소형루프 전자 탐사를 적용하여 방조제 침윤선 상부의 성토층과 해성토적층의 경계면을 구분한 사례가 있다(Lim *et al.*, 2010). 해외 사례로는 스웨덴과 노르웨이의 방조제에서 전기비저항 모니터링을 통해 누수구간에 대한 정량적 평가를 시도한 사례가 있다(Sjodahl *et al.*, 2009; Sjodahl *et al.*, 2010). 최근에는 국내 최대 규모의 새만금 방조제가 완공됨에 따라 방조제의 안전관리를 위해 지구물리 탐사방법을 이용한 모니터링에 대한 연구가 진행되고 있다.

이와 같은 사례들을 통해 다양한 지구물리학적 방법들이 방조제 안정성 평가에 매우 효과적이며, 방조제의 유지·관리에 필요한 요소로 판단된다. 그러나 지금까지 적용된 지구물리학적 방법들은 특정 구간에 대해 필요에 의해 적용된 사례로 본 연구에서는 방조제의 피복상태 및 축조재료에 맞는 맞춤형 지구물리학적 방법들을 제시한 후, 방조제 유지·관리 과정에 맞는 체계적인 접근을 시도하였다.

방조제 유지·관리 체계에 접목할 수 있는 단계별 물리탐사

본 연구에서는 앞서 사례로 제시된 지구물리학적 방법들을 초기 탐사, 장주기 탐사, 단주기 탐사와 모니터링 단계로 구분하여 방조제 유지·관리의 적용 가능성을 검토하였다. 본 논문에서 제시한 물리탐사 사례 중 자연전위 모니터링은 전라남

도 완도군의 약산방조제를 대상으로 하였으며, 그 외 자료는 전라북도 군산시와 부안군을 해상으로 연결한 새만금 방조제로부터 획득하였다.

초기 탐사 단계

방조제의 안전점검 중 분기별로 수행하는 정기점검 시기에 맞추어 겉으로 문제가 드러나지 않는 제체를 대상으로 위험요소들을 사전에 확인하기 위한 소형루프 전자 탐사방법을 제시하였다. 소형루프 전자 탐사는 비접촉식 탐사가 가능하여 별도의 전극과 전선의 설치가 불필요하므로 방대한 규모의 방조제 초기 탐사에 매우 적합한 방법으로 신속한 탐사가 가능하다.

Fig. 2는 새만금방조제 일부구간의 내측사면을 대상으로 총 24 측선을 10 m 간격으로 각 100 m로 전개한 소형루프 전자 탐사측선으로, 2012년 9월 27일과 약 1개월 경과시점인 10월 25일에 같은 위치에서 획득한 모니터링 측선에 해당된다. 측선간의 간격은 10 m로 설정하였다. Fig. 3(a)는 1차원 역산결과와 전기비저항 값을 이용하여 약 1개월 경과시점에서 전기비저항의 변화를 정밀하게 파악하기 위해 동일 측선 자료를 대상으로 9월 27일의 전기비저항 값에 대한 10월 25일의 전기비저항 값의 비를 나타낸 것이다. 탐사자료는 동상성분만을 사용하여 역산을 수행한 경우에 대한 현장자료와 이론자료를 비교한 결과 거의 모든 주파수에서 오차가 작게 나타났음을 확인할 수 있었으며, 역산 결과의 신뢰도 또한 높은 것으로 나타났다. 전반적으로 큰 차이는 없었으나, 9월 27일 자료를 기준으로 분석한 결과, 비저항이 감소하는 경향이 나타났다. 특히, 해측과 가장 가까운 측선인 line 1의 No.18+00~20+00 구간은 상대적으로 1개월 후의 전기비저항이 더 낮아지는 것으로 나타났다.

한편, 각 측선에 대해서 2차원 단면상에 전기비저항의 변화

Fig. 2. Survey lines for Nos.16+00 ~ 20+00: (a) 3D view and (b) plane view of small-loop EM monitoring at sea dike 2.

Fig. 3. Analysis of resistivity ratios (a) by line and (b) depth using two inverted sections over lines 1 ~ 6 for Nos.16+00 ~ 20+00.

가 나타나는 점에 착안하여 총 14 지점의 심도에 대한 전기비저항의 변화를 파악해 보았다. Fig. 3(b)는 9월 27일과 10월 25일에 측정한 결과를 9 지점의 심도에서 line 1, 2, 3, 4, 5, 6에 해당하는 전기비저항의 비를 표현한 것이다. 대체로 1~5 m 심도에서 전기비저항이 전반적으로 낮아지는 경향이 나타났으며, 심도 6 m에서는 측선의 시점부와 해측과 가장 가까운 line 1에서 전기비저항이 낮아지는 현상이 나타났다. 반면, 심도 7 m 이하에서는 전기비저항의 변화가 거의 나타나지 않았다. 상대적으로 전기비저항의 감소가 뚜렷한 지점은 No.17+50 ~ 18+10 지점과 No.18+50 ~ 19+80 지점이다. 특히 No.18+50 ~ 19+80 지점은 line 1, 2에 해당되는 해측과 상대적으로 가까운 구간이다. 일반적으로 방조제는 조위에 의한 영향을 많이 받지만, 소형루프 전자 탐사가 적용된 구간은 비교적 해측과 멀리 떨어진 내측에 해당되어 그 영향이 상대적으로 적게 나타난 것으로 판단된다. 또한 방조제 내측 담수의 경우도 기수 (brackish water)에 해당되므로 전기비저항이 낮아지는데 영향을 줄 수 있다. 따라서 보다 정밀한 모니터링 자료 해석을 위해서는 측정 당시 조위의 영향을 고려하는 것이 필요하다.

이와 같이 소형루프 전자 탐사는 심도 10 m 이내의 물성을

Fig. 4. Survey lines for Nos.23+60 ~ 25+40, 28+20 ~ 29+10, and 29+30 ~ 30+10 with 10 m electrode spacing along sea dike 2: (a) section view and (b) plane view.

신속하게 파악할 수 있는 방법으로 방조제 제체의 초기 탐사 단계에서 유용하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 이 방법은 전자 탐사의 특성상 전자기적 잡음에 매우 취약하여 자료의 변화가 민감하게 나타나므로 동일 지점에서 서로 다른 시점에 해당되는 각각의 역산결과로부터 전기비저항 비를 이용한 분석이 방조제 침윤선 상부의 매질에 대한 물성변화를 파악하는데 보다 효과적일 것으로 판단된다.

장주기 탐사 단계

앞서 제시한 초기 탐사결과를 전반적인 방조제 유지·관리에 필요한 사전 정보를 제공한다. 초기 탐사결과에서 나타나는 이상대 구간들의 원인을 파악하기 위해서는 주변의 환경적인 영향에 의해 이상대가 한시적으로 나타날 가능성이 있으므로 일정 주기의 반복적인 조사가 필요하다. 또한 소형루프 전자 탐사는 전자기적인 잡음에 매우 취약할 뿐만 아니라 송수신기 간의 거리가 제한되어 있으므로 비교적 규모가 큰 방조제의 경우 주파수 수직탐사의 가탐심도에 한계가 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 새만금방조제의 동일구간에 대해 장주기 탐사방법으로 2차원 전기비저항 탐사를 제시하였다. 사용된 전극배열은 해수의 영향을 받는 방조제와 같은 제체에서 효과적으로 적용할 수 있는 변형된 단극-단극 배열이며, 측정간격은 10 m, 전극 전개 수는 8로 탐사변수들을 모두 고정하였다.

최소 3회의 반복적인 장주기 탐사가 완료되면 각각의 자료에 대한 결과를 비교하여 이상대 확장 가능성을 평가할 수 있다. 이상대 확장 가능성 평가를 위해 Fig. 4와 같이 새만금 2호 방조제 내측사면 아래 5 m 이격된 제체 종방향 측선을 따라 No.23+60 ~ 25+40, No.28+20 ~ 29+10, No.29+30 ~ 30+10 구간에서 2010년 12월 8일과 2012년 7월 3일에 각각 2차원 전기비저항 탐사를 수행하였다. Fig. 5(a)의 No.23+60 ~ 24+80 지점은 전반적으로 이상대 구간이 확장된 상태로 향후 장주기

Fig. 5. Comparison results for two inverted sections (December 8, 2010 and July 3, 2012): (a) Nos.23+60 ~ 25+40 and (b) Nos.28+20 ~ 29+10 and 29+30 ~ 30+10 on sea dike 2.

탐사결과에 따라 정밀 탐사구간으로 재선정할 수 있다. 또한 Fig. 5(b)에서 No.28+20 ~ 29+10 지점과 No.29+30 ~ 30+10 지점은 모두 새롭게 1 ohm-m 이하의 낮은 전기비저항 이상대가 발생한 구간으로 두 구간 모두 향후 장주기 탐사결과에 따라 정밀탐사 구간으로 분류될 수 있다. 이상대 확장 가능성이 큰 구간은 누수에 의한 파이핑과 같은 영향에 취약하여 제체 상부에 변위를 유발할 가능성이 있다.

결과적으로 2차원 전기비저항 탐사결과에서 해수면 아래의 낮은 전기비저항 구간은 분해능의 한계에도 불구하고 신호대 잡음비가 상대적으로 높은 변형된 단극배열법을 적용하였음에도, 누수의 영향에 의한 제체 변위의 가능성이 상대적으로 높은 것으로 해석된다. 이와 같이 2차원 전기비저항 탐사결과로도 시간경과에 따른 이상대 확장 가능성 평가를 통하여 규모가 큰 방조제에서 집중관리 구역을 선정하여 효율적인 방조제 유지·관리에 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.

단주기 탐사 및 모니터링 단계

방조제 제체에 대한 모니터링 방법은 특정 지점에 대한 간

Fig. 6. Survey lines for 3D resistivity monitoring on sea dike 2: (a) 3D view and (b) plane view.

극수압, 침하, 경사 측정 등을 할 수 있는 계측시스템에 의해 주로 이루어져왔다. 그러나 이와 같은 계측시스템은 특정 지점을 대표하는 정보에 국한되므로 방조제의 전체 구간에 대해 연속적으로 관측하는 것은 실제로 불가능하다. 따라서 본 과정에서는 단주기 탐사와 모니터링 방법을 동시에 제시하였다. 모니터링 방법은 기본적으로 상시 관측을 위한 자동측정 시스템이 필수적이지만, 시스템을 설치하기에는 현실적으로 어려움이 따른다. 즉 상시 관측의 대안으로 앞서 제시된 장주기 탐사보다 더 짧은 주기의 반복적인 탐사가 필요하다. 측정 주기가 짧을수록 보다 효과적으로 제체의 안정성을 평가할 수 있으므로 적절한 측정 주기의 선택이 중요하다. 또한 제체 누수 구간의 경우 누수의 방향이나 경로를 정밀하게 추정하기 위해서는 방조제와 같은 3차원 구조로 된 제체의 경우 2차원 전기비저항 탐사자료의 왜곡이 발생하여 전기비저항 자료에 미치는 영향이 크며(Cho *et al.*, 2006; 2010), 2차원 해석시 이상대 구간이 3차원 곡면에 의한 기하학적 효과가 나타나므로 3차원 탐사가 필요하다(Oh, 2008).

Fig. 6은 새만금방조제 일부구간의 내측사면을 대상으로 시행한 3차원 전기비저항 탐사를 위한 측선도를 나타낸 것으로 방조제 내측사면 아래의 녹지대에서 방조제와 평행한 방향으로 측선을 설정하였다. 측선간격 15 m, 길이 275 m인 4개의 수평측선을 전개하였고, 이에 수직한 방향으로 측선간격 25 m, 길이 65 m인 10개의 수직측선을 설정하였다. 각 측선의 측정점간격은 동일하게 5 m로 설정하였으며, 총 2회에 걸쳐 약 2개월 간격으로 3차원 전기비저항 탐사가 수행되었다. 시간경과 역산을 위하여 1차 및 2차 탐사 시 모든 측선 및 측정점의 위치는 동일하게 유지하였으며, 동일한 전극배열인 변형된 단극배열법을 적용하였다. 1차 측정은 2012년 6월 22일에, 2차 측정은 2012년 8월 23일에 각각 수행되었다.

Fig. 7. (a) Volume-rendered distribution of resistivity and (b) iso-surface of less than 1 ohm-m as estimated from time-lapse inversion of apparent resistivity data sets obtained on August 23, 2012.

Fig. 7(a)는 1차 탐사자료의 단독 역산결과를 기준모델로 사용한 2차 탐사자료의 시간경과 역산결과이다. Fig. 7(b)는 1 ohm-m 이하의 전기비저항 분포도를 나타낸 것이다. 그러나 이 영상만으로 전기비저항 변화량의 크기를 판별하기에는 어려움이 따른다. 따라서 단주기 전기비저항 탐사의 효과적인 해석을 위해서는 전기비저항 값 자체보다는 그 변화량의 분포로부터 제체의 안정성을 해석하는 것이 보다 유리하다. Fig. 8(a)는 전기비저항 변화량의 백분율을 나타낸 것이며, Fig. 8(b)는 20% 이상 감소한 영역만을 추출하여 도시한 것이다. 시간경과 역산 결과인 Fig. 8(a)의 결과에서 나타나듯이 뚜렷한 변화대가 나타나지 않는다. 그러나 20% 이상의 음의 변화대만을 추출하여 도시한 결과인 Fig. 8(b)에서 심부에 전기비저항이 감소한 영역이 매우 폭 넓게 발달하고 있음을 확인할 수 있다. 이 조사 지역이 과거에 그라우팅으로 보강된 지역이지만, 2개월 이후에 비저항이 낮아진 것으로 보아 누수에 취약한 구간임을 알 수 있다. 또한 이 구간은 끝막이 구간에 해당하는 구간으로 전기비저항의 변화량이 비교적 크게 나타날 가능성이 높으므로 향후 정밀 탐사를 지속적으로 수행하여 전기비저항의 경과추이를 확인해야 할 구간으로 판단된다.

이와 같은 정밀조사 단계에서 단주기 탐사는 근본적으로 측정 주기를 조절하기가 매우 어렵다. 따라서 측정주기를 조절하기 쉽고, 원하는 시간대에 측정이 가능한 모니터링 방법으로 자연전위 탐사를 실시하였다. 자연전위 탐사는 최대 조위차가

Fig. 8. (a) Volume-rendered distribution of percent-change and (b) iso-surface of less than -20% as estimated from time-lapse inversion of data sets obtained on August 23, 2012.

Fig. 9. Schematic diagram of SP monitoring system.

2.5 m 정도인 약산방조제에서 수행되었으며, 과거에 재해예방 목적으로 자동측정시스템이 설치된 지역으로 현장자료를 자동으로 측정하여 전송하는 코드분할 다중접속(code division multiple access; CDMA) 방식을 적용하였다.

Fig. 9는 자연전위 자료를 획득한 자동측정시스템의 모식도를 나타낸 것으로 각각의 전극은 20 m 간격으로 배치되었고, 매설된 플라스틱 관속을 통과하는 전선과 연결되어 자동측정시스템의 제어를 통해 운영되었다. 기준전극은 측정위치에서 조사지역의 영향이 미치지 않는 2 km 이상 이격된 비교적 원지반에 가까운 지점에 설치하였다. 전원은 태양열 전지판으로부터 발생된 열에너지를 전기에너지로 변환하여 자체 배터리에서 에너지가 저장되어 최소 소비전력으로 이용하는 방식을 채용하였다. Fig. 10(a)는 평균 자연전위 차와 조위 차 사이의 관계를 나타낸 것으로 평균 자연전위 차는 조위 차와 비례하고, 조위차가 0일 때, 평균값은 거의 0이 된다. 자연전위 차가 조위 차에 의해 전극 분극과 같은 잡음이 거의 없이 순수하게 영향을 미치는 자연전위 반응을 반영하므로 자연전위 차는 방조제의 누수 유동과 관계된 유동전위와 직접적으로 상관성이 있는 것으로 판단된다. 자연전위 차가 조위 차와 직접적으로

Fig. 10. (a) Relationship between SP difference and tidal difference at a sea dike and (b) profile of sum of SP differences along survey line. Zones showing relatively large SP difference indicate potential leakage zones.

비례한다면, 자연전위 차의 정도는 특정 위치에서 상대적인 누수 유동량을 평가하기 위한 주요 변수로 해석할 수 있다. 따라서 전체 모니터링 기간 중에 각 지점에서 자연전위 차의 평균 크기를 계산하였다. Fig. 10(b)는 탐사측선에 대한 지점별 자연전위 차의 크기에 대해 나타낸 것으로 No.10~17 구간과 No.49~60 구간에서 상대적으로 크게 나타나는데, 이 지점들이 누수 구간과 관련된 것으로 판단된다. 방조제의 제체는 완

전히 불투수되는 것이 아니므로 적은 양의 누수는 심각한 문제가 되지 않지만, 이와 같이 집중된 누수현상은 파이핑 현상과 같은 방조제의 손상으로 발전될 수 있다. 따라서 이러한 누수 구간은 주의와 지속적인 감시가 필요하다.

이와 같이 자연전위 탐사를 이용한 모니터링 방법은 주로 조위의 영향에 따라 누수 지점의 누수량 변화가 많은 경우 매우 유용한 방법으로 적용할 수 있다. 또한 본 연구지역과 같이 자동측정시스템이 설치된 경우 다량의 모니터링 자료를 통해 시간경과에 따른 자연전위 차를 계산하여 조위 차와의 상관관계를 분석할 수 있으며, 조위의 상승, 하강에 따른 방조제 제체의 누수에 의한 유동전위를 효과적으로 분석할 수 있다. 이를 위해서는 장기간의 모니터링 자료가 필요하며, 자연전위 자동측정시스템을 통한 안정적인 자료가 확보될 경우 방조제의 정밀 모니터링 단계에서 유용하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

지구물리학적 방법을 이용한 유지·관리 체계 검토

지금까지 지구물리학적 방법을 초기 탐사, 장주기 탐사, 단주기 탐사 및 모니터링 단계별로 나누어 방조제 제체에 대한 적용 가능성을 검토하였다. Table 1은 지구물리학적 방법들을 비교적 적용 가능성이 높은 방법들을 열거하여 방조제 유지·관리의 단계별 과정으로 제안한 것이다. 누수구간에 대한 평가는 주로 소형루프 전자 탐사, 전기비저항 탐사, 자연전위 탐사가 필요하며, 공동 및 파쇄대에 대한 평가는 탄성과 탐사와 지표레이더 탐사가 유리하다. 방조제의 유지·관리 단계별로 살펴보면 초기 탐사 단계에서 유용하게 적용할 수 있는 방법은 소형루프 전자 탐사와 지표레이더 탐사가 유리할 것으로 생각되며, 2차원 전기비저항 탐사, 자연전위 탐사, 다중채널 표면파 탐사는 경우에 따라서 부분적으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 장주기 탐사 단계에서 주로 적용될 수 있는 방법은 2차원 전기비저항 탐사와 탄성파(다중채널 표면파, 굴절법, 반사법) 탐사가 주로 적용될 수 있으며, 단주기 탐사 및 모니터

Table 1. Geophysical methods for maintenance step of the sea dike.

Geophysical methods	Maintenance step (measurement period)				Main target
	Preliminary survey (one year)	Long period survey (half-year)	Short period survey (quarter-year)	Monitoring survey (tidal period)	
Small-loop EM	○				Leakage zone
2D electric resistivity	△	○			Leakage zone
3D electric resistivity			○	○	Leakage pathway
Self-potential	△			○	Leakage zone
Multichannel surface wave	△	○	○		Cavity or fractured zone
Seismic refraction wave		○	○		Cavity or fractured zone
Seismic reflection wave		○	○		Cavity or fractured zone
Ground penetrating radar	○				Shallow cavity

○: primary, △: secondary

Fig. 11. Flow chart for sea dike maintenance using geophysical methods (EM: small-loop electromagnetic survey, ER: electrical resistivity survey, MASW: multichannel analysis of surface wave survey, SP: self-potential survey).

링 단계에서 단주기 탐사방법으로는 3차원 전기비저항 탐사와 탄성과 탐사가 주로 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 모니터링 방법으로는 자연전위 탐사와 3차원 탐사가 유용할 것으로 생각되며, 경우에 따라서 이 두 방법을 동시에 적용할 경우 모니터링 효과가 더욱 커질 수 있다.

이와 같이 지구물리학적 방법들은 방조제 유지·관리 과정에서 효과적으로 적용될 수 있으므로, 본 연구에서는 앞서 검토된 소형루프 전자 탐사, 2차원 및 3차원 전기비저항 탐사, 다중채널 표면파 탐사와 자연전위 탐사를 중심으로 제체의 유지·관리를 위한 흐름도를 제시하였다(Fig. 11). 제안된 방법은 측정 주기에 따라 단계별로 적용될 수 있는데, 초기 탐사 단계에서는 연 1회의 조사결과에 따라 다음 단계의 과정으로 이동하게 된다. 또한 장주기 탐사 단계는 동일 구간에 대해 6개월 주기로 3회 이상의 자료 분석이 필요하며, 단주기 탐사 및 모니터링 단계는 적어도 최소 3개월 주기로 3회 이상의 자료 분석이 수반되어야 할 것으로 판단된다. 특히 모니터링의 경우는 자동측정 시스템을 이용한 상시관측이 가장 이상적으로 측정 주기는 조위에 의해 영향 받는 방조제의 특성상 조위의 최고, 최소 시점에 측정할 수 있도록 보정하는 과정이 요구된다.

토의 및 결론

최근 저수지 뚝 붕괴 등 수리시설물에 대한 관심이 급증하고 있는 추세로 본 연구에서 제시한 지구물리학적 방법들은 일반적인 수리시설물에 대해 적용될 수 있을 것으로 기대되

며, 지구물리학적 방법들이 체계적으로 적용된다면 항구적인 방조제의 유지·관리에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 특히 지구물리학적 방법을 이용한 방조제 유지·관리 흐름도는 반복적인 순환 시스템으로 방조제의 체계적인 유지·관리를 위한 조사와 평가기술로 활용될 수 있을 것으로 기대하며, 취약 구간에 대한 감시 기능을 담당할 수 있을 뿐만 아니라 육안조사 결과 이상대가 발생되지 않은 구간에 대해 선별적으로 적용할 경우 사전 재해예방에도 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 농림축산식품부의 연구비 지원에 의한 새만금 방조제 성토제 안정성 모니터링 연구의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Cho, I. K., Kang, H. J., and Kim, K. J., 2006, Distortion of Resistivity Data Due to the 3D Geometry of Embankment Dams, *Geophysics and Geophysical Exploration*, **9**, 291-298.
- Cho, I. K., Lee, K. S., and Kang, H. J., 2010, 3D Effect of Embankment Dam Geometry to Resistivity Data, *Geophysics and Geophysical Exploration*, **13**, 397-406.
- Kim, K. S., Kim, J. H., Park, S. G., Lim, H. D., and Cho, I. K., 2007, Application of Geophysical Methods for Dam Safety Analysis: Recent Technological Trend: KGS Geotechnical Engineering Workshop, 208-220.
- KRC (Korea Rural Community Corporation), 2006, A Study on Safety Diagnosis for Sea Dike and Plan for Seawater Intrusion Prevention: Research Report by Korea Rural Community Corporation, 1-6.
- KRC (Korea Rural Community Corporation), 2010, Practice Indicator for Precision Safety Diagnosis of Agricultural Infrastructure.
- Lim, S. K., Song, S. H., Park, K. Y., Yoon, D. H., and Ryu, J. S., 2010, Application of a Small-loop Electromagnetic Method for Seawater Inflow Problem of Embankment Dike, *Journal of Korean Society for Geosystem Engineering*, **47**, 1-8.
- MAFRA (Ministry of Agriculture, Food, and Rural Affairs) and KRC (Korea Rural Community Corporation), 2012, Agriculture Infrastructure Management Regulation.
- MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport), 2013, Special Act on the Safety Control of Installations.
- Oh, S. H., 2008, The Safety Assessment of Embankment by Three Dimensional Electrical DC Modeling: Journal of Korean Earth Science Society, **29**, 447-453.
- Sjodahl, P., Dahlin, T., and Johansson, S., 2009, Embankment Dam Seepage Evaluation from Resistivity Monitoring Data, *Near Surface Geophysics*, **7**, 463-474.
- Sjodahl, P., Dahlin, T., and Johansson, S., 2010, Using the Resistivity Method for Leakage Detection in a Blind Test at

- the Rossvatn Embankment Dam Test Facility in Norway, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **69**, 643-658.
- Song, S. H., Lee, G. S., Kim, Y. G., Seong, B. U., Kim, Y. B., and Kim, D. H., 2007, Detection of Seawater Inflow through Embankment Dike Near Reinforced Region: Application of Electric and Electromagnetic surveys, *Journal of Korean Society for Geosystem Engineering*, **44**, 235-243.
- Song, S. H., Lee, G. S., Kim, J. H., and Kwon, B. D., 2000, Application of SP and Pole-pole Array Electrical Resistivity Surveys to the Seawater Leakage Problem of the Embankment, *Journal of Korean Society of Economic and Environmental Geology*, **33**, 417-424.
- Yu, K. K., and Lee, N. J., 2012, Infiltration Safety Inspection of Levee by Geophysical Exploration, *Journal of Korea Water Resources Association*, **45**, 42-48.