The Journal of Engineering Geology
pISSN : 1226-5268 eISSN : 2287-7169
Vol. 31, No. 4, December, 2021, pp. 507-522
https://doi.org/10.9720/kseg.2021.4.507

RESEARCH ARTICLE

제방의 취약구간 파악을 위한 전기비저항과 탄성파속도의 교차출력 해석

조경서[1,2] · 김정인[1] · 김종우[3] · 김지수[4*]

[1]충북대학교 지구환경과학과 석사과정, [2](주)아시아지오 연구원, [3]청주대학교 토목공학과 교수,
[4]충북대학교 지구환경과학과 교수

Crossplot Interpretation of Electrical Resistivity and Seismic Velocity Values for Mapping Weak Zones in Levees

Kyoung-Seo Cho[1,2] · Jeong-In Kim[1] · Jong-Woo Kim[3] · Ji-Soo Kim[4*]

[1]Master Student, Department of Earth & Environmental Sciences, Chungbuk National University
[2]Researcher, ASIAGEO Co., Ltd.
[3]Professor, Department of Civil Engineering, Cheongju University
[4]Professor, Department of Earth & Environmental Science, Chungbuk National University

Abstract

Specific survey objectives often cannot be met using only one geophysical method, as each method's results are influenced by the specific physical properties of subsurface materials. In particular, areas susceptible to geological hazards require investigation using more than one method in order to reduce risks to life and property. Instead of analyzing the results from each method separately, this work develops a four-quadrant criterion for classifying areas of levees as safe or weak. The assessment is based on statistically determined thresholds of seismic velocity (P-wave velocity from seismic refraction and S-wave velocity from multichannel analysis of surface waves) and electrical resistivity. Thresholds are determined by subtracting the standard deviation from the mean during performance testing of this correlation technique applied to model data of four horizontal and inclined fracture zones. Compared with results from the crossplot of resistivity and P-wave velocity, crossplot analysis using resistivity and S-wave velocity data provides more reliable information on the soil type, ground stiffness, and lithological characteristics of the levee system. A loose and sandy zone (represented by low S-wave velocity and high resistivity) falling within the second quadrant is interpreted to be a weak zone. This interpretation is well supported by the N values from standard penetrating test for the central core.

Keywords: crossplot analysis, levee weak-zone, electrical resistivity, seismic velocity, ground rigidity

초 록

각 탐사의 반응 값은 지하 매질의 특정 물성에 따라 달라지기 때문에 한가지의 지구물리학적 방법만으로는 탐사목적을 달성하지 못하는 경우가 종종 있다. 특히 지질재해 위험에 취약한 지역을 조사하는 경우, 인명 및 재산피해를 최대한 줄이기 위해 한 가지 이상의 탐사방법을 사용하는 것이 효과적이다. 제방의 안전성 평가를 위한 이 연구에서는 각 탐사결과들을 개별적으로 해석하는 대신 탄성파속도(굴절법에 의한 P파속도와 MASW의 S파속도)와 전기비저항 값들을 통계적으로 분석하여 결정된 임계값들을 기반

OPEN ACCESS

***Corresponding author:** Ji-Soo Kim
E-mail: geop22@chungbuk.ac.kr

Received: 5 October, 2021
Revised: 2 December, 2021
Accepted: 10 December, 2021

Ⓒ 2021 The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

으로 취약구간과 안전구간 등으로 구분하는 사분면 상관기법을 수행하였다. 임계값은 수평 4층 구조와 경사진 파쇄대에 대한 모델자료를 가지고 수행한 사분면 상관기법을 테스트하는 과정에서 두 개의 속성자료 모두 평균에서 표준편차를 빼준 값으로 결정되었다. 전기비저항-P파 속도의 교차출력에 비해 전기비저항과 S파속도를 이용한 교차출력 해석이 제방 시스템의 토양유형, 지반강성 및 암석학적 특성 정보를 보다 충실히 제공하였다. 낮은 S파속도와 높은 전기비저항으로 2사분면에 투영된 느슨한 모래 구역이 취약구간으로 평가되는데 이와 같은 해석은 시추공 표준관입시험에서 보인 중심코어의 N 값 분포로 뒷받침되었다.

주요어: 교차출력 해석, 제방 취약구간, 전기비저항, 탄성파속도, 지반강성

서 론

물리탐사는 그 적용 방법에 따라 각기 다른 물리적인 성질(물성: physical properties)과 관련되므로 한 가지 물리탐사 방법만으로는 목적을 달성하기 어려운 경우가 많다. 예를 들어 피압대수층(confined aquifer)(Fig. 1)의 구조를 파악하기 위한 전기비저항탐사와 탄성파탐사에서 물로 포화된 점토층과 모래층은 탄성파탐사로 찾을 수 있을 만큼 속도 대비가 크지 않기 때문에 탄성파탐사로 그 경계면을 찾기 어려운 반면 전기비저항의 대비가 크기 때문에 전기비저항탐사에서는 그 경계를 찾을 수 있다. 이와 반대로 포화된 모래층과 파쇄된 기반암층의 속도 대비가 크기 때문에 탄성파탐사로 경계면은 찾을 수 있지만 파쇄된 기반암은 물로 포화되어 있기 때문에 포화된 모래 · 자갈층과 전기비저항이 비슷하여 전기비저항탐사로는 그 경계면을 찾을 수 없다(Burger, 1992; Shon et al., 2000).

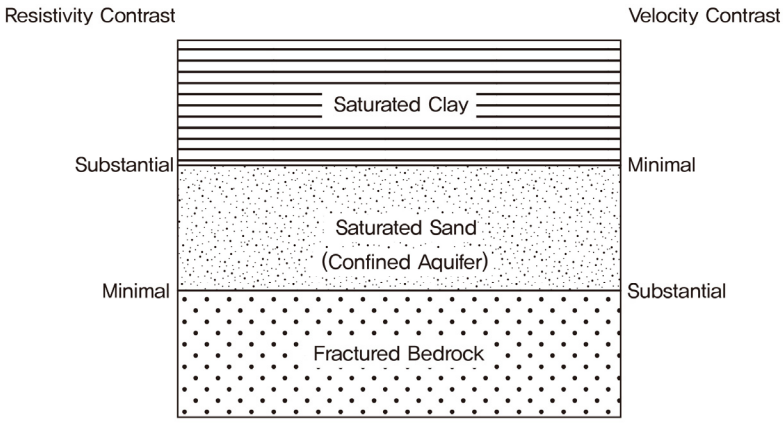


Fig. 1. Delineation of a confined aquifer using both seismic velocities and electrical resistivity (modified from Burger, 1992).

이처럼 탐사방법마다 관련된 물성이 다르므로 복합탐사를 하게 되면 한 가지 물리탐사보다 더 많고 정확한 지층구조를 파악할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 복합탐사를 통해 얻어낸 단면들은 각기 다른 이미지로 출력하여 해석하는 관계로 지하구조가 복잡해질수록 함께 분석하기 어려운 단점이 있다. 이 연구에서는 이러한 단점을 보완하기 위하여 복합탐사를 통해 얻은 결과 값들의 상관관계를 통계적으로 분석하여 하나의 단면으로 출력하는 방법을 모델자료와 OO저수지 제방에서 얻은 현장자료에 각각 적용하고자 한다.

2000년대 이후 국내에서 댐, 방조제 및 저수지 안전진단을 위한 각종 물리탐사 방법들이 3차원적 조사까지 확장되어왔다. 이중에서 특히 전기비저항과 탄성파속도는 제방의 누수 및 안전진단에 중요한 물성이 된다(Park et al., 2002; Song et al., 2005; Yoon et al., 2005; Kim et al., 2007, 2011; Cho and Yong, 2019). 이 연구에서의 복합해석은 쌍극자배열의 전기

비저항 토모그래피(electrical resistivity tomography), 탄성파굴절법 토모그래피(seismic refraction tomography), 표면파 탐사법(multichannel analysis of surface wave, MASW)에서 각각 얻어지는 전기비저항, P파속도, S파속도 자료들을 서로 통계적으로 상관분석하고 그 교차해석 단면(crossplot analysis section)을 만들어 궁극적으로 제방의 상대적인 안전구간 및 취약구간 등을 파악하고자 한다. 교차출력은 현장자료에 적용하기 전에 모델 자료에 나타난 교차출력의 반응을 충분히 검토한 후 안전진단에 활용된 사분면 투영방법(Hayashi and Konishi, 2010; Hayashi et al., 2013; Wodajo, 2018)을 임계값들을 재설정하여 현장자료에 적용하였다.

전기비저항과 탄성파속도

전기비저항탐사와 탄성파탐사를 통해 얻은 자료들은 서로 다른 물성을 가지고 있으므로 정확한 해석을 위해서는 두 자료의 상관관계를 분석하여 지하매질의 상태를 효과적으로 파악해야한다.

지질공학 및 지반공학 분야에서의 지반상태를 파악하기 위해서는 탄성파의 동탄성계수(dynamic elastic constants)들이 사용되는바 영률 E_d와 강성률 G_d는 궁극적으로 P파의 속도 V_p, S파의 속도 V_s, 매질의 밀도 ρ와 관계있다(Shon et al., 2000; Kim et al., 2015).

$$E_d = \rho \frac{(3V_p^2 - 4V_s^2)}{(V_p^2/V_s^2 - 1)}, \tag{1}$$

$$G_d = \rho V_s^2. \tag{2}$$

전기비저항은 매질의 공극률, 공극유체의 비저항, 포화도, 입자크기의 분포와 같은 인자들로 설명되는 표준 Archie의 식(Reynolds, 2010)을 따른다.

$$\rho = a\Phi^{-m}S^{-n}\rho_w. \tag{3}$$

여기서, ρ는 매질의 비저항, ρ_w는 공극 유체의 비저항, Φ는 공극률, S는 포화도, a는 흐름계수(flow factor)($0.5 \le a \le 2.5$), m은 고결계수(cementation factor)($1.3 \le m \le 2.5$), n은 포화계수(saturation factor)($n \approx 2$)이다. 산사태와 같은 지질재해의 경우 함수비뿐만 아니라 풍화대의 점토광물 또한 중요한 역할을 하므로 점토의 비표면적(specific surface)과 양이온교환능력(cation exchange capacity)에 따라 매질의 전기비저항이 추가로 감소되는 병렬 Archie식을 고려해야한다(Kirsch, 2006; Kim et al., 2021).

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\Phi^m S^n}{a\rho_w} + \frac{1}{\rho_s}. \tag{4}$$

여기서, ρ_s는 점토와 관련된 전기비비저항으로서 $\frac{1}{\rho_s}$는 역으로 점토로 인한 전기전도도의 증가를 의미한다.

이와 같이 탄성파(P파, S파) 속도는 매질의 탄성계수, 특히 지반의 강도를 표현하는 강성률 G_d는 식(2)에서 S파의 속도 V_s에 직접 관련되어 있고 전기비저항 또한 파쇄 정도 및 점토의 분포와 연관되어 있으므로 속도와 비저항의 상관관계 분석은 지반환경의 안전 평가에 매우 효과적이다.

교차출력과 임계값

탄성파속도와 전기비저항은 천부 지하매질의 밀도, 공극률, 공극수의 종류 및 포화도, 강도, 변형 등이 서로 반영되는 관계로 탐사대상체의 구조를 보다 정확히 평가하기 위해서는 이들 탐사에서 해석되는 결과들을 서로 상관시켜 해석하는 것이 중요하다.

상관해석의 한 가지 방법으로 처음 시도된 교차출력(crossplot) 기법(Hayashi and Konishi, 2010)은 OhmMapper를 이용하여 얻은 전기비저항 자료와 표면파탐사를 통해 얻은 S파속도 자료의 상관해석을 통해 지하매질을 성공적으로 구분하였으며, 이 연구에 활용하여 수평 지층과 경사 파쇄대에 대한 모델링 자료와 저수지제방 안전진단을 위한 현장자료에 각각 적용하였다.

탐사자료에서는 주변 잡음 및 측정기기의 한계로 불안정한 값들이 기록될 수 있지만 대부분의 해석은 모델링을 포함하는 역산 결과를 가지고 수행하므로 역산결과값은 현장자료에 비해 측정값의 변동 범위가 작아 상대적으로 안정된 값을 갖는다. 따라서 최종 단면도의 값들은 표준 정규분포의 형태에 가까운 분포를 보이는 경우가 많다. 그러나 제방과 같은 인위적인 구조물에 대한 자료는 비정규 분포를 보이는 경우도 적지 않다. 신뢰성 있는 속성자료들은 전체자료의 약 68.3%의 값들로서 평균 m에서 양쪽으로 한 단위의 표준편차 σ의 범위($m \pm \sigma$)안에 분포한다는 가정을 기준으로 구분하는 임계값(threshold)을 설정하여 일정 간격으로 샘플된 두 속성자료들을 해당 사분면(quadrant)에 교차출력하였다.

교차출력을 통해 구분된 지하 매질정보는 탐사 목적과 대상체에 따라 달라진다. 이 연구에서는 속성자료의 임계값들을 기준으로 1사분면(고비저항, 고속)은 하늘색, 2사분면(고비저항, 저속)은 적색, 3사분면(저비저항, 저속)은 청색, 4사분면(저비저항, 고속)은 녹색으로 표현하였다. 속이 비어있는 공동(cavity)의 경우 일반적으로 높은 전기비저항과 낮은 탄성파속도를 보이므로 교차출력에서 2사분면에 해당되고 합성단면(crossplot section)에서 적색으로 표현될 것이다(Figs. 2a, 2b). 땅밀림 산사태는 일반적으로 풍화대에 분포하는 점토에 기인하는 것으로(Kim et al., 2021; Lee, 2021) 낮은 전기비저항과 낮은 탄성파속도로 특징되는 점토를 많이 포함하는 매질은 교차출력에서 3사분면(Fig. 2a)에 투영되고 합성단면에서 청색으로 나타날 것이다(Fig. 2b).

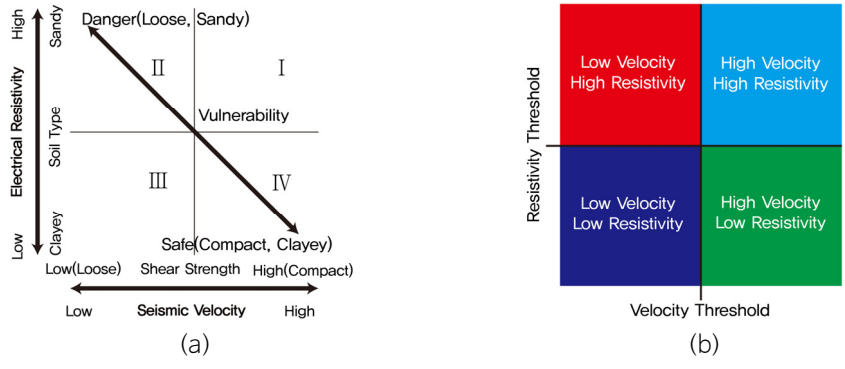


Fig. 2. Schematic diagrams showing (a) vulnerability dependent on seismic velocities and electrical resistivity and (b) their crossplot on the quadrant with the defined thresholds. Quadrants are represented as Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ, Ⅳ.

모델링 자료

4개의 수평층

한 가지 예로서 저비저항(300 Ωm), 고비저항(2000 Ωm), 저속도(1200 /s), 고속도(5000 /s)의 네 가지 조합으로 이루어진 네 개의 수평층 모델(Fig. 3a)을 살펴보자. 1 m 간격으로 값들을 추출하여 상관관계를 분석한 결과 모든 샘플 값들은 교차출력에서도 총 4개의 도수로 나타난다(Fig. 3b). 임계값은 표준편차와 평균을 고려한 임계값 $m \pm \sigma$중에서 낮은 값 $m - \sigma$으로 선택하였다. 임계값(1350.4 m/s, 358.5 Ωm)으로 설정하여 작성한 교차출력 합성단면(Fig. 3c)은 주어진 모델(Fig. 3a)의 물성자료의 범위와 잘 부합되고 있다.

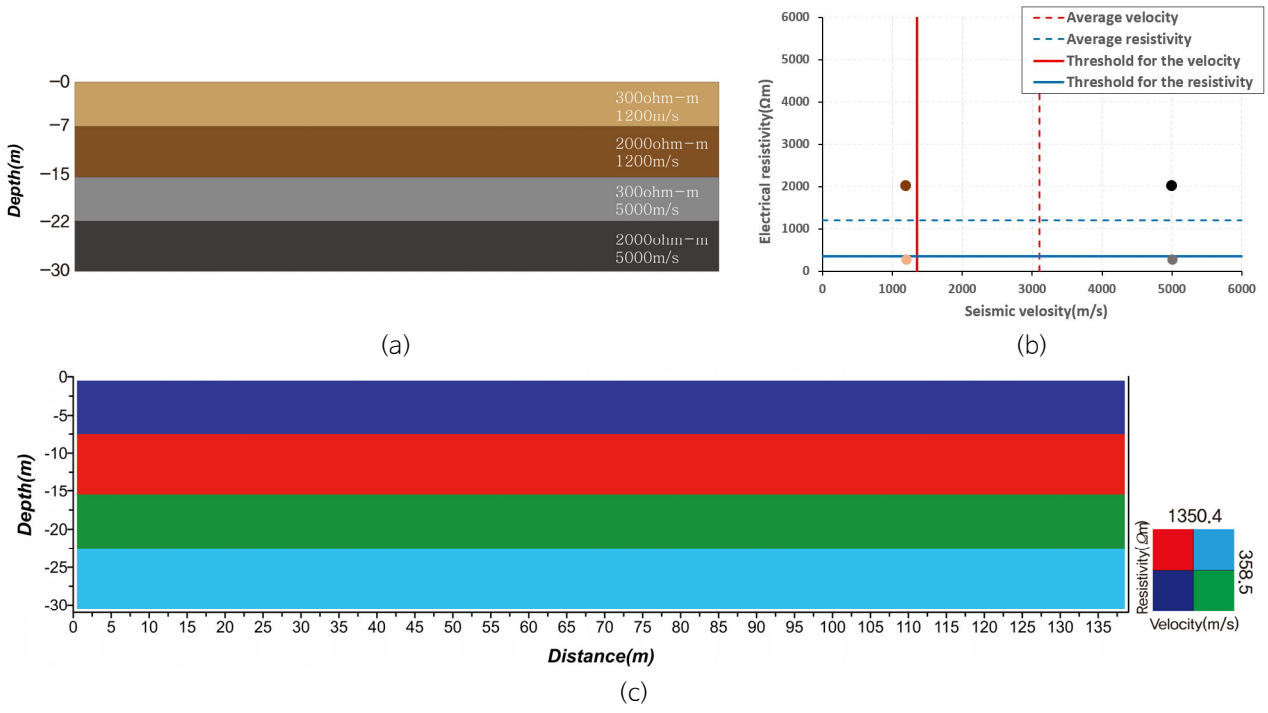


Fig. 3. Schematic diagrams of the crossplot of seismic velocity and electrical resistivity: (a) four horizontal layers combining the attributes of 300 Ωm, 2000 Ωm, 1200 m/s, and 5000 m/s; (b) two attributes classified into four quadrants; and (c) crossplot section of electrical resistivity and seismic velocity.

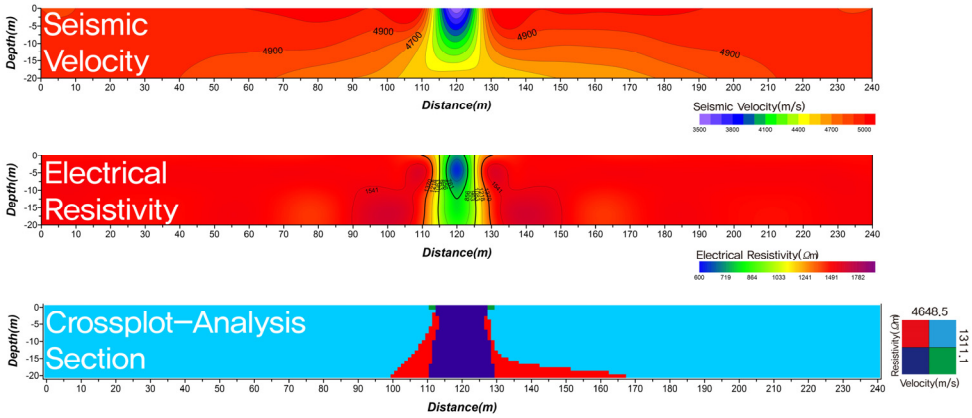
경사진 파쇄대

단순한 네 개의 수평층 모델에 잘 적용된 교차출력 기법의 복잡한 모델에 대한 적용성을 평가하기 위해 먼저 저비저항과 저속도로 특징되는 폭 10 m의 수직 파쇄대를 시험하고 점차 경사각을 변화시켜 그 반응 양상을 살펴보았다. 기반암의 전기비저항과 탄성파속도는 각각 1500 Ωm, 5000 m/s, 파쇄대의 전기비저항과 탄성파 속도는 각각 700 Ωm, 3500 m/s로 설정하였다. 탄성파탐사 모델링 자료는 Tassis et al.(2017)이 구축한 자료를 활용하였다.

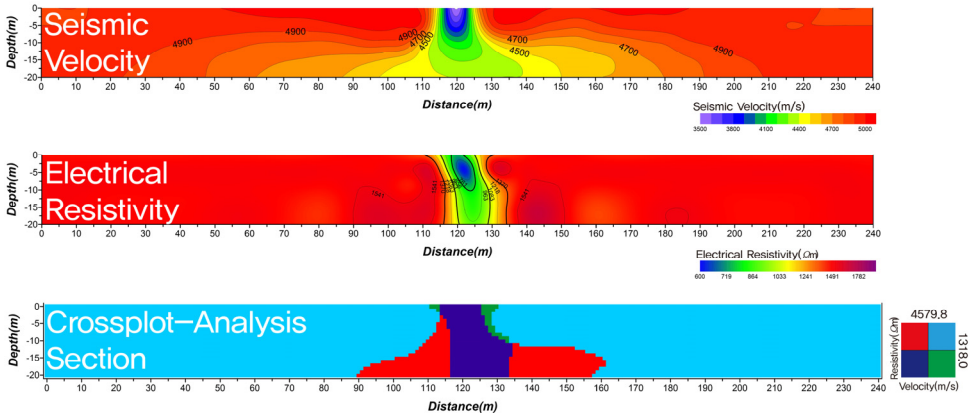
전기비저항과 탄성파 단면에서 1 m의 샘플간격으로 값을 추출하여 계산된 평균-표준편차 값을 임계값으로 설정하여 (Table 1) 4사분면으로 구분한 후 교차출력하여 그 합성단면도를 작성하였다(Fig. 4).

Table 1. Thresholds for the inclined fracture zone

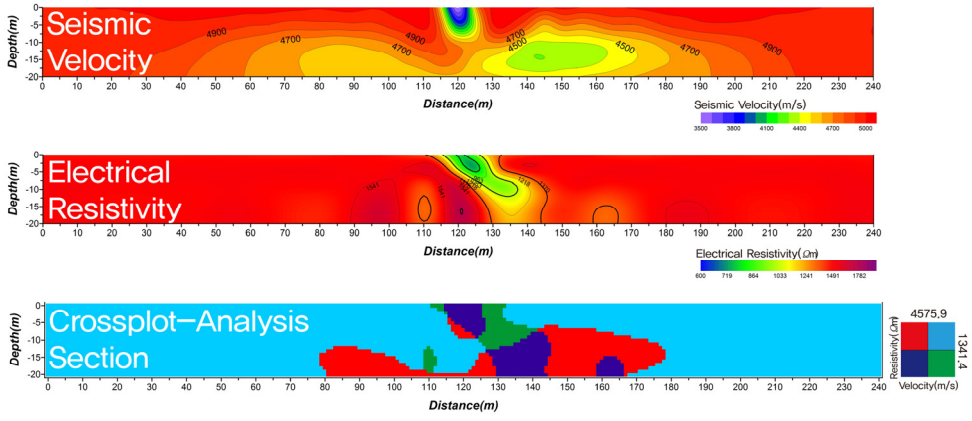
	Inclination (°)	Resistivity (Ωm)	Velocity (m/s)
Threshold	0	1311.1	4648.5
	30	1318.0	4579.8
	60	1341.4	4575.9



(a) Inclination : 0°



(b) Inclination : 30°



(c) Inclination : 60°

Fig. 4. Performance test of crossplot analysis for the fracture model with varying inclination: (a) 0°; (b) 30°; and (c) 60°. As the inclination increases, the interpretation of the anomalous zone becomes difficult in the crossplot analysis section.

역산 결과 탄성파속도는 경사각이 0°에서 60°로 커질수록 주어진 모델과의 오차가 커지고 있으며(Figs. 4a, 4b) 특히 경사각 60°인 경우(Fig. 4c) 10 m 이하의 깊이에서 경사각 왜곡이 심해 주어진 파쇄대의 형상을 확인하기 어렵다. 전기비저항은 탄성파속도에 비해 파쇄대의 효과가 잘 나타나고 있지만 경사각 60°의 결과단면(Fig. 4c)에서 깊이 약 12 m 이하에서 그 연장성이 나타나지 않는다.

경사각 0°와 30°에 대한 합성단면(Figs. 4a, 4b)에서 청색의 파쇄대는 비교적 잘 보이지만 경사각 60°의 합성단면 에서는 부분적으로 녹색(저비저항, 고속도)으로 절단되어 나타난다(Fig. 4c). 녹색 부분은 탄성파탐사 결과에서 깊이 10~15 m 사이에 보이는 상대적으로 높은 속도의 영향으로 해석된다. 이것은 파쇄대에 대한 탄성파탐사의 투과한계와 비저항탐사의 바닥까지의 연장성 한계에 기인하는데 이들에 대한 교차해석 단면은 이러한 문제점들을 효과적으로 보완한 것으로 볼 수 있다.

결론적으로 4개의 수평층 모델뿐만 아니라 경사진 파쇄대가 존재하는 복잡한 모델에서도 교차출력과 합성단면을 통해 서로 다른 물성들의 조합으로 지하매질의 견고함과 느슨함, 모래질과 점토질의 성격이 만족스럽게 구분되는 것으로 해석된다.

현장자료 수집 및 자료 해석

제방의 안전성 평가를 위해 OO저수지의 제방에서 함수매질의 분포를 알기 위한 전기비저항탐사, P파속도 구조를 파악하기 위한 탄성파 굴절법탐사, S파속도 구조를 파악하기 위한 MASW(multichannel analysis of surface wave)탐사를 각각 수행하였다. P파 및 S파속도 구조는 지하매질을 각각 지층경계면과 지반강도의 관점에서 구분하는데 활용할 수 있을 것으로 판단하였다.

조사지역의 기반암은 선캄브리아기의 경기 편마암복합체에 해당하는 규장편마암으로서 그 위에 신생대 제4기의 충적층인 모래자갈층과 표토층이 분포한다.

전기비저항 탐사자료는 AGI사의 SuperSting R8을 이용하여 3 m 간격으로 설치된 28개 전극의 쌍극자배열(dipole-dipole array)을 사용하여 전극전개수 8까지 얻었고 역산 및 자료처리는 Diprowin(2000)을 사용하였다. 탄성파 굴절법탐사와 MASW탐사의 자료수집은 모두 OYO사의 McSEIS-SX 시스템과 큰 망치(sledge hammer)를 사용하였다. 탄성파 굴절법탐사는 중심주파수 40 Hz인 수신기(geophone) 17개를 5 m 간격으로 설치하고 송신은 측선 바깥에서 1회를 포함하여 총 9회 수행하였다. MASW탐사는 중심주파수 4.5 Hz의 수신기 24개를 육상 스트리머(land streamer)에 1 m마다 연결하고 첫 번째 수신기로부터 5 m 떨어진 바깥 지점부터 송신하였으며 육상 스트리머를 1 m씩 이동시켜가며(walkaway) 전기비저항/탄성파탐사 측선의 8 m 지점부터 68 m 까지 자료를 수집했다.

역산결과 얻어진 전기비저항탐사(Fig. 5a), 탄성파 굴절법탐사(Fig. 5b), MASW탐사 단면(Fig. 5c)에서 모두 양단 8 m 이상의 깊이에서 보이는 높은 비저항과 높은 속도구간은 기반암으로 해석되며 이것은 중앙으로 갈수록 깊어지는 중심코어의 양상을 잘 보여주고 있다. 약 2~8 m 깊이에 분포하는 400 Ωm 이하의 낮은 전기비저항은 중심점토에 기인하고 그 밑의 높은 전기비저항은 기반암의 영향으로 해석된다(Fig. 5a).

P파 속도는 전체적으로 200~3000 m/s 범위에서 나타나며 측선거리 45~60 m의 깊이 2.5~10 m에서의 등속도선 간격이 다른 구간에 비해 넓게 나타난다(Fig. 5b). 특히 깊이 2.5~7.5 m 깊이에 분포하는 700~1100 m/s 범위의 저속도대가 이 구간에서 두껍게 나타나는 점으로 보아 이 부분을 다짐 정도가 약한 느슨한 매질로 해석하였다.

지반강성(ground rigidity)과 직접 연관되는 S파속도는 측선 전체에서 약 5~6 m 깊이까지 500 m/s 이하의 낮은 속도를 보인다. 특히 측선거리 약 58~60 m 구간에서 200 m/s 이하의 가장 낮은 속도를 보이는데(Fig. 5c) 이는 탄성파 굴절법탐사 결과단면에서 등속도선의 간격이 넓게 나타나는 구간과 일치한다.

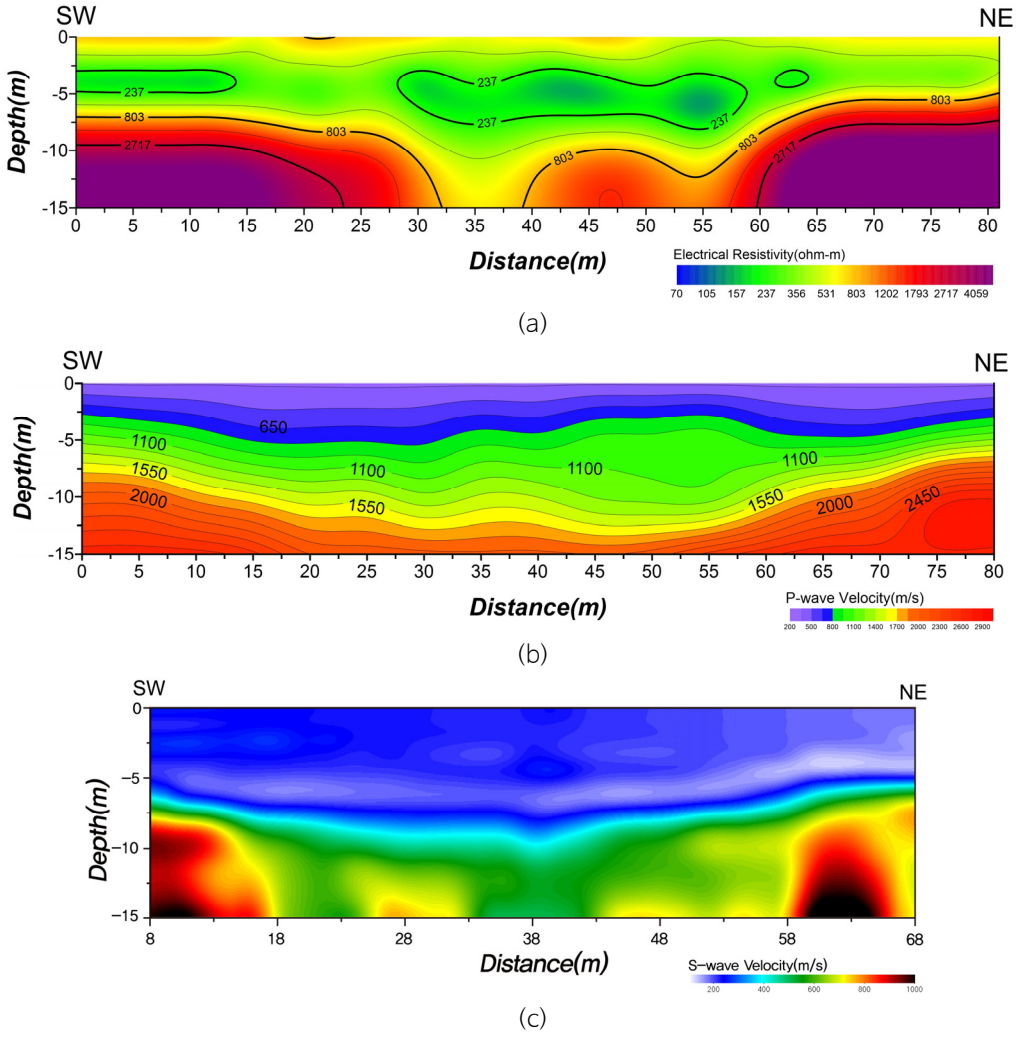


Fig. 5. Inverted images of (a) electrical resistivity structure (dipole - dipole array), (b) P-wave velocity structures (seismic refraction), and (c) S-wave velocity structures (MASW). High resistivities and velocities are from the bedrock, which deepens toward the center.

시추자료 및 표준관입시험

지하매질의 구성 물질과 특성을 파악하기 위해 측선의 2개 지점(측선거리 42 m, 69 m)에 각각 BH-01과 BH-02를 착정하여 시추조사를 실시했다. 조사지역의 물질은 성토층(bank layer), 중심코어(clay core), 풍화암(weathered rock), 기반암(bedrock)으로 나타난다. 댐이나 저수지 구조에 물이 통과하는 것을 막기 위해 건설되는 중심코어의 재질로서는 투수성이 약 10^{-5} cm/s이거나 더 낮은 재료를 사용하는데 주로 점토와 실트를 사용한다(González de Vallejo et al., 2004).

BH-01에서 0.0~2.6 m 깊이의 성토층이 존재하고 그 밑으로 2.6~11.5 m 깊이의 중심코어와 11.5~14.5 m 깊이의 기반암이 나타난다. BH-02부근의 매질은 성토층 0.0~1.8 m, 중심코어 1.8~5.5 m, 풍화암 5.5~8.5 m, 기반암 8.5~11.5 m의 깊이 분포를 보인다(Fig. 6). BH-01의 중심코어는 상부에서는 점토(clay)가 우세하고 중간부(4.8~7.6 m)는 일부 실트(silt)가 분포하고 하부(7.6~11.5 m)는 실트질 모래(silty sand), 점토, 자갈이 서로 뒤섞여 분포한다. BH-02의 중심코어는 상부에 실트, 하부에는 BH-01과 마찬가지로 실트질 모래, 점토, 자갈이 혼재한다(Table 2).

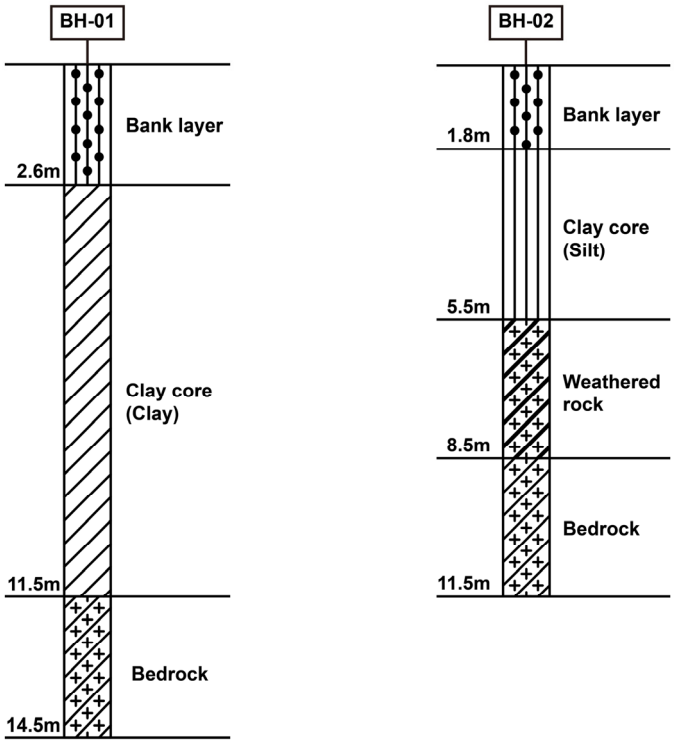


Fig. 6. Stratigraphic cross-section reconstructed from borehole data (BH-01 and BH-02). Note the upper parts of the clay cores for BH-01 and BH-02 are clay and silt, respectively.

Table 2. Details of the constituent materials for the boreholes BH-01 and BH-02

Borehole	Stratigraphy		Depth (m)	Thickness (m)
BH-01	Bank layer		0.0~2.6	2.6
	Clay core	Clay	2.6~4.8	2.2
		Silt	4.8~7.6	2.8
		Silty sand Clay Pebble	7.6~11.5	3.9
	Bedrock		11.5~14.5	3.0
BH-02	Bank layer		0.0~1.8	1.8
	Clay core	Silt	1.8~4.8	3.0
		Silty sand Clay Pebble	4.8~5.5	0.7
	Weathered rock		5.5~8.5	3.0
	Bedrock		8.5~11.5	3.0

굴착되는 지반 연경도(consistency)를 시험하는 가장 기본적인 방법인 표준관입시험(standard penetration test, SPT)을 수행하였다(Table 3). 샘플러가 30 m 관입하는데 필요한 타격 횟수를 가리키는 N값은 지반의 연경도가 클수록 커지는데 성토층의 N값이 9 이상을 보이는 것은 성토 매질(혼재된 자갈 등)에 의한 것으로 해석된다.

Table 3. Standard penetration test summary for boreholes BH-01 and BH-02

Borehole	Station (m)	Depth (m)	Stratigraphy	N-value
BH-01	42	1.0	Bank layer	10
		2.0		9
		4.0	Clay core	4
		6.0		8
		7.0		8
		8.0		6
		9.0		5
		10.0		6
		11.0		7
BH-02	69	1.0	Bank layer	12
		3.0	Clay core	1
		5.0		5

누적도수분포 및 임계값 설정

교차해석단면(crossplot analysis section) 출력을 위한 임계값을 설정하기 위해 세 개의 단면(Figs. 5a, 5b, 5c)에서 각각 1 m의 샘플간격으로 추출된 속성자료들을 전기비저항-P파속도, 전기비저항-S파속도의 상관좌표에 각각 위치시켰다(아직 교차출력이 아니기 때문). P파속도와 전기비저항의 상관분포와 임계값설정(Fig. 7a), 수집자료의 분포상태를 파악하기 위한 누적도수분포 그래프(Fig. 7b)와 도수분포 히스토그램(Fig. 7c)을 함께 분석해보았다.

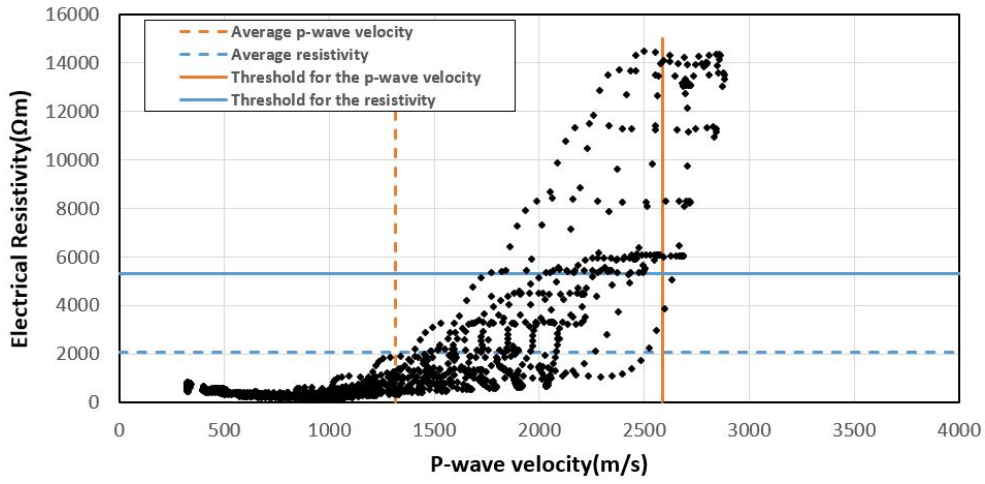
누적도수 분포곡선(Fig. 7b)에서 평균(average)과 최빈값(mode)이 왼쪽에 치우치고 임계값(thresholds)이 음수로 나타난다. 통계분석에서 자료들이 정규분포를 보일 때 표준편차와 평균을 고려한 임계값을 효과적으로 설정할 수 있다는 점을 고려할 때 이와 같은 비대칭 현상은 비정규분포를 보이는 히스토그램에서도 확인되고 있으며(Fig. 7c) 이에 근거한 임계값 설정은 자료 왜곡을 수반할 것이다.

비정규분포 자료의 이러한 문제점은 전기비저항 자료뿐만 아니라 탄성파 굴절법 및 표면파 탐사자료에서도 똑같이 나타났다. 따라서 이 연구에서는 모든 자료들을 로그 스케일로 변환하여 정규분포화 시켰다. 즉 표본집단의 큰 값에 영향을 많이 받는 산술평균의 개념에 비해 각 값에 로그를 취하여 계산된 평균값을 계산하는 기하평균의 개념으로 분포범위를 집약시켜 정규분포를 만들었다(Bae et al., 2011).

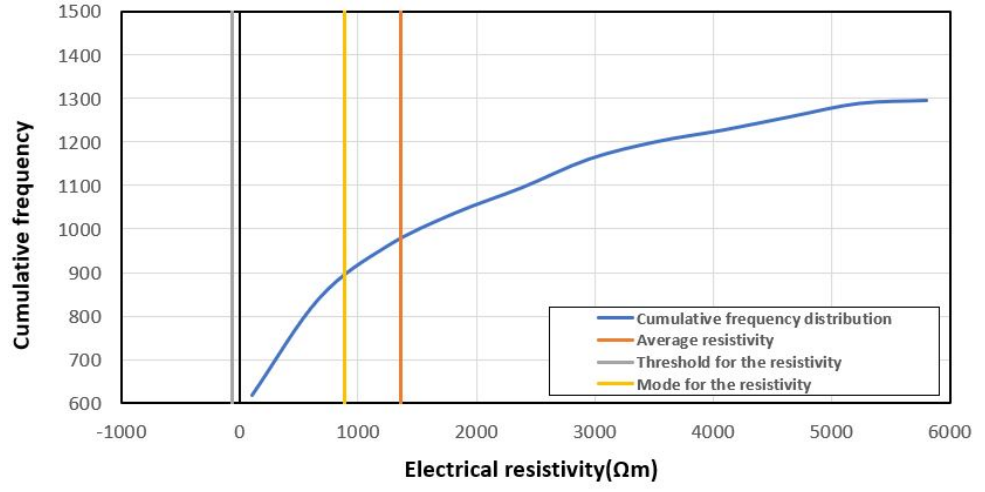
로그변환 이전의 자료와 비교하였을 때 누적도수분포 곡선에서 평균이 분산자료의 중앙부근으로 이동하며 임계값 또한 양수의 정규범위에 설정되고 있다(Figs. 8a, 8b). 도수분포 히스토그램(Fig. 8c)또한 로그 스케일로 변환하기 이전의 자료(Fig. 7c)에 비해 정규분포에 가까운 형태를 보인다. 탄성파굴절법 및 표면파탐사에서 각각 해석된 P파속도 및 S파속도 자료 또한 로그 스케일링 후 정규분포를 보였으며 같은 방법으로 임계값을 설정하였다(Table 4).

Table 4. Thresholds for electrical resistivity and seismic velocities

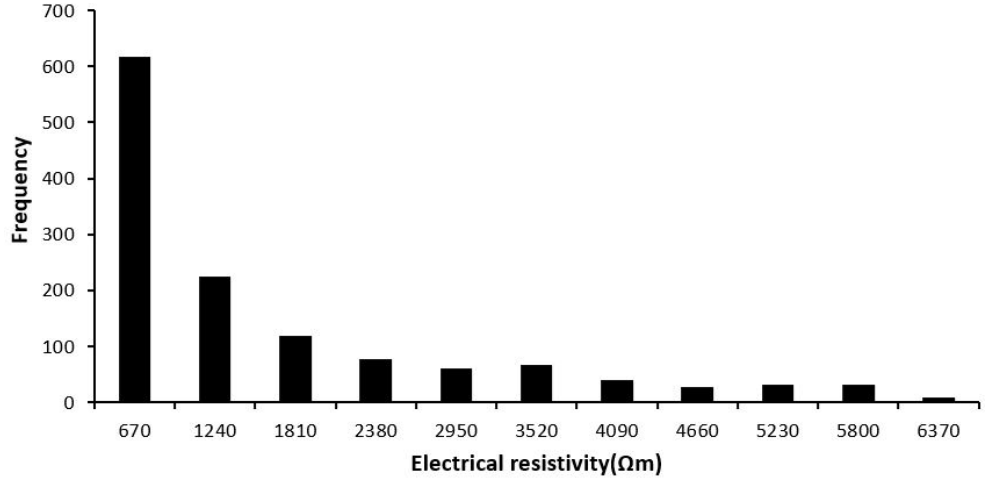
	Resistivity (Ωm)	P-wave velocity (m/s)	S-wave velocity (m/s)
Threshold	264.9	608.6	188.5
Threshold (log scale)	2.42	2.78	2.28



(a)

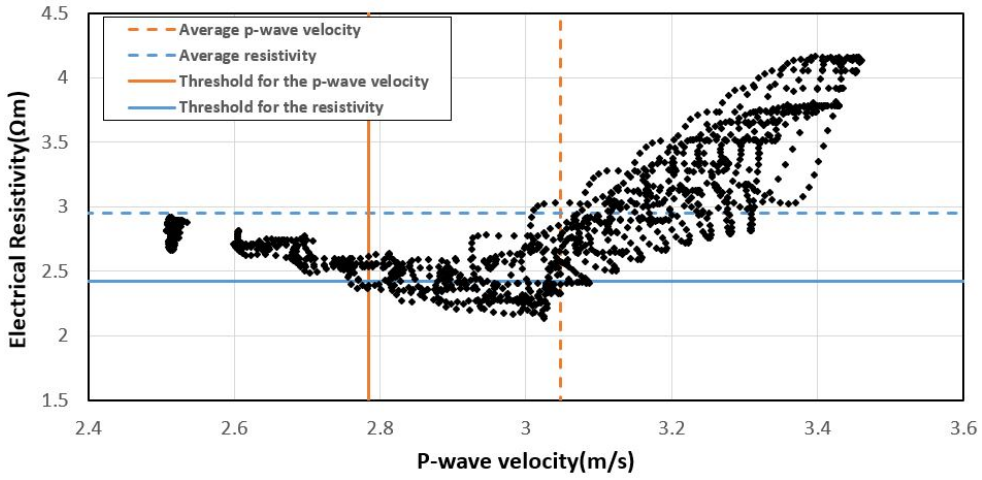


(b)

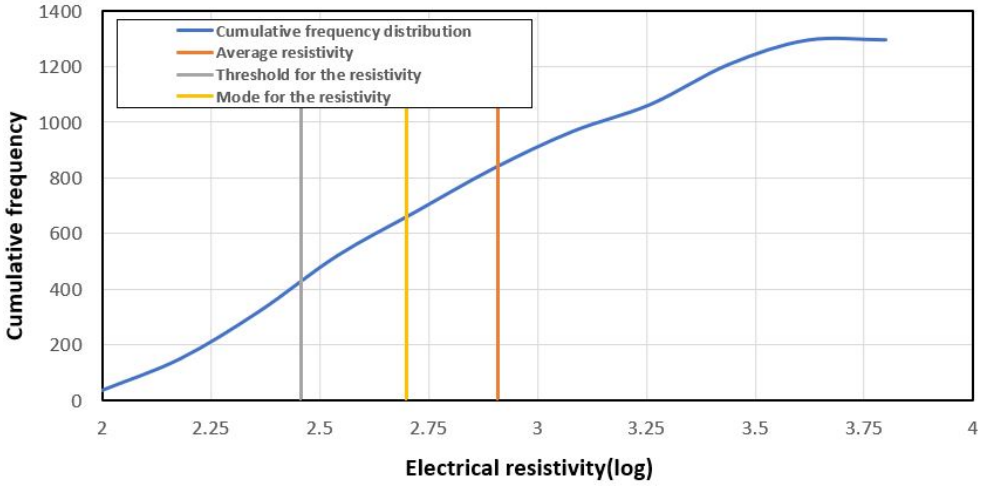


(c)

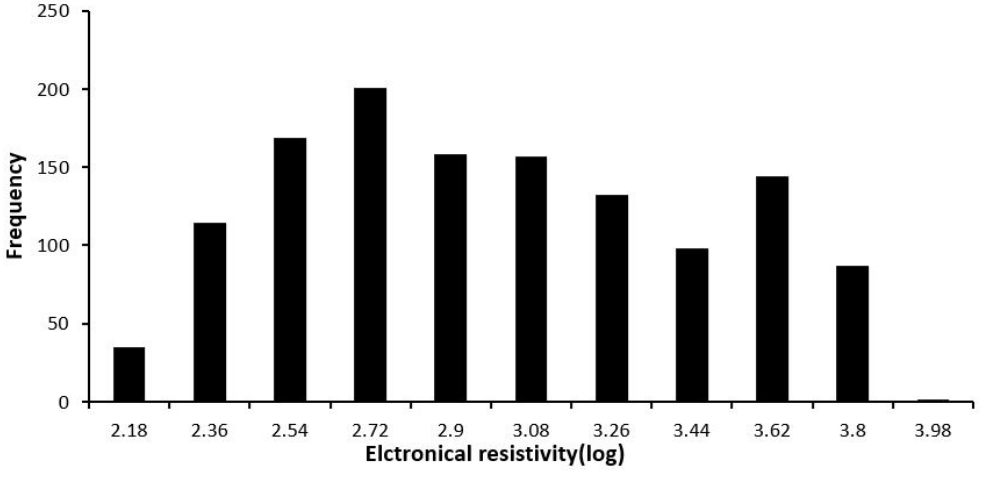
Fig. 7. Correlation of P-wave velocities and electrical resistivities (Fig. 5a): (a) two attributes classified into four quadrants; (b) cumulative frequency distribution with the calculated thresholds of the negative value; and (c) histogram of electrical resistivities showing a non-normal distribution.



(a)



(b)



(c)

Fig. 8. Correlation of P-wave velocity and electrical resistivity (Fig. 5a) after log-scaling: (a) two attributes classified into four quadrants; (b) cumulative frequency distribution with the threshold of the positive value; and (c) histogram of electrical resistivities showing normal distribution.

현장자료의 교차해석단면

앞에서 설정한 두 가지 속성자료의 임계값들을 바탕으로 전기비저항-S파속도와 전기비저항-P파속도의 교차해석 단면(Figs. 9a, 9b)을 각각 작성하고 각 속성들의 조합(해당 사분면)에 따라 취약구간(weak zone), 잠재취약구간(potentially weak zone), 양호구간(fair zone), 안전구간(safe zone)으로 구분하였다. 단면에서 해석된 각 구간들의 지질공학적인 특성은 시추공(BH-01, BH-02) 조사에서 확인된 지하매질 및 SPT의 N값 자료와 함께 분석하였다.

전기비저항-S파속도의 교차해석 단면(Fig. 9a)에서 고비저항-저속도의 적색으로 표현된 취약구간(weak zone)은 점토가 적고 주로 공극률과 입경이 큰 비교적 느슨한 매질로 구성된 것으로 해석되며, 이와 같은 해석은 BH-02에서 수행한 SPT 결과에서 실트(silt)로 구성된 중심코어의 N값이 1~5(매우연약-견고)를 보이는 것과 잘 부합한다(Table 3).

하늘색 구간은 큰 공극 안에 스며드는 유체에 의한 포화정도에 따라 취약해질 수 있는 잠재취약구간(potentially weak zone)으로서 BH-01의 성토층, 중심코어의 밑부분(7.6~11.5 m)과 기반암, BH-02의 풍화암에 해당한다. 성토층은 자갈이 섞인 실트와 모래로 이루어져 있으며 중심코어의 하부 충전물은 실트질 모래, 점토, 자갈로서 그 구성 입자의 크기가 비교적 크고 점토의 함량이 상대적으로 작고 메마른 매질(dry material)로서 비교적 비저항이 높고 그 밑의 풍화암은 공극률이 작고 상대적으로 잘 다져진 매질로서 강도(stiffness)가 높아 S파속도 또한 크게 나타난 것으로 해석하였다.

초록색의 저비저항-고속도 구간은 BH-01에서 중심코어의 윗부분에 해당하는 점토로 구성되어 입자의 크기가 작고 점토의 함량이 많아 비저항이 낮으며 SPT의 N값이 4~8(연약-보통견고)의 잘 다져진 매질로서 강도가 높아 안전구간(safe zone)으로 해석하였다.

저비저항-저속도의 청색구간은 BH-01에서 중심코어의 중앙부(4.8~7.6 m)에 있는 중심점토의 실트에서 점토의 함량이 상대적으로 많은 부분에서 나타나고 있다. 다짐이 약하여 S파속도 및 강도가 작고 점토의 함량이 많고 습윤한 매질(wet material)로서 비저항 또한 작아 적색의 취약구간에 비해 상대적으로 안전한 양호구간(fair zone)으로 구분하였다.

전기비저항-P파속도 교차해석 단면(Fig. 9b)은 전기비저항-S파속도 교차해석 단면(Fig. 9a)에 비해 포괄적인 특성으로 나타난다. 특히 전기비저항-S파속도 교차해석 단면에서 점토의 함량에 따라 청색으로 표현된 부분이 전기비저항-P파속도 교차해석 단면에서는 적색과 초록색으로 대체 표현되고 두 색의 경계부에서만 청색을 약간 띤다. 성토층은 BH-01의 SPT에서 N값이 9~10으로서 견고한 경도를 가지고 있음에도 측선 전체의 단면에서 고비저항-저속도의 취약구간으로 분류되어 전기비저항-P파속도 교차해석은 매질의 지반강도와 직접 관련된 해석으로 보기 힘들다.

이에 비해 두 시추공의 중심코어 하부에 분포하는 실트질 모래, 점토, 자갈들의 혼재층은 BH-01에서는 두 교차해석 단면 모두 다른 색으로 구분되었지만, BH-02에서는 전기비저항-P파속도 단면에서만 적색과 하늘색으로 구분되었다. 따라서 P파 속도를 이용한 교차해석은 지반강도에 영향을 많이 받는 취약구간과 안전구간의 구분에 강조를 둔 안전평가에는 부적합하고 그 대신 물성의 변화에 반응하는 지하매질의 불연속 경계면을 탐지하는데 효과적인 것으로 평가하였다.

전기비저항-S파속도 교차출력의 지반강도에 따른 해석단면(Fig. 9a), 전기비저항-P파속도 교차출력의 지하매질의 물성변화에 따른 해석단면(Fig. 9b), 시추조사의 매질정보와 SPT의 N값 자료를 종합하여 제방의 지하모식도(Fig. 9c)로 나타냈다. BH-01을 중앙으로 측선의 양쪽에 보이는 취약구간은 점토가 적고 입경이 커서 공극이 큰 느슨한 매질로서 중심코어의 N값이 작은 부분과 부합된다. 중앙부분에 보이는 안전/양호 구간은 중심코어의 점토함량이 비교적 많아 비저항이 낮게 나타나며 N값이 상대적으로 높은 잘 다져진 매질로서 지반강성이 높은 것에 기인한 것으로 해석된다.

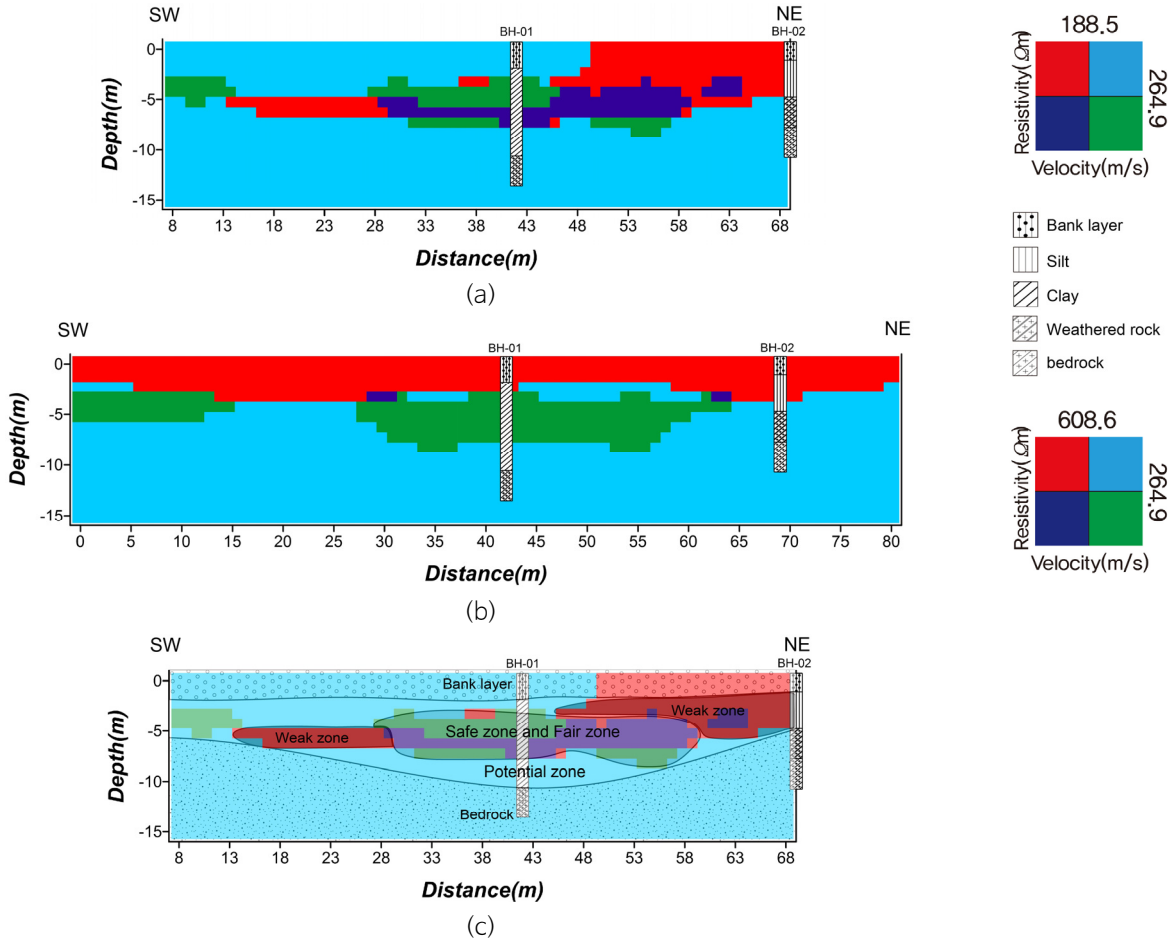


Fig. 9. Crossplot sections for: (a) electrical resistivity - S-wave velocity; (b) electrical resistivity - P-wave velocity; and (c) the interpretation section incorporating (a), (b), and borehole data. The crossplot section of electrical resistivity - S-wave velocity is effective in detecting the potentially weak, weak, fair, and safe zones, whereas the crossplot section of electrical resistivity - P-wave velocity is effective in delineating the stratigraphic interface.

결 론

저수지 제방의 취약구간과 안전구간을 파악하기 위해 저수지 제방에서 전기비저항탐사, 탄성파 굴절법탐사, 표면파탐사를 수행하였다. 탐사결과 측선 양단에서 약 8 m 깊이의 상대적으로 높은 비저항은 측선 중앙으로 갈수록 깊어지는 이러한 양상은 P파 및 S파속도 구조에서도 나타났다. 복합탐사자료에서 일관적으로 보이는 이러한 형태는 기반암으로 해석되는데 중심코어의 하부 경계면의 윤곽을 잘 보여주고 있다.

전기비저항과 탄성파속도 자료를 각각 해석하는 대신 이 연구에서는 전기비저항-P파속도, 전기비저항-S파속도를 서로 상관시켜 하나의 단면도를 해석하는 교차출력 기법을 개발하여 현장자료에 적용하였다. 현장자료에 앞서 수평 4층 구조 및 경사진 파쇄대의 모델링 자료에 시험 적용한 결과 평균에서 표준편차를 뺀 값을 임계값으로 설정할 때 두 속성자료의 사분면(고비저항-고속도, 고비저항-저속도, 저비저항-고속도, 저비저항-저속도)을 효과적으로 구분할 수 있었다. 현장자료에 적용할 때 전기비저항의 임계값이 음수로 나오는 문제는 비정규 분포를 보이는 자료와 관련된 것으로 로그 스케일로 변환하여 자료를 정규화시킨 후 임계값을 설정하였다.

전기비저항-P파속도와 전기비저항-S파속도의 교차해석 단면을 시추자료 및 표준관입시험 자료와 함께 분석하였다. 전기비저항-P파속도 교차해석 단면은 매질의 지반강도 보다 지층의 물성변화를 보이는 경계면(성토층, 중심코어, 기반암)을 파악하는 데에 효과적이었으며 전기비저항-S파속도의 교차해석 단면에서는 중심코어 구간이 취약, 잠재취약, 안전, 양호 구간으로 세분화 될 수 있었다. 취약구간은 점토가 적고 입경과 공극이 커서 느슨한 매질로 해석되며, 안전구간은 중심코어의 불투수성 점토함량이 비교적 많고 입경이 작은 잘 다져진 지반강성이 높은 매질로서 이러한 해석은 표준관입시험에서 관찰된 N값들의 분포와 잘 부합된다. 결과적으로 전기비저항-S파속도의 교차출력 해석이 제방의 안전성 평가에 효과적인 것으로 확인되는데 이것은 S파속도가 매질의 강성률과 직접 관련되기 때문으로 해석된다.

사 사

본 연구는 충북대학교 국립대학육성사업(2021)의 지원을 받아 작성하였습니다. 논문 심사를 해주신 심사위원분들과 자료 수집에 도움을 준 송수민, 풍혜림님께 감사드립니다.

References

Bae, D.S., Lee, N.Y., Kwon, H.M., Jang, J.S., Cha, M.S., Yoon, W.Y., Kim, M.S., Lee, M.G., 2011, Statistics-theory and applications, Cheongmungak, Seoul, 750p.

Burger, H.R., 1992, Exploration geophysics of the shallow subsurface, Prentice Hall, New Jersey, 483p.

Cho, I.K., Yong, H.H., 2019, 3D resistivity survey for dam safety inspection, Geophysics and Geophysical Exploration, 22(3), 99-106 (in Korean with English abstract).

Diprowin, 2000, Electrical resistivity processing software, Hisong Ltd., Daejeon, Korea.

González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., Otero, C., 2004, Geological engineering, Pearson Education, Madrid, 744p.

Hayashi, K., Inazaki, T., Kitao, K., Kita, T., 2013, Statistical estimation of geotechnical soil parameters in terms of cross-plot of S-wave velocity and resistivity in japanese levees, Proceedings of the 2013 SEG Annual Meeting, Houston, 1259-1263.

Hayashi, K., Konishi, C., 2010, Joint use of a surface-wave method and a resistivity method for safety assessment of levee systems, Proceedings of the GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling and Design, Florida, 1340-1349.

Kim, J.H., Yi, M.J., Song, Y.H., Seol, S.J., Kim, K.S., 2007, Application of geophysical methods to the safety analysis of an earth dam, Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 12(2), 221-235.

Kim, J.I., Kim, J.S., Lee, S.J., Cho, K.S., Kim, J.W., 2021, Interpretation of electrical resistivity tomogram with contents of clay minerals for the land creeping area, The Journal of Engineering Geology, 31(2), 187-197 (in Korean with English abstract).

Kim, J.S., Song, Y.S., Yoon, W.J., Cho, I.K., Kim, H.S., Nam, M.J., 2015, An introduction to applied and environmental geophysics, 2nd ed., Sigmapress, Seoul, 729p.

Kim, K.Y., Jeon, K.M., Hong, M.H., Park, Y.G., 2011, Detection of anomalous features in an earthen dam using inversion of p-wave first-arrival times and surface-wave dispersion curve, Exploration Geophysics, 42(1), 42-49.

Kirsch, R., 2006, Groundwater geophysics: A tool for hydrogeology, Springer, New York, 500p.

Lee, S.J., 2021, Delineation of geological anomaly zone of land creeping using integrated geophysical methods, Ph.D. Thesis, Chungbuk National University, 164p.

Park, S.G., Song, S.H., Choi, B.G., Lee, B.H., 2002, Applicability of geophysical prospecting for water leakage detection

in water utilization facilities, Proceedings of the Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists symposium, Daejeon, 179-195.

Reynolds, J.M., 2010, An introduction to applied and environmental geophysics, 2nd ed., West Sussex, Wiley-Blackwell, 696p.

Shon, H.O., Kim, J.S., Song, Y.S., Yun, W.J., Kim, I.S., Seo, M.C., Kim, K.Y., Cho, I.K., 2000, Geophysical exploration of shallow subsurface, Sigmapress, Seoul, 716p.

Song, S.H., Song, Y.H., Kwon, B.D., 2005, Application of hydrogeological and geophysical methods to delineate leakage pathways in an earth fill dam, Exploration Geophysics, 36(1), 73-77.

Tassis, G., Rohdewald, S., Rønning, J.S., 2017, Refraction seismic modeling and inversion for the detection of fracture zones in bedrock with the use of Rayfract® software, Geological Survey of Norway, 62p.

Wodajo, L.T., 2018, Integrity assessment of earthen dams and levees using cross-plot analysis of seismic refraction and electrical resistivity tomograms, Electronic Theses and Dissertations, University of Mississippi, 125p.

Yoon, J.R., Kim, J.M., Choi, B.H., 2005, Assessment of levee safety using electrical surveys, Journal of the Korean Geophysical Society, 8(2), 53-61 (in Korean with English abstract).