

수치지도를 활용한 탄성파탐사 자료와 시추조사 자료의 지구통계학적 통합 분석

Geostatistical Integration Analysis of Geophysical Survey and Borehole Data Applying Digital Map

김 한 샘¹⁾ · 김 정 준¹⁾ · 정 총 기[†]

Hansaem Kim · Jeongjun Kim · Choongki Chung

Received: December 17th, 2013; Revised: December 27th, 2013; Accepted: February 12th, 2014

ABSTRACT : Borehole investigation which is mainly used to figure out geotechnical characterizations at construction work has the benefit that it provides a clear and convincing geotechnical information. But it has limitations to get the overall information of the construction site because it is performed at point location. In contrast, geophysical measurements like seismic survey has the advantage that the geological stratum information of a large area can be characterized in a continuous cross-section but the result from geophysics survey has wide range of values and is not suitable to determine the geotechnical design values directly. Therefore it is essential to combine borehole data and geophysics data complementally. Accordingly, in this study, a three-dimensional spatial interpolation of the cross-sectional distribution of seismic refraction was performed using digitizing and geostatistical method (kriging). In the process, digital map were used to increase the trustworthiness of method. Using this map, errors of ground height which are broken out in measurement from boring investigation and geophysical measurements can be revised. After that, average seismic velocity are derived by comparing borehole data with geophysical speed distribution data of each soil layer. During this process, outlier analysis is adapted. On the basis of the average seismic velocity, integrated analysis techniques to determine the three-dimensional geological stratum information is established. Finally, this analysis system is applied to dam construction field.

Keywords : Borehole investigation, Geophysical survey, Digital map, Kriging, Outlier analysis

요 지 : 대규모 건설공사, 토목공사 시 지반 특성 파악을 위해 주로 수행되는 시추조사는 명확하고 확실한 지반정보를 제공한다는 장점이 있지만 좌표 공간상 지점마다 수행되기 때문에 현장 전체의 지반특성 파악이 어렵다. 이에 반해 탄성파, 중력파 등을 이용하는 물리탐사는 시추조사와는 달리 연속적인 단면의 정보를 제공하고 넓은 지역의 지반특성을 파악할 수 있다는 장점을 가지고 있는 반면 측정값의 지반공학적 상관성이 불확실하기 때문에 지반 특성을 직접적으로 결정하기에는 적합하지 않다는 단점이 있다. 따라서 대상 부지의 정확한 지반정보 파악을 위해서는 두 가지 이중 지반조사 자료, 즉 물리탐사자료와 시추조사 자료를 상호 보완하여 이용하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 이중 지반조사의 통합분석 기법을 제안하였으며, 분석 방법의 정확성과 신뢰성을 높이기 위하여 수치지도도를 도입하였다. 수치지도도를 사용하여 시험, 조사 단계에서 발생할 수 있는 지반고의 오차를 보정하였으며, 표고와 기울기를 분석하여 대상분석 영역 설정의 지표로 사용하였다. 다음으로 탄성파의 속도분포 단면 등고선을 디지털화(digitizing)하고 지구통계학적 방법인 크리깅(kriging)을 이용하여 3차원으로 공간보간하였으며, 이를 시추조사와 결합하여 각 토층 경계 별 평균 탄성파 속도를 도출하였다. 자료를 도출하는 과정에서 이상치 분석을 수행하여 결과의 신뢰성을 높였으며, 최적화된 평균 탄성파 속도를 활용하여 3차원 층상 정보를 결정할 수 있는 통합 분석 기법을 수립하였다. 최종적으로 수립된 통합분석 기법을 A댐 비상 여수로 건설현장에 적용하였다.

주요어 : 시추조사, 탄성파 탐사, 수치지도, 공간보간, 이상치 분석

1. 서 론

일반적으로 구조물 건설을 목적으로 지반조사를 시행하는 경우, 시추조사가 널리 이용된다. 시추조사는 채취된 시료를 확인함으로써 확실하고 구체적인 지반정보를 제공하

지만 제한된 지점의 지반정보만 제공하기 때문에 전체 대상 부지의 층상 분포를 파악하는 데는 어려움이 있다. 반면에 탄성파탐사는 직접적으로 지반의 역학적 특성을 파악하기는 어렵지만, 지표면 상의 탐사 측선을 따라 수행되기 때문에 연속적인 2차원 지반의 탄성파 단면정보를 얻을 수 있다

1) Department of Civil & Environmental Engineering, Seoul National University

† Department of Civil & Environmental Engineering, Seoul National University (Corresponding Author : geolabs@snu.ac.kr)

는 장점이 있다(Kim et al., 2012c).

따라서 대상 부지의 정확한 지반정보 파악을 위해서는 시추조사와 물리탐사 자료의 장점을 상호 보완하여 이용하는 것이 필요하다. 즉 특정 대상 부지의 지반특성과 분포양상을 합리적으로 평가하기 위해서는 탄성파탐사로부터 획득한 연속적인 탄성파 속도 분포와 직접적인 지층 정보를 제공하는 시추조사 자료를 비교·분석하여 종합적으로 해석하는 것이 바람직하다(Jaime & Mohan, 1990; Oh et al., 2004; Joh et al., 2006; Kim et al., 2012b).

이를 위해 Kim et al.(2012a)은 시추조사 자료의 층상 정보와 탄성파탐사의 2차원 토모그래피의 공간적 상관관계를 고려하여, 층상 정보를 토모그래피에 중첩하는 방법으로 수치화된 2차원 층상 단면을 결정하는 방법을 제안하였다. 이렇게 결정된 2차원 층상 단면의 경우 지반의 불균질성 및 국지적인 변동성을 고려하지 못해 3차원 공간보간을 통해 합리적인 3차원 지반구조를 파악하는데 한계가 있다. 또한 시험 방법상 물리탐사 측선을 기준으로 시추조사 지점이 일치하거나, 근접해서 분포하고 있지 않기 때문에 중첩하는 과정에서 결정된 2차원 층상 단면별로 해당 위치에서의 지반특성을 반영하고 있다고 보기 어렵다.

이에 따라 중첩과정에서 발생하는 한계점을 해결하고자 지반의 불균질성 및 지반조사 자료 간의 공간적인 상관관계를 고려할 수 있도록 지구통계학 및 통계적 기법을 활용하고자 한다. 먼저 이격거리 발생에 따른 중첩과정의 오차를

해결하고자 물리탐사 2차원 분포 단면의 속성값을 기준으로 3차원 공간보간을 수행함으로써, 지반조사가 미수행된 지점을 포함한 평가 대상부지 전체의 3차원 지반특성 정보를 확보할 수 있다. 또한 통합분석에 사용된 지반조사 자료의 불확실성을 고려하기 위해 이상치 분석 기법을 바탕으로 지반조사 자료의 최적화가 가능하다.

본 연구에서는 국내에서 시공된 A댐 현장을 대상으로 수집된 다수의 굴절파 탄성파탐사 자료와 시추조사 자료를 활용하였다. 우선 탄성파탐사 자료에 대하여 3차원 공간보간 기법(kriging)을 적용함으로써, 대상 부지의 3차원 탄성파 속도 분포를 결정하고, 시추조사 자료와 동일 지점의 탄성파 속도를 비교·분석함으로써 대상 지역 내 각 지층 경계에서의 대표 탄성파 속도를 도출하였다. 또한 분석과정의 신뢰도를 확보하기 위해서 교차검증을 통한 이상치 분석 방법을 적용하였다. 이상치 분석을 통해 최적화된 지층 경계별 탄성파 속도 범위를 Box and Whisker plot을 통해 결정함으로써 실무 현장에서의 즉각적인 지층파악을 위한 지표를 제시하였다. 이렇게 결정된 지층 경계별 대표 탄성파 속도를 통해 대상 부지 전체의 연속적인 3차원 지층분포를 확보할 수 있다.

2. 이종 지반조사 자료의 3차원 통합분석 기법

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 이종 지반조사 자료의 지구통계학적 3차원 통합분석 기법을 제안하였다. 본 기법은

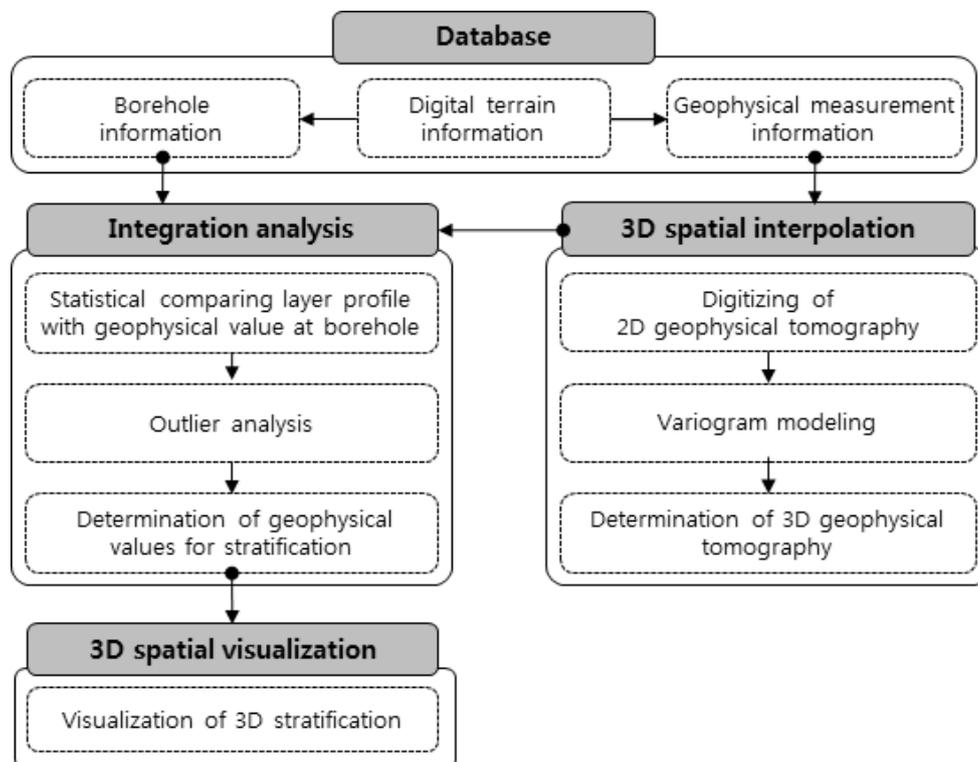


Fig. 1. Framework of geostatistical integration analysis of geophysical survey and borehole data

GIS를 기반으로 통합분석 과정을 자동화된 시스템 알고리즘으로 구성하였다. 먼저 대상현장에서 수행된 시추조사, 물리탐사 자료와 함께 현시점의 정확한 지형정보를 확보하기 위해 수치지도 자료를 수집하여 데이터베이스로 구축한다. 데이터베이스는 GIS를 기반으로 공간좌표 정보와 각 속성정보를 연계하여 입력될 수 있도록 설계하였다(ESRI, 2006). 이 때 시추조사 및 물리탐사 자료의 지표고 정보의 측정오류를 보정하고자, 연속적인 지형정보를 확보할 수 있는 수치지도를 활용하였다.

두 번째로 다수의 물리탐사 결과 중 2차원 토모그래피를 대상으로 3차원 공간보간을 한다. 일반적으로 설계단계의 지반조사 보고서상에서 물리탐사 토모그래피는 측정값의 전처리 과정이 완료된 그림파일 형태로 제공된다. 따라서 각 토모그래피 분포 단면의 공간좌표를 확보하기 위해 수치지도 좌표를 바탕으로 디지털라이징을 수행한다. 이후 Kriging 기법을 활용하여 물리탐사 결과(속성값)의 3차원 공간보간을 통해 3차원 물리탐사 토모그래피를 결정한다.

세 번째로 3차원 물리탐사 토모그래피를 바탕으로 각 시추조사 지점에서의 층상 정보와 물리탐사 속성값을 비교·분석함으로써 대상현장의 층경계에 따른 대표 물리탐사 속성값을 결정한다. 이 때 시추조사 정보의 경우, 지층의 공간적 변동성을 고려하고 측정 및 분석 방법의 오차를 보정하기 위해 교차검증(Cross-validation)을 통한 이상치를 제거하여 최적화된 시추조사 층상 정보를 결정한다. 최적으로 결정된 층경계별 물리탐사 속성값에 따라 선행적으로 결정된 물리탐사 3차원 토모그래피를 기준으로 3차원 층상 정보를 확보한다.

2.1 지반조사 자료 및 수치지도 데이터베이스 구축

이중 지반조사 자료의 지구통계학적 3차원 통합분석의 첫 단계는 대상현장의 시추조사, 물리탐사 자료 및 수치지도의 데이터베이스 구축이다.

지반의 상태 및 특성 파악 목적의 다양한 조사 방법 중 가장 직접적이고 대표적인 조사 방법은 시추조사(Borehole Drilling Investigation)이다. 시추조사는 대상 부지의 지표면에서 연직 방향의 지반 주상을 획득하기 위해 수행되지만, 목적에 따라 경사 방향이나 횡방향의 지반 주상을 얻기 위해 활용되기도 한다. 이와 함께 지반의 상태 평가와 시료 채취를 위한 표준 관입 시험(Standard Penetration Test; SPT)이 병행되기도 한다(Sun et al., 2008). 물리탐사 방법 중 탄성파탐사는 지표 부근에서 충격, 진동 또는 발파 등의 방법으로 탄성파(P파, S파)를 발생시켜 지층 경계에서 반사되어 돌아오는 파를 지표에 설치한 측정 장치로 기록하여 지하의

속도구조를 알아내는 탐사방법으로 굴절법 탄성파탐사, 반사법 탄성파탐사, 하향식 탄성파탐사 등이 있다. 이 중에서도 굴절법탐사는 토목공사에서 기반암까지의 깊이, 지하수 탐사·석유탐사 및 지각 구조 규명 등에 주로 이용된다. 굴절법 탄성파탐사는 기초의 설치 지점을 중심으로 여러 차례 반복·수행되며, 일반적인 경우 여러 단면을 직교하여 조사한다. 이와 같이 평가 대상 지역 내 공간 분포상 격자로 배치되는 탄성파탐사 축선과 동일 영역 내 수행되는 시추조사 자료를 활용하여 통합분석이 수행된다.

구축 데이터베이스를 바탕으로 수치지형 정보를 이용하여 시추조사 정보와 탄성파탐사 정보의 지표고 정보를 보정한다. 시공 대상 지역의 지표고는 시추조사나 탄성파 탐사 이후 수행된 공사 등 외부 요인에 의해서 변화할 수 있다. 원지반 지층구조의 정확한 모델링을 위해서는 이로 인한 지표고의 차이를 보정할 필요가 있으며, 이를 위하여 가장 최근에 제작된 수치지도를 통해서 지형 레이어를 추출하여 보정에 활용한다. 수치지도 지형 레이어를 기준으로 시추조사 상의 지표고와 물리탐사 2차원 분포 단면상의 지표고를 보정하여 이중 지반조사 자료 통합분석에 사용하였다.

수치지형 정보는 지표고의 보정뿐만 아니라 통합분석 대상영역을 결정하는 지표로도 활용된다. 대상영역의 크기가 작아질수록 이후에 진행될 물리탐사 자료의 공간보간으로 인한 신뢰성은 높아지지만, 대상 영역 안에 포함되는 시추조사 자료의 개수가 적어지는 문제점이 있을 수 있다. 반면에 대상영역의 크기가 커질수록 분석 방법에 사용되는 시추조사 자료의 개수는 많아지지만 공간보간 영역의 확대로 물리탐사 공간보간 자료의 신뢰성이 떨어질 수 있기 때문에 적절한 통합분석 대상영역을 확보하는 것이 중요하다. 또한 공간보간은 대상 영역의 지형적 특성에 영향을 받게 되는데, 이를 고려하기 위해서는 수치지도를 활용하여 분석 대상 지역의 지표고 및 기울기를 분석하여 지역적 변동성이 유사한 지형조건을 선정한다.

2.2 탄성파탐사 정보의 3차원 공간보간

직선 형태의 물리탐사 단면들을 이용하여 탄성파 속도 공간분포의 디지털 공간정보를 확보하기 위해서 Fig. 2와 같이 그림 파일의 탄성파탐사 결과자료를 디지털라이징하는 과정이 선행되어야 한다. 구체적인 과정은 다음과 같다.

- ① 탄성파탐사 결과(jpg, bmp, png 등의 이미지파일)를 표준화 및 입력한다(Fig. 2(a)). Fig. 2(a)는 2차원 탄성파 토모그래피(m/s)을 나타낸다.
- ② 대상 분석 영역과 격자(Grid) 크기 등을 결정하고, 이

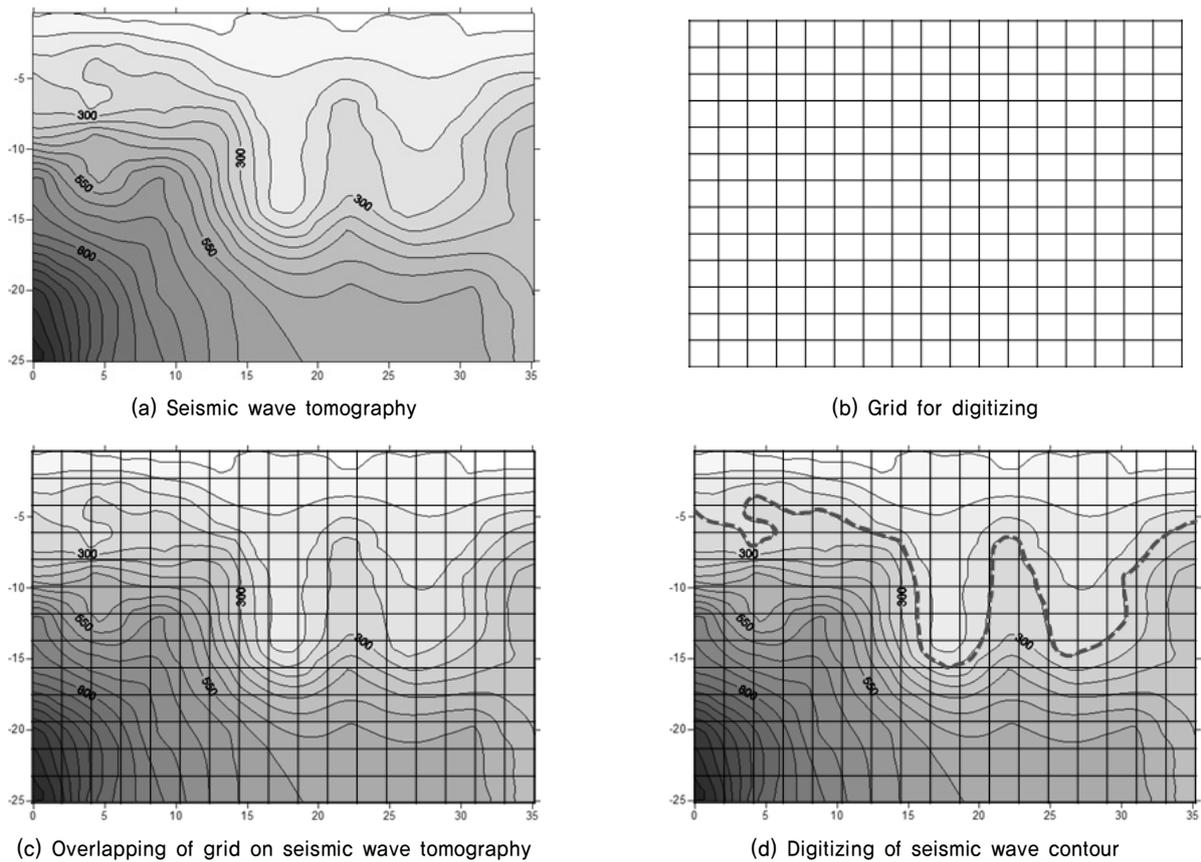


Fig. 2. Example of the digitizing for an elastic wave velocity cross section

를 디지털 좌표계로 설정한다(Fig. 2(b)).

- ③ 탄성과 탐사결과를 격자 파일 상(GIS를 활용한 DEM, 수치표고 모델)에 일치하는 위치에 설정한다(Fig. 2(c)).
- ④ 결정된 격자를 기준으로 탄성과 탐사 결과(이미지 파일)의 탄성과 속도 분포선을 따라 디지털라이징(Digitizing)을 통해 단면의 탄성과 속도 속성값(ex. 500 m/s, 1,000 m/s, 1,500 m/s)을 수치화한다(Fig. 2(d)).

이에 따라 얻어진 탄성과 속도별 2차원 단면의 각 격자상의 값을 기지점으로 공간보간 기법에 적용하여 3차원 탄성과 속도 분포를 결정하였다. 본 연구에서는 대표적인 공간보간 기법인 kriging을 사용하였다. kriging에서 한 미지점에 대한 기존 자료의 신뢰도(혹은 가중치)는 통계학적인 분산으로 정의된다. kriging 방법은 자료값과 예측값이 분산에 의해 서로 밀접하게 관련되어 있어 기존 자료의 위치로부터 공간상으로 멀리 떨어진 미지점일수록 그 미지점의 분산값은 커지며, 가중치는 작아지는 상관관계를 지닌다. 즉 kriging 방법에서 분산은 가중치의 함수로 쓰이며, 기존 자료에 가까운 부분은 분산값이 작고 신뢰도가 높으며, 멀어질수록 분산값은 커지고 신뢰도는 떨어진다. 즉 미지점과 기존 자료점의 거리가 가까울수록 예측 시 기존 자료점에 적용되는

가중치가 크고 멀어질수록 가중치는 줄어들게 된다. 미지 영역의 자료들을 보간하는 크리깅에는 여러 방법이 있으며, 본 연구에서는 보편적으로 활용되는 ordinary kriging을 적용하여 공간 지층 분포를 구축하였다(Isaaks & Srivastava, 1989).

2.3 이상치 분석을 활용한 3차원 층상 정보 구축

탄성과 속도 3차원 공간정보는 일정한 크기의 Grid로 구역화할 수 있다. Grid의 크기는 물리탐사 축선의 길이를 기준으로 정하게 되는데, Grid의 크기가 작을수록 정확하고 정밀한 공간분포 구성이 가능하다. 각 Grid는 공간좌표 상 위치정보와 함께 탄성과 속도 정보를 포함한다.

3차원 탄성과 속도 토모그래피의 Grid 좌표계 상에 시추조사 정보를 해당 위치에 중첩하였으며, 각 층 경계에서 탄성과 속도 값들을 비교·분석하였다. 시추조사 지점을 기준으로 동일지점에서의 탄성과 속도 3차원 공간정보는 가상의 시추공이라고 볼 수 있으며, 실제 시추조사와 같이 층상 정보를 표시하는 대신 심도에 따른 탄성과 탐사 속도 값을 표시한다. 이 때 시추조사의 층상 정보(층별 두께)를 기준으로 심도에 따른 탄성과탐사 속도를 비교함으로써 각 층상 경계(퇴적토, 풍화토, 풍화암, 연암 등)별로 평균적인 탄성

파 속도를 결정할 수 있다.

각 층상 경계별 평균 탄성과 속도를 결정하는 과정은 일련의 통계적 처리 과정으로써 통계분석 대상이 되는 표본내의 일부 자료가 표본 집단의 성질을 대표한다고 보기 어려운 경우가 있을 수 있다. 이러한 경우에는 통계분석에서 이와 같은 표본의 포함 여부를 정량적으로 평가할 필요가 있다. 분석 대상 물리량 가운데 주어진 평가수준에서 통계적으로 동일한 성질의 측정값이 아니라고 할 수 있는 이상치(Outlier)를 골라내어 적절한 통계분석이 이루어질 수 있도록 해야 한다(David, 1976; Clayton & Andre, 1997; Deutsch & Journel, 1998; Caers, 2001). 본 연구에서는 표본의 공간적 상관관계를 고려한 이상치 검증 기법 중 교차검증(Cross-validation) 기법을 적용하였다.

공간보간에 의해 미지점에 대해 예측한 물리량은 항상 오차가 존재할 가능성이 있다. 교차검증 방법은 대상 영역의 기지점의 자료 가운데 하나의 물리량을 미지점으로 가정하고 나머지 자료로부터 이를 예측함으로써 실측된 물리량과 예측된 물리량의 차이를 통해 해당 지점의 물리량이 주변의 측정값이 갖는 경향을 따르는지 판단하여 수행하게 된다. 교차검증은 기지의 자료점이 평가대상이기 때문에 일부 지역에 편중되어 분포하는 자료를 분석하는 경우에는 평가의 정확도가 다소 왜곡될 수 있다는 점을 유의해야 하며, 구체적인 분석과정은 다음과 같다.

- ① 실제 자료치, 베리오그램, 유효 반경을 이용하여 관심 영역의 크리깅 예측값을 계산한다.
- ② 실제 자료치를 미지점으로 가정하고 제거한다.
- ③ 베리오그램, 크리깅을 통해 실제 자료값들이 제거된 지점에서의 값을 예측한다.
- ④ 예측된 값들과 실제 자료치(true value)를 비교하여 편

향성이나 종속성을 파악한다.

교차검증의 평가는 예측값과 실제 자료값을 그래프로 그려 기울기가 1인 직선 상에서 벗어나는 정도를 보고 공간보간 자료의 신뢰성 평가를 하였다(Kim et al., 2012a; Isaaks & Srivastava, 1989).

마지막으로 이상치 분석과정을 거쳐 이상치가 제거되어 최적화된 표본을 이용하여 각 토층 경계별 평균 탄성과 속도의 분포를 결정할 수 있다. 탄성과 속도 분포는 정량적인 통계분포를 나타낼 수 있는 Box and Whisker plot으로 도식화 할 수 있다. Box and Whisker plot에서는 최대값, 최소값, 중앙값, 사분위값 등으로 대상부지의 층 경계별 탄성과 속도 분포 특성을 대표하는 값을 제시하게 되며, 본 특성값을 기준으로 탄성과 속도의 3차원 공간분포를 층서가 구분된 실제 대상 부지의 지반조건으로 모델링한다.

다만 본 기법은 대상 분석 지역 내에서 탄성과 탐사 자료는 심도가 깊어질수록 탄성과 속도는 커진다는 것을 가정하며, 대상 분석 지역 내에서 토층이 역전된 층이 있는 경우에는 본 분석방법이 적용될 수 없다는 한계가 있다.

3. 현장적용

3.1 현장조건

본 연구에서 제안된 이종 지반조사 자료의 통합 분석 기법을 국내에서 시공된 A댐 비상 여수로 공사 현장에 적용하였다. 현장에 적용된 굴절법 탄성과 탐사 측선의 길이는 5,530 m이고, Fig. 3과 Fig. 4의 직선과 같이 6개의 횡단 측선과 6개의 종단 측선이 서로 직교하여 분포하며, 시추조사는 총 31공이 수행되었다. 또한 대상 현장의 1: 5,000 수

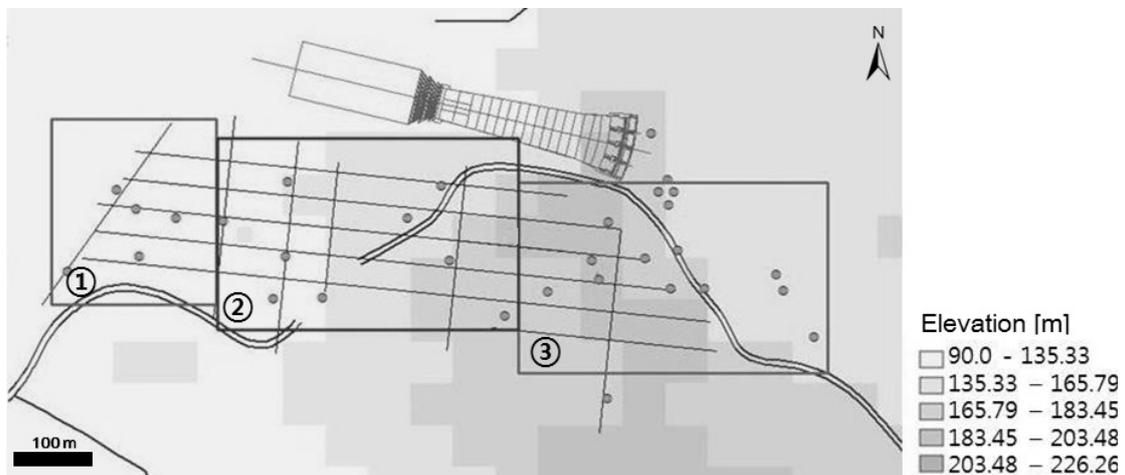


Fig. 3. Spatial distribution of boring data and seismic refraction test data based on digital terrain elevation in target site

치지도의 지형 레이어 정보를 바탕으로 ESRI사의 ArcGIS를 활용하여 표고 및 경사의 공간분포(cell size : 5 m × 5 m)를 분석하였다. 대상 지역은 동쪽 또는 동남쪽 지역이 상대적으로 표고가 높았으며, 서쪽으로 갈수록 낮아지는 특성을 보였다. 이에 따라 Fig. 3과 Fig. 4와 같이 분석된 표고와 경사 분포에 따라 대상영역을 세 개의 구역으로 구분하였다. 세 개의 구역을 기준으로 ①구역은 표고의 변화폭이 작은 비교적 평탄한 지형이지만 분석에 사용될 시추공(5공)이 적어 분석 결과의 신뢰성이 떨어지며, ③구역은 비교적 많은 시추공(14공)이 존재하지만 표고의 변화폭, 즉 비탈면 경사의 변화가 심하다는 특성이 있다. 이에 반해 대상 지역 중앙에 위치한 ②구역의 경우 상대적으로 표고의 변화 폭이 10 m 내외로 비교적 지형적인 변동이 작으며, Table 1과 같이 9공의 시추조사 자료가 공간상 산재하여 분포하였다. 이에 따라 본 연구에서는 대상현장의 지형 및 지반의 지역적 변동성을 고려하기 위해 전체 대상영역과 ②구역의 지반조사 자료를 선별적으로 구분하여 분석에 활용하였다.

또한 Table 1과 같이 ②구역에 분포하는 시추조사 자료의 층상 조건을 제시하였다. 퇴적토층과 풍화토층의 두께는 각각 2.4 m와 4.5 m였으며, 토층 전체의 평균 두께는 5.7 m였다. 또한 풍화암층과 연암층의 두께는 각각 1.5 m와 2.9 m였으며, 연암 또는 경암을 포함하는 기반암까지의 심도는 6.9 m였다. 특히 'NBH-10'에서 풍화토층이 11 m 존재하였으며, 'NBH-3'과 'NBH-4'에서만 연암층이 발견되었다.

3.2 현장적용 결과

선택한 구역 내의 탄성과 탐사 결과는 그림과일의 형태로 존재하기 때문에 이를 3차원으로 공간보간 하기 위해서는 탄성과 탐사 결과를 디지털 정보화하여야 한다. 이를 위하여 탐사 단면과 공간 좌표상 위치정보가 포함된 1 m 간격의 Blank Grid를 중첩시켰다. 다음으로 탄성과 탐사 속도(0 m/s, 1,000 m/s, 1,500 m/s, 2,000 m/s, 2,500 m/s)에 대해 각각 공간정보를 확보할 수 있도록 디지털이징한 후, 각 속도 별로 공간보간하여 대상 부지의 탄성과 속도에 대한 3차원

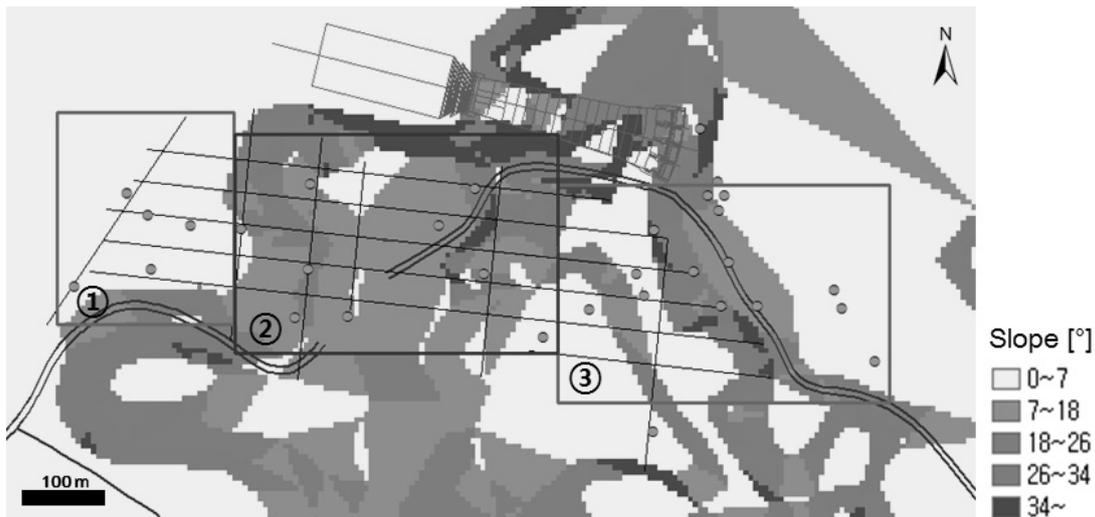


Fig. 4. Slope spatial distribution in target site

Table 1. Thickness of deposit soil, weathered soil, weathered rock, soft rock and hard rock for boring data in target site

Boring Name	Deposit Soil (m)	Weathered soil (m)	Weathered Rock (m)	Soft rock (m)	Hard rock (m)	Total (m)
NBH-3	3.5	2.5	3.4	4.0	33.2	46.6
NBH-4	5.6	-	-	1.8	37.8	45.2
NBH-8	1.0	7.0	1.0	-	31.0	40.0
NBH-10	2.0	11.0	1.0	-	41.0	55.0
NBH-11	-	3.0	0.6	-	34.7	38.3
NBH-12	-	2.0	1.0	-	23.5	26.5
NBH-16	2.0	1.5	0.8	-	30.0	34.3
NBH-17	0.5	7.3	-	-	41.5	49.3
NBH-18	-	2.0	3.0	-	26.0	31.0
Average	2.4	4.5	1.5	2.9	33.2	40.7

토모그래피를 확보하였다.

다음으로 3차원 탄성과 토모그래피 상의 시추조사 정보를 중첩시켰다. 대상현장 시추조사의 층상은 퇴적토, 풍화토, 풍화암, 연암, 경암으로 구성되었으며, 3차원 토모그래피로부터 시추조사 지점에 해당하는 탄성과 속도를 추출하여 Table 2와 같이 비교하였다. 이 때 3차원 공간보간 결과는 지형특성에 따라 크게 영향을 받을 수 있다. 이를 고려하기 위해 다음과 같이 2가지 Case로 구분하여 공간보간을 실시하였다.

Case 1: A댐 비상 여수로에 수행된 모든 굴절법 탄성과 탐사 단면을 대상으로 공간보간

Case 2: 지형의 지역적 변동성을 고려할 수 있도록 Fig. 3과 Fig. 4의 중앙 영역(②영역)의 굴절법 탄성과 탐사를 대상으로 공간보간

물리탐사 자료를 전체 영역으로 공간보간 한 경우에 각 층 경계에서의 탄성과 속도의 표준편차가 전체적으로 큼을 알 수 있었다. 또한 풍화암 상층의 탄성과 속도가 연암 상층의 평균 탄성과 속도보다 큰 경우가 존재하는 등 분석 결과의 신뢰성이 떨어짐을 알 수 있다. 지형의 변화가 작은 영역으로 한정하여 공간보간을 한 경우에는 전체 영역으로 공간보간 한 경우보다는 표준편차가 줄어들었지만 경암 상층의 평균탄성과 속도가 연암 상층의 탄성과 속도보다 작은 경우가 발생하는 등 해석 결과의 신뢰성이 여전히 낮게 나타남을 확인할 수 있다.

공간보간 방법에 의한 오차 이외에도 시추조사나 물리탐

사 등 지반조사 과정 중에 조사자의 실수에 의하여 이상치가 발생하거나 디지털라이징 과정에서 이상치가 발생할 수 있다. 이를 고려하여 이상치 분석을 적용하고, 그 결과에 따른 해석 결과를 Table 2에 제시하였다. 교차검증(Cross-validation) 방법에 의한 이상치 분석방법(Outlier analysis)을 사용하였으며, 실제 기존값과 추정값이 10%의 차이가 날 경우 이상치로 분류하였다. 이상치 분석의 한 예로 경암 상층에 대한 이상치 분석 결과를 Fig. 5에서 나타내었으며, 이상치는 Empty symbol로 표시하였다.

이상치 분석 결과를 적용한 각 층 경계별 탄성과 속도는 Table 2와 같다. 이상치 분석 기법(Outlier analysis)을 적용하지 않았을 때와 비교해 보았을 때, 표고 및 경사 분포에

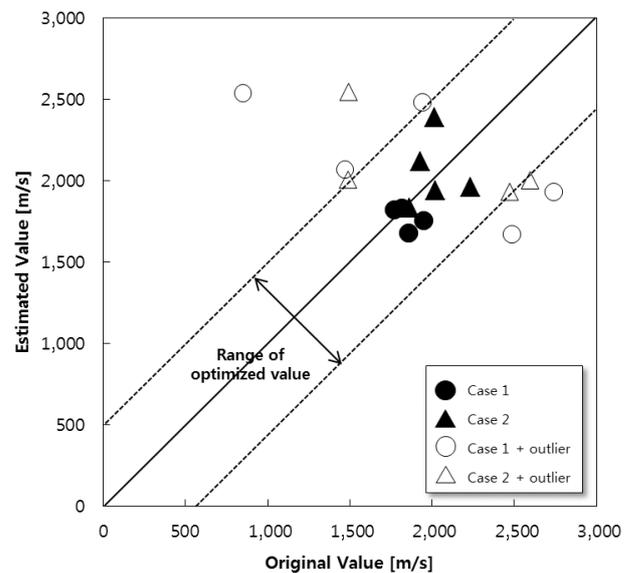


Fig. 5. Outlier analysis result of upper boundary of hard rock

Table 2. Elastic wave velocity of each subsoil boundary applying outlier analysis result (m/s)

Boring Name	Deposit Soil / Weathered Soil		Weathered Soil / Weathered Rock		Weathered Rock / Soft Rock		Soft Rock / Hard Rock		
	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2	
NBH-3	1,075.3*	1,037.0*	1,566.5	1,518.9	2,145.5	2,048.0	2,738.5*	2,595.9*	
NBH-4	-	-	-	-	1,507.1	1,829.0	1,942.6*	2,017.3	
NBH-8	381.0	591.7	2,267.6*	2,239.2*	-	-	2,486.5*	2,472.0*	
NBH-10	330.6*	392.9*	1,411.5	1,474.8	-	-	1,470.7*	1,488.6	
NBH-11	-	-	1,654.8	1,432.8	-	-	1,950.5	2,020.0	
NBH-12	-	-	1,503.2	1,503.5	-	-	1,856.5	1,860.1	
NBH-16	1,061.1*	1,206.1*	1,602.2	1,682.8	-	-	1,817.8	2,233.5	
NBH-17	130.9*	632.9	-	-	-	-	1,772.9	1,929.2	
NBH-18	-	-	339.6*	1,174.2*	-	-	849.0*	1,491.6*	
Average	Original	595.8	772.1	1,575.2	1,575.2	1,826.3	1,938.4	1,876.1	2,012.0
	Outlier analysis	381.0	612.3	1,547.6	1,522.6	1,826.3	1,938.4	1,849.4	1,924.8
Standard deviation	Original	463.6	337.0	574.3	329.6	451.5	154.9	543.1	361.5
	Outlier analysis	-	29.1	94.0	95.4	451.5	154.9	75.6	247.9

* : Outlier

따라 구분한 Case 1과 Case 2 모두 표준편차 값이 크게 줄어든 것을 확인할 수 있었다. 이에 따라 이상치 분석 기법을 적용하였을 경우, 최적화된 지층 경계별 탄성과 속도 값을 결정할 수 있을 것으로 판단하였다.

이 때 평균 탄성과 속도를 층의 분류에 바로 사용하는 경우도 있지만, 분류 기준값(평균, 중간값 등)을 지반공학자가 자료를 보고 직접 지정할 수 있도록 Box and Whisker plot을 이용하여 Case 2의 각 층 경계별 탄성과 속도를 Fig. 6과 같이 결정하였다. Box and Whisker plot은 자료 분포의 위치, 산포도, 대칭성 또는 치우침 판단에 적합하며, 특히 이상치 존재 유무 파악에 효과적이다. 작성방법 상, 먼저 자료의 평균값을 상자 안의 실선으로 표시하고, 1사 분위(25%)와 3사 분위(75%)에 해당하는 값을 끝단으로 하는 상자를 그린다. 또한 자료의 최대값, 최소값을 상자 외부에 선 또는 점으로 표시하며, 이상치 값을 표시한다.

Fig. 6과 같이 각 층별 경계에 따라 평균값을 기준으로 퇴적토층과 풍화토층의 경계는 612.3 m/s, 풍화토층과 풍화암층의 경계는 1,522.6 m/s, 풍화암층과 연암층의 경계는 1,938.4 m/s, 연암층과 경암층의 경계는 1,924.8 m/s로 결정되었다. 대체적으로 심도가 깊어질수록 즉 퇴적토, 풍화토, 풍화암, 연암, 경암 순서로 탄성과 속도가 전반적으로 점점 증가하게 된다. 다만 시추조사 지점 9개의 제한적인 층상 정보만을 비교·분석하였기 때문에, 연암 상층의 평균 탄성과 속도(1,938.4 m/s)가 경암 상층의 평균 탄성과 속도(1,924.8 m/s)보다 크게 나타났다. 그러나 대상 지역의 경우 시추조사 결과상 연암은 2개 지점에서 존재하였기 때문에 연암층이 없거나 얇게 분포하는 것으로 판단되며, 특히 Korea ministry

of land, Infrastructure and Transport(2012)에서 제시한 RQD에 따른 암분류 기준을 토대로 할 때 대상 지역 연암의 RQD는 70으로 경암으로 분류할 수 있다. 따라서 대상 지역에 일부 분포하는 연암은 경암에 포함시켜 기반암으로 판단하였다. 또한 Fig. 6에 기존의 국내 암분류 기준 중 하나인 Korea ministry of land, Infrastructure and Transport(2012)상의 탄성과 속도에 따른 암분류 기준을 제시하였다. 이 때 본 통합분석을 통해 결정한 토층부(퇴적토층과 풍화토층)와 풍화암층의 경계에 해당하는 속도값은 1,522.6 m/s로 기존의 기준인 1,500 m/s보다 상대적으로 컸으며, 풍화암층과 연암층 경계의 속도값은 1,938.4 m/s로 기존의 기준인 2,000 m/s보다 상대적으로 작았다. 이는 대상영역 내의 시추조사 층상 조건을 바탕으로 탄성과 속도의 지역성을 고려한 층경계 기준이기 때문에 다른 지역에 적용할 경우, 해당 지역에서 수행된 지반조사 자료를 바탕으로 지역별 층경계 기준을 제시할 수 있다.

이에 따라 Case 2의 이상치 분석을 적용하여 결정된 층경계별 대표 탄성과 속도를 기준으로 Fig. 7과 같이 3차원 지반구조를 결정하였다. 3차원 지반구조는 선형적으로 결정된 3차원 탄성과 토모그래피의 공간 좌표를 바탕으로 각 층상별 특성정보가 함께 연계되어, 3차원 데이터베이스로 구축된다. 3차원 지반구조는 전체 대상영역에 대해서 연속적인 지형 및 지반특성 정보를 확인할 수 있으며, 선택적으로 관심영역의 2차원 층상 단면 정보를 수치화할 수 있다. 대상영역의 경우, Fig. 7과 같이 퇴적토층의 두께는 2 m~6 m, 풍화토층의 두께는 1 m~3 m, 풍화암층의 두께는 4 m~12 m로 분포하며, 전반적으로 퇴적토와 풍화토를 포함하는

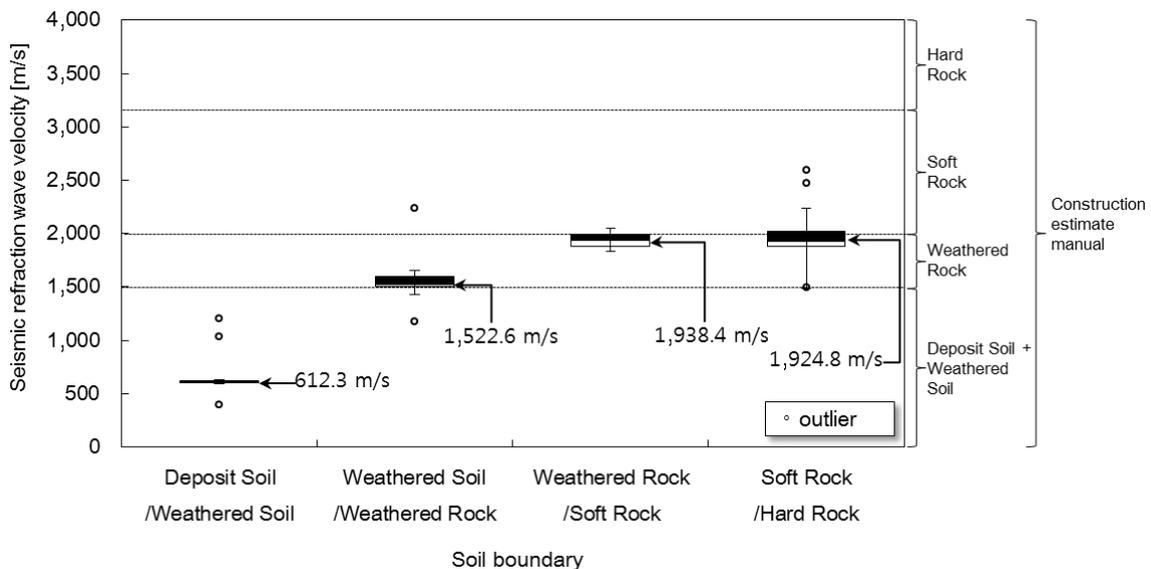


Fig. 6. Box and whisker plot for seismic refraction wave velocity of each subsoil boundary applying outlier analysis result (Case 2), And previous criterion for stratification by Construction estimate manual (Korea Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2012).

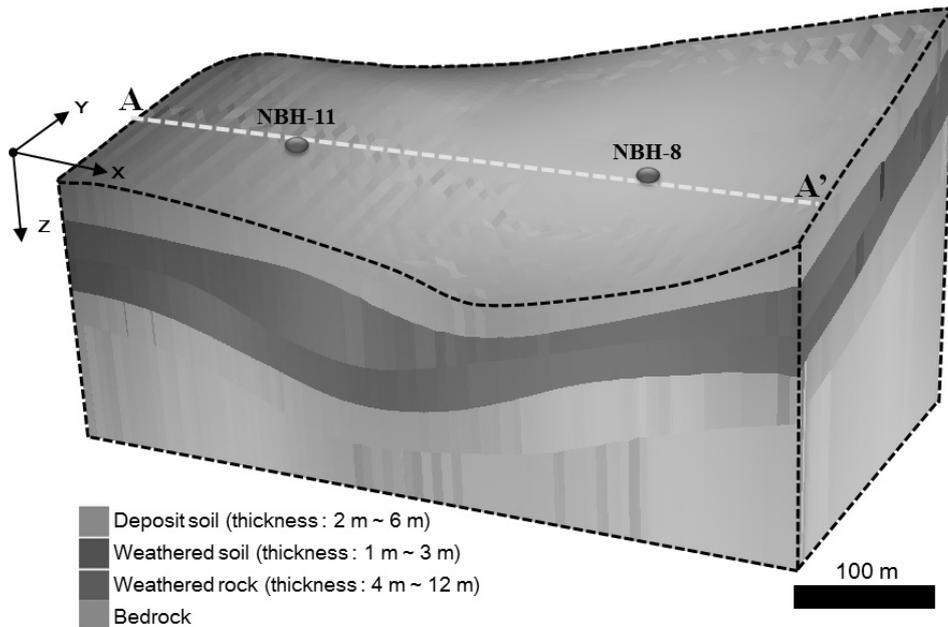


Fig. 7. 3D geo-layer of target area (Case 2)

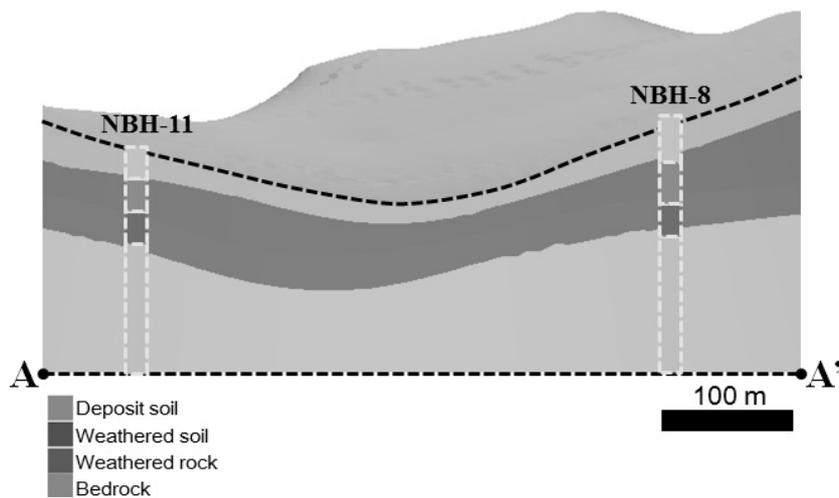


Fig. 8. Cross-sectional view along the line A-A' with the verification borehole points NBH-8 and NBH-11

토층이 최대 7 m까지 분포하는 것으로 확인되었다. 또한 Fig. 7의 3차원 지층구조를 대상으로 A-A'에 대한 2차원 층상 단면을 Fig. 8과 같이 가시화하였다. 이 때 A-A' 단면 주변의 시추공 'NBH-8'과 'NBH-11'의 층상 조건을 함께 도시하여 비교·분석한 결과, 시추층상과 비교적 유사한 층상 경계를 결정한 것으로 확인하였다.

본 연구에서는 대상 지역의 지층구조 및 지반특성을 파악하기 위해 시추조사와 물리탐사가 함께 수행된 경우, 본 이종 지반조사 자료의 3차원 통합분석 기법의 적용이 가능하다. 대상영역의 수치지도를 활용하여 지형의 공간적 변동성을 고려한 후, 공간보간된 3차원 탄성파 토모그래피와 시추조사 자료를 교차검증을 통해 이상치를 제거하여 비교·분석함으로써, 대상영역의 지형 및 지반의 공간적 변동성을

고려한 탄성파 속도의 층경계 기준을 결정하였다. 이를 바탕으로 대상영역의 연속적인 3차원 지층구조를 확보하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 지반의 지층구성 및 지반정수 분포 양상을 파악하기 위한 방법으로 시추조사 자료, 탄성파 탐사 자료를 결합한 이종 지반조사 자료의 통합분석 방법을 제안하였으며, 이를 국내 A댐 비상 여수로 건설현장에 적용하였다. 먼저 시추조사, 탄성파탐사 자료와 수치지도 자료를 수집하여 데이터베이스화하였다. 이후 수치지도를 사용하여 시험, 조사 단계에서 발생할 수 있는 지반고의 오차를 보정

하며, 표고와 기울기를 분석하여 대상 분석 영역 설정의 지표로 사용하였다. 다음으로 탄성파의 속도분포 단면 등고선을 디지털화(digitizing)하고 크리깅(kriging)을 적용하여 3차원 탄성파 토모그래피를 결정하였다. 탄성파 토모그래피를 바탕으로 층상 정보와 물리탐사 속성값의 비교·분석함으로써, 대상현장의 층경계에 따른 대표 물리탐사 속성값을 결정하였다. 이 때 시추조사 정보의 경우, 지층의 공간적 변동성을 고려하고 측정 및 분석 방법의 오차를 보정하기 위해 교차검증(Cross-validation)을 통한 이상치를 제거하여 최적화된 탄성파 속도에 따른 층경계 기준을 결정하였다. 이와 함께 대표 탄성파 속도값을 결정하는 과정에서 분류 기준값을 지반공학자가 자료를 보고 직접 지정할 수 있도록 Box and Whisker plot을 통해 분포특성을 확인하였다. 최종적으로 결정된 층경계별 탄성파 속도값에 따라 선행적으로 결정된 물리탐사 3차원 토모그래피를 기준으로 3차원 지층구조를 확보하였다.

최종적으로 A댐 비상 여수로 건설현장의 시추조사 결과와 물리탐사 결과의 이중지반조사 결과를 통합분석하여 각 층별 경계에 따라 평균값을 기준으로 층서를 구분하였다. 퇴적토층과 풍화토층의 경계는 612.3 m/s, 풍화토층과 풍화암층의 경계는 1,522.6 m/s, 풍화암층과 연암층의 경계는 1,938.4 m/s, 연암층과 경암층의 경계는 1,924.8 m/s로 결정되었으며, 대체적으로 심도가 깊어질수록 즉 퇴적토, 풍화토, 풍화암, 연암, 경암 순서로 탄성파 속도가 전반적으로 점점 증가하게 된다. 이에 따라 분포하는 퇴적토층의 두께는 2 m~6 m, 풍화토층의 두께는 1 m~3 m, 풍화암층의 두께는 4 m~12 m로 분포하며, 전반적으로 퇴적토와 풍화토를 포함하는 토층이 최대 7 m까지 분포하는 것으로 확인되었다.

데이터베이스화된 3차원 지층구조를 활용하여, 향후 대상 지역의 토목공사 시 관심영역의 지반 특성정보를 연속적인 2차원 또는 3차원 공간상 수치정보로 확인할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 “환경친화적 준설토 확보, 매립 및 운송거리 30 km 이상급 이송 기술 개발(12기술혁신E12)”의 연구성과의 일부임을 밝히며, 재정지원에 감사드립니다.

References

1. Caers, J. (2001), Geostatistical reservoir modeling using statistical pattern recognition. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 29, No. 3, pp. 177~188.
2. Clayton, D. and Andre, J. (1997), GSLIB: Geostatistical software library and user's guide, pp. 250~259.
3. David, M. (1976), The practice of Kriging. In: M. Guarascio, M. David, C. Huijbregts, eds. *Advanced Geostatistics in the Mining Industry*, Boston, pp. 31~48.
4. Deutsch, C. V. and Journel, A. G. (1998), *GSLIB: Geostatistical software library and user's guide* (Oxford University Press, Oxford), pp. 58~77.
5. ESRI (2006), *ArcGIS 9: Using ArcGIS desktop*, ESRI Press, New York, pp. 122~125.
6. Isaaks, E. H. and Srivastava, R. M. (1989), *An introduction to applied geostatistics*, Oxford University Press, Oxford, pp. 175~177.
7. Jaime, J. G. H. and Mohan, S. R. (1990), ISIM3D: An ansi-C three-dimensional multiple indicator conditional simulation program. *Computers & Geosciences*, Vol. 16, No. 4, pp. 395~440.
8. Joh, S. H., Kim, D. S., Kang, T. H., Kim, K. S., Chang, H. S. and Jo, C. H. (2006), Comparison of surface-wave techniques in the spatial profiling of subsurface stiffness. *Site and Geomaterial Characterization*, pp. 188~195.
9. Kim, H. S., Kim, H. K., Shin, S. Y. and Chung, C. K. (2011), Application of statistical geo-spatial information technology to soil stratification, *Journal of Korean Geotechnical Society*, Korean Geotechnical Society, Vol. 27, No. 7, pp. 59~68 (in Korean).
10. Kim, H. S., Kim, H. K., Shin, S. Y. and Chung, C. K. (2012a), Application of statistical geo-spatial information technology to soil stratification in the seoul metropolitan area, *Georisk*, Vol. 6, No. 4, pp. 221~228.
11. Kim, H. S., Kim, M. G., Kim, J. Y., Kim, K. L. and Chung, C. K. (2012b), Geostatistical integration of borehole and geophysical data for design of offshore-foundation, *Journal of Korean Geotechnical Society*, Korean Geotechnical Society, Vol. 28, No. 5, pp. 109~120 (in Korean).
12. Kim, M. G., Kim, H. S., Kim, J. Y. and Chung, C. K. (2012c), Geostatistical integration analysis of refraction seismic survey and borehole data and application, *KSCE Conference & Civil Expo 2012*, Korean Society of Civil Engineers, pp. 376~370 (in Korean).
13. Korea ministry of Land, Infrastructure and Transport (2012), *Construction estimate manual*. pp. 25~26 (in Korean).
14. Oh, S. H., Chung, H. J. and Lee, D. K. (2004), Geostatistical integration of MT and borehole data for RMR evaluation, *Journal of Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists*, Vol. 7, No. 2, pp. 121~129 (in Korean).
15. Sun, C. G., Chun, S. H., Ha, T. G., Chung, C. K. and Kim, D. S. (2008), Development and application of GIS-based tool for earthquake-induced hazard prediction, *Computers and Geotechnics*, Vol. 35, No. 3, pp. 436~449.