레이리파 분산을 역산하여 구한 횡파속도를 이용한 원주시의 부지특성

김충호 · 알리 아비드 · 김기영 *

강원대학교 지구물리학과

Site Characterization using Shear-Wave Velocities Inverted from Rayleigh-Wave Dispersion in Wonju, Korea

Chungho Kim, Abid Ali, and Ki Young Kim*

Department of Geophysics, Kangwon National University

요약: 원주시 저고도 지역에서의 천부 횡파속도(v_s) 및 부지특성을 파악하기 위해 2013년 2월부터 2013년 9월 사이의 20일간 4.5 Hz 수직 지오폰 12 ~ 24개를 이용하여 원주시내 내의 78 지점에서 레일리파를 기록하였다. 레일리파 분산곡선은 확장된 공간자기상관함수법으로 구하였고, v_s 를 구하기 위하여 감소최소자승법으로 역산하였다. 이들 1-D 모델로부터 구한 풍화암질 기반암의 깊이(D_b), 기반암의 횡파속도(v_s^b), 토양층의 평균 횡파속도($\bar{v}_s$), 30 m까지 평균 횡파속도(v_{s30})는 95% 신뢰구간에서 각각 16.3 ± 0.7 m, 576 ± 8 m/s, 290 ± 7 m/s, 418 ± 13 m/s로 산출되었다. v_{s30} 의 적절한 지시자를 결정하기 위해서 v_{s30} 과 지표면 경사도($r=0.46$) 및 고도($r=0.43$)와의 상관계수를 계산하였고, 개별적으로 평가한 v_{s30} 과의 상관성을 종합하여 지표면 경사도, 고도, 암상의 가중치를 각각 0.45, 0.45, 0.1으로 하는 선형 경험식을 제시하였다. 그러나 이 경험식과 역산으로 구한 v_{s30} 의 상관성이 미약하여($r=0.50$), 적용시에는 상대적으로 큰 오차범위를 고려해야 할 것이다.

주요어: 횡파속도, 레일리파 분산곡선, 확장된 공간자기상관함수, v_{s30} , 지시자

Abstract: To reveal shear-wave velocities (v_s) and site characterization of Wonju, Korea, Rayleigh waves were recorded at 78 sites of lower altitude using 12 to 24 4.5-Hz vertical geophones for 20 days during the period of February to September 2013. Dispersion curves of the Rayleigh waves obtained by the extended spatial autocorrelation method were inverted using the damped least-squares method to derive v_s models. From these 1-D models, the average v_s to a depth of 30 m (v_{s30}), v_s of weathered rocks, depths to these basement rocks, and average v_s of the overburden layer were derived to be 16.3 ± 0.7 m, 576 ± 8 m/s, 290 ± 7 m/s, and 418 ± 13 m/s, respectively, in the 95% confidence range. To determine adequate proxies for v_{s30} , we computed correlation coefficients of v_{s30} with topographic slope ($r = 0.46$) and elevation ($r = 0.43$). An empirical linear relationship is presented as a combination of individually estimated v_{s30} with weighting factors of 0.45, 0.45, and 0.1 for topographic slope, elevation, and mapped lithology, respectively. Due to a weak correlation between v_{s30} obtained from inversion of dispersion curves and the proxy-based estimation ($r = 0.50$), however, the relatively large error range should be considered for applications of this relationship.

Keywords: Shear-wave velocity, Rayleigh-wave dispersion, extended spatial autocorrelation method, v_{s30} , proxy

서론

기반암 상부의 미고결층에서는 지진에 의해 발생한 지진파

가 증폭되어 구조물에 영향을 미치게 되며, 외력의 진동수가 구조물의 고유진동수와 일치할 때 진폭이 증폭되는 공진현상이 일어난다. 이러한 공진현상은 기반암 상부의 지반특성에 따라 다르게 나타나며 이를 부지효과라 한다. 지반특성에 대한 정보를 정량적으로 얻기 위해서는 지반조사를 실시해야 하나, 모든 지역에서의 지반조사는 경제적, 시간적, 환경적 이유 등으로 실시하기 어려운 것이 현실이다. 따라서 우리나라는 Borchardt (1994)에 의해 제안된 지하 100 ft (약 30 m)까지의 평균 횡파속도(v_s)인 v_{s30} 을 기준으로 지반을 분류한 ICBO (International Conference of Building Officials, 1997)의 국제 건축 기준(Uniform Building Code)을 사용한다(Sun *et al.*,

2013년 12월 23일 접수; 2014년 2월 3일 수정; 2014년 2월 6일 채택

*Corresponding author

E-mail: kykim@kangwon.ac.kr

Address: Department of Geophysics, Kangwon National University, Hyojadong, Chuncheon, Kangwon-do 200-701, Korea

©2014, 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.

2005).

v_s 30는 수직탄성파탐사(vertical seismic profiling)를 통해서 정확하게 구할 수 있는데, 시추공을 굴착해야 하는 제약이 있으므로 상대적으로 경제적이며 효율적인 표면파 및 굴절파 탐사를 통해서 구하기도 한다. 그러나 시추공 및 지표 지구물리학적 방법으로 v_s 30을 정확하게 측정하는 것도 현실적으로 한계가 있기 때문에, 손쉽게 구할 수 있는 자료와 v_s 30 사이의 관계식을 구하여 넓은 지역에 적용코자 하는 노력이 진행되어 왔다. 대표적 지시자(proxy)로는 지표면 경사도(Wald and Allen, 2007; Allen and Wald, 2009; Thompson and Wald, 2012), 지질학적 정보(Romero and Rix, 2001; Wills and Clahan, 2006; Wald *et al.*, 2011), 위성사진을 이용한 지형학적인 분류(Yong *et al.*, 2008; Yong *et al.*, 2012), 고도(Lee *et al.*, 2001; Chiou and Youngs, 2008) 등이 있다.

연구지역인 원주는 거주 인구가 30만 명이 넘고 면적 또한 870 km²에 달해 강원도에서는 인구 밀도가 가장 높은 도시이다. 이 도시는 한반도의 중심이자 강원도의 남서쪽에 위치하며, 서울에서 동쪽으로 120 km 정도 떨어져 있다. 지형학적으로는 백두대간의 큰 부분을 이루는 태백산맥의 남서쪽에 있으며, 기복과 경사가 심한 특징이 있다. 지질학적으로는 주로 원생대 편마암, 중생대 화강암, 신생대 제 4기 충적토로 이루어져 있다(Fig. 1; Park *et al.*, 1989).

1978년 기상청에서 첫 지진관측소를 설치한 이후 기록된 가장 큰 지진은 2004년 5월에 울진에서 발생한 지진으로 규모는 5.1에 달한다(Kang and Baag, 2004). 또 근래에 강원도에서 발생한 지진으로는 2007년 1월에 기록된 규모 4.8의 월정사 지진이 있다(Jung *et al.*, 2013). 이와 같이 원주는 지진으로부터 안전한 대륙 내부에 위치함에도 지진이 빈번하게 관측되며, 핵확산금지조약에 의해 우선적으로 지진관측소의 설치가 필요한

지역으로 선정된 바 있다(CTBTO, 2013).

이 연구에서는 강원도 주요도시의 지진 위험도 평가를 위한 지구물리학적 부지분류를 목적으로 원주시계 내의 상대적으로 인구가 밀집되어 있는 저고도 지역을 대상으로 확장된 공간자기상관법(extended spatial autocorrelation; ESPAC)을 이용하여 능동 및 수동적 표면파탐사를 실시하고 레일리파 위상속도 분산곡선을 역산하여 지표부근의 v_s 30 구조를 구하고자 한다. 또한 이로부터 v_s 30 값을 지표면 경사도, 고도, 암상 등의 지시자들과의 상관성을 분석하고, 이들 지시자들로부터 v_s 30을 구하는 관계식을 구하고자 한다.

지질 환경

원주는 옥천계와 평남분지 사이의 경기육괴에 위치해 있으며, 동경 127.73° ~ 128.22°와 북위 37.14° ~ 37.50°의 범위에 해당하는 지역이다(Fig. 1). 지형적으로는 태백산맥에서 뻗어져 나온 남서 방향의 산맥들로 인해 북동-남서 방향으로 능선을 이루고, 높은 산들이 곳곳에 산재해 있어 급경사를 이루고 있다. 지질학적으로는 크게 원생대 흑운모편마암 및 흑운모편암, 중생대 쥐라기 양운모화강암 및 흑운모화강암, 백악기 석영반암 및 석영섬록암, 신생대 제 4기 충적토가 주를 이룬다(Park *et al.*, 1989).

원주지역의 최고령 암석으로 추정되는 흑운모편암 및 흑운모편마암 노두는 동부 및 남동부에서 발견되며, 기원암에 해당되는 퇴적암으로부터 측정한 연대는 약 10 억년으로 원생대 초기 또는 그 이전에 형성된 것으로 여겨진다. 또한 흑운모편암 내의 규암층 발달과 석영의 관찰되어, 육성퇴적층이 변성되었고 변성정도는 저급 내지 중급에 해당되는 것으로 알려져 있다(Park *et al.*, 1989). 이후 쥐라기 시대에 한반도를 가로지르며 일어난 조산운동으로 관입한 대보화강암류의 흑운모화강암이 원주의 서부 및 북부에 넓게 분포하고 있다. 원주를 가로질러 흐르는 섬강 및 섬강의 지류 부근에 충적층이 발달해 있으나, 두께는 두껍지 않을 것으로 여겨진다(Park *et al.*, 1989). 지질 구조적으로는 노두 규모에서의 습곡 및 단층들이 곳곳에서 관찰되나, 원주 전역을 가로지르는 대규모 습곡 및 파쇄대는 발견되지 않는다.

배경 이론

이 연구에서는 레일리파로부터 위상속도 스펙트럼을 작성하기 위해 Aki (1957)에 의해 처음 소개된 후, 더욱 실용적으로 발전된 확장된 공간자기상관법(Okada, 2003)을 사용하였다.

각주파수 ω 와 거리 r 의 함수인 공간자기상관계수 $\rho(\omega, r)$ 는 제 0차 1종 베셀함수 J_0 로 나타낼 수 있다. 즉,

$$\rho(\omega, r) = J_0(r\omega/c(\omega)), \quad (1)$$

Fig. 1. Locations of the 78 recording sites (solid circles) superimposed on a simplified geologic map of Wonju, Korea (Park *et al.*, 1989). The lithology comprises Precambrian gneiss and schist (green), Mesozoic granite and granodiorite (orange), and Quaternary alluvium (yellow). Several faults (solid line) are also indicated in the eastern part. Sites A (cyan circle), B (red circle), and C (white circle) denote locations where some exemplary data were recorded.

이 되고, 각각의 주파수에 해당하는 위상속도로부터 위상속도 스펙트럼을 작성할 수 있다(Jung and Kim, 2014). 레일리와 위상속도는 층상모델의 경우에

$$c = c(f; v_{p1}, v_{s1}, \rho_1, h_1; v_{p2}, v_{s2}, \rho_2, h_2; \dots; v_{pN}, v_{sN}, \rho_N, h_N), \quad (2)$$

으로 나타낼 수 있으며, 여기서 N 은 층의 개수, v_{pi} 은 각 층의 종파속도, v_{si} 은 횡파속도, ρ_i 은 밀도, 층의 두께 h_i 이다 (Schwab and Knopoff, 1972). 식 (2)의 복잡한 함수는 테일러 전개를 적용하여 1차 편미분 방정식의 근사식으로 나타낼 수 있고, v_{si} 가 레일리와 위상속도에 미치는 영향이 v_{pi} 와 ρ_i 보다 크기 때문에, v_{pi} 와 ρ_i 를 v_{si} 의 함수로 변환하여 변수를 줄이는 것이 가능하다(Xia *et al.*, 1999). 따라서 측정된 위상속도 c_i^{obs} 와 계산된 위상속도 c_i^{cal} 의 차 Δc_i 는

$$\Delta c_i = \sum_{j=1}^N \left[\left(\frac{\partial c_i}{\partial v_{pj}} \right) \frac{dv_{pj}}{dv_{sj}} + \left(\frac{\partial c_i}{\partial v_{sj}} \right) + \left(\frac{\partial c_i}{\partial \rho_j} \right) \frac{\partial \rho_j}{\partial v_{sj}} \right] \Delta v_{sj}, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (3)$$

과 같이 나타낼 수 있다. 이는 Marquart (1963)에 의해 제시된 감쇠최소자승법(damped least-squares method)으로 해를 구할 수 있다. 즉,

$$\hat{V}_s = (G^T G + \theta)^{-1} G^T P. \quad (4)$$

여기서 $\hat{V}_s$ 는 최소자승 해이며, G 는 모델의 $M \times N$ 계수행렬이다. 해를 안정시키기 위한 가중치행렬은 θ 이고, P 는 식 (3)의 위상속도 잔차 M 으로 구성된 열벡터이다.

현장 자료 기록

2013년 2월 13일부터 9월 3일 사이의 20일간 6회에 걸쳐 강원도 원주에서 레일리카를 기록하였고, 측정 위치는 환경부에서 제공하는 토지피복도 분류상의 도심지 44 곳과 농지 34 곳의 총 78 곳으로 산지를 제외시키고 비교적 인구밀도가 높은 저고도

Fig. 2. Map showing land cover composed of downtown (red), agricultural (yellow), forest (dark green), grassland (light green), and bare ground (aqua) areas in Wonju, Korea. The recording sites of Rayleigh waves (solid orange circles) are also plotted on the land cover map.

지역을 중심으로 선정하였다(Fig. 2). 이 측정점들의 위치를 지표 지질에 따라 분류하면 원생대 편마암 지역에 3 곳, 쥐라기 화강암 및 화강섬록암 지역에 24 곳, 제 4기 충적층에 51 곳이 분포한다(Fig. 1).

도심지에서는 수신기 주변의 인간 활동에 의한 비정상성 잡음의 영향을 최소화하기 위해 야간시간대에 기록하였고, 농지는 근거리에서 발생한 잡음의 영향이 적은 시간과 장소를 선택하여 기록하였다. 공간적 분해능 향상과 알리아싱 방지를 위하여 2~4 m의 간격으로 4.5 Hz 수직 지오폰을 현장 여건에 따라 12개나 24개 설치하였으며, 2 ms 샘플링으로 8,192 ms 동안 레일리카를 기록하였다. 현장에서는 알리아싱 방지용 고주파 차단필터 이외의 다른 주파수 필터는 적용하지 않았다.

불규칙하고 무작위한 방향에서 잡음이 충분히 발생된다고 판단될 경우, 'L' 자형 수신기 배열을 택하고 저주파 성분을 충분히 확보하기 위하여 수동적 방법인 상시미동 신호를 기록하였다(Fig. 3a). 상시미동이 미약한 경우에는 선형으로 지오폰을 배열하고, 배열 끝에서 8 kg 나무해머를 사용하여 선형 배열

Fig. 3. Seismic data recorded in a linear array at site B (Fig. 1) using 24 4.5-Hz vertical geophones at 3 m intervals for (a) passive and (b) active sources.

Fig. 4. Phase-velocity spectra constructed using individual spatial autocorrelation (SPAC) functions of (a) passive and (b) active data, and (c) the combined SPAC function at site B. Automatically estimated dispersion curves (red dots) before smoothing show that the lowest frequencies (black circles) are lower for the passive data than the active data at the cost of losing resolution at higher frequencies. The highest detectable velocity (black circle) is the lowest when only active data were used.

한쪽 끝에서 지진동을 발생시켰는데, 신호/잡음비가 충분하지 못한 경우는 측선의 반대쪽 끝에서 사람이 도약하여 해머보다 상대적으로 저주파인 신호를 추가로 발생시켜 저주파수 대역 신호를 보완하였다(Fig. 3b). 수동적 방법은 78개의 모든 측정점에서 적용하였으며, 이 중 57 측정점에서는 능동적 방법도 함께 적용시켰다.

자료 처리

레이리파의 위상속도를 구하기 위한 공간자기상관법(spatial autocorrelation method; SPAC)의 공간적인 단점을 보완한 확장된 공간자기상관법(extend spatial autocorrelation; ESPAC)을 적용하였으며(Ling and Okada, 1993), 이 학회지의 이번 호에 발표한 Jung and Kim (2014) 논문에 사용한 방법과 동일한 방법으로 표면파 자료를 처리하였다(Fig. 5).

먼저 배열에 적용한 수신기 위치정보를 입력하고, 푸리에 변환을 한 후, 기록된 자료로부터 파워스펙트럼과 공간자기상관함수를 계산하였다. 이 때, 능동 및 수동적 방법을 모두 적용한 57 곳의 측정자료는 두 방법으로 얻은 공간자기상관함수를 중첩하여 고주파 및 저주파 대역의 신호/잡음비를 모두 높였다(Park *et al.*, 2005; Fig. 4c). 공간자기상관계수는 최적의 제 0차 1종 베셀함수로 나타낼 수 있으므로, 각각의 수신기 거리 r 에 따른 일관성(coherence) 단면을 구하였다(Fig. 6a). 위상속도 스펙트럼은 식 (1)을 이용하여 만들었고, 진폭이 가장 큰 값을 선택하여 분산곡선을 결정하였다(Fig. 6b).

Fig. 5. Processing flow for the ESPAC method to get 1-D shear-wave velocities.

Fig. 6. (a) The average of spatial autocorrelation functions with distances between pair of geophones from 3 to 69 m and (b) the best-estimate phase-velocity dispersion curve (red solid line) superimposed on the phase-velocity spectrum of ambient noise recorded at site C (Fig. 1).

Fig. 7. Shear-wave velocities (solid line) derived by inverting the Rayleigh-wave dispersion curve using an initial model (dotted line) for a profile on a paved road at site C (Fig. 1).

역산을 위한 초기모델은 파장의 1/3을 겹보기 깊이로 정하고 두께 1 m의 균질한 층 40개를 반무한 매질 위에 설정하였다. 식 (3)과 같이 v_p 와 ρ 를 각각 Kitsunozaki *et al.* (1990)과 Ludwig *et al.* (1970)의 경험식을 이용하여 v_s 의 함수로 변환한 후, Thomson-Haskell법(Thomson, 1950; Haskell, 1953)으로 위상속도 순차모델링을 실시하였다. 역산은 식 (4)의 Marquart (1963) 감쇠 최소자승법을 적용하여, 모델로부터 구한 위상속도와 관측한 위상속도의 평균제곱근 오차가 8% 이하가 되도록 20번의 반복적 계산과정을 통해 1차원 횡파속도 모델을 구하였다(Fig. 7).

자료 분석

기반암의 깊이(D_b)

기반암 깊이를 결정하기 위한 기준을 마련하기 위하여, 시추

공 B-1으로부터 남서방향으로 20 m 떨어진 측정점 A(Fig. 1)에서 ESPAC법을 이용한 표면파 탐사를 실시하였다. 시추주상도와 레일리와 분산곡선 역산결과를 비교하였을 때(Fig. 8), 토사부터 풍화암까지 4개 지층 구간에서의 v_s 는 78 m/s부터 523 m/s까지 점이적으로 증가하는 양상을 보이며, 깊이 12 m의 풍화암에 해당하는 암석(이하 ‘기반암’이라 칭함)의 경계 D_b 부터 v_s 증가율이 급격히 감소하는 모습을 보인다. 따라서 Jung and Kim (2014)의 경우와 마찬가지로 D_b 결정 기준을 v_s 가 풍화암의 범위인 400 ~ 700 m/s 범위(Keçeli, 2012)에서 속도 증가율이 떨어지는 깊이로 삼았다.

한국농어촌공사에서 제공하는 원주시계 내의 250 곳 시추자료 중 정확한 위치가 파악되는 156 곳의 자료(Fig. 9a)와 저고도 지역에서 레일리파를 기록한 78개 측정 자료를 모두 활용하여, 등방성 선형 배리오그램(variogram) 함수를 적용한 크리

Fig. 8. Correlation of the estimated v_s profile using the ESPAC method at site A (Fig. 1) and a geologic log from a nearby well B-1.

깁 방법으로 공간적으로 보간한 원주지역의 D_b 분포도를 작성하였다(Fig. 9b). ESPAC 자료를 함께 이용하여 구한 분포도(Fig. 9b)는 시추자료만을 이용하여 구한 D_b 분포도(Fig. 9a)에 비하여, 시추공이 거의 없는 시가지 부분의 저평가된 D_b 가 적절하게 보정되어 있다. 원주시 저고도 지역의 평균 D_b 는 95% 신뢰구간에서 16.3 ± 0.7 m로 산출되었고, 토지분류 상의 도심지와 농지에서 각각 18.6 ± 0.9 m와 13.3 ± 1.0 m로 산출되어 도심지에서 더 깊게 나타난다. 전반적으로 동쪽과 서쪽의 도심지(Fig. 2)를 중심으로 D_b 가 깊은 경향을 보이는데, 이는 대체로 충적층으로 덮여 있는 지역에 해당한다(Fig. 1).

기반암 및 토양층의 v_s

원주시 저고도에서 측정한 레일리파로부터 구한 기반암의

평균 횡파속도(v_s^b)는 95% 신뢰구간에서 576 ± 8 m/s로 산출되었고, D_b 분포도와 마찬가지로 방법으로 공간적으로 보간하여 구한 v_s^b 분포도는 전체적으로 426 ~ 764 m/s의 속도 범위를 보인다(Fig. 9c). 전반적으로 서부에 분포하고 있는 화강암질 기반암 지역(571 ± 16 m/s)보다 동부에 분포하는 편마암질 기반암지역(641 ± 40 m/s)에서 12% 정도 높은 경향을 나타낸다. 이는 변성작용으로 인한 광물의 재결정 등의 지질작용에 의해 편마암 암석의 v_s 가 증가되었을 가능성을 지시한다.

한편 토양층의 평균 횡파속도($\bar{v}_s$)는 95% 신뢰구간에서 290 ± 7 m/s로 분석된다. 토지피복 분류에 따라서는 도심지와 농지에서 291 ± 9 m/s와 288 ± 10 m/s로 각각 산출되어, 농지보다 도심지에서 오히려 더 높은 $\bar{v}_s$ 값을 보인다(Fig. 9d). 이는 토양층의 두께가 더 깊어서 압밀에 의한 속도 증가에 기인

Fig. 9. Maps showing: basement depth (D_b) using information from (a) only the 156 agricultural wells (pink crosses) and (b) both the wells and the 78 inverted v_s profiles (black open circles), (c) v_s of the uppermost part of basement-rocks (v_s^b), (d) average v_s in the overburden layers ($\bar{v}_s$), and (e) average v_s in the top 30 m depth (v_{s30}) in Wonju, Korea.

하는 현상으로 해석된다.

v_s30

원주시계 내 저고도 지역의 78개 지점에서 레이리와 분산곡선을 역산하여 측정별로 1차원 v_s 단면을 작성하였고, 이로부터 각 측정에서의 v_s30 을 구하였다. 조사지역 내에 대규모 지질구조가 없는 점을 감안하여, 각 측정의 v_s30 을 D_b 및 v_s^b 분포도와 같은 크리깅 방법으로 공간적으로 보간하여 v_s30 분포도를 작성하였다(Fig. 9e). 전반적으로 고도가 낮고 화강암질 기반암인 북서쪽에서는 비교적 작은 v_s30 을 가지며, 고도가 높고 선캄브리아기 편마암질 암석이 지질기반을 이루는 남동쪽으로 갈수록 v_s30 이 증가하는 양상을 보인다. 239 ~ 747 m/s의 범위를 보이는 원주지역의 전체 평균 v_s30 은 95% 신뢰구간에서 418 ± 13 m/s로 산출되었다. 토지피복 분류에 따라서는 도심지에서 390 ± 15 m/s, 농지에서 454 ± 22 m/s로 상대적으로 도심지에서 낮고 농지에서 높게 산출되어 도심지가 진동에 더 민감한 지역으로 분석된다.

v_s30 에 따른 부지 분류

건설교통부의 국내 내진설계기준(Ministry of Construction and Transportation, 1997)에 의하면, 원주시 저고도 지역의 부지는 조사된 78 지점 중 S_D 등급이 31 곳, S_C 등급이 47 곳으로 분류된다. 이를 바탕으로 작성한 지반분류도(Fig. 10)는 S_D 지반지역이 원주시 저지대 면적의 45%로서, 지질도에서(Fig. 1) 충적토 지역과 토지피복도(Fig. 2)의 농지 지역 또는 일부 도심지와 비교적 잘 일치한다. 한편 원주시 저지대 면적의 55%를 차지하는 S_C 지반지역은 원생대 편마암류 기반암 지역과 중생대 화강암류 기반암 지역과 일치하며, 토지피복도의 산지 또는 일부 도심지와 대략 일치한다.

v_s30 지시자

v_s30 은 지구물리학적 방법으로 정확하게 측정할 수 있으나,

Fig. 10. Microzonation of Wonju city based on v_s30 two comprising; very dense soil and soft rock (S_C ; gray), stiff soil (S_D ; yellow) and recording sites (black solid circles).

시간 및 경제적 이유 등으로 전체 지역을 대상으로 광범위하게 적용할 수 없는 한계가 있다. 따라서 v_s30 과 관련이 있고 비교적 손쉽게 구할 수 있는 지표면 경사도(Wald and Allen, 2007), 고도(Chiou and Youngs, 2008a), 암상(Wills and Clahan, 2006) 등과 같은 지시자(proxy)로부터 v_s30 을 추정하고자 하는 노력이 지속되어 왔다. 이 논문에서는 원주시계 내 78 지점에서 기록한 레이리와 분산곡선을 역산하여 얻은 v_s30 과 지표면 경사도, 고도 및 암상 사이의 상관성을 분석하여, v_s30 의 지시자로서의 적정성을 검토하고 다중 지시자를 이용한 v_s30 의 관계식을 제시한다.

v_s30 과 지표면 경사도의 관계

원주지역은 산지가 전체 면적의 78%를 차지하며, 1×1 km 격자자료를 사용하여 계산하면 평균 경사도가 7.2%인 고경사 지역에 해당하며(Fig. 2), 북쪽에서 남쪽으로 및 서쪽에서 동쪽으로 갈수록 경사가 증가하는 경향을 보인다. 이러한 증가추세는 v_s30 평면도(Fig. 9e)의 양상과도 유사하여 Wald and Allen (2007)의 이론을 뒷받침한다.

경사도를 v_s30 의 지시자로서 처음 제시한 Wald and Allen (2007)에 의하면, 경사도와 v_s30 의 상관관계는 디지털 자료의 해상도에 따라 달라진다. 따라서 우리는 수치지형도의 정방형 격자간격을 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0 km로 설정하고 경사도를 구한 후, v_s30 과의 상관성을 계산하여 0.35, 0.38, 0.38, 0.46, 0.35의 상관계수를 산출하였다. 격자간격이 1 km일 때의 경사도와 v_s30 의 상관계수가 가장 높게 나타나서, 적정 격자간격에 관한 Wald and Allen (2007)의 연구결과와 일치한다.

Kuo *et al.* (2012)과 Ancheta *et al.* (2013) 등 여러 학자들은 지표면 경사도를 v_s30 의 지시자로 이용할 때, 상관도를 양대수 비율(log-log scale)에서 도출하였다. 그러나 원주시 자료의 경우, 양대수 비율에서 구한 상관계수 0.45는 선형 비율(linear scale)로 구한 상관계수 0.46보다 오히려 작다. 한편 편대수(log-linear scale) 비율에서의 상관도는 0.45로 양대수 비율과 비슷하다.

1 km의 정방형 격자간격으로 구한 경사도와 v_s30 의 관계(Fig. 11a)를 나타내는 선형 방정식을 최소자승법으로 구하면

$$v_s30(S) = 349 \text{ (m/s)} + 1549 \text{ (m/s)} \cdot S, \quad (5)$$

으로, 여기서 S 는 수직거리를 수평거리로 나눈 비율의 경사도, $v_s30(S)$ 는 경사도로 계산된 v_s30 값이다.

v_s30 과 고도의 관계

양대수 비율에서 고도와 v_s30 의 상관계수는 0.35로 산출되고, 선형 비율에서의 상관계수는 0.43으로 선형 배율이 더 높은 상관관계를 보인다(Fig. 11b). 이는 상관성이 크지는 않지만 경사도와의 상관계수 0.46과 비슷하여 미약한 정도의 상관성은 있는 것으로 분석된다. 고도와 v_s30 의 관계를 나타내는 선

형 방정식으로 수식화하면

$$v_{s30}(E) = 299 \text{ (m/s)} + 0.65 \text{ (s}^{-1}\text{)} \cdot E, \quad (6)$$

으로, 여기서 E 는 m 단위의 고도, $v_{s30}(E)$ 는 고도로 계산된 v_{s30} 값이다.

v_{s30} 과 암상과의 관계

지표 지질을 v_{s30} 과의 유일한 상관성 요소(Wills and Clahan, 2006)나 다중 요소 중의 하나(Wills and Gutierrez, 2008)로 분석한 연구들이 있으며, 지표 지질을 층의 두께, 연령, 결합상태 등으로 세분화하여 v_{s30} 의 지시자로서 제시한 경우도 있다(Ancheta *et al.*, 2013). 우리는 이 논문에서 지표 암상과 v_{s30} 의 상관관계를 분석하였다.

레일리파 기록지점 수는 원생대 편마암 지역 3 곳, 중생대 화강암 지역 19 곳, 화강섬록암 지역 5 곳, 신생대 제 4기 충적층 지역 51 곳으로, 암상별로 고르게 분포하지는 않으며 편마암 지역의 측정 수가 충분하지 않은 한계가 있다. 중생대의 화강암 및 화강섬록암은 평균 v_{s30} 이 각각 416 m/s와 440 m/s이며, 두 암상 사이의 지질연령도 큰 차이가 없어서 동일한 군으로 취급하였다. 역산된 v_{s30} 은 95% 신뢰구간에서 기반암이 편마암인 지역은 635 ± 60 m/s, 화강암 및 화강섬록암인 지역은 420 ± 27 m/s, 충적층인 지역은 403 ± 14 m/s로 각각 구해졌다. 화강암질 기반암 지역보다 편마암 지역에서 200 m/s 이상 빠르게 평가되는 이유는 v_s^b 의 경우와 마찬가지로 변성 작용으로 인한 광물의 재결정 등에 의한 영향으로 보인다.

다중 지시자의 v_{s30} 관계식

v_{s30} 과 고도, 경사도, 암상의 상관도를 종합적으로 고려하여, v_{s30} 과의 관계식

$$v_{s30}(P) = 0.45 \cdot v_{s30}(S) + 0.45 \cdot v_{s30}(E) + 0.1 \cdot v_{s30}(L) \quad (7)$$

을 제시한다. 여기서 $v_{s30}(S)$ 와 $v_{s30}(E)$ 은 각각 경사도와 고도에 따라 식 (5)와 (6)을 이용하여 개별적으로 구한 최적의 v_{s30} 값이다. $v_{s30}(L)$ 은 기반암의 종류에 따라 편마암류는 635 m/s,

화강암류는 420 m/s, 충적층은 403 m/s의 값을 지정하였다. 각 인자별 가중치(weighting factor)는 기여도를 나타내며 그들의 합은 1이다. 가중치의 결정은, 경사도와 고도의 경우에 v_{s30} 과의 상관계수가 0.46과 0.43으로 비슷하여서 0.45로 같게 설정하였고, 암상의 경우에는 v_{s30} 의 상관계수를 수치적으로 구할 수 없어서 시험과정을 통하여 최적의 상관계수를 0.1로 정하였다. 다중 지시자를 이용한 이 관계식은 경사도나 고도만을 이용할 경우의 상관계수 0.46과 0.43보다 높은 0.50의 상관도를 보여서, 단일 인자만을 고려한 경우보다 신뢰성이 높아진 것으로 분석된다. 그러나 여전히 0.6 이하로 상관성이 높지 않은 점을 감안할 때, 광범위한 지역을 대상으로 개발된 지시자를 이용한 v_{s30} 예측 방법은 상대적으로 적은 면적의 원주시에 적용할 경우에 한계성이 있을 수 있으므로, 식 (7)을 이용하여 v_{s30} 를 구해야 할 경우에는 상대적으로 넓은 오차범위를 함께 고려하여야 할 것이다.

토 의

레일리파 분산곡선으로 구한 v_s 의 신뢰성을 검증하기 위하여, 시추공 B-1으로부터 20 m 떨어진 지점 A(Fig. 1)에서 SH-

Fig. 12. SH walkaway data at site A constructed with six shot records. Four prominent linear events are indicated with their apparent velocities.

Fig. 11. Plots for v_{s30} versus (a) topographic gradient and (b) elevation in Wonju, Korea. The trend lines represent the least-squared fits for (a) $v_{s30}(S) = 349 \text{ (m/s)} + 1549 \text{ (m/s)} \cdot S$ and (b) $v_{s30}(E) = 299 \text{ (m/s)} + 0.65 \text{ (s}^{-1}\text{)} \cdot E$.

walkaway 방법으로 기록한 자료를 수평 2층 구조 모델에 적용하여 토양층 및 굴절면의 v_s 를 구하였다(Fig. 12). 이 비교목적으로 야외에서 측정한 SH 굴절과 방법과 현장 적용변수들은 춘천지역에서 실시한 내용(Jung and Kim, 2014)과 동일하다. 초동의 기울기로부터 구한 속도는 207 m/s와 208 m/s로 방향에 따른 변화가 거의 없으며, 표면과 자료로부터 역산한 토양층의 평균 속도 216 m/s에 비교하여 4% 정도 작은 값을 보인다. 이는 시추추상도(Fig. 8)에 나타난 바와 같이 토양층이 하나의 속도를 갖는 균질한 층이 아니라 깊이에 따라 표토층, 사력층, 풍화암층 등으로 변하고 실제 측정이 이루어진 수평거리가 20 m 이내인 점을 감안하면 분산곡선 역산결과와 일치한다고 볼 수 있다. 굴절과의 양방향 겹보기속도 526 m/s와 530 m/s로부터 구한 굴절면의 v_s 는 528 m/s로, 레이리와 분산곡선 역산으로 구한 기반암의 속도 523 m/s와는 차이가 1% 이내로 거의 동일하다.

또한 v_{s30} 을 레이리와 분산곡선 역산으로 구한 방법이 적절하였는지를 춘천지역(Jung and Kim, 2014)에서 실시한 것과 마찬가지로 방법으로 검증하였다. 레이리와 분산곡선으로부터 획득한 5 m, 10 m, 20 m 깊이까지의 v_s 를 이용하여 구한 v_{s5} , v_{s10} , v_{s20} 으로부터 추정된 v_{s30} 과 레이리와 분산곡선으로 구한 v_{s30} 을 비교해 보았다(Table 1). v_{s5} , v_{s10} , v_{s20} 으로부터 추정된 v_{s30} 과 표면과 분산곡선으로부터 구한 v_{s30} 의 결정계수는 각각 0.47, 0.86, 0.98이며, Sun *et al.* (2007)이 국내 부지 72개소 자료로부터 구한 결과와 비슷하게 깊이 증가에 따라 1.0에 수렴하는 경향을 보인다. v_{s20} 을 이용한 경우에는 0.98에 이르러서, 이번 분석에 사용한 레이리와 분산곡선을 이용하여 30 m 깊이까지 v_s 를 역산한 결과가 탐사 깊이에 별 문제가 없음을 지시한다.

그러나 이상의 지반의 v_s 특성은 지반 증폭에 의해 직접적 피해가 클 것으로 예상되는 상대적으로 인구가 밀집되어 있는 저지대를 중심으로 야외에서 측정된 자료에 근거하며, 측정 수가 전체적인 면적에 비하여 충분하지 않은 한계성이 있다. 비록 SH 굴절과 walkaway 자료와 비교하여 검증과정을 거쳤으나, 두 방법 모두 지표 탄성과 방법으로 수직 탄성과와는 차이가 있을 수 있음을 고려해야 할 것이다. 아울러 분석결과의 신뢰성을 향상시키기 위해서는 추후 지속적인 측정을 통하여 측정 밀도를 높이고 수직 탄성과나 S파 검층 등 시추공을 이용한 물리탐사 방법과의 비교를 통한 검증이 필요할 것이다.

Table 1. Computed v_{s30} using average v_s over depths of 5, 10, and 20 m and v_{s30} derived from inversion of Rayleigh-wave dispersions.

		Average v_{s30}	R^2
Computed v_{s30}	v_{s5}	476.5	0.47
	v_{s10}	435.7	0.86
	v_{s20}	420.2	0.98
Inverted v_{s30}		417.8	1

결론

원주시계 내의 저고도 78 지점에서 능동 및 수동식 표면과 탐사를 수행하고 역산하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 평균 v_{s30} , D_b , v_s^b , $\bar{v}_s^s$ 는 95% 신뢰구간에서 각각 418 ± 13 m/s, 16.3 ± 0.7 m, 576 ± 8 m/s, 290 ± 7 m/s로 산출되었다.
2. 산출된 v_{s30} 에 기초하여 지반을 분류하면, 원주시의 저고도 부지는 S_c (55%)와 S_D (45%)에 해당되며, 편마암 및 중생대 화강암류 지역과 토지피복도의 산지 및 도심지 지역은 S_c , 충적토 지역과 토지피복도상의 농지 및 일부 도심지 지역에 S_D 가 주로 분포하고 있다.
3. 평균 v_{s30} 은 도심지에서 390 ± 15 m/s, 농지의 경우는 454 ± 22 m/s로 산출되어 인구 밀도가 높은 도심지 지역이 진동에 더 민감한 것으로 분석된다.
4. v_{s30} 은 북서쪽에서 남동쪽으로 갈수록 증가하여 경사도 및 고도의 증가 양상과 유사하며, 암상에 따라서는 중생대 화강암보다 원생대 편마암류에서 높게 나타난다.
5. 원주시의 v_{s30} 을 구하는 관계식은 경사도, 고도, 암상의 다중 지시자의 함수로, $v_{s30}(P) = 0.45 \cdot v_{s30}(S) + 0.45 \cdot v_{s30}(E) + 0.1 \cdot v_{s30}(L)$ 을 도출하였으나, 상관성이 높지 않으므로 ($r = 0.5$), 상대적으로 작은 면적의 원주시에 적용할 경우에 높은 신뢰성을 기대하기 어려울 것으로 판단된다.
6. 레이리와로부터 구한 v_s 는 SH파 굴절법 자료에서 해석한 v_s^b 및 $\bar{v}_s^s$ 와 잘 일치하였고, v_{s30} 도 v_{s20} 로부터 산출한 값과의 상관성이 매우 높아서($R^2 = 0.98$) 적용한 방법이 30 m 깊이까지의 v_s 역산에 적합한 방법이었다고 판단된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발(CATER 2012-8040)의 지원으로 수행되었습니다. 자료 기록에 많은 도움을 준 강원대학교 지진과 실험실의 정진훈 대학원생과 학부생들, 논문의 품질을 향상시키는데 많은 기술적 도움을 주신 심사위원 3분께 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- Aki, K., 1957, Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, *Bulletin Earthquake Research Institute*, **35**, 415-456.
- Allen, T. I., and Wald, D. J., 2009, On the Use of High-Resolution Topographic Data as a Proxy for Seismic Site Conditions (VS30), *Bulletin of the Seismological Society of America*, **99**, 935-943.
- Ancheta, T. D., Darragh, R. B., Stewart, J. P., Seyhan E., Silva, W. J., Chiou, B., Wooddell, K., Graves, R., Kottke, A., Boore, D. M., Kishida, T., and Donahue, J. L., 2013, PEER NGA-

- West2 Database, *PEER Report 2013/03*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA.
- Borcherdt, R. D., 1994, Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification), *Earthquake Spectra*, **10**, 617-653.
- Chiou, B. S.-J., and Youngs, R. R., 2008, An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra, *Earthq. Spectra*, **24**, 173-216.
- CTBTO, 2013, Department of State, USA, <http://www.ctbto.org/verification-regime/featured-stations/types/primary-seismic/ps31-wonju-republic-of-korea/>, Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organizations (December 2, 2013 Accessed).
- Haskell, N. A., 1953, The dispersion of surface waves in multi-layered media, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **43**, 17-34.
- ICBO., 1997, 1997 Uniform Building Code, **2**, Structural Engineering Design Provisions.
- Jung, J., and Kim, K. Y., 2014, Site characterization using shear-wave velocities inverted from Rayleigh-wave dispersion curves in Chuncheon, Korea, *Geophysics and Geophysical Exploration*, **17**, 1-10.
- Jung, J., Park, I., Han, A., Ali, A., Park, Y. H., and Kim, K. Y., 2013, Near-surface shear-wave velocities in Chuncheon, Korea derived from passive surface waves, *First Near-surface Geophysics Asia Pacific Conference*, Beijing, July 17-19, SEG and CGS.
- Kang, T. S., and Baag, C. E., 2004, The 29 May 2004, Mw=5.1, offshore Uljin earthquake, Korea, *Geosciences Journal*, **8**, 115-123.
- Keçeli, A., 2012, Soil parameters which can be determined with seismic velocities, *Jeofizik*, **16**, 17-29.
- Kitsunezaki, C., Goto, N., Kobayashi, Y., Ikawa, T., Horike, M., Saito, T., Kurota, T., Yamane, K., and Okuzumi, K., 1990, Estimation of P- and S-wave velocities in deep soil deposits for evaluating vibrations in earthquakes, *SINEN-SAIGAI-KAGAKU*, **9**, 1-17.
- Kuo, C. H., Wen, K. L., Hsieh, H. H., Lin, C. M., Chang, T. M., and Kuo, K. W., 2012, Site classification and v_s30 estimation of free-field TSMIP stations using the logging data of EGD, *Engineering Geology*, **129-130**, 68-75.
- Lee, C. T., Cheng, C. T., Liao, C. W., and Tsai, Y. B., 2001, Site classification of Taiwan freefield strong-motion stations, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **91**, 1283-1297.
- Ling, S., and Okada, H., 1993, An extended use of the spatial autocorrelation method for the estimation of geological structure using microtremors, *89th SEGJ Conference*, 44-48.
- Ludwig, W. J., Nafe, J. E., and Drake, C. L., 1970, Seismic refraction in *The Sea*, **4**, Wiley-interscience, 74.
- Marquart, C. W., 1963, An algorithm for least square estimation of nonlinear parameters, *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, **11**, 431-441.
- Ministry of Construction and Transportation, 1997, Seismic design code, 36.
- Okada, H., 2003, The microtremor survey method, Society of Exploration Geophysicists, 127.
- Park, B. K., Chang, H. W., and Woo, Y. K., 1989, Geological map of Korea; 1:50,000 Wonju, Korea Institute of Energy and Resources, Seoul, Korea.
- Park, C. B., Miller, R. D., Ryden, N., Xia, J., and Ivanov, J., 2005, Combined use of active and passive surface waves, *JEEG*, **10**, 323-334.
- Romero, S., and Rix, G. J., 2001, Regional variations in near-surface shear wave velocity in the greater Memphis area, *Engineering Geology*, **62**, 137-158.
- Schwab, F. A., and Knopoff, L., 1972, Fast Surface Wave and Free Mode Computations. In: B.A. Bolt (Ed.), *Methods in Computational Physics*, **11**, Academic Press, New York and London, 87-180.
- Sun, C. G., Chung, C. K., and Kim, D. S., 2005, A proposition of site coefficients and site classification system for design ground motions at inland of the Korean peninsula, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, **21**, 101-115.
- Sun, C. G., Chung, C. K., and Kim, D. S., 2007, Determination of mean shear wave velocity to the depth of 30 m based on shallow shear wave velocity profile, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, **11**, 45-57.
- Thompson, E. M., and Wald, D. J., 2012, Developing v_s30 site-condition maps by combining observations with geologic and topographic constraints, *15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon, Portugal, September 24-28.
- Thomson, W. T., 1950, Transmission of elastic waves through a stratified solid, *Journal of Applied Physics*, **21**, 89-93.
- Wald, D. J., and Allen, T. I., 2007, Topographic slope as a proxy for seismic site conditions and amplification, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **97**, 1379-1395.
- Wald, D. J., McWhirter, L., Thompson, E. M., and Hering, A. S., 2011, A new strategy for developing v_s30 maps, *4th IASPEI/IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, August 23-26, Santa Barbara, U.S.A.
- Wills, C. J., and Clahan, K. B., 2006, Developing a map of geologically defined site-condition categories for California, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **96**, 1483-1501.
- Wills, C., and Gutierrez, C., 2008, Investigation of geographic rules for improving site-conditions mapping. California Geologic Survey Final Technical Report No. 07HQGR0061.
- Xia, J., Miller, R. D., and Park, C. B., 1999, Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves, *Geophysics*, **64**, 691-700.
- Yong, A., Hough, S. E., Abrams, M. J., Cox, H. M., Wills, C. J., and Simila, G. W., 2008, Site characterization using integrated imaging analysis methods on satellite data of the Islamabad, Pakistan region, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **98**, 2679-2693.
- Yong, A., Hough, S. E., Iwahashi, J., and Braverman, A., 2012, Terrain-based site conditions map of California with implications for the contiguous United States, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **102**, 114-128.