레이리파 분산을 역산하여 구한 횡파속도를 이용한 춘천시의 부지특성

정진훈 · 김기영 *

강원대학교 지구물리학과

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

JinHoon Jung and Ki Young Kim*

Department of Geophysics, Kangwon National University

요약: 춘천시 인구 밀집지역의 지반특성 파악 및 분류를 목적으로 2011년 1월부터 2013년 5월까지 고유진동수 1 Hz인 수직성분 속도센서 4대와 4.5 Hz 수직 지오폰 24개를 이용하여 춘천시계 내의 50 지점(산림지 4 곳 포함)에서 레일리파를 기록하였다. 확장된 공간자기상관함수법으로 얻은 레일리파 분산곡선을 두께 1 m인 40개 수평층의 횡파속도(v_s) 모델로 역산하였다. 또한 이를 바탕으로 풍화암질 기반암의 깊이(D_b) 및 횡파속도(v_s^b), 토양층의 평균 횡파속도($\bar{v}_s$), 깊이 30 m까지의 횡파속도(v_{s30})를 각각 산출하였다. 46개 저고도 측정에서 구한 D_b , v_s^b , $\bar{v}_s$, v_{s30} 는 각각 5 ~ 29 m, 404 ~ 561 m/s, 208 ~ 375 m/s, 226 ~ 583 m/s의 범위를 갖는다. 이는 국내 내진설계기준에 따르면 단단한 토사지반 S_D 와 매우 조밀한 토사지반 및 연암지반인 S_C 에 해당한다. v_{s30} 의 대표적 지시자를 파악하기 위해 토지피복 종류, 기반암 암상, 지표면 경사도 및 지표 고도와의 상관도를 분석하였다. 그 결과, 가장 좋은 지시자인 고도와의 상관성($r = 0.41$)도 미약하게 나타나서, 상대적으로 작은 면적의 춘천시만을 대상으로 적용하기에는 신뢰성에 한계가 있다고 판단된다.

주요어: 횡파속도, 레일리파 분산, 공간자기상관함수, v_{s30} , 고도

Abstract: To reveal and classify site characteristics in densely populated areas in Chuncheon, Korea, Rayleigh-waves were recorded at 50 sites including four sites in the forest area using four 1-Hz velocity sensors and 24 4.5-Hz vertical geophones during the period of January 2011 to May 2013. Dispersion curves of the Rayleigh waves obtained by the extended spatial autocorrelation method were inverted to derive shear-wave velocity (v_s) models comprising 40 horizontal layers of 1-m thickness. Depths to weathered rocks (D_b), shear wave velocities of these basement rocks (v_s^b), average velocities of the overburden layer ($\bar{v}_s$), and the average velocity to a depth of 30 m (v_{s30}), were then derived from those models. The estimated values of D_b , v_s^b , $\bar{v}_s$, and v_{s30} for 46 sites at lower altitudes were in the ranges of 5 to 29 m, 404 to 561 m/s, 208 to 375 m/s, and 226 to 583 m/s, respectively. According to the Korean building code for seismic design, the estimated v_{s30} indicates that the lower altitude areas in Chuncheon are classified as S_C (very dense soil and soft rock) or S_D (stiff soil). To determine adequate proxies for v_{s30} , we compared the computed values with land cover, lithology, topographic slope, and surface elevation at each of the measurement sites. Due to a weak correlation ($r = 0.41$) between v_{s30} and elevation, the best proxy of them, applications of this proxy to Chuncheon of a relatively small area seem to be limited.

Keywords: shear-wave velocity, Rayleigh-wave dispersion, spatial autocorrelation method, v_{s30} , elevation

서론

지진에 의해 발생한 지진파는 지표면과 기반암 사이의 토양층에서 증폭되며, 그 정도는 진원이나 진앙으로부터 동일한 거리의 부지일지라도 지표 부근 물질과 횡파속도(v_s) 등의 동역학적 특성에 따라 달라진다. 이와 같이 지진파가 기반암 상부의 지층을 통과함에 따라 지진동이 증폭되는 현상을 부지효과라고 한다. 따라서 부지 증폭에 직접적인 영향을 미치는 기반

2013년 12월 19일 접수; 2014년 1월 23일 수정; 2014년 1월 28일 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.

암까지 v_s 를 측정하고, 이를 바탕으로 부지를 일반적으로 구분한다. 국내에서는 Borchardt (1994)가 제안한 지하 100 ft (약 30 m)까지 평균 횡파속도(v_{s30})에 의해 나눈 지반분류를 토대로 제정한 NEHRP (BSSC, 1997) 규정과 ICBO (1997)의 UBC (Uniform Building Code)를 국내 내진설계기준(Ministry of Construction and Transportation, 1997)에 반영하여 사용하고 있다.

그러나 퇴적층이 두꺼운 미국 서부지역을 대상으로 개발된 v_{s30} 이 퇴적층이 얇은 국내 지반특성을 제대로 반영하지 못하는 문제점을 보완하기 위해 30 m보다 얇은 깊이까지의 평균 v_s 사이의 상관관계가 연구된 바 있다(Sun *et al.*, 2007). 또한 지역적인 지반상태에 따라 크게 변하는 지진과 같은 지질 재해는 지역적 특성을 고려해야 하며, 동시에 영향범위가 넓으므로 광역적 면적에 대한 지반조사가 필요하다. 따라서 경제적, 시간적 제약을 효과적으로 극복하기 위해 지리정보시스템을 기반으로 지표면 경사도와 같은 지시자(proxy)를 이용한 간접적 방법을 이용해 지반을 분류하는 연구가 국내에서도 수행되고 있다(Sun, 2009; Kang and Kim, 2011; 2012).

천부 v_s 를 측정하기 위해서 수직탐사와 탐사, 음파검층, 천부 굴절과 탐사, 표면과 탐사와 같은 다양한 지구물리학적 탐사방법이 수행된다. 하지만 시추공에서 측정하는 탄성과 탐사는 상대적으로 많은 시간과 비용이 필요하며 환경오염의 우려가 있고, 굴절법을 이용하여 v_s 를 구하는 경우에는 신호가 잡음의 영향을 많이 받아서 주변 잡음이 매우 작은 곳에서만 적용할 수 있는 제약이 있다. 또한 적절한 횡파를 효율적으로 발생시키기 어렵기 때문에 v_s 를 직접적으로 측정하는 방법보다 레일리파 분산곡선을 이용하여 v_s 를 역산하여 구하는 표면과 탐사가 최근 많이 사용되고 있다(Xia *et al.*, 1999; Hayashi and Suzuki, 2004; Park *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2012).

20 Hz 이상의 레일리파 분산곡선은 능동적 방법으로 획득한 표면과 탐사 자료에서 잘 나타나는 반면, 그 이하의 저주파에서는 수동적인 탐사를 통해 수집한 자료에서 잘 나타난다(Park *et al.*, 2005). 수동적 방법으로는 상시미동(microtremor)을 이용한 공간자기상관함수(Spatial Autocorrelation method; SPAC) 분석법(Aki, 1957), 주파수-파수(f-k) 분석법(Capon, 1969) 등이 사용되고 있다. 능동적으로 신호를 발생시켜 기록한 자료를 분석하는 방법으로는 표면과 스펙트럼 분석법(Spectral Analysis of Surface Waves; Nazarian and Stokoe, 1984)과 다중채널 표면과 분석법(Multichannel Analysis of Surface Waves; Park *et al.*, 1999)이 있다.

이 연구에서는 강원도 주요도시의 지진 위험도 평가의 기초가 되는 지구물리학적 부지분류 연구의 일환으로, 춘천시의 비교적 인구가 밀집된 저고도 지역을 중심으로 표면파를 기록하였다. 확장된 공간자기상관법(ESPAC; Okada, 2003)으로 레일리파 분산곡선을 구하고 이를 역산하여 토양층과 기반암의 v_s , 기반암의 깊이, v_{s30} 을 각각 구하고, 이를 바탕으로 춘천시 부

지를 구체화하고자 하였다. 아울러 v_{s30} 의 지시자를 파악하기 위해 환경부 기준 토지피복 유형, 암상, 지표면 경사도, 고도 등과 v_{s30} 의 상관성을 비교하여, v_{s30} 을 측정하지 않은 지역에 까지 확대 적용 가능성을 타진코자 하였다.

배경이론

공간자기상관함수(SPAC) 분석법

상시미동은 인간의 활동과 자연현상에 따라 시간과 공간에 따라 변하며, 이러한 변화는 매우 복잡하고 불규칙하며 반복 관측되지 않는 특성이 있다. 따라서 상시미동은 시간 및 공간 영역에서 정상평형 추계론적(stationary stochastic) 현상으로 다룰 수 있다(Aki, 1957; Toksöz, 1964; Okada, 2003). 기준 관측소 $A(0, 0)$ 와 이 관측소로부터 거리 r 만큼 떨어진 관측소 $B(r, \theta)$ 에서 각각 기록된 상시미동 사이의 공간자기상관함수 $S(r, \theta)$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다. 즉,

$$S(r, \theta) = E[X_A(t, 0, 0)X_B(t, r, \theta)], \quad (1)$$

또는

$$S(r, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} g(\omega, r, \theta) d\omega, \quad (2)$$

으로, 여기서 E 는 기대치 연산자이며, $g(\omega, r, \theta)$ 는 각주파수 ω 의 상시미동 공간자기공분산함수를 뜻한다(Henstridge, 1979). 한편, 관측소 $A(0, 0)$ 에서 공간자기공분산함수의 방향적 평균은 상시미동의 파워스펙트럼 $h_0(\omega)$ 와 0종 1차 베셀함수 $J_0(rk)$ 의 곱 형태인

$$\bar{g}(\omega, r) = h_0(\omega)J_0(rk), \quad (3)$$

로 나타낼 수 있으며, k 는 각파수를 뜻한다. 따라서 관측소 $A(0, 0)$ 에서 기록한 레일리파 SPAC 함수의 방향적 평균은

$$\bar{S}(r) = \int_{-\infty}^{\infty} h_0(\omega)J_0(rk)d\omega, \quad (4)$$

이므로, $h_0(\omega)$ 으로 정규화한 각주파수 ω 인 SPAC 함수 계수는

$$\rho(\omega, r) = \bar{g}(\omega, r)/h_0(\omega), \quad (5)$$

또는

$$\rho(\omega, r) = J_0(r\omega/c(\omega)), \quad (6)$$

이 된다. 따라서 각주파수 ω 의 SPAC 함수 계수 ρ 는 위상속도 $c(\omega)$ 의 함수가 되며, 이는 배열 하부의 지하구조를 반영하는 고유한 값을 가져, 각각의 주파수에 해당하는 위상속도로부터 위상속도 스펙트럼을 작성할 수 있다.

레일리파 분산곡선의 역산

주파수 f 인 레일리와 위상속도는 층상구조 모델의 경우, 층의 개수 N , 각 층의 종파속도 v_{pi} , 횡파속도 v_{si} , 밀도 ρ_i , 층의 두께 h_i 의 함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다(Schwab and Knopoff, 1972). 즉,

$$c = c(f; v_{p1}, v_{s1}, \rho_1, h_1; v_{p2}, v_{s2}, \rho_2, h_2; \dots; v_{pN}, v_{sN}, \rho_N, h_N). \quad (7)$$

식 (7)에 테일러 전개를 적용하고, 2차항 이상을 제거하면, N 개 층의 모델을 통과하는 i 번째 주파수에서의 측정된 위상속도 c_i^{obs} 와 계산된 위상속도 c_i^{cal} 의 차이인 Δc_i 를 1차 편미분 방정식의 근사식으로 나타낼 수 있다. 즉,

$$\Delta c_i = \sum_{j=1}^N \left(\frac{\partial c_i}{\partial v_{pj}} \Delta v_{pj} + \frac{\partial c_i}{\partial v_{sj}} \Delta v_{sj} + \frac{\partial c_i}{\partial \rho_j} \Delta \rho_j \right) + \sum_{j=1}^{N-1} \frac{\partial c_i}{\partial h_j} \Delta h_j$$

$$i = 1, 2, \dots, M, \quad (8)$$

으로 표현된다. 미지수 개수를 역산 전에 $(4N-1)$ 에서 N 으로 줄이기 위하여 일반적으로 층의 두께 h 를 고정시키고, v_{pi} 와 ρ_i 는 v_{si} 의 함수로 가정한다. 이는 v_{si} 가 레일리와 위상속도에 미치는 영향이 v_{pi} 와 ρ_i 보다 훨씬 크기 때문에 가능하다(Xia *et al.*, 1999). 따라서 c_i^{obs} 와 c_i^{cal} 의 차이 Δc_i 는

$$\Delta c_i = \sum_{j=1}^N \left[\left(\frac{\partial c_i}{\partial v_{pj}} \right) \frac{dv_{pj}}{dv_{sj}} + \left(\frac{\partial c_i}{\partial v_{sj}} \right) + \left(\frac{\partial c_i}{\partial \rho_j} \right) \frac{d\rho_j}{dv_{sj}} \right] \Delta v_{sj}$$

$$i = 1, 2, \dots, M, \quad (9)$$

으로 나타내어지며, 식 (9)의 해는 감쇠최소자승법(Marquart, 1963)을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다. 즉,

$$\hat{V}_s = (G^T G + \theta)^{-1} G^T P. \quad (10)$$

여기서 $\hat{V}_s$ 는 최소자승 해이며, G 는 모델의 $M \times N$ 계수행렬이고, θ 는 해를 안정시키기 위한 가중치행렬을 의미한다. 그리고 P 는 식 (9)의 위상속도 잔차 M 으로 구성된 열벡터이다.

현장 자료 기록

춘천시의 지질은 1,115 km²에 달하는 시역에 전반적으로 분포하는 선캄브리아기의 변성암류와 이를 관입한 중생대 화성암류로 크게 분류되며, 북한강 유역에 넓게 분포하는 제4기 충적층이 이 층들을 부정합으로 덮고 있다(Lee *et al.*, 1974; Fig. 1). 레일리와 기록 위치는 지질도상의 지표지질에 따라 흑운모 화강암 19곳, 충적층 25곳, 편마암 3곳, 편암 2곳, 규장암/장석 반암인 지점에 1곳 등이다. 고도 70 ~ 1,430 m인 이 측정점들은 환경부에서 발행한 2000년도 대분류 토지피복도 상의 농업지에 29곳, 시가지에 13곳, 산림지에 4곳, 나지에 4곳 분포한다(Ministry of Environment, 2013).

2011년 1월부터 2013년 5월까지 34일간, 고유진동수 1 Hz

Fig. 1. Map showing locations of 50 recording sites in Chuncheon, Korea for the ESPAC method (solid circles) and well B-1 (cross) used for the comparison of basement depths. The location map is superimposed on a simplified geologic map where lithology comprises Precambrian gneiss and schist (white background), Mesozoic granite (orange), and Quaternary alluvium (yellow) as well as water-covered area (blue) (Lee *et al.*, 1974). Sources recorded at sites 18 (red circle) and 32 (green circle) shown in figure 2.

인 수직성분 속도센서 4대로 25개 측정점에서, 그리고 중첩된 2 곳을 포함한 27개 측정점에서는 고유진동수 4.5 Hz인 수직 지오폰으로 레일리를 기록하였다. 시가지를 제외한 지역에서는 자료의 신호/잡음비가 비교적 높고 시간에 따라 크게 변하지 않아 주간 시간대에 기록하였으며, 교통량이 많은 시가지에서는 상시미동의 정상성을 방해해서 교통 및 잡음이 최소인 야간에 조사하였다.

1 Hz 수직센서를 이용한 경우의 수신기 배열은 중심에 1대의 지진계를 고정하고 원주 상에 3대의 지진계를 정삼각형이 되도록 배치하였으며, 250 Hz로 샘플링하여 5분간 이동식 기록계(Taurus)로 상시미동을 기록하였다(Fig. 2a). 반경은 5 m 부터 시작하여 차례로 10, 20, 40 m로 확장하면서 실시하였으며, 아날로그 신호를 수치화하는 과정에 2,132 Hz 샘플률로 디멀티플렉스한 신호를 연속적인 FIR(finite impulse response) 필터를 적용하여(Nanometrics, 2007), 250 Hz 샘플률의 수치자료로 기록하였다.

4.5 Hz 수직 지오폰을 사용하였을 경우, 배열은 조사지의 지형적 특성에 따라 선형 및 'L' 자 배열을 적용하고, 조사측선을 따라 12 또는 24개 수신기를 2 ~ 4 m 간격으로 설치하여 능동식 및 수동식 탐사를 수행하였다(Table 1). 이 때 본 조사에 앞서 선행조사로 실시했던 한 곳(측점 32; Fig. 2b)을 제외한 모든 측정점에서 동적 기록범위 114 dB를 갖는 기록계(Geode)를 이용하여 2 ms 샘플률로 8초간 기록하였다. 능동식 탐사의 경우에 레일리와 신호는 8 kg 나무 해머를 이용하여 지

Fig. 2. Microtremors recorded at (a) site 18 using four 1-Hz vertical velocity sensors with radii indicated on the right side of traces and (b) a seismic record generated by a sledge-hammer at site 32 using 24 4.5-Hz vertical geophones at 2 m intervals.

Table 1. Acquisition parameters.

Source	Microtremor	Microtremor or 5 kg Hammer
Receiver Type	1-Hz vertical velocity sensors	4.5 Hz vertical geophones
Recorder	Nanometrics Taurus	ABEM MK-6 Geometrics Geode
Receiver Array	radius 5, 10, 20, 40 m	geophone interval 2-4 m
Number of Channels	4	12 or 24
Record Length	5 min	2,048 or 8,192 ms
Sampling Interval	4 ms	1 or 2 ms

표면에 수직으로 1회 타격하여 발생시켰다.

자료처리

현장에서 기록한 자료는 ESPAC 방법에서 일반적으로 적용하는 순서에 따라 처리하였다(Fig. 3). 1 Hz 수직센서를 사용하여 기록한 경우에는 전처리과정으로 기록계에 저장된 MiniSEED 형식의 자료를 SAC (Seismic Analysis Code) 형식으로 변환한 후, 위치와 성분에 따라 분류하고, 길이가 1024개

Fig. 3. Processing sequence for the ESPAC analysis of microtremor data.

Fig. 4. (a) The averaged spatial autocorrelation functions with distances between pairs of geophones of 2 to 46 m and (b) the best-estimated dispersion curve by picking the maximum amplitude for each frequency (red solid curve) at site 32.

인 블록으로 나누어 푸리에 변환을 하였다. 1 Hz 및 4.5 Hz 수신기로 기록한 모든 자료의 파워스펙트럼을 구하고, 수신기 위치 정보를 입력하였다. 주파수 영역에서 식 (6)을 이용하여 구한 ESPAC 함수(Fig. 4a)로부터 레일리파의 위상속도를 계산하고, 위상속도 스펙트럼에서 주파수별로 에너지의 진폭이 최대가 되는 위상속도를 선택하여 분산곡선을 작성하였다(Fig. 4b).

분산곡선 역산에 사용한 초기모델은 최하부의 반무한 층 위에 두께 1 m의 40개 균질한 층으로 구성하였다. Thomson-Haskell법(Thomson, 1950; Haskell, 1953)을 이용한 순차모델 과정에서 레일리파 위상속도를 계산하고, 식 (10)의 비선형 최소자승 과정을 통해 1차원 v_s 를 역산하였다. 이때 v_s 는 레일리

Fig. 5. Shear-wave velocities at site 32 (a) derived by inverting the dispersion curves in figure 4b and (b) from the SH walkaway data. The lithologic log of nearby well B-1 (Fig. 1) is on the right of inverted v_s profile in (a). The dashed-dotted line indicates the interpreted D_b based on the criterion of minimum second vertical derivative in the v_s range of 400 and 700 m/s. Apparent velocities for both direct and critically refracted waves at the basement boundary are indicated on the SH-wave data in (b).

파의 위상속도에 미치는 영향이 종파속도 v_p 와 밀도 ρ 의 영향보다 크기 때문에, v_p 와 v_s 의 경험식(Kitsunezaki *et al.*, 1990)

$$v_p = 1,290 + 1.11v_s, \quad (11)$$

및 v_p 와 ρ 의 관계식(Ludwig *et al.*, 1970),

$$r = 1.2475 + 0.399v_p - 0.026v_p^2, \quad (12)$$

을 이용하여, v_s 의 함수로 치환한 후 식 (9)와 같이 잔차를 구하고 역산하였다(Fig. 5a). 여기서 v_p 와 ρ 의 단위는 각각 km/s와 g/cm³이다. 20회 역산한 후, 위상속도의 평균 제공근 오차는 10% 미만으로 수렴하였다.

자료 분석

지반의 v_s 특성

춘천시 경계 내의 총 50곳 측정점에서 기록한 레일리와 자료를 ESPAC 분석법으로 구한 v_s 로부터 기반암의 깊이(D_b) 및 횡파속도(v_s^b), 토양층의 평균 횡파속도($\bar{v}_s$), v_s30 을 각각 구하였다. 역산으로 구한 v_s 단면에서 기반암 깊이를 신뢰성 있게 구하기 위해서, 춘천시 68 개 농업용 시추공으로부터 구한 풍화암질 기반암 깊이를 등방성 선형 배리오그램을 적용한 단순 크리깅 방법으로 보간하여 기반암 분포도를 만들고(Fig. 6), 이를 역산된 v_s 와 비교하였다. 기반암 경계는 물리적 물성이 뚜렷이 변하는 미고결층과 고결층의 경계인 풍화암면에 해당한다. 분석 결과, v_s 가 풍화암의 범위인 400 ~ 700 m/s 구간(Keçeli, 2012)에서 깊이에 따른 v_s 변화율이 변하는 (즉, 2차 미분값이 최소가 되는) 깊이와 시추 주상도 상의 D_b 가 대략 일치하였다(Fig. 5a). 이는 풍화도 차이에 따른 기반암 내의 v_s

Fig. 6. Map for basement depths (D_b) estimated using information only from 68 geologic wells (black crosses) in Chuncheon, Korea.

차이가 압밀현상에 의한 미고결층 내에서의 v_s 증가보다 훨씬 작은데 기인하는 것으로 판단된다.

이런 기준으로 결정한 D_b 는 산림지를 제외한 저고도 지역에서 5 ~ 29 m의 범위를 가지며, 95% 신뢰구간에서 14.5 ± 0.7 m로 나타난다(Fig. 7a). 단 기반암의 깊이가 신뢰성 있는 분석 범위를 초과하는 3개 측정자료는 D_b , v_s^b , $\bar{v}_s$ 의 분석 및 도면 작성 시 제외하였다. 가장 얇은 곳은 산과 농지의 경계 부근이었으며, 북한강과 소양강가의 큰 D_b 는 두꺼운 퇴적층의 영향으로 보인다. 또한 시가지와 중북부의 지내리 지역에서도 20 m 이상의 D_b 지역이 분포한다.

한편 역산된 v_s^b 는 전체적으로 403.6 ~ 560.5 m/s의 비교적 균질한 속도 분포를 보이며, 95% 신뢰구간에서 515.4 ± 4.4

Fig. 7. Maps for (a) basement depths (D_b) estimated using information from both 68 geologic wells and the ESPAC analysis at 46 sites, (b) the v_s of the basement rocks (v_s^b), (c) the average v_s of the overburden material ($\bar{v}_s$), and (d) the average v_s to 30 m depth (v_{s30}) in Chuncheon, Korea. Land cover is categorized into three districts, i.e., downtown area (red circles), agricultural district (yellow circles), and unoccupied soil outcrops (cyan circles). Locations of site 38 (red star) on the Bongui mountain and sites (black circles) excluded for D_b , v_s^b , and $\bar{v}_s$ analyses are also indicated in figure (a), (b), and (c).

m/s의 값을 갖는다(Fig. 7b). 도심 속에 봉의산이 위치한 측점 38을 기준으로 동서방향으로 v_s^b 가 상대적으로 낮게 나타나는데, 이는 측점 서쪽과 북쪽에서 각각 북동-남서 방향과 동-서 방향으로 흐르는 북한강과 소양강에 의한 차별풍화나 지질구조의 영향을 지시할 가능성이 있다(Fig. 1). 또한 이 두 강이 만나는 의암댐의 동쪽과 남쪽을 중심으로 $v_s^b < 450$ m/s인 지역이 분포한다.

한편 $\bar{v}_s$ 는 208.2 ~ 375.0 m/s의 비교적 넓은 범위에 걸쳐 분포하며, 95% 신뢰구간에서 285.9 ± 6.6 m/s의 값을 가진다(Fig. 7c). 농지가 넓게 분포하는 중북부와 v_s^b 가 작게 분포하는 의암댐 부근에서 $\bar{v}_s$ 는 작은 값을 가지며, 산림지와 접하는 부근의 농지는 대체로 높은 값을 갖는다.

v_{s30} 은 전체적으로 225.7 ~ 582.9 m/s의 범위에 놓이며(Fig. 7d), 95% 신뢰구간에서 401.6 ± 12.6 m/s의 값을 갖는다. 이는 춘천시 저고도 지역의 지반이 $360 < v_{s30} < 760$ m/s인 S_C 와 $180 < v_{s30} < 360$ m/s인 S_D 에 해당하여 매우 조밀한 토사지반 및 연암지반과 단단한 토사지반(Ministry of Construction

and Transportation, 1997)으로 구성되어 있는 것으로 판단된다(Fig. 8). S_C 는 시가지를 포함한 춘천시 전역에 고루 분포하지만, S_D 는 시가지의 북부, 동부, 남부 3 방향에 위치한 농지를 중심으로 분포한다. 또한 소양호와 북한강 부근과 북한강 수계 내의 섬에 분포한다.

그러나 이상의 지반의 v_s 특성은 지반 증폭에 의해 직접적 피해가 클 것으로 예상되는 인구 밀집지역인 시가지와 일부 농지를 중심으로 야외에서 측정된 자료에 근거하며, 측정 수가 전체적인 면적에 비하여 충분하지 않은 한계성이 있다. 따라서 추후 지속적인 측정을 통하여 꾸준히 측점 밀도를 높이고 범위를 넓힘으로써, 분석의 신뢰성을 향상시켜야 할 것이다.

v_{s30} 지시자

대표적 지시자를 이용하여 광범위한 면적에 대한 v_{s30} 분포를 효과적으로 구하고자 하는 방법이 시 단위의 상대적으로 작은 면적에도 적용 가능한지를 파악하기 위하여 대표적 지시자(proxy)를 찾아보고, 상관성을 검토하였다. 대표적 지시자

Fig. 8. Micro-zonation of Chuncheon based on v_{s30} , composed of only two classes; 'stiff soil' (S_D ; yellow) in the central part and 'very dense soil and soft rock' (S_C ; grey) in the rest part.

(proxy)로는 지표면 경사도(Wald and Allen, 2007), 지표 고도(Chiou and Youngs, 2008), 지표면 형태(Matsuoka *et al.*, 2006), 지질 암상(Wills and Clahan, 2006; Yong *et al.*, 2012) 등이 있는데, 이 연구에서는 토지피복 종류, 기반암 암상, 지표면 경사도, 고도와의 상관성을 분석하였다. 분석시, 자료의 분포 폭을 넓히기 위하여 산림지에서 측정된 4개 측정점 자료까지 포함시켜 모두 50개 측정점자료를 이용하였다.

토지피복 종류

환경부에서 분류한 토지피복별 종류와 v_{s30} 와의 관계를 고찰하기 위해 농업지 29 곳, 시가지 13 곳, 산림지 4 곳, 나지 4 곳에서 각각 측정된 v_{s30} 을 분석하였다. 농업지, 시가지, 산림지, 나지에서의 v_{s30} 은 95% 신뢰수준에서 각각 417.5 ± 16.2 , 397.5 ± 18.5 , 575.4 ± 21.9 , 300.1 ± 33.9 m/s의 값을 가진다(Fig. 9a). 따라서 산림지에서 가장 높고, 주로 매립지인 나지에서 가장 낮은 값을 갖는다. 이러한 양상은 대부분의 농업

지와 시가지가 작은 v_s 를 갖는 제 4기 충적층으로 덮여 있는데 반해(Fig. 1), 산림지의 경우 기반암이 얇게 분포하는데 그 원인이 있는 것으로 분석된다.

기반암 암상

기반암 암상에 따라서 화강암 43 곳, 편마암 6 곳, 규장암/장석반암 1 곳에 측정점 위치하며, v_{s30} 값은 95% 신뢰수준에서 화강암, 편마암, 규장암/장석반암에 따라 각각 402.7 ± 14.5 m/s, 506.4 ± 16.2 m/s, 421.4 m/s로 나타난다(Fig. 9b). 화강암류 기반암에서 대체로 낮은 v_{s30} 을 보이는데, 이는 춘천지역 화강암의 풍화가 많이 진행되는데 기인하는 것으로 판단된다. 규장암/장석반암의 경우는 측정 수가 1개 지점에 불과하여 통계적 의미를 부여하기 어렵다.

지표면 경사도

지표면 경사도와 v_{s30} 사이의 상관관계는 몇몇 학자들에 의해 발표된 바 있으며, Allen and Wald (2009)가 미국의 샌프란시스코, 로스앤젤레스, 세인트루이스 지역과 타이완의 타이베이를 대상으로 수행한 연구가 대표적이다. 춘천시는 대부분이 산악지형으로, 1×1 km 격자자료를 사용하여 계산하면 평균 경사도가 4.2° (7.3%)로 경사도가 4.0° 이상인 활동성구조(active tectonic)에 해당한다. 격자 크기가 0.9×0.9 km인 30 초각(arcsecond)의 분해능 자료를 이용하여 구한 Allen and Wald (2009)의 수정된 활동성 구조의 결과와 v_{s30} 간의 관계와 비교하였다(Fig. 10a). 역산하여 구한 v_{s30} 과 지표면 경사도의 분포는 대부분 Allen and Wald (2009)의 세분화된 지반분류상 C_2 - D_3 에 해당하나, 넓게 산포되어 있음을 보인다.

수치지형도의 공간적 분해능은 지표면 경사도에 직접적 영향을 미치는 중요한 요소이므로, 정방향 격자간격이 0.1, 0.2, 0.3, 1.0, 2.0 km인 수치지형 자료로부터 계산한 지표면 경사도와의 상관성을 양대수 및 선형 비율에서 계산하였다. 양대수 비율에서 v_{s30} 과 지표면 경사도의 상관계수는 0.18, 0.20, 0.19, 0.04, 0.22으로 나타나고, 선형 비율에서 각각 0.12, 0.17, 0.18, 0.05, 0.22으로 분석되었다. Allen and Wald (2009)의 경우, 정

Fig. 9. Estimated v_{s30} categorized by (a) land cover and (b) surface geology. Vertical bars indicate ranges of standard error.

Fig. 10. Scatter plots with trend lines showing correlations of v_{s30} with (a) topographic slope of 2×2 km grid data and (b) surface elevation (m). The rectangles in (a) indicate ranges for sites B through E classified by Allen and Wald (2009) based on v_{s30} .

방향 격자간격 1.0 km에서 상관성이 가장 좋았지만, 춘천시의 경우는 오히려 v_{s30} 와의 상관성이 가장 낮은 특징적 모습을 보인다. 또한 선형 비율보다 양대수 비율에서 상대적으로 더 높은 상관성을 보이지만, 전체적으로 상관계수가 0.22 이하로 매우 작은 값을 보여 이들 사이에 상관도가 존재한다고 보기 어렵다(Fig. 10a). 따라서 춘천지역만을 대상으로 하는 경우에는 경사도가 v_{s30} 의 지시자로 적당하지 않은 것으로 판단된다.

지표 고도

GPS로 측정된 측정점의 대략적인 고도와 v_{s30} 의 상관관계를 양대수 비율과 선형 비율에 따라 분석하였다. 양대수 비율과 선형 비율에서 상관계수가 각각 0.35와 0.41로 나타나서, 선형 비율에서 상대적으로 더 나은 상관도를 보인다(Fig. 10b). 미국, 타이완, 일본을 대상으로 분석한 외국의 연구 결과(Ancheta *et al.*, 2013)와 원주시의 경우(Kim *et al.*, 2014)는 v_{s30} 의 예측을 위해 여러 지시자를 이용할 경우에 정확성이 높은 것으로 분석되었으나, 춘천시의 경우에는 고도를 제외한 다른 지시자들의 상관도가 매우 낮아서 고도만을 v_{s30} 의 지시자로 활용하였다. 이러한 상관분석 결과로부터 제시하는 v_{s30} 과 고도(E) 사이의 선형 경험식은

$$v_{s30}(E) = 302 \text{ m/s} + 0.9 \text{ s}^{-1} \cdot E, \quad (13)$$

으로, 여기서 $v_{s30}(E)$ 와 E 의 단위는 각각 m/s와 m이다.

다른 지시자보다 지표 고도와의 상관성이 상대적으로 높게

분석되었으나, 여전히 0.5 이하로 상관성이 높지 않은 점을 감안할 때, 광범위한 지역을 대상으로 개발된 지시자를 이용한 v_{s30} 예측 방법은 상대적으로 적은 면적의 춘천시에 적용할 경우에 높은 신뢰성을 기대하기 어려울 것으로 판단된다. 부득이식 (13)을 이용하여 v_{s30} 를 구해야 할 경우에는 상대적으로 넓은 오차범위를 함께 고려하여야 할 것이다.

토 의

이 연구에서는 분해능이 높은 수직 탄성파탐사로 v_s 를 측정하지 않고 레일리와 분산곡선을 역산하여 구하였으므로, 지표 굴절법 자료와 비교함으로써 분석 결과의 신뢰성 검증을 실시하였다. 특히 레일리와 분산곡선에 대한 민감도가 그리 높지 않은 v_s^b (Fig. 5a)의 신뢰성을 평가하기 위해 32번 측정에서 SH파 walkaway 방식으로 구한 v_s^b 와 비교하였다(Fig. 5b). 이 비교목적의 야외실험에서는 지면에 측선방향으로 고정시킨 40 kg의 H-형 철골의 측면을 5 kg의 해머로 측선에 수직하게 타격하여 SH 파를 발생시켰으며, 지면에 고정된 1 m 간격의 24개 8 Hz 수평 지오폰으로 수신하였다. 0.25 ms 샘플률로 1.024 s 동안 기록한 후 파원을 이동시켜, 지오폰 설치위치를 중심으로 양방향으로 읍셋 범위가 1.5 ~ 53 m가 되도록 하였다.

굴절파의 겉보기속도는 정방향(동서 방향)과 역방향(서동 방향)의 경우에 각각 474 m/s와 487 m/s으로 거의 같게 구해져서 굴절면이 경사가 매우 작음을 보인다. 이 두 굴절법의 겉보기속도로 구한 v_s^b 는 480 m/s로, ESPAC법을 통해 구한 v_s^b 인 507.3 m/s보다 5% 정도 낮은 값을 보인다. 또한 토양층의 경우, 굴절법과 ESPAC법을 통해 구한 v_s^b 는 각각 236 m/s와 252 m/s로, 굴절법으로 계산한 v_s^b 가 ESPAC법을 통해 구한 v_s^b 보다 6% 정도 작게 나타난다.

탐사 깊이가 충분하였는지는 판단하기 위해서, Boore (2004)가 제시한 방법으로 5 m, 10 m, 20 m 깊이까지의 v_s , 즉 v_{s5} , v_{s10} , v_{s20} 를 이용하여 v_{s30} 를 구하고, 이를 분산곡선 역산으로 구한 v_{s30} 과 비교해 보았다(Table 2). 이 때 경험식은 Sun

Table 2. v_{s30} derived from inversion of Rayleigh-wave dispersions and computed using average over depths of 5, 10, and 20 m.

		Average v_{s30}	R^2
Computed v_{s30}	v_{s5}	492.6	0.53
	v_{s10}	437.2	0.82
	v_{s20}	427.0	0.99
Inverted v_{s30}		420.2	1

et al. (2007)이 국내 부지 72개소 자료로부터 구한 선형 관계식을 사용하였다. 계산에 사용한 v_s 의 깊이가 깊어질수록 결정계수가 커져서 v_{s20} 의 경우에는 0.99에 이른다. 이는 이번 분석에 사용한 레일리와 분산곡선을 이용하여 30 m 깊이까지 v_s 를 역산한 결과가 탐사 깊이에 별 문제가 없음을 지지한다. 이는 파장의 1/2 ~ 1/3 정도가 탐사 깊이인 표면과 스펙트럼 분석법(SASW)이나 다중채널 표면파 분석법(MASW)보다 ESPAC 방법으로 레일리와 분산곡선을 구할 경우에는 탐사 깊이가 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 실제 이 방법으로 최대 배열간격의 10 ~ 20 배에 해당하는 파장까지도 지하 경계를 탐지하는데 이용된 바 있다(Matsuoka et al., 1996).

결론

강원도 춘천시의 50 지점에서 ESPAC 방법으로 레일리파를 기록하고, 도출한 분산곡선을 역산하여 천부 지반의 v_s 를 산출하였으며, 토지피복 종류, 기반암 암상, 지표면 경사도, 지표고도에 따른 v_{s30} 의 변화와 상관성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 산림지(4 개소)를 제외한 춘천시 저고도 지역의 D_b , v_s^b , $\bar{v}_s$, v_{s30} 의 범위는 각각 5 ~ 29 m, 403.6 ~ 560.5 m/s, 208.2 ~ 375.0 m/s, 225.7 ~ 582.9 m/s로 산출되었으며, 95% 신뢰구간에서 각각 14.5 ± 0.7 m, 515.4 ± 4.4 m/s, 285.9 ± 6.6 m/s, 401.6 ± 12.6 m/s의 값을 갖는 것으로 분석되었다.

2. 산출한 v_{s30} 을 이용하여 건설교통부 기준에 따라 지반을 분류하면, 시가지를 포함한 대부분의 춘천시 저고도 지역 지반은 S_c 에 해당하고, S_D 는 시가지의 주변의 농지 및 소양호와 북한강 부근, 북한강 수계 내의 섬에 분포한다.

3. 토지피복의 유형에 따라서는 v_{s30} 이 95% 신뢰구간에서 농업지, 시가지, 산림지, 나지에서 각각 417.5 ± 16.2 , 397.5 ± 18.5 , 575.4 ± 21.9 , 300.1 ± 33.9 m/s로 평가되어, 산림지에서 가장 높고, 매립지를 포함한 나지에서 가장 낮은 v_{s30} 의 값을 갖는 것으로 분석되었다.

4. 기반암의 암상에 따라서는 v_{s30} 이 95% 신뢰구간에서 화강암, 편마암, 규장암/장석반암에 따라 각각 402.7 ± 14.5 , 506.4 ± 16.2 , 421.4 m/s로 평가되었다.

5. v_{s30} 의 지시자로는 상관성이 매우 낮은($r < 0.22$) 지표면 경사도보다 상관도가 높은($r = 0.41$) 고도가 적당하나, 상대적으로 적은 면적의 춘천시에 적용할 경우에 높은 신뢰성을 기대하기 어려울 것으로 판단된다.

6. 레일리파로부터 구한 v_s 는 SH파 굴절법 자료에서 해석한 v_s^b 및 $\bar{v}_s$ 와 비교할 때, 오차가 5 ~ 6% 정도로 작아 거의 일치하였고, 30 m까지의 평균값 v_{s30} 도 v_{s20} 로부터 산출한 값과의 상관성이 매우 높아서($R^2 = 0.99$) 적용한 방법의 탐사 깊이가 적절하였다고 판단된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발(CATER 2012-8040)의 지원으로 수행되었습니다. 자료 기록에 많은 도움을 준 강원대학교 지진파 실험실의 김충호, 알리 아비드 학생과 분석 내용을 명확히 기술하는데 많은 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), *Bull. Seism. Soc. Am.*, **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.
- Boore, D. M., 2004, Estimating v_{s30} (or NEHRP Site Classes) from shallow velocity models (Depths < 30 m), *Bull. Seism. Soc. Am.*, **94**, 591-597.
- Borcherdt, R. D., 1994, Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification), *Earthquake Spectra*, **10**, 617-653.
- BSSC., 1997, NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Part 1-Provisions, 1997 Edition, Building Seismic Safety Council, Washington D. C.
- Capon, J., 1969, High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis, *Proc. IEEE*, **57**, 1408-1418.
- 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.
- Haskell, N. A., 1953, The dispersion of surface waves in multi-layered media, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **43**, 17-34.
- Hayashi, K., and Suzuki, H., 2004, CMP cross-correlation analysis of multi-channel surface-wave data, *Exploration Geophysics*, **35**, 7-13.
- Henstridge, J. D., 1979, A signal processing method for circular arrays, *Geophysics*, **44**, 179-184.
- ICBO., 1997, 1997 Uniform Building Code, **2**, Structural Engineering Design Provisions.
- Kang, S. Y., and Kim, K. H., 2011, Effects of DEM resolutions in site classification, *Journal of the Korean Society for Geo-Spatial Information System*, **19**, 21-28.
- Kang, S. Y., and Kim, K. H., 2012, Developing a seismic site classification map of Korea using geologic and topographic maps, *Disaster Advances*, **5**, 16-24.
- Keçeli, A., 2012, Soil parameters which can be determined with

- seismic velocities, *Jeofizik*, **16**, 17-29.
- Kim, C., Ali, A., and Kim, K. Y., 2014, Site characterization using shear-wave velocities inverted from Rayleigh-wave dispersion curves in Wonju, Korea, *Geophysics and Geophysical Exploration*, **17**, 11-20.
- Kim, K. Y., Kim, W. J., and Park, Y. H., 2012, Inversion of Rayleigh-wave Dispersion Curves for Near-surface Shear-wave Velocities in Chuncheon Area, *Geophysics and Geophysical Exploration*, **15**, 1-7.
- 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.
- Lee, D. S., Lee, H. T., Nam, K. S., and Yang, S. Y., 1974, Explanatory text of the geological map of Chuncheon sheet; 1:50,000 Chuncheon Sheet 6727-IV.
- 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.
- Matsuoka, M., Wakamatsu, K., Fujimoto, F., and Midorikawa, S., 2006, Average shear-wave velocity mapping using Japan engineering geomorphologic classification map, *J. Struct. Mecha. Earthq. Eng.*, **23**, 57-68.
- Matsuoka, T., Umezawa N., and Makishima, H., 1996, Experimental studies on the applicability of the spatial autocorrelation method for estimation of geological structures using microtremors, *Butsuri-Tansa (Geophys. Explor.)*, **49**, 26-41.
- Ministry of Construction and Transportation, 1997, Seismic design code, 36.
- Ministry of Environment, 2013, Land cover map (2008-2010), <http://egis.me.go.kr/ewebgis/webgis.jsp> (November 7, 2013 Accessed).
- Nanometrics, 2007, Taurus Portable Seismograph User Guide, 145-149.
- Nazarian, S., and Stokoe, II, K. H., 1984, In situ shear wave velocities from spectral analysis of surface waves: *Proceedings of the World Conference on Earthquake Engineering*, **8**, San Francisco, Calif., July, 21-28.
- Okada, H., 2003, The microtremor survey method, Society of Exploration Geophysicists, 127.
- 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.
- Park, C. B., Miller, R. D., and Xia, J., 1999, Multichannel analysis of surface waves, *Geophysics*, **64**, 800-808.
- 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., 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.
- Sun, C. G., 2009, Seismic zonation on site responses in Daejeon by building geotechnical information system based on spatial GIS framework, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, **25**, 5-19.
- Thomson, W. T., 1950, Transmission of elastic waves through a stratified solid, *Journal of Applied Physics*, **21**, 89-93.
- Toksz, M. N., 1964, Microseisms and an attempted application to exploration, *Geophysics*, **29**, 154-177.
- Wald, D. J., and Allen, T. I., 2007, Topographic slope as a proxy for seismic site conditions and amplification, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **97**, 1379-1395.
- Wills, C. J., and Clahan, K. B., 2006, Developing a map of geologically defined site- condition categories for California, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **96**, 1483-1501.
- 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., Iwahashi, J., and Braverman, A., 2012, Terrain-based site conditions map of California with implications for the contiguous United States, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **102**, 114-128.