

춘천 인근 천부 횡파속도 비파괴 측정 연구

김기영²⁾, 김우중¹⁾, 박영환¹⁾

¹⁾강원대학교 지구물리학과, kykim@kangwon.ac.kr

Non-destructive Measurements of Near-surface Shear-wave Velocities in Chuncheon Area

Ki Young Kim¹⁾, Woo-jung Kim¹⁾, Yeong Hwan Park¹⁾

¹⁾Department of Geophysics, Kangwon National University

1. 서론

지하 30 m 이내의 지구 구성 물질은 우리 생활에 밀접한 영향을 미치며, 지진에 의한 피해 정도 역시 지표 부근 물질의 특성에 크게 영향을 받는다. 이러한 부지효과를 평가하기 위해서, 30 m 깊이까지의 평균 v_s 인 Vs30이 전세계적으로 지진공학적 설계에 널리 사용되고 있다. 실제로 시추공에서 v_s 를 측정하기 위해서는 많은 시추공을 굴착해야 하는 등 경제적, 시간적, 환경적 부담이 크기 때문에, 비파괴적 방법인 지표 지구물리학적 탐사방법이 적용된다. 이 논문에서는 춘천시 지내리 조사지(Fig. 1)에서 능동적 방법인 다중채널 표면파 분석법(Multichannel Analysis of Surface Waves: MASW)과 수동적 방법인 공간자기함수 분석법(Spatial Autocorrelation: SPAC)으로 각각 구한 분산곡선을 병합하여 역산한 결과를 주변 시추공 자료와 비교하여 깊이 30 m까지 지층의 v_s 를 밝히고자 한다.

2. 실험자료 기록

2011년 2월, 농업용 관정이 있는 강원도 춘천시 지내리의 비교적 평탄한 논에서 수동적 및 능동적 레일리와 탐사를 실시하였다(Fig. 1). 수동적 탐사는 이 관정으로부터 남남서쪽으로 5 m 떨어진 지점에 고정된 지진계 주변에 3대 지진계가 정삼각형이 되도록 하였으며, 반경 5, 10, 20, 40 m 되는 원 주상에서 실시하였다. 1 Hz 고유진동수를 갖는 고주파 수직센서(Geospace GS-1) 4대를 동시에 이용하여 상시미동을 감지하고, 250 Hz로 샘플링하고 24 비트 수치변환기로 수치화시킨 후 이동식 기록계(Taurus 기록계)에 5분간 기록하였다.

또한 능동적 레일리와 탐사를 위해서, 이 관정 주변의 길이 46 m 측선을 따라 4.5 Hz 수직 지오폰 24개를 2 m 간격으로 설치하고, 양단 지오폰으로부터 19 m 떨어진 두 지점 사이에 놓인 2 m 간격의 모든 타격점에서 5 kg의 해머를 지표면에 놓인 알루미늄판에 타격함으로써 소규모 인공지진파를 발생시켰다. 모두 43개의 공발점 모음자료를 취득하였고, 동적 기록범위 114 db를 갖는 24채널 기록

계(ABEM MK-6)를 이용하여 1 ms 샘플률로 2 s 동안 기록하였다.

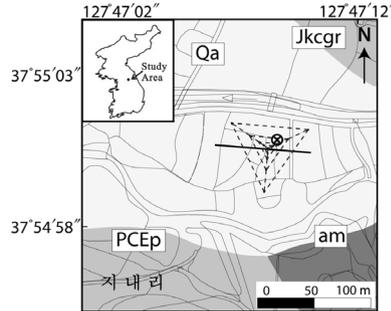


Fig. 1. Simplified geologic map on which superimposed are the seismic profile (solid line) for active surface-wave analyses, triangular arrays (broken lines) for microtremor measurements (soild circles), and an agricultural well (open circle with cross).

3. 자료처리

Miniseed 형식으로 기록한 상시미동 자료는 SAC 형식과 내부형식들로 변환하고 위치와 성분에 따라 분류한 뒤, 비교적 고주파의 산발성 잡음이 기록된 부분을 편집하였다. 디지털 푸리에 변환이 용이하도록 샘플길이 1024개의 블록들로 나누고 파워스펙트럼을 구하였으며, 0.003-30 Hz의 대역필터를 적용한 후, 수신기 위치 정보를 입력하였다. 그 후, 공간자기상관함수를 주파수 영역에서 계산하였고(Aki, 1957), 레일리파의 위상속도를 구하기 위해서 SPAC 계수들을 구하였다. 양(+)의 경사를 갖는 배열반응을 경사필터를 적용하여 최소화한 후, 속도스펙트럼의 최대 상관값을 중심으로 분산특성을 잘 나타내는 7-19 Hz 주파수 구간에서 분산곡선을 선택하였다(Fig. 2a).

다중채널 레일리파 분산곡선을 위상속도-주파수($c-\omega$) 영역에서 분산곡선을 나타내기 위하여, Park et al. (1998)이 제시한 대로 MASW 분석방법(Park et al., 1999)을 사용하여 상호상관된 자료의 위상을 주파수영역에서 이동시키고 중합하였다. 측선 서쪽 끝에서 3 m 떨어진 곳에서 발생시킨 신호의 분산곡선(Fig. 2b)은 위상속도가 50 Hz에서 210 m/s, 11 Hz에서 580 m/s로 주파수가 감소함에 따라 증가하는 뚜렷한 정상분산 양상을 보이며, 고차모드 분산곡선은 뚜렷이 나타나지 않는다.

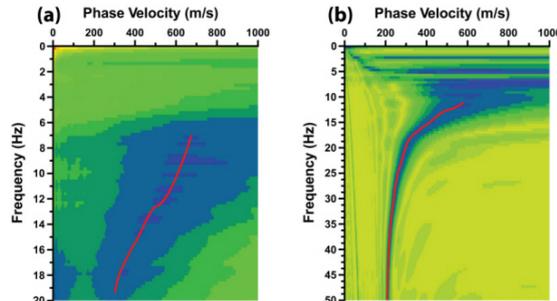


Fig. 2. The best-estimated dispersion curves (red solid line) superimposed on phase velocity spectra from (a) microtremors and (b) artificial surface waves, respectively.

투과심도가 깊은 수동적 방법으로 구한 분산곡선(Fig. 2a)의 7-19 Hz 구간과 천부 분해능이 우수한 능동적 방법으로 구한 분산곡선(Fig. 2b)의 11-50 Hz 구간을 병합하여 분산곡선을 작성하였다(Fig. 3). 1차원적 v_s 를 역산하기 위한 초기모델은 40개 층으로 구성되어 있으며, 층 두께를 1.0 m로 고정하였다. 초기모델은 분산곡선에서 구한 위상속도의 1.08배에 해당하는 v_s 를 그 파장의 1/3되는 깊이로 하는 일반적 가정을 우선 적용한 후, 각 층의 속도를 20% 증가시키고, 관정(B-1)에서 풍화암과 연암 경계가 각각 존재하는 5 m와 14 m 깊이에 v_s 불연속 제한조건을 추가하였다(Fig. 4). 모델의 위상속도는 Thomson- Haskell 방법(Thomson, 1950; Haskell, 1953)을 사용하여 계산하였다. 이 때, 각 층의 v_p 와 ρ 는 Kitsunozaki et al. (1990)와 (Ludwig et al., 1970)의 경험식을 이용하여 v_s 의 함수로 치환하였다. 이 속도모델을 이용하여 순차모델로 구한 분산곡선(검정색 실선)은 관측값(붉은색)의 상관계수는 99.9%로 매우 잘 일치하고 있음을 보인다.

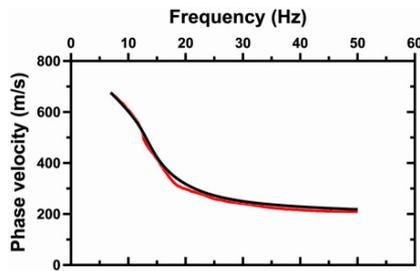


Fig. 3. The best-estimated combined (red curve) and the computed dispersion curves (black curve).

4. 자료분석 및 토의

상시미동을 이용한 SPAC 방법과 인공 표면파 분석법인 MASW 방법으로 구한 분산곡선을 병합하여 구한 레일리파 분산곡선(Fig. 3)을 역산하여 구한 v_s 를 관정 B-1의 시추주상도와 비교하였다(Fig. 4). 깊이 5 m의 풍화암 상부에 놓여 있는 토사, 사력, 혼전층의 역산모델 v_s 는 211-271 m/s로 평균 246 m/s의 값을 보인다. 시추공의 풍화암 구간인 깊이 5-14 m에서는 v_s 가 371-537 m/s로 1 m 당 약 18.4 m/s의 기울기로 선형으로 증가하는 것으로 나타난다. 이 구간의 v_s 가 깊이에 따라 증가하는 양상은 풍화도 감소에 따른 강성률 증가에 기인한 것으로 해석된다. 14 m 이하의 연암구간에서도 약 22 m 깊이까지는 v_s 가 선형으로 증가하는 양상을 보이며 25 m 깊이 이하에서는 거의 일정한 값($v_s = 870$ m/s)을 보인다.

역산결과가 초기모델에 영향을 많이 받으므로, 추후 초기모델에 의한 영향을 자세히 분석할 필요가 있다. 또한 역산의 안정된 해를 얻기 위해서 지나치게 평활화됨에 따라, 지층 경계를 인지하기 어려운 문제를 보완하는 연구를 수행하여야 할 것이다.

이 조사지에서의 Vs30은 594 m/s로 계산되나, 기반암 상부면의 깊이가 5 m 정도로 비교적 얇은 지역에서는 Vs30이 효과적이지 않을 수 있다. 이 조사지 지반의 공진주기(Nazarian and Stokoe, 1984)는 0.1 s 미만으로 계산된다. 보통 3-15층 콘크리트 건물의 공진주기가 0.5-1.0 s인 점(Goel and

Chopra, 1998)을 감안하면, 부지효과에 의한 지진위험성은 크지 않은 것으로 판단된다.

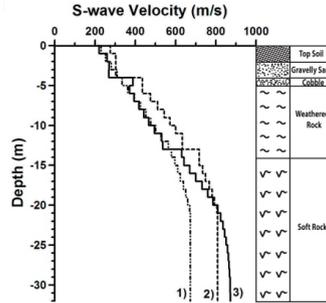


Fig. 4. Shear-wave velocities derived from the combined dispersion curve (3) in Figure 2. The initial v_s models were built using the 1/3-wavelength rule (1) followed by 20% increase and adding steps at the top and bottom of a weathered rock layer (2). For interpretation, a simplified well log from well B-1 is illustrated on the right of the v_s profiles.

참고문헌

- Aki, K., 1957, Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 35, 415-456.
- Goel, R.K. and Chopra, A.K., 1998, Period formulas for concrete shear wall buildings, *Jour. of Structural Engineering*, 124(4), 426-433.
- Haskell, N.A., 1953, The dispersion of surface waves in multilayered media, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 43, 17-34.
- 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*, 9-3, 1-17.
- Ludwig, W.J., Nafe, J.E., and Drake, C.L., 1970, *Seismic refraction in the Sea*, vol. 4, part 1, Wiley-interscience, 74.
- 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*, v. 8, San Francisco, Calif., July 21-28.
- Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J., 1998, Ground roll as a tool to image near-surface anomaly, 68th Ann. Internat. Mtg. Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 874-877.
- Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J., 1999, Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics* 64, 800-808.
- Thomson, W.T., 1950, Transmission of elastic waves through a stratified solid, *Journal of Applied Physics*, 21, 89-93.