상시미동 및 원거리 지진 자료로부터 구한 화천 지진관측소의 천부 횡파속도구조

윤원영¹ · 박순천¹ · 김기영^{2*}

¹기상청 국립기상연구소

²강원대학교 지구물리학과

Near-surface Shear-wave Velocities Derived from Microtremors and Teleseismic Data at the Hwacheon Seismic Station

Won Young Yun¹, Sun-Cheon Park,¹ and Ki Young Kim^{2*}

¹National Institute of Meteorological Research

²Department of Geophysics, Kangwon National University

요약: 화천 지진관측소의 시추주상도와 56일간 기록한 상시미동자료 및 3개 원거리 지진이벤트($M_w \geq 6.0$)를 이용하여 천부 횡파속도(v_s)를 구하였다. 지표에서 기록한 상시미동자료의 수평성분/수직성분 스펙트럼비로부터 10 m 두께의 토양층의 v_s ($v_s^f = 296$ m/s)를 결정하였다. 지표로부터 시추공 센서가 설치된 96 m 깊이까지의 평균 v_s ($\bar{v}_s = 1,309$ m/s)는 3개의 원거리 지진이벤트를 지표 및 시추공 센서로 기록한 자료들의 스펙트럼 상관도로 계산하였다. 이렇게 계산한 v_s^f 와 $\bar{v}_s$ 값을 이용하여 계산한 기반암의 v_s 는 2,150 m/s이며, 30 m까지의 평균 v_s 는 696 m/s이다. 화천 관측소 부지는 비교적 양호한 것으로 판단되며, 이 연구를 통해 구해진 천부 v_s 는 향후 지반의 부지증폭효과 및 지진재해의 정량적 평가에 활용될 수 있다.

주요어: 횡파속도(v_s), 화천 지진관측소, 상시미동, 원거리 지진, 수평성분/수직성분 스펙트럼비, 스펙트럼 상관도

Abstract: We estimated near-surface shear-wave velocity (v_s) at the Hwacheon seismic station using a geologic log of a well, microtremors recorded during a period of 56 days, and records of three teleseismic events ($M_w \geq 6.0$). The v_s of the 10-m thick soil layer ($v_s^f = 296$ m/s) was determined from horizontal-to-vertical spectral ratios of microtremors recorded at the surface. The average v_s ($\bar{v}_s = 1,309$ m/s) from the surface to the 96-m depth of a borehole sensor, was computed using spectral coherence analyses of data recorded by surface- and borehole-sensors for the three teleseismic events. Using these calculated values of v_s^f and $\bar{v}_s$, the computed bedrock v_s is 2,150 m/s and the time-averaged v_s to a 30-m depth is 696 m/s. Accordingly the Hwacheon seismic station is regarded as a relatively good site. The deduced near-surface v_s can be used for further quantitative evaluation of site amplification and earthquake hazard.

Keywords: shear-wave velocity (v_s), Hwacheon seismic station, microtremors, teleseismic, horizontal-to-vertical spectral ratio, spectral coherence

서론

일반적으로 지진파는 지하 암반층을 통과한 후 상부 토양층으로 전파하며, 부지별로 고유한 지질조건 및 지반의 물성에 따라 지반의 증폭 및 감쇠 현상이 발생한다(Sun, 2010). 이 때,

부지증폭영향과 지진재해의 정량적 평가를 위해서는 지진관측소 하부의 지반 물성에 대한 정보가 요구되며, 이를 파악하기 위해서는 천부의 속도구조 정보가 필요하다. 특히 지하 30 m까지의 횡파속도(v_s)구조는 부지증폭에 중요한 영향을 미친다. 이러한 v_s 와 지반의 물성은 시추공 내 수직탄성과 탐사(Vertical Seismic Profiling: VSP)를 통하여 정확히 파악할 수 있으며(Kim and Kim, 1997), 다중채널 표면파 탐사(Multichannel Analysis of Surface Waves method: MASW), 굴절과 탐사와 같은 지표 탄성과 탐사를 통하여도 구할 수 있다(Lee and Kim, 2000; Cho *et al.*, 2002).

하지만 화천 지진관측소의 경우, 지표 및 시추공에서 능동적 탄성과 탐사가 수행되지 않아서 천부 v_s 구조에 관한 정보가 전혀 없는 상황이며, 단지 시추공 지진계 설치 시 작성된 개략

2013년 7월 9일 접수; 2013년 8월 23일 수정; 2013년 8월 26일 채택

*Corresponding author

E-mail: kykim@kangwon.ac.kr

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

©2013, 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.

적인 시추주상도(Fig. 2)만이 가용한 정보이다. 따라서 지표와 시추공 지진계에 기록된 상시미동과 원거리 지진 이벤트 및 제한된 시추주상도 정보만을 이용하여 지반의 v_s 를 구하고자 한다.

수평성분/수직성분(H/V) 스펙트럼비 방법은 상시미동을 이용하여 지반응답을 구하는 지진학적 방법으로 많이 사용되어 왔다(Kim and Hwang, 2002; Hong and Kim, 2010; Castro *et al.*, 1997). 이 방법은 상부 토양층의 $v_s(v_s^s)$ 를 알거나 가정할 수 있을 경우에, H/V 스펙트럼비가 극대값을 갖는 지반응답의 우세주기로 부터 대략적인 토양층의 두께를 구하는 간편한 지구물리학적 방법이다. 화천 지진관측소의 경우에는 토양층의 두께를 시추주상도로부터 정확히 알고 있으므로, 이 H/V 스펙트럼비의 우세주기를 이용하여 v_s^s 를 역으로 구하고자 한다.

지표에 기록된 직접파와 시추공에 기록된 지표반사파에 의한 간섭효과를 보정하기 위하여 스펙트럼 상관도(Coherence)를 분석하는 방법이 종종 사용된다(Steidl *et al.*, 1996). 이 연구에서는 건설적 간섭이 일어나는 주파수로부터 시추공 지진계 설치 깊이까지의 평균속도를 구하는데 이 방법을 최초로 적용시켜 보고자 한다. 즉, 지표와 시추공 지진계에 기록된 신호/잡음비가 높은 원거리 지진 이벤트 자료의 상관도 분석을 통하여 지하 96 m까지의 평균 $v_s(\bar{v}_s)$ 를 구하고자 한다. 또한 이렇게 구한 $\bar{v}_s$ 와 v_s^b 를 이용하여 기반암의 $v_s(v_s^b)$ 를 산출하고자 한다.

배경 이론

H/V 스펙트럼비 방법

Nakamura (1989)에 의하여 처음 제안된 H/V 스펙트럼비 방법은 이미 국내외 연구자(Castro *et al.*, 1997; Kim and Hwang, 2002; Jung *et al.*, 2010)에 의하여 여러 차례 소개되었으며, 여기서는 Nakamura (2000)의 방법에 따라 간략히 설명한다. 지진동은 실체파와 레일리파로 구성되어 있으므로, 토양층의 지표에서 기록된 지진동의 수평성분 $H_s(f)$ 과 수직성분 $V_s(f)$ 은 각각

$$H_s(f) = A_h(f) \cdot H_b(f) + H_r(f) \quad (1)$$

와

$$V_s(f) = A_v(f) \cdot V_b(f) + V_r(f) \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 $A_h(f)$ 와 $A_v(f)$ 는 수직으로 입사하는 실체파의 수평과 수직성분의 증폭인자이고, $H_b(f)$ 와 $V_b(f)$ 는 기반암에서 기록된 지진동의 수평 및 수직성분이며, $H_r(f)$ 와 $V_r(f)$ 는 레일리파의 수평과 수직성분을 나타낸다. 토양층에서의 수평성분 증폭인자와 수직성분 증폭인자의 비율인 T_h 는

$$T_h(f) = \frac{QTS}{H_b(f)/V_b(f)} \quad (3)$$

으로, 여기서 레일리파의 H/V 스펙트럼비인 QTS (Quasi-Transfer Spectra)는

$$QTS = \frac{H_b(f)}{V_b(f)} \cdot \frac{[A_h(f) + H_r(f)/H_b(f)]}{[A_v(f) + V_r(f)/V_b(f)]} \quad (4)$$

으로 표시할 수 있다(Nakamura, 2000). 기반암에서의 증폭현상은 없다고 가정하면, $H_b/V_b \approx 1$ 이 된다. 레일리파의 영향이 훨씬 큰 경우에는 식 (4)에서 괄호 안의 두 번째 항이 우세하므로, 식 (3)은

$$T_h(f) \approx \frac{H_r(f)}{V_r(f)} \quad (5)$$

로 나타낼 수 있다. 즉, 부지응답은 지표에서 기록한 상시미동의 H/V 스펙트럼비로부터 간단히 계산될 수 있다.

한편, 수직 입사하는 횡파가 증폭반사에 의해 증폭률이 최대가 되는 공진주기 T 는

$$T = \frac{4D_s}{V_s} \quad (6)$$

으로, 파장이 상부 토양층 두께(D_s)의 4배일 때 가장 크게 진동하게 됨을 뜻한다. 횡파를 대상으로 한 식 (6)은, 주로 레일리파로 구성된 상시미동을 이용하여 토양층의 두께를 대략적으로 구하는데도 널리 적용한다(Hong and Kim, 2010).

지표와 시추공 자료의 스펙트럼 상관도 분석

지표와 시추공에서 각각 기록된 지진 이벤트 자료의 스펙트럼 상관도(γ_{12}^2)는

$$\gamma_{12}^2 = \frac{[S_{12}(f)]^2}{S_{11}(f)S_{22}(f)} \quad (7)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 $S_{11}(f)$ 와 $S_{22}(f)$ 는 각각의 지진기록 자기상관값을 주파수영역에서 나타낸 것이며, $S_{12}(f)$ 는 두 기록을 상호상관한 것이다(Steidl *et al.*, 1996).

이 γ_{12}^2 는 평활화 창길이에 민감하게 반응하며, 두 기록의 위상차이가 $2m\pi$ 일 때 극대값을, $(2n+1)\pi$ 일 때 노치(notch) 형태의 극소값을 갖는다. 따라서 지표면 반사파를 무시할 경우, 식 (7)의 γ_{12}^2 는 두 관측점의 깊이 차이(D)가 파장의 정수배일 때, 극대값을 갖게 된다. 이번 연구에서는 지표와 시추공에 각각 기록된 지진자료의 γ_{12}^2 를 분석하여 구한 극대값을 보이는 주파수와 시추공 깊이 정보를 이용하여 지표로부터 시추공 센서 깊이까지의 $\bar{v}_s$ 를 계산하였다.

자료 기록

화천 지진관측소에는 지하 96 m에 시추공 광대역 속도센서(CMG-3TB)가 설치되어 있으며, Q330S 기록계에 코르기 빈도 100 Hz로 연속적으로 지진자료를 기록하고 있다. 시추공 지진

Fig. 1. Map showing the Hwacheon seismic station (triangle) and epicenters of the earthquakes (stars) used in this study.

계의 수직 상부 지표에 이동식 광대역 속도계(CMG-3T)와 기록계 Q330을 2011년 4월 18일부터 6월 15일까지 56일간 설치하여 고르기 빈도 200 Hz로 자료를 기록하였다.

상부 토양층의 v_s 인 v_s^s 를 구하기 위하여 H/V 스펙트럼비 분석에는 지진 이벤트가 없는 2011년 5월 1일 새벽 1시부터 2시까지 1시간 동안 지표 지진계에 기록된 상시미동 자료를 사용하였다. 또한 시추공 센서 깊이까지의 평균 v_s 인 $\bar{v}_s$ 를 계산하기 위하여 2011년 4월 18일부터 6월 15일까지 56일 동안 지표와 시추공에서 기록된 규모 6.0 이상의 원거리 지진자료 (Fig. 1)를 사용하였다.

자료 분석

자료 전처리

Mini-SEED 포맷 형태로 기록된 자료를 SAC (Seismic Analysis Code)포맷으로 변환하고, IRIS (Incorporated Research Institute for Seismology)에서 제공하는 SAC 프로그램을 이용하여 전처리 과정을 수행하였다. 지진계와 기록계에 의한 효과를 보정하였고, 평균값 및 편류(drift)효과를 제거하였으며, 지표에 기록된 자료는 알리아싱 방지필터를 적용하여 시추공 자료와 동일한 고르기 빈도 100 Hz로 변환하였다. 또한 동서 및 남북성분으로 기록된 지진 자료의 후방위각(back-azimuth)을 이용하여 파선방향으로 회전시킨 후, SH파가 기록된 점선성분을 $\bar{v}_s$ 분석에 사용하였다.

H/V 스펙트럼비 분석

H/V 스펙트럼비 분석은 SESAME 유럽연합에서 개발된 GEOPSY 프로그램을 사용하였으며(Wathelet, 2005), 한 시간의 상시미동 자료를 25초 길이의 시간창으로 나누고 50%씩 중첩하여 계산하였고 상시미동이 아닌 기록된 이벤트 신호를 걸러내기 위하여 각 시간창에 STA/LTA(Short Time Average/Long Time Average)를 수행하였으며 그 창 길이는 각각 1초와 30초로 설정하였다. H/V 스펙트럼비는 Nakamura (1989)가 제안한 방법으로 계산하였으며, 나이퀴스트 주파수인 50 Hz까지 0.006 Hz 고르기 간격으로 기록된 자료를 분석하였다.

γ_{12}^2 분석

지표와 시추공에서 기록된 지진자료는 전처리를 거친 후, 식 (7)을 이용하여 γ_{12}^2 를 분석하였다. 평활화 창길이(W)를 고르기 간격 3 샘플부터 101 샘플까지 2 샘플 간격씩 증가하며 시험하였고, 분해능과 신호/잡음비가 모두 우수한 $W=25$ 일 때 극대값을 보이는 주파수(f_o)를 $\bar{v}_s$ 계산에 사용하였다. f_o 와 $\bar{v}_s$ 는

$$\bar{v}_s = f_o \cdot D \cdot \cos \theta \quad (8)$$

의 관계가 있으며, 여기서 D 와 θ 는 각각 시추공 지진계의 설치 깊이와 상향파의 입사각을 뜻한다. 화천 관측소의 경우, 고결된 기반암에 비하여 미고결 상태인 토양층에서의 v_s 가 매우 작을 것이 예상되므로, 이 연구에서는 수직입사를 가정하고 ($\theta=0$) $\bar{v}_s$ 를 구하였다. 또한 우세주파수가 1 Hz 이하인 장주기 신호의 경우에 적용할 수 있는 PREM 속도구조모델 (Dziewonski and Anderson, 1981)과 Kim (1995)이 제안한 한반도 속도구조모델로부터 구한 v_s 를 이용하여 구한 값과 비교하였다.

분석 결과

토양층의 v_s (v_s^s)

화천 지진관측소의 시추주상도에 의하면 토양층은 지표로부터 기반암 상부 경계까지 약 10 m이다(Fig. 2). H/V 스펙트럼비 분석 결과, 정점을 보이는 우세주파수 f_o 는 7.4 Hz와 46 Hz이다(Fig. 3). $f_o = 7.4$ Hz와 $D_s = 10$ m를 식 (6)에 대입하면 v_s^s 는 약 296 m/s로 계산된다. 두 번째 f_o 인 46 Hz는 10 m 두께의 토양층보다 더 얇은 층 경계를 나타내는 것으로, 앞에서 구한 $v_s^s = 296$ m/s를 적용하면 약 1.6 m로 계산된다. 실제로 v_s 가 이 보다 작은 점을 가정하면 최상부의 건조한 표토층 두께는 이보다 얇은 가능성이 높다.

지하 96 m 깊이까지의 평균 v_s ($\bar{v}_s$)

시추공 지진계가 설치된 깊이(D)인 96 m까지의 $\bar{v}_s$ 를 구하기 위하여, 일본에서 2011년 4월 23일에 발생한 지진(이벤트 1)과 솔로몬제도에서 2011년 4월 23일에 발생한 지진(이벤트

Fig. 2. Geologic log at the Hwacheon seismic station. A 10-m thick soil layer and a 4-m layer of soft bedrock overlie the hard rock in which the borehole sensor is installed at a depth of 96 m.

Fig. 3. H/V spectral ratios of microtremors recorded by a broadband seismometer at the surface. Peak frequencies occur at approximately 7.4 and 46 Hz.

2) 및 인도네시아에서 2011년 5월 10일에 발생한 지진(이벤트 3)자료를 이용하였다. 이 지진 이벤트들의 진앙거리는 각각 1,300, 6,409, 7,732 km이며 지진발생시간, 위·경도, 규모 등의 주요 지진정보를 Table 1에 정리하였고, 그 중 지표와 시추공 지진계에 기록된 이벤트 2의 지진파형을 Fig. 4에 도시하였다.

지표와 시추공 지진계에 기록된 자료를 식 (7)을 이용하여 γ_{12}^2 를 구한 결과, 이벤트 1, 2, 3의 f_0 는 각각 13.58, 13.57, 13.78 Hz로 구해지며, 이들의 대략적인 배수인 28.21, 28.37, 30.03 Hz에 배음(overtone)이 존재한다(Fig. 5). 진앙거리가

Fig. 4. Waveform data of Event 2 (Table 1), recorded (a) on the ground and (b) in the borehole of the Hwacheon seismic station.

30° (지표거리 약 3000 km) 이상인 이벤트 2와 3의 파선은 관측소에 거의 수직으로 입사한다고 가정할 수 있으며, 만약 상부에 매우 느린 퇴적층이 존재한다면, 약 12°의 진앙거리를 갖는 이벤트 1의 경우도 수직입사를 가정할 수 있다. $\theta=0$ 일 때, 식 (8)을 이용하여 구한 $\bar{v}_s$ 는 이벤트 1, 2, 3에 대하여 각각 1,304, 1,303, 1,322 m/s이고, 이들의 평균 $\bar{v}_s$ 는 1,309 m/s이다 (Table 2).

한편, 전 지구적으로 널리 사용되는 PREM 속도구조모델로 구한 이벤트 1, 2, 3의 입사각 45.35°, 21.37°, 18.68°를 이용하여 계산한 $\bar{v}_s$ 는 916, 1,213, 1,253 m/s이다. 이들의 평균 $\bar{v}_s$ 는 1,127 m/s로 계산되어 수직입사 모델보다 13.9% 작게 구해진다. 또한, 최상부층의 두께가 2.6 km인 Kim (1995)이 제안한

Table 1. List of teleseismic events used for this study.

Event No.	Epicentral Distance (km)	Date	Origin Time (KST)	Lat (°)	Lon (°)	M_w	Back Azimuth (°)
1	1336	2011.04.23	19:13:00	39.2 N	143.0 E	6.0	80
2	6409	2011.04.23	13:16:55	10.4 S	161.2 E	6.8	139
3	7732	2011.05.10	17:55:11	20.2 S	168.2 E	6.8	139

Fig. 5. Surface/borehole spectral coherence of (a) Event 1, (b) Event 2, and (c) Event 3 in Table 1. The fundamental peaks (F) and their harmonic overtones (O) due to a constructive interference are indicated with arrows.

Table 2. Peak frequencies (f_0) and average shear-wave velocities ($\bar{v}_s$) derived from the spectral coherence analysis of the teleseismic events for three different velocity models.

Event No.	f_0 (Hz)	$\bar{v}_s$ (m/s)		
		Vertical Incidence	PREM	Kim (1995)
1	13.58	1,304	916	1,017
2	13.57	1,303	1,213	1,234
3	13.78	1,322	1,253	1,270
Average	13.64	1,309	1,127	1,174

한반도 속도구조모델로 계산한 이벤트 1, 2, 3의 $\bar{v}_s$ 도 1,017, 1,234, 1,270 m/s로 수직입사 모델보다 평균 10.3% 작게 구해진다. 이는 최상부층의 두께가 PREM과 Kim 모델의 경우, 각각 15 km와 2.6 km로서 우세주파수 13 ~ 14 Hz 인 지진파가 지표 근처에서 굴절된 현상이 반영되지 못한데 기인한다.

깊이 10 ~ 96 m 구간에서의 기반암의 $v_s(v_s^b)$

기반암에서의 $v_s(v_s^b)$ 는 지표에서 H/V 스펙트럼비를 이용하여 구한 v_s^s 와 지표 및 시추공자료의 γ_{12}^2 로 계산한 $\bar{v}_s$ 의 함수로,

$$v_s^b = \frac{\Delta D_b}{(\Delta D_s + \Delta D_b)/\bar{v}_s - \Delta D_s/v_s^s} \quad (9)$$

와 같이 나타낼 수 있으며, 여기서 ΔD_s 와 ΔD_b 는 상부 토양층과 기반암의 두께이다. 수직입사 모델의 경우($\theta=0$), 식 (9)에 $\Delta D_s = 10$ m, $\Delta D_b = 86$ m, $v_s^s = 296$ m/s, $\bar{v}_s = 1,309$ m/s의 값을 적용하여 구한 v_s^b 는 2,150 m/s이다.

이 값들을 이용하여 구한 30 m 깊이까지의 평균 $v_s(v_s,30)$ 는 696 m/s로 건설교통부(MOCT, 2004)의 암반분류에 의하면 매우 조밀한 토사지반 또는 연암지반(Sc)에 해당된다. 따라서 화천 지진관측소의 기반암은 연암층이 존재하며, 추후 수직탄성과 탐사 등을 통한 더욱 정밀한 횡파속도구조 규명이 필요할 것이다.

결론 및 토의

이번 연구에서는 시추주상도 정보와 1시간 동안의 상시미동 자료 및 규모 6.0 이상의 3개 지진이벤트 자료를 이용하여 화천 지진관측소의 천부 횡파속도(v_s)를 구하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) H/V 스펙트럼비 방법으로 구한 우세주파수 7.40 Hz와 시추주상도의 상부 토양층의 두께 10 m를 이용하여 계산한 토양층의 v_s 는 약 296 m/s이다.
- 2) 지표와 시추공에서 기록한 지진자료의 상관도분석으로 구한 우세주파수 13.64 Hz와 시추공 센서의 설치 깊이 96 m까지의 평균 v_s 는 수직입사의 경우 1,309 m/s이다.
- 3) 토양층의 $v_s(v_s^s = 296$ m/s)와 깊이 96 m까지의 평균 $v_s(\bar{v}_s = 1,309$ m/s)를 이용하여 계산한 기반암의 v_s 는 2,150 m/s이며, 이를 이용하여 구한 $v_s,30$ 은 696 m/s로 매우 조밀한 토사지반 또는 연암지반(Sc)에 해당된다.

감사의 글

이 연구는 국립기상연구소 관측·지진기술 지원 및 활용 과제의 일환으로 수행되었으며, 2013년도 강원대학교 학술연구 조성비로 연구하였음(과제번호-12131278)을 밝힙니다. 본 논문을 심사하고 유익한 조언을 해 주신 익명의 두 심사위원께 감사드립니다.

참고문헌

- Castro, R. R., Mucciarelli, M., Pacor, F., and Petrangaro, C., 1997, S-Wave Site-Response Estimates Using Horizontal-to-

- Vertical Spectral Ratios, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **87**, 256-260.
- Cho, C. S., Lee, H. I., and Suh, J. H., 2002, Interpretation on the Subsurface Velocity Structure by Seismic Refraction Tomography, *Geophysical Exploration*, **5**(1), 6-17.
- Dziewonski, A. M., and D. L. Anderson, 1981, Preliminary Reference Earth Model (PREM), *Phys. Earth Planet. Inter.*, **25**, 297-356.
- Hong, M. H., and Kim, K. Y., 2010, H/V Spectral-ratio Analysis of Microtremors in Jeju Island, *Geophysics and Geophysical Exploration*, **13**(2), 144-152.
- Jung, H., Kim, H. J., Jo, B. G., and Park, N. R., 2010, The Microtremor HVSRs in the SW Korean Peninsula I: Characteristics of the HVSR Peak Frequency and Amplification, *Journal of Korean Earth Science Society*, **31**(6), 541-554.
- Kim, K. Y., and Kim, H. G., 1997, Seismic velocities and elastic moduli of sedimentary layers in the Pungam Basin, *Journal of the Geological Society of Korea*, **33**(2), 111-116.
- Kim, S. K., 1995, A Study on the Crustal Structure of the Korean peninsular, *Journal of the Geological Society of Korea*, **31**(4), 393-403.
- Kim, S. K., and Hwang, M. W., 2002, Estimation of Subsurface Structure and Ground Response by Microtremor, *Journal of Korean Earth Science Society*, **23**(4), 380-392.
- Lee, K. J., and Kim, K. Y., A Seismic Refraction Study on the Basement near the Chonbuk Ranch in Gyeongju, *Journal of the Korean Geophysical Society*, **3**(4), 215-226.
- MOCT, 2004, Seismic Design Guideline of Utility-Pipe Conduit, Ministry of Construction Transportation, 49.
- Nakamura, Y., 1989, A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, *Quarterly Reports*, **30**, 25-30.
- Nakamura, Y., 2000, Clear Identification of Fundamental Idea of Nakamura's Technique and Its Applications, Proceedings of 12th World Conf. Earthq. Engrg. (WCEE), Auckland, New Zealand, 1-8.
- Steidl, J. H., Tumarkin, A. G., and R. J. Archuleta, 1996, What Is a Reference Site?, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **86**, 1733-1748.
- Sun, C.-G., 2010, Suggestion of Additional Criteria for Site Categorization in Korea by Quantifying Regional Specific Characteristics on Seismic Response, *Geophysics and Geophysical Exploration*, **13**(3), 203-218.
- Wathelet, M., 2005, Array recordings of ambient vibrations: surface waves inversion. Ph. D. Thesis, University of Liege, Belgium, 177.