

상시미동의 수평/수직 스펙트럼비를 이용한 예당댐체의 지진응답특성 분석

정진훈 · 김기영[‡]

강원대학교 지구물리학과

요 약

충청남도 예당저수지 댐체의 지진동 응답특성을 파악할 목적으로 댐 마루에서 3성분 가속도 센서로 30분간 100 Hz 샘플률로 상시미동을 기록하였고, 수직성분과 수평성분의 진폭 스펙트럼비(H/V) 방법으로 분석하였다. 수평/수직(H/V) 값은 4.2, 7.4, 13.5 Hz 정곡점에서 2.2, 2.0, 2.1의 값을 갖는다. 정곡 주파수 4.2 Hz와 이의 배음반응인 13.5 Hz는 높이 13.5 m인 댐체에 의한 증폭 현상임을 보여주며, 반사계수법으로 구한 모델 결과와 비교적 잘 일치한다. 한편 1차원 속도모델에서 나타나지 않는 7.4 Hz의 정곡점은 댐체 내부의 다중반사 및 3차 원적 효과 등에 기인한 것으로 해석된다.

주요어: 상시미동, 수평/수직 스펙트럼비, 정곡 주파수, 공진주기, 예당댐

Jinhoon Jung and Ki Young Kim, 2017, Seismic responses of the Yedang dam in Korea using H/V spectral ratios of microtremors. Journal of the Geological Society of Korea. v. 53, no. 2, p. 265-275

ABSTRACT: To reveal site responses of the Yedang dam in Korea, microtremors were recorded on the crest using a 3-component accelerometer. The amplitude spectra for each component of the 30-minute microtremors digitized at a 100 Hz sampling rate were analyzed and their horizontal-to-vertical ratios (H/V) were examined. Peaks of the H/V spectral ratios are at 4.2, 7.4, and 13.5 Hz with values of 2.2, 2.0, and 2.1, respectively. The peak frequency of 4.2 Hz and its overtone at 13.5 Hz which are responsible to the amplification of the dam material match relatively well with the modeling results computed by the reflectivity method. On the other hands, the peak occurring at 7.4 Hz, which is absent in the one dimensional velocity model, might reflect the interference of multiples caused by three dimensional geometrical effects and multiple reflections inside the dam.

Key words: microtremor, horizontal-to-vertical ratios, peak frequency, resonance period, Yedang dam

(Jinhoon Jung and Ki Young Kim, Department of Geophysics, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea)

1. 서 론

우리나라는 국토의 70%가 산지로 강우의 유출이 빠르고 토지의 보수력이 낮아서, 농업용수 확보를 위한 저수지를 많이 축조해 왔다. 그러나 대부분의 저수시설 댐체가 노후되어 누수현상과 지진동으로 인한 안정성이 문제가 되며, 이에 따라 시설물에 대한 보수 및 보강이 필요한 실정이다. 강진동 관측자료가 부족한 우리나라는 내진설계에 필요한 지반응답특성 결정시 대부분 NEHRP (BSSC, 1997) 기준을 적용하고 있다. 그러나 각 시설물에 보다 적합한

내진설계 요소를 구하기 위해서는 부지별로 지반의 공학적 특성 및 부지증폭함수를 정확히 밝힐 필요가 있다.

지반의 공학적 특성을 파악하기 위한 요소로는 깊이 30 m까지의 평균 횡파속도인 v_{s30} , 표준관입시험의 N 값, 비배수 전단강도(undrained shear strength), 지질암상, 기반암 깊이 등이 있다(Yun and Suh, 2007). 부지 증폭함수를 평가하는 방법으로는 지반의 기하학적 형태와 탄성과 속도 및 임피던스 등을 이용하여 평가하는 방법(Sun *et al.*, 2007)과 노두상의 기준점과 조사지 사이의 스펙트럼비를 이용해서 구하는

[‡] Corresponding author: +82-33-250-8584, E-mail: kykim@kangwon.ac.kr

방법이 있다. 이 중, 스펙트럼비를 이용하는 방법은 Borchardt (1970), Rogers *et al.* (1984), Bonilla *et al.* (1997) 및 Hartzell *et al.* (1997) 등에 의해 연구되어 왔지만 조사지 주변에 노두가 잘 발달되어 있어야 하는 제약이 있다. 이러한 제약 없이 적용할 수 있는 스펙트럼 분석법은 분석대상 조사지에서 관측한 지반진동의 수평과 수직성분의 스펙트럼비(H/V)만을 이용하여 구할 수 있는 장점이 있다(Nakamura, 1989).

이 연구에서는 간단한 1차원적 구조에 주로 적용하는 H/V 스펙트럼비 방법을 3차원 구조의 해당저수지 댐체에 시험적으로 적용하고 결과의 정확성을 분석하고자 한다. 이를 위하여 댐 마루와 인근 시추공에서 기록된 상시미동의 진폭 스펙트럼 특성을 살핀 후, 이 스펙트럼의 수평성분과 수직성분의 비를 분석하였다. 이를 댐 마루에서의 굴절법 및 표면파

탐사로 밝혀진 속도합수를 이용하여 구한 1차원적 이론적 전달합수와 비교하여 해석하였다.

2. 연구지역 및 자료기록

총 저수용량 4,710 m³인 해당저수지는 1964년에 준공되었으며, 충청남도 예산군 대흥면 노동리에 위치한다(그림 1a). 무한천의 서쪽 방향에 있는 후사리에는 선캠브리아기 각섬석 화강편마암이, 동쪽 방향의 지곡리에는 중생대 쥐라기의 흑운모 화강편마암이 각각 분포하며, 이 기반암들을 해당저수지와 하천을 따라 제4기 충적층이 부정합으로 덮고 있다(Um and Lee, 1963). 여수로 동쪽 끝부분에서 북쪽 방향으로 약 160 m 떨어진 B 지점(그림 1a)에서 시추한 결과는 기반암인 흑운모 화강편마암이 15 m 깊이에 존재하고 있음을 보인다(HGC, 2011).

해당저수지의 시설물은 해당댐의 댐체(서측)와 여수로(동측)로 구성되어 있다(그림 1a). 해당저수지의 댐체 형식은 중심 코어형 필댐(fill dam)으로 높이 13.5 m, 길이 314.5 m, 마루폭 6.0 m이다(KIST, 2010; 그림 1b). 댐체 축조 전에, 터파기와 암반기초 위에 풍화암 등 취약부분을 제거하였고 기초지반의 균열부분에 그라우팅과 같은 기초처리를 시행하였다(MLTMA, 2011; 그림 1b). 댐 관리를 목적으로 2011년부터 댐 마루, 댐 기초, 수문에 각각 3성분 지표형 가속도 센서(CMG-5TC) 1 대와 B 지점의 시추공 30 m 깊이에 3성분 시추공형 가속도 센서(CMG-5TB)가 설치되어 운영되고 있다(그림 1). 이번 상시미동 분석에는 댐 마루와 시추공에 설치된 지진계에 100 Hz 샘플링으로 연속해서 기록된 자료 중, 2012년 10월 27일 3시(UTC)부터 30분간 기록된 자료를 사용하였다(그림 2). 이때 알리아싱 방지를 위해 고주파 차단필터(high-cut filter)를 적용한 후, 수치화하여 기록하였다(Güralp, 2008; Güralp, 2011). 기록 당시의 평균 풍속은 2.2 m/s였으며, 강수량은 약 21.6 mm였다(KMA, 2015).

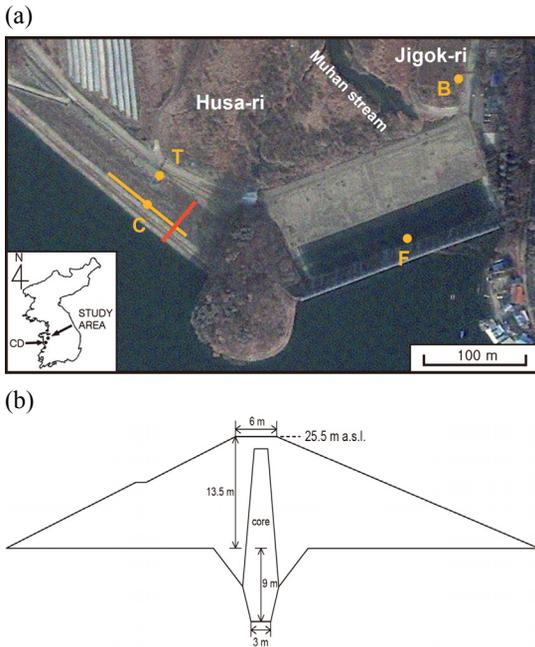


Fig. 1. (a) Aerial view of the 315-m long Yedang embankment dam in Yesan, Korea. (b) Simplified geometric structure of Yedang dam along the profile (red line). Locations are shown of the short seismic profile (solid line) and 3-component accelerometers (solid circles) on the crest of the dam 'C', at the toe of the dam 'T', on the floodgate of the dam 'F', and in a borehole 'B'. Letter 'CD' on the inset map shows the location of the Cheongcheon dam 33 km south-southwest of the study area. Surface elevation is in meter above sea level (a.s.l.).

3. 배경 이론 - 수평/수직(H/V) 스펙트럼비

Nakamura (1989)가 제안한 H/V 스펙트럼비 방법은 지표에서 기록한 상시미동을 이용해 지반응답을 구하는 방법으로, 지진파 임피던스 차이가 큰 층

의 경계가 존재할 경우에 상부층의 공진주기를 쉽게 결정할 수 있는 특징을 가지고 있다. 또한 지진발생이 적은 중약진 지역에서도 적용이 가능하며, 단일 관측지점 자료만으로도 해석이 가능한 장점을 가지고 있다. 국내에서는 Kim and Hwang (2002)이 광주광역시와 경주의 지하구조와 강진동에 의한 지반 응답, Kim and Hong (2012)이 제주도의 기반암 분포, Jung *et al.* (2010)이 한반도 남서부 지역의 부지 반응을 규명할 목적으로 각각 적용한 바 있다.

H/V 스펙트럼비 방법은 간단하고 실용적인 방법이지만, 그 원리는 아직 완전히 밝혀지지 않았다. 이 분석법을 처음 제안한 Nakamura (1989)는 상시미동의 H/V 스펙트럼비 정곡점이 다중 반사된 S파와 레일리파에 의해 결정된다고 보았으나, Lachet and Bard (1994)는 레일리파에 의해 주로 결정됨을 합성 지진자료를 이용하여 설명하였고, Arai and Tokimatsu (2000)는 레일리파와 러브파에 의해 결정된다는 이론을 제시하였다.

이 방법이 처음 소개된지 11년 뒤에 Nakamura

본인이 제시한 배경이론은 다음과 같다(Nakamura, 2000). 지진동이 실체파와 레일리파로 구성되어 있고 레일리파의 영향이 크다고 가정할 경우, 토양층 표면에서 기록된 지진동의 수평성분 $H_s(f)$ 과 수직성분 $V_s(f)$ 의 스펙트럼 비는 레일리파의 수평성분 $H_r(f)$ 및 수직성분 $V_r(f)$ 의 비율과 거의 같아진다. 즉,

$$\frac{H_s(f)}{V_s(f)} \approx \frac{H_r(f)}{V_r(f)} \quad (1)$$

이 된다. 기반암 위에 놓여있는 토양층에 의한 부지증폭효과 T_h^* 는

$$T_h^*(f) = \frac{H_s(f)/V_s(f)}{H_b(f)/V_b(f)} \quad (2)$$

으로, 여기서 H_b 와 V_b 는 각각 기반암에서의 수평 및 수직성분을 의미한다. 기반암에서의 증폭현상은 무시할 수 있어서 $H_b/V_b \approx 1$ 이 되어, 레일리파의 수평 및 수직성분 스펙트럼비와 같아진다.

한편, 기반암으로부터 상부 토양층을 통해 지표로 전파되는 각주파수 ω 인 상향 횡파의 진폭 U_u 는

$$U_u = \exp\left\{i\omega\left(t + \frac{x}{v_{s_2}}\right)\right\} \quad (3)$$

으로 나타낼 수 있으며, 여기서 t 는 토양층 주행시간, x 는 기반암 주행거리, v_{s_2} 는 하부 기반암층의 횡파속도를 나타낸다. 지표에서의 진폭 U_s 는 상부 토양층 두께 D_s 와 횡파속도 v_{s_1} 의 함수인

$$U_s = \frac{2}{\sqrt{\cos^2 \frac{\omega D_s}{v_{s_1}} + k^2 \sin^2 \frac{\omega D_s}{v_{s_1}}}} \quad (4)$$

로 나타낼 수 있다(Okamoto, 1973). 여기서 코사인 함수의 위상인 $\frac{\omega D_s}{v_{s_1}}$ 가 $\frac{\pi}{2}$ 일 때 분모 항이 최소가 되어 U_s 가 크게 증폭된다. 따라서 각주파수 ω 에 해당하는 주기를 T 라 하면, 증폭률이 최대가 되는 공진주기는

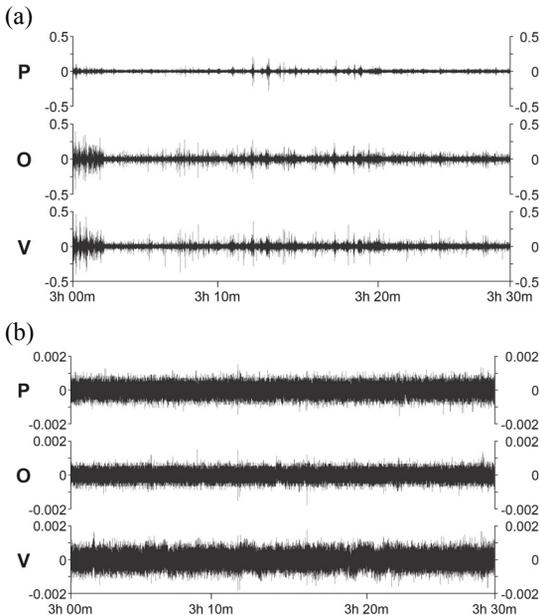


Fig. 2. Thirty-minute accelerometer records at sites (a) C on the Yedang dam and (b) B in the nearby borehole, respectively (Fig. 1). The traces 'P' and 'O' indicate horizontal components for sensors parallel and orthogonal to the dam, respectively. The trace 'V' shows vertical component of motion. Units of the installed ground accelerations are mm/s².

$$T = \frac{4D_s}{v_{s1}} \quad (5)$$

이 된다. 이는 공진주기(resonance period)가 D_s 의 4배일 때 크게 진동함을 의미한다. 따라서 상부토양층의 횡파속도 v_{s1} 를 알고 있을 경우, 상시미동의 H/V 스펙트럼비로부터 계산한 지반응답의 정곡점, 즉 지반의 공진주기를 결정하면 상부토양층의 두께를 추정할 수 있다.

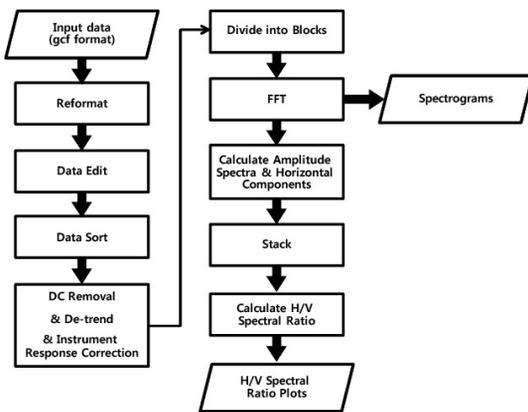


Fig. 3. Flowchart of the processing sequence for the H/V spectral-ratio study.

4. 자료처리

기록된 상시미동 자료를 주파수 영역에서 분석하기 위하여 댐 마루와 시추공에서 gcf 포맷으로 기록한 상시미동 자료를 SAC (Seismic Analysis Code) 포맷으로 변환시킨 후, SAC 프로그램(IRIS, 2014)을 이용하여 자료 편집, 기울기 및 평균값 제거, 계기보정 등을 수행하였다(그림 3). 이러한 전처리 과정을 거친 1,800 s의 자료를 25 s 길이의 시간창 72개 자료군으로 분할하고, 자료의 양 끝에 갑스현상 방지를 위하여 5%의 코사인 경사함수를 적용하였다. 이후 자료군별로 0.01~50 Hz 범위에서 0.05 Hz의 간격으로 샘플링하여 푸리에변환한 뒤, 성분별로 스펙트럼을 구하고, 72개 모든 자료군을 등가중 평균함으로써 평활화된 스펙트럼을 각각 구하였다(그림 4). 이렇게 구한 두 수평성분과 수직성분의 스펙트럼 값을 이용하여 Nakamura (1989)가 제안한 방법으로 H/V 스펙트럼비,

$$H/V(\omega) = \frac{\sqrt{E(\omega)^2 + N(\omega)^2}}{U(\omega)} \quad (6)$$

를 계산하였다. $E(\omega)$ 와 $N(\omega)$ 는 통상 동서 및 남북 방향 성분을 의미하나, 이번 연구 대상인 댐체에 설

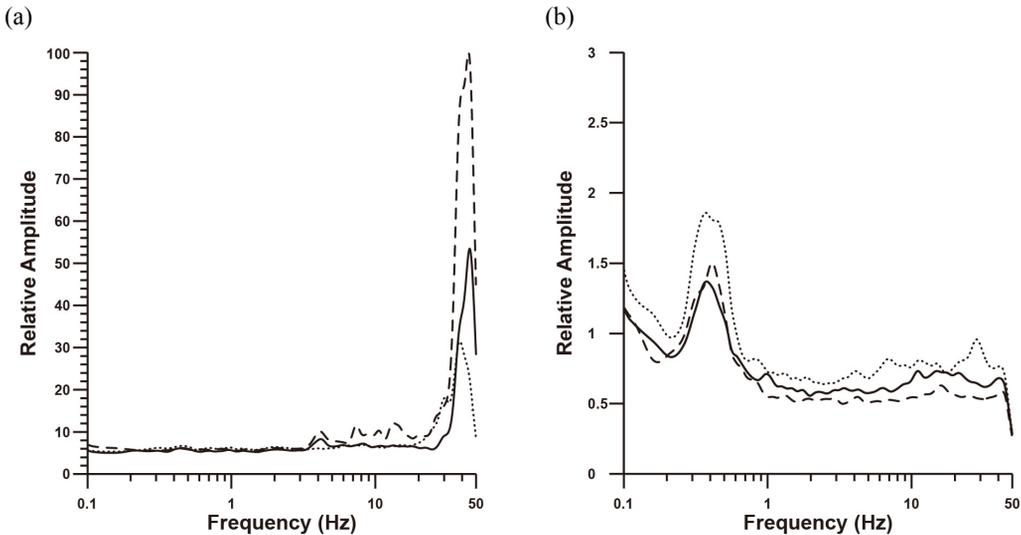


Fig. 4. Relative amplitude spectra of the microtremors recorded at sites (a) C and (b) B. The solid, dashed, and dotted lines indicate the parallel-to-dam, perpendicular-to-dam, and vertical components, respectively. The relative amplitudes are normalized so that the peak value for the perpendicular-to-dam component at site C is 100.

치된 지진계의 경우에는 각각 댐체에 평행(P) 및 직교(O)하는 수평성분을 말한다. 또한 $U(\omega)$ 는 수직성분(V)을 의미한다. 100 Hz 샘플률로 표본화된 수치 자료의 나이퀴스트(Nyquist) 주파수는 50 Hz이나, 22 Hz 이상의 고주파 성분에는 인공잡음이 많이 포함되어 있으므로 이 연구에서는 주로 20 Hz 이내의 자료만을 분석하였다.

5. P파 및 S파 속도구조

5.1 탐사자료 기록

댐체의 P파 속도(v_p)와 S파 속도(v_s) 모델을 구하기 위해 댐 마루의 서쪽 끝으로부터 130~199 m 사이의 길이 69 m 축선을 따라 P파 굴절법 및 표면파 탐사를 동시에 수행하였다(그림 1). 축선의 중앙점, 1/4, 3/4 및 양단에서 15 m 떨어진 모두 7개 지점에서 5 kg 해머로 각각 3회 타격하여 소규모 지진파 신호를 발생시킨 뒤, 3 m 간격으로 설치된 4.5 Hz 수직지오폰 24개를 통해 수신한 신호를 0.5 ms 샘플률로 2,048 ms 동안 동적 범위 144 dB인 기록계에 기록하였다(표 1; 그림 5).

5.2 v_p 및 v_s 자료처리

5.2.1 굴절법 토모그래피

굴절법 토모그래피 방법으로 댐체의 v_p 구조를 구하기 위하여, 원시자료에 파원 및 수신기 위치정보 입력한 후, 초동주시 결정, 속도 분석, 초기모델 작

성, 토모그래피 역산 등의 순으로 처리하였다. 초동주시 결정시, 양단주시의 일치성 및 주시곡선의 평행성 등에 유의하였다(그림 6). 주시곡선상의 개략적 겹보기 속도는 300~1,200 m/s의 범위를 보이므로, 깊이에 따라 v_p 가 200 m/s부터 2,000 m/s까지 증가하는 층 25개가 반무한 공간 위에 놓여있도록 초기모델을 구성하였다. SIRT (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) 방식으로 반복역산을 20 회 수행하여 v_p 토모그램을 계산하였으며, 이때 관측 주시와 모델주시의 평균 제곱근 오차는 0.8 ms 이내

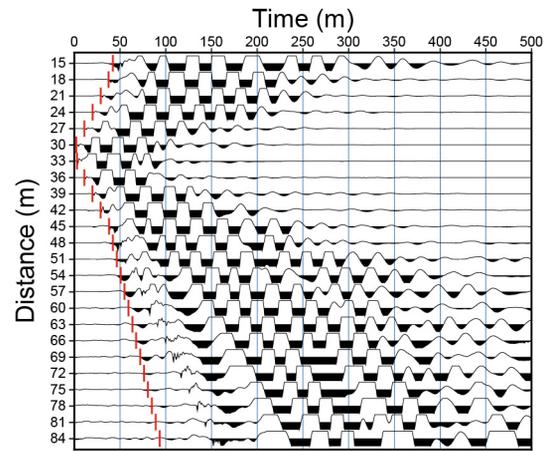


Fig. 5. Raw data recorded on the crest of the dam. The data were intentionally clipped for this display to indicate first-arrivals (red ticks) clearly.

Table 1. Acquisition parameters.

SOURCE	
Type	5 kg Hammer
Plate	16×16×2.5 cm aluminium plate
Average Spacing	16.5 m
Vertical Stack	300%
RECEIVER	
Type	4.5 Hz Geophone
Spacing	3 m
Number of Channel	24
RECORD	
Recorder	Geometrics Geode
Record Length	2,048 ms
Sampling Interval	0.5 ms

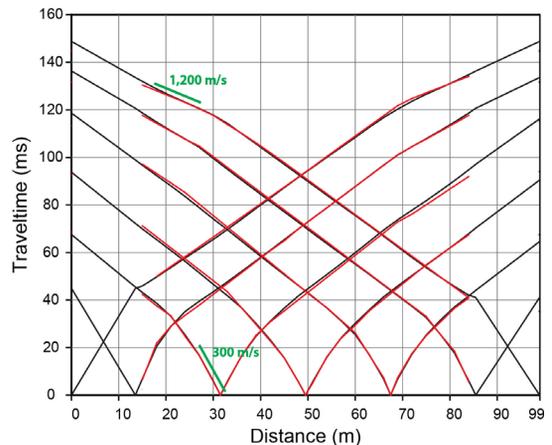


Fig. 6. First-arrival times for the P-wave refraction profile on the crest. The observed and calculated first arrivals are indicated by red and black lines, respectively. The green lines indicate apparent v_p .

로 수립하였다(그림 6).

5.2.2 표면파 분석법

표면파 분석은 Park *et al.* (1999)이 제시한 MASW 방법을 Hayashi and Suzuki (2004)가 수정하여 수평 분해능을 높인 공중점 상호상관법(Common Midpoint Cross-Correlation, CMPCC)을 적용하였다. 먼저 파원 및 수신기 위치정보가 입력된 공통발파점 모음자료에서 모든 트레이스들의 조합에 대해 상호상관을 계산하였다. 신호/잡음을 높이기 위하여 모든 공통발파점 모음자료로부터 공중점이 동일한 모든 상호상관 자료를 모으고, 수신점 간격이 같은 상호상관 자료끼리는 중첩하여 공중점 상호상관 모음자료를 구하였다. 이때, 공중점의 크기를 6 m으로 설정하였다. 이후 공중점 상호상관 모음자료를 푸리에 변환하고, MASW 방법(Park *et al.*, 1999)에 따라 위상을 이동시키고 공간방향으로 적분하여 위상속도 스펙트럼을 작성하였다. 위상속도 스펙트럼에서 분석대상 주파수 범위를 결정하기 위하여 최소 수신기 간격 3 m와 최대 수신기 간격 69 m의 2배인 6 m와 138 m를 적정 파장의 경계로 결정하였다(Park *et al.*, 1999). 이 범위 안에서 각 주파수별로 공간자기상관함수의 크기가 최대가 되는 위상속도를 선택하여 분산곡선을 작성하였다(그림 7).

역산을 위한 초기모델은 v_s 가 레일리와 위상속도의 약 1.1배이며, 유효깊이가 파장의 1/3이라는 가정(Asten and Henstridge, 1984)하에, $v_s = 518$ m/s 인 반무한 공간 위에 v_s 가 197~485 m/s 범위에 있

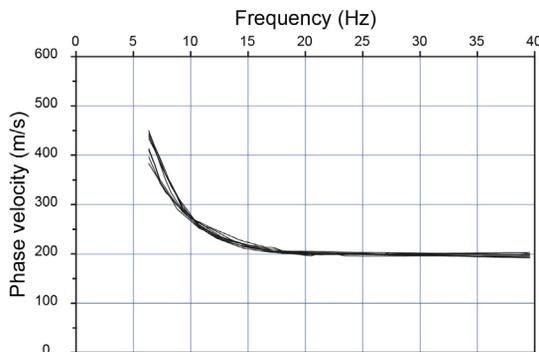


Fig. 7. The best-estimate dispersion curves for nine CMP locations along the profile on the dam crest (Fig. 1). The curves were derived from phase-velocity spectra of synthetically generated Rayleigh waves.

는 두께 1 m의 25개 수평층으로 구성하였다. 비선형 최소자승 역산법을 20회 반복 수행하여 평균제곱근 오차가 4.34 m/s 이하인 1차원 v_s 모델을 9개 공중점에서 계산한 뒤, 이를 보간하여 2차원 v_s 단면을 얻었다.

5.3 v_p 및 v_s 분석

굴절법 토모그래피와 표면파 분석법으로부터 각각 구한 v_p 및 v_s 단면들은 모두 수평적 속도변화가 크지 않은 양상을 보여준다(그림 8). 굴절법 토모그래피 역산 결과, دم체의 최상부면으로부터 깊이 약 13.5 m의 성토부 구간에서는 v_p 가 243 m/s부터 773 m/s까지 깊이에 따라 속도가 증가하는 양상을 보이며, 기초부에서는 799~1,041 m/s의 범위를 갖는 것으로 나타났다(그림 8a).

1차원 v_s 구조를 공간적으로 내삽하여 구한 2차원 v_s 단면의 경우, 성토부에서는 212~318 m/s의 비교

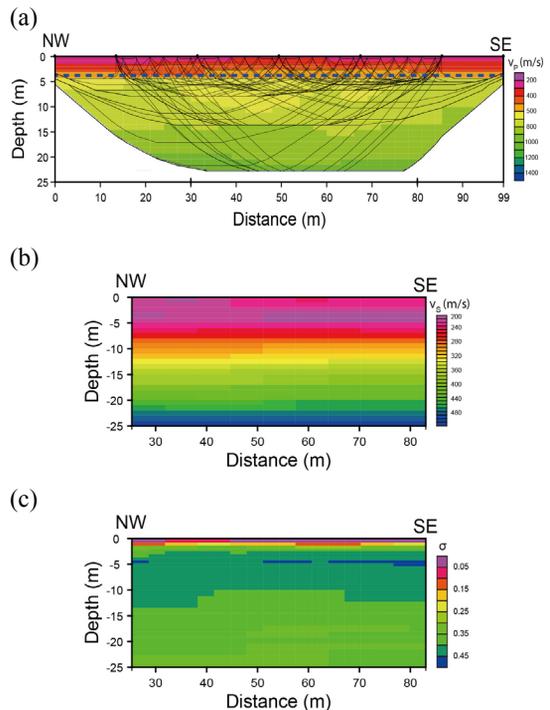


Fig. 8. (a) Two-dimensional v_p tomogram, (b) interpolated v_s section derived by the CMPCC method, and (c) the dynamic Poisson's ratios computed using those v_p and v_s data. Black curves and blue dashed line superimposed on the v_p tomogram indicate raypaths and the measured water level, respectively.

적 일정한 값을 갖고, 깊이 13.5 m 이하의 기초부에서는 336~516 m/s로 급격히 증가한다(그림 8b). 표면파 분석법으로 구한 깊이별 v_s 분포는 Sawada and Takahashi (1975)의 경험적 분포곡선의 하한 경계에 거의 일치한다(그림 9).

v_p 단면상에서 뚜렷한 깊이 약 5 m의 층경계가 v_s 단면에서는 잘 나타나지 않는다. 이는 v_p 가 조립질 미고결층의 공극유체 종류에 민감하게 변하는데 반하여, v_s 는 공극유체 종류의 영향을 거의 받지 않는 특성 차이에 기인한다. 따라서 이 경계면은 댐체 내의 지하수위로 해석되며, 현장자료 기록 당시에 상류쪽 저수지 수위가 해발 21.5 m(댐 마루 기준 -4 m)였던 점도 이러한 해석을 뒷받침한다. 또한 v_p 단면상에서 나타나는 약 7 m의 층 경계는 상부층의 다짐불량에 기인한 것으로 판단된다(KIST, 2010). v_p 단면상에 댐체 높이와 일치하는 13.5 m의 굴절면 경계는 댐체와 기초지반사이의 경계를 잘 나타낸다.

v_p 와 v_s 함수로 표시되는 동포아송비(dynamic Poisson's ratio; σ),

$$\sigma = \frac{v_p^2 - 2v_s^2}{2(v_p^2 - v_s^2)} \quad (7)$$

를 주시토포그래피로 구한 v_p (그림 8a) 및 레일리파 위상속도 분산곡선을 역산하여 구한 v_s (그림 8b)를 이용하여 구하였다(그림 8c). 이 σ 단면은 댐체 구

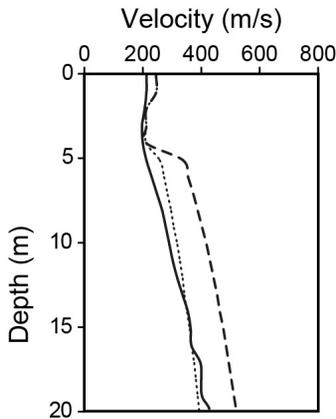


Fig. 9. The averaged v_s profile (solid line) estimated by inverting dispersion curves superimposed on the empirically derived core high (dashed line) and low (dotted line) bounds by Sawada and Takahashi (1975).

성물질의 물리적 특성을 잘 나타내준다. 건조한 상태인 댐체의 최상부면(0~5 m)에서는 평균 $\sigma(\bar{\sigma})$ 가 95% 신뢰구간에서 0.32 ± 0.05 이나 지하수면 아래의 성토부 구간(5~13.5 m)에서는 0.42 ± 0.01 로 상당히 작아서 전단력이 크게 감소되어 있음을 보여 준다. 한편 13.5 m이하의 댐 기초부인 평균 σ 가 0.36 ± 0.01 으로 비교적 강성률이 높은 물질로 구성되어 있음을 지시한다.

6. 상시미동 스펙트럼 분석

6.1 주파수 성분 특성

댐 마루와 시추공 내에서 30분간 기록한 상시미동 가속도의 실효값(root mean square)은 각각 9.03과 0.38 mm/s^2 으로, 댐 마루 자료의 잡음수준이 시추공 기록보다 20 배 이상 큰 것으로 분석된다. 댐 마루에서 기록한 댐체에 직교하는 수평성분 $O(\omega)$ 의 진폭 스펙트럼은 44 Hz에서 최댓값을 가지며, 이 값을 100으로 하여 모든 진폭 스펙트럼의 값을 정규화하였다(그림 4a). 댐 마루에서의 스펙트럼은 22 Hz에서 모든 성분의 진폭이 급격하게 증가하나, 시추공의 경우 1 Hz 이상에서 세 성분의 진폭이 모두 매우 작고 거의 일정한 값을 갖는 특징을 보인다(그림 4b). 이는 시추공의 진폭스펙트럼이 지반응답특성을 나타내기 보다는 기록계 자체의 전자기적 잡음이 주로 기록된 것으로 보인다. 따라서 상시미동은 댐 마루에서 크게 증폭되어 지반의 응답특성을 잘 나타내는 반면, 시추공 기반암에서는 진폭이 매우 약하게 기록되어 지반의 증폭효과가 거의 없는 이상적인 관측소였음을 지시한다. 따라서 시추공에서 기록한 자료는 H/V 스펙트럼비 분석에 사용하지 않았다.

한편 기압의 변화나 태풍으로 생긴 너울에 의해 발생되는 것으로 알려진 double-frequency (DF; Longuet-Higgins, 1950)는 0.4 Hz 부근에서 우세하게 관찰된다(그림 10). DF는 전 세계적으로 0.1~0.5 Hz 정도의 대역폭을 가지며, 날씨, 시간, 위치 등의 요소에 따라 다르게 나타나는 것으로 알려져 있다(Peterson, 1993; Okada, 2003; Ruigrok *et al.*, 2011). 국내 30개 광대역 관측소의 배경잡음에도 DF가 0.1~0.5 Hz 범위에서 기록된 바 있으며(Sheen *et al.*, 2009), 예당댐 으로부터 남남서 방향으로 약 33 km 떨어진 청천댐 (높이 23 m, 길이 306 m; 그림 1)에서는 정곡 주파수

가 0.3 Hz로 예당댐보다 약간 낮게 나타난 바 있다 (Park and Kim, 2015). 해안선에서 10 km 이내에 있는 청천댐에서의 당시 기압은 1,007 hPa, 평균풍속이 1.7 m/s, 강수량 0.4 mm 정도였으며, 해안선에서 30 km 정도 떨어진 예당댐에서의 기록 당시 기압은 1,016 hPa, 평균풍속은 2.2 m/s, 강수량은 21.6 mm였다(KMA, 2015). 이러한 상시미동의 주요 진원지인 해양으로부터의 거리 및 기상상태 등이 두 댐에서의 DF 주파수 차이에 영향을 미쳤을 가능성이 높다.

6.2 수평/수직(H/V) 스펙트럼비

앞에서 설명한 Nakamura (1989)의 H/V 스펙트럼비 방법을 상시미동 자료에 적용하여 예당댐체의 응답특성을 분석하였다. 이때 상대적으로 낮은 댐체의 높이와 얇은 토양층의 두께를 감안하고, 신뢰성 있는 응답특성 평가를 위해서 스펙트럼 비의 값이 2.0 이상의 값을 갖는 1 Hz 이상의 주파수 성분만을 분석에 사용하였다. 댐 마루에서의 H/V 스펙트럼비는 4.2, 7.4, 13.5 Hz에서 정점이 나타나며 각각 2.2, 2.0, 2.1의 값을 갖는다(그림 11). 표면파 분석법으로 구한 두께 1 m인 각 층의 횡파속도로부터 구한 성토부의 평균 횡파속도(\bar{v}_s)는 238 m/s이다. 이 값을 식 (5)에 적용하여 D_s 를 구하면, 정곡 주파수가 4.2, 7.4, 13.5 Hz일 때, D_s 는 각각 14.2, 8.0, 4.4 m로 계산된다.

상시미동의 H/V 스펙트럼비는 토양층의 전달함수 (transfer function)와 유사하므로(Fuchs and Müller,

1971), 인공지진을 통해 구한 속도모델로부터 이론적 전달함수를 계산한 뒤, 기록자료와 비교함으로써 H/V스펙트럼비 분석 결과의 신뢰성을 검증하였다(그림 11). 이론적 전달함수는 평균 v_p, v_s, ρ 가 각각 907 m/s, 441 m/s, 1,588 kg/m³인 반무한(half-space) 기초부 위에 평균 $v_p = 545$ m/s, $v_s = 238$ m/s, $\rho = 1,457$ kg/m³인 댐체가 놓여있는 수평 2층 모델로 설정하여 반사계수법(reflectivity method; Daley and Hron, 1982)으로 구하였다(그림 12). 이때, 평균 v_p, v_s 는 굴절파 토모그래피와 표면파 역산으로 구한 값을 이용하여 구하였으며, ρ 는 v_p 와의 경험적 관계식을 이용하여 계산하였다(Ludwig *et al.*, 1970). 그 결과, 전달함수의 정곡점은 4.3 Hz와 13.3 Hz에 나타나며, 이 정곡 주파수를 식 (5)에 대입하여 구한 D_s 는 각각 13.8와 4.5 m이다.

관측자료의 H/V 스펙트럼비 정곡 주파수인 4.2 Hz로 구한 D_s 는 14.2 m로 실제 댐체의 높이 13.5 m 외는 약 5%의 차이를 보인다. 이는 식 (5)가 단순 층상구조를 가정하여, 댐체 형상의 3차원 효과와 코어 등 내부 물질의 조성 차이를 반영하지 못한 데 기인할 수 있으나(Atakan *et al.*, 2004), 레일리파 위상속도의 분산곡선 역산과정으로 v_s 를 구하는 표면파탐사 방법 자체의 오차범위(15%) 이내로(Xia *et al.*, 2000) 비교적 잘 일치한다고 판단된다. 또한 4.2 Hz의 정곡 주파수의 약 3배에 해당되는 13.5 Hz의 정곡점은 이론적 전달함수 13.3 Hz와 비교적 잘 일치하여 배음반응으로 해석된다. 이는 횡파, Coda파 및 배경잡음을 이용하여 동일한 댐체를 대상으로 분석

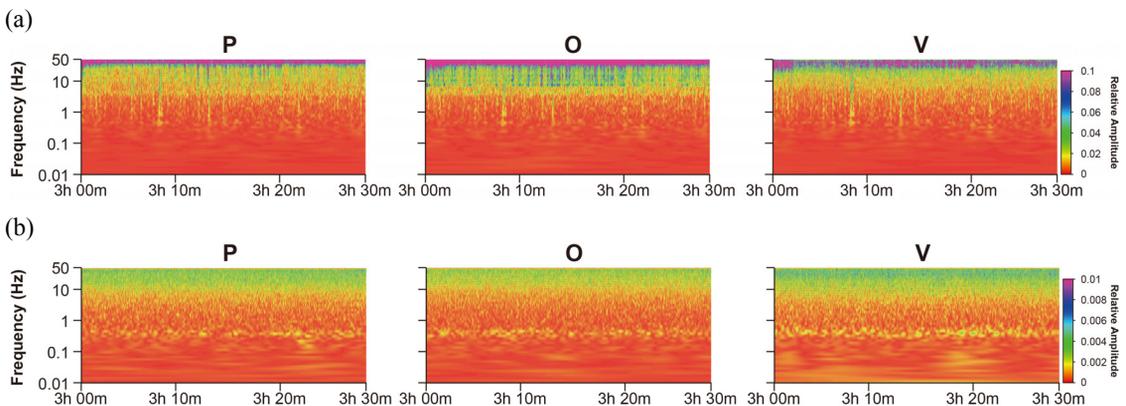


Fig. 10. Spectrograms of the 30-minute data recorded at sites (a) C and (b) B (Fig. 2). The labels ‘P’, ‘O’, and ‘V’ indicate orientations of sensors as in Figure 1.

한 지반응답의 정곡주파수 4 Hz와 13 Hz와 비교적 잘 일치한다(Wee *et al.*, 2015). 한편 1차원 이론적 전달함수에서 관찰되지 않는 7.4 Hz나 H/V 값이 1.96 인 10.6 Hz의 정곡 주파수는 3차원 구조체인 댐체의 외형 및 내부 다중반사 등에 의한 간섭현상이 복합적으로 나타난 것으로 사료된다(Ambraseys, 1960; Knopoff and Gangi, 1960; Takeuchi *et al.*, 1984). 따라서 H/V 스펙트럼비 방법은 복잡한 3차원 속도 구조나 기하학적 구조를 갖는 대상체에 적용할 경우 주의가 요구된다.

7. 결론

예당저수지의 댐 마루에서 굴절법 및 표면파 탐사를 수행하여 댐체의 속도를 구하고, 댐마루와 인근 시추공에서 기록한 상시미동의 진폭스펙트럼을 H/V 분석법으로 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 굴절법 토모그래피 및 레일리파 분산곡선 분석으로부터 구한 예당댐체의 v_p 및 v_s 는 성토부(깊이 0~13.5 m)에서 각각 243~773 m/s와 212~318 m/s, 기초부(13.5 m 이하)에서 799~1,041 m/s와 336~516 m/s의 범위를 갖는다. 또한 평균 동포아송비는 지하수면 위의 상부 성토부(깊이 0~5 m)에서 0.32, 아래의 하부 성토부(깊이 5~13.5

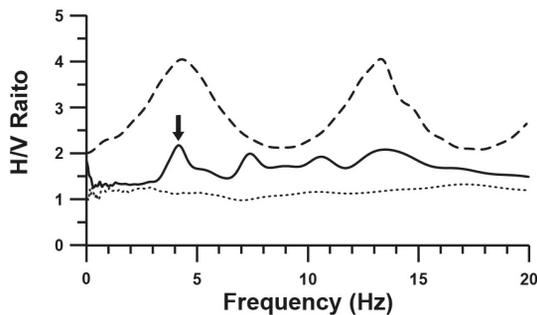


Fig. 11. H/V spectral ratios of the microtremors recorded at sites C (solid line) and B (dotted line) and the 1-D transfer function (dashed line) for site C computed by the reflectivity method using the simplified velocity model in Fig. 12. The peak at 4.2 Hz (down arrow) for site C is interpreted as the thickness (14.2 m) of dam fills. For the borehole data, the H/V spectral ratios close to $\sqrt{2}$ for the frequencies greater than 1 Hz may be indicative of self-noise of the seismic instrument.

m)에서 0.42, 기초부인 13.5 m 아래에서는 0.36으로 계산되었다.

- 2) H/V 스펙트럼비를 이용해 구한 댐 마루의 응답특성은 4.2, 7.4, 13.5 Hz에서 각각 2.2, 2.0, 2.1의 스펙트럼 값을 가지며, 성토부의 평균 v_s 인 238 m/s로 계산하면 이 정곡 주파수들은 각각 14.2, 8.0, 4.4 m의 깊이에 해당된다.
- 3) H/V 스펙트럼비의 4.2 Hz 정곡 주파수는 이론적 전달함수와 비교적 잘 일치하고, 두께 13.5 m인 댐체의 응답특성을 반영하는 것으로 해석된다. 또한 이의 약 3배에 해당하는 13.5 Hz의 정곡 주파수는 배음반응으로 해석된다.
- 4) 반사계수법으로 구한 전달함수에서 나타나지 않는 7.4 Hz의 정곡 주파수는 댐체의 3차원적 외형과 내부의 다중반사에 의한 것으로 분석되어, H/V 스펙트럼비 방법은 복잡한 3차원 속도구조나 기하학적 구조를 갖는 대상체에 적용할 경우 주의가 요구된다.

사 사

이 연구는 기상청 기상지진기술개발(CATER 2012-8040)의 지원으로 수행되었으며, 2015년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비로 연구하였음(과제번호-520150420)을 밝힙니다.

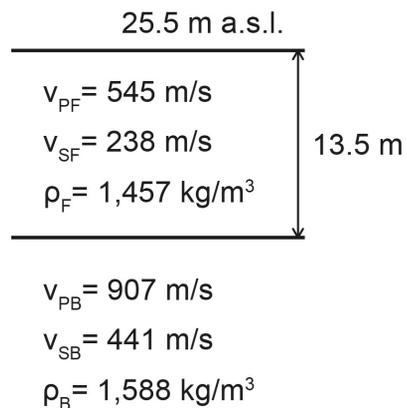


Fig. 12. Simplified model for v_p and v_s at site C derived by the refraction and Rayleigh-wave surveys on the crest of the dam. The densities were derived from these velocities using the empirical relationship given by Ludwig *et al.* (1970). Subscripts ‘F’ and ‘B’ denote values of the dam fill and bedrock, respectively.

REFERENCES

- Ambraseys, N.N., 1960, On the shear response of a two-dimensional truncated wedge subjected to an arbitrary disturbance. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 50, 45-56.
- Arai, H. and Tokimatsu, K., 2000, Effects of Rayleigh and Love waves on microtremor H/V spectra. 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, January 30-February 4.
- Asten, M.W. and Henstridge, J.D., 1984, Array estimator and the use of microseisms for reconnaissance of sedimentary basin. *Geophysics*, 49, 1828-1837.
- Atakan, K., Duval, A., Theodulidis, N., Guillier, B., Chatelain, J., Bard, P. and the SESAME-Team, 2004, 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, August 1-6.
- Bonilla, L.F., Steidl, J.H., Lindley, G.T., Tumarkin, A.G. and Archuleta, R.J., 1997, Site amplification in the San Fernando Valley, California. variability of site-effect estimation using the S-wave, coda, and H/V methods. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87, 710-730.
- Borcherdt, R.D., 1970, Effects of local geology of ground motion near San Francisco Bay. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 60, 29-61.
- BSSC, 1997, NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures. Part 2-Provisions, 1997 Edition, Building Seismic Safety Council, Washington D.C.
- Daley, P.F. and Hron, F., 1982, Ray-reflectivity method for SH-waves in stacks of thin and thick layers. *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society*, 69, 527-535.
- Fuchs, K. and Müller, G., 1971, Computation of synthetic seismograms with the reflectivity method and comparison with observations. *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society*, 23, 417-433.
- Güralp, 2008, CMG-5TB Operator's guide: Borehole Accelerometer. Güralp Systems Limited, 50 p.
- Güralp, 2011, CMG-5T Compact Operator's guide: Compact Triaxial Accelerometer. Güralp Systems Limited, 26 p.
- Hartzell, S., Cranswick, E., Frankel, A., Carver, D. and Meremonte, M., 1997, Variability of site response in the Los Angeles Urban area. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87, 1377-1400.
- Hayashi, K. and Suzuki, H., 2004, CMP cross-correlation analysis of multi-channel surface-wave data. *Exploration Geophysics*, 35, 7-13.
- HGC (Heesong Geotek Co., Ltd.), 2011, Completion report; Seismic acceleration measurement system installation. Korea Rural Community Corporation, 21-23.
- IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology), 2014, Seismic Analysis Code Users Manual. version 101.6a.
- Jung, H.O., 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 the Korean Earth Science Society*, 31, 541-554 (in Korean with English abstract).
- Kim, K.Y. and Hong, M.H., 2012, Shear-wave velocity structure of Jeju Island, Korea. *Geosciences Journal*, 16, 35-45.
- Kim, S.K. and Hwang, M.W., 2002, Estimation of Subsurface Structure and Ground Response by Microtremor. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 23, 380-392 (in Korean with English abstract).
- KIST, 2010, Detailed safety inspection report on Yedang reservoir, Korea Rural Corporation, 13-29.
- KMA (Korea Meteorological Administration), 2015, Past calibration. http://www.kma.go.kr/weather/climate/past_cal.jsp, (January 16, 2015).
- Knopoff, L. and Gangi, A.F., 1960, Transmission and reflection of rayleigh by wedges, *Geophysics*, 25, 1203-1214.
- Lachet, C. and Bard, P., 1994, Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of the Nakamura's technique. *Journal of Physics of the Earth*, 42, 377-397.
- Longuet-Higgins, M.S., 1950, A theory of the origin of microseisms, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 243, 1-35.
- Ludwig, W.J., Nafe, J.E. and Drake, C.L., 1970, Seismic refraction in The Sea, 4. Wiley-interscience, 74 p.
- MLTMA (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs), 2011, Design standards of dam. 76 p.
- Nakamura, Y., 1989, A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremors on the ground surface. *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*, 30, 25-33.
- Nakamura, Y., 2000, Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications. 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, January 30-February 4.
- Okada, H., 2003, The microtremor survey method. *Society of Exploration Geophysicists*, 9-12.
- Okamoto, S., 1973, Introduction to Earthquake Engineering. University of Tokyo Press, Tokyo, 571 p.
- Park, C.B., Miller, R.D. and Xia, J., 1999, Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64, 800-808.
- Park, Y. and Kim, K.Y., 2015, Microtremor response of the Cheongcheon dam in Korea. *Exploration Geophysics*, 47, 115-122 (in Korean with English abstract).
- Peterson, J., 1993, Observation and modeling of seismic

- background noise. U.S. Department of Geological Survey, 1-42.
- Rogers, A.M., Borchardt, R.D., Covington, P.A. and Perkins, D.M., 1984, A comparative ground response study near Los Angeles using recordings of Nevada nuclear tests and the 1971 San Fernando earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 74, 1925-1949.
- Ruigrok, E., Campmanb, X. and Wapenaar, K., 2011, Extraction of P-wave reflections from microseisms. *Comptes Rendus Geoscience*, 343, 512-525.
- Sawada, Y. and Takahashi, T., 1975, Study on the material properties and the earthquake behaviors of rockfill dams. *Proceeding of 4th Japan Earthquake Engineering Symposium*, Tokyo, November 26-28, 695-702.
- Sheen, D., Shin, J.S. and Kang, T., 2009, Seismic noise level variation in South Korea. *Geosciences Journal*, 13, 183-190.
- Sun, C., Chung, C. and Kim, D., 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 (in Korean with English abstract).
- Takeuchi, S., Fuji, K. and Nakano, M., 1984, Theoretical investigation of scattering phenomena inside wedge caused by incidence of Rayleigh wave. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 74, 1593-1603.
- Um, S.H. and Lee, M.S., 1963, Explanatory text of the geological map of Tae Hung sheet 6523-I (1:50,000). Geological Survey of Korea, 1-3 (in Chinese with English abstract).
- Wee, S., Kim, J., Yoo, S. and Kyung, J., 2015, A Comparison Study of the Amplification Characteristics of the Seismic Station near Yedang Reservoir using Background Noise, S-wave and Coda wave Energy. *Journal of the Korean earth science society*, 36, 632-642 (in Korean with English abstract).
- Xia, J., Miller, R.D., Park, C.B., Hunter, J.A. and Harris, J.B., 2000, Comparing Shear-Wave Velocity Profiles from MASW with Borehole Measurements in Unconsolidated Sediments, Fraser River Delta, B.C., Canada. *Journal of Environmental and engineering Geophysics*, 5, 1-13.
- Yun, K. and Suh, J., 2007, Classification of Seismic Stations Based on the Simultaneous Inversion Result of the Ground-motion Model Parameters. *Geophysical exploration*, 10, 183-190 (in Korean with English abstract).

Received : January 18, 2017

Revised : February 14, 2017

Accepted : February 16, 2017