

상시미동 측정을 통한 천부 횡파속도 연구

황윤구 · 김기영*

강원대학교 지구물리학과

Shallow Shear-wave Velocities Using the Microtremor Survey Method

Yoon Gu Hwang and Ki Young Kim*

Department of Geophysics, Kangwon National University

상시미동을 이용하는 수동적 표면파 탐사를 결정질암 기반암 지역에서 실시하여, 내진설계 지반분류 기준인 30 m 깊이까지의 평균 횡파속도(V_s30)를 구하고자 연구를 수행하였다. 시험자료는 조사지 A와 B에서 삼각형 배열과 'L'자형 직각 배열로 2 ms 간격으로 4초 동안 기록하였다. 조사지 A에서 기록한 자료를 공간 자기상관 방법으로 분석하여 위상속도 스펙트럼을 작성하고, 수신기 배열의 길이 및 형태, 기록 횟수, 수신기 수 등의 주요인자들의 영향을 고찰하였다. 조사지 B에서 상시미동 기록자료의 역산을 통해서 구한 횡파속도와 근처 시추공에서 수직탄성과 방법으로 구한 결과가 대체로 일치함을 보여 상시미동을 이용한 표면파 탐사법이 V_s30 을 구하는데 효율적인 방법으로 판단된다.

주요어 : 상시미동, 표면파, 횡파 속도, V_s30 , 공간 자기상관, 위상속도

The passive surface wave survey using microtremor is conducted in areas of crystalline rock basements to obtain average shear-wave velocity structures to 30 m deep (V_s30), on which the earthquake-resistant design standard is based. Test data were recorded at two sites with triangular and L-shaped arrays for 4 seconds with an sampling interval of 2 ms. The microtremor recorded at a site were analysed using the spatial autocorrelation method to obtain phase-velocity spectra and effects of major factors such as size and shape of array and number of record and receiver were examined. At the other site, shear-wave velocities were derived from VSP and microtremor data separately. The results from these two methods agree to each other reasonably well, indicating that the microtremor method can be an effective geophysical tool to measure V_s30 .

Key words : microtremor, surface wave, shear-wave velocity, V_s30 , spatial autocorrelation, phase velocity

서 론

지진에 의해 발생된 지진파는 지하 매질을 통하여 전파되고, 기반암 상부의 미고결층에서 증폭되어 구조물에 영향을 미친다. 국내의 내진설계 기준(BSSC, 2000; 건설교통부, 1997)에서 정량화하여 사용하는 지반의 증폭계수는 지질 및 지반의 동적 특성 차이로 인하여 지역에 따라 많이 변한다. 외국의 경우 각 지역의 실제 계측자료와 부지응답 해석결과를 비교, 분석하여 지역별로 정량적으로 평가하는 연구가 진행되고 있으며(Dobry *et al.*, 1999), 국내에서도 수치모델을 통한 연구(Kang and

Baag, 2004a; Kang and Baag, 2004b)가 일부 행하여지고 있다.

그러나 모든 지역에서 실제로 측정하거나 부지응답 해석을 실시하는 것이 현실적으로 어려우므로, 우리나라에서는 지진계수와 지반조건에 따라 지반증폭계수를 산출하여 사용한다(건설교통부, 1997). 즉, 1989년 Loma Prieta 지진기록자료를 바탕으로 Borchardt(1994)가 제안한 지하 100 ft (약 30 m)까지의 평균 횡파속도(V_s30)에 의해 나눈 지반분류를 토대로 제정한 ICBO(1997)의 국제건축물기준(Universal Building Code)을 사용하고 있다. 이는 횡파속도가 종파속도보다 강진동 부지응답 효

*Corresponding author: kykim@kangwon.ac.kr

과에 더 민감하기 때문이다.

이에 따라 미국뿐만 아니라 일본, 캐나다, 유럽의 여러 나라에서는 지하 30 m까지의 횡파속도에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다(Hayashi, 2005). 특히 일본에서는 2000개 이상의 지점에서 Vs30을 측정하였고, GIS에 기초한 공학적 지형분류도를 이용하여 일본 국토 전체를 대상으로 한 지반증폭도를 이미 완성하였다(Matsupka *et al.*, 2005; Wakamatsu *et al.*, 2006). 또한 이탈리아 등 일부 국가에서는 공학적 목적의 모든 시추조사에 Vs30 측정을 의무화하는 법 제정을 서두르고 있다. 한편, 선창국 외(2005)는 우리나라 지질과 차이가 있는 미국 서부지역을 기준으로 작성된 지반증폭계수 조정의 필요성을 제기하고, Vs30뿐만 아니라 Vs10, Vs15, Vs20을 이용한 추가분류 기준 마련을 제안한 바 있다.

이처럼 지반증폭계수를 산출하는데 필요한 천부 횡파속도를 구하는 지구물리학적 조사방법으로는 지표 굴절과 탐사, 시추공 탄성과 탐사, 표면파 탐사 등이 있다. 굴절법을 이용한 횡파 탐사의 경우는 신호가 잡음에 민감하고 종파와 PS변환파 도달 이후에 기록되기 때문에 초동선택에 어려움이 있으며, 시추공 탄성과 탐사는 시추공이 존재해야 하므로 상대적으로 많은 비용과 시간이 소요되는 제약이 있다. 이에 비하여 비교적 신속하고 용이하게 자료를 획득할 수 있는 비파괴적 표면파 탐사는 인공적 파원을 사용하는 능동적 방법과 상시미동(microtremor 혹은 microseism)을 이용하는 수동적 방법이 있다. 그러나 SASW(Spectral Analysis of Surface Wave) 방법(Nazarian *et al.*, 1983)과 MASW(Multi-channel Analysis of Surface Wave) 방법(Park *et al.*, 1999)이 사용되는 능동적 표면파 탐사법은 대상깊이가 20 m 이내로 얕은 경우에만 효과적이므로, 30 m까지의 횡파 속도를 구하기에 다소 어려움이 있다. 따라서 30 m까지의 횡파속도를 구하기 위해서는 장주기 신호를 가지는 상시미동을 이용하는 수동적 방법이 적합하다.

이 연구에서는 국내 기반암의 대부분을 차지하는 결정질암 지역에서 수동적 표면파 탐사법을 시험적으로 적용하고 주요 인자들의 영향을 고찰하여, 적정 야외변수와 문제점 등을 분석하고자 한다. 또한 레일리파의 위상속도를 분석하여 지하 30 m까지의 횡파 속도구조를 구하고, 이를 시추공에서 직접 측정된 결과와 비교함으로써, 상시미동 측정법으로 구한 Vs30값의 정확성을 검증코자 한다.

배경이론

실체파와 표면파가 합쳐져 있는 상시미동(Toksöz and Lacoss, 1968)의 주성분인 레일리파는 수직적인 속도변화가 있을 경우, 주파수 성분에 따라 위상속도가 변하는 분산특성을 갖는다(Aki and Richard, 1980). 균질한 등방성 수평층 N개로 이루어진 모델의 위상속도 c 와 주파수 f 는

$$F\left(c, f, \sum_{j=1}^N u_{p_j}, u_s, \rho_j, h_j\right) = 0 \quad (1)$$

와 같이, j 번째 층의 종파속도 u_{p_j} , 횡파속도 u_s , 밀도 ρ_j , 두께 h_j 의 내재함수로 나타낼 수 있다. 따라서 주파수의 함수로 표시된 위상속도를 알 수 있다면, 역으로 각 층들의 종파 및 횡파속도와 밀도 등의 물리적 특성을 알 수 있다.

기록된 상시미동 자료로부터 레일리파의 분산곡선을 구하는 방법은 주파수-파수(f - k) 방법(Capon *et al.*, 1967; Lacoss *et al.*, 1969)과 공간 자기상관(Spatial Autocorrelation; SPAC) 방법(Aki, 1957; Okada, 2003)이 사용된다. 이 연구에 사용한 공간 자기상관 방법은 상시미동을 시간과 공간영역에서 확률론적으로 나타낼 수 있다는 Aki(1957) 이론에 기초한다.

수신기 사이의 거리 r 인 두 지점에서 기록된 각주파수 ω 의 상시미동 기록의 공간 자기상관 함수 $\rho(\omega, r)$ 는

$$\rho(\omega, r) = J_0(\omega r / c(\omega)) \quad (2)$$

와 같이 0차 제1종 베셀함수로 나타낼 수 있다(Okada, 2003). 따라서 조합가능한 모든 방향의 공간 자기상관 함수의 평균을 이용하여 주파수별로 위상속도를 구함으로써 분산곡선을 작성할 수 있다.

주어진 주파수의 위상속도는 식 (1)에서와 같이 각 층별로 4가지 변수에 의해서 결정되는데, 이 중 횡파속도 u_s 와 두께 h_j 가 주요한 인자이다(Bloch *et al.*, 1969; Xia *et al.*, 1999). 또한 포아송비가 매우 큰 경우를 제외하면, 대부분의 레일리파는 기본모드(fundamental mode)가 우세하므로, 식 (1)은 고차모드를 제외시킨 기본모드에 대한 식으로 간주될 수 있다. 한편 종파속도와 횡파속도, 밀도와 횡파속도의 경험적 관계식을 사용하고 층의 수 N 을 미리 결정하면, 식 (1)은 횡파속도만의 함수로 표시되어, 역산을 효과적으로 수행할 수 있다. 분산곡선의 역산과정은 횡파속도의 1차원 초기모델을 정

하고, 이 모델로부터 계산한 이론적 분산곡선과 측정자료의 분산곡선에서 각기 구한 위상속도의 차이가 최소화되도록 반복계산 하는 과정으로 구성된다.

시험자료 획득 및 처리

비교적 주변환경이 양호한 강원도 춘천시 강원대학교 내의 운동장(조사지 A)에서 기록한 상시미동 자료를 이 지점에서 450 m 떨어진 곳에 위치한 강의동 건물 주변(조사지 B)에서 기록한 자료와 비교하였다(Fig. 1). 조사지 A는 배열 길이(L)가 10, 20, 40, 80 m인 삼각형 형태(Fig. 2a)와 ‘L’자 형태의 직각 배열(Fig. 2b), 조사지 B에서는 L=60 m 및 L=80 m인 직각 배열과 L=60 m의 삼각형 배열을 적용하였으며, 한 배열 당 4.5 Hz

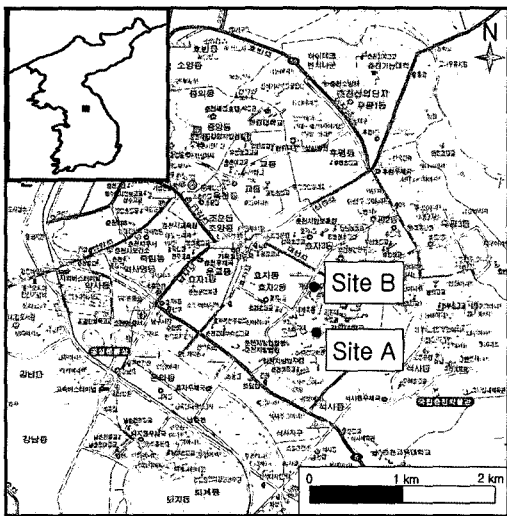


Fig. 1. Location map of the test sites A and B.

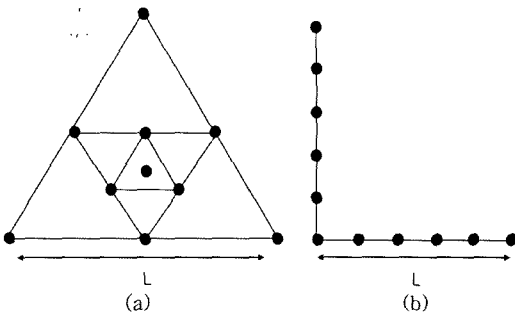


Fig. 2. Receiver arrays used in the microtremor recording with (a) triangular and (b) L-shaped arrays, respectively.

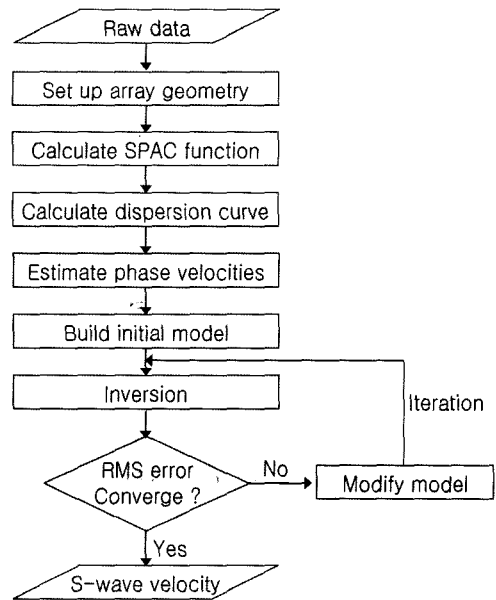


Fig. 3. Processing flow for the microtremor data.

수직지오폰을 최대 11개 사용하여 2 ms 샘플률로 총 4 초간 50회 기록하였다.

상시미동자료를 역산하기 위하여, 포맷변환 배열에 따른 수신기 배열 정보 입력, 공간 자기상관 계산, 분산곡선 작성, 위상속도 분석 및 초기모델 설정, 역산 순으로 자료를 처리하였다(Fig. 3). 조사지 A에서 기록한 L=20 m인 삼각형 배열의 자료를 예로 들어, 각 처리단계별로 간단히 기술한다. 원시자료(Fig. 4a)는 능동적 방법과는 달리 신호의 일관성이 거의 인지되지 않음을 보여준다. 수신기 간격이 2.8, 5, 5.8, 8.6, 10, 11.6, 13.2, 17.3, 20 m인 트레이스들 사이의 평균 공간 자기상관 함수를 구하고 주파수영역(Fig. 4b)으로 변환시켜 파워스펙트럼을 구하였다. 구해진 파워스펙트럼을 이용하여 위상속도와 주파수의 함수로 변환시켜 위상속도 스펙트럼을 작성하였고(Fig. 4c), 작성된 속도 스펙트럼으로부터 각 주파수에서 최대의 유사도를 갖는 위상속도를 선택하였다. 역산 수행을 위한 초기모델은 20개 층으로 구성되어 있으며, 속도가 200~600 m/s 범위에서 40 m 깊이까지 하부로 갈수록 증가하도록 설정하였다(Fig. 4d). 이 초기모델에서는 파장의 1/3을 해당되는 위상속도의 깊이로 사용하였다. 선형 최소자승법으로 모델을 수정하는 과정을 10회 반복하여 평균제곱근 오차가 0.01 이하가 되는 1차원 횡파 속도구조를 얻었다.

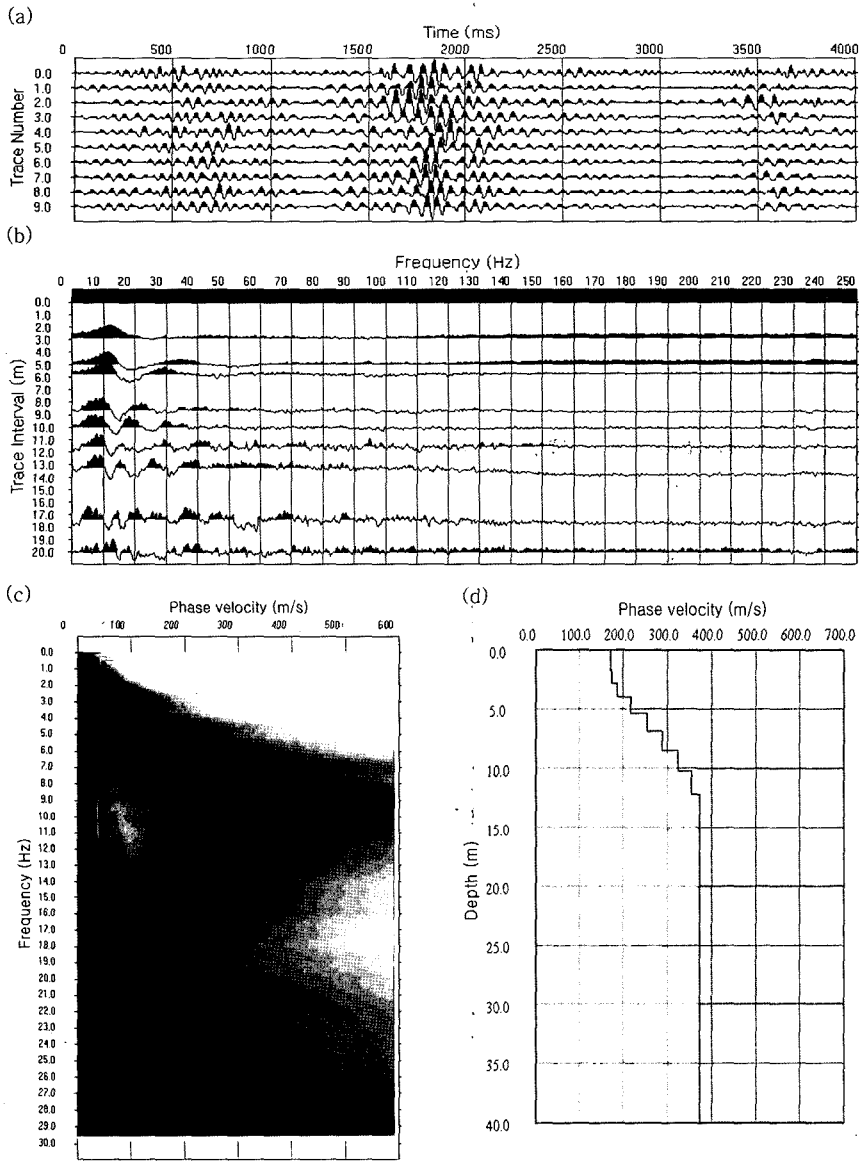


Fig. 4. Microtremor data obtained with a triangular array ($L=20$ m) at site A: (a) raw data in the time domain, (b) real parts of the Fourier pairs of spatial autocorrelation functions, (c) the phase-velocity spectrum, and (d) the initial model for the subsequent inversion, respectively.

인자 분석

상시미동 자료를 공간 자기상관 함수를 이용하여 분석할 경우, 결과적으로 얻어지는 분산곡선은 수신기 배열의 길이 및 형태, 기록 횟수, 수신기 수 등에 영향을 받는다. 샘플률 2 ms, 기록 길이 4 s, 기록 횟수 50회의 조사지 A에서 기록한 자료를 대상으로 이러한 인자들

의 영향을 고찰하였다.

수신기 배열 길이

배열 길이가 10, 20, 40, 80 m인 삼각형 배열자료의 주파수-위상속도 관계는 배열 길이(L)가 작을수록 분산곡선의 모습이 명확하게 나타나는 양상을 보이는데(Fig. 5), 이는 식 (2)에서 공간 자기상관 함수가 수신기 배열

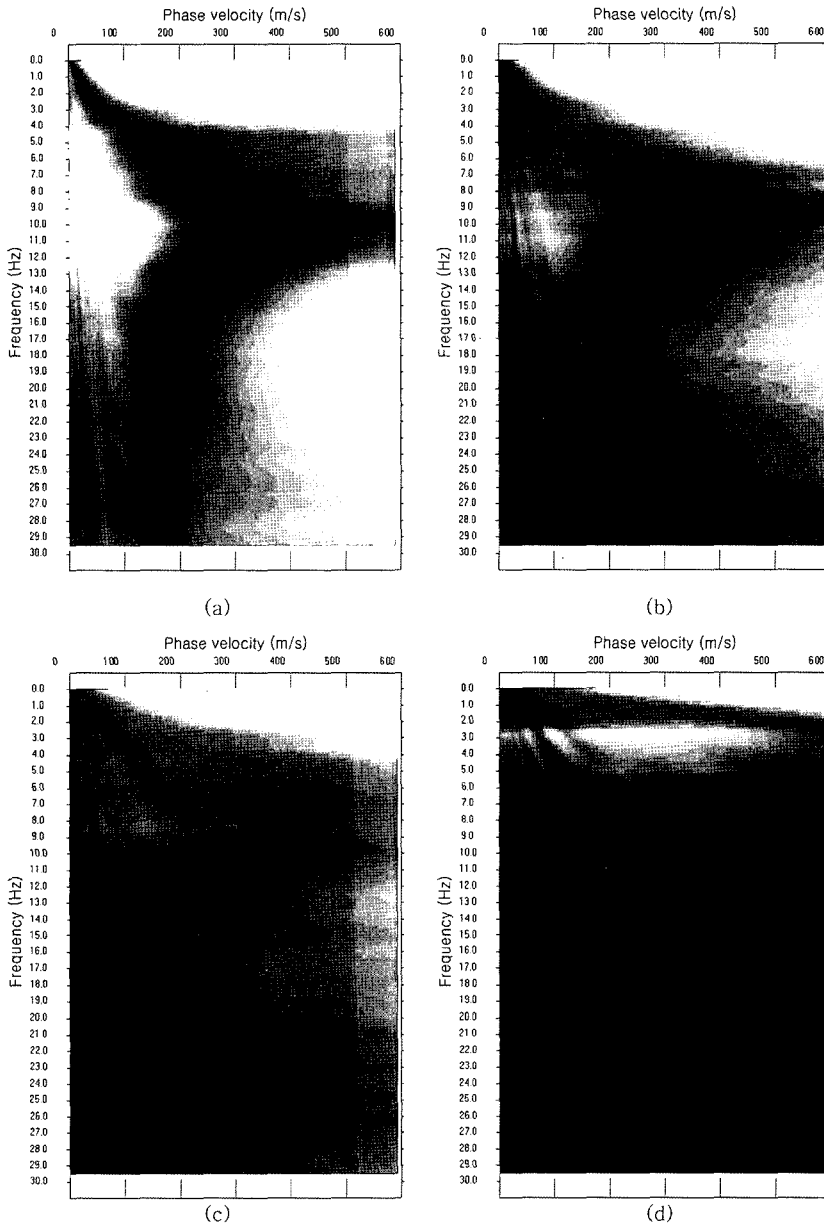


Fig. 5. Phase-velocity spectra of the triangular arrays at site A with (a) $L=10$ m, (b) $L=20$ m, (c) $L=40$ m, and (d) $L=80$ m, respectively.

길이가 작은 경우에 분해능이 높아지는 특성에 기인한다. 이러한 관계는 이론적 응답스펙트럼에서 명확히 나타난다. $L=10$ m인 삼각형 배열의 경우에, 파장(λ)이 최소 수신기 간격인 1.5 m의 이론적 응답(Fig. 6a)이 최대 수신기 간격인 10.0 m인 경우보다 1.8배 크며, 32.2 m 이상인 경우에는 0임을 보인다.

한편 수신기 배열 길이의 감소에 따라 조사 깊이도 감소하여, $L=10$ m인 경우(Fig. 5a)에는 대략 11 Hz 이상 (혹은 위상속도 340 m/s 이하)의 주파수 영역에서만 위상속도를 결정할 수 있다. 이 삼각형 배열의 $L=10$ m인 경우에 파장이 32.2 m 이상인 경우에 응답이 0인 반면, $L=80$ m인 경우에는 파장이 220 m 이상인 경우에만

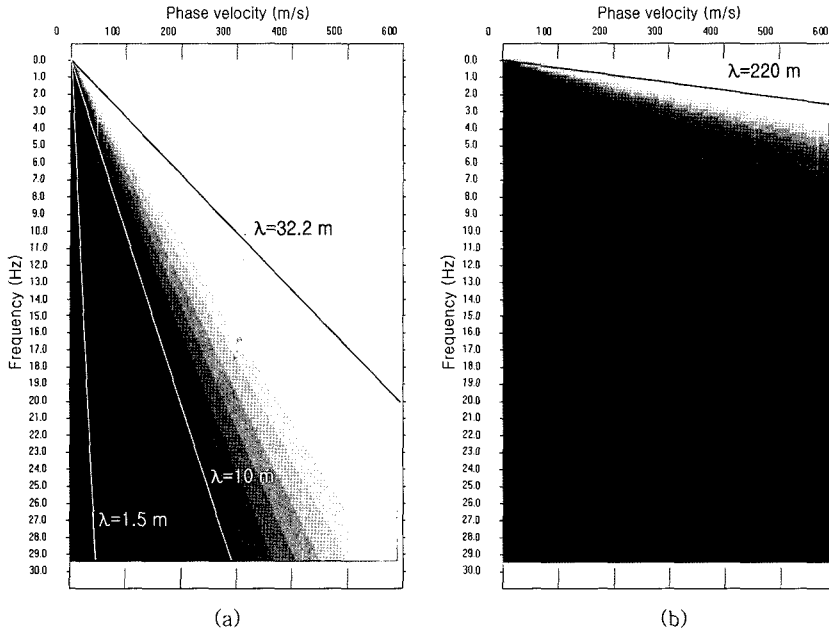


Fig. 6. Responses of triangular arrays with (a) L=10 m and (b) L=80 m, respectively.

0이 되어, 투과 깊이가 배열 길이의 증가에 따라 커짐을 보인다.

수신기 배열 길이는 해상도와 투과 깊이를 모두 고려하여 결정하여야 하며, 조사 깊이가 40 m 정도일 경우에 조사지 A에서의 이상적 배열 길이는 40 m 정도일 것으로 분석된다(Fig. 5c). 이는 파장이 최대 수신기 간격의 3배 이상인 경우에, 배열반응 값이 거의 0이 되는 점과 파장의 1/3 정도를 투과 깊이로 간주할 때, 최대 배열 길이와 조사 깊이가 대략적으로 일치하기 때문이다.

배열 형태

배열 형태에 따른 주파수-위상속도의 관계를 비교하기 위하여, 삼각형 배열의 경우와 동일한 배열 길이인 L=10, 20, 40, 80 m인 직각 배열 자료(Fig. 2)의 분산곡선(Fig. 7)을 작성하였다. 배열 길이에 따른 특성은 삼각형 배열의 경우와 유사하나, 배열 길이가 동일한 경우에 삼각형 배열보다 분산곡선을 인지할 수 있는 주파수가 약간 낮아서 조사 깊이가 다소 깊으나, 신호/잡음비가 조금 낮은 특성을 보인다. 이는 공간 자기함수를 계산하기 위한 수신기 간격 및 중첩도 차이에 기인한다. 즉, L=20 m인 경우에, 삼각형 배열(Fig. 2a)의 경우에는 수신기 간격이 2.8, 5.0, 5.8, 8.6, 10.0, 11.6, 13.2, 17.3, 20.0 m인 9가지가 존재하나, 직각 배열(Fig. 2b)인

경우에는 수신기 간격이 4.0, 5.6, 8.0, 8.9, 11.3, 12.0, 12.6, 14.4, 16.0, 16.5, 17.0, 17.9, 20.0, 20.4, 21.5, 22.6, 23.3, 25.6, 28.3 m의 19개 경우가 존재하여 최대 수신기 간격이 삼각형 배열보다 $\sqrt{2}$ 배 더 크다. 그러나 상기 수신기 간격별 중첩도는 삼각형 배열의 경우에 3, 8, 3, 3, 9, 3, 6, 3, 3으로 직각 배열의 10, 1, 8, 2, 1, 6, 2, 2, 4, 2, 1, 2, 4, 2, 2, 2, 2, 1보다 대체로 높고 변화 폭이 크지 않아서 분산곡선 인지가 다소 용이하다.

따라서 조사대상 깊이까지 배열 길이를 충분히 전개할 수 있는 경우에는 삼각형 배열을, 현장 여건상 배열을 멀리 전개하기 어려운 경우에는 직각 배열을 사용하는 것이 바람직할 것이다.

기록 횟수

상시미동 파워스펙트럼의 정상성(stationarity) 때문에, 기록 횟수를 늘리는 것은 기록 길이를 늘리는 것과 같은 효과를 나타낸다(Bendat and Piersol, 1986). 조사지 A에서 2 ms 샘플로 4초간 기록한 총 50회 기록 중에서 심하게 잡음에 오염된 기록 5개를 제외한 45개 기록을 대상으로, 기록 횟수(혹은 총 기록시간)에 따른 효과를 분석하였다. Fig. 8은 기록 횟수가 1, 10, 30, 45개로, 기록 횟수의 증가에 따라 신호/잡음비가 증가하는 양

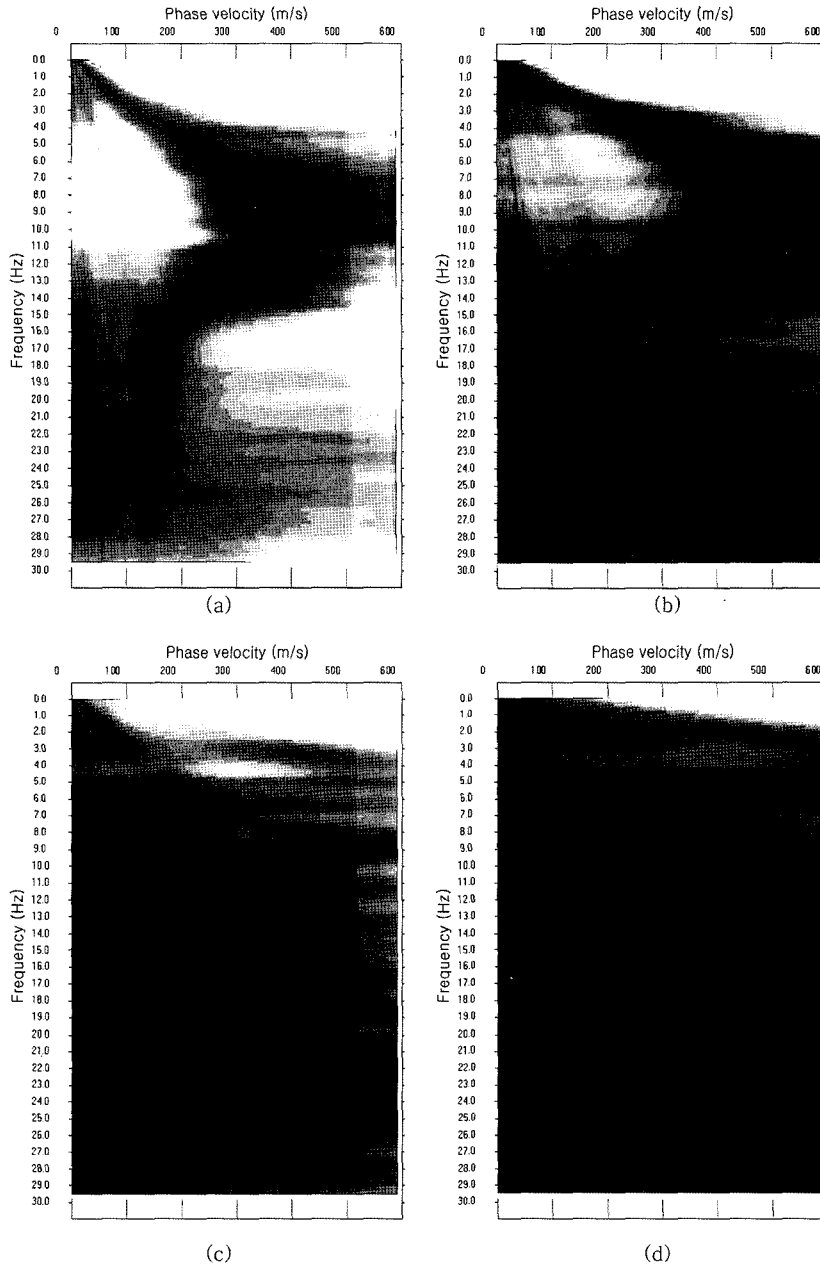


Fig. 7. Phase-velocity spectra of the L-shaped arrays at site A with (a) $L=10$ m, (b) $L=20$ m, (c) $L=40$ m, and (d) $L=80$ m, respectively.

상을 보이나, 30회 이상의 경우에는 항상되는 정도가 그리 크지 않다. 따라서 조사지 A에서 적용한 야외기록변수를 사용할 경우에는 기록 횟수가 30회 (혹은 120초) 정도면 충분할 것으로 분석된다. 그러나 기록 횟수는 기록 길이와 수신기 간격 등의 자료획득 매개변수들과 주

변잡음 및 조사 깊이 등의 현장 여건을 종합적으로 고려하여 결정하여야 할 것이다.

수신기 수

공간 자기상관 함수를 이용한 상시미동 분석법은 한

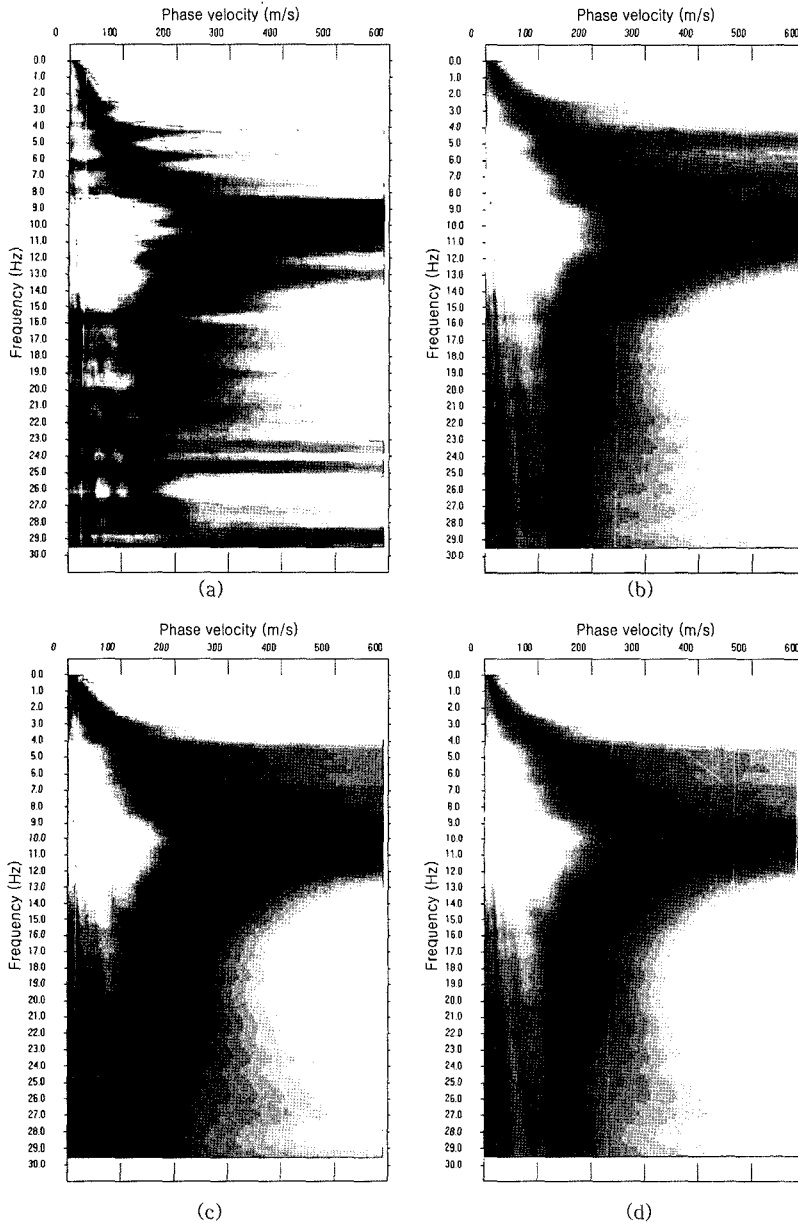


Fig. 8. Effects of number of records on the phase-velocity spectra of the triangular arrays at site A. The corresponding number of records are (a) 1, (b) 10, (c) 30, and (d) 45, respectively.

변의 길이(L)가 일정하더라도, 수신기 간격에 영향을 미치는 수신 채널수에 따라 신호/잡음비가 결정된다. 따라서 조사지 A에서 10채널로 4초간 50회 기록한 $L=20$ m 인 삼각형 배열 자료를 이용하여, 한 변의 길이를 일정하게 20.0 m로 고정하고, 수신기 수가 4, 7, 10인 3가지 경우를 대상으로 신호/잡음비를 고찰하였다. 수신기

가 4개인 경우에는 수신기 간격은 12.0 m와 20.0 m의 경우가 존재하며, 수신기가 7개인 경우에는 수신기 간격이 5.8, 10.0, 11.5, 17.3, 20.0 m, 수신기가 10개인 경우에는 수신기 간격이 2.8, 5.0, 5.8, 8.6, 10.0, 11.6, 13.2, 17.3, 20.0 m의 경우가 존재한다(Fig. 4b). 위상속도-주파수 영역에서 나타낸 분산곡선의 신호/잡음비는

수신기 수가 4, 7, 10으로 증가할수록 증가하는 양상을 보인다(Fig. 9). 다른 영향인자에 따라 변하지만, 이 실험과 유사한 환경에서는 한 배열 당 수신기 수가 최소 7개는 되어야 할 것으로 분석된다.

수직탄성파 자료와 비교

주변에 시추공이 있는 조사지 B에서는 L=60 m 및 L=80 m인 직각 배열과 L=60 m인 삼각형 배열로 상시 미동자료를 기록하였으며, 샘플률 2 ms, 기록 길이 4 s,

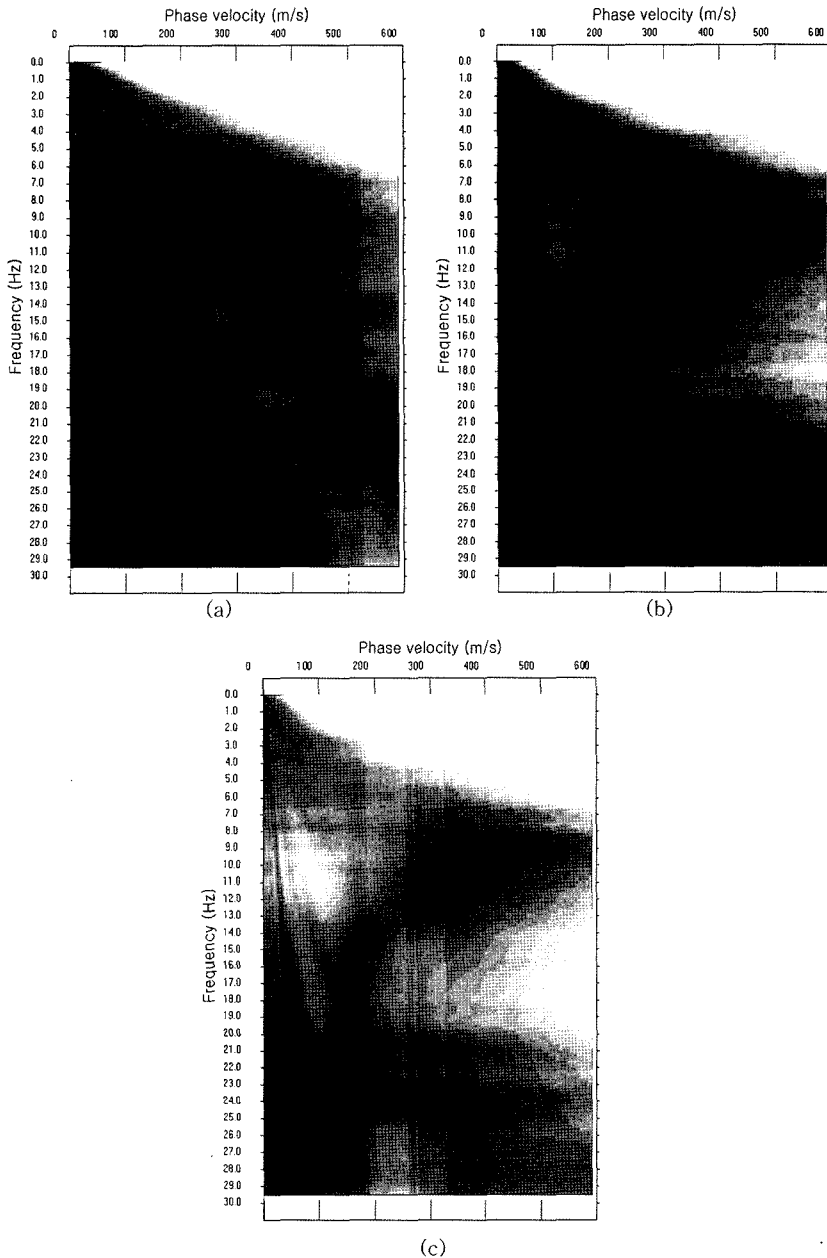


Fig. 9. Effects of number of receivers on the phase-velocity spectra of the triangular arrays at site A. The corresponding number of receivers are (a) 4, (b) 7, and (c) 10, respectively.

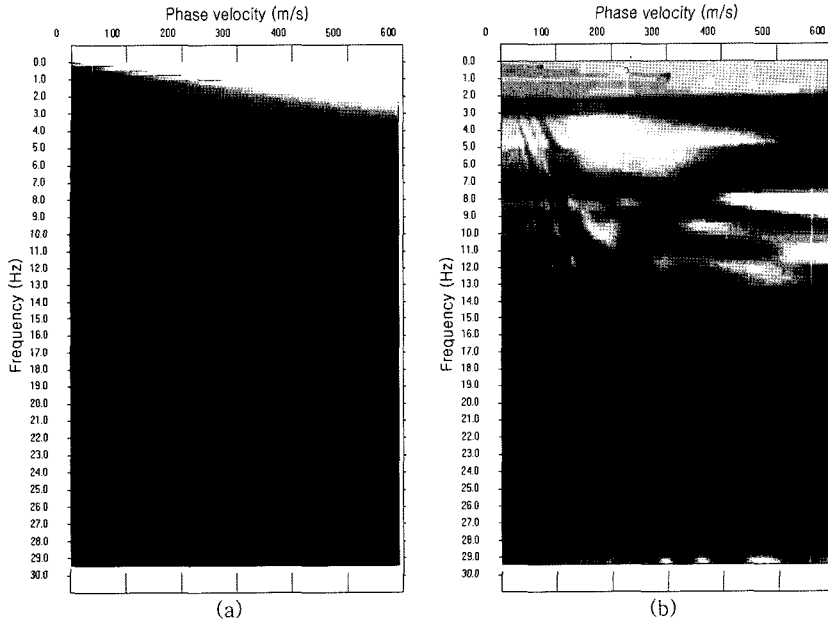


Fig. 10. Phase-velocity spectra of the triangular array at site B with L=60 m (a) before and (b) after removal of the array response.

기록 횟수 50회로 조사지 A에서와 동일한 기록변수를 적용하였다. 앞에서 기술한 바와 같이, 위상속도 스펙트럼은 파장에 따라 반응도가 심하게 변하며, 특히 고주파 부분의 이득이 너무 커서 분산곡선 해석이 용이하지 않다. 배열반응을 제거한 후의 L=60m인 직각 배열의 위상속도 스펙트럼(Fig. 10b)은 배열효과 제거 전의 위상속도 스펙트럼(Fig. 10a)에 비하여 신호/잡음비가 크게 향상되어 분산곡선을 인지가 용이한 모습을 보인다. 따라서 조사지 B에서 기록한 모든 상시미동 자료들의 스파이크 신호에 대한 배열반응을 구하고, 배열효과를 기록자료의 분산곡선에서 제거함으로써 분별력을 높인 후에 역산을 실시하였다.

상시미동자료 역산을 통하여 구한 횡파속도를 검증하기 위해서 B지역의 시추공에서 수직탄성파 방법으로 횡파속도를 실측하였다. 높이 0.2 m 정도의 고도차이가 있는 화단 가장자리에 0.3×0.3×0.8 m 침목의 측면을 타격하는 방법으로 횡파를 발생시켰으며, 타격점으로부터 수평거리 0.5 m에 위치한 시추공 내의 깊이 5~40 m 구간에서 0.5 m 간격으로 측정하였다.

측정된 자료로부터 구한 구간속도는 L=60 m 및 L=80 m인 직각 배열과 L=60 m인 삼각형 배열로 기록한 상시미동 자료의 역산으로 구한 결과와 비교하였다 (Fig. 11). 상시미동자료의 역산을 통하여 구한 횡파속도

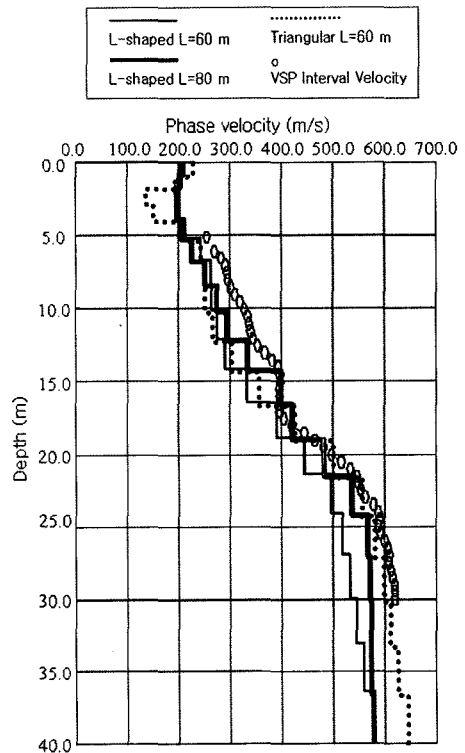


Fig. 11. Interval velocities from the VSP and microtremor surveys at site B.

Table 1. Average shear-wave velocities from the VSP and microtremor surveys at Site B.

Depth Range (m)	L-shaped (L=60 m)	L-shaped(L=80 m)	Triangular(L=60 m)	VSP
0~10 (Vs10)	211 m/s	237 m/s	211 m/s	246 m/s
0~15 (Vs15)	232 m/s	250 m/s	235 m/s	272 m/s
0~20 (Vs20)	266 m/s	277 m/s	270 m/s	303 m/s
0~30 (Vs30)	321 m/s	342 m/s	338 m/s	367 m/s

구조는 수직탄성파로 구한 구간속도와 비교할 때, 차이가 수십 m/s 이내로 두 결과가 대체로 일치하는 경향을 보인다. 이 속도 차이는 적용 방법의 차이, 혹은 시추공이 수신기 배열의 중심에서 수십 m 정도 떨어져 있는데 원인이 있을 수 있다. 그러나 Vs30을 기준으로 지반을 분류하는데 수십 m/s 정도의 차이는 무시될 수 있으며, 비파괴적 방법인 상시미동을 이용한 수동적 표면파 탐사법이 30 m 깊이까지의 속도구조를 구하는데 효과적일 것으로 판단된다. 또한 선창국 외(2005)가 제안한 지반증폭계수에 필요한 VS10, Vs15, Vs20 등도 동시에 구할 수 있어서(Table 1), 천부 횡파속도구조를 구하는 좋은 지구물리학적 조사방법으로 판단된다.

결 론

결정질 기반암 지역에서 수동적 표면파 탐사법을 시험적으로 적용하여 레일리와 위상속도 분석을 통하여 지하 30 m까지의 횡파속도(Vs30)를 구하고, 수신기 배열의 길이 및 형태, 기록 횟수, 수신기 수 등의 영향을 고려하였다. 또한 시추공에서 직접 측정된 결과와 비교함으로써, 상시미동 측정법으로 구한 Vs30값의 정확성을 검증하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 조사 깊이가 40 m 정도일 경우에 이상적 배열 길이는 40 m 정도일 것으로 분석되어, 배열 길이와 조사 깊이가 대략적으로 일치함을 보인다.
2. 배열 길이를 충분히 전개할 수 있는 경우에는 삼각형 배열을, 현장 여건상 배열을 널리 전개하기 어려운 경우에는 직각 배열을 사용하는 것이 바람직하다.
3. 기록 횟수는 조사지 A에서 적용한 야외기록변수를 사용할 경우에 30회 (혹은 120초) 정도면 충분할 것으로 판단되나, 주변잡음, 수신기 간격, 조사 깊이, 기타 현장 여건 등을 종합적으로 고려하여 결정하여야 할 것이다.
4. 위상속도 스펙트럼의 신호/잡음비는 수신기 수가 증가할수록 증가하는 양상을 보이며, 이 실험과 유사한 조건에서는 한 배열 당 수신기 수가 최소 7개는 되어야

할 것으로 분석된다.

5. 배열반응을 제거한 후의 위상속도 스펙트럼은 제거 전에 비하여 신호/잡음비가 크게 향상되어, 배열반응을 제거할 경우에 분산곡선의 분별력을 높일 수 있다.

6. 상시미동으로 구한 횡파속도와 시추공에서 수직탄성파로 구한 결과 사이의 차이는 수십 m/s 이내로 두 결과가 대체로 일치한다. 따라서 상시미동을 이용한 수동적 표면파 탐사법이 30 m까지의 횡파속도(Vs30) 구조뿐만 아니라 그 상부의 Vs10, Vs15, Vs20 등을 구하는데 적합한 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2006-0501)의 지원으로 수행되었습니다. 현장시험자료 획득에 수고한 강원대학교 탄성파탐사 실험실 홍명호 연구원과 진광민, 이재훈, 박병규, 김수영 학생들에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

건설교통부, 1997, 내진설계기준 연구(II), 215p.
 김성균, 황민우, 2002, 상시미동에 의한 지하구조와 지반 응답 추정, 한국지구과학회지, 23, 4, 380-392p.
 선창국, 정충기, 김동수, 2005, 국내 내륙의 설계 지반운동 결정을 위한 지반 증폭 계수 및 지반분류 체계 제안, 한국지반공학회지, 21, 6, 101-115p.
 Aki, K. and Richard, P.G., 2002, Quantitative seismology, 2nd ed., University Science Books, 700p.
 Bendat, J.S. and Piersol, A.G., 1986, Random data: analysis and measurement procedures, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc, 592p.
 Borchardt, R. D., 1994, Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification), Earthquake Spectra, 10, 617-653p.
 BSSC, 2000, NEHEP Recommended Provision for Seismic Regulation for New Buildings and Other Structures, Part 1-Provisions, Building Seismic Safety Council, Washington D. C., 450p.
 Dobry, R., Ramos, R., and Power, M.S., 1999, Site Factor and Site Categories in Seismic Code, Technical Report MCEER-99-0010, Multidisciplinary Center

- for earthquake Engineering Research, 81p.
- Hayashi, K., Inazaki, T., and Suzuki, H., 2005, Buried channel delineation using microtremor array measurements, Society of Exploration Geophysicists, 1137-1140p.
- ICBO, 1997, 1997 Uniform Building Code, Volume 2 - Structural Engineering Design Provisions, International Conference of Building Officials, 492p.
- Kang, T.S. and Baag, C.E., 2004a, Finite-difference seismic simulation combining discontinuous grid with local variable time steps, Bulletin of the Seismological Society of America, 94, 207-219p.
- Kang, T.S. and Baag, C.E., 2004b, An efficient finite-difference method for simulating 3D seismic response of localized basin structures, Bulletin of the Seismological Society of America, 94, 1690-1705p.
- Matsupka, M., Wakamatsu, K., Fujimoto, K., and Midorikawa, S., 2005, Nationwide site amplification zoning using GIS-based Japan Engineering Geomorphologic Classification Map, Safety and Reliability of Engineering Systems and Structures (Proc. 9th International Conference on Structural Safety and Reliability), Millpress, Rome, 239-246p.
- Nazarian, S., Stokoe, K.H., and Hudson, W.R., 1983, Use spectral analysis of surface wave method for determination of moduli and thicknesses of pavement system, Transportation Research Record, 930, 38-45p.
- Okada, H., 2003, The microtremor Survey method, Geophysical monograph series, Society of Exploration Geophysicists, 12, 135p.
- Pack, C.B., Miller, R.D., and Xia, J., 1999, Multichannel analysis of surface wave, Geophysics, 64, 800-808p.
- Toksoz, M.N. and Lacos, R.T., 1968, Microseisms- Mode structure and sources, Science, 159, 3817, 872-873p.
- Wakamatsu, K., Matsupka, M., and Hasegawa, K., 2006, GIS-based nationwide hazard zoning using the Japan Engineering Geomorphologic Classification Map, Proc. 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, 849p.

2006년 11월 19일 원고접수, 2006년 12월 10일 게재승인

황윤구

강원대학교 자연과학대학 지구물리학과
200-701, 강원도 춘천시 효자2동 192번지
Tel: 033-250-8584
Fax: 033-244-8580
E-mail: hwang252@kangwon.ac.kr

김기영

강원대학교 자연과학대학 지구물리학과
200-701, 강원도 춘천시 효자2동 192번지
Tel: 033-250-8584
Fax: 033-244-8580
E-mail: kykim@kangwon.ac.kr