

## 상시미동에 의한 지하구조와 지반응답의 추정

김성균\* · 황민우

전남대학교 지구환경과학부, 500-757 광주 북구 용봉동 300

### Estimation of Subsurface Structure and Ground Response by Microtremor

Sung Kyun Kim\* · Min Woo Hwang

Department of Earth Systems and Environmental Sciences, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea

**Abstract :** The purpose of the present study is to evaluate the usage of microtremor in estimation of subsurface structure and ground response to strong ground motion. To accomplish the purpose, the current status of microtremor study are reviewed and microtremors recorded at several stations are analysed. First of all, the stability of microtremor is examined through the analysis of microtremors recorded for 80 seconds per hour during the time from 10 p.m. to 6 a.m. for eight hours at night time. It is found that the shape of microtremor spectra of low frequency below 10Hz is approximately invariable with time and the spectra contain informations about subsurface structure. The subsurface structures estimated from the predominant frequency determined from the recorded microtremors are compared with the known ones from geophysical surveys at several stations in Kyungju. The comparison of structures shows rough agreements at most stations. Horizontal to vertical spectral ratio(HVSR) technique for microtremor has been proposed as an indirect method to determine ground response to strong ground motion. The HVSR for microtremors recorded in Kyungju is calculated and compared with theoretical transfer function calculated from the known structures. The comparison shows rough coincidence of the peak frequency of spectra between them.

**Keywords :** microtremor, ground response, subsurface structure, HVSR

**요약 :** 이 연구의 목적은 지하구조와 강진동에 의한 지반의 응답을 추정하는 데에 있어서 상시미동의 활용법을 평가하는 것이다. 이 목적을 달성하기 위하여, 상시미동의 연구현황을 검토하였으며, 여러 곳에서 측정된 상시미동을 분석하였다. 먼저 오후 10시부터 다음날 오전 6시까지 매시간 80초씩 밤에 8시간에 걸쳐 측정된 상시미동을 분석하여 상시미동의 안정성을 조사하였다. 그 결과 10Hz 이하의 저주파 대역에서 상시미동 스펙트럼은 시간에 따라 대체로 변화가 없는 것으로 나타났으며, 또한 스펙트럼은 지하구조에 대한 정보를 포함하고 있는 것으로 보였다. 지하구조는 상시미동 기록으로 결정한 탁월주파수로부터 추정되었으며, 이 방법으로 추정된 구조는 경주의 여러 장소에서 다른 지구물리학적 탐사에 의하여 알려진 구조와 비교되었다. 이러한 비교결과 대부분의 장소에서 두 구조는 개략적으로 일치함을 보여 주었다. 상시미동의 수직성분에 대한 수평성분의 스펙트럼비(HVSR)를 이용하는 기법은 지진동에 대한 지반의 응답을 결정하는 간접적인 방법으로서 제안되어 왔다. 경주의 여러 장소에서 기록된 상시미동의 HVSR을 계산하여 지하구조가 알려진 장소에서 이론적으로 계산한 전달함수와 서로 비교해 보았다. 비교결과는 양자 사이에 스펙트럼의 최대 주파수에서 개략적인 일치를 보여 준다.

**주요어 :** 상시미동, 지반응답, 지하구조, HVSR

## 서론

일반적으로 어떤 지역에서의 지진재해는 지진동에

의한 지반의 응답에 따라 크게 달라진다. 지반의 응답은 기반암에 입력된 지진동이 지표면까지 전달되었을 때, 기반암에서의 입력 지진동에 대한 지표면에서의 지진동의 주파수별 증폭특성을 의미한다. 지반의 응답에 따라 같은 크기의 지진동이라 하더라도, 연약

\*Corresponding author: kimsk@chonnam.ac.kr

지반에서는 특정 주파수에서 크게 증폭되어 큰 재해를 초래할 수도 있다. 예를 들면, 1923년 일본 동경 부근에서 발생한 Kwantoz진에 의한 건물의 도괴율은 층적층이 두껍게 쌓인 곳에서 높았다. 그 이유는 저주파에서의 지반응답, 즉 증폭률이 커서 대부분의 건물에 공진이 일어난 것과 지진동에 의하여 기초부분에 부등침하가 일어났던 것으로 해석하고 있다(Oohara, 1974). 이와 같이 연약지반에서 지반의 응답에 따라 지진동이 크게 증폭되어 큰 재해로 연결된 예는 여러 곳에서 찾을 수 있다(Takemura *et al.*, 1995).

지반의 응답을 예측하기 위해서는 지반의 물성과 속도구조를 알아야 한다. 지반의 물성과 속도가 수평방향으로는 일정하고 연직방향으로만 변화하는 층상구조로 가정하여, 파동의 1차원적인 운동방정식으로부터 지반의 응답을 구할 수 있다(Schnabel *et al.*, 1972). 기반암위 지반의 구조에 대한 조사는 주로 탄성과 탐사 및 시추 등에 의해 시도되어 왔다. 특히 퇴적층 구조에 대한 연구는 토목공학에 있어 매우 중요한 문제이고 보통은 시추에 의해 연구가 이루어진다. 그러나 시추에 의한 방법은 많은 비용과 시간이 소요될 뿐만 아니라, 얻어진 정보가 정확하다 할지라도 지극히 국한된 지역의 값으로 볼 수밖에 없다. 이러한 어려움을 극복하기 위한 대안으로서 상시미동(microtremor)은 지구물리탐사 기술의 한 방법으로 연구되어 왔다(Takemura *et al.*, 1995). 상시미동에 의한 지반구조의 추정은 시추에 의한 방법보다는 정확한 정보를 얻기 어렵지만, 시간과 비용에 있어 훨씬 경제적이며, 보다 더 광범위한 범위의 지반에 대한 정보를 효과적으로 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있다.

상시미동은 지진계가 개발된 후 지진기록의 배경잡음에 대한 연구의 하나로서 관측, 분석되어 왔다. 상시미동은 겉보기에 불규칙적인 백색잡음과 같지만 이를 관측, 해석하여 보면 지하구조에 따른 고유의 주파수를 보이고 있고, 그 지역 지반 고유의 탁월주파수를 보이며 진동특성을 반영하고 있기 때문에 지질공학적으로도 주목을 받아 왔다. Naruse *et al.*(1976)은 일본의 Hachinohe 지역에서 장주기 상시미동을 측정하였다. 그들은 모든 측정지역에서 나타나는 공통적인 스펙트럼의 최대값은 퇴적층에 입사한 파에 의한 것이고, 측정지역마다 다르게 나타나는 스펙트럼의 최대값은 측정점 아래 표층의 탁월주기를 지시

하는 것으로 해석하였다. 유사한 결과들이 일본의 많은 지역에서 상시미동 측정으로부터 연구되었다(Taga *et al.*, 1983; Kagami *et al.*, 1986). 단주기 상시미동에 의하여 두꺼운 표층의 구조를 추정하는 방법은 항상 효과적으로 사용될 수 있는 것은 아니다. Kagami *et al.*(1982)은 일본 Niigata와 미국 Los Angeles 분지에서 관측한 상시미동 스펙트럼에서 어떤 체계적인 탁월주기의 변화를 관찰할 수 없었다. 대신에 스펙트럼의 진폭들에 있어 체계적인 변화들을 발견한 것으로 보고하였다.

상시미동 분석은 지진발생중에 표층에서의 지반의 동적인 응답을 평가하기 위해서 널리 사용되고, 이러한 목적을 위해서 많은 연구들이 수행되어 왔다(Lermo and Chaves-Gracia, 1993). 여러 방법들 중에서 가장 만족할만한 결과는 Nakamura(1989)에 의해 제안된 수평 대 수직 스펙트럼비(HVSR: Horizontal to Vertical Spectral Ratio)를 적용함으로써 얻어졌다. 이 이론은 많은 경험적, 이론적 그리고 수치적인 결과에 의해 지지되어 왔다(Field and Jacob, 1993; Lermo and Chavez-Garcia, 1993; Lachet and Bard, 1994; Castro *et al.*, 1997). 또한 HVSR은 깊은 퇴적분지의 구조에 대한 연구(Yamanaka *et al.*, 1993)와 건물에서의 공진에 대한 연구(Mucciarelli, 1998)에 성공적으로 적용되어 왔다. 이처럼 상시미동 분석을 통한 지질공학적 응용으로서는 진폭과 탁월주파수에 착안한 지하구조의 추정이나 지반종별의 판정, 내진설계를 위한 지반 증폭 특성의 예측 등이 있다.

한편 Aki(1988)는 HVSR과 퇴적층의 두께와의 관계에 대한 연구를 통해 HVSR을 이용한 퇴적층구조의 해석은 단주기 범위에서 보다 장주기 범위에서 더 신뢰성이 있음을 주장했다. Seo *et al.*(1990)의 연구에 의하면 장주기 상시미동 스펙트럼에 있어 특정한 탁월주기가 없는 경우는 높은 임피던스비를 가진 경계면이 없기 때문이라고 설명하였다. 한편, Shino *et al.*(1979)은 장주기 상시미동은 주로 표면파로 구성된다는 가정에 근거하여, HVSR을 사용함으로써 지하구조를 추정하는 방법을 제안하였다.

장주기 상시미동에 대한 다른 연구는 배열측정을 이용하는 것이다. Horike(1985)와 Matsushima and Okada(1990)는 수직성분 지진계의 배열에 의해 기록된 장주기 상시미동에 대하여 F-K 스펙트럼 분석을 적용하고, 표면파에 대한 위상속도 분산곡선의 역산에 의해 지하의 S파 속도구조를 추정하였다. 결국 이

연구에서는 두꺼운 퇴적층에서 S파 속도 구조를 결정하는데 있어서 어려움은 장주기 상시미동의 배열측정에 의해 효과적으로 해결될 수 있음을 시사하였다.

현재 국내에서는 이러한 상시미동 측정을 이용한 연구가 많이 진행되어 있지는 않다. 김성균(1991)은 상시미동을 관측하여 지하구조와의 관련성을 조사하였다. 그는 이 연구에서 확실히 구분 가능한 지하구조를 가진 경상분지내 3지점에서 측정된 상시미동을 해석, 유추한 지하구조와 실제의 구조가 일치하는 사례를 소개하였다.

본 연구의 주된 목적은 상시미동을 이용하여 지반 응답의 추정 가능성을 조사하는 것이다. 이를 위하여 먼저 상시미동을 이용하여 지하구조를 추정하는 방법론들에 대한 이론을 정리하고 기존에 연구된 사례를 조사하였다. 또한 상시미동의 시간적 변화에 따른 진폭 및 스펙트럼의 안정성을 조사하기 위하여 매시간 수분간씩 측정된 하루동안 기록으로부터 상시미동 스펙트럼 및 진폭의 안정성을 분석하였다. 연구에 사용한 기록은 인공적인 잡음이 들어가지 않은 야간 8시간에 대한 것이다. 또한 탁월주기와 지하구조와의 관련성을 규명하기 위해 경주의 4지점에서 단주기 및 장주기 상시미동을 측정하였다. 기록된 상시미동으로부터 탁월주기를 결정하고 지하구조 해석에 이용하였다. 또한 지층의 증폭률 스펙트럼(HVSR)이 퇴적층에서의 전달함수(transfer function)와 유사하다는 이론에 근거하여 경주의 4지점에서 측정된 기록을 가지고 수직 대 수평 스펙트럼비를 구하여 이론적으로 계산한 전달함수와 비교하였다. 전달함수를 계산하기 위해서 프로그램 EERA (Equivalent-linear Earthquake site Response Analysis)가 사용되었으며, 계산에 필요한 각 층의 전단파 속도와 두께는 경주 지역의 지반 공학적 지진 민감도 분석을 위해 정충기 외(2000)가 실시한 시추 및 탄성파 탐사 결과를 참조하였다.

## 상시미동 이론

### 상시미동의 정의

상시미동은 지진이나 폭발과 같은 짧은 기간의 사건에 기인하지 않은 모든 지반 진동으로 요약될 수 있다. 지반은 미세하게 연속적으로 탄성체적인 진동을 지속하고 있고, 이러한 지반진동의 변위 진폭은 대략  $10^{-6} \sim 10^{-7}m$  정도이며, 그 주파수는 0.01~수 십 Hz의 범위에 있다. 주파수 0.01~0.1Hz 범위의 진동

은 맥동(microseisms or pulsatory oscillations)으로, 대략 0.5 ~수 십Hz 범위의 진동은 상시미동 또는 미소지반진동(microtremor)으로 정의된다(Cherry, 1974). 또한 Ohta *et al.*(1978)은 0.1~1Hz 범위의 장주기 지반진동까지도 상시미동으로 간주하고 있다. 또한 상시미동은 “microseism”, “seismic noise”, “Earth noise” 등으로 불리는 항상 존재하는 지반운동으로, 특히 “microtremor”라는 용어는 이러한 미세 지반운동이 지진 공학적 목적을 위해 사용될 때 사용한다(Takemura *et al.*, 1995). Field *et al.*(1990)은 상시미동을 해양이나 대기 그리고 문화적 활동으로부터 현저하게 발생하는 저 진폭 진동(1~10microns)으로 정의하였다. 상시미동은 바람이나 해파에 의한 자연 발생적인 진동원과 교통이나 산업활동등의 인간활동에 의한 다양한 원인에 의해 불규칙적으로 발생한 진동이 사방으로 전파되어 관측지점의 지반을 통하여 지표에서 관측될 수 있다.

이러한 상시미동은 주기 범위에 따라 두 가지 형태로 분류될 수 있다. 하나는 1초 이하의 주기를 갖는 단주기 상시미동으로 얕은 지하구조와 관련되어 있고, 다른 하나는 1초 이상의 주기를 갖는 장주기 상시미동으로 심부의 지하구조와 관련되어 있다(Takemura *et al.*, 1995).

### 탁월주기(predominant period)에 의한 지하구조의 추정

단일층으로 이루어진 표층에서의 공진주기 특성에 근거한 상시미동과 지하구조와의 관계에 대한 연구는 일본의 Kanai 연구그룹(Kanai and Tanaka, 1961; Kanai *et al.*, 1965, 1966)에 의해 주로 발전되어 왔다. 지진발생시에 지표에서의 주요 진동은 S파이고, 일반적으로 탄성과 속도는 깊이에 따라 증가하므로 지진 발생에 따른 S파는 지표면에 대략 수직으로 입사하게 되며 표층내에서 중폭반사의 현상이 일어나게 된다. 그 결과 어떤 특정의 주파수를 가진 진동은 크게 증폭되어 지표면이 더욱 크게 진동하는데 이러한 주기를 지반의 탁월주기로 부른다.

단일층으로 이루어진 표층을 가진 지반을 통해 전파되는 전단파의 경우에 대하여 고려하기로 하자. 표층의 두께를 H, 표층에 대한 밀도와 전파속도를 각각  $\rho_1$ 과  $c_1$ 으로, 그리고 기반암에 대한 밀도와 전파속도를  $\rho_2$ 와  $c_2$ 로 나타내기로 하자. 또한 각주파수가  $\omega$ 이고 단위진폭을 가진 정현곡선형의 전단파가 기반

앞으로부터 왼쪽방향으로 진행하는 경우에 시간  $t$ 와 지표를 따른 방향  $x$ 에 있어서의 진폭을 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$U_2 = \exp\left\{i\omega\left(t + \frac{x}{c_2}\right)\right\} \quad (1)$$

이때 기반암과 표층에서의 파의 운동은 각각 다음 방정식에 의해 표현될 수 있다(Okamoto, 1973).

$$u_2 = \exp\left\{i\omega\left(t + \frac{x}{c_2}\right)\right\} + D_2 \exp\left\{i\omega\left(t - \frac{x}{c_2}\right)\right\} \quad (2)$$

$$u_1 = U_1 \exp\left\{i\omega\left(t + \frac{x}{c_2}\right)\right\} + D_1 \exp\left\{i\omega\left(t - \frac{x}{c_1}\right)\right\} \quad (3)$$

여기서  $D_1$ ,  $D_2$  및  $u_1$ 은 결정되어야 할 미지수들을 나타낸다. 변위와 전단응력은 기반암과 표층의 경계에서 연속적이라는 조건으로부터, 세 미지수들  $U_1$ ,  $D_1$ ,  $D_2$ 를 구하여 식 (2) 및 (3)에 대입하면, 지표에서의 진폭  $u_s$ 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$u_s = \frac{2}{\sqrt{\cos^2 \frac{\omega H}{c_1} + k^2 \sin^2 \frac{\omega H}{c_1}}} \quad (4)$$

여기서  $k$ 와  $\frac{\omega H}{c_1}$ 의 다양한 값에 대해  $u_s$ 를 구하면 그 결과는 Fig. 1과 같이 나타난다. 만약 표층이 기반암에 비해 연약하다면,  $k < 1$ 이 되어 그림에서와 같이 그 진폭은 크게 증폭된다. 주기를  $T$ 라 할 때,

$$\frac{\omega H}{c_1} = \frac{2\pi H}{T c_1} = \frac{\pi}{2} \text{의 관계가 성립되므로,}$$

파는 다음과 같은 주기를 갖는다(Okamoto, 1973).

$$T = \frac{4H}{c_1} \quad (5)$$

식 (5)에 의해 정의되는 주기는 증폭률이 최대가 되므로, 이 주기가 바로 지반의 최대 공진주기가 되며 이 때의 진폭은  $u_s = \frac{2}{k}$ 이다.  $\frac{H}{c_1}$ 는 파의 운동이 표층을 통과하는데 요구되는 시간이기 때문에, 파의 주기가 이것의 4배가 되면 지반의 표층은 가장 크게 진동하게 된다. 이러한 공진주기 특성에 근거하여 매질의 물성 즉 밀도와 S파속도가 달라지는 수평 2층

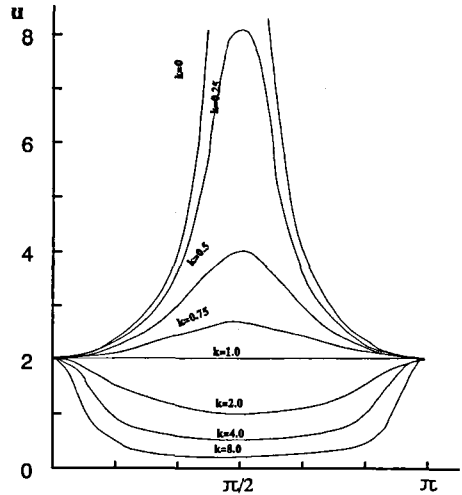


Fig. 1. Plotting  $u_s$  for various of  $k$  and  $PH/c_1$ . Redrawn from Okamoto (1973).

구조에서 연직으로 입사하는 S파에 대해 적절한 경계조건 아래에서 증폭률이 최대가 되는 탁월주기  $T$ 를 이론적으로 구할 수 있다. 한편 상시미동의 측정과 해석으로 지반의 탁월주기가 결정되어 있을 때 표층의 S파속도를 알게 되면 식 (5)에 의하여 표층의 두께를 추정할 수도 있다.

탁월주기를 이용하여 지하구조 해석에 적용한 예로서, Kagami *et al.*(1986)은 주기 1초~5초 범위의 장주기 상시미동을 측정하여 지반의 탁월주기를 결정하였다. 그 결과 1초 이상의 탁월주기는 퇴적층의 깊이와 잘 대응되며, 표층의 증폭효과는 기존의 지질학적 및 강진기록과 질적으로 잘 일치한다고 밝혔다. 김성균(1991)은 포항지역의 석유탐사용 시추공 지점에서 얻어진 상시미동의 파워 스펙트럼으로부터 지반의 탁월주기를 결정하여 시추자료와 비교한 결과 만족할 만한 결과를 얻었다.

위의 예는 상시미동으로부터 표층의 구조를 성공적으로 결정한 예이다. 그러나 표층이 두껍거나 그 아래 놓인 층과의 사이에 임피던스차가 크지 않은 경우는 상시미동의 스펙트럼에서 특정한 탁월주기를 찾기 어렵다. Kagami *et al.*(1982)은 일본과 미국의 퇴적분지에서 단주기 상시미동을 측정하여 얻은 스펙트럼에서 뚜렷한 탁월주기를 발견할 수 없었다고 보고하고 있다. 따라서 상시미동 해석에 의해 탁월주기로부터 지하구조를 결정하는데 있어서 몇 가지 주의가 필요하다. 왜냐하면 지반은 단순한 수평 2층구조로

근사하기 어려운 경우가 많으며, 상시미동 기록으로부터 얻어진 결과가 반드시 지반의 탁월주기를 반영하지 않는 경우도 있기 때문이다. 따라서 상시미동으로부터 얻어진 결과는 다른 방법으로 결정된 지하구조와 상호 연관시켜 사용되어야 할 것이다.

**수직 대 수평성분 스펙트럼비에 의한 지반응답의 추정**

상시미동 연구의 초기에는 주로 탁월주기를 구하는 연구에서 출발하여 지하구조를 추정하는 연구가 주류를 이루었으나, 점차 그 활용분야가 확대되기 시작하였다. 특히 지층의 지진동에 대한 응답을 지하구조에 대한 정보없이 상시미동으로부터 간접적으로 구하는 연구가 시도되었다(Takemura *et al.*, 1995). 왜냐하면, 상시미동의 연구가 지하구조 자체에 관심있는 물리탐사분야의 연구자들이 아닌 지진공학자들에 의하여 주도되었기 때문이다. 지진공학의 중요한 목표중의 하나는 지진재해의 경감이며, 이러한 경감을 위해서는 지진동에 의한 지반의 응답을 예측할 필요가 있다. 물론, 탄성과 탐사나 시추공조사로 얻은 지하구조로부터 지반의 지진응답을 결정할 수 있으나, 그 조사에 필요한 경비나 시간을 무시하기 곤란하다. 이에 대한 대체적인 기법으로서 Nakamura(1989)는 상시미동의 수직성분에 대한 수평성분의 스펙트럼비(HVSR)를 이용하는 방법을 제안하였다. 이 기법을 Castro *et al.*(1997)의 방법에 따라 설명하기로 한다.

기반암 위에 놓여있는 저속도층의 응답 즉, 증폭효과를 결정하기 위하여 지표에서 기반암까지의 층을 수평의 층상구조로 가정하기로 하자. 이때 주파수 영역에서 지반응답  $H(f)$ 는 전달함수에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$H(f) = [h_v(f)^2 + h_u(f)^2]^{1/2} \tag{6}$$

여기서  $h_v(f)$ 와  $h_u(f)$ 는 각각  $H(f)$ 의 수직성분과 수평성분이며,  $h_u(f)$ 는 지표에서의 수직성분 운동  $V_s(f)$ 와 기반암에서의 수직성분  $V_b(f)$  사이의 비로서 다음과 같이 정의할 수 있다(Castro *et al.*, 1997).

$$h_u(f) = \frac{V_s(f)}{V_b(f)} = \frac{S_v(f) \cdot \Gamma(f) \cdot Z_u(f)}{S_v(f) \cdot \Gamma(f)} \tag{7}$$

이 식에서  $S_v(f)$ 는 진동원의 영향을 나타내고,  $\Gamma(f)$ 는 지진원에서 기반암까지의 전파 경로에 의한 영향을 나타내며,  $Z(f)$ 는 퇴적층에서 유도된 증폭을 나타

낸다. 같은 방법으로,  $H(f)$ 의 수평성분도 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$h_u(f) = \frac{U_s(f)}{U_b(f)} = \frac{S_v(f) \cdot \Gamma(f) \cdot Z_u(f)}{S_v(f) \cdot \Gamma(f)} \tag{8}$$

여기서  $U_s(f)$ 와  $U_b(f)$ 는 각각 지표와 기반에서의 운동에 대한 수평성분이다. 식 (7)과 (8)로부터 전달함수 HVSR은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{h_u(f)}{h_v(f)} = \frac{Z_u(f)}{Z_v(f)} = \frac{U_s(f)}{U_b(f)} \cdot \frac{V_b(f)}{V_s(f)} \tag{9}$$

Nakamura(1989)는 상시미동의 수직성분에 대한 스펙트럼은 주로 진동원의 효과를 포함하고 있으므로, 저속도의 층에 의하여 증폭되지 않는다고 가정하였다. 이 가정이 성립된다면 식 (9)에서 수직방향의 증폭률  $Z_v(f) = 1$ 이 된다. 또한 기반암에서의 수평 및 수직방향의 스펙트럼 진폭 사이에  $U_b(f) = V_b(f)$ 가 성립된다는 가정을 추가하였다. 이러한 두 가지의 가정이 성립된다는 전제아래 수평성분의 기반암에 대한 지표에서의 스펙트럼 진폭비  $Z_u(f)$ 는 다음 식으로 표현된다.

$$Z_u(f) = \frac{U_s(f)}{V_s(f)} \tag{10}$$

식 (10)에 의하면 지진동의 수평성분의 표층에 의한 응답은 표층의 물성이나 탄성과 속도에 대한 정보없이, 상시미동의 HVSR로부터 측정이 가능하다.

이러한 Nakamura의 이론에 근거하여 지반응답 추정에 대한 여러 연구들이 진행되어 왔다. Castro *et al.*(1997)은 Nakamura(1989)의 기법에 포함된 가정들에 대한 타당성을 입증하기 위한 연구를 수행하였다. 그들은 Italy에서 관측된 강진기록을 이용하여 S파의 수직성분 스펙트럼이 층적층에 의하여 증폭되는 비가 2배 이내로서 대체로 Nakamura(1989)의 가정이 성립된다고 보고하였다. 그러나 S파가 표면파에 의해 오염된 경우는 가정이 성립되지 않으며 HVSR법의 사용이 곤란하다고 밝혔다. 한편 Yuncha and Luzon(2000)은 퇴적분지에서의 HVSR 기법의 신뢰성을 두 개의 지층모델에 대한 이론적인 계산으로 조사하였다. 그 결과 이론적으로 계산된 HVSR은 실제의 탁월주기와 잘 일치하지 않는 경우가 있음을 밝혔다. 또한 기반암과 퇴적층의 임피던스차가 지나치게 크지 않을 때는 HVSR 기법으로 지반응답을 예측할 수 있다고 보고하였다.



Fig. 2. The locations for KJ1, KJ2, KJ3, and KJ4 in Kyungju city.

### 야외측정 및 자료해석 방법

#### 야외측정

상시미동의 측정은 보통의 지진관측용 지진계로 가능하다. 즉 환진기로서는 고유주기 1초 정도, 감도 1~5V/(cm/sec)의 속도형 전자식 지진계가 이용되며, 감도특성은 1초 이하의 주기에서 동일하여야 한다. 또한 장주기 상시미동의 경우는 고유주기가 5~10초인 것이 사용된다.

상시미동은 그날의 기상상태나 주위환경 및 교통기관에 의한 영향을 많이 받지만 일반적으로 동일장소와 동일조건 아래에서 측정이 이루어진 경우, 즉 측정시기가 다르다 할지라도 주기와 진폭에 있어서 거의 같은 결과를 나타낸다. 상시미동은 1회 측정시 5~10분 연속적으로 측정하며, 수회 반복 측정한 결과에 재현성이 입증될 때 그 신빙도가 높다. 또한 인공적인 잡음을 피하는 것이 중요하며, 파형에서의 특수한 진동의 부분은 기록에서 제외시켜야 한다(김성균, 1991).

본 연구에서는 상시미동 측정을 위해 기록계로서는 Scintrex사의 휴대용 지진기록계 PRS4가 사용되었고, 센서는 고유주기 1초의 단주기 지진계 1대와 고유주기 12초의 장주기 지진계 1대가 이용되었다. 측정은 두 차례에 걸쳐 이루어졌다. 첫 번째는 상시미동의 하루중의 시간적 변화에 따른 진폭 및 스펙트럼을 고찰하여 그 안정성을 평가하였다. 측정은 2000년

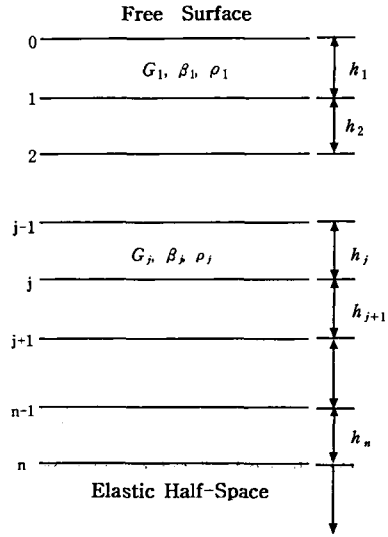


Fig. 3. Computational model for a viscoelastic layered structure over a half-space.

12월중에 매시간 1분 20초씩 1시간 간격으로 24회 수행되었다. 측정장소는 광주광역시 도심으로부터 멀리 떨어진 비교적 조용한 장소를 선택하였다. 측정결과 주간과 야간의 진폭차가 크게 나타났으며, 주간의 경우 근거리의 인공적 잡음으로 인해 매시간 진폭이 불규칙하게 나타났고 야간에는 비교적 안정한 경향을 보였다. 따라서 이 연구에서는 야간에 기록된 9회의 자료를 분석에 이용하였다.

두 번째 측정은 경북 경주시의 통일전(KJ1), 명활산성(KJ2), 준용하천(KJ3), 황성공원(KJ4)의 4지점에서 2001년 2월중 3일간에 걸쳐 수행되었다(Fig. 2). 이 장소들은 정충기 외(2000)가 시추 및 탄성과 탐사를 수행한 지역으로서, 상시미동으로부터 추정되는 지반응답과 시추자료로부터 계산한 응답을 서로 비교 분석하였다.

#### 지반응답의 계산

자유면 아래의 지하구조에 대하여 밀도, 전단계수, 점성계수등의 분포가 주어져 있는 경우, 이론적으로 지표면에서의 응답을 구할 수 있다(Schnabel *et al.*, 1972). 이하에서는 Schnabel *et al.*(1972)의 방법에 따라 지반응답의 계산법을 설명하기로 한다. Fig. 3과 같이 탄성적인 반무한 공간위에 놓인 n개의 수평층에서 j번째 층에 대한 전단계수( $G_j$ ), 임계감쇠비( $\beta_j$ ), 층두께( $h_j$ )가 주어져 있다고 하자. 아래쪽에서 수직방

향으로 S파가 전파되었을 때 각 층내에서의 모든 변위는 수평방향이 되며 다음과 같은 운동방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\rho_j \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G_j \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta_j \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t} \quad (11)$$

여기서  $u = u(t, z)$ 는 수평방향의 변위,  $t$ 는 시간,  $z$ 는  $j$ 번째 층의 깊이 그리고  $\eta_j$ 는  $j$ 번째 층의 점성계수를 나타낸다. 윗식에 대한 안정한 해는 다음과 같다.

$$u = U_j(z) \exp(i\omega t) \quad (12)$$

여기서

$$U_j(z) = E_j \exp(ik_j z) + F_j \exp(-ik_j z) \quad (13)$$

그리고

$$k_j = \omega / V_j \quad (14)$$

이다. 식 (14)에서 변수  $V_j$ 는  $j$ 번째 층에 대한 복소수 전단파 속도이다. 이 속도는 다음의 관계식을 통하여  $\rho_j$ ,  $G_j$  그리고  $\eta_j$ 와 관계된다.

$$V_j^2 = (G_j + i\omega\eta_j) / \rho_j \quad (15)$$

또한 실험적인 결과에 의해 다층 구조에 있어서  $G_j$ 와  $\omega\eta_j$ 는 관심있는 범위내에서 주파수에 의해 거의 영향을 받지 않는다. 결과적으로 복소수 전단파 속도  $V_j$ 는 주파수로부터 완전 독립적인 것으로 가정된다. 이 가정으로, 식 (15)는 다음의 형태로 다시 쓸 수 있다.

$$V_j^2 = G_j(1 + i2\beta_j) / \rho_j \quad (16)$$

여기서  $\beta_j$ 는  $j$ 번째 층의 매질에 대한 임계감쇠비를 나타낸다. 식 (13)의 첫 항은 복소수 진폭  $E_j$ 를 가지고 윗쪽으로 진행하는 전단파를 나타내고, 두 번째 항은  $F_j$ 를 가지고 아래쪽 방향으로 진행하는 전단파를 나타낸다. 진폭  $E_j$ 와  $F_j$ 는 층에 따라 변화하지만 다음의 반복적인 공식을 통하여 서로 관계를 갖는다.

$$E_{j+1} = \frac{1}{2} E_j [(1 + \alpha_j) \exp(ik_j h_j) + (1 - \alpha_j) \exp(-ik_j h_j)] \quad (17)$$

그리고

$$F_{j+1} = \frac{1}{2} E_j [(1 - \alpha_j) \exp(ik_j h_j) + (1 + \alpha_j) \exp(-ik_j h_j)] \quad (18)$$

여기서  $\alpha_j (j = 1, \dots, n)$ 는 다음과 같이 위 아래층의 임피던스비를 나타낸다.

$$\alpha_j = (\rho_j V_j) / (\rho_{j+1} V_{j+1}) \quad (19)$$

식 (17)과 (18)은 층사이에서의 응력과 변위의 연속을 보장하며, 응력과 무관한 최상부 층의 표면에서 다음의 관계를 갖는다는 것을 의미한다.

$$E_1 = F_1 = \frac{1}{2} A_0 \quad (20)$$

여기서  $A_0$ 는 자유면에서 총변위진폭을 나타낸다.

식 (17)-(20)을 이용하여  $E_j$ 와  $F_j$ 를 표층의 진폭 또는 다른 층의 진폭의 함수로 결정할 수 있다. 특히 표층에 대한 다른 층의 비는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{A_{n+1}}{A_0} = \frac{E_{n+1} + F_{n+1}}{2E_1} \quad (21)$$

위와 같이 여러 층으로 이루어진 구조에 있어서 응답계산을 위한 해를 표현하는 식은 매우 복잡하지만 그 결과는 컴퓨터 프로그램을 이용하여 쉽게 계산이 된다. 본 논문에서는 지반응답 계산을 위한 컴퓨터 프로그램 EERA(Bardet et al., 2000)를 사용하였다. EERA(Equivalent-linear Earthquake Response Analysis)는 위에 설명한 알고리즘에 따라 고안된 프로그램으로 지반응답계산에 널리 쓰이고 있다. EERA의 입력과 출력은 Excel 프로그램의 worksheet로 구성되어 있다. 이 프로그램에서 지층을 수평다층 구조로 가정하여 각 층의 두께 및 전단파속도를 입력하면, 프로그램의 실행에 따라 주파수별 지반응답(증폭률)이 계산되도록 되어 있다.

### 자료해석방법

아외에서 측정된 상시미동 자료는 Scintrex사의 지진 기록계 PRS4에 디지털 자료로 기록된다. 이 자료를 개인용 컴퓨터에서 받아 파일로 보관하게 되며, 분석에 앞서 가장 먼저 파형으로 출력한다. 이 상시미동의 파형에는 아외에서 기록시에 세심한 주의를 한다 하더라도 중간중간에 지반의 구조와는 관련없는 가까운 거리의 직접적인 진동원에 의한 잡음이 섞여 있다. 따라서 이러한 부분을 제거하는 것이 다음의 과정이다.

상시미동은 항상 N-S, E-W, U-D의 3성분을 기록하였다. 근거리의 직접적인 진동원에 의한 잡음이 섞이지 않은 한 보통 수평 2성분의 스펙트럼은 유사한

경향을 보여 주나, 경우에 따라서 그 차가 심하게 나타나기도 한다. 본 연구에서는 두 수평성분이 유사한 경우에는 두 성분을 Lachet *et al.*(1996)의 방법에 따라 다음 식을 이용하여 하나의 성분으로 결합하여 사용하였다.

$$\begin{aligned}
 CH &= NS + iEW \\
 CHS &= CFT[CH] \\
 HS &= \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \cdot |CHS|
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

먼저 두 수평성분을 하나의 값으로 묶기 위하여 NS성분의 실수를 NS, EW성분의 복소수를 iEW로 하여 CH를 얻는다. 여기서 CH는 상시미동의 두 수평성분을 결합한 복소수 수평성분을 나타내고, CHS는 CH의 FFT를 통해 얻어지는 값이다. 이 CHS의 절대값에  $1/\sqrt{2}$ 을 곱하여 두 수평성분의 평균적인 스펙트럼 HS가 구해진다.

상시미동의 기록은 200sample/sec의 속도로 이루어졌다. 따라서 의미가 있는 Nyquist 주파수는 100Hz가 되는 셈이다. 그러나 고주파에는 지하구조와 관련이 없는 직접적인 인공적 잡음이 포함되므로 스펙트럼은 주로 10Hz 이내에서만 관찰하였다. 보통 시간창의 길이가 짧은 기록에 대한 스펙트럼은 그 변화가 심하고 불안정하기 때문에 본 연구에서는 Chael (1987)의 스펙트럼 중첩법을 사용하였다. 이 방법은 시간창을 중첩하여 얻은 스펙트럼을 평균함으로써 좀더 안정한 스펙트럼을 얻을 수 있는 이점이 있다. 본 연구에서는 하나의 시간창의 길이를 20초로 하여 50%씩 4번 중첩하는 방법을 사용하였다. 이와 같이 시간창을 중첩함으로써 무작위적인 잡음의 진폭은 줄어들고, 신호의 진폭은 강조된다.

위의 방법으로 얻어진 상시미동의 스펙트럼을 좀더 단순화하기 위하여 스펙트럼을 평활화하여 분석에 이용하였다. 평활화는 FFT를 거쳐 얻어진 주파수 영역자료를 주어진 대역폭에 따라 Parzen의 창(이회연 외, 1996)에 맞춰 이동평균을 취하는 방법이다. 평활화시 주파수 대역의 폭은 스펙트럼을 관찰하며, 경우에 따라 조절하였다.

### 측정결과 및 토론

#### 상시미동의 안정성

상시미동의 주거나 진폭을 조사하여 보면, 측정된

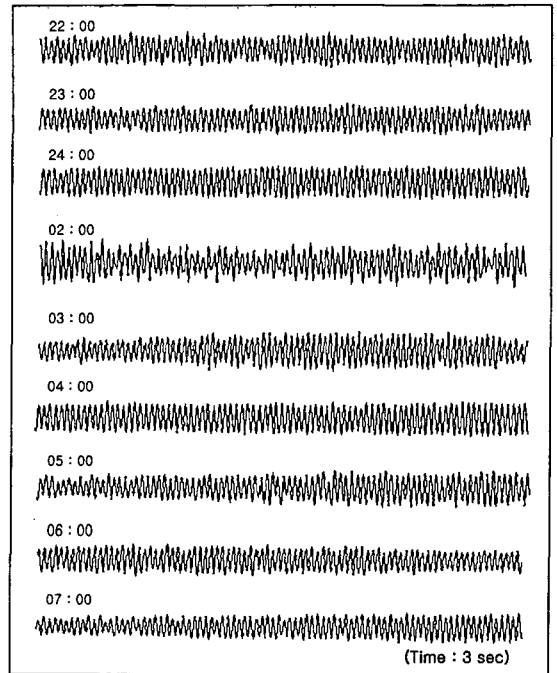


Fig. 4. Vertical components of microtremor records from 10 p.m. to 7 a.m. for eight hours at Kwangju site. The length of each record is 3 seconds.

장소나 조건이 같을 경우, 측정시기가 달라도 거의 같은 결과가 얻어지고 하루중 평균주기는 시각에 따라 별로 변화하지 않으나 야간의 최대진폭은 주간에 비하여 크게 감소한다(Kanai *et al.*, 1965). 본 연구에서는 하루동안의 시간적 변화에 따른 상시미동의 진폭 및 스펙트럼 변화를 관찰하기 위하여 매시간 1분 20초씩 24시간에 걸쳐 상시미동을 기록하였다. 그 자료를 분석한 결과 주간의 기록은 직접적인 인공적 잡음이 심하게 포함되어 있음을 알았다. 따라서 근거리의 인공적 잡음이 포함되지 않은 야간에 기록된 9시간의 시간적 변화만을 조사하였다. 기록된 상시미동의 예는 Fig. 4에 도시하였으며, 이 그림은 22시부터 다음날 07시까지의 상시미동 기록중 약 3초간의 기록만을 나타낸 것이다.

먼저 기록된 상시미동의 3성분에 대해서 각각 FFT 및 스펙트럼 중첩법을 이용하여 10Hz까지의 진폭 및 스펙트럼의 변화를 그림으로 도시하였다. 일반적으로 10Hz 이상의 고주파 부분은 근거리의 인공적인 잡음 성분의 영향이 많이 포함되어 있는 것으로 판단되어 분석에서 제외하였다. Fig. 5에 상시미동의 성분별 스펙트럼을 22시부터 다음날 07시까지 1시간 간격으로



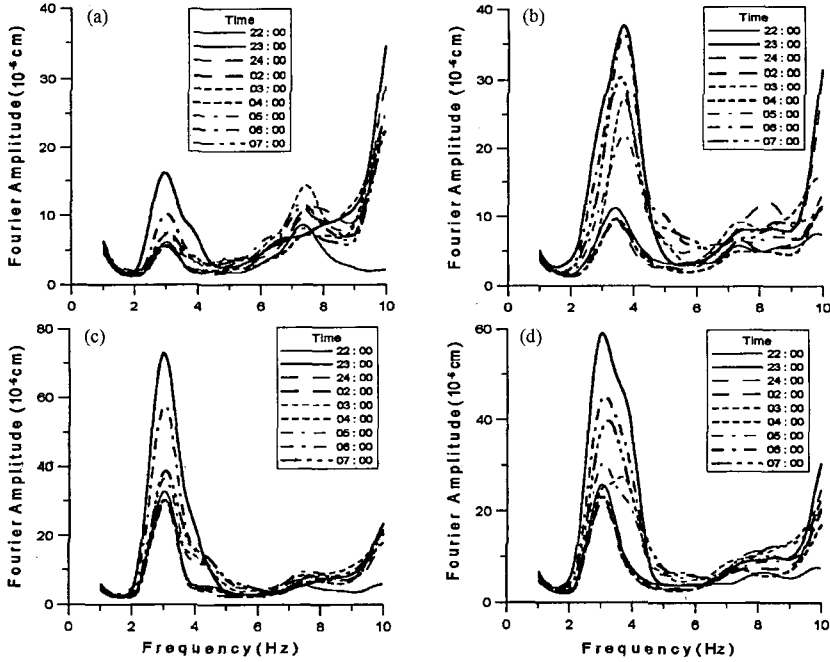


Fig. 5. The temporal variation of Fourier amplitude spectrum. (a) vertical component, (b) N-S component, (c) E-W component, and (d) complex horizontal component.

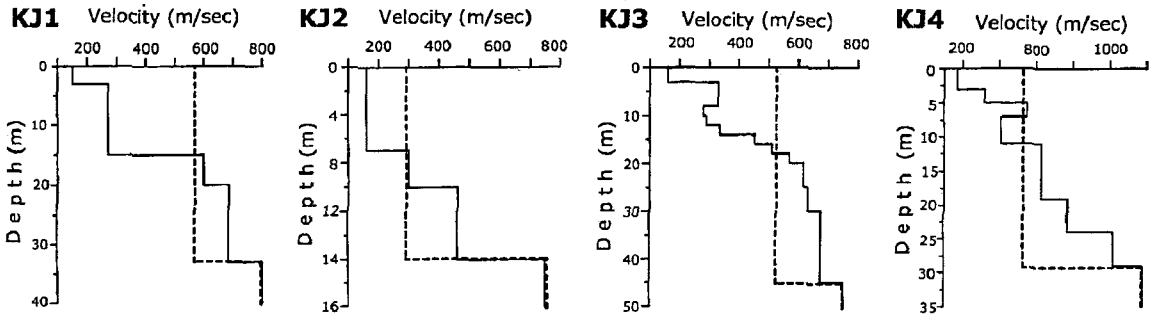


Fig. 6. Layered S-wave velocity structure obtained by Chung *et al.* (2000) for KJ1, KJ2, KJ3, and KJ4. Broken line denotes simplified velocity structure to be assumed as 2-layers.

도시하였다. 그림의 (a), (b), (c), (d)에는 각각 수직성분, N-S성분, E-W성분 및 식 (22)에 의하여 수평성분을 하나로 합성한 스펙트럼이 도시되어 있다. 모든 스펙트럼은 3Hz 부근에서 최대값을 보이고 시간적 변화에 따른 스펙트럼의 모양은 진폭에 있어서 약간의 차이를 보이나, 대체로 유사한 경향을 보여준다. 그러나 수평성분의 스펙트럼은 수직성분의 스펙트럼에 비하여 3Hz에서의 진폭이 상대적으로 크게 나타난다는 점을 지적할 수 있다. 또한 인간활동이 상대적으로 적은 심야의 스펙트럼 진폭이 다른 시간에 비

하여 작은 것을 보여 주고 있다. 결론적으로 근거리의 직접적인 진동원과 관련 없는 상시미동은 시간의 변화와 무관하게 안정적이라 할 수 있으며, 상시미동 자체가 지하구조의 정보를 포함하고 있음을 시사한다.

### 경주지역의 지반응답

상시미동에 의한 지반응답 평가의 가능성을 고찰하기 위하여 경북 경주시의 통일전, 명활산성, 준용하천, 황성공원의 총 4개 지점(Fig. 2 참조)에서 상시미동 측정을 시행하였다. 이 측정점들은 정충기 외

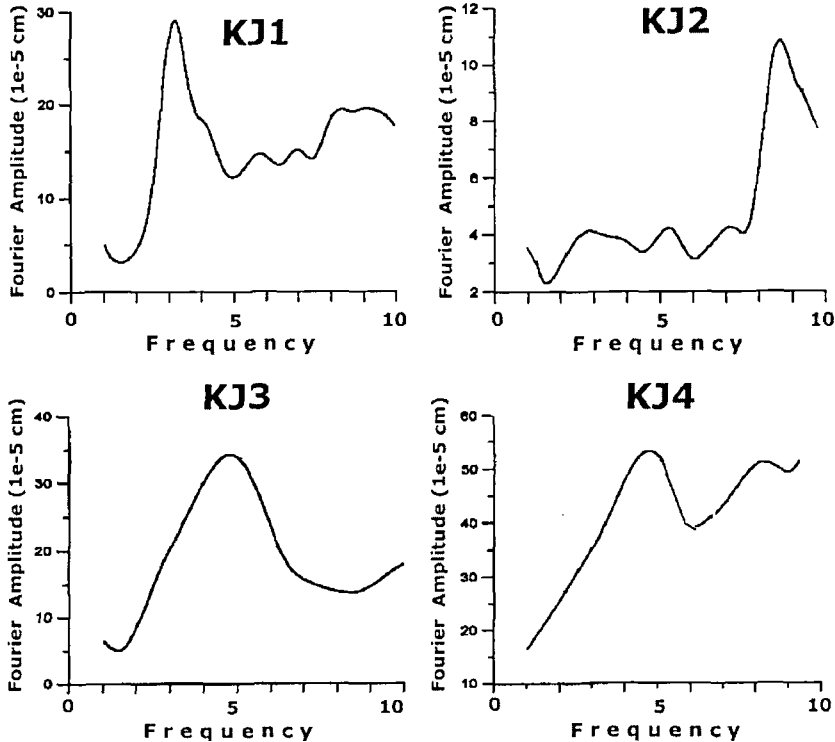


Fig. 7. Predominant frequencies for KJ1, KJ2, KJ3, and KJ4 in Kyungju.

(2000)가 시추 조사와 탄성과 탐사를 수행한 지역으로 시추공내에서 탄성과 속도를 측정하기 위해서 부분적으로 크로스홀 시험(cross-hole test), 다운홀 시험(down-hole test), SASW(Spectral Analysis of Surface Waves)시험을 실시하였다. 크로스홀 및 다운홀에 의한 시험은 10~20m의 얇은 깊이까지 수행되었고, SASW에 의한 속도구조는 대략 30~50m의 범위까지 주어져 있다. 그러나 그들이 얻은 S파속도는 방법에 따라 각각 다르며, 어떤 곳에서는 상당히 큰 차이를 보여주고 있다. 따라서 그들은 속도측정자료, N값 및 시추코아등을 참조하여, 층 내에서 속도가 일정한 수평다층구조로 근사하였다. 본 연구에서는 정충기 외(2000)가 제시한 수평다층의 속도구조를 채용하여 이론적인 응답을 계산하였다. Fig. 6에 통일전(KJ1), 명활산성(KJ2), 준용하천(KJ3), 황성공원(KJ4)의 속도구조를 제시한다.

Fig. 7은 통일전(KJ1), 명활산성(KJ2), 준용하천(KJ3), 황성공원(KJ4)의 4개 지점에서의 상시미동 측정에 의한 수평성분 스펙트럼을 도시하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 KJ1, KJ2, KJ3 및 KJ4에

서 탁월주파수는 각각 3.2Hz, 5.2Hz, 4.7Hz, 4.7Hz로 나타난다. 탁월주파수로부터 기반암까지의 깊이를 추정하기 위해서는 표층의 S파속도가 알려져야 한다. Fig. 6에 나타난 S파 속도구조는 수평다층구조로 되어 있다. 여기서 기반암을 어느 정도의 속도를 가진 층으로 보느냐 하는 문제가 있다. 이 연구에서는 기반암을 최하위 층으로 가정하였으며, 그 위의 층들을 하나의 층, 즉 표층으로 간주하였다. 이때 발생하는 문제는 표층의 평균속도에 대한 문제이다. 일반적으로 여러 층으로 이루어진 퇴적층에서의 평균적인 S파속도는 다음 식에 의해 계산할 수 있다(Bardet *et al.*, 2000).

$$V = \frac{1}{\sum h_i} \sum h_i v_i \quad (23)$$

여기서  $h_i$ 는 층  $i$ 의 두께이고,  $v_i$ 는 층  $i$ 에서의 전단파 속도를 나타내며,  $n$ 은 층의 총 수이다. 본 연구에서는 이 식을 이용하여 층 내의 평균속도를 산출하였다. 이 방법으로 2층구조로 단순화한 통일전(KJ1), 명활산성(KJ2), 준용하천(KJ3), 황성공원(KJ4)의 속도

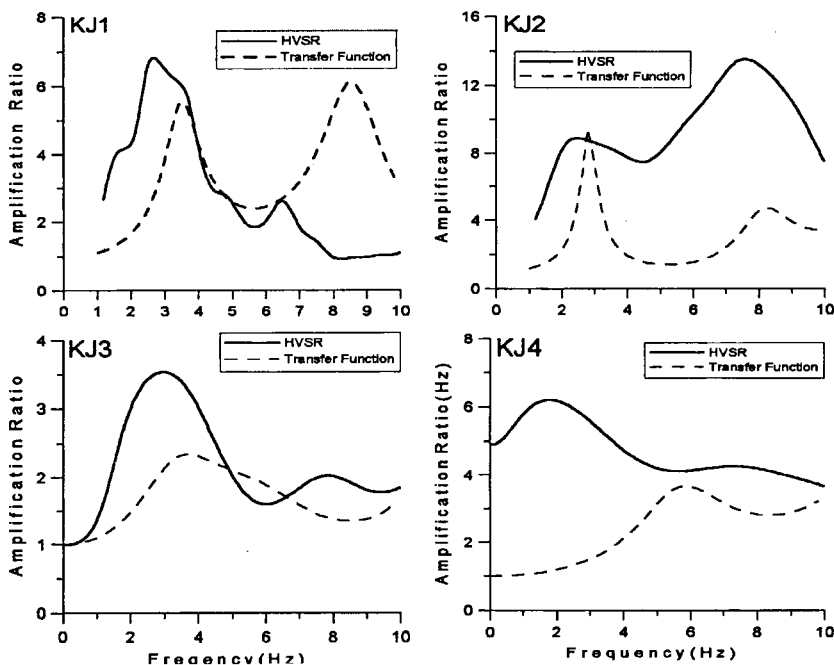
**Table 1.** Predominant frequency and thickness of sediment layer for KJ1, KJ2, KJ3, and KJ4 in Kyungju City.

Site	Predominant Frequency (Hz)	S-wave Velocity (m/sec)	Estimated Thickness (m)	Seismic Survey (m)
KJ1	3.4	473	34.7	33.0
KJ2	5.2	298	14.3	16.0
KJ3	4.7	517	27.9	45.0
KJ4	4.7	533	28.3	29.0

구조를 Fig. 6에 점선으로 나타내었다. 위에서 얻은 표층의 평균속도와 탁월주파수를 식 (5)에 대입하여 기반암까지의 깊이를 추정하여 시추결과와 비교하였다. 그 결과를 Table 1에 제시하였으며, 추정된 깊이는 측정점 KJ1과 KJ2 그리고 KJ4에서는 시추조사 결과와 거의 일치하고 KJ3에서는 잘 맞지 않는다. KJ3에서의 값이 잘 맞지 않는 이유는 1층에서 3층까지의 속도변화가 너무 커서, 하나의 층으로 근사하기에 곤란한 때문인지도 모른다.

Fig. 8은 각 측정점에서 수직 대 수평스펙트럼비 HVSR과 이론적으로 계산한 지반응답을 비교하여 도시한 것이다. 그림에 나타난 바와 같이, 통일전(KJ1),

명활산성(KJ2), 준용하천(KJ3)의 3지점에서는 측정치와 이론치를 비교하였을 때 스펙트럼의 모양은 잘 맞지 않으나, 탁월주파수는 대략 일치하는 결과를 보여 주고 있다. 그러나 황성공원(KJ4)에서는 HVSR과 이론치를 비교하였을 때 특별한 유사성이 발견되지 않았다. 이것은 이 측정장소가 도로변에 위치하고 있어 차량의 통과 등에 의한 인공적인 잡음의 혼입으로 인한 측정위치의 부적절한 선정때문으로 판단된다. 한편, HVSR에서 가정한  $Z_v(f)=1$ 은 이론적으로 입증된 바 없는 단순한 글자 그대로의 가정이며, 이러한 가정을 용인함으로써 현상론적인 결과(HVSR이 대체로 지반의 응답과 유사하다는 보고)를 설명할 수 있는 것이다. 따라서 HVSR기법은 경험론적인 기법이라 할 수 있으며, 본 논문에서는 이 기법의 타당성 여부보다는 활용가능성을 경주지역에 적용해 본 것이라 할 수 있다. 실제로는  $Z_v(f)=1$ 이라는 가정에 대해서는 많은 의문이 있으나, 수평성분 스펙트럼의 진폭이 일반적으로 수직성분의 수 - 수십배 크다는 관점에서 보면 수평성분이 수직성분에 비하여 크게 증폭됨은 사실로 받아들일 수 있다.

**Fig. 8.** Horizontal to vertical spectral ratio of microtremor records for KJ1, KJ2, KJ3, and KJ4 at Kyungju compared with transfer function calculated using computer program(EERA).

## 결 론

본 연구의 목적은 상시미동 해석에 의하여 지반의 구조와 지진동에 대한 응답의 추정 가능성을 평가하는 것이다. 이 목적을 달성하기 위하여, 먼저 이 분야의 연구현황과 방법론을 분석하여 현장의 측정자료에 적용하였다. 그 결과 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 상시미동의 수직성분에 대한 수평성분의 스펙트럼비(HVSR)는 지진동에 대한 지반의 응답과 비교할 때 탁월주파수는 거의 일치하나 스펙트럼의 형태는 많은 차이를 보여 준다. 따라서 이 기법은 질은 약간 떨어지나 간편하고 경제성이 있기 때문에, 지하구조를 얻기 곤란한 경우에 대체적인 수단으로 이용할 수도 있을 것이다.

- 상시미동의 안정성을 조사하기 위하여 1시간마다 80초씩 상시미동을 하루 동안 측정하여 그 스펙트럼을 분석하였다. 인간활동이 상대적으로 낮은 야간의 9시간 동안의 상시미동 스펙트럼은 진폭에 있어서 차는 있으나 그 형태는 대체로 유사하게 나타났다.

- 경주지역의 4지점에서 상시미동 스펙트럼으로부터 결정된 탁월주기를 이용하여 계산한 퇴적층의 두께는 실제 시추에 의해 결정된 두께와 유사한 결과를 나타내었다. 또한 HVSR과 지반응답 비교에서 3지점에서 스펙트럼의 최대값을 나타내는 주파수에서 유사성을 나타냈고 한 지점에서는 유사성이 발견되지 않았다. 이는 측정장소의 부적절한 선정으로 인한 측정오차로 사료된다.

## 감사의 글

이 연구는 한국과학재단 특정기초 연구 “한반도와 한반도 주변의 지진지체구조”(과제번호: 1999-2-133-002-5)의 지원에 의하여 수행되었다. 이 논문을 세심하게 검토하여 오류를 지적하여 주신 기상청 기상연구소 연구관 이덕기 박사님과 익명의 심사위원께 감사드린다.

## 참고문헌

김성균, 1991, 상시미동과 지하구조, 지질공학회지, 1, 1-12.  
이희연·채원규·남은성 역, 1996, 지진파의 스펙트럼 해석 입문, 도서출판 골드, 서울, 260 p.  
정충기·선창국·김동수·방은석·조성호, 2000, 경주지역의 지반공학적 지진 민감도 분석, 2000년도 지진공학

연구센터 연구과제발표회.  
Aki, K., 1988, Local site effects on strong ground motion, in Earthquake engineering and soil dynamics II - Recent advances in ground-motion evaluation, ASCE, New York, 103-155.  
Bardet, J.P., Ichii, K., and Lin, C.H., 2000, EERA, A computer program for equivalent-linear earthquake site response analyses of layered soil deposits, University of Southern California, 36 p.  
Castro, R.R., Mucciarelli, M., Pacor, F., and Petrongaro, C., 1997, S-Wave Site-Response Estimates Using Horizontal-to-Vertical Spectral Ratios, Bulletin of the Seismological Society of America, 87, 256-260.  
Chael, E.P., 1987, Spectral scaling of earthquake in the Miramichi region of New Brunswick, Bulletin of the Seismological Society of America, 77, 347-365.  
Cherry, S., 1974, Earthquake ground motions: Measurement and characteristics, in The engineering seismology and earthquake engineering edited by Solnes, J., Noordhoff-Leiden, Netherlands, 315 p.  
Field, E.H., Hough, S.E., and Jacob, K.H., 1990, Using microtremors to assess potential earthquake site response: A case study in flushing meadow, New York city, Bulletin of the Seismological Society of America, 80, 1456-1480.  
Field, E.H. and Jacob, K.H., 1993, The theoretical response of sedimentary layers to ambient seismic noise, Geophysical Research Letter, 20, 2925-2928.  
Horike, M., 1985, Inversion of phase velocity of long-frequency microtremors to the S-wave-velocity structure down to the basement in urbanized areas, Journal of Physics of the Earth, 33, 59-96.  
Kagami, H., Duke, C.M., Liang, G.C., and Ohta, Y., 1982, Observation of 1-to 5-second microtremors and their application to earthquake engineering. II. Evaluation of site effect upon seismic wave amplification due to extremely deep soil deposits, Bulletin of the Seismological Society of America, 72, 987-998.  
Kagami, H., Okada, S., Shiono, K. Oner, M., Dravinski, M., and Mal, K., 1986, Observation of 1-to 5-second microtremors and their application to earthquake engineering. Part III. A two dimensional study of site effects in the San Fernando valley, Bulletin of the Seismological Society of America, 76, 1801-1812.  
Kanai, K., Hirano, K., and Yoshizawa, S., 1966, Observation of strong earthquake motions in Matsushiro area, Part I, Bulletin of Earthquake Research Institute, Tokyo University, 44, 1269-1296.  
Kanai, K. and Tanaka, T., 1961, On microtremors VIII, Bulletin of Earthquake Research Institute, Tokyo University, 39, 97-114.  
Kanai, K., Tanaka, T., and Yoshizawa, S., 1965, On microtremors IX, Bulletin of Earthquake Research Insti-

- tute, Tokyo University, 43, 577-588.
- Lachet, C. and Bard, P.Y., 1994, Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique, *Journal of the Physics of the Earth*, 42, 377-397.
- Lachet, C., Hatzfeld, D., Bard, P.Y., Theodulidis, N., Papaioannou, C., and Savvaidis, A., 1996, Site Effects and Microzonation in the City of Thessaloniki (Greece) comparison of Different Approaches, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86, 1692-1703.
- Lermo, J. and Chavez-Garcia, F.J., 1993, Site effect evaluation using spectral ratios with only one station, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83, 1574-1594.
- Matsushima, T. and Okada, H., 1990, Determination of deep geological structure under urban area using long-period microtremors, *Butsuri-Tansa*, 43, 21-33 (in Japanese).
- Mucciarelli, M., 1998, Reliability and applicability of Nakamura's technique using microtremors: an experimental approach, *Journal of Earthquake Engineering*, 2, 625-638.
- Nakamura, Y., 1989, A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremors on the ground surface, *Quaternary Report of Railway Technology Research Institute*, 30, 25-33.
- Naruse, S., Izuhara, K., Takeuchi, F., Ohta, Y., Kagami, H., Goto, N., Shiono, K., Kudo, K., and Sakajiri, N., 1976, Observation of 1- to 5-sec microtremors and their applications to earthquake engineering, Part 2. Relation of the predominant periods and deeper underground conditions, *Zishin (Seismological Society of Japan)*, 29, 25-32 (in Japanese).
- Ohta, Y., Kagami, H., Goto, N., and Kudo, K., 1978, Observation of 1- to 5-sec microtremors and their applications to earthquake engineering, Part 1., *Zishin (Seismological Society of Japan)*, 31, 767-779 (in Japanese).
- Okamoto, S., 1973, Introduction to earthquake engineering, University of Tokyo Press, Tokyo, 571p.
- Oohara, S., 1974 Modern earthquake engineering, Morikita Press, Tokyo, 206p (in Japanese).
- Schnabel, P., Seed, H.B., and Lysmer, J., 1972, Modification of seismograph records for effects of local soil conditions, *Bulletin of Seismological Society of America*, 62, 1649-1664.
- Seo, K., Samano, T., Yamanaka, H., Hao, X., and Takeuchi, M., 1990, Comparison of ground vibration characteristics among several districts mainly with microtremors measurement, *Proceedings 8th Japan Earthquake Engineering Symposium*, 685-690.
- Shiono, K., Ohta, Y., and Kudo, K., 1979, Observation of 1- to 5-sec microtremors and their application to earthquake engineering, Part 9. Existence of Rayleigh wave components, *Zishin (Seismological Society of Japan)*, 32, 115-124 (in Japanese).
- Taga, N., Togashi, Y., and Miyazaki, T., 1983, On the microseisms around the Nobi Plain, *Trans Architecture Institute of Japan*, 324, 95-103.
- Takemura, M., Motosaka, M., and Yamanaka, H., 1995, Strong Motion Seismology in Japan, *Journal of the Physics of the Earth*, 43, 211-257.
- Yunchar, Z.A. and Luzon, F., 2000, On the Horizontal-to-vertical spectral ratio in sedimentary basins, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90, 1101-1106.
- Yamanaka, H., Dravinski, M., and Kagami, H., 1993, Fundamental characteristics of long period microtremors as observed in the Los Angeles metropolitan area, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83, 1595-1609.

---

2002년 2월 7일 원고 접수  
 2002년 3월 19일 수정원고 접수  
 2002년 3월 23일 원고 채택