

常時微動과 地下構造

Microtremor and Underground Structure

金性均(Kim, Sung Kyun)

全南大學校 地質學科

요 약

본고에서는 상시미동의 지질공학적 응용을 폭넓게 검토하는 한편 상시미동을 측정, 해석하여 상시미동의 탁월주기와 지하구조와의 관련성을 규명하였다. 상시미동의 응용예로서 확실히 구분이 가능한 지하구조를 가진 경상분지내 3지점에서 측정한 상시미동을 해석, 유추한 지하구조와 실제의 구조가 일치하는 사례를 소개하였다. 이와같은 상시미동의 장기간 측정 및 해석은 지하구조의 추정, 부지 고유의 응답 스펙트럼 작성, seismic microzonation 등에 경제적이고 효과적으로 이용할 수 있는 지질공학적 수단으로 사료된다.

Abstract: Applications of microtremor to geological engineering are widely reviewed and observed microtremors are processed to show evidences of close relationship between the predominant periods of microtremor and underground structure. The ground vibrates continuously at all times and the elastic vibration is called microtremor (0.5–20Hz) or microseisms (0.01–0.1Hz) according to their frequency range. The vibration is believed to have propagative nature like those of the dispersive surface waves or multireflected shear waves.

Microtremors were recorded at selected thress places of which subsoil structures are well distinguished in the Kyongsang Sedimentary Basin. It is found that the underground structures estimated from microtremor analysis coincide well with the known structures. The microtremor analysis of the long period range can be an inexpensive and effective tool in geological engineering for the evaluation of the underground structure, site-specific reponse spectrum, and seismic microzonations.

서 론

지반은 미세하게 연속적으로 탄성체적인 진동을 지속하고 있다. 이러한 지반진동의 변위 진폭은 대략 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ m 정도이며, 그 주파수는 0.01~수십Hertz의 범위에 있다. 주파수 0.01~0.1Hertz 범위의 진동은 脈動(Microseisms or pulsatory oscillations)으로, 대략 0.5~수십Hertz 범위의 진동은 常時微動 또는 微小地盤振動(microtremor)으로 정의된다(Guten-

berg, 1950 ; Cherry, 1974). 또한 Ohta *et al.* (1978)은 0.1~1Hertz 범위의 장주기 지반진동까지도 상시미동으로 간주하고 있다. 상시미동은 교통기관, 공장등의 인공적인 진동원 또는 바람, 해파와 같은 자연적인 진동원 등 불특정 다수의 원인에 의하여 발생된 불규칙적인 진동이 사방으로 전파되어 관측지점의 지반을 통하여 지표에서 관측되는 것으로 생각되어진다. 또한 상시미동과 맥동의 파동으로서의 성질은 표층내에 있어서의 S파의 중복반사 또

는 표면파와 같은 분산성의 파동으로서 설명되기도 한다(Kanai and Tanaka, 1961 ; Haubrich and McCamy, 1969 ; Rind and Donn, 1979 ; Masaki at al., 1982).

상시미동과 맥동은 지진계가 개발된후 지진 기록의 배경잡음에 대한 연구의 하나로서 관측, 분석되어 왔다. 상시미동이 지질공학적으로 주목된 것은, 겉보기에 불규칙적인 백색잡음과 같은 상시미동을 관측, 해석하여 보면 지하구조에 따라 다른 탁월주파수를 보이며 그 지역 지반고유의 진동특성을 반영하고 있는 것으로 나타났기 때문이다. 또한 상시미동과 강진기록의 주파수특성 사이에 밀접한 관련이 있음이 입증되었기 때문이다. 이러한 상시미동의 지질공학적 응용으로서는 진폭과 탁월주파수에 착안한 지하구조의 추정이나 지반중별의 판정, 내진설계를 위한 지반증폭특성의 예측 등이 있다.

본 연구의 목적은 상시미동의 지질공학적 응용 가능성을 평가하는 데에 있으며, 실제 측정과 해석을 통하여 지하구조와의 관련성을 입증하고자 한다. 김성균의(1987)는 상시미동을 관측하여 지하구조와의 관련성을 조사하였다. 본 연구는 상기 연구를 일부 수정, 보완한 것임을 밝혀둔다. 먼저 다음 절에서는 상시미동의 지질공학적 응용에 관한 현재까지의 연구결과를 정리하며, 제3절에서는 상시미동의 측정방법에 대하여 기술한다. 또한 제4절에서

는 상시미동의 측정을 통하여 얻어진 기록을 해석하여 지하구조와의 관련성을 검토한다.

상시미동의 지질공학적 이용

상시미동의 지질공학적 이용은 다음과 같은 분야에서 이루어지고 있다.

- 지하구조와의 관련성 및 지반중별의 판정
- 구조물의 동적특성 추정
- 강진동의 예측

그러면 먼저 상시미동과 지하구조와의 관련성에 대하여 검토하여 보기로 하자.

이 분야의 연구는 일본의 Kanai(1969)에 의하여 주로 발전되어 왔다. 지진이 발생하였을 때 재해와 관련된 주요진동은 지표면 부근을 전파하는 S파와 표면파라고 볼 수 있다. 일반적으로 탄성파속도는 깊이에 따라 증가하므로, 지진발생에 따른 S파는 지표면에 대략 수직으로 입사하게 되며 표층내에서 중폭반사의 현상이 일어나게 된다. 그 결과 어떤 특성의 주파수(또는 주기)를 가진 진동은 크게 증폭되어 지표면은 더욱 크게 진동한다. 이러한 주기를 지반의 탁월주기(Predominant Period) 또는 고유주기라 부른다. 매질의 물성 즉 밀도와 S파속도가 달라지는 수평 2층구조에서 연직으로 입사하는 S파에 대하여 적절한 경계조건 아래에서 증폭률이 최대가 되는 탁월주기 T를 구

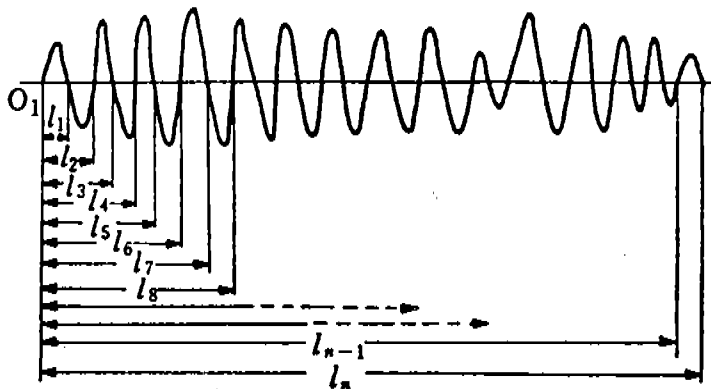


Fig 1. Schematic diagram to determine period-frequency curve.

하면 다음 식으로 나타난다(Kanai, 1969 ; Okamoto, 1973).

$$T=4H/V_s \tag{1}$$

단 H : 표층의 두께(m)

V_s : 표층의 S파속도(m/sec)

상시미동의 측정과 해석으로 지반의 탁월주기가 결정되어 있을 때 표층의 S파속도를 알게 되면 식(1)로부터 표층의 두께를 추정할 수 있으며, 이와 반대의 경우도 가능하다. 상시미동기록으로부터 탁월주기를 얻는 방법으로서

2가지가 사용되고 있다. 첫째 방법은 Kanai (1969)가 Zero-crossing method라고 명명한 것으로, 그림 1에 나타난 방법으로 먼저 각 파의 주기를 측정한다. 즉 O_1 점에서부터 각 파가 zero선을 끊는점까지의 시간 $l_1, l_2, \dots, l_{n-1}, l_n$ 을 측정하면, 각 파의 주기는 $T_i=2(l_{i+1}-l_i)$ 가 된다. 이와같이 측정된 일정 범위의 주기의 출현빈도를 조사하여, 가로축에 주기를 세로축에 출현빈도를 나타낸 주기-빈도곡선이 얻어지게 되며, 최대빈도를 가진 주기를 지반의 탁월주기로 간주하게 된다. 두번째의 방법은 수치화된 상시미동기록의 Fourier변환으로 얻어진 스펙트럼의 최대치를 나타내는 주기를 탁월주기로 간주하는 것이다.

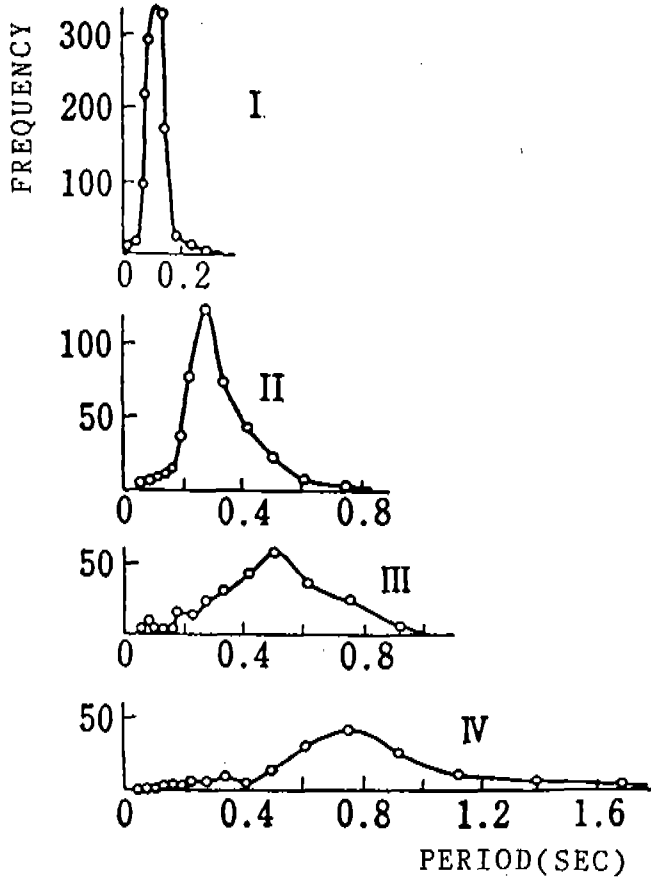


Fig 2. Typical predominant period-frequency curve for various kinds of the ground (Redrawn from Kanai (1969)).

Table 1. Classification of the ground by the predominant period.

Class	Ground	Predominant Period (sec)
I	basement	0.1
II	diluvium	0.2-0.3
III	alluvium	0.4-0.5
IV	reclaimed layer	0.6-0.8

Oosaki(1981)에 의하면, 위의 두 방법으로 결정된 탁월주기는 대략 일치한다.

Kanai(1969)는 일본 각지에서 측정된 주기 1초이하의 단주기 상시미동을 분석하여 주기-빈도곡선을 작성, 분류하였다. 그림 2에 그 대표적인 유형을 나타내었으며, 암반층(I), 홍적층(II), 충적층(III), 매립지 또는 성토층(IV)에 따라 최대빈도를 나타내는 탁월주기가 길어지는 경향이 있다. 이러한 결과를 참조하여 Kanai는 구조물의 지반을 제I종~제IV종으로 분류하여, 상시미동의 측정, 해석으로부터 지반종별을 판정하여 내진설계에 이용하도록 제안하였다(표1 참조). 상시미동의 측정, 해석에 의한 microzoning의 예로는 Tanaka and Migita(1982)가 있다.

한편 Kagami *et al.*(1982, 1986)은 주기 1~5초 범위의 장주기 상시미동을 측정하여 지반의 고유주기를 결정하였다. 그 결과 1초 이상의 고유주기는 퇴적층의 깊이와 잘 대응되며, 지표층의 증폭효과는 기존의 지질학적 및 강진 기록자료와 질적으로 잘 일치한다고 밝혔다.

그러나 상시미동의 해석으로 얻어진 지반의 탁월주기로부터 지하구조를 정량적으로 결정하는 데에는 여러가지 주의가 필요하다. 왜냐하면 지반은 단순한 수평 2층구조로 근사하기 곤란한 경우가 많으며, 진동의 해석으로 얻어진 결과가 반드시 지반의 탁월주기를 반영하지 않는 경우도 있기 때문이다. 따라서 상시미동으로 얻어진 결과는 다른 방법으로 결정된 지하구조와 상호연관시켜 사용되어야 할 것이다.

이상에서는 상시미동에 의한 지하구조의 추정과 지반종별의 판정에 대하여 검토하였다. 다음으로 구조물의 동적특성의 추정에 대하여 고찰하여 보기로 하자. 구조물의 지진재해 추

정을 위한 동적특성으로서 중요한 변수는 구조물의 고유진동수와 감쇠계수를 들 수 있다. 이러한 변수의 측정은 起振器에 의한 강제 진동시험이 통상 사용되어 왔다. 그러나 상시미동의 측정에 의한 방법이 이에 비하여 훨씬 간편하며 정확도가 높다는 것이 입증되었다(Matsuoka *et al.*, 1987).

구조물 부근의 지반 및 구조물상에서 관측된 상시미동의 시간파형을 각각 $x(t)$, $y(t)$ 라 하며, 이들을 일반의 선형계에 있어서의 입력과 출력이라 하자. 이러한 계의 impulse 응답함수 $h(t)$ 를 이용하여 다음의 식이 성립된다(Matsuoka *et al.*, 1987).

$$y(t) = \int_0^t h(\tau)x(t-\tau)d\tau \quad (2)$$

입력 $x(t)$ 를 $t < 0$ 의 영역까지 생각하면 식 (2)는

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)x(t-\tau)d\tau \quad (3)$$

으로 고쳐 쓸 수 있다. 식 (3)의 Fourier변환을 취하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$Y(\omega) = H(\omega)X(\omega) \quad (4)$$

여기서 $X(\omega)$, $Y(\omega)$ 는 각각 $x(t)$, $y(t)$ 의 Fourier변환에 의하여 표현되는 복소Fourier 스펙트럼이다.

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i\omega t} dt$$

$$Y(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t)e^{-i\omega t} dt$$

이며, $H(\omega)$ 는 $h(t)$ 의 Fourier변환

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)e^{-i\omega t} dt$$

로 표현되며, 계의 전달함수로서 단위진폭의 정현파입력에 의한 계의 주파수응답특성을 나타낸다. 또한 $H(\omega)$ 는 식 (4)로부터

$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)X^*(\omega)}{X(\omega)X^*(\omega)} = \frac{S_{xy}(\omega)}{S_{xx}(\omega)} \quad (5)$$

가 되며, 입력의 power spectrum $S_{xx}(\omega)$ 및 입출력간의 cross spectrum $S_{xy}(\omega)$ 에 의하여 표현된다. 또한 식 (4)로부터

$$H(\omega)^2 = H(\omega)H^*(\omega) = \frac{Y(\omega)Y^*(\omega)}{X(\omega)X^*(\omega)} = \frac{S_{yy}(\omega)}{S_{xx}(\omega)} \quad (6)$$

이 성립되며 $S_{xx}(\omega)$ 및 출력의 power spectrum $S_{yy}(\omega)$ 에 의하여 $H(\omega)$ 의 진폭특성을 나타낼 수 있다.

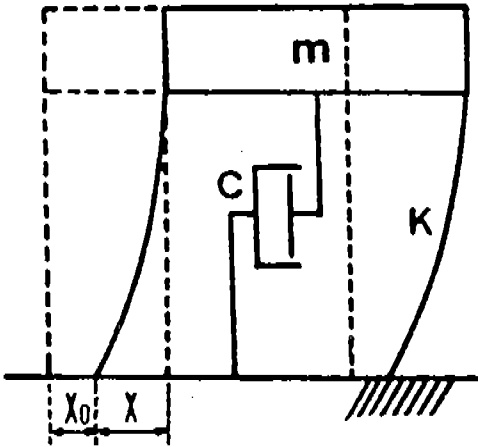


Fig 3. Simple viscous damping model of the structure.

한편 구조물의 응답특성을 가장 단순한 모델로 표현하면 그림 3과 같은 단일자유도계 (single degree of freedom)의 점성감쇠모델이 된다. 그림 3에서 질량 m 인 구조물은 탄성계수 k 인 용수철과 점성감쇠계수 c 인 dashpot에 의해 지지되고 있으며, 지반의 변위 x_0 에 대하여 구조물은 x 만큼 변위된 것을 나타내고 있다. 이러한 모델에 지반으로부터의 입력가속도 \ddot{x}_0

가 작용할 때의 운동방정식은

$$\ddot{x} + 2h\omega\dot{x} + \omega_0^2x = -\ddot{x}_0 \quad (7)$$

$$\text{단 } h = c/2\sqrt{mk} \quad (\text{감쇠계수})$$

$$\omega_0 = \sqrt{k/m} \quad (\text{고유 원진동수})$$

가 된다. $x_0 = Ae^{-i\omega t}$ 인 경우 (7)의 해를 단위진폭을 가진 지반가속도에 대한 구조물의 가속도응답 $H_a(\omega)$ 를 구하면

$$H_a(\omega) = \sqrt{\frac{1 + 4h^2(\omega/\omega_0)^2}{\{1 - (\omega/\omega_0)^2\}^2 + 4h^2(\omega/\omega_0)^2}} e^{-i\phi} \quad (8)$$

$$\text{단 } \phi = \tan^{-1} \left[\frac{2h(\omega/\omega_0)^2}{1 - (1 - 4h^2)(\omega/\omega_0)^2} \right]$$

이 되며, 이것은 (5)식의 전달함수 $H(\omega)$ 에 대응된다. 따라서 상시미동기록으로부터 $H(\omega)$ 가 구해지면 식 (8)의 모델에 맞는 구조물의 동적특성 h, ω_0 가 구해진다.

끝으로 상시미동을 이용한 특정지역에서의 강진기록의 예측에 관한 연구결과를 검토하여 보자. 특히 20세기 후반에 들어 원자력발전소를 비롯한 대형인공구조물의 설계방식이 정적인 방식에서 동적설계방식으로 전환됨에 따라, 지진파와 같이 응력수준이 높은 파동이 도달하였을 때 지반의 주파수별 응답을 나타내는 응답스펙트럼(response spectrum)의 작성이 주요과제로 등장하였다. 특정부지에서 부지고유의 응답스펙트럼을 얻기 위해서는 그 지역에서 기록된 다수의 강진기록을 필요로 하게 된다. 그러나 실제로 이러한 기록을 얻기 위해서는 시간적, 경제적으로 많은 투자를 필요로 한다. 이러한 점에서 상시미동의 기록과 지진파의 기록을 주파수영역에서 비교하는 연구가 시작되었다.

Kanai and Tanaka(1961)는 최초로 특정지역에서 기록된 상시미동과 지진파의 주파수

특성사이에 관련성이 있음을 시사하였다. Katz and Bellon(1978)은 Nevada의 수개소에서 측정된 상시미동의 주파수특성을, 핵실험에 의한 강진기록 및 지하구조로부터 이론적으로 계산한 주파수특성과 비교하였다. 그 결과 스펙트럼의 최대진폭을 나타내는 주파수가 서로 잘 일치함을 나타내었다. 그러나 그들은 주기 1초 이하의 단주기 상시미동을 대상으로 하였기 때문에, 그 결과는 상대적으로 얕은 지반의 응답에 국한되었다. Ohta *et al.*(1978)은 주기 1~5초의 상시미동을 측정하여, 1968년에 발생한 Tokachi-oki Earthquake(M=7.9)의 강진기록과 주파수특성을 비교하여, 양자가 서로 잘 일치함을 지적하였다.

한편 Udwardia and Trifunac(1973)은 El Centro지역에서 일어난 강진기록과 그 지역에서 측정된 상시미동을 주파수영역에서 상호비교한 결과, 그들 사이에 별로 상관이 없다고 밝혔다. 위의 서로 상반되는 결과는 단지 지역적인 차이인지 또는 다른 요인에 의한 것인지 불분명하다. 즉 상시미동의 발생, 전파 및 응력수준이 지진발생에 의한 진동과는 크게 다르기 때문에, 상시미동의 결과를 선형적으로 지진동으로 외삽시킬 수 없을런지도 모른다.

Masaki and Lermo(1990)는 상시미동을 이용하여 특정지역의 지진동 응답스펙트럼을 추정하는 흥미있는 연구결과를 발표하였다. 그들이 사용한 식은 다음과 같다.

$$S_{i,s} = (S_{i,m}/S_{o,m}) \times S_{o,s} \quad (9)$$

단 $S_{i,s}$: 임의의 부지의 지진동 스펙트럼

$S_{i,m}$: 임의의 부지의 상시미동 스펙트럼

$S_{o,s}$: 기준점의 지진동 스펙트럼

$S_{o,m}$: 기준점의 상시미동 스펙트럼

윗식을 이용하면 부지와 유사한 지역(기준점)의 지진동 스펙트럼이 존재할 경우, 기준점과 대상부지에서 상시미동의 스펙트럼을 얻음으로서 대상부지에 대한 지진동 스펙트럼의 추정이 가능하다. Masaki and Lermo(1990)는 1988년 2월8일의 Mexico지진(Ms=5.8)시에

Mexico City에서 얻어진 지진동기록의 스펙트럼과 식 (9)로 부터 계산된 스펙트럼을 4개소에서 비교하였다. 그 결과는 그림 4에 나타난 바와같이, 스펙트럼의 형상과 탁월주기는 실측치와 비교적 잘 일치한다. 그러나 스펙트럼의 진폭은 수배~10배정도 과잉으로 추정되었다. 가속도 응답스펙트럼을 작성할때 중요한 것은 스펙트럼의 형태이며, 통상 수십 Hertz이상의 고주파 부분에서는 최대가속도치에 접근하게 된다. 따라서 위의 연구결과는 스펙트럼의 형태만을 결정하고자 할때는 적용이 가능하다.

위에서 검토한 바와같이 상시미동의 지질공학적 응용은 다른 지구물리학적 방법에 비하여 단순하고 경제적이란 이점이 있다. 예를 들면, 탄성파에 의하여 지하구조를 결정하고자 할 경우, 인공적 또는 자연적인 파원을 이용하여야 하나, 상시미동은 특정의 파원없이 항상 측정이 가능하다. 또한 부지고유의 지진동 스펙트럼을 얻기 위해서는 대상지역에 강진계가 설치되어, 적당한 진앙거리를 가진 일정규모 이상의 지진이 상당수 기록되어야 하는 제약을 갖는다. 그러나 상시미동의 경우는 이러한 제약없이 측정이 가능하다는 점이 큰 이점이라고 볼 수 있다.

상시미동의 측정방법

상시미동의 측정은 통상 지진관측용 지진계로도 가능하다. 즉 환진기로서는 고유주기 1초 정도, 감도 1~5V/(cm/sec)의 속도형 전자식 지진계가 이용되며, 감도특성은 1초이하의 주기에서 동일하여야 한다. 또한 장주기 상시미동의 경우는 고유주기가 5~10초인 것이 사용된다. 상시미동의 진폭은 통상 수 μm 이하로 아주 작기 때문에 기록매체에 기록하기 전에 적당한 크기로 증폭할 필요가 있다. 기록계의 증폭도는 보통 80~100dB의 것이 사용되고 있다. 또한 기록계는 진동속도를 변위 또는 가속도로 환산하기 위한 적분 또는 미분의 연산 기능을 갖추고 있어야 한다. 기록방식은 펜레코더를 써서 직접적으로 파형을 기록하거나

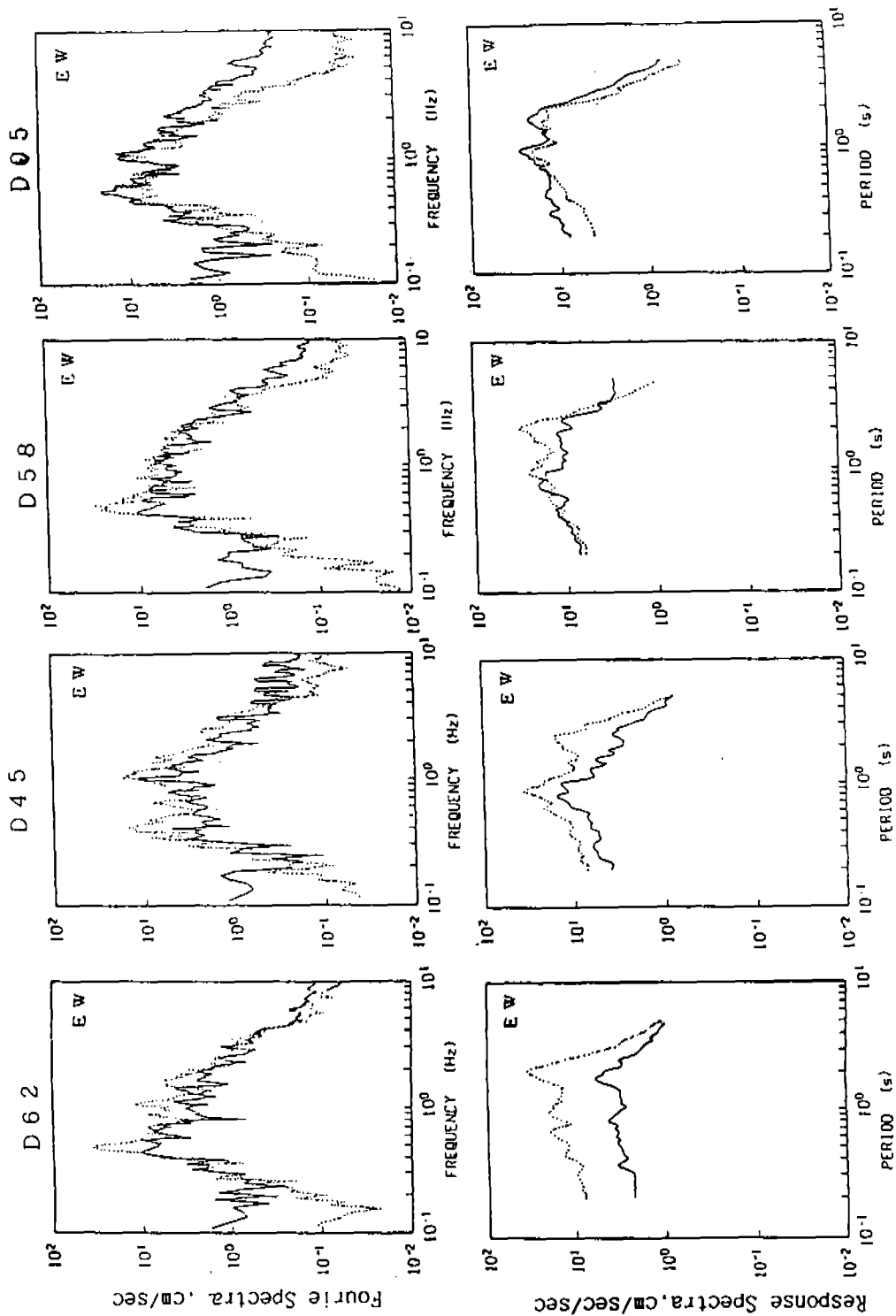


Fig. 4. Comparison of Fourier and response spectra (solid line) determined from recorded acceleration time history to those (broken line) estimated from microtremor. Redrawn from Masaki and Lermo (1990).

자기테이프에 analogue 또는 digital data로서 기록된다. 기록의 해석을 위해서 analogue data는 A/D변환기를 써서 digital data로 변환시켜야 된다. A/D변환속도는 단주기 상시미동의 경우 100 sample/sec 이상, 장주기 상시미동의 경우 20 sample/sec 이상이 요구된다.

상시미동의 주기나 진폭을 조사하여 보면, 동일장소와 동일조건아래에서 측정된 경우, 측정시기가 달라도 거의 같은 결과가 얻어진다. 하루중 평균주기는 시각에 따라 별로 변화하지 않으나 야간의 최대진폭은 주간에 비하여 크게 감소한다(Kanai, 1969). 상시미동은 통상 1회당 10분이상 연속측정하게 되며, 수회 반복측정한 결과에 재현성이 입증될때 그 신빙도가 높다. 또한 직접적인 인공적 잡음을 피하는 것이 중요하며, 파형을 조사하여 특수한 진동기록부분을 해석에서 제외시켜야 한다.

지진계(Model : VS-1200)이다. 단주기 지진계는 고유주기가 1초로서 속도응답은 2~100 Hz까지가 거의 평탄하다. 또한 장주기 지진계의 속도응답은 1/12~50Hz까지가 거의 일정하다. 기록계로서는 Teledyne Geotech 사의 digital 기록계(Model : MCR-600)를 사용하였다.

관측은 인공적인 진동원으로부터 직접 전달되는 잡음을 피하기 위하여 비교적 조용한 시간대를 선택하였다. 실제의 측정에서는 지동속도의 수직성분을 1초당 100 sample의 비율로 약 5분간씩 기록하였다. 또한 기록계의 filter range는 단주기 지진계의 경우 5~25Hz로, 장주기 지진계의 경우 0.2~25Hz로 고정하였다.

위에 기술한 방법으로 수치화되어 기록계의 magnetic tape에 수록된 자료를 개인용 컴퓨터에 입력하여, 다음 순서로 분석하였다.

상시미동의 측정 및 해석 실례 - 지하구조와의 관련성

본 연구에서 상시미동의 측정에 사용한 환진기는 Teledyne Geotech사의 단주기 지진계(Model : S-500)와 Katsujima 사의 장주기

- 16진수의 10진수로의 변환
- 파형의 도형화
- FFT를 이용한 power spectrum 계산
- Parzen's Lag Window(Oosaki, 1981)를 이용한 spectrum의 평활화
- 지반의 탁월주기 결정→지하구조의 추정

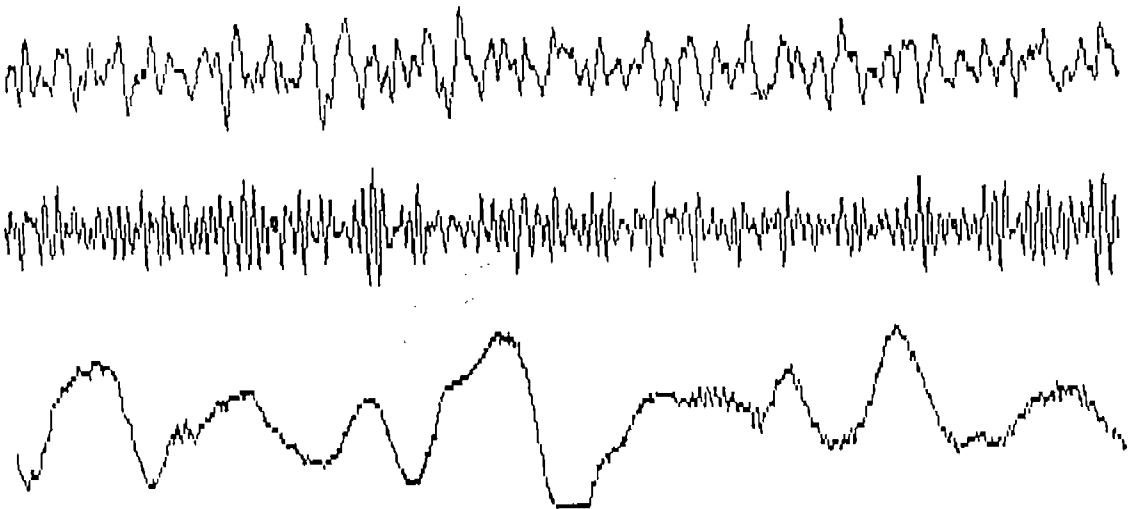


Fig 5. Microtremor records observed at Pohang Well Site "A", Kumi Industrial Complex, and Pohang microearthquake observatory (from the upper). The length of each record is 10 seconds.

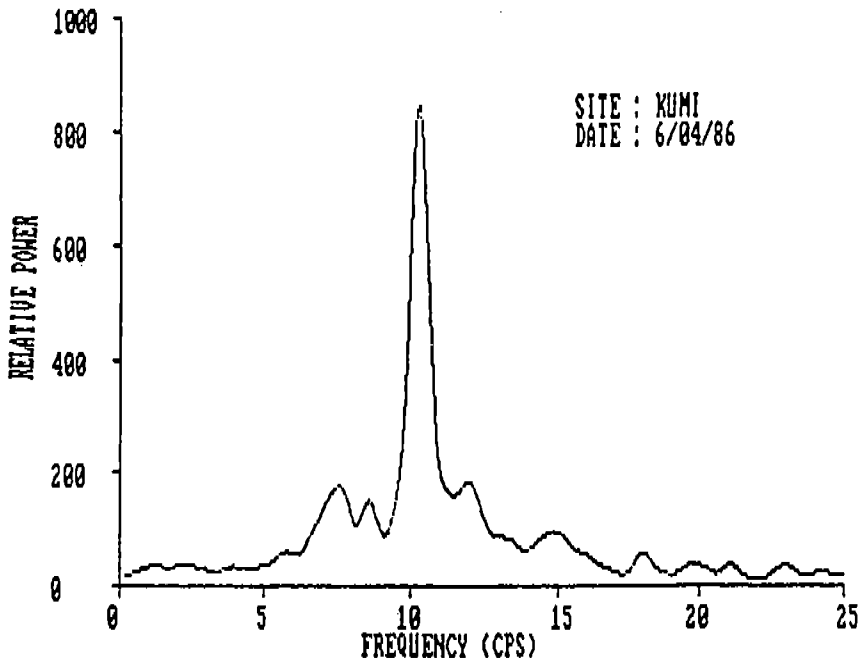


Fig 6. Relative power spectrum at Kumi Industrial Complex
(smoothed, window length: 0.88 cps).

그림 5에 구미공단의 한 지점과 포항지역의 두 지점에서 측정된 상시미동의 파형을 제시한다. 이들중 구미공단에서는 단주기지진계를, 포항지역에서는 장주기지진계를 환진기로 사용하였다. 특기 할만한 사실은 각각의 기록에서 주파수 특성이 큰 차이를 보여 준다는 점이며, 이하에서 지하구조와의 관련성을 검토하기로 한다.

구미공단의 측정점은 공장부지로 사용하기 위하여 경사가 낮은 야산지역을 절토하여 정지한 곳으로, 지하 수m에 암반이 존재한다. 이 지점의 상시미동기록에 대한 power spectrum을 그림 6에 도시한다. 여기서 지반의 탁월주기는 약 0.1초정도로 판단되며, 이것은 제2층이 아주 얇은 곳에 존재하고 있음을 나타낸다.

그림 5의 첫번째 기록은 포항지역의 석유탐 사용 시추공 A에서 얻은 것이다. 이곳의 주상도에 의하면 표층은 제3기 충적층이며 약 40~50m 하부에 이암층이 존재한다(韓宗煥外, 1987). 이 지점에서 얻어진 상시미동기록의 po-

wer spectrum을 그림 7에 나타내었다. 이 spectrum으로 부터 지반의 탁월주기는 약 0.35초로 판단된다. 지반의 탁월주기와 지하구조와의 이론적인 관계를 나타낸 식 (1)에 탁월주기 0.35초, 표층의 두께 40~50m 대입하면 표층의 S파속도는 450~570m/sec가 얻어지며, 이 값은 충적층에서 기대되는 S파속도의 범위에 들어간다.

그림 5의 아랫쪽에 나타낸 파형은 한국동력자원연구소 포항 미소지진 관측점부근에서 측정된 것이며, 측정지점은 경상계와 제3기 퇴적층의 경계에 위치한 곳으로 표층은 고결도가 낮은 천북역암층으로 되어 있다. 이 기록에 대한 power spectrum을 그림 8에 나타내었으며, 표층지반의 탁월주기는 약 1.5초인 것으로 판단된다. 식 (1)에서 지반의 탁월주기 1.5초, 천북역암층의 S파평균속도를 800~1000m로 가정할때 역암층의 두께는 대략 300~380m가 된다. 이 두께는 다른 연구결과(韓宗煥外, 1987)로 부터 추정되는 값과 잘 일치한다.

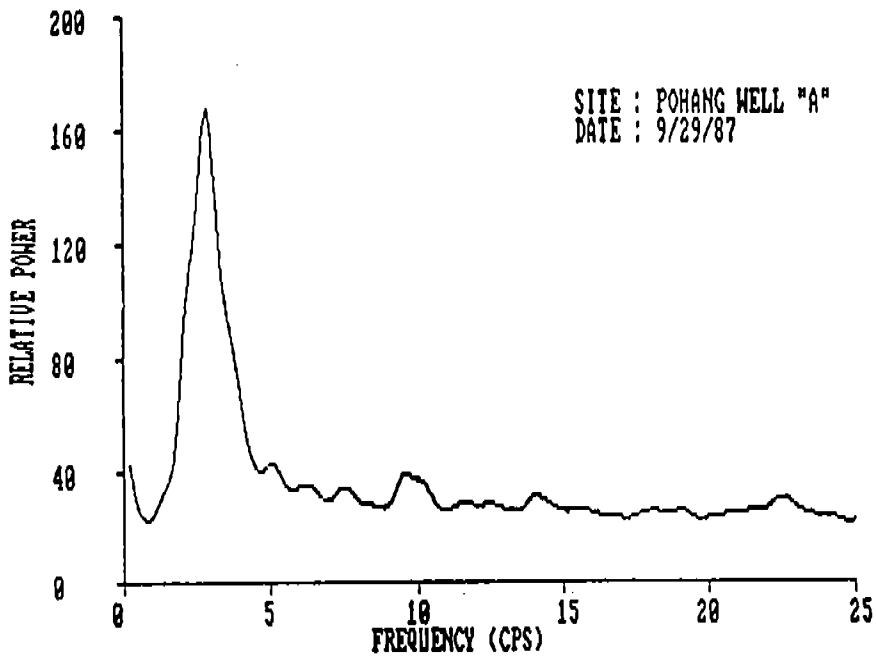


Fig 7. Relative power spectrum at Pohang Well "A" (smoothed, window length: 0.88 cps).

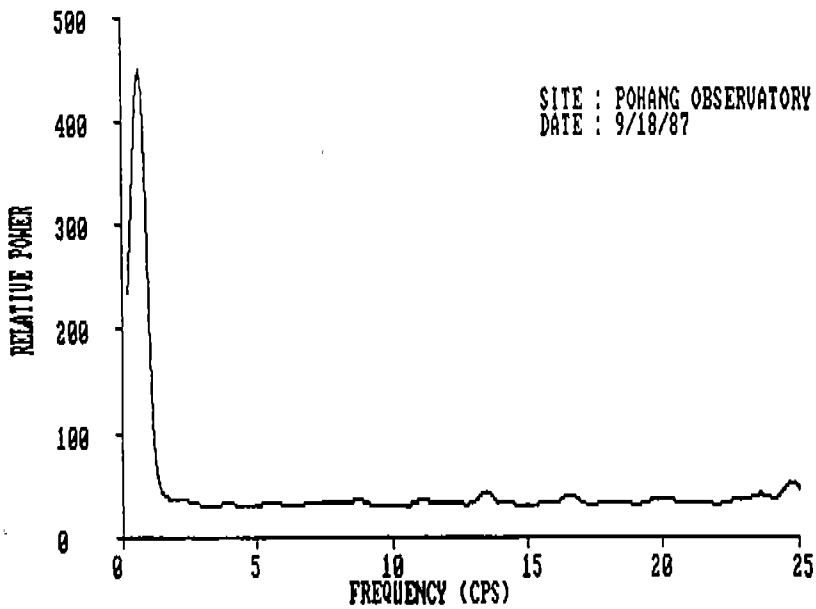


Fig 8. Relative power spectrum at Pohang microearthquake observatory (smoothed, window length: 0.88 cps).

위에 제시한 바와같이, 상시미동의 해석으로 얻어진 지하구조가 다른 방법으로 알려진 구조와 서로 잘 일치함을 알 수 있다. 앞에서도 지적한 바와 같이 상시미동의 측정 및 해석은 그 방법이 간편하고 경제적이란 이점이 있으나, 정량화된 지하구조를 얻는 데에는 아직도 많은 문제점을 남기고 있다.

결론 및 전망

본 연구에서는 상시미동의 지질공학적 응용을 폭 넓게 검토하였으며, 상시미동을 측정, 해석하여 지하구조와의 관련성을 조사하였다. 지반은 연속적으로 미세하게 진동하고 있으며 이러한 지표지반의 탄성체적인 진동은 맥동(0.01~0.1Hz)과 상시미동(0.5~20Hz)으로 불린다. 상시미동은 교통기관, 바람, 해파와 같은 불특정의 진동원에 의해 발생된 전파성의 표면파 또는 중폭반사된 전파파의 성질을 가진 파동

으로서, 주파수 특성은 지하구조와 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다.

경상분지내의 지하구조가 크게 다른 선택된 3지점에서 측정된 상시미동을 해석하여 얻은 지하구조는 실제의 구조와 잘 일치함이 밝혀졌다. 경상분지와 포항분지의 경계부근에 위치한 천북역암층위에서 관측한 상시미동을 해석하여 얻은 지반의 탁월주기는 약 1.5초이며, 이 역암층의 S파 속도를 800~1000m/sec로 가정하여, 지하구조와 지반의 탁월주기의 이론적인 관계로부터 계산한 역암층의 두께는 대략 300~380m가 된다.

결론적으로 장주기 상시미동의 측정 및 해석은 다른 지구물리학적 방법에 비하여 간편하고 경제적이란 이점이 있어, 지질공학적 측면에서의 응용이 크게 기대된다. 특히 지하구조의 추정, 부지고유의 응답스펙트럼 작성, seismic microzonation 등에 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

金性均, 曹圭張, 鄭富興(1987) 微小地盤振動의 地震工學的 應用(1), 국토이용지질조사연구, 한국동력자원연구소, KR-87-29, 157-174.
 韓宗煥, 郭英勳, 孫晉潭, 孫炳國(1987) 韓國東南部 地域 第三紀 堆積盆地的 地體構造發達 및 堆積環境 研究, 한국동력자원연구소, KR-86-2-(B)-4.
 Cherry, S.(1974) Earthquake ground motions: Measurement and characteristics, In the engineering seismology and earthquake engineering ed. by Solnes, Noordhoff-leiden.
 Gutenberg, B.(1958) Microseisms, Advances in geophysics (V) ed. by Lendsberg.
 Haubrich, R. and K. McCamy(1969) Microseisms: Coastal and pelagic sources, Rev. Geophys. Space Phys., 7, 539-571.
 Ikegami, R. and F. Kishinouye(1951) An observational study on the propagation of microseismic waves, Bull. Tokyo Gakugei Univ., 13, 197-209 (in Japanese).
 Kagami, H., C. M. Duke, G. C. Liang, and Y.

Ohta(1982) Observation of 1 to 5 second microtremors and their application to earthquake engineering. Part II, Bull. Seis. Soc. Am., 72, 987-998.
 Kagami, H., S. Okada, K. Shiono, M. Oner, M. Dravinski, and A. K. Mal(1986) Observation of 1 to 5 second microtremor and their application to earthquake engineering. Part III, Bull. Seis. Soc. A., 76, 1801-1812.
 Kanai, K.(1969) Earthquake engineering, Kyorit-sussupan, pp176 (in Japanese).
 Kanai, K. and T. Tanaka(1961) On microtremors, VIII, Bull. Earthq. Res. Inst., Tokyo Univ., 39, 97-115
 Katz, L. J. and R. S. Bellon(1978) Microtremor site analysis study at Betty, Nevada, Bull. Seis. Soc. Am., 68, 757-765.
 Masaki, K. and J. Lermo(1990) Estimation of seismic ground motion by using microtremor-A study in Mexico City, Programme and abstracts of the Seismological Society of Japan, 1990, No. 1, pl68.
 Masaki, K., H. Taniguchi, and K. Iida (1982) Pre-

- dominant period and mean amplitude of long period microtremor measured in the Nobi Plain and their relations to ground structure, *Butsuri-Tansa*, 35, 1-12 (in Japanese).
- Matsuoka, T., H. Shiraishi, and T. Maiguma(1987) Determination of dynamic characteristics of low-storied houses by means of transfer function of microtremor measurements, *Butsuri-Tansa*, 40, 117-128 (in Japanese).
- Ohta, Y., H. Kagami, N. Goto, and K. Kudo(1978) Observation of 1 to 5 second microtremors and their application to earthquake engineering. Part I, *Bull. Seis. Soc. Am.*, 68, 767-779.
- Okamoto, S.(1973) Introduction to earthquake engineering, Univ. of Tokyo Press, PP571.
- Omote, S., N. Nakajima, and N. Kobayashi(1972) Some considerations for the relation between microtremors and underground structure, *Butsuri-Tanko*, 25, 234-242 (in Japanese).
- Oosaki, Y.(1981) Introduction to spectral analysis of ground motion, Hiroshima-Syuppankai, pp 260 (in Japanese).
- Rind, D. and W. L. Donn(1979) Microseisms at Palisades, *Journ. Geophys. Res.*, 84, 5632-5642.
- Tanaka, A. and K. Migita(1982) Research on seismic microzoning of Kumamoto City by microtremors observation-Kind of ground and distribution of predominant period, *Butsuri-Tanko*, 35, 42-46 (in Japanese).
- Udwadia, F. E. and M. D. Trifunac(1973) Comparison of earthquake and microtremor ground motions in El Centro, California, *Bull. Seis. Soc. Am.*, 63, 1277-1253.