

## 국내 지진관측소 부지의 지반증폭특성 연구

김준경<sup>1)\*</sup>

### Analysis of Site Amplification Characteristics of Several Seismic Stations Distributed in the Southern Korean Peninsula

Jun Kyoung Kim

**Abstract** The horizontal to vertical (H/V) ratio technique in spectral domain is a common useful technique to estimate empirical site transfer function. The technique, originally proposed by Nakamura, is proposed to analyse the surface waves in the microtremor records. The purpose of this paper is to estimate spectral ratio using observed data at the seismic stations distributed within Southern Korean Peninsula from the Fukuoka earthquake including 11 aftershocks. The results show that most of the stations have fairly good amplification characteristics in low frequency band. However, some of the seismic stations show one (resonant frequency specific to the site) or several local peaks of amplification factors with narrow high frequency band. Even though the site amplification characteristics are important information, we should be careful to analyse the observed ground motions from the seismic stations which have several very high amplification peaks for the deconvolution of seismic source and attenuation parameters.

**Key words** Empirical site transfer function, H/V spectral ratio, Surface wave, Resonant frequency

**초 록** 주파수 영역에서 H/V 스펙트럼비를 구하는 방법은 부지 지반증폭함수를 평가할 때 자주 사용되는 방법이다. 이 방법은 Nakamura에 의해 처음으로 제시되었으며 주로 표면파를 이용하였다. 본 논문에서는 H/V스펙트럼비를 분석한 결과를 이용하여 국내에 분포되어 있는 지진관측소 부지의 지반증폭 특성을 분석하였으며 이를 위해 본진을 포함한 12개의 후쿠오카 지진으로부터 관측된 지반진동 자료가 이용되었다. 분석결과 대부분의 지진관측소의 H/V스펙트럼비는 저주파수 영역에서는 변화가 거의 없는 지반증폭 특성을 보여주었다. 하지만 고주파수 영역의 H/V스펙트럼비는 지진관측소에 따라 우세 주파수 및 1개 또는 여러 개의 지역 피크값을 가지고 있는 것과 같이 특징적인 지반증폭 특성을 보여 주었다. 물론 지반증폭 특성 자체도 부지에 대해 중요한 정보를 제고한다는 점에서 중요하지만 관측된 지반진동 자료를 이용하여 지진원 및 지각감쇠 특성 요소를 분석할 경우 결과값의 왜곡을 피하기 위해 지반증폭 특성을 제거할 필요가 있다.

**핵심어** 지반증폭, H/V스펙트럼비, 표면파, 우세주파수

## 1. 서 론

현재 국내에서 여러 종류의 구조물에 내진기준에서 적용하고 있는 설계응답스펙트럼과 국내 관측소에서 실제 기록된 지반진동을 처리하여 얻어진 지반증폭특성을 나타내는 지반응답을 비교할 경우 단주기 및 장주기 대역의 특성값에서 많은 차이를 보여주고 있다. 이러한

현상은 우리나라의 경우 현대적 장비를 이용한 지진관측 이후 6.0 이상의 대규모의 지진이 거의 발생하지 않은 중약진 지역이기 때문에 내진설계기준을 설정하기 위한 실제 관측 강지진동이 부족하여 지반증폭 특성 및 설계응답스펙트럼 작성방법의 대부분을 미국의 1997 National Earthquake Hazards Reduction Program(1997 NEHRP) 및 1997 Uniform Building Code(1997 UBC) 기준을 준용하고 있다. 하지만 앞서 언급한 미국 내진설계 기준은 기반암이 대단히 깊은 미국 서부 해안지역의 지반에 적합하도록 만들어 졌고 또한 내진설계 실무자의 편의성을 위하여 지표로부터 단지 상부 30 m 층의 평균 전단파 속도를 이용하도록 되어 있다. 그러나 국내에서는 대부분

<sup>1)</sup> 세 명대학교 자원환경공학과 교수

\* 교신저자 : kimjkl@unitel.co.kr

접수일 : 2006년 11월 23일

심사 완료일 : 2006년 12월 15일

의 기반암이 지표로부터 30 m 이내에 존재하기 때문에 장주기 영역보다 단주기 영역에서 가속도 스펙트럼의 지반증폭이 상대적으로 크게 나타나서 현재 사용중인 미국 서부 기준을 국내에 적용하는 것은 문제점이 많다. 따라서 우선 국내의 지반특성을 고려한 고유의 부지 증폭 특성에 대한 연구가 필요하다. 이러한 부지효과는 부지하부 지하매질의 기하학적 형태와 물성값 및 지형 등에 영향을 받아서 관측된 지반운동의 중요한 특성값(진폭, 주파수 성분, 지속시간 등)에 큰 영향을 주기 때문에 지진공학적인 연구에서 반드시 고려되어야 할 요소이다.

부지의 지반증폭을 연구하는 방법에는 개략적으로 2 종류가 제시되어 있다. 우선 노도가 양호하게 발달되어 있고 분석대상 부지로부터 비교적 가까 곳에 위치하는 기준지점과 지반증폭 효과를 분석하고자 하는 대상 지점에서 동일 지반 진동원으로부터 각각 관측된 지반진동의 푸리에 스펙트럼 비를 이용하는 방법이 있다. 이러한 방법은 주로 Borchert(1970), Rogers et al(1984), Harzell et al(1997) 및 Bonilla et al(1997) 등에 의해 활발하게 연구되어 왔다.

하지만 주변에 노도가 잘 발달된 기준 관측지점을 쉽게 발견할 수 없을 경우 다른 방법이 제시되었고 분석대상 부지에서 관측된 지반진동의 수평과 수직성분의 스펙트럼비(이하 H/V스펙트럼비)를 비교하여 분석하는 방법이 있다. H/V스펙트럼비를 이용하는 방법은 Nakamura (1989)에 의해 처음으로 제시되었고 주로 표면파를 푸리에 변환을 수행 후 스펙트럼의 H/V비를 이용하여 부지의 지반증폭 효과를 분석하였다. 이 방법은 Lermo and Chavez-Garcia(1993)에 의해 표면파 뿐만 아니라 적용 대상이 되는 파형 에너지 종류를 확장하여 S파 에너지에도 적용하였다. 부지효과를 구할 때 이 방법은 Ohmachi et al.(1991)와 Lermo and Francisco(1993)에 의해 성공적으로 적용되었으며, Seed et. al.(1998)은 S파 에너지를 이용하여 부지의 지반증폭 효과를 구하는데 적용될 수 있음을 증명하였다. 또한 H/V스펙트럼비를 이용하는 방법이 최근에는 Cassidy and Rogers(1999) 등에 의해서도 활발하게 연구되어 오고 있다. 하지만 국내에는 H/V스펙트럼비를 이용한 지진관측소 부지의 지반증폭 효과에 대한 연구가 박동희 외(2003) 등에 의해 연구되었으나 아직 활발하지 못한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 H/V 스펙트럼비를 적용한 방법을 이용하여 국내 지진관측소 부지 고유의 지반증폭 효과를 분석하였다. 본 연구에서 이용된 자료는 한국지질자원연구소에서 운영되는 국내 지진관측망에서 관측된 지반진동 자료이고 본 연구결과는 국내 각종 주요 구조물의 내진설계

뿐만 아니라 지진원 및 지각감쇠 요소를 왜곡없이 분석하기 위해서도 역시 중요한 기초자료로 사용가능하다.

## 2. 지반진동 지배방정식

추계학적 지진모델은 단일 코너 주파수 및 일정한 응력강하(stress drop)의  $w_2$  형태의 지진원 모델을 이용하였다. 가속도시간이력에 대한 푸리에스펙트럼은  $a(f)$ 로 나타내고 여러 가지 형태로 주어질 수 있으나 본 연구에서는 박동희 외(2003)에 의해 제시된 다음의 식을 이용하였다.

$$a(f) = C \cdot \frac{f^2}{1 + (\frac{f}{f_0})^\gamma} \cdot \frac{M_0}{R} \cdot P(f) \cdot A(f) \cdot e^{-\frac{\pi f R}{\beta_0 Q(f)}} \quad (1)$$

여기에서

$$c = (\frac{1}{\rho_0 \beta_0^3}) \cdot (2) \cdot (0.55) \cdot (\frac{1}{\sqrt{2}}) \cdot \pi, \quad f = \text{주파수}$$

$M_0$  = 지진모멘트(seismic moment),

$R$  = 진원거리(hypocentral distance; km)

$\beta_0$  = 지진원부근의 S파 속도(km/sec),

$\rho_0$  = 지진원부근의 밀도( $g/cm^3$ )

$Q(f) = Q_0 f^\eta$  (quality factor),

$A(f)$  = 지각증폭

$P(f)$  = 고주파제거필터

$f_0$  = 지진원코너주파수

$\gamma = 1, 2, 3$  ( $f_0$  이상에서 지진원 변위스펙트럼 감쇠율

위에서 제시된 가속도의 푸리에스펙트럼 지배방정식에서 C는 상수로서 지진원 지역 지반의 밀도( $\rho_0$ )와 S파 속도, 자유면 효과(2배수), 구면으로 방사하는 지진에너지의 평균값(0.55), 2개의 수평방향으로의 에너지 분리( $1/\sqrt{2}$ )와 관련된 파의특성을 포함한다. 지진원 규모는 지진모멘트와 고주파 응력파라미터 즉 응력강하( $\Delta\sigma$ )의 두 개의 독립적인 파라미터에 의해서 결정된다. 지진모멘트와 모멘트 지진규모의 상관관계는 Hanks and Kanamori (1979)에 의해 제시된 지진모멘트 규모의 정의에 따라 다음과 같이 제시 가능하다.

$$\log M_0 = 1.5 M_w + 16.05 \quad (2)$$

응력강하( $\Delta\sigma$ )는 지진원 코너주파수와 지진모멘트( $M_0$ ) 등과 관련되어 있으며 다음과 같은 관계식으로 표현된다.

$$f_0 = \beta_0 \left( \frac{\Delta\sigma}{8.44 M_0} \right)^{1/3} \quad (3)$$

응력강하는 고주파 응력강하(혹은 응력파라미터)라고도 불리며 그 이유는 지진원특성을 나타내는 코너주파수 이상의 고주파 대역에서 푸리에 스펙트럼이 응력강하에 비례하여 스케일 되기 때문이다.

또한 식 (1)에서  $P(f)$  필터는 관측지반진동이 일정한 주파수값 이상의 영역에서 스펙트럼값이 급격히 감소하는 현상을 모델화하기 위해 이용된다. 고주파영역에서 스펙트럼값의 감쇠는 지진원 특성도 영향을 주지만 주로 지진원으로부터 관측소 부지부근 지표까지 통과하는 매질의 비탄성 감쇠특성 등에 의해 설명된다.

고주파 영역에서 관측 강진운동의 급격하게 감소하는 현상을 대표하는 이론은 f-max 모델 및 kappa 모델 등 2가지 종류가 제시되어 있으며 kappa 모델은 다음과 같은 형태로 제시된다.

$$P(f) = e^{-\pi \cdot k(R) \cdot f} \quad (4)$$

식 (4)의 지수부분의 주된 구성요소인  $k(R)$ 은 지진파가 지진원으로부터 관측점까지 지각을 통과할 경우 발생하는 지진파의 감쇠를 나타내며 크게 2가지 현상을 포함하여 모델링하고 있다. 즉 관측소 부지하부의 약 3-4 km 부근까지의 비탄성 감쇠 효과 및 거리와 관련된 지각 구조 전체에 의한 효과로 구성되어 있다. 위에서 제시한 2가지 종류의 감쇠효과를 모두 고려한 식은 아래 식에 의해 모델화 된다.

$$k(R) = \frac{H}{\beta \bar{Q}_s} + \frac{R}{\beta_0 \bar{Q}(f)} \quad (5)$$

위 식 중에서 등호 오른쪽의 첫 번째 항은 거리가 0인 경우에 해당하며  $k(0)$ 으로 표시 되며 식 (6)과 같이 표현된다.

$$k(0) = \frac{H}{\beta \bar{Q}_s} \quad (6)$$

식 (6)에서  $\bar{\beta}$ ,  $\bar{Q}_s$ 는 관측소 부지하부의 전체 표층의 깊이 H에 대한 전단파 속도 및 quality factor 값들의 평균을 의미한다. 이 식에서 제시된 바와 같이 거리가 0인 경우  $k$ 값은 주파수와 무관하게 모델화가 가능하며 관측소 부지 약 3-4 km 하부의 특성에 좌우되는 값으로 간주된다.

다음 항은 지진파가 지진원으로부터 관측점까지 지각을 경유할 때 발생하는 감쇠의 2가지 종류의 효과 중에서 2번째 효과에 해당하는 거리와 관련되며 지각전체 구조

에 의한 효과가 있다. 이는 주파수의 함수인  $Q(f)$ 로 모델링이 되고 식 (5)의  $k(R)$ 중에서 2번째 항에 해당하며 가속도 지배방정식 식 (1)에서 마지막 항에 해당한다. 따라서 본 논문의 가속도 지배방정식 식 (1)에서 제시된  $P(f)$ 는 앞서 제시된 2개의 일반적인 감쇠 특성중에서 단지 관측소 부지하부의 비탄성 감쇠만을 대표하도록 모델화 하였다. 본 연구에서는 각각의 관측소에서 관측된 지진파는 동일한 경로를 전파하기 때문에 H/V스펙트럼비 값은  $P(f)$  특성으로부터 영향을 전혀 받지 않는다.

식 (1)에서 부지하부의 증폭특성을 대표하는  $A(f)$  필터는 지진파가 관측소 하부의 지표 가까이 얕은 심도에 존재하는 저속도층(미국 서부의 경우 약 100 m-300 m; 국내 경주지역의 경우 약 30 m)을 전파함에 따라 고주파수 대역에서 파의 진폭이 주파수에 의존하여 증가하는 현상을 대표한다. 또한 지진파의 부지 직하부에서의 증폭률은 관측소 하부의 전단파 속도 및 밀도 등에 의해 결정된다.

배경잡음 및 S파 에너지를 이용하여  $A(f)$ 를 분석하는 방법은 앞서 제시한 바와같이 여러 가지 방법이 제시되어 있으나 본 연구는 Nakamura(1989)의 방법을 적용하였다. 이 분석방법은 일반적으로 지반진동원이 관측부지에 아주 가까이 있지 않을 경우 지진파의 수직성분은 거의 증폭이 없으나 수평성분은 속도가 낮은 매질을 통과하여 전파될 때에 지각의 속도 및 밀도의 지반매질 임피던스 차이에 의한 지반의 증폭효과를 크게 나타내는 성질을 이용하고 있다. 따라서 수직성분의 증폭효과는 거의 무시될 수 있고 수평성분과 수직성분의 스펙트럼 비를 이용하면 부지효과를 간단하고 유용하게 평가할 수 있다.

H/V스펙트럼비는 지진동의 푸리에 스펙트럼을 이용하여 다음과 같이 주어진다.

$$\log(H/V) = (\log(H_1^2 + H_2^2))/2 - \log V \quad (7)$$

여기서,  $H_1$ ,  $H_2$ 는 남북 및 동서방향 수평성분의 푸리에 스펙트럼을 나타내고 V는 수직성분의 푸리에 스펙트럼을 나타낸다.

### 3. 연구자료

본 연구에서 사용한 자료는 후쿠오카 지역에서 2005년 3월 20일 발생한 지진(규모 6.5)을 포함하여 12개 지진으로부터 관측된 154개 지반진동 자료를 이용하였다. 12개의 후쿠오카 지역에서 발생하여 국내의 관측소에서 관측된 속도자료는 모두 가속도형태의 자료로 변환하여 이용하였다. 본 연구에서 사용된 관측자료는 표 1에 제시되어 있고 각각 지진발생일시, 지진규모 및 관측소 목록

표 1. 자료분석에 이용된 지진 및 관측소 목록

EVENT NO	Date	Lat	Log	Depth (km)	ML	Station
1	2005/05/02	33.7713	130.2324	0.00	4.3	KRA,KRB,WSB,WSA,HDB,WSC,GSU,GKP1,KMC,BGD,UJA,TJN,YGA,SND,HKU,SNU,KHD
2	2005/04/20	33.7379	130.2116	0.00	4.6	KRA,KRB,WSB,WSA,HDB,WSC,GSU,GKP1,KMC,BGD,UJA,TJN,YGA,SND,HKU,SNU,KHD
3	2005/04/20	33.7116	130.2677	0.00	4.7	KRA,KRB,WSB,WSA,HDB,WSC,GSU,GKP1,KMC,BGD,UJA,TJN,YGA,SND,HKU,SNU,KHD
4	2005/04/10	33.5419	129.9002	0.00	4.4	KRA,KRB,WSB,WSA,HDB,WSC,GSU,GKP1,KMC,BGD,TJN,YGA,SND,KHD
5	2005/03/25	33.9128	130.1575	0.00	3.9	KRA,KRB,WSA,HDB,WSC,GSU,GKP1,BGD,TJN,SND,HKU,KHD
6	2005/03/22	33.8668	130.0855	0.00	4.3	KRA,KRB,WSB,WSA,HDB,WSC,GSU,GKP1,KMC,BGD,TJN,SND,HKU,SNU,KHD
7	2005/03/21	33.8175	130.0618	0.00	4.4	KRA,KRB,WSB,WSA,HDB,WSC,GSU,GKP1,KMC,BGD,TJN,YGA,SND,HKU,SNU,KHD
8	2005/03/21	33.8381	130.1983	0.00	4.0	WSB,WSA,HDB,GSU,GKP1,KMC,TJN,SND,HKU,KHD
9	2005/03/20	33.7734	130.0191	0.00	3.9	HDB,GSU,GKP1,KMC,BGD,TJN,SND,HKU,KHD
10	2005/03/20	33.7905	129.8901	0.00	4.2	HDB,GSU,GKP1,KMC,BGD,TJN,SND,HKU,SNU,KHD
11	2005/03/20	33.8183	130.0974	0.00	3.9	HDB,GSU,GKP1,KMC,BGD,TJN,SND
12	2005/03/20	33.7620	130.0954	12.10	6.5	HDB,GSU,GKP1,KMC,BGD,TJN,SND,HKU,SNU,KHD

을 나타내고 있다. 수직성분 뿐만 아니라 2개의 수평성분의 S파 에너지 중에서 S/N비가 낮은(약 3.0이하) 자료는 제외하였다.

본 연구를 위해 특히 12개의 후쿠오카 지진을 선택한 것은 12개 지진원의 진앙위치가 아주 좁은 지역내에 한정되어 분포하고 있다. 따라서 지진원 및 지진파 전파 특성 관련 값들을 분석할 때 지진파 전파 경로에 대한 중복성이 증가되므로 적어도 해당되는 지진파의 전파 path에 대해 분산이 감소하는 장점이 있다.

그림 1은 본 연구에서 사용한 지반진동을 관측한 관측소의 진원거리별 분포를 나타내는 그림이다. 이 그림에 의하면 약 170 km에서 약 565 km의 범위에서 관측된 지반진동을 이용하였다. 근거리에서 관측된 지반진동 자료가 다소 많고 진원거리가 최대 약 565 km부근에서 관측된 자료도 있다. 국내의 일반적인 지각구조를 고려할 때 S파의 지각과 맨틀경계에 대한 교차거리는 약 55 km에서 60 km 정도이고 모든 관측자료가 이 범위를 넘기 때문에 관측자료의 일관성으로 인하여 분석결과에 대한 신뢰성의 제고에 기여할 수 있다.

그림 2는 본 연구에서 사용한 지반진동의 진원거리에 따른 최대가속도값의 분포를 나타내는 그림이다. 이 그림에 의하면 12개의 지진을 지진규모에 따라 개략적으로 4 가지로 분류하였고 우선 첫 그룹은 규모가 가장 작은 규모 3.9, 두번째 그룹은 규모 4.0에서 규모 4.5, 3번째

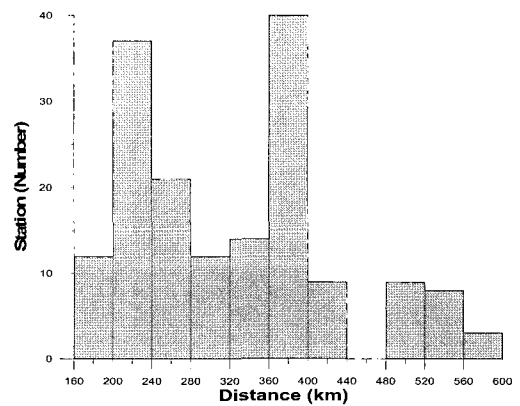


그림 1. 12개 지진자료의 거리별 관측소 분포도

그룹은 규모 4.5-5.0, 마지막으로 본진이며 가장 규모가 커다란 규모 6.5로 분류하였다. 그림 2에 의하면 지진규모가 작을수록 또한 거리가 증가할수록 각각의 관측소에서 관측된 지반진동의 최대가속도값이 감소하고 있는 특징을 잘 보여주고 있다.

#### 4. 연구방법

표 1에서 제시된 관측 지반진동을 분석하였으며 표 2

에서 제시된 순서도에 따라 순차적으로 수행하였다. 특히 S파 에너지의 시간창 길이를 설정할 때 Rayleigh파 에너지를 최대한 제외하였고, 시간창 시작점은 S파 에너지 도달전 2초전으로 하고 진원거리에 따라 S파 시간창 길이를 제시된 공식을 이용하여 조절하였다. 잡음을 제거하기 위해 잡음의 시간창 길이를 S파 시간창 길이와 동일하게 설정하여 푸리에 변환을 수행할 때 발생하는 주파수간격 차이 등에 대한 문제점 발생을 사전에 배제하였다.

시간창을 이용한 에너지 선택작업으로 인해 경계 부분에서 본래 signal에는 포함되지 않았던 고주파 성분이 인위적으로 발생하는 것을 방지하기 위해 signal 마지막 부분에 cosine tapering을 수행하였다. 또한 수평 2개 성분(NS 및 EW) 및 수직성분의 관측지반진동을 Analyst

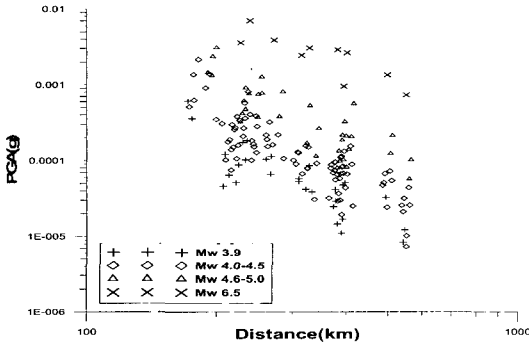
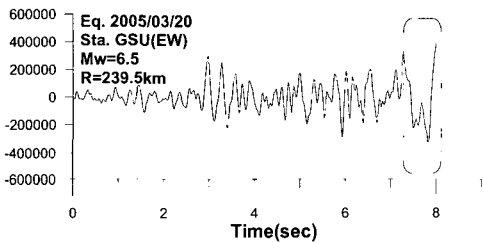
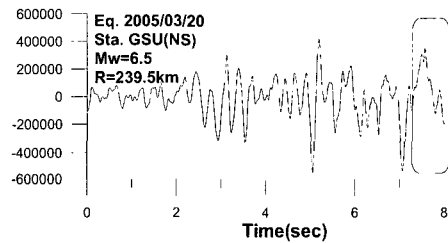


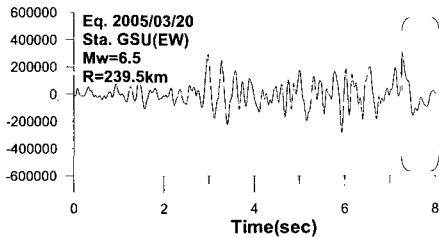
그림 2. 12개 지진자료의 거리별 PGA 값 분포도



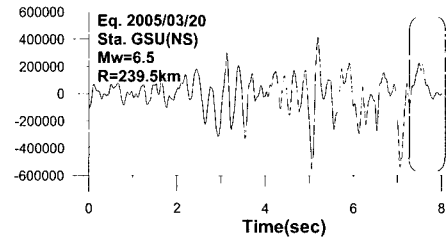
(a) EW성분 Tapering 전



(b) NS성분 Tapering 전



(c) EW성분 Tapering 후

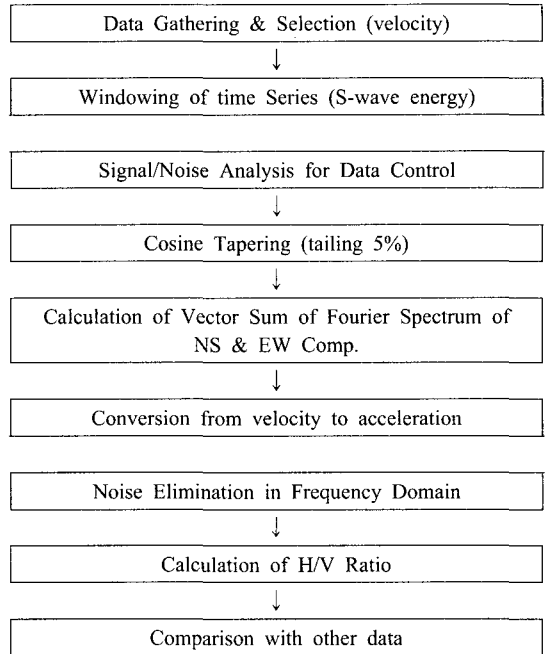


(d) NS성분 Tapering 후

그림 3. 2005년 3월 20일 규모 6.5 지진으로부터 GSU관측소에서 관측된 EW 및 NS 성분에서 S파 에너지의 끝부분을 tapering하는 과정

프로그램을 이용하여 각각 푸리에 스펙트럼으로 변환하였다. 그림 3은 2005년 3월 20일 후쿠오카지역에서 발생한 규모 6.5의 지진에 대해 GSU 관측소에서 수평 2개 성분 각각에 대해 S파 에너지를 tapering하는 과정을 예시하였다.

표 2. 분석절차 순서도



## 5. 연구결과

연구결과는 그림 4, 5, 6, 및 7에 차례로 제시되어 있으며 각각의 그림에서 가로축은 주파수값을 대수적으로 표시하였고 세로축은 H/V스펙트럼비 값을 대수적으로 표시하였다. 주파수의 변화에 따른 H/V스펙트럼비 값의 전체적인 변화양상을 보다 효과적으로 파악하기 위해 각각의 관측소 자료에서 주파수 영역에서 이동평균(moving average)을 적용하였다. 이동평균의 창길이는 각각의 그림에 표시되어 있는 바와 같이 6개의 다양한 주파수 영역의 창길이를 이용하여 좁은 영역 및 넓은 영역 주파수 범위에 대한 변화를 조사하였으며 창길이는 각각 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 및 3.0 Hz이다.

그림 4는 고리 원자력발전소 부근의 2개의 관측소(KRA 및 KRB)에서 관측된 지반진동을 이용하여 분석한 결과를 보여주고 있다. 전체적으로 저주파수 영역에서는 2보다 큰 값을 가지고 출발하고 또한 거의 변화가 없고 일정한 값을 보여주고 있으나 고주파수 영역으로 갈수록 지반 증폭값이 심하게 변화하고 있는 현상을 보여주고 있다. KRA 관측소는 약 6 Hz에서 약 15 Hz 사이의 영역에서 H/V스펙트럼비가 지역적인 피크를 갖고 있고 또한 진폭의 변화가 상대적으로 크다. 본 연구에서 이용한 지반진동 자료는 1초당 100개의 샘플링을 하였기 때문에 나이퀴

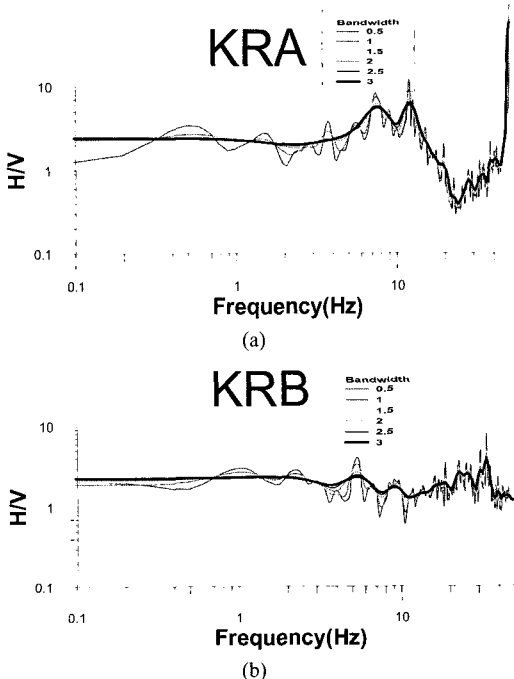


그림 4. 지진관측소 KRA (a) 및 KRB (b) 에 대한 H/V 값

스트(Nyquist) 주파수는 50 Hz이고 나이퀴스트 주파수인 50 Hz 부근에서는 아주 큰 값을 보여주고 있다. 50 Hz 부근에서 이러한 피크는 극히 좁은 주파수영역을 가지고 있어 S파 에너지를 취할 때 내재되는 백색잡음이거나 대도시내의 배경잡음일 가능성이 있다. 백색잡음은 다른 주파수 영역에서도 광범위하게 유사한 크기로 나타나야 하나 그러한 현상은 보여주지 않기 때문에 관측소 주변의 인위적 및 자연적 배경잡음이 영향을 주었을 가능성이 크다. 물론 KRB 관측소에서도 고주파수 영역에서 다소 변화는 보여주고 있으나 전체적으로 안정된 값을 보여주고 있다. 따라서 2개의 관측소가 고리 원자력 발전소 내부에서 서로 대단히 가까운 거리에 있지만 H/V스펙트럼비가 많은 차이를 보여주고 있다. 이러한 차이는 넓은 지역의 전체적인 지반조건이 부지의 지반증폭 특성에 영향을 줄 수 있지만 관측소 부지 고유의 하부지반 특성도 역시 큰 영향을 준다는 것을 잘 보여주고 있다.

그림 5는 월성 원자력발전소 부근 3개의 관측소(WSA, WSB 및 WSC)에서 관측된 지반진동을 이용하여 분석한 H/V스펙트럼비의 결과를 보여주고 있다. 전체적으로 저주파수 영역에서는 1과 2사이의 값을 유지하고 있으며 3개의 관측소에서 공통적으로 2개의 지역적인 피크영역이 존재함을 알 수 있다. 하나는 약 8 Hz에서 약 10 Hz 사이에 중심을 두고 좌우로 감소하는 지역적인 피크영역이 있고 또한 약 30 Hz에서 50 Hz 사이 영역의 고주파수 영역에서의 지역적인 피크영역을 보여주고 있다. 특히 WSB 관측소는 2개의 지역적인 피크영역에서 다른 2개의 관측소에 비해 가장 심한 변화를 보여주고 있기 때문에 양질의 관측 지반진동을 얻기 위해 관측소 하부 지반조건을 보다 신중하게 고려할 필요가 있다고 판단된다. WSB 관측소 부지의 지반증폭값이 심하게 변화하는 이유는 월성지역의 석산부근에 위치하고 있어 타 관측소에 비해 관측소 바로 주변의 석산관련 차양운동과 같은 인위적 및 자연적 배경잡음이 더욱 영향을 줄 가능성이 크다. 또한 지진원 및 지각구조에 의한 광역적인 감쇠값을 구하기 위해 WSB 관측소에서 관측된 지반진동을 이용할 경우 결과값에 왜곡된 영향을 줄 가능성이 크다.

그림 6은 GSU(경상대학교), HDB(효동리) 및 SND(상동) 관측소와 같이 시추공 관측소에서 관측된 지반진동을 이용하여 분석한 결과를 보여주고 있다. 시추공 관측소는 센스가 지반으로부터 일정한 깊이의 시추공 내에 설치되어 있어 지표잡음의 영향이 비교적 적은 것으로 알려져 있다. SND 관측소는 변화가 가장 작은 부지의 지반증폭값을 보여주고 있고 물론 HDB 관측소도 비교적 변화가 작은 값을 보여주고 있다. GSU 관측소의 경우 H/V스펙트럼비의 변화는 작으나 특히 20 Hz 부근에서

특징적인 피크를 보여주고 있다. 이 피크는 아주 좁은 주파수영역을 가지고 있어 GSU 관측소 고유의 우세주파수로 판단된다. 따라서 지진원 및 지각구조에 의한 광역적인 감쇠값과 같은 다른 목적의 연구를 위해 GSU 관측소에서 관측된 지반진동을 이용할 경우 특히 주의하여 지반의 증폭효과를 제거해야 할 필요가 있다.

그림 7은 TJN(대전) 및 SNU(서울대학교) 관측소의 H/V스펙트럼비를 보여주고 있다. 2개의 관측소는 비교적 잘 발달된 암반위에 센스가 위치하고 있다. TJN 관측소(대전)는 부지의 지반증폭값의 변화가 상대적으로 타 관측소에 비해 대단히 작다. 이러한 현상은 TJN 관측소가 비록 시추공 관측소는 아니지만 단단한 기반암위에 위치하

고 있어 전체 주파수 영역에서 지반증폭값의 변화가 상대적으로 작은 것으로 분석된다. SNU 관측소는 TJN 관측소와 유사하게 전체 주파수 영역에서 지반증폭값의 변화가 상대적으로 작으나 50 Hz 부근에서 급격한 피크를 보여주고 있다. 이러한 피크는 극히 좁은 주파수영역을 가지고 있어 S파 에너지를 취할 때 내재되는 백색잡음이거나 대도시내의 배경잡음일 가능성이 있다. 하지만 백색잡음은 다른 주파수 영역에서도 유사한 크기로 나타나야 하나 그러한 현상은 없기 때문에 앞서 제시한 바와같이 관측소 주변의 인위적 및 자연적 배경잡음이 더욱 큰 영향을 줄 가능성이 있다.

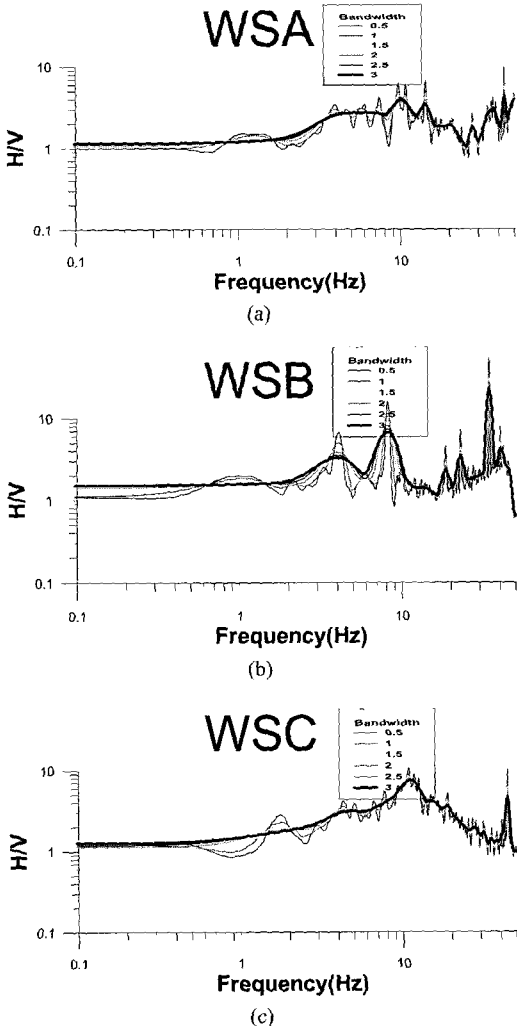


그림 5. 지진관측소 WSA (a), WSB (b) 및 WSC (c)에 대한 H/V 값

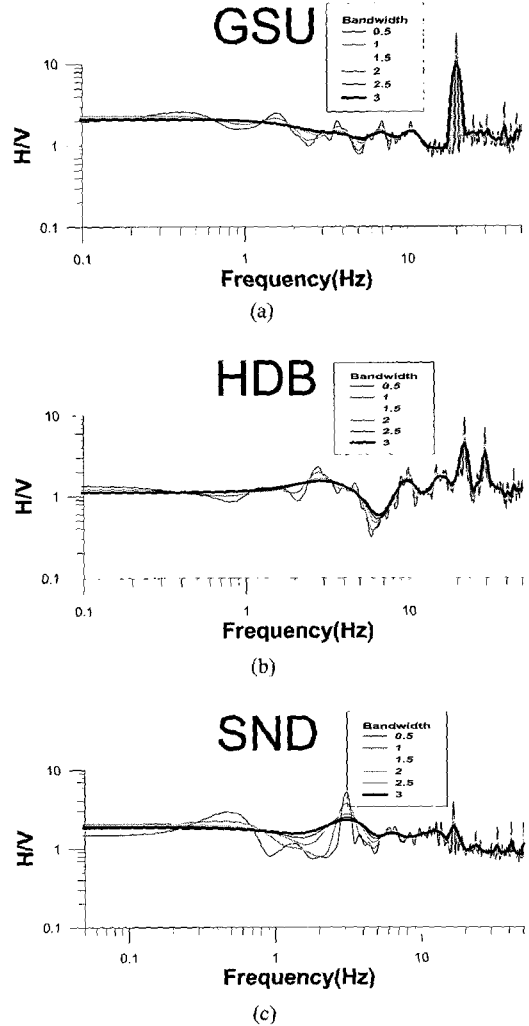


그림 6. 지진관측소 GSU (a), HDB (b) 및 SND (c)에 대한 H/V 값

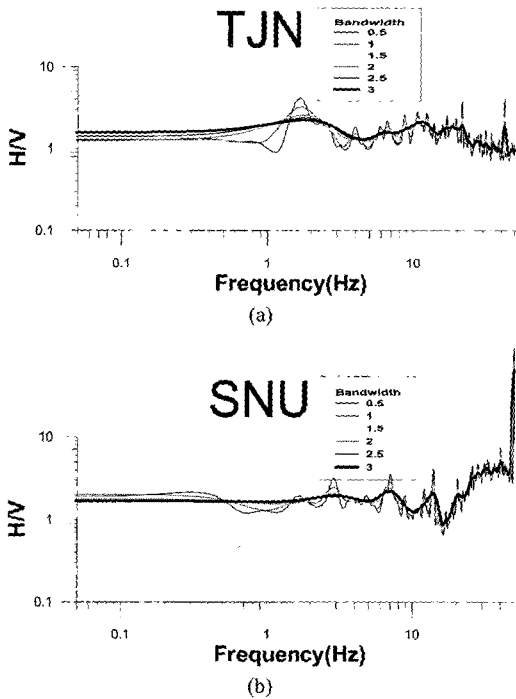


그림 7. 지진관측소 TJN(a) 및 SNU(b)에 대한 H/V 값

## 6. 결론

국내에서는 아직 부지고유의 증폭현상(A(f))에 대한 국내 연구가 거의 없기 때문에 지진원 관련 값과 지각감쇠 관련값을 분석하기 위해 저주파수 대역에서 고주파수 대역까지 전체 주파수 대역에 걸쳐서 주로 증폭계수 1을 획일적으로 사용하고 있는 실정이다. 특히 관측된 지반진동을 이용하여 지진원 및 지각구조에 의한 광역적인 감쇠값 등을 구할 때 WSB 및 GSU 관측소 등에서 관측된 지반진동을 이용할 경우 결과값에 왜곡된 영향을 줄 가능성이 크다. 그러므로 국내 지역별 부지 고유의 수평과 수직성분의 비에 해당하는 지반증폭값에 대한 정보가 필요한 실정이다.

고리 및 월성원자력 발전소 부지 내의 관측소들의 지반증폭값을 비교한 결과 거리적으로 대단히 가까운 부근의 관측소라고 할지라도 부지 직하부의 특성이 다르면 지반증폭값이 서로 다른 경향을 보이고 있어 부지 직하부의 속도구조 모델의 영향이 지반증폭값에 대단히 중요하다. 특히 WSB 관측소는 월성지역의 석산부근에 위치하고 있어 암반 노두위에 위치하고 있으나 타 관측소에 비해 부지의 지반증폭값이 심하게 변화하는 현상을 보여 주고 있다. 이러한 현상은 관측소 부지하부의 특성도 중요하다.

지만 관측소 주변의 인위적 배경잡음이 더욱 커다란 영향을 줄 가능성이 있다. 따라서 관측소의 위치를 선정할 때 주변의 잡음환경도 고려하여야 한다.

시추공 관측소에서 관측된 지반진동을 이용하여 분석한 결과에 의하면 비교적 변화가 작은 H/V값을 보여주고 있으나 GSU 관측소와 같이 좁은 범위의 주파수영역에서 급격한 피크값을 보여 주는 경우도 있다. 따라서 급격한 피크값을 보여 주는 경우 지진원 및 지각구조에 의한 광역적인 감쇠값을 구할 경우 결과값에 왜곡된 영향을 줄 수 가능성이 크기 때문에 신중하게 고려하여야 한다. TJN 및 SNU 관측소의 경우 잘 발달된 암반 위에 센스가 위치하고 있어 비교적 작고 안정된 H/V스펙트럼비를 보여주고 있다. 따라서 잘 발달된 암반조건은 양질의 지반진동을 관측하기 위해 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 2006년도 기상지진개발사업단의 “기상지진기술개발사업(CARTER 2006 -5107)”에 의한 것이며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. NEHEP, 1997, Recommended provisions for seismic regulation for new building and o-s structures, FEMA 302/303, part 1(Provisions) and Part 2(Commentary).
2. 박동희, 연광희, 장천중, 2003, 지진관측 자료를 이용한 국내 지진관측소의 지반특성 분류, 한국지진공학회 춘계 학술대회논문집, pp61-68.
3. Borchardt, R., 1970, Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay, Bull. Seism. Soc. Am. 60, pp29-61.
4. Rogers, A. M., R. D. Borchardt, P. A. Covington, and D. M. Perkins, 1984, A comparative ground response study near Los Angeles using recordings of Nevada nuclear tests and the 1971 San Fernando earthquake, Bull. Seism. Soc. Am. 74, pp1925-1949.
5. Hartzell, S., E. Cranswick, A. Frankel, D. Carver, and M. Meremonte, 1997, Variability of site response in the Los Angeles Urban area, Bull. Seism. Soc. Am. 87, pp1377-1400.
6. Bonilla, L., J. Steidl, G. Lindley, A. Tumarkin, and R. Archuleta, 1997, Site amplification in the San Fernando Valley, California. variability of site-effect estimation using the S-wave, coda, and H/V methods, Bull. Seism. Soc. Am. 87, pp710-730.
7. Nakamura, Y., 1989, A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, QR RTRI 30, pp25-33.
8. Lermo, J. and F. Chavez-Garcia, 1993, Site effect evaluation using spectral ratios with only one station, Bull.



- Seism. Soc. Am. 83, pp1574-1594.
9. Ohmachi, T., Y. Nakamura and T. Toshinawa, 1991, Ground motion characteristics in the San Francisco Bay area detected by microtremor measurements, Proc. 2nd Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, Missouri, pp1643-1648.
  10. Lermo, J. and J. C. Francisco, 1993, Site effect evaluation using spectral ratios with only one stations, Bull. Seism. Soc. am, 83, pp1574-1594.
  11. Seed, H. B., M. P. Toro, and J. L. Sun, 1998, Relationship between soil conditions and earthquake motions, earthquake spectra, 4, pp687-729.
  12. Cassidy, J. F. and G. C. Rogers, 1999, Seismic site response in the greater Vancouver, British Columbia area: spectral ratios from moderate earthquakes, Can. Geotech. J. 36, pp195-209.
  13. Hanks T. C. and H. Kanamori, 1979, A moment magnitude scale. J. Geophys. Res., 84, pp2348-2350.

---

### 김준경



1978년 서울대학교 자원공학과 학사  
 1980년 서울대학교 자원공학과 석사  
 1989년 미국 University of Arizona, 이학박사  
 1989년 Dept of Geoscience 지구물리전공

Tel: 043-649-1319

E-mail: kimjkl@unitel.co.kr

현재 세명대학교공과대학 자원환경공학과 교수

---