

# 지진관측 자료를 이용한 국내 지진관측소의 지반특성 분류

## Site characteristics and classification of seismic stations based on observed earthquake data

박동희\*                      연관희\*                      장천중\*  
Park, Dong-Hee              Yun, Kwan-Hee              Chang, Chun-Joong

---

### ABSTRACT

The H/V ratio (Horizontal to Vertical spectral ratio) has been used to infer site amplification without previous knowledge of near-surface geology and in fact may provide useful general site condition information. This method is used to classify the site characteristics of seismic stations in Korea by comparison with known H/V ratios representative of various sites all over the world. In addition, differences between horizontal and vertical kappa values were evaluated for each seismic stations by comparing H/V ratio and Weak Motion amplification derived from inversion of stochastic ground motion parameters and were used as index to quantitatively classify the site characteristics.

---

### 1. 서 론

지진자료의 지역적인 부지효과는 지진원의 특성, 지하매질의 기하학적 형태와 물성치, 지형 등에 영향을 받고 강진운동의 중요한 특성치들(진폭, 주파수 성분, 지속시간 등)에 큰 영향을 줄 수 있어 지진공학적인 연구에서 반드시 고려되어야 할 요소이다.

지진자료를 이용하여 부지효과를 추정하기 위해 제시된 방법으로 푸리에 진폭스펙트럼의 연구, 기준이 되는 지점과 부지효과를 구하고자 하는 관측지점과의 스펙트럼 비의 고찰, 코다(Coda)파를 이용하여 상대적인 부지증폭계수를 계산하는 방법, 수평성분 대 수직성분의 스펙트럼 비(이하 H/V 비) 비교 등이 있다. 이 중 H/V 비를 이용한 방법은 Nakamura(1989)<sup>(1)</sup>에 의해 처음으로 제시된 것으로 배경잡음이나, S파 등 이용 가능한 지진자료의 제한이 없으며 방법 또한 비교적 간단하고 안정하여 부지효과를 추정하는데 가장 널리 이용되는 방법이다.

본 연구에서는 H/V비 방법을 이용하여 한국 전력연구원에서 운영중인 8개 지진관측소를 포함하여 국내 99개 지진관측소의 지각 및 부지의 속도, 밀도 등의 효과로 인한 주파수별 증폭 특성을 계산하여 부지효과 모델을 구하였으며, 지진기록의 H/V비에 의한 부지효과와 수평성분과 수직성분의 고주파수 감소 특성을 이용하여 지반특성을 분류하였다.

---

\* 한국전력공사 전력연구원, 정회원

## 2. 본론

### 2.1. 이론적 배경

지진기록을 이용한 부지효과의 평가는 배경잡음을 이용한 Nakamura(1989)<sup>(1)</sup>의 연구에 의해 제안되었다. 일반적으로 지진파의 수평성분은 수직성분보다 변형이 크고 soft한 매질을 통과하여 전파될 때에 지각의 속도 및 밀도의 임피던스 차에 의한 지반의 증폭효과를 나타낸다. 그러나 수직성분은 증폭효과는 무시될 수 있다. 따라서 수평성분과 수직성분의 스펙트럼 비를 이용하면 부지 증폭효과를 간단하고 유용하게 평가할 수 있다,

Nakamura의 방법은 Ohmachi *et al.*(1991)<sup>(2)</sup>, Lermo *et al.*(1993)<sup>(3)</sup>에 의해 부지효과를 구하는데 성공적으로 적용되었으며 Seed(1998)<sup>(4)</sup> 등은 Nakamura 방법을 S파 기록을 이용하여 부지증폭 효과를 구하는데 적용될 수 있음을 증명하였다.

H/V비는 지진동의 푸리에 스펙트럼의 주파수 함수를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\log(H/V) = (\log H_1 + \log H_2)/2 - \log V \quad (1)$$

여기서,  $H_1$ ,  $H_2$ 는 수평성분을 나타내고  $V$ 는 수직성분을 나타낸다.

Chen(2000)<sup>(6)</sup>에 의하면 H/V비는 스펙트럼 분석을 직접 수행하지 않고 지각의 속도구조와 밀도에 의한 증폭효과  $Amp(f)$ 와 지표부근의 지반 특성에 의한 고주파수 비선형 감쇠  $\kappa(x)$ 로 나타낼 수 있는데,  $Amp(f)$ 는 수 km의 지각까지의 속도에 의한 증폭  $X_{crust}$ 와 천부 수 m에 의한 증폭 효과가 더해져서 나타난다. 한편, 고주파수 감쇠를 독립적으로 고려해보면 수평성분의 고주파수 감쇠특성  $\kappa_H$ 가 수직성분의 고주파수 감쇠특성인  $\kappa_V$ 보다 크다고 가정할 수 있어 최종적으로 H/V 스펙트럼에 반영되는 것은 수평성분과 수직성분의  $\kappa$ 의 차이  $\kappa_H - \kappa_V$  ( $\kappa$  difference, 이하  $\kappa_{diff}$ )이다. 즉 H/V는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H/V(f) = Amp(f) \exp(-\pi\kappa f) = Amp(f) \exp(-\pi(\kappa_H - \kappa_V)f) \quad (2)$$

$\kappa_{diff}$ 는 hard rock과 같이 H/V비가 거의 1인 경우에는 주파수에 따른 수평성분과 수직성분의 스펙트럼 형상과 진폭이 거의 유사하므로 0이거나 0에 가깝다. 반면에 soft한 지반특성을 가지는 관측소의 기록은  $\kappa_H$ 가 수평성분의 증폭에 의하여 큰 값을 가지게 되므로  $\kappa_{diff}$  값이 0보다 커지게 된다. 이와 같이  $\kappa_{diff}$ 는 지반특성이 soft한 부지일수록 큰 값을 가지므로 지반특성에 따른 부지효과를 고려하는 기준으로 이용할 수 있다.

본 연구에서  $\kappa_{diff}$ 를 구하기 위하여 H/V비 스펙트럼과 weak motion 증폭특성의 차이를 이용하는 방법을 제안하였다. 규모 2, 3 정도의 미소지진 중 S/N비가 좋은 지진자료의 역산을 통하여 지진파의 수평성분에 대한 스펙트럼을 계산할 수 있다. 이렇게 계산된 스펙트럼은 고주파 감쇠가 배제된 것으로 만약 특정 관측소의 실측 지진기록의 스펙트럼과 어느 주파수 대역에서 차이가 발생한다면 이 차이만큼은 부지효과라 볼 수 있으며 이 값에 지각증폭효과를 더한 것을 weak

motion의 부지증폭특성,  $A_{W.M.}(f)$ 로 두었다. 한편, H/V비 스펙트럼은  $\kappa_{diff}$ 를 반영하므로 이 두 스펙트럼 비교하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{A_{H/V}(f)}{A_{W.M.}(f)} = \exp(-\pi(\kappa_H - \kappa_V)f) \quad (3)$$

즉, 부지효과가 없는 관측소는 수평성분이 수직성분에 비해 증폭을 일으키지 않아서  $\kappa_H$ 값이 변화가 없으므로  $\kappa_{diff}$ 는 0이 되어  $A_{W.M.}(f)$ 과 H/V 스펙트럼( $A_{H/V}(f)$ )은 일치하게 된다. 그러나 수평성분의 증폭효과가 발생하는 경우  $A_{H/V}(f)$ 과 차이가 발생하게 된다. 이 두 스펙트럼의 차이가 나지 않도록  $A_{W.M.}(f)$ 을 보정해 주면  $\kappa_{diff}$  값을 구할 수 있다.

## 2.2. H/V 비와 부지특성에 따른 지각증폭

Chen(2000)은 각기 다른 지체지구조 환경에 놓인 6개의 지역, 미국 북동부(ENA), 캘리포니아, 캐나다 서부해안(B.C.), 일본, 멕시코, 터키 지역에 대하여 부지지질의 특성과 H/V비를 이용하여 부지효과(site effect)를 연구하였다.

부지효과는 지각의 속도구조와 밀도 및 특히 shallow surface나 surface soil site의 영향을 받으므로 천부 지반의 지질학적 상태를 고려하여야 한다. 표 1의 Abrahamson과 Silva(1997)<sup>(5)</sup>의 수정된 Geomatrix site분류법을 이용한 지질학적 상태에 따른 상기 6개 지역은 다음과 같은 부지특성을 가진다. 캘리포니아 지역은 rock의 특성을 나타내는 A/B, B.C.와 ENA는 very hard rock인  $A_0$ , 일본은 rock 특성인 A와 soft 특성을 보이는 B/C, 멕시코와 터키는 각각 hard-rock(A), soft rock(A/B)로 분류되었으며 캘리포니아 지역은 A/B, C/D로 분류되었다.

표 1. 수정된 Geomatrix의 부지 분류(Abrahamson and Silva, 1997)

Site class	Definition	Site class	Definition
$A_0$	Hard rock ( $V_s > 1500$ m/s)	C	Deep soil in narrow canyon : soil > 20 m thick canyon < 2 km wide ( $V_s$ 180-360 m/s)
A	Rock ( $V_s > 600$ m/s) or very thin soil (<5 m) over rock	D	Deep soil in broad canyon : soil > 20 m thick canyon > 2 km wide ( $V_s$ 180-360 m/s)
B	Shallow soil : soil 5-20 m thick over rock ( $V_s$ 360-600 m/s)	E	Soft Soil ( $V_s < 150$ m/s)

\* A/B는 rock, A/B는 soft rock, C/D는 deep soil로 분류

Chen(2000)<sup>(6)</sup>에 의하면 식(2)와 같이 어느 관측소의 H/V비와 부지의 고주파 감쇠를 나타내는 평균적인  $\kappa$ ( $\approx \kappa_{diff}$ ) 값을 알고 있으면 부지증폭함수  $Amp(f)$ 를 추정할 수 있어 우리나라와 같이 지진관측소의 지표근처의 지질학적인 사전 정보가 없는 지역에서 H/V비는 부지증폭 효과를 연구하는데 매우 표준적이고 유용한 자료가 된다.

Chen(2000)<sup>(6)</sup>은 앞서 설명한 부지특성 분류가 되어있는 6개의 지역에 대하여 이미 연구되어 있는 부지증폭특성  $Amp(f)$ 에  $\kappa$ 값을 곱함으로써 H/V비를 구하였다. 각 지역별  $Amp(f)$ 에  $\kappa$ 를

곱하여 얻은 H/V비는 그림 1(a)과 같다. 각 지역의 대표적인  $x$ 값은 ENA지역이 0.002, B.C지역이 0.011, 일본, 멕시코, 터키, 캘리포니아 지역에서는 0.035이다.

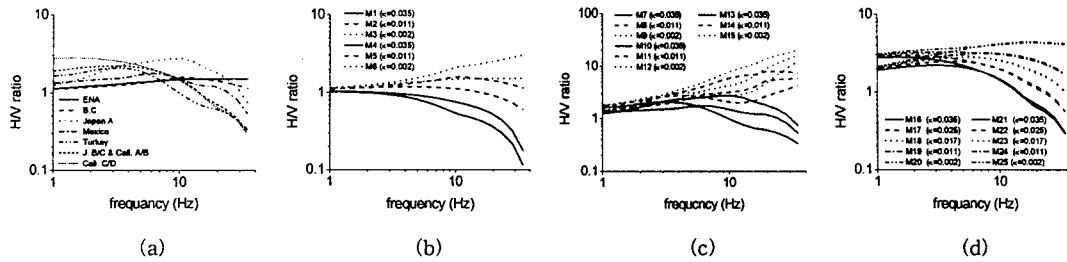


그림 1. 6개 지체지구조 지역의 H/V비(a)와 이번 연구에서 제시된 모델(b, c, d)

위의 그림 1(a)의 결과에서 H/V비의 주파수에 따른 형상과 진폭에 근거하면 H/V비는 hard rock/rock site(ENA, B.C., 멕시코), soft rock(터키), soil site로 일관성 있게 구분된다. soil site는 firm soil인 BC/일본, AB/캘리포니아, 일반적인 soil인 C/D 캘리포니아와 soil-rock mixture(A/일본)로 다시 분류된다. 관찰된 H/V 비의 특징은 다음과 같이 부지증폭과 잘 부합된다.

- 1) amplification peak는 hard/rock, rock site일수록 고주파수 대역을 가지는 반면에 softer soil 지역일수록 낮은 주파수 대역으로 이동한다.
- 2) amplification peak의 넓이는 hard rock/rock 일수록 좁은 주파수 범위를 가지는 반면에 soft soil 지역일수록 넓은 주파수 범위를 가진다.
- 3) hard rock site는 낮은 증폭을 보이는 반면 soil site는 높은 증폭을 보인다.

부지의 특성에 따른 증폭의 양상을 나타내는 위와 같은 성질은 일반적인 다른 부지에 대해서도 잘 부합될 것이라는 가정하에 아래에서는 국내 지진관측소에서 기록된 H/V비를 이용하여 지각증폭과의 관계에 대하여 고려해 보았다.

### 2.3 국내 지진관측소의 부지특성 모델

국내에서 운영중인 대부분의 지진관측소들은 부지효과가 최소화되는 hard rock에 설치되어 있지만, 일부 관측소는 마사토와 같은 soft 부지에 설치되어 있어 지반특성에 따른 부지증폭을 보이고 있다. 그러나 국내의 관측소별 부지효과에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이라서 지진자료를 해석하고 응용하는데 부지효과를 고려하지 않거나 자료 활용을 하지 못하는 경우가 대부분이다.

이번 2.3에서는 국내 지진관측소들의 부지특성을 알아보기 위하여 H/V비 스펙트럼의 형상과 진폭준위에 근거하여 부지특성을 분류하였다. 이를 위해 식(2)를 이용하여  $Amp(f)$ 에  $x$ 를 곱하여 M1에서 M25까지 25개의 모델을 설정하였다(표 2, 그림 1 (b), (c), (d)). 이 때, 이용된  $Amp(f)$ 는 Chen(2000)<sup>(6)</sup>에 제시되어 있는 ENA, B.C., 터키, 멕시코, 일본A, 캘리포니아 A/B, C/D 지역의 자료를 이용하였다. 국내에서 운영중인 99개 관측소에서 기록된 지진기록 중 S/N비가 3이상인 기록을 선별하여 관측소별 평균 H/V비를 구하여 스펙트럼 형상과 진폭준위를 구하여 제시된 25개 모델과 스펙트럼 형상과 준위가 비슷한 최적의 모델을 구하였다.

표 2.  $Amp(f)$ 와  $x$ 를 곱하여 설정한 25개의 부지특성 모델

$x$	ENA $Amp(f)$	B.C $Amp(f)$	Japan A $Amp(f)$	Mexico $Amp(f)$	Turkey $Amp(f)$	California A/B $Amp(f)$	California C/D $Amp(f)$
$x=0.035$	M1	M4	M7	M10	M13	M16	M21
$x=0.025$						M17	M22
$x=0.017$	M2	M5	M8	M11	M14	M18	M23
$x=0.011$						M19	M24
$x=0.002$	M3	M6	M9	M12	M15	M20	M25

그림 2는 국내 99개 관측소에 대하여 구한 H/V비와 표 2에서 설정된 모델과의 root mean square값이 최소가 되는 방법으로 최적해를 구하는 예를 나타낸 것이다. 각 관측소별 좌측그림의 실선은 H/V 비를 나타내고 점선은 각 각 H/V비에 대한  $+1\sigma$ ,  $-1\sigma$ 를 나타낸다. 각 관측소별 우측 그림에는 관측소별 평균 H/V비와 구해진 최적해 모델을 함께 도시한 것이다.

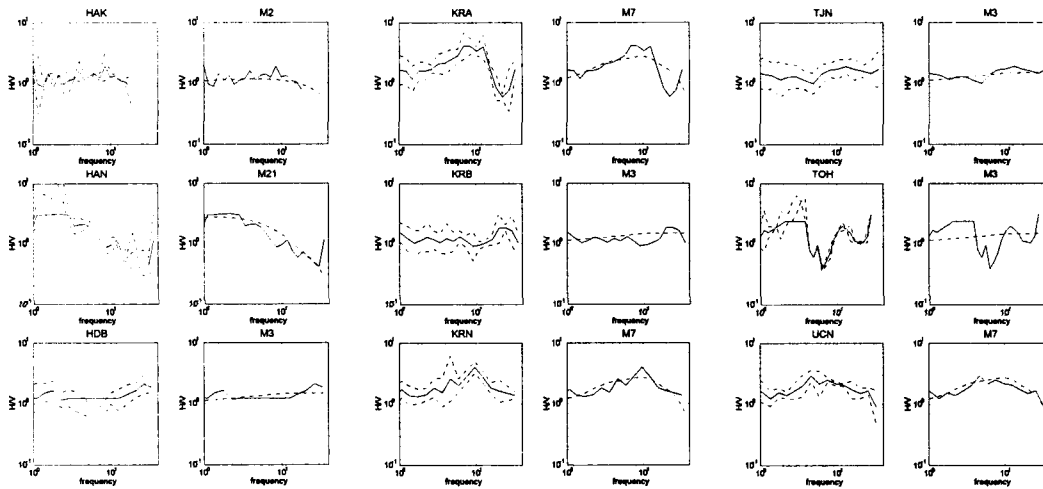


그림 2. 국내 각 관측소별 부지증폭 모델. 오른쪽 그림은 관측소별 H/V 비(실선)와  $\pm 1\sigma$ 를 나타냄. 왼쪽 그림은 H/V비와 최적해를 가지는 모델을 함께 도시한 것임

표 3은 그림 2의 결과를 정리하여 국내 지진관측소별 계산된 부지효과 모델을 나타낸 것이다. 표 3과 같이 국내의 99개 관측소는 크게 18개의 유사한 부지특성을 가지는 그룹으로 나눌 수 있고, 주로 M2, M3, M5, M6, M7, M10, M17, M21로 크게 8개로 분류할 수 있다. 그림 3은 8개의 대표적인 모델로 분류된 관측소들의 평균 H/V값과 모델을 비교하여 함께 도시한 것으로 각 모델별 평균적인 H/V값은 모델과 잘 부합된다. 이 중에서 M2, M3, M5, M7, M10, M13에 해당되는 70개 관측소는 암반의 특성을 가지고 M17, M21에 해당되는 29관측소는 firm soil 내지 soft soil의 특성을 가지는 모델이다. 이렇게 분류된 관측소들의 지역적인 분포를 고려해본 결과 지역적인 분포는 보이지 않았다. 표 3에서 분류된 각 관측소별 부지특성 모델은 각 관측소의 지진자료 스펙트럼을 해석할 때 부지특성효과를 보정하는데 기준으로 이용될 수 있으며, 8개의 부지특성 모델은 국내 지진관측소의 광역적인 부지효과로 고려하여 응답스펙트럼 또는 지진재해도 작성 등의 지진 공학적 자료 분석에 이용될 수 있을 것이다.

표 3. 부지증폭특성 모델과 국내 지진관측소의 부지증폭특성의 분류. 표에서 빗금친 부분은 Chen(2000)에 의한 6개의 광역 부지에 대하여 구하여진 kappa값

부지 분류			관측소
모델	site 특성	kappa( $\kappa$ )	
M 2	ENA : hard rock	0.011	HAK, JAH, JJU, KUJ, PCH, SGP, WON
M 3		0.002	CHJ, CHN, CPN, DAG, DGY, GKP, GSU, HDB, INJ, KAN, KRB, KWJ, NPR, SAC, TJN, TOH, WSB, YAP, YOS
M 5	B.C. : rock	0.011	BBK, CHC, CHS, HSB, KOH, MAK, SEO, SES, SND, ULJ, WAN, YGA, YGN
M 6		0.002	BGD, CGD, JTU, KJM
M 7	Japan : A(rock)	0.035	AND, EUS, HKU, HUK, KMC, KRA, KRN, TAB, UCN, ULS
M 10	Mexico : rock	0.035	CHU, CHY, IMS, INC, IZH, JEC, KHD, KUS, MOP, PUA, SNU, TAG, TEJ, UJA, YOC
M 13	Turkey : soft rock	0.035	CHA, KUM
M 16	Japan B/C & California A/B : firm soil	0.035	BRD, NAW
M 17		0.025	BUY, CHI, CHW, ICN, SUC, WSN, YOD, YOJ
M 18		0.017	CHO, WSA
M 19		0.011	WSC
M 20		0.002	KMH
M 21	California C/D : soil	0.035	BR2, CEJ, HAC, HAN, KMS, MAS, POR, SUW
M 22		0.025	JOU, ULL, BOE
M 23		0.017	POH
M 24		0.011	KUC, SOC

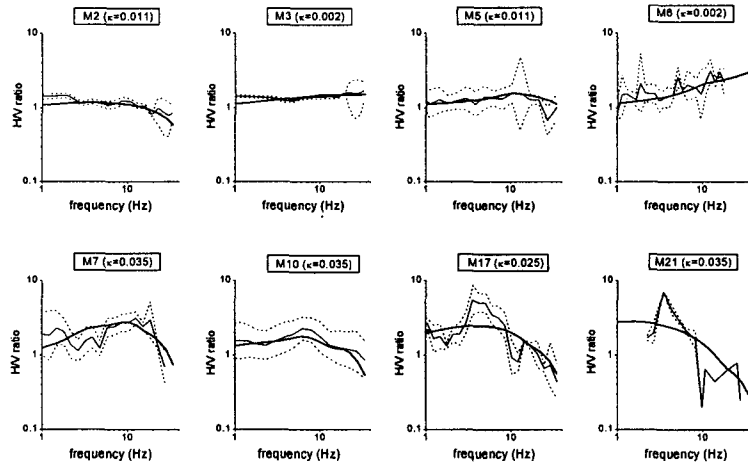


그림 3. 동일한 부지특성 모델로 분류된 관측소의 평균 H/V비

#### 2.4. 수직, 수평성분의 고주파 감쇠( $\kappa$ ) 차이에 의한 지반 분류

앞의 절에서는 국내 지진관측소의 스펙트럼 형상과 준위에 의해 부지특성을 분류하여 각 특성별 대표적인 모델을 제시하였다. 이번 절에서는 보다 정량적인 방법으로 각 부지별로 부지효과를 야기시키는 지반특성에 대하여 고찰하여 보았다.

식(3)에서 설명한바와 같이  $\kappa_{diff}$ 는 부지증폭효과 및 지반의 비선형성을 지시하는 좋은 분류기준이 된다.  $\kappa_{diff}$ 를 구하는 방법으로 제시된 것이 weak motion의 부지증폭특성과 H/V비 스펙트

럼을 비교하는 것으로 그림 4와 그림 5는 그 예를 도시한 것이다. 그림 4의 (a)TJN, (b)KRA 관측소는 weak motion의 증폭특성과 H/V비가 전 주파수 대역에서 일치하고 있어  $x_{diff}$ 가 0이다. 따라서 지반특성에 따른 비선형성과 천부지반의 증폭특성이 보이지 않는 hard rock이라 할 수 있다. 그러나 그림 5(a)의 CHO 관측소의 경우에는 weak motion이 약 3 Hz 이상의 고주파수 대역에서 H/V보다 큰 증폭특성을 보여 두 스펙트럼에 차이가 보임을 알 수 있다. 그러나, 그림 5(b)와 같이 weak motion 스펙트럼을 H/V 스펙트럼과 fitting 시키면 증폭정도를 지시하는  $x_{diff}$ 를 구할 수 있다. 이와 같이 구하여진  $x_{diff}$  값을 기준으로 관측소를 I, II, III, IV 4 등급으로 분류한 결과가 표 3이다. 표 3의 기준은 결국 관측소의 천부 지반의 비선형성 정도(가능성), 수평/수직성분의 컨트리레스 차에 의한 증폭정도의 지표가 된다.

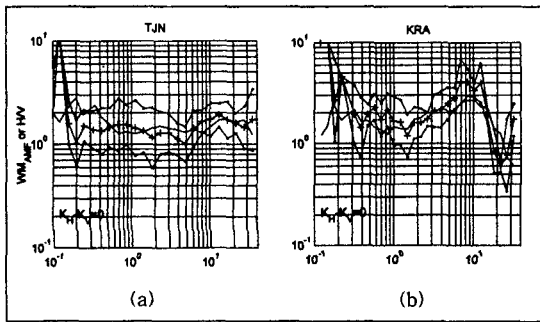


그림 4.  $x_{diff}=0$ 인 관측소의 예. -- : 실측자료의 H/V비, --- : 실측자료 H/V비의  $\pm 1\sigma$ , - : weak motion의 증폭특성

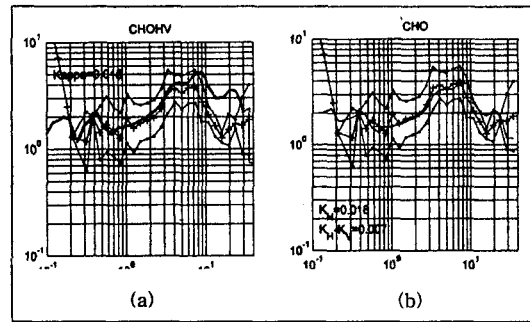


그림 5. (a)  $x_{diff} \neq 0$ 인 관측소의 예. (b) weak motion의 증폭특성을 보정하여 실측자료와 일치시켜  $x_{diff}$ 를 구함

표 4.  $x_{diff}$ 에 따른 지반특성 분류

분류	관측소
I $x_H - x_V = 0$	BGD, CGD, CHJ, CHN, CHS, DGY, GKP, GRE, HDB, HKU, ICN, IZH, KJM, KMC, KMH, KRA, MAK, MOP, NPR, POR, SNU, TAG, TJN, ULS, WSA, WSN
II $0 < x_H - x_V \leq 0.003$	BBK, BOE, CHC, DAG, KOH, KUS, KWJ, UJA, ULJ, WSB
III $0.003 < x_H - x_V \leq 0.01$	BR2, BDY, BUY, CHI, CHO, GSU, HAK, HAN, HSB, INJ, KHD, KRB, KUC, KUM, NAW, NAW, PCH, SEO, SES, SND, SUC, TEJ, ULL, WAN, WSC, YAP, YGA, YGN, YOS
IV $0.01 < x_H - x_V$	AND, CEJ, CHA, CHU, CHW, CHY, CPN, EUS, HAC, IMS, INC, JAH, JEC, JJU, JOU, KAN, KMS, MAS, POH, PUA, SAC, SGP, SOC, SUW, TAB, TOH, WON, WOC, WOD, YOJ

한편, Chen(2000)<sup>(6)</sup>는 앞서 설명한 6개의 지체지구조 환경하에서 kappa값의 residual을 구하고 규모에 따른 의존성을 연구하였다. hard rock의 경우와 같이 비선형성이 작은 경우에는 kappa residual은 거의 0이었으며 규모에 독립적이었다. 그러나 soft한 지반특성을 가지는 관측소에서는 kappa residual이 더욱 크게 나타났으며 규모에 의존함을 제시하였다. Chen의 결과를 본 연구결과에 적용하면 표 4에서 III, IV와 같이  $x_{diff}$ 가 비교적 큰 값을 가지는 큰 관측소의 자료를 이용할 때는 특히, 비선형성 효과가 일어날 가능성과 지반증폭효과에 대하여 주의하여야 할 것이다.

### 3. 결론 및 토의

지진자료의 수평성분 대 수직성분 스펙트럼 비(H/V 비)는 지각중폭 특성에 대한 정보를 제공하므로 지각에 대한 속도구조나 밀도 등이 알려지지 않은 지역에서 부지특성을 분류하는데 매우 유용한 정보를 제공한다.

이번 연구에서는 지진관측자료의 H/V비를 이용하여 국내 지진관측소의 부지효과에 따른 지반 특성을 분류하기 위하여 두 가지 방법을 적용시켰다.

먼저 스펙트럼의 형성과 진폭의 준위로 구별되는 부지특성을 나타내는 25개의 이론적인 모델을 제시하고 국내 지진관측소별 H/V비 스펙트럼과 비교하여 오차가 최소가 되는 모델을 선정하였다. 국내 99개 관측소의 부지 중폭특성은 크게 8개의 유사한 부지특성을 가지는 모델로 나눌 수 있었으며, hard rock site 특징을 나타내는 관측소는 26곳, rock site는 44곳, firm soil은 14곳, soil은 13곳 관측소이었다.

다음으로, 지반중폭효과에 대한 보다 정량적인 평가를 위하여 weak motion의 중폭특성과 H/V비 스펙트럼의 차이를 이용하여  $x_{diff}$  값을 제시하고  $x_{diff}$  값의 크기에 따라 지진관측소의 지반특성을 4가지로 분류하였다.

이상에서 분류된 관측소별 부지특성은 지진자료를 취사 선택하는데 있어 기준으로 이용될 수 있으며, 향후 역산을 통한 지진동 모사 및 응답스펙트럼 등의 지진공학적 연구의 입력요소로도 고려될 수 있을 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부 2002년도 원자력연구개발 중장기 계획사업 “원전 내진설계를 위한 기반 구축연구”과제로 수행되었음을 밝히며, 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. Nakamura, Y., "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using micortremor on the ground surface.", *QR · RTRI.*, 30, 1989.
2. Ohmachi, T., Nakamura, Y. and T. Toshinawa "Ground motion characteristics in the San Francisco Bay area detected by micortremor measurements." Proc. 2nd Int. Conf. on Recent Advances in Geotech. Earth. Eng. & Soil Dyn., San Louis, Missouri, 1995, pp. 1643-1648.
3. Lermo J. Francisco J. C., "site effect evaluation using spectral ratios with only one stations." *Bull. seism. Soc. Am.*, 83, 1993, pp. 1574-1594.
4. Seed, H. B., Romom, M. P., Sun, J. I., Jaime, J. A., and Lysmer, J., "Relationships between soil conditions and earthquake ground motions." *Earthquak Spectra* 4, 1998, pp. 687-729.
5. Abrahamson, N. A. and W.J. Silva, "Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes." *Seism. Res. Lett.*, 68, 1997, pp. 94-127
6. Chen, S. Z., *Global comparisons of earthquake source spectra*, Ph. D. Thesis, Carleton University, Ottawa, Ontario, Canada, 2000, 436 pp.