

코다파를 이용한 남한지역의 부지증폭 계수 Site Amplification Factors in Southern Korea Determined from Coda Waves.

김동일* 박창엽**
Kim, Dong-Il Baag, Chang-Eob

ABSTRACT

The relative site amplification factors in southern Korea were determined from coda waves using coda normalization method. The seismograms of 15 events at 79 stations were used in this study. Seismogram envelopes were obtained by the Hilbert transform of bandpass-filtered velocity seismograms with frequency bands at 1-2Hz, 2-4Hz, 4-8Hz, 8-16Hz and 16-32Hz. The envelopes were stabilized by application of moving-average scheme with time window of 1 second. The relative amplitudes of seismogram envelope were computed by dividing the amplitude of seismogram envelope at one site by the amplitude of seismogram envelope at reference site. The relative site amplification factors were obtained by taking averages of the relative amplitude. Values of relative site amplification factors in southern Korea are generally low in western area and high in eastern area.

1. 서 론

20세기뿐만 아니라 역사적으로도 한반도에는 파괴적인 지진이 많이 발생하였지만 90년대 중반 까지도 정부에서는 한반도에서 발생하는 지진과 그 지진으로 인한 피해 가능성에 대해서는 거의 관심을 가지지 않았다. 관측소 또한 기상청에서 관리하는 12곳의 1성분 아날로그 지진계와 해외 기관에서 설치한 1-2곳의 광대역 디지털 지진계뿐이었다.¹⁾ 그 후 1996년 12월 13일 영월지진과 1997년 6월 26일 경주지진으로 국가의 지진방재체제에 대한 전면적 보강의 필요성이 제기되면서 현재에는 총 99개 관측소가 세워졌으며 관측소에 설치된 광대역 지진계, 단주기 지진계, 가속도계로부터 수많은 지진자료들이 수집되고 있다. 지진방재에 대한 관심이 점점 커지면서 수집된 지진 자료들을 이용하여 한반도내에서의 지진학적 특성에 대한 많은 연구가 수행되어 왔지만 내진설계의 기본이 되는 부지응답(site response)에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다. 따라서 지금

* 서울대학교 대학원 지구환경과학부 박사과정

** 서울대학교 대학원 지구환경과학부 교수, 정회원

까지 축적된 자료를 이용하여 한반도내에서 지역에 따른 혹은 지질학적 특성에 따른 부지증폭(site amplification)의 연구는 필수적이라 할 수 있다.

부지응답을 얻기 위해 그동안 많은 방법들이 개발되었다. 그 중 하나는 직접 S파를 이용하는 것으로 지반운동의 푸리에 스펙트럼비(Fourier spectral ratio)를 결정하는 방법²⁾과 평균적인 부지효과(site effect)를 기준으로 하여 상대적인 S파 부지증폭 계수(site amplification factor)를 계산하는 방법³⁾이 있고 다른 하나는 Aki & Chouet(1997)⁴⁾에 의한 모델을 기초로 하여 고안된, 코다파(coda wave)를 이용하여 상대적인 부지증폭 계수를 계산하는 방법^{5), 6)}이 있다. Kato 외(1995)⁷⁾는 같은 지역에서의 S파와 코다파의 부지증폭 계수를 계산하여 이 둘 사이에 선형적 관계가 있음을 보이고 코다파를 이용한 부지증폭 계수의 타당성을 증명하였다.

본 연구에서는 2001년 1월부터 2002년 1월까지 발생한 지진중 신뢰도가 높은 15개 지진의 지진 자료로부터 코다파를 추출하여 상대적인 부지증폭 계수를 계산하였다.

2. 지진 기록 자료

2002년 1월 현재 우리 나라에서 운영되는 지진 관측소는 기상청에서 운영하는 63개소¹⁾, 한국지질자원연구원 및 대학에서 운영하는 24개소, 한국전력연구원에서 운영하는 8개소, 한국원자력안전기술원에서 운영하는 4개소로 총 99개소이다. 이 중 일부 관측소는 설치된 장소가 부적합하여 잡음이 너무 많이 기록되고 있으며, 초기에 설치된 경상분지내의 단주기 지진계는 코다파를 연구할 수 있을 만큼 충분히 지진파를 기록하지 못하고 있다. 본 연구에서는 이들을 제외한 양질의 자료를 얻을 수 있는 79개소의 관측소(그림 1)에서 수집된 지진자료를 이용하였다. 이들 관측소는 25개의 단주기 속도계, 22개의 광대역 속도계, 79개의 가속도계로 이루어져 있으며 수집된 자료 중

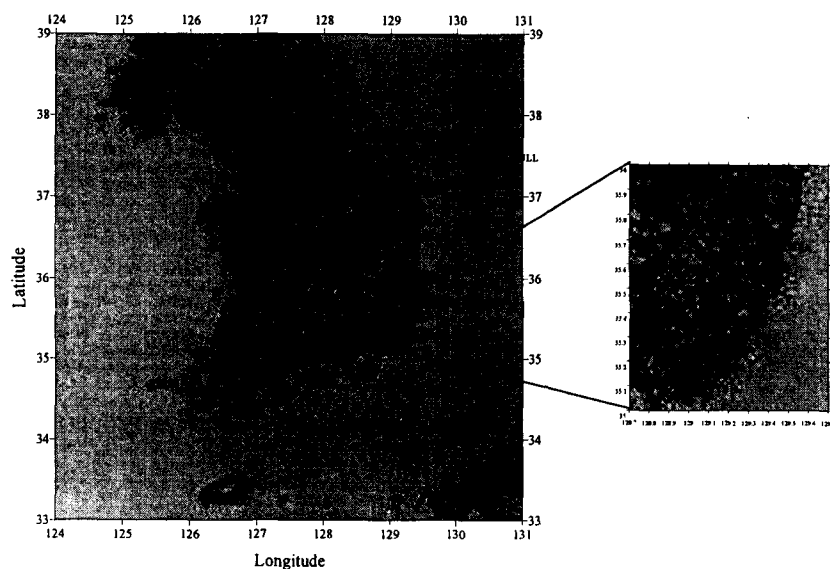


그림 1. 지진관측소 분포도. 총 79개소로 25개의 단주기 속도계, 22개의 광대역 속도계, 79개의 가속도계로 이루어져 있다.

Date (year-mo-da)	Origin Time (Local Time)	Latitude (deg-min)	Longitude (deg-min)	Magnitude(KMA) M_L
2001-01-29	11-44-07.67	35-42.84	126-33.61	3.0
2001-03-24***	15-27-53.50	34-04.98	132-31.56	6.4
2001-06-29	11-21-08.63	35-47.53	126-36.59	3.6
2001-07-23	17-29-14.74	36-27.71	127-59.46	3.5
2001-08-24*	11-12-03.00	35-51.77	128-09.11	3.1
2001-09-13**	06-07-14.80	36-24.00	127-00.00	2.2
2001-09-15**	02-32-41.80	35-36.00	125-54.00	2.2
2001-09-19**	08-47-57.20	36-36.00	126-54.00	2.6
2001-11-13**	06-15-19.80	36-30.00	127-54.00	1.9
2001-11-21**	10-49-10.90	36-42.00	128-18.00	3.5
2001-11-24**	16-10-31.60	36-42.00	129-54.00	4.1
2001-11-30**	11-18-31.70	35-54.00	127-30.00	2.4
2002-01-04*	00-33-25.90	34-44.88	127-31.85	2.3
2002-01-07*	17-10-03.00	35-18.14	128-51.94	3.1
2002-01-08*	08-18-30.82	35-50.44	128-13.75	2.8

* : KMA
** : KIGAM
*** : USGS

표 1. 본 연구에서 사용된 2001년 1월부터 2002년 1월까지의 지진목록.

속도자료는 그대로, 가속도자료는 속도로 적분하여 사용하였다. 표 1은 본 연구에서 이용된 2001년 1월부터 2002년 1월까지 발생한 15개의 지진목록이다. 15개의 지진이 이 기간 중에 발생한 전체 지진은 아니며, 충분히 많은 관측소에 기록되어진 지진만을 선별한 것이다. 이 중 14개 지진은 남한지역에서 발생한 지진이며 1개는 일본 히로시마 인근 해역에서 발생한 규모 6.4의 Aki-nada 지진이다.

3. 분 석

3.1 Coda normalization method

Coda normalization method는 코다파를 이용하여 진원효과나 부지효과, 혹은 전파효과의 주파수별 특성을 보는 데 유용한 방법이다. 이 방법은 지진발생 후 일정한 시간 t_c 가 지나면 지진에너지(seismic energy)는 진원주위의 일정한 부피 내에서 고르게 분포한다는 생각에 기초하고 있다. 그러므로 일정한 부피내의 다른 두 지역에서 기록된 지진파형의 상대적인 진폭은 관측소의 부지증폭 영향을 제외하면 같아야만 한다. 이를 식으로 표현하면 먼저 S-코다의 파워(power)는 식 (1)과 같이 진원, 전파, 부지효과의 컨벌루션(convolution)으로 표현될 수 있다.⁸⁾

$$\left\langle \left| \dot{u}_y^{S \text{ Coda}}(t; f) \right|^2 \right\rangle_t \propto W_i^S(f) |N_j^S(f)|^2 \frac{e^{-Q_i' 2\pi f t}}{t^n} \quad (1)$$

여기서 $\dot{u}_y^{S \text{ Coda}}(t; f)$ 는 중심주파수 f 의 주파수 대역으로 필터된 관측소 j 의 S-코다 속도 파장(velocity wavefield), $W_i^S(f)$ 는 같은 주파수 대역에서의 진원 i 에서의 에너지 방사(energy radiation), $N_j^S(f)$

는 관측소 j 의 부지증폭 계수이다. 그러므로 어느 한 부지에서의 상대적인 부지증폭 계수는 식 (2)로 나타내어 질 수 있다.

$$\frac{N_j^S(f)}{N_k^S(f)} = \sqrt{\frac{\left\langle \left| \hat{u}_{ij}^{S \text{ Coda}}(t_c; f) \right|^2 \right\rangle_T}{\left\langle \left| \hat{u}_{ik}^{S \text{ Coda}}(t_c; f) \right|^2 \right\rangle_T}} \quad (2)$$

여기서 관측소 k 는 기준이 되는 관측소로서 부지증폭효과를 최소로 받는 시추공 관측소나 암반 위에 위치한 관측소를 선정하는 것이 보통이나 본 연구에서는 15개 지진 모두를 기록한 관측소의 수가 적기 때문에 이 중에서 양질의 자료가 수집되는 대전 관측소(TJN)를 기준관측소로 선정하였다.

3.2 지진파형 포락선(Seismogram envelope)

식 (2)를 이용하기 위해서는 먼저 지진파형 포락선(seismogram envelope)을 계산해야 한다. 지진파형 포락선은 힐버트 변환(Hilbert transform)이나 지진파형의 RMS를 사용하여 얻을 수 있다. 본 연구에서는 부지증폭의 주파수별 특성을 보기 위하여 대역통과 필터(bandpass filter)를 이용하여 지진자료를 1-2Hz, 2-4Hz, 4-8Hz, 8-16Hz, 16-32Hz의 주파수 대역으로 필터한 후, 힐버트 변환을 하여 지진파형 포락선을 구하였다. 구하여진 포락선은 국지적인 최소값을 가지게 되어 식 (2)에 대입시에 증폭계수가 실제보다 크거나 작게 얻어질 수 있다. 이를 방지하기 위하여 지진파형

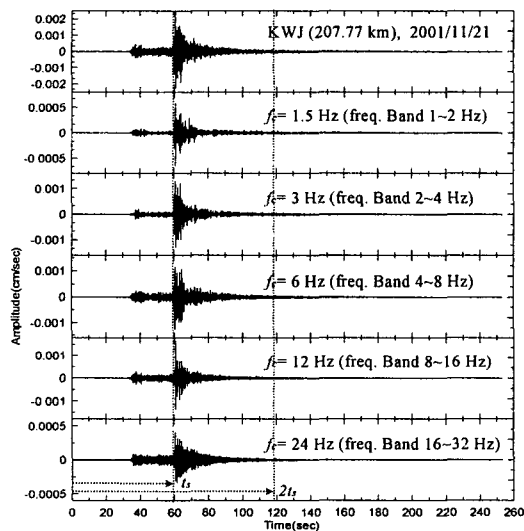


그림 2. KWJ에 기록된 2001년 11월 21일에 발생한 지진의 수직성분 속도자료. 위에서 아래로 각각 1-2Hz, 2-4Hz, 4-8Hz, 8-16Hz, 16-32Hz의 주파수 대역으로 필터되었다.

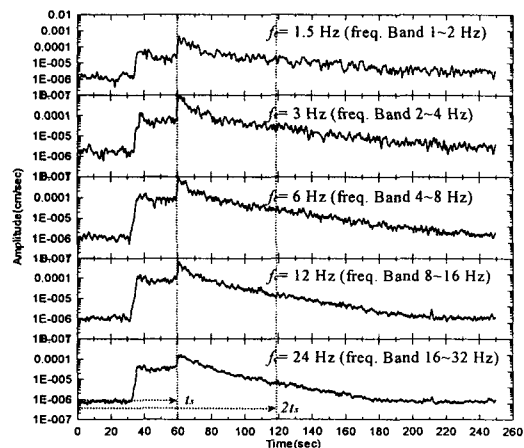


그림 3. 필터된 속도자료(그림 2)의 힐버트 변환을 통해 얻어진 지진파형 포락선. 계산된 포락곡선의 안정화를 위해 1초의 창크기로 이동평균을 하였다.

포락선을 1초의 창으로 이동평균(moving average)하였다. 그림 2와 3은 광주관측소(KWJ)에 기록된 2001년 11월 21일에 발생한 지진의 수직성분 속도자료를 각각의 주파수 대역으로 필터한 결과와 이를 힐버트 변환하여 구한 이동평균화된 지진파형 포락선이다. 점선은 각각 S파가 도달하는 시간과 이의 2배인 코다파(coda wave)가 시작되는 시간을 나타낸다.

3.3 부지증폭 계수(Site amplification factor)

관측소 j 에서의 상대적인 진폭비를 얻기 위해 기준 관측소(TJN)에 대한 이동평균화된 지진파형 포락선의 비를 계산한다. 이동평균화된 지진파형 포락선의 비를 시간에 대해 평균하면 안정화된 부지증폭 계수를 얻을 수 있다. 그림 4는 울진관측소(ULJ)(실선)와 대전관측소(TJN)(점선)에 기록된 2001년 7월 23일에 발생한 지진의 수직성분 속도자료의 지진파형 포락선(a)과 TJN에 대한 ULJ에서의 지진파형 포락선의 상대적인 진폭비(b)를 계산한 것이다. 수직 점선은 코다파가 시작되는 시간이다. 16-32Hz의 주파수 대역에 다소 잡음이 섞여 있으나 코다파가 시작되는 시간 이후로 대부분의 주파수 대역에서 진폭비가 대체로 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 그림 5는 얻어진 계수에 자연로그를 취한 값을 주파수에 따라 도시한 것으로 그 지역의 부지증폭의 주파수별 특성을 볼 수 있다. (a)의 SEO(서울)와 (b)의 SNU(서울대)는 둘 다 서울에 위치한 관측소로 서로 가깝게 설치되어 있어 지반의 지질학적 특성이 같을 뿐 아니라 지진계의 센서도 STS-2로 같기 때문에 부지증폭 계수가 거의 같게 나온다. 그러나 SNU는 관악산 밑에 암반터널을 뚫고 설치하였기 때문에 잡음이 적게 나오는 반면, SEO는 기상청 건물 지하 2층에 설치되어 있어¹⁾ 잡음의 영향으로 부지증폭 계수의 편차가 크다. (c)와 (d)는 각각 GKP(경북대), ULJ(울진)에서의 부지증폭 계수로 하나는 주파수가 커짐에 따라 증폭이 더 크게 되고 다른 하나는 증폭이 더 작아진다. 이와 같이 지역에 따라 주파수별로 특정한 부지증폭 계수를 가지게 되며 계수값의 공간적 분포를 통해 부지증폭 계수의 지역적 특성을 알아낼 수 있다.

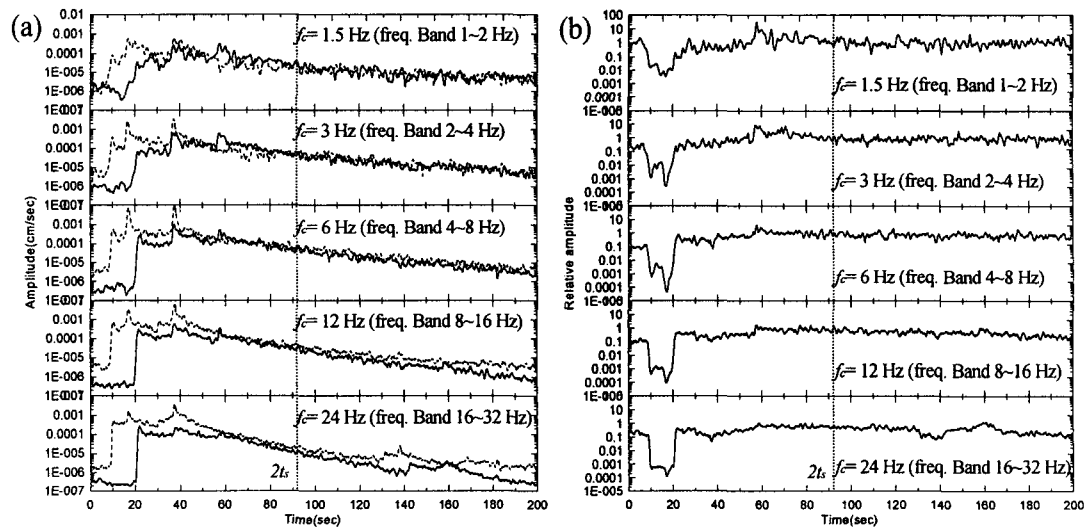


그림 4. ULJ(실선)와 TJN(점선)에 기록된 2001년 7월 23일에 발생한 지진의 수직성분 지진파형 포락선(a)과 기준 관측소(TJN)에 대한 ULJ에서의 지진파형 포락선의 상대적 진폭비(b).

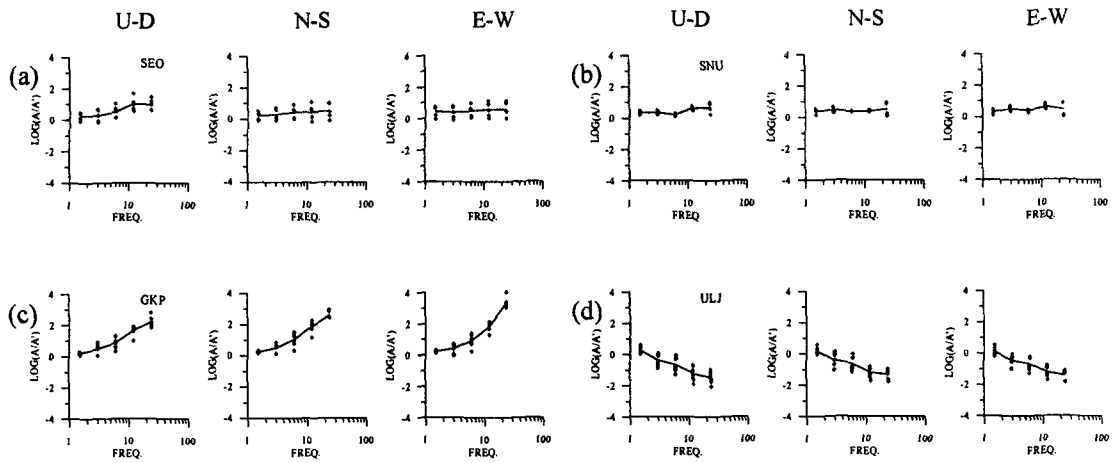


그림 5. 주파수에 따른 각 관측소에서의 부지증폭 계수. (a) SEO, (b) SNU, (c) GKP, (d) ULJ.

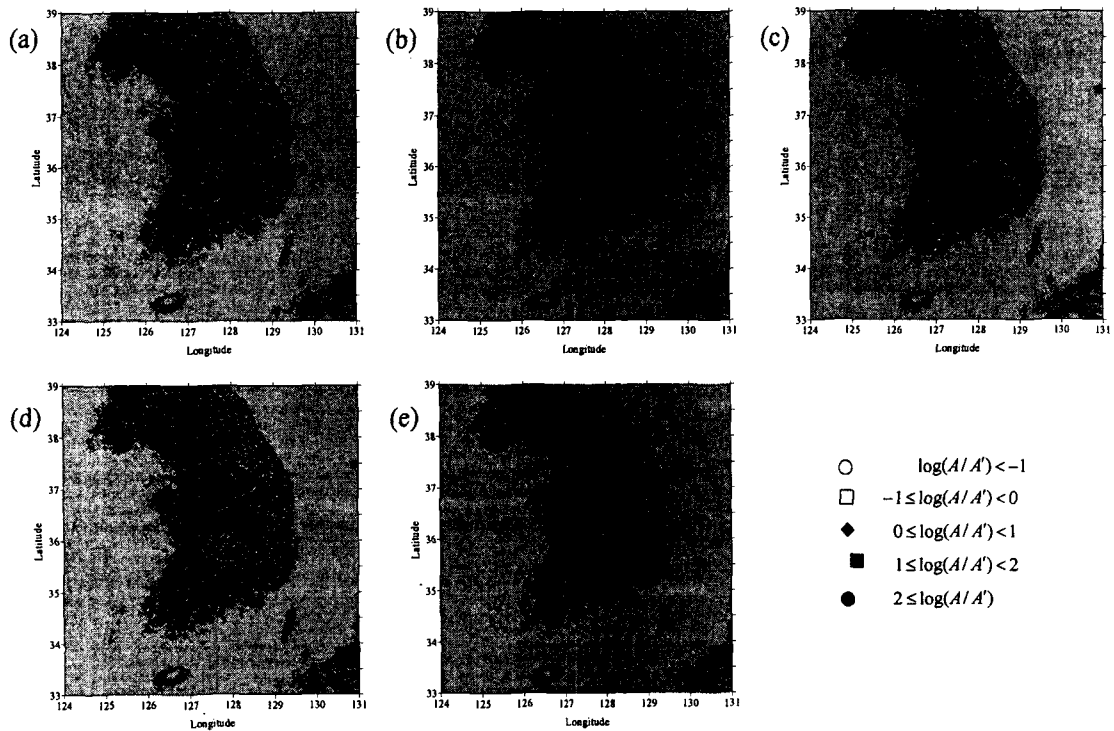


그림 6. 각 주파수별 부지증폭 계수와 공간적 분포. (a) 1-2Hz, (b) 2-4Hz, (c) 4-8Hz, (d) 8-16Hz, (e) 16-32Hz.

4. 결과 및 토의

그림 6은 각 관측소에서 구해진 계수의 지역적 특성을 보기 위해 공간적으로 도시한 것으로 (a)~(e)는 차례대로 1-2Hz, 2-4Hz, 4-8Hz, 8-16Hz, 16-32Hz의 주파수 대역에서 값이다. 1-2Hz의 주파수 대역에서 전반적으로 중서부와 남서부지역, 동해안지역에서는 계수값이 음수인 반면 동부 및 내륙지역은 양수값을 나타냈고 특히 지리산일대를 포함한 내륙지역과 제주도, 울릉도에서 큰 값을 보였다. 주파수 대역이 커짐에 따라서도 이러한 양상은 그대로 보여지고 있으나 계수의 증가정도가 내륙지역이 훨씬 더 큼을 알 수 있다. 이는 동부 및 내륙지역이 전반적으로 에너지 증폭이 서부지역에 비해 클 뿐 아니라 고주파로 갈수록 그 차이가 더 커진다는 사실을 말한다. 이런 지역적 특성의 원인이 정확히 무엇인지는 알 수 없지만 신생대 화산암지역인 제주도와 울릉도에서의 계수값이 다른 지역에 비해 상당히 큰 것을 볼 때 지반의 지질학적 특성이 그 원인중 하나라고 생각되어지며 이후 이에 대한 연구가 계속 되어져야 할 것이다.

5. 결 론

남한지역에서의 부지증폭 계수를 구하기 위하여 2001년 1월부터 2002년 1월까지 발생한 지진 중 15개 지진을 선별하여 coda normalization method를 적용하였다. 심한 잡음의 영향으로 일부 기상청 자료를 분석하는 데 어려움이 있었으나 많은 자료를 이용함으로써 남한지역에서 부지증폭 계수의 지역적 특성을 볼 수 있었다. 그 결과 내륙 및 동부지역이 해안가나 서부지역에 비해 상대적으로 에너지 증폭이 많이 되며 주파수가 커짐에 따라 증폭의 정도가 더 크게 됨을 알 수 있었다. 이 결과를 토대로 지반의 지질연대에 따른 부지증폭 계수의 특성을 파악하거나, S파를 이용하여 한반도에서의 여러 가지 감쇠에 대한 연구⁹⁾ 하는 데 활용될 수 있으며 지역에 따른 주파수 별 지진파 에너지의 증폭을 파악함으로써 구조물의 설계단계에서 내진설계를 위한 중요한 자료로 활용할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 기상청 (2001), "1978~2000 지진관측보고", 기상청, pp.22.
2. Field, E. H. and K. H. Jacob (1995), "A comparison and test of various site response estimation techniques, including three that are not reference site dependent", Bull. Seism. Soc. Am., Vol.85, pp.1127-1143.
3. Castro, R. R., J. G. Anderson, and S. K. Singh (1990), "Site response attenuation, and source spectra of S waves along the Guerrero, Mexico, subduction zone", Bull. Seism. Soc. Am., Vol.80, pp.1481-1503.
4. Aki, K. and B. Chouet (1975), "Origin of coda waves : source, attenuation and scattering effects", J. Geophys. Res., Vol.80, pp.3322-3342.
5. Phillips, W. S. and K. Aki, (1986), "Site amplification of coda waves from local earthquakes in central California", Bull. Seism. Soc. Am., Vol.76, pp.627-648.
6. Su, F. and K. Aki (1995), "Site amplification factors in central and southern California determined from Coda waves", Bull. Seism. Soc. Am., Vol.85, pp.452-466.

7. Kato, K., K. Aki, and M. Takemura (1995), "Site amplification from Coda waves : Validation and application to S-wave site response", *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.85, pp.467-477.
8. Sato, H. and M. C. Fehler, (1998), "Seismic wave propagation and scattering in the heterogeneous earth", Springer-Verlag New York, Inc.
9. Fehler, M., M. Hoshihara, H. Sato, and K. Obara, (1992), "Separation of scattering and intrinsic attenuation for the Kanto-Tokai region, Japan, using measurements of S-wave energy versus hypocentral distance, *Geophys. J. Int.*, Vol.108, pp.787-800.