

## S파 및 Coda파를 이용한 국내 관측소지반의 동적 증폭특성에 관한 연구

김준경<sup>1)</sup>

### A Study on the Dynamic Amplification Characteristics of the Domestic Seismic Observation Sites using Shear- and Coda-Wave

Junkyoung Kim

**Abstract** For more reliable estimation of seismic source, attenuation properties and dynamic ground property, site amplification function should be considered. Among various estimation methods, this study used the Nakamura's method (1989) for estimating site amplification characteristics. This method was originally applied to the surface waves of background noise and therefore there are some limitations in applying to general wave energy. However, recently this method has been extended and applied to the S wave energy successfully. This study applied the method to S wave and Coda wave energy, which is equivalent to the backscattered S wave energy. We used more than 60 observed ground motions from 5 earthquakes which were occurred recently, with magnitude range from 3.6 to 5.1. Each station showed characteristic site amplification property in low-, high- and resonance frequencies. Some of the stations showed as high as 4 times of site amplification in the range of specific frequencies, which may imply abnormal small scale geologic strata below the station or development of various trapped modes in the basin structure. Moreover, removal of site amplification can give us more reliable seismic source and attenuation parameters, addition to the seismic hazard estimation.

**Key words** Site amplification, H/V spectral ratio, Coda wave, Surface wave, Resonance frequency

**초 록** 지진원 및 지반의 동적 특성을 보다 신뢰성 있게 도출하기 위해 지반의 증폭특성은 반드시 고려되어야 하는 요소이다. 지반증폭 특성을 분석할 때 여러가지 방법이 제시되어 있으나 본 연구에서는 Nakamura (1989)에 의해 제시된 방법을 적용하였다. 본 방법은 얇은 지반의 상시미동의 표면파 특성을 이해하기 위해 제시되었으나 근래에 와서 S파 등에 적용되어 지반의 동적인 증폭 특성연구에 많이 이용되고 있다. 본 연구는 기존의 S파에 적용 뿐만 아니라 추가하여 새로이 Coda 파에 적용하여 비교 분석하였다. 최근 국내에서 관측된 5개의 중규모 지진(규모 3.6- 규모 5.1)으로 관측된 약 60여개의 관측자료를 이용하여 지진관측소에서 각각 지반의 동적인 증폭 특성을 분석하였다. 관측소마다 저진동수, 고진동수 및 우월주파수가 서로 다른 증폭특성을 보여주었다. 일부 관측소는 제한된 주파수 대역에서 약 4배의 증폭특성을 보여주고 있어 관측소 하부의 작은 규모의 기하학적 층서이상대 이거나 다양한 trapped mode 등과 같은 층서적인 특성을 유추할 수 있었다. 또한 관측지반진동에서 지반 고유의 증폭특성을 제거하면 지진원 및 비탄성감쇠 변수를 보다 신뢰성 있게 도출할 수 있다. 또한 지진재해도 평가에도 정보를 제공하는 것이 가능하다.

**핵심어** 지반증폭, H/V스펙트럼비, 코다파, 표면파, 우월주파수

#### 1. 서 론

지반증폭 특성은 지진원 특성, 지각의 비탄성 및 탄성

감쇠 특성을 포함하여 지진파의 특성을 결정하는 대단히 중요한 요소이다. 또한 지반증폭 특성의 중요성은 Loma Prieta 지진 및 멕시코 지진의 지진재해로부터 그 중요성이 입증되어 왔다(Atkinson and Cassidy, 2000).

또한 현재 국내에서 여러 종류의 구조물 내진기준에서 적용하고 있는 설계응답스펙트럼과 국내 관측소에서 실제 기록된 지반진동을 처리하여 얻어진 지반증폭 특성을 나타내는 지진응답을 비교할 경우 단주기 및 장

<sup>1)</sup> 세명대학교 교수

\* 교신저자 : kjk-512@semyung.ac.kr

접수일 : 2009년 9월 23일

심사 완료일 : 2009년 10월 8일

게재 확정일 : 2009년 10월 16일

주기 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 있기 때문이다. 하지만 앞서 언급한 미국 내진설계 기준은 기반암이 대단히 깊은 미국 서부 지역의 지반에 적합하도록 만들어졌고 또한 내진설계 실무자의 편의성을 위하여 지표로부터 단지 상부 약 30 m 까지 지층의 평균 전단파 속도를 이용하도록 되어 있다. 그러나 국내에서는 대부분의 기반암이 지표로부터 약 30 m 보다 얇게 존재하기 때문에 저주파수 대역보다 고주파수 대역에서 가속도 스펙트럼의 지반증폭이 상대적으로 크게 나타나서 현재 사용중인 미국 서부 기준을 국내에 적용하는 것은 문제점이 많다. 따라서 우선 국내의 지반특성을 고려한 국내 고유의 부지증폭 특성에 대한 연구가 필요하다. 이러한 부지효과는 부지하부 지하매질의 기하학적 형태와 물성치 및 지형 등에 영향을 받아서 관측된 지반운동의 중요한 특성치들(진폭, 주파수 성분, 지속시간 등)에 큰 영향을 주기 때문에 지진공학적인 연구에서 반드시 고려되어야 할 요소이다.

부지의 지반증폭을 연구하는 방법은 공학적인 방법과 수 km 또는 수백 km의 원거리에서 전파하여 오는 관측된 지진파를 이용하는 방법이 제시되어 있고, 여기에서는 지진파를 이용하는 방법을 적용하였다. 지진파 중에서 S파 및 Coda파 에너지를 이용하여 부지의 지반증폭을 연구하는 방법에는 여러 방법이 제시되어 있다. 첫째 분석대상 부지로부터 비교적 가까운 곳에 위치하고 노두가 양호하게 발달되어 있는 기준지점과 지반증폭 효과를 분석하고자 하는 대상 지점에서 각각 관측된 지반진동의 푸리에 스펙트럼 비율을 이용하는 기준암반 관측소(Reference Site)와 비교하는 방법이 있다. 이러한 방법은 주로 Borcherdt (1970), Rogers 외(1984), Hartzell 외(1997) 및 Bonilla 외(1997) 등에 의해 활발하게 연구되어 왔다. 하지만 이 방법은 분석대상 부지 주변 가까운 곳에 지역적으로 대표 가능한 암반이 존재하느냐 여부에 달려 있다. 두 번째는 Nakamura (1989)가 제시하였고 임의의 관측소에서 관측된 3개 성분을 이용하여 수직성분에 대한 수평성분의 비율을 이용하는 방법으로 다른 관측소의 추가적으로 지반진동을 필요로 하지 않는다. 처음에는 배경잡음을 대상으로 이 방법이 적용

되었으나 S파 에너지로 확장되어 적용한 결과 타당성이 입증되고 있다. 또한 관측소가 일정 범위의 지역내에 존재할 경우 임의 부지 그룹의 약 3-4 km 하부의 평균적인 감쇠 부분( $\kappa_s$ )을 제외한 나머지 효과의 평균을 기준값으로 이용하는 방법이 있다(Su 외, 1996, Phillips and Aki, 1986). 마지막으로 부지하부의 기하학적 모양, 전단파 속도 및 탄성임피던스를 이용하여 이론적으로 구하는 방법(Atkinson and Cassidy, 2000)을 제시하였다.

본 연구에서는 동일 관측소에서 관측된 속도 및 가속도 시간이력의 S파 모두를 이용하였으며 또한 가속도 시간이력의 Coda파 에너지 자료를 이용하였고 2번째 방법인 Nakamura (1989)가 제시한 평가방법을 적용하였다. S파 에너지(속도 및 가속도)와 coda 파 에너지를 비교를 통해 임의의 관측소에서의 지반증폭 현상에 대해 보다 신뢰성이 향상된 분석이 가능하다. 일부 관측소는 제한된 주파수 대역이지만 약 4배의 증폭특성을 보여주고 있어 작은 규모의 기하학적 층서이상대 이거나 trapped mode의 발달 등과 같은 특성을 유추할 수 있었다. 특히 Coda파 에너지를 이용한 방법은 주로 여러 연구자들(Su 외 1996, Phillips and Aki, 1986, Tucker and King, 1984)에 의해 연구가 수행되어 왔다.

## 2. 본 론

### 2.1 지반진동 지배방정식 및 방법

지반진동은 추계학적으로 평가가 가능하다고 가정하고 코너주파수 및 일정한 응력강하(stress drop)와  $\omega^{-2}$  형태의 Brune의 지진원 모델을 이용하였다. 가속도 지반진동에 대한 푸리에스펙트럼은 다음과 같이 식 (1)로 나타낼 수 있다.

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

식 (1)에서 C는 여러 가지 효과를 고려한 상수, 두번째 항은 지진모멘트, 코너주파수 등 지진원을 대표하는 항, 세번째(기하학적 지진파 감쇠) 및 네번째 항은 지진파의 광역적인 경로인 지각의 비탄성감소를 대표하는 항이다.  $P(f)$ 는 관측소 부근 약 3-4 km 하부의 탄성적인 성질을 대표한다. 관측소 직하부의 증폭특성을 대표하는  $A(f)$  필터는 지진파가 관측소 하부의 지표 가까이 얽은 심도에 존재하는 속도값이 다른 여러 층들로 이루어진 지층을 전파함에 따라 지진파의 진폭이 주파수에 따라 증폭 및 감쇠하는 현상을 대표한다. 이러한

부지 직하부에서의 증폭률은 관측소 하부의 전단파 속도, 밀도 및 층두께 등에 의해 결정된다.

배경잡음, S파 에너지 및 Coda 파 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 지진과 같은 지반진동원이 관측부지에 아주 가까이 있지 않을 경우 적용되며 관측소에서 관측된 지진파의 수직성분은 거의 증폭이 없으나 수평성분은 속도가 낮은 매질을 통과하여 전파될 때에 지표부근 지층의 속도 및 밀도의 지반매질 임피던스 차이에 의한 지반의 증폭효과가 나타나는 성질을 이용하고 있다. 따라서 Nakamura (1989)에 의하면 수직성분의 증폭효과는 거의 무시될 수 있고 수평성분과 수직성분의 스펙트럼 비를 이용하면 부지효과를 간단하고 유용하게 평가할 수 있다.

수직성분에 대한 수평성분의 스펙트럼비는 지반진동의 푸리에 스펙트럼을 이용하여 다음과 같이 주어진다.

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

여기서,  $H_1$  및  $H_2$ 는 각각의 관측소에서 관측된 남북 및 동서방향 수평성분의 푸리에 스펙트럼을 나타내고  $V$ 는 수직성분의 푸리에 스펙트럼을 나타낸다.

**2.2 연구자료**

본 연구에서 사용한 자료는 백령도, 홍도, 울진, 오대산 및 공주지역에서 발생한 지진을 포함하여 5개 지진으로부터 관측된 지반진동 자료를 이용하였다. 본 연구에서 사용된 관측자료는 표 1에 제시되어 있고 각각 지진발생일시, 진앙좌표, 진원깊이, 지진규모 및 관측소 목록을 나타내고 있다. 국내의 관측소에서 관측된 가속도 및 속도자료를 이용하였다. 표 1에서 제시된 지진을 선정한 것은 최근 발생한 지진중에서 비교적 규모가 3.0이상의 중규모급이어서 상대적으로 많은 관측소에서 관측되어 관측자료가 풍부하기 때문이다. 가속도 및 속도자료 각각에서 Coda파 에너지의 시간창의 시작점은 S파 도달시간의 2배가 되는 시점이고, 이후 약 20초 동안의 시간창의 에너지를 이용하였다. 지반증폭을 분석할 때 의미있는 주파수 대역을 설정하기 위해 지반진동이 도달하기 전 약 20초 동안의 배경잡음을 이용하여

**표 1.** 자료분석에 이용된 지진 및 관측소 목록

| EVENT NO | Date       | Lat.    | Log.     | Depth (km) | ML  | Station |   |
|----------|------------|---------|----------|------------|-----|---------|---|
|          |            |         |          |            |     | ACC     | VEL   |
| 1        | 2003.03.23 | 34.8607 | 124.3507 | 9.6        | 5.1 | ACC     | BRD,GSU,HKU,HSB,,NPR,SNU,TJN  |
|          |            |         |          |            |     | VEL     | BRD,GSU,HKU,HSB,NPR,SNU,TJN   |
| 2        | 2003.03.30 | 37.976  | 123.7992 | 4.5        | 4.8 | ACC     | BRD,BGD,GSU,HKU,HSB,NPR,SNU,TJN, KHD,KMC,SND                                |
|          |            |         |          |            |     | VEL     | BRD,BGD,GSU,HKU,HSB,NPR,SNU,TJN, CHNB,GKP1                                  |
| 3        | 2004.05.29 | 36.6572 | 130.1047 | 3.7        | 5.1 | ACC     | GKP1,GSU,HDB,HKU,HSB,JRB, KMC,KRA,KRB,NPR,SND,TJN,UJA, WSA,WSC              |
|          |            |         |          |            |     | VEL     | GKP1,GSU,HDB,HKU,HSB,JRB,NPR,SNU ,TJN                                       |
| 4        | 2007.01.20 | 37.6889 | 128.5841 | 13.1       | 4.9 | ACC     | BGD,BRD,GKP1,GSU,HDB,HKU, HSB,JRB,JSB,KHD,KMC,MGB,NPR, SND,TJN,YKB          |
|          |            |         |          |            |     | VEL     | BGD,BRD,CHNB,GKP1,GSU,HDB, HKU,JRB,JSB,KSA,MGB,NPR,SND, TJN,YKB             |
| 5        | 2008.10.29 | 36.3454 | 127.2586 | 5.7        | 3.6 | ACC     | BGD,GKP1,GSU,HDB,HSB,HWSB, JJB,JRB,JSB,KHD,KMC,KSA,NPR, SND,SNU,YGA,YGB,YKB |
|          |            |         |          |            |     | VEL     | BGD,CHNB,GKP1,GSU,HDB,HSB, HWSB,JJB,JRB,JSB,KSA,NPR,SND,SNU, TJN,YKB        |

신호대잡음 비율을 분석하였고 신호대잡음 비율값이 약 10배 이상에 해당하는 주파수 영역에 대해 증폭계수를 분석하였다.

그림 1은 2003년 3월 30일에 발생한 백령도지진에 의해 BGD(보길도) 관측소에서 관측된 지진파형으로 신호대잡음 비율이 양호하지 않은 경우의 가속도 시간 이력(그림 1(a)), 가속도 및 속도시간이력 각각 3성분의 푸리에 스펙트럼(그림 1(b)) 및 가속도 및 속도시간이력 각각 3성분(속도 및 기록도 기록) 각각의 신호대잡음비(그림 1(c))를 잘 보여주고 있다. 특히 그림 1(a)를 살펴 보면 시간이력이 고주파수 및 저주파수에 오염되어 있는 것을 알 수 있다. 그림 1(b)의 양쪽 경계의 잡음에 해당하는 주파수 대역에서 중앙 주파수 대역에 비하여 푸리에 스펙트럼값이 대단히 높다. 이는 고주파수 및 저주파수에서의 잡음에 의한 것으로 그림 1(c)의 동일 주파수 대역에서 신호대잡음 비율이 상대적으로 아주 낮은 현상과 일치한다.

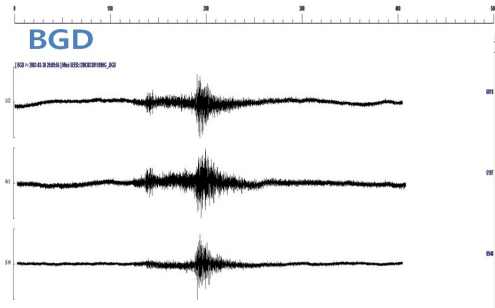
시간창에서 S파 에너지 및 Coda파 에너지를 선택하는 작업으로 인해 경계 부분에서 본래 신호영역에 포함되지 않았던 고주파 성분이 인위적으로 발생하는 것을 방지하기 위해 신호영역의 마지막 부분에 cosine tapering을 수행하였다. 또한 수평 2개 성분(NS 및 EW) 및 수직성분의 시간이력을 Analyst 프로그램을 이용하여 각각 푸리에 스펙트럼으로 변환하였다.

그림 2는 백령도지역에서 발생한 규모 4.8의 지진에 대해 홍성(HSB) 관측소에서 기록된 시간이력으로 지진 발생시간( $t_0$ ), P파 도착시간( $t_p$ ), S파 도착시간( $t_s$ ) 및 Coda파 에너지에 해당하는 시간창의 시작시간( $t_{CODA}$ )과 구간을 보여주고 있다.

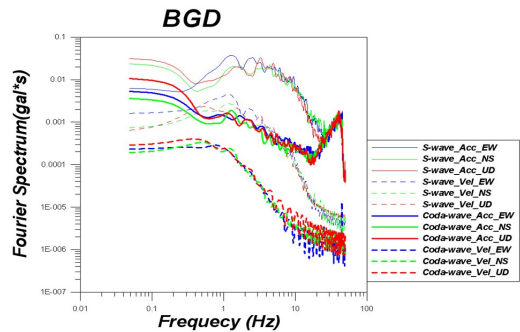
관측기록의 지진상호간 중복성이 낮아서 분석의 대상이 되는 관측소는 그다지 많이 존재하지 않았고 하나의 임의 관측소에서 적어도 4개 이상의 지진을 기록한 관측소를 비교하였으며 하나의 임의 관측소에서 지진 상호간 및 각각의 관측소 상호간의 결과를 분석하였다.

### 3. 연구결과

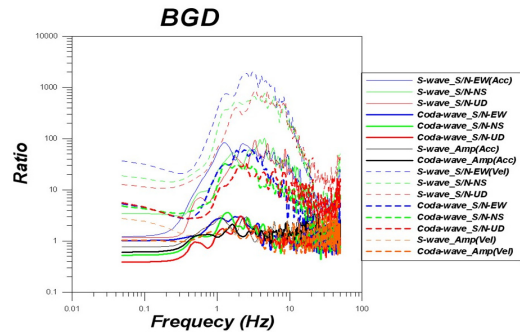
연구결과는 그림 3부터 그림 10까지 차례로 제시되어 있으며 각각의 그림에서 가로축은 주파수값을 대수적으로 표시하였고 세로축은 H/V스펙트럼비 값(S파 가속도, 속도 및 Coda파 가속도)을 대수적으로 표시하였다. 특히 효과적으로 비교하기 위해 S파 가속도의 경우 표준편차를 이용하여 상한 및 하한을 점선으로 나타내었다. 주파수의 변화에 따른 H/V스펙트럼비 값의 전체적인 변화양상을 보다 효과적으로 파악하기 위해 주파수



(a) 3성분 가속도시간이력(백령도지진)



(b) 가속도 및 속도시간이력의 푸리에 스펙트럼 (3성분 및 S, Coda파)



(c) 가속도 및 속도시간이력의 신호대잡음비 (3성분 및 S, Coda파)

그림 1. 백령도지진의 보길도관측소 자료

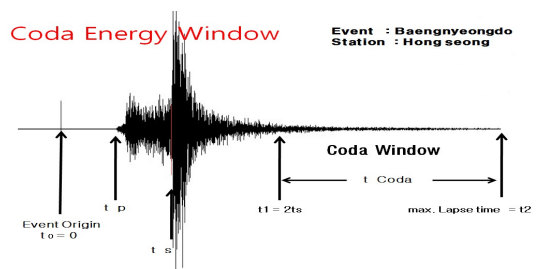


그림 2. 홍성(HSB) 관측소 가속도시간이력의 Coda파 에너지 구간(백령도지진)

영역의 이동평균을 적용하였고, 에너지 손실이 비교적 적은 것으로 알려져 있는 Pharsen 이동평균법(moving average)을 적용하였다. 이동평균의 창길이는 각각 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 및 3.0 Hz 등 6개의 다양한 주파수 영역의 창길이를 이용하여 좁은 영역 및 넓은 영역 주파수 범위에 대한 변화를 조사하였다. 이중에서 이동평균의 변화를 가장 적절하게 나타내고 있는 창길이 2.0 Hz에 대한 분석결과를 비교하였다. 또한 각각의 그림에서 여러 지진에 대한 평균값 및 표준편차값을 제시하였다.

특히 주파수 대역중에서 특히 약 0.1 Hz 부터 약 5 Hz 부근은 일반적인 건축물 및 구조물의 공진주파수와 유사하고 또한 약 1 Hz 에서 약 10 Hz 까지 대역은 국내에서 일반적으로 발생하는 지진원의 코너주파수에 해당하는 범위이므로 이 범위의 지반증폭 특성은 지진원의 정밀한 분석 뿐만 아니라 구조물의 지진재해 평가를 위해서도 대단히 중요한 주파수 대역이다. 따라서 약 1 Hz 에서 약 10 Hz 까지 대역에서 지반증폭 특성에 대한 연구는 대단히 중요한 정보를 제공한다. 그리고 10 Hz 이상의 고주파수 대역은 부지 하부 약 3 km 심도의 비탄성 감쇠와 관련된 대역이기 때문에 역시 중요한 정보를 제공한다.

지반의 증폭 원인은 일반적으로 지반하부 층서 복잡도 및 전단파 속도, 두께 등 탄성적인 특성에 의해 결정된다고 알려져 있다. 뿐만 아니라 Tucker and King (1984) 등에 의하면 관측소가 위치하고 있는 주변 지역의 지형학적 특성에 의해서도 기인된다고 제시하였다. 지형학적 굴곡중에서 산악지역의 정상부 혹은 지진파의 파장에 대비될 정도의 기하학적 규모를 가진 계곡(폭: 수 km 및 길이; 수십 km) 내에 위치할 경우 등 관측소의 지형학적 위치가 지반증폭 특성에 영향을 미친다고 제시하였다. 하지만 국내 지진관측소는 전기공급원 등을 고려하여 비교적 완만한 지형에 설치되어 있어 산악 및 계곡 등 지형적 분포에 의한 영향을 고려할 필요가 없는 것으로 판단하였다. 또한 Su 등(1996)는 S파 에너지에 비해 시간적으로 보다 뒷부분에 도달하는 또다른 에너지인 Coda파 에너지를 이용한 지반증폭 특성과 S파 에너지를 이용한 지반증폭 특성 결과가 거의 유사하다고 제시하고 있다.

그림 3은 HSB(홍성) 관측소 지반증폭 분석결과이며 약 50 Hz 부근에서 표준편차 값이 급격하게 증가하고 있는 현상을 보여주고 있다. 이는 이 주파수 대역에서 신호대잡음비가 아주 낮은 것으로 확인되어 이에 의한 영향으로 분석된다. 또한 평균에서 표준편차를 제외한 값은 저주파수 대역에서 이상한 특징을 보여주고 있으나 표준편차 값이 1 보다 훨씬 커서 마이너스 값이 되

어 로그스케일로 나타내기 불가능하였다. 또한 여타 관측소에 비해 특히 저주파수 대역에서 표준편차 값이 큰 것을 보여주고 있어 자료수를 증가시켜 신뢰성을 확보하는 것도 필요하다. 약 1 Hz 까지는 약 4의 증폭값을 보여주고 있으나 1 Hz에서 10 Hz의 범위에서는 약 1의 값을 보여 주고 있다. 약 10-20 Hz사이에서 뚜렷하게 값이 다른 탁월주파수를 보여주고 있다. S파 에너지의 가속도, 속도 및 Coda 파 에너지 모두에서 동일한 특징을 보여주고 있다. 또한 속도 기록을 이용한 결과 역시 가속도기록을 이용한 결과와 하부 표준편차 범위를 교차하면서 유사한 굴곡패턴을 보여주고 있다. 마지막으로 Coda파 에너지를 이용한 결과는 S파 에너지의 결과와 전체 주파수 대역에서 변화의 패턴이 유사하며 S파 에너지의 표준편차 범위내에서 변화하는 값을 보여주고 있고 약 10 Hz까지 약 1과 같은 안정된 값을 보여주고 있다. 따라서 Su 외(1996) 등이 제시한 바와 같이 Coda파와 S파의 증폭특성이 상호 유사하다는 것을 확인할 수 있었다.

GKP1(경북대)관측소는 약 50 Hz 부근에서 지반증폭 값이 급격하게 증가하고 있는 현상을 보여주고 있다. 역시 신호대잡음비에 의한 영향으로 분석된다(그림 4). 특히 GKP1 관측소는 약 10 Hz 이상부터 점점 증가하여 약 20-30 Hz 부근에서 3-4배 정도의 값까지 증가하고 있는 현상을 나타내고 있으나 10 Hz이하에서는 1과 2 배 사이의 값을 보여 주고 있다. 이러한 특징은 오대산 지진파형 중에서 S파 에너지를 이용하여 분석한 김준경(2009)에서 역시 유사하게 제시되고 있다. 고주파 대역의 높은 증폭 특징은 여러 가지 가능성이 있으나 이는 Phillips and Aki (1986)가 제시한 바와 같이 입사된 지진파가 대구 분지에서 지질구조적 이유로 인하여 trapped mode의 활성화에 의한 영향이거나 파장길이 등을 고려할 때 아주 작은 기하학적 규모의 관측소 하부 층서구조에 의한 가능성일 수도 있다. 또한 속도 기록을 이용한 결과는 가속도기록을 이용한 결과와 비교할 때 전체적으로 하한 표준편차 값을 벗어나고 있고 증폭값은 낮으나 굴곡의 패턴은 유사한 경향을 보여주고 있다. Coda파 에너지를 이용한 결과는 1 Hz 부근에서 하부 경계를 넘어서는 경향도 보이고 있으나 S파 에너지의 결과와 전체 주파수 대역에서 변화의 패턴이 유사하며 S파 에너지의 표준편차 범위내에서 변화하는 값을 보여주고 있다.

GSU(경상대) 관측소 역시 공통적으로 약 50 Hz 부근에서 지반증폭값이 급격하게 증가하고 있는 현상을 보여주고 있다(그림 5). 하지만 20 Hz 이하의 전체 주파수 대역에서 1과 2사이의 안정된 증폭값을 보여주고

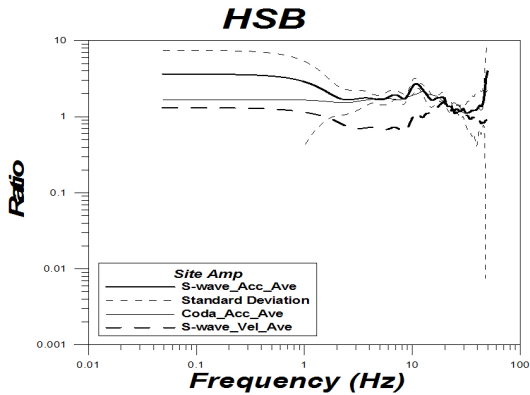


그림 3. HSB(홍성) 관측소의 지반증폭(가속도 및 속도 S파, Coda파)

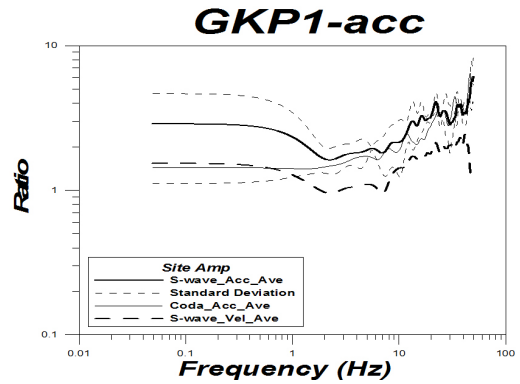


그림 4. GKP1(경북대)관측소의 지반증폭(가속도 및 속도 S파, Coda파)

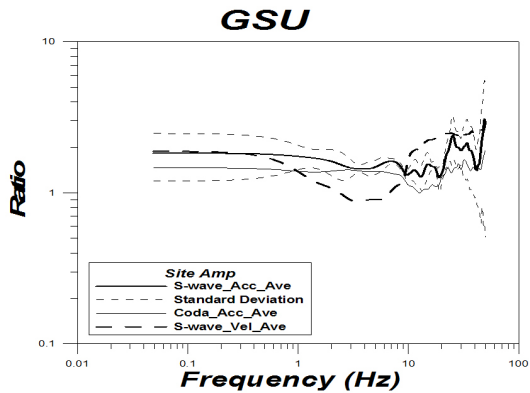


그림 5. GSU(경상대)관측소의 지반증폭(가속도 및 속도 S파, Coda파)

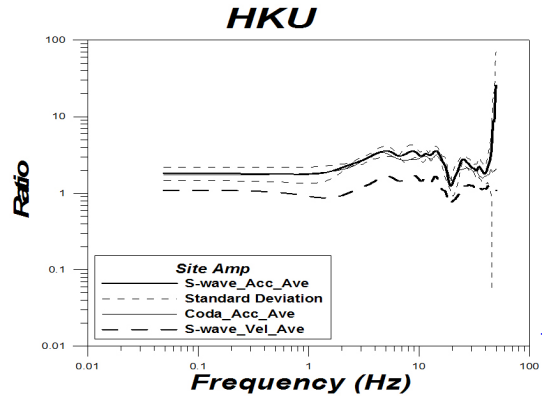


그림 6. HKU(교원대)관측소의 지반증폭(가속도 및 속도 S파, Coda파)

있다. 속도기록을 이용한 경우 약 1 Hz 부터 약 10 Hz의 대역에서 가속도 보다 작은 값을 유지하고 가속도 기록과 매우 다른 패턴을 보여주고 있다.

그림 6은 HKU(교원대)의 지반증폭값을 보여주고 있으며 1 Hz 까지 약 2배의 값을 보여주나 약 2 Hz 부터 약 15 Hz 까지 약 4배의 높은 증폭값을 보여주고 있다. 속도기록을 이용한 결과는 전체 주파수 대역에서 유사한 굴곡 패턴을 유지하면서 가속도기록 보다 낮은 증폭값을 보여주고 Coda파를 이용한 경우는 거의 동일한 증폭값을 보여주고 있다. 이러한 지반증폭 특성은 오대산 지진파형 중에서 S파 에너지를 이용하여 분석한 김준경(2009)에서 역시 유사하게 제시되고 있다. 이는 Phillips and Aki (1986)가 제시한 바와 같이 파장길이 등을 고려할 때 아주 작은 기하학적 규모의 관측소 하부 층서 구조에 의한 가능성일 수도 있으나 약 2 Hz 부터 약 15 Hz 까지 주파수범위가 비교적 광범위하기 때문에 청주 분지에 입사된 지진파가 지질구조적으로 trapped mode

의 활성화에 의한 영향일 가능성이 더욱 크다.

그림 7은 NPR(나포리) 관측소의 결과이며 약 10 Hz에서 20 Hz 부근의 범위에서 3배의 값을 보여주고 이외의 주파수 대역에서는 1과 2사이의 안정된 증폭값을 보여주고 있다. 또한 속도기록을 이용한 경우는 전체 주파수 범위에서 유사한 굴곡 패턴을 유지하면서 가속도 기록 보다 증폭값이 작고, Coda파를 이용한 경우는 표준편차 범위내에서 가속도 기록 결과와 상호 교차하고 있다.

그림 8 및 9는 SND 및 SNU의 2개 관측소의 지반증폭 특성을 보여주고 있다. 2개 관측소 상호 유사한 지반증폭 특성을 잘 보여 주고 있다. 전체주파수 대역에서 1과 2사이의 증폭값을 보여주고 또한 속도기록은 가속도 기록에 의한 결과와 대단히 유사한 굴곡 패턴을 유지하면서 증폭값이 항상 작다. 또한 Coda파를 이용한 경우는 표준편차 범위 내에서 가속도 기록에 의한 증폭과 교차하고 있다.

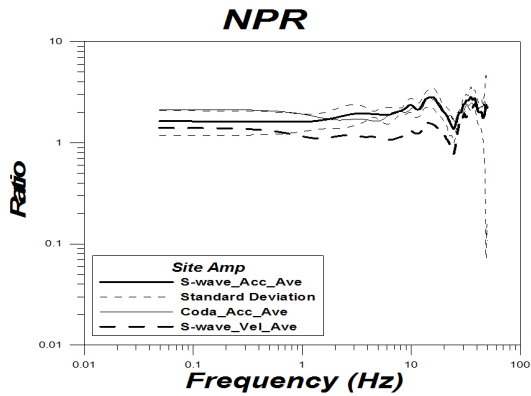


그림 7. NPR(나포리)관측소의 지반증폭(가속도 및 속도 S파, Coda파)

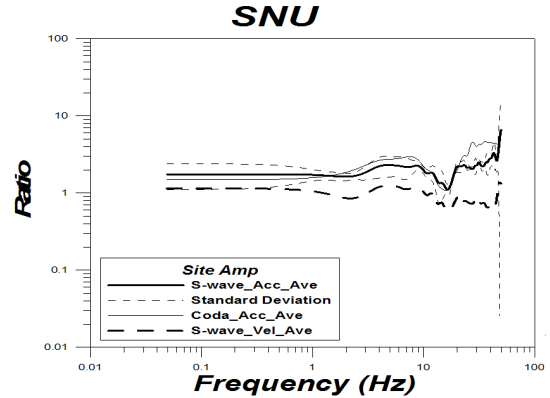


그림 8. SNU(서울대)관측소의 지반증폭(가속도 및 속도 S파, Coda파)

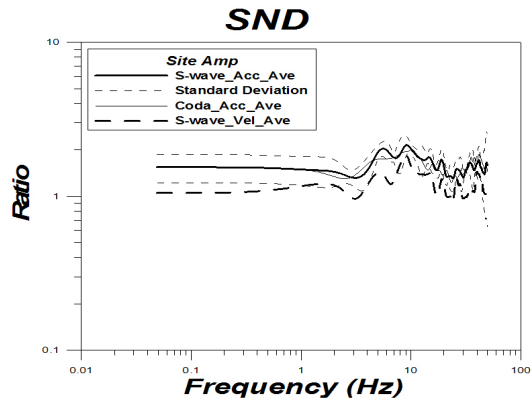


그림 9. SND(상동)관측소의 지반증폭(가속도 및 속도 S파, Coda파)

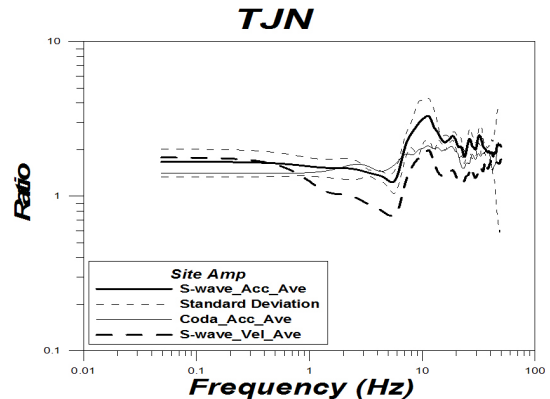


그림 10. TJN(대전)관측소의 지반증폭(가속도 및 속도 S파, Coda파)

그림 10는 TJN(대전)의 지반증폭값을 나타내며 가속도 기록의 경우 약 10 Hz -20 Hz 범위에서 약 3배의 증폭값을 보여주고 이외의 주파수 대역에서는 1과 2배 사이의 증폭값을 보여주고 있다. 따라서 앞서 제시한 HKU 및 GKP1에서 제시된 증폭 가능성을 유추할 수 있다. 또한 속도기록의 경우 저주파수에서 교차하고 교차 이후에는 유사한 굴곡 패턴을 유지하면서 증폭값이 항상 작고 Coda파를 이용한 경우는 표준편차 범위내에서 가속도 기록에 의한 증폭과 교차하고 있다.

#### 4. 결론

지반증폭은 광범위한 전체 주파수 대역에서 대단히 중요하며, 특히 지진파형의 파장길이와 국내의 일반적인 지반깊이 등을 고려할 때 Phillips and Aki (1986)가 제시한 바와 같이 약 10 Hz 이상의 고주파수 대역의 지반

증폭도 대단히 중요하다. 또한 고주파수 대역에서 지반증폭값의 부분적인 피크가 있을 경우 고주파수 대역의 중요성이 더욱 강조된다. 가속도기록을 이용한 지반증폭은 HKU 관측소의 경우 약 2 Hz 부터 약 15 Hz 까지 약 4배의 증폭값을 보여주고 있어 일부 주파수 대역이지만 분석대상 관측소중에서 가장 높은 지반증폭 값을 보여 주었다. 또한 GKP1의 경우도 약 20-30 Hz 부근에서 3배의 값까지 증가하고 있는 현상을 나타내고 있다. 이러한 특징은 Phillips and Aki (1986)가 제시한 바와 같이 입사된 지진파가 대구 및 청주분지에서 지질구조적으로 trapped mode의 활성화에 의한 영향이거나 파장길이 등을 고려할 때 비교적 작은 기하학적 규모의 관측소 하부 층서구조에 의한 가능성일 수도 있다. 하지만 향후 여타 방법론을 이용하여 체계적인 연구가 필요하다 생각된다. 이를 제외한 다른 관측소의 경우 20 Hz이상의 고주파수 및 1 Hz이하의 저주파수 대역

에서 예외는 있으나 약 1 Hz에서 약 10 Hz의 주파수 대역에서는 약 1배에서 약 2배의 증폭값 범위를 보여 주고 있다.

속도기록을 이용한 지반증폭 특성은 일부 관측소에서 0.1 Hz 이하의 아주 낮은 주파수 대역에서 상호 교차되는 경우도 있으나 이를 제외한 전체 주파수 대역에서 유사한 굴곡 패턴을 유지하면서 가속도기록을 이용한 지반증폭 결과보다 상대적으로 낮은 증폭값을 일관성 있게 보여 주었다. 따라서 지반증폭 절대값 자체도 중요하지만 주파수별 지반증폭 패턴을 확인하기 위해 속도기록을 이용한 지반증폭 특성을 부가적으로 이용하면 중요한 역할을 할 수 있다고 분석된다.

또한 Coda파를 이용한 경우 증폭 특성은 가속도 기록의 지반증폭의 표준편차 범위내에서 가속도 기록에 의한 증폭값과 교차하고 대부분의 관측소에서 표준편차 범위내에서 존재하고 있어 S파 에너지에 부가하여 Coda파를 추가적으로 이용한다면 보다 신뢰성을 향상시킬 수 있는 지반증폭 특성을 얻을 수 있는 것으로 분석된다.

따라서 지진원 및 지각의 비탄성감쇠 특성 분석을 위해 HKU 관측소의 지반진동을 이용할 때 사전에 자료 보정이 필요하다. 그리고 GKP1 관측소의 부지하부 약 3-5 km 정도의 비탄성감쇠 특성을 분석할 때 약 20 Hz 이상 대역에서 충분한 보정이 필요한 것으로 분석된다.

## 감사의 글

본 연구는 2009년도 기상지진개발사업단의 “기상지진기술개발사업(CARTER 2007 -5109)”에 의한 것이며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 김준경, 2009, 오대산지진 자료를 이용한 국내 관측소 부지의 증폭특성 연구, 한국지진공학회 논문집, 13, 1, 27- 34.
2. Atkinson, G. M. and John F. Cassidy, 2000, Integrated Use of seismograph and strong-motion data to determine soil amplification: response of the Fraser River Delta to the. Duvall and Georgia Strait Earthquakes, Bull. Seism. Soc. Am. 90, 4, 1028-1040.
3. 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, 3, 710-730.
4. Borchardt, R., 1970, Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay, Bull. Seism. Soc. Am. 60, 1, 29-61.
5. Hartzell, S., E. Cranswick, Frankel, D. Carver, and M. Meremonte, 1997, Variability of site response in the Los Angeles Urban area, Bull. Seism. Soc. Am. 87, 6, 1377-1400.
6. ICBO, 1997, Uniform Building Code, Volume 2- Structural Engineering Design Provisions, International Conference of Building Officials, 1997, pp 492.
7. Nakamura, Y., 1989, A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, QR RTRI 30, 1, 25-33.
8. NEHRP, 1997, Recommended provisions for seismic regulation for new building and other structures, FEMA 302/303, part 1 (Provisions) and Part 2 (Commentary).
9. Phillips, S. C. and Keiiti Aki (1986), Site amplification of coda waves from local earthquakes in Central California, Bull. Seism. Soc. Am. 76, 3, 627-648.
10. 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, 5, 1925-1949.
11. Su, F, John G., Anderson, James N., Brune, and Yuehua Zeng, 1996, A Comparison of Direct S-Wave and Coda-Wave site amplification determined from aftershocks of the Little Skull Mountain Earthquake, Bull. Seism. Soc. Am. 86, 4, 1006-1018.
12. Tucker, B. D, and J. L. King, 1984, Dependence of sediment-filled valley response on input amplitude and valley Properties, Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 74, No. 1, pp. 153-165.



### 김 준 경

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

Tel: 043-649-1319

E-mail: kimjkl@unitel.co.kr

현재 세명대학교 공과대학 소방방재학과 교수