

Coda파를 이용한 국내 관측소지반의 동적 증폭특성에 관한 연구

A Study of the Dynamic Amplification Characteristics of the Domestic Seismic Observation Sites Using Coda Wave

김 준 경¹⁾ · 이 준 대[†]

Kim, Junkyoung · Lee, Jundae

ABSTRACT : For more reliable estimation of soil-structure interaction and seismic source and attenuation properties, site amplification function should be considered. This study use the Nakamura's method (1989) for estimating site amplification though various methods for the same purpose have been proposed. This method was originally applied to the surface waves of background noise and therefore there are some limitation for applications 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 the coda wave energy which is equivalent to the backscattered S wave energy. We used more than 60 observed ground motions from 5 earthquakes which occurred recently, with magnitude range from 3.6 to 5.1 Each station showed characteristic site amplification property in low-, high- and resonance frequency ranges. In the case of comparing these results to those from S wave energy, lots of information to the site classification work can be gained. Moreover, removal of site amplification can give us more reliable seismic source parameters.

Keywords : Site amplification, H/V spectral ratio, Surface wave, Resonance frequency

요 지 : 지진원 및 구조물과 지반상호간의 동적 특성을 보다 신뢰성 있게 도출하기 위해 지반의 증폭특성은 반드시 고려되어야 하는 요소이다. 지반증폭 특성을 분석할 때 여러 가지 방법이 제시되어 있으나 본 연구에서는 Nakamura(1989)에 의해 제시된 방법을 적용하였다. 본 방법은 얇은 지반의 상시미동의 표면파 특성을 이해하기 위해 제시되어 한계점이 존재하나 근래에 와서 S파 등에 적용되어 지반의 동적인 증폭 특성연구에 많이 이용되고 있다. 일반적으로 S파가 이용되고 있으나 본 연구에서는 지진파 에너지 지인 Coda 파에 새로이 적용하였다. 최근 국내에 설치된 지진 관측기에 관측된 5개 지진(규모 3.6-5.1)의 약 60 여개의 관측자료를 이용하여 지진관측소 각각 지반의 동적인 증폭 특성을 분석하였다. 관측소마다 저진동수, 고진동수 및 우월주파수가 서로 다른 증폭 특성을 보여주었다. 본 연구 결과 관측지반진동에서 지반 고유의 증폭특성을 제거하면 지진원 변수를 보다 신뢰성 있게 도출할 수 있다.

주요어 : 지반증폭, H/V스펙트럼비, 표면파, 우월주파수

1. 서 론

지반증폭 특성은 지진원특성, 지각의 비탄성 및 탄성감쇠 특성을 포함하여 지진파의 특성을 결정하는 대단히 중요한 요소이다. 또한 지반증폭 특성에 대한 중요성은 미국 샌프란시스코 지진, 멕시코 지진(1985) 및 일본 효고현 지진(1996)의 지진재해로부터 그 중요성이 입증되어 왔다(Atkinson 등, 2000).

우리나라의 경우 현대적 장비를 이용한 지진관측 이후 6.0 이상의 대규모의 지진이 거의 발생하지 않은 중약진 지역이기 때문에 관측된 지진파형 자료가 충분하지 못하다. 이러한 이유 때문에 미국의 1997 National Earthquake Hazard Reduction Program(1997, NEHRP) 및 1997 Uniform Building

Code(1997, UBC) 내진설계기준을 준용하고 있다. 하지만 최근 여러 연구결과에 의하면 국내에서 관측된 지진파를 이용하여 얻어진 응답스펙트럼은 단주기 및 장주기 대역의 특성값에서 미국과 비교할 때 많은 차이를 보여주고 있다. 따라서 미국 기준을 비판없이 준용하기 보다는 우선 국내의 지진원, 지각감쇄 및 지반특성을 종합적으로 고려하여 국내 고유의 부지 증폭 특성에 대한 연구가 필요하다.

비교적 깊은 심도의 부지의 지반증폭을 연구하기 위해 원거리에서 전파하여 오는 관측된 지진파를 이용하는 방법을 적용하였다. 원거리 지진파 중에서 S파 및 Coda파 에너지(Kato 등, 1995)를 이용하여 부지의 지반증폭을 연구하는 방법에는 개략적으로 3가지 방법이 제시되어 있다. 첫째, 우선 노두가 양호하게 발달되어 있고 분석대상 부지로부터 비

1) 정희원, 세명대학교 소방방재학과 교수

† 정희원, 세명대학교 토목공학과 교수(E-mail : jdlee@semyung.ac.kr)

교적 가까운 곳에 위치하는 기준지점과 지반증폭 효과를 분석하고자 하는 대상 지점에서 각각 관측된 지반진동의 푸리에 스펙트럼 비율을 이용하는 기준암반관측소(Reference Site)와 비교하는 방법이 있다. 이러한 방법은 Borchardt(1970), Rogers 등(1984), Harzell 등(1997) 및 Bonilla 등(1997) 등에 의해 활발하게 연구되어 왔다. 2번째 방법은 Nakamura(1989)가 제시하였고 임의의 관측소에서 관측된 3개 성분을 이용하여 자체 수직성분에 대한 자체 수평성분의 비율을 이용하는 방법으로 다른 기준이 되는 관측소의 지반진동을 필요로 하지 않는다. 이 방법도 처음에는 배경잡음을 대상으로 하였으나 S파 에너지로 확장되었다. 마지막으로 부지하부의 기하학적 모양, 전단파 속도 및 탄성임피던스를 이용하여 이론적으로 지반 증폭특성을 구하는 방법(Boore 등, 1997) 등이 있다.

본 연구에서는 가속도 시간이력을 이용하였으며 이 중에서 3개 성분의 coda파 에너지를 이용하고 2번째 방법인 Nakamura(1989)가 제시한 방법을 적용하였다. 동일한 시간이력 중에서 S파 에너지에 비해 시간적으로 보다 뒷부분에 도달하는 또 다른 지진파 에너지인 coda파 에너지를 이용하였고 결과를 S파 에너지를 이용한 기존의 결과와 비교하면 임의 관측소에서의 지반증폭 현상에 대해 보다 신뢰성이 향상된 분석이 가능하다. coda파 에너지를 이용한 방법은 여러 연구자(Su 등, 1996; Phillips 등, 1986; Tucker 등, 1984)에 의해 연구가 수행되어 왔다.

2. 본 론

2.1 관측된 지진파 모델(주파수 영역)

지반진동은 추계학적으로 평가가 가능하다고 가정하고 코너주파수 및 일정한 응력강하(stress drop)와 ω^{-2} 형태의 Brune의 지진원 모델(Su 등, 1996)을 이용하였다. 가속도 지반진동에 대한 푸리에스펙트럼은 다음과 같이 $a(f)$ 로 나타낼 수 있다.

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

식 (1)에서 C는 여러 가지 효과를 고려한 상수, 2번째 항에서 f는 주파수, M_0 는 지진모멘트, f_0 는 코너주파수, R은 진앙거리 등 지진원을 대표하는 항, 3번째(기하학적 지진파 감쇠)항에서 β_0 는 진원부근 전단파 속도, $Q(f)$ 는 Quality 요소를 나타내며, 마지막으로 4번째 항은 지진파의 광역적인 경로인 지각의 비탄성감소를 대표하는 항이다. $P(f)$ 는 관

측소 부근 약 3-4km 하부의 탄성적인 성질을 대표한다. 관측소 직하부의 증폭특성을 대표하는 $A(f)$ 필터는 지진파가 관측소 하부의 지표 가까이 얇은 심도에 존재하는 속도 값이 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.

2.2 연구 방법

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 비율 이용하면 부지효과를 간단하고 유용하게 평가할 수 있다.

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

$$\log\left(\frac{H}{V}\right) = \frac{\log(H_1^2 + H_2^2)}{2} - \log V \quad (2)$$

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

2.3 연구자료

본 연구에서 사용한 자료는 백령도, 홍도, 울진, 오대산 및 공주지역에서 발생한 지진을 포함하여 5개 지진으로부터 관측된 지반진동 자료를 이용하였다. 본 연구에서 사용된 관측 자료는 표 1에 제시되어 있고 각각 지진발생일시, 진앙좌표, 진원깊이, 지진규모 및 관측소 목록을 나타내고 있다. 국내의 관측소에서 관측된 가속도 자료를 이용하였다. 본 연구를 위해 표 1에서 제시된 지진을 선택한 것은 최근 발생한 지진중에서 비교적 규모가 중규모급이어서 상대적으로 많은 관측소에서 관측되어 관측자료가 풍부한 지진을 선택하였다. 이중에 최근 발생한 공주 지진도 포함시켰다.

가속도 자료 각각에서 coda파 에너지의 시간창의 시작점

표 1. 자료분석에 이용된 지진 및 관측소 목록

EVENT NO	Date	Lat.	Log.	Depth (km)	M _L	Station	
1	2003.03.23	34.8607	124.3507	9.6	5.1	ACC	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
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
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
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

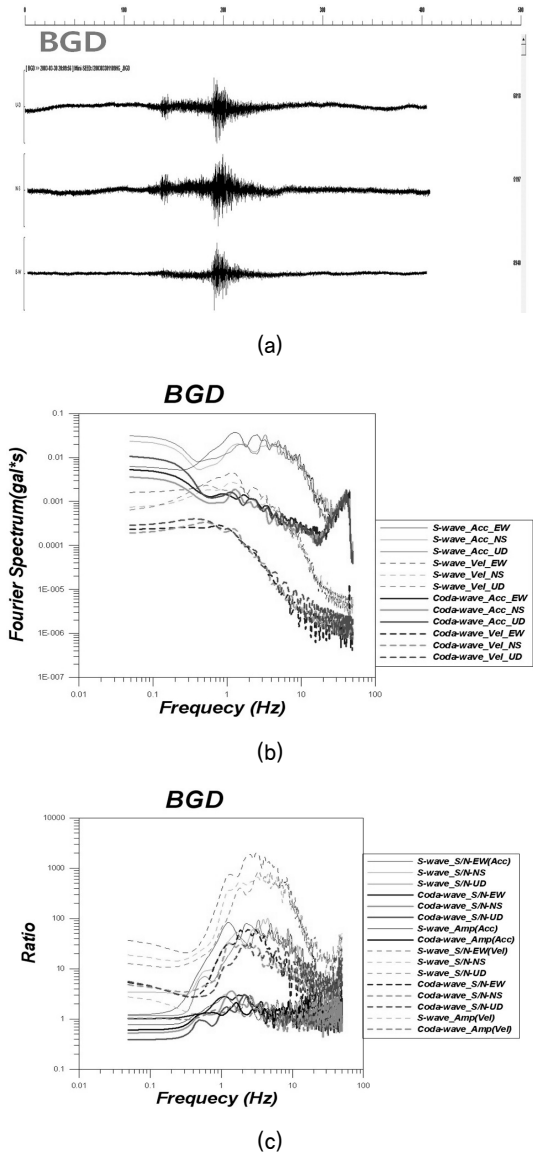


그림 1. (a) 보길도관측소 가속도시간이력(백령도지진), (b) 백령도지진의 보길도관측소 가속도 및 속도시간이력의 푸리에 스펙트럼(3 성분 및 S & Coda파), (c) 백령도지진의 보길도관측소 가속도 및 속도시간이력의 신호대잡음비(3성분 및 S & Coda파)

은 S파 도달시간의 2배되는 시점이고, 이후 약 20초 동안의 시간창의 에너지를 이용하였다. 지반증폭을 분석할 때 의미 있는 주파수 대역을 설정하기 위해 지반진동이 도달하기 전

약 20초 동안의 배경잡음을 이용하여 신호대 잡음 비율을 분석하였고 신호대 잡음 비율값이 약 10배 이상에 해당하는 주파수의 영역에 대해 증폭계수를 분석하였다.

그림 1은 2003년 3월 30일에 발생한 백령도지진에 대해 BGD(보길도) 관측소에서 관측된 지진파형으로 신호대 잡음 비율이 양호하지 않은 경우의 가속도 시간이력(1(a)), 가속도 및 속도시간이력 각각 3성분의 푸리에 스펙트럼(1(b)) 및 가속도 및 속도시간이력 각각 3성분 각각의 신호대잡음비(1(c))를 잘 보여주고 있다. 특히 그림 1(a)를 살펴보면 시간이력이 고주파수 및 저주파수에 오염되어 있는 것을 알 수 있다. 여기서 x축 단위는 시간축으로서 sec. 이며 y축은 counts로서 변환과정을 통해 가속도 단위로 변환된다. 그림 1(b)의 양쪽 경계 주파수 대역에서 중앙 주파수 대역에 비하여 푸리에 스펙트럼 값이 대단히 높다. 이는 고주파수 및 저주파수에서의 잡음에 의한 것으로 그림 1(c)의 이 대역에서 신호대 잡음 비율이 상대적으로 아주 낮은 현상과 일치한다. 그림 2는 2003년 3월 30일에 발생한 백령도지진으로부터 NPR(나포리) 관측소에서 관측된 지진파형으로 신호대 잡음 비율이 대단히 양호한 가속도 시간이력(2(a)), 가속도 및 속도시간이력 각각 3성분의 푸리에 스펙트럼(2(b)) 및 가속도 및 속도시간이력 각각 3성분 각각의 신호대잡음비(2(c))를 잘 보여주고 있다. 하지만 동일한 지진에 의해 나포리(NPR) 관측소에서 관측된 지진파형의 푸리에 스펙트럼은 저주파수 및 고주파수 경계에서는 아주 낮은 값을, 중간 대역에서는 아주 높은 값을 보여주고 있어 그림 1(c)와 대조적이다.

시간창에서 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 3은 2003년 3월 30일 백령도지역에서 발생한 규모 4.8의 지진에 대해 나포리(NPR) 관측소에서 기록된 시간이

력으로 지진발생시각(t_0), P파 도착시각(t_p), S파 도착시각(t_s) 및 coda파 에너지 시간창의 시작점 및 끝(t_1, t_2)과 구간을 보여주고 있다.

관측기록의 지진상호간 중복성이 낮아서 분석의 대상이

되는 관측소는 적었지만 하나의 임의 관측소에서 적어도 4개 이상의 지진을 기록한 관측소를 비교하였으며 하나의 임의 관측소에서 지진상호간 및 각각의 관측소 상호간의 결과를 분석하였다.

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

주파수 대역 중에서 특히 약 5Hz 부근은 일반적인 건축물 및 구조물의 공진주파수와 유사하고 또한 약 1Hz에서 약 10Hz 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 1Hz에서 약 10Hz 까지 대역에서 지반증폭 특성에 대한 연구는 대단히 중요한 정보를 제공한다.

지반의 증폭 원인은 일반적으로 지반하부 층서 복잡도 및 전단파 속도, 두께 등의 특성에 의해 결정된다고 알려져 있다. 뿐만 아니라 Tucker 등(1984) 등에 의하면 관측소가 위치하고 있는 주변 지역의 지형학적 특성에 의해서도 기인된다고 제시하였다. 지형학적 굴곡중에서 산악지역의 정상부 혹은 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 산악 및 계곡 등 지형적 분포에 의한 영향을 고려할 필요가 없는 것으로 판단하였다. 또한 Su 등(1996)은 동일한 지진파의 시간이력 중에서 S파 에너지에 비해 시간적으로 보다 뒷부분에 도달하는 또 다른 에너지인 coda파 에너지를 이용한 지반증폭 특성과 S파 에너지를 이용한 지반증폭 특성 결과와 거의 유사하다고 결과를 제시하고 있다.

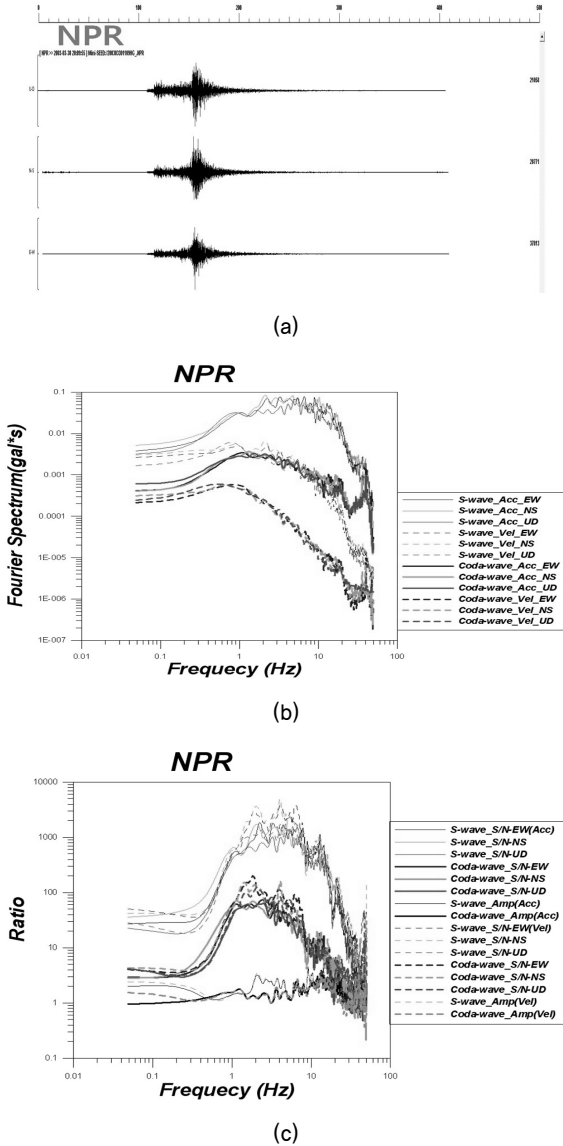


그림 2. (a) 나포리관측소 가속도시간이력(백령도지진), (b) 백령도지진의 나포리관측소 가속도 및 속도시간이력의 푸리에 스펙트럼(3성분 및 S & Coda파), (c) 백령도지진의 나포리관측소 가속도 및 속도시간이력의 신호대잡음비(3성분 및 S & Coda파)

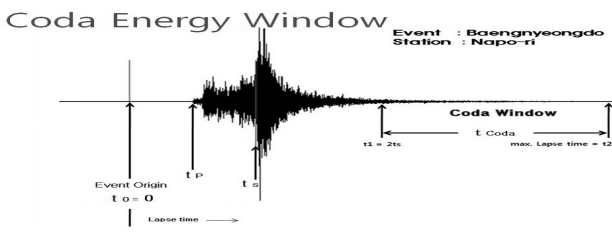
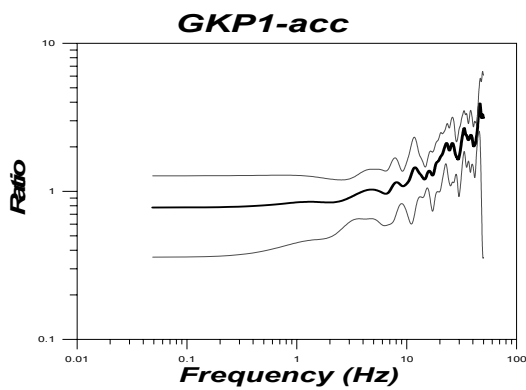
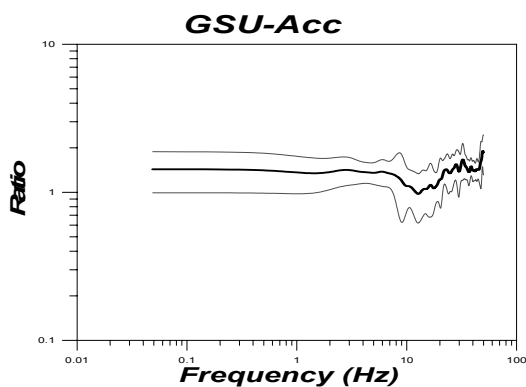


그림 3. 나포리(NPR) 관측소 가속도시간이력의 Coda파 에너지 구간(백령도지진)

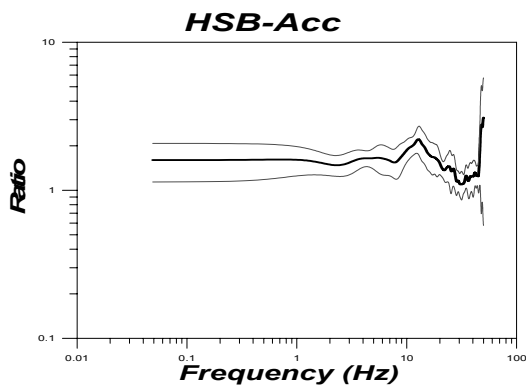
그림 4에서 GKP(경북대)1, GSU(경상대) 및 HSB(홍성) 관측소는 공통적으로 약 50Hz 부근에서 지반증폭값이 급격하게 증가하고 있는 현상을 보여주고 있다. 특히 GKP1 관측소는 약 10Hz 이상부터 점점 증가하여 약 50Hz 부근까지 증가하고 있는 현상을 나타내고 있다. 시간적인 관련성을 조사하기 위해 2003부터 2009까지 약 5년 간에 걸쳐서 발생한 4개 지진 각각에 대해 분석하였고 그림 5에 제시되어 있다. 하지만 4개 지진 모두 공통적으로 약 10Hz 이상부터 증가하고 있는 현상을 나타내고 있다. 관측소 지반하부의 고유한 성질 혹은 관측기기의 이상 등의 가능성이 있다. 이러한



(a)



(b)



(c)

그림 4. (a) GKP1 관측소 지반증폭 특성, (b) GSU 관측소 지반증폭 특성, (c) HSB 관측소 지반증폭 특성

결과는 오대산 지진파형 중에서 S파 에너지를 이용하여 분석한 김준경(2009)도 역시 유사하게 제시하고 있다. 다른 방법에 의한 분석 또는 지진자료를 증가시켜서 분석을 시도하는 등 향후 정밀한 분석이 추가적으로 필요한 사항이다.

또한 GSU 및 HSB 관측소도 2003부터 2009까지 약 5년 간에 걸쳐서 발생한 4개 지진 모두에 대해 공통적으로 약 50Hz 부근에서 급격하게 증가하고 있는 현상을 나타내었다. 2개 관측소 공통적으로 신호대 잡음비가 낮은 경우의 주파수 경계 효과 등에 의한 것으로 분석되었다. 특히 GSU 관측소는 오대산 지진파형 중에서 S파 에너지를 이용하여 분석한 김준경(2009)의 결과와 상당히 다르게 나타나고 있다. 다른 방법에 의한 분석 또는 관측된 지진자료를 증가시켜서 분석을 시도하는 등 추가적인 분석이 필요하다. HSB 관측소의 경우 기존 연구결과가 없어 비교가 불가능하였다.

그림 6에 제시된 HKU(교원대) 관측소는 다른 관측소와 다르게 약 3-4Hz 부근에서 약 20Hz 부근까지 비교적 광범

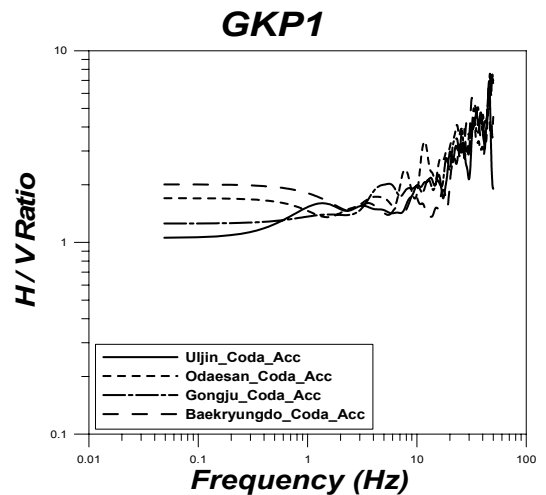


그림 5. 4개 지진기록을 이용한 GKP1 관측소 지반증폭값

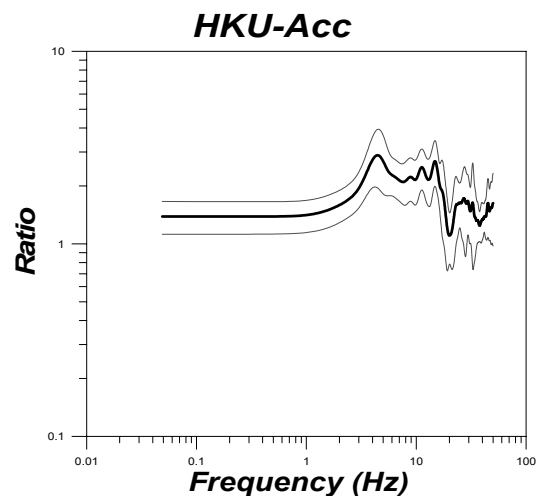


그림 6. HKU 관측소 지반증폭 특성

위한 주파수 대역에서 다른 주파수 대역에서보다 3-4배의 높은 지반증폭 특성을 보여주고 있다. 하지만 언급한 주파수 대역 외부의 주파수 대역에서 거의 1의 값을 보여주고 있다. 이러한 결과는 오대산 지진파형 중에서 S파 에너지를 이용하여 분석한 김준경(2009)이 제시한 결과와 대단히 유사하다. S파 에너지 및 coda파 에너지를 이용한 지반증폭 결과의 유사성은 Su 등(1996)이 제시한 바와 같다. 지진원 특성 분석이나 지진재해 등을 해석할 때 HKU 관측소 지진파형을 이용할 경우 지반증폭 특성을 반드시 고려할 필요가 있다.

그림 7은 SND(상동) 및 TJN(대전) 관측소의 coda파 에너지의 H/V스펙트럼비를 보여주고 있다. 3개의 관측소는 비교적 잘 발달된 암반위에 센스가 위치하고 있다. TJN 관측소(대전)는 상대적으로 타 관측소에 비해 부지의 지반증폭 값의 변화가 거의 없다. 이러한 현상은 TJN 관측소가 비록

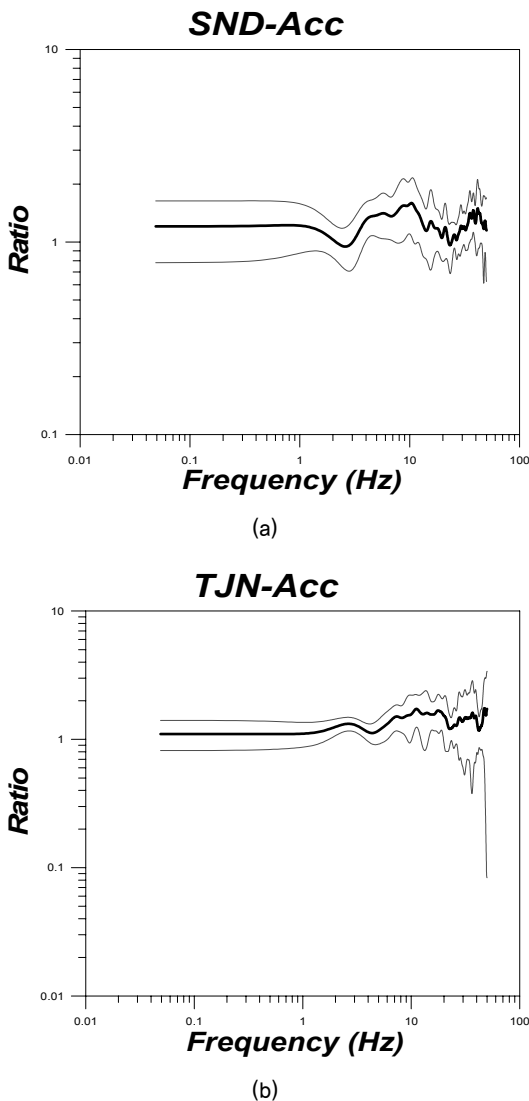


그림 7. (a) SND 관측소 지반증폭 특성, (b) TJN 관측소 지반증폭 특성

시추공 관측소는 아니지만 단단한 기반암위에 위치하고 있어 전체 주파수 영역에서 지반증폭값의 변화가 상대적으로 작은 것으로 분석된다.

4. 결 론

국내에서는 아직 부지고유의 증폭현상 $A(f)$ 에 대한 국내 연구가 거의 이루어지지 않았고, 더구나 coda파 에너지를 이용한 연구 역시 전혀 없었다. 따라서 지진원 관련 값과 지각감쇠 관련값을 분석하기 위해 저주파수 대역에서 고주파수 대역까지 전체 주파수 대역에 걸쳐서 증폭계수 1을 획일적으로 사용하고 있는 실정이다. 특히 지진원 및 지각구조에 의한 광역적인 감쇠값 등을 구할 때 부지고유의 증폭 현상이 심각할 경우 결과값에 왜곡된 영향을 줄 가능성이 크다. 그러므로 국내 지역별 부지 고유의 수평과 수직성분의 비에 해당하는 지반증폭값에 대한 정보가 필요한 실정이다. 최근 국내에 설치된 지진 관측기에 관측된 5개 지진(규모 3.6-5.1)의 약 60여개의 관측자료를 이용하여 지진관측소 각각 지반의 동적인 증폭 특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 비교적 잘 발달된 암반위에 센스가 위치하고 있는 관측소는 지반증폭값이 지진원 관련 값과 지각감쇠 관련값을 분석할 때 별다른 영향을 주지 않을 것으로 분석된다. 따라서 지진재해도 등을 고려할 때 지반증폭에 의한 영향을 고려하지 않아도 될 것으로 판단된다.
- (2) HKU 관측소는 다른 관측소와 다르게 비교적 광범위한 주파수 대역에서 다른 주파수 대역에서보다 3-4배의 높은 지반증폭 특성을 보여주고 있다. 이러한 경우는 지진원 특성 분석이나 지진재해 등을 해석할 때 HKU 관측소 지진파형을 이용할 경우 반드시 고려할 필요가 있다.
- (3) GKPI, GSU 및 HSB 관측소는 공통적으로 약 50Hz 부근에서 지반증폭값이 급격하게 증가하고 있는 현상을 보여주고 있다. 특히 GKPI 관측소는 다른 연구에서도 공통적으로 이러한 현상이 발견되었으며 다른 방법에 의한 분석 또는 지진자료 숫자를 증가시켜서 분석을 시도하는 등 향후 정밀한 분석이 추가적으로 필요한 사항이다. 하지만 GSU 및 HSB 관측소의 경우 고주파수 대역에서 불규칙적으로 큰 값을 가지는 것은 신호대 잡음비가 낮아서 주파수 경계 효과 등에 의한 것으로 분석된다.
- (4) GSU와 같은 일부 예외가 있지만 동일한 지진파의 시간 이력 중에서 S파 에너지에 비해 시간적으로 보다 뒷부

분에 도달하는 또 다른 에너지인 coda파 에너지를 이용한 지반증폭 특성과 S파 에너지를 이용한 지반증폭 특성 결과가 거의 유사하다는 사실을 일부 확인할 수 있었다. 따라서 임의 1개의 시간이력에 대해서 S파 에너지 뿐만 아니라 coda파 에너지를 활용하여 지반증폭 특성을 보다 효과적으로 분석할 수 있다.

감사의 글

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

참고 문헌

1. 김준경 (2009), 오대산지진 자료를 이용한 국내 관측소 부지의 증폭특성 연구, *한국지진공학회 논문집*, Vol. 13, No. 1, pp. 27~34.
2. 이준대, 김준경 (2009), 관측지진파를 이용한 지반증폭특성 사례분석, *한국지반환경공학회 논문집*, Vol. 10, No. 1, pp. 35~41.
3. 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, *Bulletin Seismological. Society. America*. Vol. 90, No. 4, pp. 1028~1040.
4. Bonilla, L., Steidl, J., Lindley, G., Tumarkin, A. and Archuleta, R. (1997), Site Amplification in the San Fernando Valley, California. Variability of Site-effect Estimation using the S-wave, Coda, and H/V methods, *Bulletin Seismological. Society. America*. Vol. 87, No. 3, pp. 710~730.
5. Boore and Joyner (1997), Site-Amplifications for Generic Rock

- Sites, *Bulletin Seismological. Society. America*. Vol. 87, pp. 327~341.
6. Borchardt, R. (1970), Effects of Local Geology on Ground Motion Near San Francisco Bay, *Bulletin Seismological. Society. America*. Vol. 60, No. 1, pp. 29~61.
7. Hartzell, S., Cranswick, E., Frankel, Carver, D. and M. Mere-monte (1997), Variability of Site Response in the Los Angeles Urban Area, *Bulletin Seismological. Society. America*. Vol. 87, No. 6, pp. 1377~1400.
8. ICBO 1997 (1997), Uniform Building Code, Volume 2- Structural Engineering Design Provisions, *International Conference of Building Officials*, pp. 492.
9. Kato, K., Aki, K. and Takemura, M. (1995), Site Amplification from Coda Waves: Validation and Application to S-wave Site Response, *Bulletin Seismological. Society. America*. Vol. 85, No. 2, pp. 467~477.
10. Nakamura, Y. (1989), A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface, *QR RTRI*, Vol. 30, No. 1, pp. 25~33.
11. NEHERP (1997), *Recommended Provisions for Seismic Regulation for New Building and Other Structures*, FEMA 302/303, part 1 (Provisions) and Part 2 (Commentary), pp. 1~55.
12. Phillips, S. C. and Keiiti Aki (1986), Site Amplification of Coda Waves from Local Earthquakes in Central California, *Bulletin Seismological. Society. America*. Vol. 76, No. 3. pp. 627~648.
13. Rogers, A. M., Borchardt, R. D., Covington, P. A. and Perkins, D. M. (1984), A Comparative Ground Response Study near Los Angeles using Recordings of Nevada Nuclear Tests and the 1971 San Fernando earthquake, *Bulletin Seismological. Society. America*. Vol. 74, No. 5, pp. 1925~1949.
14. 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, *Bulletin Seismological. Society. America*. Vol. 86, No. 4, pp. 1006~1018.
15. Tucker, B. D. and J. L. King (1984), Dependence of Sediment-filled Valley Response on Input Amplitude and Valley Properties, *Bulletin Seismological. Society. America*. Vol. 74, No. 1, pp. 153~165.

(접수일: 2009. 9. 9 심사일: 2009. 9. 29 심사완료일: 2009. 11. 20)