

국내 중규모지진의 자료를 이용한 주요 관측소 지반의 동적 증폭특성에 관한 연구

김 준 경*
세명대학교

Dynamic Amplification Characteristics of Major Domestic Seismic Observation Sites using Ground Motions from Domestic Macro Earthquakes

Jun Kyoung Kim*
Semyung University

지진원 및 구조물과 지반상호간의 동적 특성을 보다 신뢰성 있게 분석하기 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 제시되었으나, 최근 S파 및 Coda파 등에 적용되어 지반의 동적인 증폭 특성연구에 많이 이용되고 있으며 본 연구에서 S파 에너지에 적용하여 분석하였다. 최근 국내의 관측소에 관측된 23개의 규모 3.0 이상의 지진으로 부터 관측된 180 여개의 관측된 지반진동 자료를 분석하여 8개 주요 국내 지진관측소 지반의 동적인 증폭특성을 분석하였다. 각각의 지진관측소마다 지진동수, 고진동수 특성 및 관측소 고유의 우월진동수가 서로 상이하여 관측소 고유의 증폭특성을 보여주었다. 본 연구의 결과를 다른 분석방법을 적용하여 얻어진 결과와 비교하면 국내 지반의 동적 특성 및 지반분류 연구에 많은 정보를 줄 수 있다고 사료된다.

주요어 : S파, 지반증폭, H/V스펙트럼비, 우월주파수

To estimate seismic source and soil-structure interaction more reliably, site amplification characteristics should be considered. Among the various estimation methods, we used Nakamura's method (1989) to estimate site amplification. This method was originally applied to background noise; however, it has recently been successfully applied to S-wave and Coda-wave energy, and is applied to S-waves in the present study. We used more than 180 observed ground motions from 23 macro-earthquakes and then analyzed site amplification characteristics at eight seismic stations. Each station showed characteristics of site amplification properties in the low-, high- and resonance-frequency ranges. Comparison of the present results with those of other studies provide successful information regarding the dynamic amplification of domestic site characteristics and site classification

Key words : S-wave, Site amplification, H/V spectral ratio, Resonance frequency

서 론

*Corresponding author: kjk-512@semyung.ac.kr
© 2012, The Korean Society of Engineering Geology
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

입의 지역에 관측된 지진파는 지진원특성, 지진파전파특성, 부지특성이 결합되어 있다. 따라서 지진원 특성, 지각의 비탄성 및 탄성감쇠 특성을 보다 정확하게 결정하기 위해 부지지반증폭 특성은 제거되어야 한다. 따라

서 부지의 지반증폭 특성은 대단히 중요한 정보 가운데 하나이다. 또한 구조물의 효과적인 내진설계를 위해 해당 부지의 지반증폭 효과는 가장 중요한 정보에 해당된다. 따라서 자연과학적 및 공학적 측면 모두 지반증폭 특성은 대단히 중요한 정보 가운데 하나이다. 또한 지반증폭 특성의 중요성은 1989년 미국 서부지역에서 발생한 Loma Prieta 지진 및 멕시코 지진의 경우 각각의 진앙으로부터 약 250 km 및 300 km 이상 멀리 위치하고 하더라도 구조물이 위치하고 있는 지반증폭이 높을 경우 구조물이 심각한 지진재해를 당한 사례로부터 그 중요성이 입증되어 왔다(Atkinson et al., 2000).

또한 현재 국내에서 일반 건축구조물 및 원전구조물 등 여러 종류의 구조물의 내진기준에서 적용하고 있는 설계응답스펙트럼이 이미 존재한다. 하지만 국내 관측소에서 실제 기록된 지반진동을 처리하여 결과 얻어진 지반증폭 특성을 나타내는 지진응답을 현재 국내 기준인 설계응답스펙트럼과 비교할 경우 단주기 및 장주기 대역에서 많은 차이를 보여주고 있다. 일반적으로 단주기에서는 관측된 지반진동을 분석한 결과가 설계기준 수준을 초과하고 장주기에서는 반대로 설계기준을 못 미치고 있다. 우리나라의 경우 현대적 장비를 이용한 지진관측 이후 6.0 이상의 지진이 거의 발생하지 않은 중약진 지역이다. 따라서 국내 고유의 내진설계기준을 설정하기 위한 실제 관측 강지진동 자료가 부족하여 지반증폭 특성 및 설계응답스펙트럼 기준 마련이 어려워져 미국의 1997 National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP, 1997) 및 1997 Uniform Building Code (UBC, 1997) 기준을 주로 준용하고 있기 때문이다.

물론 고진동수 대역에서 지진원 및 지진파 감쇠 특성도 일부 기여하고 있을 수 있다. 하지만 위에서 언급한 미국의 건축물 내진설계 기준은 기반암이 대단히 깊은 미국 서부 지역의 지반에 적합하도록 만들어 졌고 또한 내진설계 실무자의 편의성을 위하여 지표로부터 약 30 m까지 지층의 평균 전단파 속도(V_{30})를 이용하도록 되어 있다. 그러나 국내에서는 지질역사의 환경이 다르기 때문에 대부분의 기반암이 지표로부터 30 m보다 얇게 존재하고 있다. 따라서 저진동수 대역보다 특히 고진동수 대역에서 가속도 스펙트럼의 지반증폭이 상대적으로 크게 나타나서 현재 사용중인 미국 서부 기준을 국내에 적용하는 것은 문제점이 많다고 지적되어 왔다.

그러므로 우선 국내 고유의 지반특성을 고려한 국내 고유의 부지 증폭 특성에 대한 연구가 필요하다. 이러한 부지효과는 부지하부 지하매질의 기하학적 형태와 물질

치 및 지형 등에 영향을 받아서 관측된 지반운동의 중요한 특성치들(진폭, 진동수 성분, 지속시간 등)에 큰 영향을 주기 때문에 지진공학적인 연구에서 반드시 고려되어야 할 요소이다.

부지의 지반증폭을 연구하는 방법은 다양한 방법이 제시되어 있다. 탄서파탐사 자료를 이용하는 방법 등도 존재한다(Song et al., 2002; Sun et al., 2012). 본 연구에서는 동적 특성을 분석하기 위해 관측된 지진파형을 이용하는 방법을 적용하였다. 또한 파형에너지를 이용할 경우 전체 파형 에너지, S파 및 Coda파 등과 같이 분석 대상의 파형 에너지에 따라 분류할 수 있다. 여기에서는 다른 에너지에 비해 비교적 커다란 에너지를 가지고 있는 S파 에너지를 지진파를 이용하는 방법을 적용하였다.

부지의 지반증폭을 연구하기 위해 지진파 중에서 S파 에너지를 이용하는 방법은 여러 방법이 제시되어 있다. 우선 분석대상 부지로부터 비교적 가까운 곳에 위치하고 또한 노두가 양호하게 발달된 기준지점과 지반증폭 효과를 분석하고자 하는 대상 부지에서 각각 관측된 지반진동의 푸리에 스펙트럼 비율을 이용하는 기준암반 관측소(Reference Site)와 비교하는 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 이 방법을 효과적으로 적용할 수 있을 가능성은 분석대상 부지 주변 가까운 곳에 지역적으로 대표 가능한 암반이 존재하느냐 여부에 달려 있다.

두 번째 방법은 Nakamura (1989)가 제시하였고 임의의 관측소에서 관측된 수직 및 수평 2성분을 포함하여 3개 성분을 이용하여 수직성분에 대한 수평성분의 푸리에 스펙트럼의 비율을 이용하는 방법으로 주변 다른 관측소의 지반진동을 필요로 하지 않는다. 처음에는 배경 잡음을 대상으로 연구가 진행되었으나 S파 에너지 및 Coda파 에너지 등으로 확장되어 적용한 결과 타당성이 입증되고 있다.

세 번째 방법은 관측파형에서 우선 지진원 및 지각감쇠 특성을 제거하고 다음으로 임의의 부지 그룹의 약 3-4 km 하부의 평균적인 감쇠 부분(κ_s)을 제외한 나머지를 이용하여 부지의 지반증폭을 구하는 방법이 있다. 특히 Coda파 에너지를 이용한 방법은 주로 여러 연구자(Tucker and King, 1984; Phillips and Aki, 1986; Su et al., 1996)에 의해 연구가 수행되어 왔다. 마지막으로 부지하부의 기하학적 모양, 전단파 속도 및 탄성임피던

스를 이용하여 RVT (Random Vibration Theory) 및 SHAKE 프로그램 등을 이용하는 방법이 있다.

본 연구에서는 S파 에너지 및 가속도 지반진동을 이용하였으며, 2번째 방법인 Nakamura (1989)가 제시한 평가방법을 적용하였다. Coda파 에너지를 이용한 기존의 결과(Kim and Lee, 2009)와 비교하면 임의 관측소에서의 지반증폭 현상에 대해 보다 신뢰성이 향상된 분석이 가능하였다.

지반진동 지배방정식 및 방법

지반진동은 일반적인 추계학적 모델을 가정하였고, 추계학적 지반진동 추정모델을 위해 코너진동수, 일정한 응력강하(stress drop)와 진동수 감쇠 모델은 ω^{-2} 형태로 주어지는 Brune의 지진원 모델을 이용하였다. 가속도 지반진동에 대한 푸리에스펙트럼은 다음과 같이 $\alpha(f)$ 로 나타낼 수 있다.

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

식 (1)에서 C는 여러 가지 지반의 지표효과를 고려한 상수, 2번째 항은 지진모멘트(M_0) 및 코너진동수(f_0) 등 지진원을 대표하는 항이다. 3번째 항은 기하학적 지진파 감쇠를 나타내며 -1승 모델을 적용하였고, 4번째 항은 지진파의 광역적인 경로인 지각의 비탄성감쇠를 대표하는 항이다. $P(f)$ 항은 관측소에서 약 3-4 km 지반 하부의 탄성적인 성질을 대표한다. 관측소 직하부의 증폭특성을 대표하는 $A(f)$ 필터는 지진파가 관측소 하부의 지표 가까이 얇은 심도에 존재하는 속도값이 다른 여러 층들로 이루어진 지층을 전파함에 따라 지진파의 진폭이 진동수에 따라 증폭되는 현상을 대표한다. 부지 직하부에서의 증폭현상은 관측소 하부의 전단파 속도, 밀도, 층두께 및 damping 값 등에 의해 결정된다.

배경잡음, S파 에너지 및 Coda 파 에너지를 이용하여 $A(f)$ 를 분석하는 방법은 앞서 제시한 바와 같이 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 지반진동의 수직성분은 거의 증폭현상이 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 부지에서 수직성분의 증폭효과는 거의 무시될 수 있고 수평성분과 수직성분의 스펙트럼 비를 이용하면 부지효과를 간단하고 유용하게 평가할 수 있다.

지반진동의 수직성분에 대한 수평성분의 지반증폭 비율은 지반진동의 푸리에 스펙트럼을 이용하여 다음과 같이 스펙트럼의 비율로 주어진다.

$$\log(H/V) = (\log \sqrt{0.5^2 (H_1^2 + H_2^2)} - \log V) \quad (2)$$

이 식에서, H_1 및 H_2 는 각각 관측된 지반진동의 남북 및 동서방향 수평성분의 푸리에 스펙트럼을 나타내고 순서에는 관계가 없다. 또한 H 는 수평성분의 푸리에 스펙트럼, V 는 수직성분의 푸리에 스펙트럼을 각각 나타낸다.

연구자료

본 연구에서 사용한 8개 관측소 및 각각 관측소에서 이용된 지반진동의 지진 발생일자는 Table 1에 제시되어 있다. 또한 Kim and Lee (2009)이 이용한 지진관측소에 대해 지반진동 숫자도 마지막 칼럼에 제시하였다. Kim and Lee (2009)은 국내에서 발생한 지진 가운데 비교적 큰 규모에 해당하고 또한 규모 4.0 이상의 5개 지진만을 이용하였고 따라서 신호대 잡음 비율을 고려하여 Table 1에 제시된 바와 같이 관측소마다 3개의 지반진동 자료를 이용하였다.

본 연구에서 대표적 중규모 지진(규모 3이상 7미만)에 해당하는 백령도, 홍도, 울진, 오대산 지역에서 발생한 지진을 포함하여 2003년 이후 발생한 규모 3.0 이상의 23개 중규모급지진으로부터 관측된 지반진동 자료를 대상으로 하여 분석할 지반진동 수를 대폭 증가시켰다.

본 연구를 위해 Table 1에서 제시된 지진들을 선택한 이유는 최근 발생한 지진 중에서 한반도의 지진지체구조적인 의미를 가지는 중규모급 지진에 해당하고 또한 상대적으로 많은 관측소에서 관측되어 관측 자료가 풍부하였기 때문이다.

Coda파 에너지를 이용하였고 또한 규모가 비교적 커다란 지진을 이용한 Kim and Lee (2009)에 비해 지반증폭 분석을 위한 관측소가 BRD, KHD, HKU 및 SNU 관측소 등 4개 관측소가 추가되었고 SND 관측소가 누락되었다. Kim and Lee (2009) 연구에서 이미

Table 1. List of seismic stations and earthquake occurrence dates.

Station Name	Event Date List	Event Number	Kim and Lee, 2009
GKP1	2004/04/26, 2004/05/29, 2004/06/01, 2004/08/05, 2005/06/29, 2006/01/19, 2006/12/03, 2007/01/20, 2008/10/29, 2009/05/01	10	3
BRD	2003/03/30, 2003/10/13, 2004/01/04, 2006/12/03, 2007/01/20, 2009/05/01,	6	N/A
KHD	2003/04/15, 2004/01/04, 2005/10/19, 2007/01/20, 2007/01/20, 2008/10/29, 2009/03/03, 2009/05/01	8	N/A
GSU	2004/04/26, 2004/08/05, 2005/06/29, 2006/12/03, 2008/10/29, 2009/05/01,	6	3
HKU	2003/04/15, 2003/10/13, 2004/08/05, 2006/01/19, 2006/12/03, 2007/01/20, 2009/05/01	7	N/A
HSB	2003/04/15, 2003/10/13, 2004/04/26, 2004/08/05, 2006/12/03, 2008/10/29, 2009/03/03, 2009/05/01	8	3
SNU	2003/04/15, 2003/10/13, 2004/08/05, 2005/10/09, 2006/01/19, 2006/12/03, 2008/10/29, 2009/05/01, 2009/08/21	9	N/A
TJN	2003/04/15, 2003/10/13, 2004/04/26, 2004/08/05, 2006/01/19, 2009/05/01	6	3
Total	-	60	23

분석 대상이었던 관측소의 경우에도 규모 3.0이상의 지진자료를 추가하여 일반적으로 지반진동 자료의 숫자가 증가하였다. 특히 GKP1의 경우 지반진동 자료 숫자가 3배 이상 증가된 관측소이다. 따라서 상대적으로 지반진동 자료의 증가한 경우의 분석결과를 기존 연구와 비교 분석을 통해 신뢰성이 보다 증가되도록 하였다.

Table 1에서 알 수 있는 바와 같이 수평 성분 120개 및 수직성분 60개 자료 모두 180개의 지반진동 자료를 처리하여 분석하였다. 신호 대 잡음비를 분석하여 지반진동 분석으로부터 제외된 지반진동 자료수를 감안하면 실제 분석된 지반진동 자료 수는 훨씬 많은 약 2배 이상이 된다.

지반진동의 자료타입은 지반진동 분석에 일반적으로 이용되는 가속도 자료이며 지반진동의 샘플링 간격은 1초에 100개 즉 0.01초이다. S파 에너지의 발달 정도 즉 진폭의 최대크기 및 지속시간은 지진규모 및 진앙거리 등에 따라 영향을 받지만 지반진동의 분석을 위한 시간 길이를 일반적으로 약 11초 이상 약 20초 이하를 선택하였기 때문에 푸리에 변환 분석 특성상 분석대상 포인

트 숫자는 가장 가까운 2의 배수인 모두 2,048 포인트가 된다. 100 Hz가 2,048 포인트로 표현되기 때문에 이를 고려하면 푸리에 변환 분석의 진동수 간격은 약 0.048828 Hz에 해당한다.

각각의 지반진동 자료에서 관측된 S파 에너지를 충분히 반영하기 위해 분석대상 시간길이를 약 11초 이상 약 20초 이하가 되도록 설정하여 분석하였다. 또한 이보다 아주 짧은 시간길이를 설정하여 S파 에너지를 충분히 포함하지 못할 경우 결과 값이 신뢰성이 현격하게 감소되고 왜곡되는 가능성을 분석하였다.

Fig. 1은 SNU 및 TJN 관측소에 대해 S파 에너지 도달시간부터 약 20초 및 약 5분의 1에 해당하는 약 4초의 지반진동 자료를 각각 분석하였을 경우 결과 값의 차이를 잘 보여 주고 있다. 약 4초의 지반진동 자료를 각각 분석하였을 경우 가로축에서 출발점이 상대적으로 높은 진동수가 되는 이유는 푸리에 변환할 때 진동수 간격이 훨씬 크기 때문에 시발점의 진동수 크기가 약 5배 정도 크기 때문이다.

Fig. 1에서 알 수 있는 바와 같이 동일한 지반진동

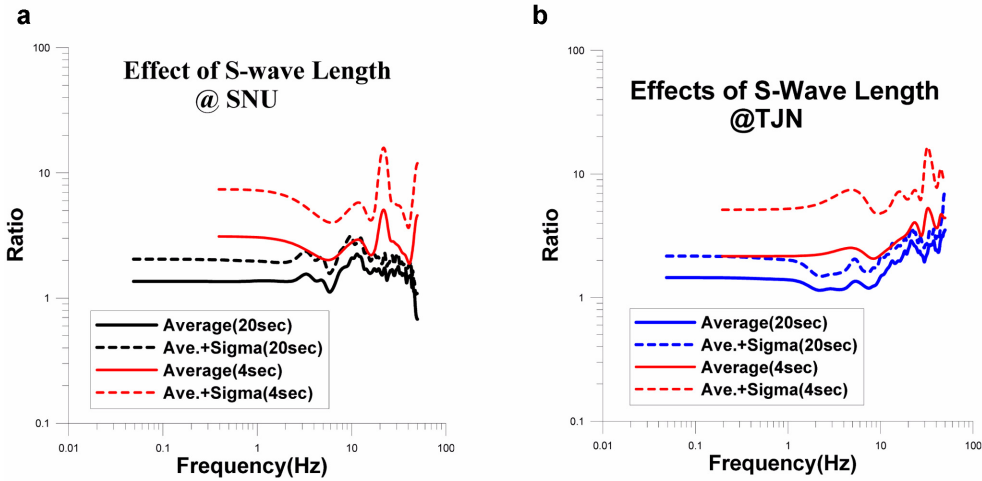


Fig. 1. (a): Effect of S-wave length at SNU station, (b): Effect of S-wave length at TJN station.

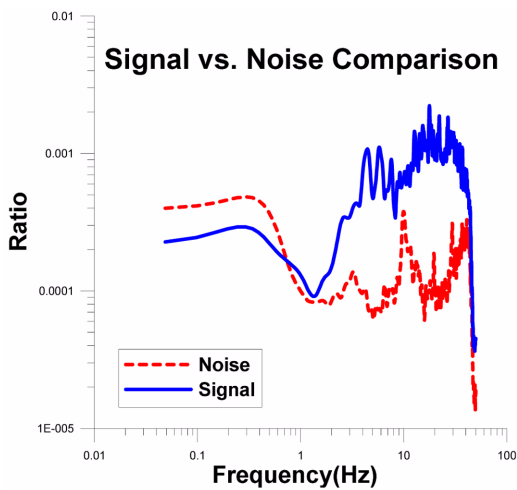


Fig. 2. Signal vs. noise comparison at TJN station.

자료를 이용하여 짧은 시간길이를 이용하여 분석한 결과가 충분한 시간길이를 가진 분석 결과 보다 지반증폭의 평균값이 전체적으로 보다 높은 수준을 유지하였다. 또한 표준편차 값이 상대적으로 훨씬 커다란 수준을 보여주었다. 따라서 높은 표준편차 값으로부터 유추 가능한 바와 같이 짧은 시간길이를 이용하여 분석한 결과가 결과 값에 대한 신뢰성이 작다는 것을 제시하고 있다. 따라서 지반진동 자료로부터 S파 에너지를 충분히 반영할 필요가 있고 이를 위해 분석 대상 시간길이를 유의할 필요가 있다.

지반증폭을 분석할 때 신호 대 잡음비를 분석하기 위

해 지반진동의 P파가 도달하기 전 약 20초 동안의 배경 잡음(background noise)을 이용하여 신호 대 잡음을 비교 분석하였고 신호 대 잡음 비율 값이 약 3 이상의 잡음이 비교적 작은 지반진동 만을 이용하였다. Fig. 2는 TJN 관측소에 대해 신호 대 잡음비를 분석한 것을 보여 주고 있다. 약 0.7 Hz보다 낮은 저 진동수 대역에서 잡음의 수준이 신호 수준보다 오히려 높고 진동수가 증가할수록 잡음수준이 감소하다가 다시 10 Hz 부근에서 갑자기 높아 졌고 이후 다시 감소하는 경향을 보여 주고 있다. 10 Hz 부근의 잡음 수준이 높은 것은 여러 가지 원인이 있을 수 있으나 이러한 지반진동 자료는 지반증폭 분석을 위해 제외하였다.

연구 결과

연구결과는 Fig. 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 및 10에 차례로 제시되어 있으며 각각의 그림에서 가로축은 진동수 값을 대수적으로 표시하였고 세로축은 지반증폭 값을 대수적으로 표시하였다. 또한 평균값과 평균값에 표준편차를 더한 값을 나타내었다. 가로축 및 세로축 모두 대수적으로 하는 이유는 응답스펙트럼을 이용한 지반증폭 분석에서도 동일한 축 스케일을 사용하기 때문이다.

Fig. 3은 BRD (백령도) 관측소 지반증폭을 분석한 결과이며 서해에 위치하고 있다. BRD 관측소는 약 2 Hz 보다 작은 저 진동수 대역에서는 부지 증폭 현상이 없는 즉 1과 2 사이의 값을 그리고 2 Hz부터 4 Hz 구간에서는 2 보다 약간 상회하는 지반증폭 값을 보여

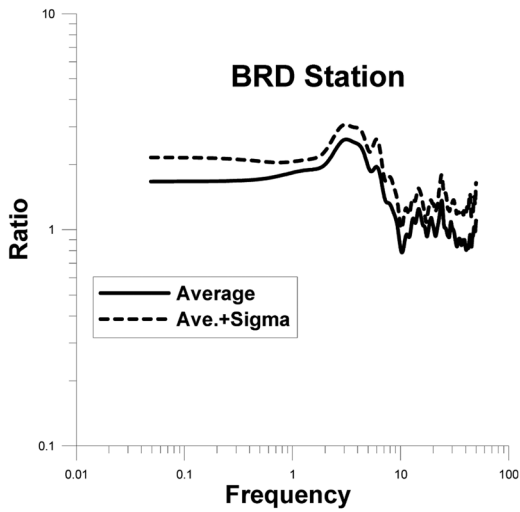


Fig. 3. Site amplification ratio at BRD station.

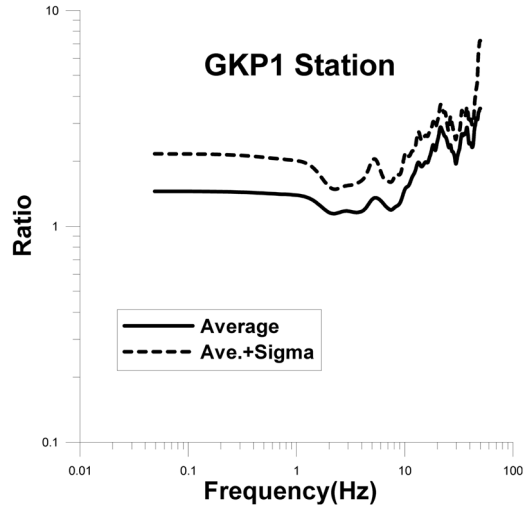


Fig. 5. Site amplification ratio at GKP1 station.

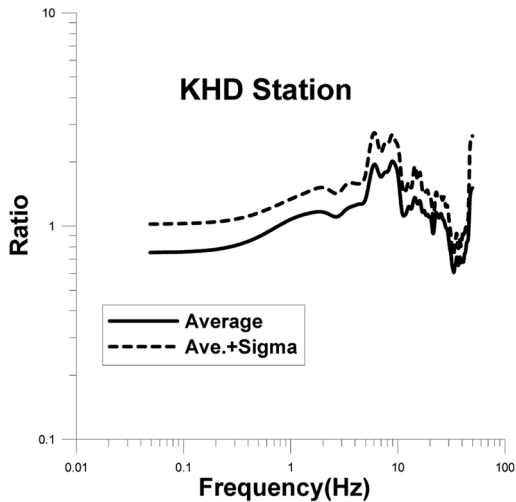


Fig. 4. Site amplification ratio at KHD station.

주고 있다. 또한 이후 10 Hz까지 구간에서 갑자기 감소하다가 진동수가 증가하면서 증폭이 거의 없는 약 1 수준의 값을 보여주고 있다. 전체 진동수 구간에서 표준편차 값은 대체로 양호한 값을 보여주고 있다. 하지만 약 2 Hz부터 4 Hz 구간에서 2 보다 초과하는 현상을 BRD 관측소 부지의 우월 진동수로 분석할 수 있으나, 향후 발생하는 지진으로부터 관측된 지반진동 자료숫자를 대폭 증가시켜 보다 신뢰성 있는 분석을 할 필요가 있다.

Fig. 4는 KHD (강화도) 관측소에 대한 지반증폭 분석결과이며 약 5 Hz 부근까지 증폭이 거의 없는 약 1의

값을 보여주고 약 5 Hz부터 9 Hz 구간에서 BRD 관측소와 유사하게 약 2의 값을 보여 주었다. 약 10 Hz 부근에서 갑자기 감소하다가 진동수가 증가하면서 계속 감소하는 현상을 보여 주었다. 또한 마지막 50 Hz 부근에서 급격하게 증가하고 있다. 전체 진동수 구간에서 표준편차 값은 대체로 양호한 값을 보여주어 결과 값의 신뢰성이 있다고 판단된다. 또한 마지막 50 Hz 부근에서 급격하게 증가하고 있어 신뢰성이 대단히 낮은 구간이다. 약 5 Hz부터 9 Hz 구간에서 증가하는 현상이 KHD 관측소 부지의 우월 진동수라고 보기에는 지반증폭 값이 역시 너무 작아 단정하기 힘들다고 판단된다. BRD 관측소와 유사하게 향후 발생하는 지진으로부터 관측 가능한 지반진동 자료숫자를 대폭 증가시켜 분석할 필요가 있다.

Fig. 5는 GKP1 (경북대) 관측소에 대한 지반증폭 분석결과이며 0.1 Hz 이하의 저진동수 대역에서 출발하여 약 1 Hz까지 거의 일정한 값을 보여주다가 약 4 Hz까지 완만하게 감소하고 이후 갑자기 다시 증가하고 있다. 약 4 Hz부터 6 Hz 구간에서 약한 증폭을 보여주고 있다. 그리고 약 50 Hz 부근까지 몇 개의 날카로운 피크를 가지고 있고 또한 약 20 Hz부터 30 Hz 구간 및 30 Hz부터 40 Hz 구간에서 2개의 커다란 정상 부분을 보여주며 3을 약간 못 미치는 높은 지반증폭 값을 나타내고 있다. 저 진동수 대역으로부터 고진동수로 옮겨 갈수록 몇 개의 피크를 가지면서 전체적으로 점차 증가하는 현상은 약 3분의 1 이하의 지반진동 자료를 이용한 Kim and

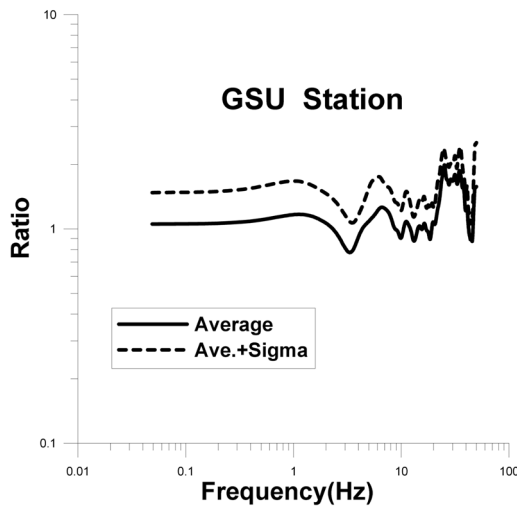


Fig. 6. Site amplification ratio at GSU station.

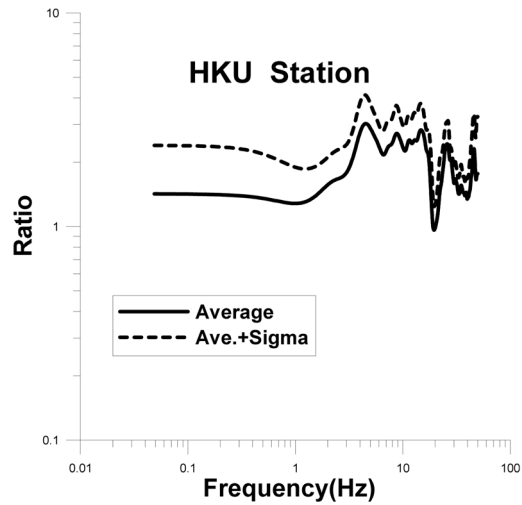


Fig. 7. Site amplification ratio at HKU station.

Lee (2009)이 제시한 연구에서도 유사한 특징을 보여 주었다.

또한 표준편차 값은 0.1 Hz 이하의 저 진동수 대역에서 출발하여 약 2 Hz까지 다소 큰 값을 보여주고 있으나 이후 고진동수로 갈수록 감소하고 있다. 하지만 약 40 Hz 이상부터 50 Hz 부근까지 표준편차 값이 급격하게 증가하고 있는 현상을 보여주고 있다. 이 진동수 대역은 신호 대 잡음비가 아주 낮은 것으로 확인되어 이에 의한 영향으로 분석된다.

약 20 Hz부터 30 Hz 구간 및 30 Hz에서 40 Hz 구간 등 고진동수 대역에서의 2개의 폭넓은 정상구간은 피크의 진동수 위치가 Kim and Lee (2009)의 연구결과와 정확하게 일치하는지 여부에 대한 보다 정밀한 분석이 필요하지만 전체적 변화 양상이 대단히 유사하다. 따라서 2개의 진동수 구간이 GKP1 관측소 부지 고유의 우월 진동수라고 판단된다.

Kim and Lee (2009)의 결과와 본 연구 결과를 비교할 경우 전체 진동수 대역에서 급변 분석 결과와 유사하고 일관성 있는 패턴을 제시하여 주고 있다. 따라서 지반증폭 현상을 분석하는 다양한 방법이 제시되어 있으나 본 연구에서 적용된 S파 에너지의 수평/수직 비율을 이용하는 방법이 지반증폭 값을 분석하는 중요한 방법이 될 수 있다고 분석된다.

Fig. 6은 GSU (경상대)관측소 지반증폭을 보여주고 있고, 역시 낮은 진동수 대역에서 출발하여 약 1 Hz까지 증폭 현상을 거의 보이지 않는 일정한 값을 보여주

다가 약 3 Hz까지 완만하게 감소하고 갑자기 다시 증가하고 있다. 약 4 Hz부터 6 Hz 구간에서 약간 증가하는 지반증폭 값을 보이고 약 20 Hz에서 40 Hz까지 1개의 폭 넓은 정상부분을 보여주며 해당구간의 증폭값은 2에 미치지 못하는 값을 보여 주고 있다. Kim and Lee (2009)과 비교할 때 약 4 Hz부터 6 Hz 구간의 정상부분은 전 연구와 서로 상이하고 20 Hz에서 40 Hz까지 1개의 폭 넓은 커다란 정상부 값은 서로 유사하다.

또한 표준편차 값은 전체 진동수 대역에서 대체로 작은 값을 보여주고 있어 신뢰성을 보여주고 있다. 또한 GKP1 (경북대) 관측소와 유사하게 약 50 Hz 부근에서 지반증폭 값이 증가하고 있으나 이러한 진동수 대역은 표준편차 값이 역시 동시에 급격하게 증가하고 있어 신뢰성이 대폭 감소된다. Kim and Lee (2009)의 결과와 본 연구 결과를 비교할 경우 전체 진동수 대역에서 급변 분석 결과와 아주 유사한 패턴을 제시하여 주고 있다.

마지막으로 20 Hz에서 30 Hz까지 1개의 폭 넓은 뚜렷한 정상부분이 관측소 부지의 우월진동수로 제시하기에는 지반증폭 값이 역시 너무 낮다. 따라서 향후 지진으로부터 자료숫자를 대폭 증가시켜 분석할 필요가 있다고 판단된다.

Fig. 7은 HKU (교원대) 관측소의 지반증폭 값을 보여주고 있다. 저 진동수 대역에서 출발하여 약 1 Hz까지 1을 초과하는 거의 일정한 값을 보여주고 있다. 그리고 약 4 Hz 부근에서 15 Hz까지의 구간에서는 물론 3개의 작은 피크로 이루어져 있지만 1개의 폭 넓은 정

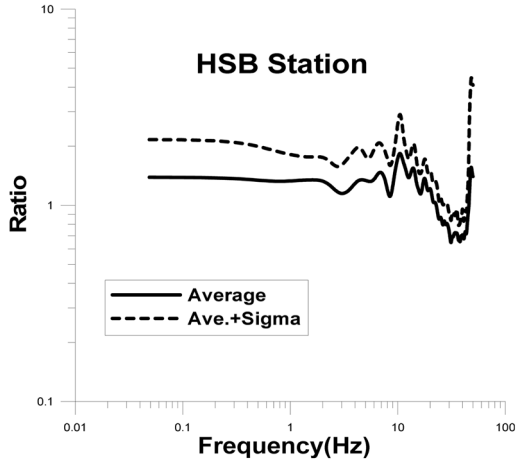


Fig. 8. Site amplification ratio at HSB station.

상부분을 보여 주고 있다. 폭넓은 정상부분의 지반증폭 값은 2를 초과하고 3에 다소 못 미치고 있다. 분석대상 관측소에서 가장 넓은 폭을 가진 정상부분을 보여주고 있다. 약 4 Hz 부근에서 시작되어 약 15 Hz까지의 1개의 폭 넓은 정상부분은 Kim and Lee (2009)의 결과의 진동수의 위치 및 지반증폭 값 모두에서 서로 대단히 유사하여 일관성 이 있음을 보여 주고 있다.

그리고 표준편차 값은 저 대역에서 대체로 다른 관측소보다 다소 커다란 값을 보여주고 있으나 전체 진동수 대역에서 신뢰성을 보여주고 있다. 또한 앞서 제시된 GKP1 및 GSU 관측소와 유사하게 약 50 Hz 부근에서 지반증폭 값이 갑자기 증가하고 있으나 해당되는 표준 편차 값이 역시 동시에 급격하게 증가하고 있어 신뢰성이 대폭 감소되는 진동수 구간이다. 따라서 약 3 정도의 지반증폭 값을 보여주고 그리고 약 4 Hz부터 15 Hz 까지 폭넓은 정상 부분이 HKU 관측소 부지의 우월진동수로 판단된다.

HSB (홍성) 관측소는 Fig. 8에 제시되어 있고, 저 진동수 대역에서 출발하여 약 1 Hz까지 거의 일정한 값을 보여주고 있다. 그리고 물론 몇 개의 작은 피크로 이루어져 있지만 약 10 Hz 부근에서 1개의 가장 커다란 증폭값 피크를 보여 주고 있다. 피크 부분의 지반증폭 값은 2에 가깝다. 그리고 표준편차 값은 전체적으로 작은 값을 보여주고 있어 신뢰성을 보여주고 있다.

또한 앞서 제시된 GKP1, GSU 및 HKU 관측소와 유사하게 약 50 Hz 부근에서 지반증폭 값이 증가하고 있으며 해당되는 표준편차 값이 동시에 급격하게 증가하고 있다. Kim and Lee (2009)의 결과와 본 연구 결

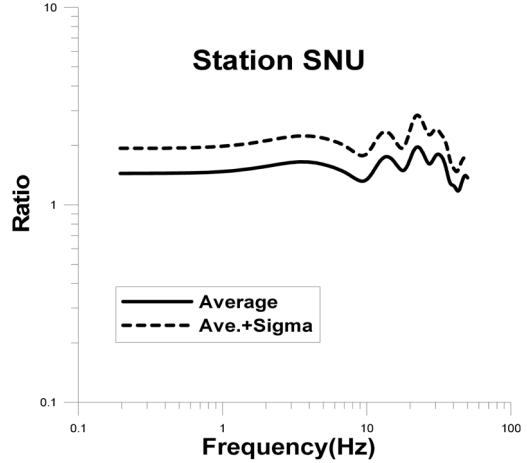


Fig. 9. Site amplification ratio at SNU station.

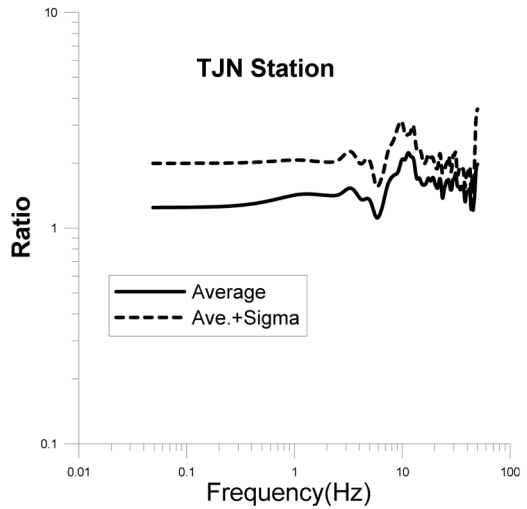


Fig. 10. Site amplification ratio at TJN station.

과를 비교할 경우 전체 진동수 대역에서 금번 분석 결과와 아주 유사하고 일관성 있는 패턴을 제시하여 주고 있다. 10 Hz 부근의 정상부분은 약 2 정도의 지반증폭 값을 보여주고 있고 뚜렷하게 구분되어 관측소 부지의 우월진동수로 판단된다.

Fig. 9는 SNU 관측소의 지반증폭 특성을 보여주고 있다. 다른 관측소에 비해 증폭 현상이 복잡하지 않고 또한 전체 진동수 대역에서 증폭 값이 1과 거의 같거나 약간 높은 값을 보여주고 있다. 그리고 표준편차 값 역시 전체 진동수 대역에서 대체로 작은 값을 보여주고 있어 분석결과에 대한 신뢰성을 보여주고 있다. 따라서 SNU 관측소의 경우 관악산 암반 내에 설치되어 전체

진동수 대역에서 뚜렷한 지반증폭 효과를 거의 보이지 않아 본 연구의 분석대상 관측소 가운데 증폭현상과 관측소 고유의 우월진동수가 없다. 따라서 관측소 고유의 보정이 부가적으로 필요 없는 가장 양호한 관측소로 판단된다.

Fig. 10은 TJN (대전 한국지질자원연구원)의 지반증폭 값을 나타내며 0.1 Hz 이하의 저진동수 대역에서 출발하여 약 2 Hz까지 거의 일정한 값을 보여주다가 약 3 Hz에서 작은 피크현상을 그리고 약 10 Hz를 중심으로 하는 진동수 구간에서 2를 다소 초과하는 증폭 값을 보여주고 있다. 이후 고진동수 대역에서는 복잡한 현상을 보여주지만 1과 2 사이의 완만한 증폭 값을 보여주고 있다. 그리고 표준편차 값 역시 전체 진동수 대역에서 대체로 작은 값을 보여주고 있어 신뢰성을 보여주고 있다. 따라서 약 10 Hz를 중심으로 하는 진동수 구간이 뚜렷하게 구분되어 TJN 관측소 부지의 우월진동수로 판단된다.

결 론

1. 지진원 특성, 지각의 비탄성 및 탄성감쇠 특성과 같은 관측된 지진파의 특성을 보다 정확하게 결정하기 위해 부지 효과가 제거되어야 한다. 하지만 구조물의 효과적인 내진설계를 위해 지진원, 지각의 비탄성 및 탄성감쇠 특성과 같은 요소도 중요하지만 해당 부지의 지반 증폭 효과는 가장 중요한 요소 가운데 하나에 해당된다. 따라서 자연과학적 및 공학적 측면 모두 지반증폭 특성은 대단히 중요한 정보 가운데 하나이다. 동적 지반증폭 특성을 분석하기 위한 지반진동 자료가 비교적 풍부할 몇 개의 주요 국내 관측소에 대해 분석한 결과이다.

2. 국내에서 특히 동적인 지진관측소의 지반증폭 효과에 대한 연구가 별로 없다, 또한 관측소 하부지반의 지반의 직접 조사와 같이 비용이 많이 필요한 다른 방법에 비해 관측으로부터 축적된 지반진동 자료의 분석만으로 가능하기 때문에 본 방법을 적용하여 지반증폭 효과를 분석하였다. 물론 관측거리 범위 내에서 중규모 이상의 지진이 자주 발생해야 한다는 단점이 있다.

3. 전체 분석대상의 관측소에서 지반의 증폭 값이 물론 진동수 대역에 따라 변화가 있지만 증폭효과가 발생하지 않거나 약간 초과하는 특징을 부여 주었다. 특히 증폭효과가 1보다 초과하는 관측소는 관측소 부지를 일반적으로 증폭이 거의 없는 지반을 선택하려고 노력하였으나 관측소의 전기공급원 등을 고려하여 생활근린 시

설 부근에 설치되어 부지 내에 다소의 토양층이 있기 때문이다. 따라서 다수의 관측소에서 지반의 증폭 값이 1보다 초과하는 지반증폭 현상이 공통적으로 나타나고 있다. 하지만 SNU 관측소의 경우 관악산 암반 내에 설치되어 전체 진동수 대역에서 지반증폭 효과 또는 지반 고유의 우월진동수 특징을 거의 보이지 않아 본 연구의 분석대상 관측소 가운데 가장 양호한 관측소로 판단된다.

4. 일부 관측소는 관측소 고유의 우월진동수를 가지고 있는 것으로 분석되었다. 관측소 부지고유의 우월진동수를 가진 부지는 다음과 같다. GKP1관측소는 약 20-30 Hz 구간 및 약 30-40 Hz 구간 등 2개 구간, HKU는 약 4부터 15 Hz 부근에서 폭넓은 구간, 관측소 HSB 관측소는 10 Hz 부근의 정상부분, 마지막으로 TJN 관측소는 약 10 Hz를 중심으로 하는 진동수 구간이라고 분석된다.

5. 우월진동수가 뚜렷한 부지에서 관측된 지반진동을 이용할 경우 지진원 특성, 지각의 비탄성 및 탄성감쇠 특성과 같은 관측된 지진파의 특성을 보다 정확하게 결정하기 위해 부지 고유의 우월진동수를 유의하여 고려한 필요가 있다. 또한 비록 일부 국내 지진관측소 부지의 지반 증폭특성을 분석하였으나 국내 고유의 지반증폭 특성의 연구에 도움이 될 수 있다고 판단된다.

6. 일부 지진관측소의 경우 향후 발생 지진으로부터 관측될 지반진동을 보다 많이 고려하여 신뢰성 있는 지반증폭 효과를 분석할 필요가 있다고 판단된다.

사 사

본 연구는 2012년도 기상기술개발관리단의 “지진기술 개발사업(CARTER 2012 -8170)”에 의한 것이며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

Atkinson, G. M. and Cassidy, J. F., 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.
 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, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 87(3), 710-730.
 Borchardt, R., 1970, Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 60(1), 29-61.

- Hartzell, S., Cranswick, E., Carver, F. D. and Mermonte, M., 1997, Variability of site response in the Los Angeles Urban area, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 87(6), 1377-1400.
- Kim, J. K. and Lee, J. D., 2009, A Study of the Dynamic Amplification Characteristics of the Domestic Seismic Observation Sites Using Coda Wave, *Journal of Korea Geo-environmental Society*, 10(7), 135-141 (In Korean with English abstract).
- Nakamura, Y., 1989, A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, *QR RTRI*, 30(1), 25-33.
- NEHEP, 1997, Recommended provisions for seismic regulation for new building and other structures, FEMA 302/303, part 1(Provisions) and Part 2(Commentary).
- Phillips, S. C. and Aki, K., 1986, Site Amplification of Coda waves from Local earthquakes in Central California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 76(3), 627-648.
- 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, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 74(5), 1925-1949.
- Song, M. Y., Kim, H. S., and Park, J. O., 2002, Relationship between lithology and rock physical property using borehole prospecting, *The Journal of Engineering Geology*, 12(2), 127-135 (In Korean with English abstract).
- Su, F., Anderson, J. G., Brune, J. N., and Zeng, Y., 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.
- Sun, C., Han, J., and Choi, W., 2012, Representative shear wave velocity of geotechnical layers by synthesizing in-situ seismic test data in Korea, *The Journal of Engineering Geology*, 22(3), 297-303 (In Korean with English abstract).
- Tucker, B. D. and King, J. L., 1984, Dependence of Sediment-filled Valley Response on Input Amplitude and Valley Properties, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 74(1), 153-165.

원고접수일 : 2012년 11월 21일

수정본채택 : 2012년 12월 20일

게재확정일 : 2012년 12월 21일

김준경

세명대학교 소방방재학과

390-711 충청북도 제천시 세명로 117

Tel: 043-649-1319

E-mail: kjk-512@semyung.ac.kr