후쿠오카 지역 발생 지진의 Coda파, 배경잡음 및 S파 에너지를 이용한 관측소의 증폭특성에 관한 비교 연구

김 준 경*

세명대학교

A Comparison Study of the Amplification Characteristics of the Seismic Observation Sites using Coda wave, Background Noise, and S-wave Energy from Fukuoka Earthquakes Series

Jun Kyoung Kim*

Semyung University

내진설계기준이 국내 고유의 지반 특성을 제대로 반영하지 못하고 있어 특히 고진동수 구간에서 실제 관측된 가속도 스펙 트럼 값이 내진설계기준보다 상대적으로 크게 나타나는 등 문제점이 많다고 지적되어 왔다. 지반증폭 특성을 분석할 때 여 러 가지 방법이 제시되어 있으나 본 연구는 지반진동의 수평/수직 비율을 이용하는 방법을 적용하였다. 이 방법은 최근 배경 잡음, S파 및 Coda파 등에 적용되어 지반의 동적인 증폭 특성연구에 많이 이용되고 있다. 본 연구는 후쿠오카 지진으로부터 관측된 지반진동의 Coda파 및 배경잡음을 분석하였고 결과를 일련의 후쿠오카 지진의 S파 에너지를 분석한 결과와 비교하 였다. 2005년 3월 20일 발생한 후쿠오카 본진을 포함하여 규모 3.9 이상의 모두 15개 중규모의 후속 지진으로부터 국내 관 측소에 관측된 각각 267개 지반진동 자료의 Coda파 및 배경잡음을 분석하여 국내 8개 주요 지진관측소 지반의 동적인 증폭 특성을 분석하였다. 각각의 지진관측소마다 저 진동수 및 고진동수 특성, 관측소 고유의 우월진동수가 서로 상이하여 관측소 고유의 증폭특성을 보여주었다. 대다수 관측소는 S파 및 배경잡음 에너지를 분석한 결과와 많은 부분이 유사함을 보여 주었 다. 물론 본 연구로부터 도출된 결과를 다른 방법을 적용하여 얻어진 결과와 비교할 경우 주요 국내 지진관측소지반의 동적 특성 및 지반분류 연구에 많은 정보를 제시할 수 있다.

주요어: 배경잡음, S파, Coda파, 지반증폭, 수평/수직스펙트럼비, 우월주파수

Since design response spectrum does not reflect local soil characteristics, site specific response spectrum of observed ground motions appears relatively higher than design response spectrum at high frequency range. These problems have been pointed out from the domestic seismic design industry. Among various estimation methods, this study used the method H/V ratio of ground motion for estimating site amplification. This method has been extended to background noise, Coda waves and S waves recently for estimating site amplification. This study applied this method to the background noise and Coda wave energy. This study analysed more than 267 background noises from 15 macro earthquakes including main Fukuoka earthquake (2005/03/20, M=6.5) and then compared to results from S waves, at 8 main domestic seismic stations. The results showed that most of the domestic seismic stations gave similar results to those from S waves. Each station showed its own characteristics of site amplification property in low, high and specific resonance frequency ranges. Comparison of this study to other studies using different method can give us much information about dynamic amplification of domestic sites characteristics and site classification.

Key words : Background noise, S wave, Coda wave, Site amplification, H/V spectral ratio, Resonance frequency

^{*}Corresponding author: kjk-512@semyung.ac.kr

^{© 2013,} 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.

서 론

우리나라는 6.0 이상의 규모 지진이 자주 발생하지 않는 중약진 지역이고 6.0 이상의 규모 지진으로부터 기 록된 실제 기록된 지반진동이 부족한 실정이다. 또한 지 반 분류 방법 및 설계응답스펙트럼 작성 방법의 경우 1997 NEHRP 기준 및 1997 Uniform Building Code (UBC, 1997)을 국내에 적용하고 있다. 현재 미국 서부 지역의 지반 특성 평가를 위해 적용되고 있는 V₃₀ 기준 도 존재하나, 국내의 경우 주로 선캠브리아기 및 중생대 에 대부분의 기반이 생성되어 오랜 기간의 풍화작용을 거친 지질역사의 환경이 여타 지역과 비교하여 고유하 기 때문에 대부분의 기반암이 지표로부터 30 m 보다 이 내에 존재하고 있다. V₃₀ 기준은 토양층이 아주 깊은 미국 서부 지역의 지반의 증폭 특성을 비교적 간편하게 적용하기 위한 분석방법 가운데 하나이다.

또한 국내 내진설계 기준을 이용할 경우 지반분류 방 법이 국내 지반 특성을 제대로 반영하지 못하여 국내의 부지고유 응답해석 결과와 국내 내진설계기준을 반영한 설계응답스펙트럼을 비교할 경우 단주기와 장주기 영역 에서 많은 특성 차이를 보여 주고 있다. 따라서 저 진 동수 구간보다 특히 고진동수 구간에서 가속도 스펙트 럼의 지반증폭이 상대적으로 크게 나타나는 등 미국 서 부 기준을 국내에 적용하는 것은 문제점이 많다고 지적 되어 왔다. 따라서 국내의 고유 지반증폭 현상에 대한 연구가 필요한 실정이다.

관측 지반진동은 지진원, 지각감쇄 및 지반의 증폭특 성 등 3가지 주요 인자로 구성되며 지반증폭 특성은 특 히 지진원 및 지각감쇄 특성을 보다 신뢰성 있게 분석 하기 위해 반드시 고려되어야 하는 주요 요소이다. 따라 서 지반증폭 특성은 자연과학적 및 공학적 측면 동시에 고려할 때 대단히 중요한 정보 가운데 하나이다. 또한 지반증폭 특성의 중요성은 1989년 미국 서부지역에서 발생한 Loma Prieta 지진 및 멕시코 지진의 경우 각각 의 진앙으로부터 약 250 km 및 300 km 이상의 먼 거 리에 위치하여도 구조물이 위치하고 있는 지반증폭이 높 은 수준일 때 구조물에 대한 지진재해가 심각하여 그 중요성이 입증되었다(Atkinson and Cassdiy, 2000).

그러므로 국내 고유의 지반특성을 고려한 국내 고유 의 부지 증폭 특성에 대한 연구가 필요하다. 이러한 부 지효과는 부지하부 지하매질의 기하학적 형태와 물성치 및 지형 등에 영향을 받아서 관측된 지반운동의 중요한 특성값(진폭, 진동수 성분, 지속시간 등)에 큰 영향을 주 기 때문에 지진공학적인 연구에서 반드시 고려되어야 할 요소이다. 국내에서는 지반특성에 대해 Yoon et al. (2006) 및 Sun et al. (2007) 등에 의해 연구되어 왔다.

본 연구는 가속도 지반진동의 Coda파 및 배경잡음 에너지를 이용하였으며, 2 번째 방법에 해당하는 Castro et al. (1997) 등에 의해 제시된 분석방법을 적용하였다. 본 연구는 Coda파 및 배경잡음 에너지를 추가적으로 분 석하고 그 결과를, S파 에너지를 이용한 기존의 결과 (Kim, 2013)와 비교 분석하였다. 따라서 관측소에서의 지반증폭 현상에 대해 보다 신뢰성이 향상된 분석이 가 능하였다.

연구방법

지반의 지반증폭을 연구하는 방법은 다양한 방법이 제시되어 있다. 또한 분석할 때 배경잡음, S파 및 Coda 파 등과 같이 파의 에너지 종류에 따라 분류할 수 있다. 본 연구는 S파 에너지에 비해 상대적으로 주시시간이 길어 늦게 도달하고 또한 상대적으로 작은 에너지를 가 지고 있는 Coda파 및 배경잡음 에너지를 분석한 결과 를 기존의 S파 에너지의 연구결과(Kim, 2013)와 비교하 였다. Coda파 에너지를 이용한 방법은 여러 연구자 (Tucker et al, 1984; Phillips et al, 1986; Su et al, 1996)에 의해 연구가 수행되어 왔다.

지반증폭 효과를 분석하는 방법은 크게 3가지로 분류 가능하고 첫 번째 방법은 우선 분석대상 부지로부터 비 교적 가까운 곳에 위치하고 또한 노두가 양호하게 발달 된 기준지점과 지반증폭 효과를 분석하고자 하는 대상 부지에서 각각 관측된 지반진동의 푸리에 스펙트럼 비 율을 이용하는 기준암반 관측소(Reference Site)와 비교 하는 방법이 있다. 이러한 방법은 다양한 연구자에 의해 활발하게 연구되어 왔다(Borchert, 1970; Rogers et al. 1984; Nakamura, 1989; Ohmachi et al., 1991; Lermo and Francisco, 1993; Bonilla et al, 1997; Hartzell et al, 1997; Seed et al. 1998; Cassidy et al., 1999). 하지만 이 방법을 효과적으로 적용할 수 있 을 가능성은 분석대상 부지 주변 가까운 곳에 지역적으 로 대표 가능한 암반이 존재하느냐 여부에 달려 있다.

두 번째 방법은 Castro et al. (1997) 등에 의해 제 시된 방법은 임의의 관측소에서 관측된 수지 및 수평 2 성분을 포함하여 3개 성분을 이용하여 수직성분에 대한 수평성분의 푸리에 스펙트럼의 비율을 이용하는 방법으 로 주변 다른 관측소의 지반진동 자료를 필요로 하지 않는다. 처음에는 배경잡음을 대상으로 연구가 주로 진 행되었으나 S파 에너지 및 Coda파 에너지 등으로 확장 되어 적용한 결과 타당성이 입증이 되고 있다.

세 번째 방법은 관측파형에서 우선 지진원 및 지각감 쇠 특성을 제거하고 다음으로 임의 부지 그룹의 약 3-4 km 하부의 평균적인 감쇠 부분(k_s)을 제외한 나머지를 이용하여 순수한 지반증폭을 구하는 방법이 있다. 마지 막으로 부지하부의 기하학적 모양, 전단파 속도 및 탄성 임피던스를 이용하여 RVT (Random Vibration Theory) 및 SHAKE 프로그램 등을 이용하는 방법이 있다. 국내에서 특히 지진관측소의 동적 지반증폭 효과에 대한 연구가 별로 없는 실정이다, 또한 관측소 하부지반 의 직접 조사는 비용이 많이 소요되기 때문에 임의 관 측소에서 축적된 지반진동 자료의 분석만으로 지반증폭 효과를 분석할 수 있는 효과적인 방법 가운데 하나이다. 물론 관측거리 범위 내에서 중규모 이상의 지진이 관측 기간 내에 자주 발생하여 관측자료가 풍부해야 한다는 약점을 피할 수 있는 효과적 방법이다.

이 분석방법은 일반적으로 지진과 같은 지반진동원이 관측부지에 아주 가까이 있지 않을 경우 적용되며 관측

Table 1. List of seismic station and earthquake occurrence dates

Station Name (Lat, Lon)	Event Date List	Event Number
GKP1 (Lat; 35.8863N Lon.:128.6083E)	2005/05/01/16/23 (ML 4.3), 2005/04/20/00/08 (ML 4.6) 2005/04/19/21/11 (ML 4.7), 2005/04/10/11/33 (ML 4.4) 2005/03/25/12/02 (ML 3.9), 2005/03/24/14/37 (ML 3.7) 2005/03/22/06/55 (ML 4.3), 2005/03/21/14/58 (ML 4.4), 2005/03/21/06/37 (ML 4.0), 2005/03/20/11/38 (ML 3.9), 2005/03/20/11/08 (ML 3.7), 2005/03/20/10/52 (ML 4.2) 2005/03/20/05/32 (ML 3.9), 2005/03/20/01/53 (ML 6.5)	14
KRA (Lat; 35.3306N Lon; 129.3110E)	2005/05/01/16/23 (ML 4.3), 2005/04/20/00/08 (ML 4.6) 2005/04/19/21/11 (ML 4.7), 2005/04/10/11/33 (ML 4.4), 2005/03/25/12/02 (ML 3.9), 2005/03/24/14/37 (ML 3.7), 2005/03/22/06/55 (ML 4.3)	7
KHD (Lat; 37.7036N Lon;126.3774E)	2005/05/01/16/23 (ML 4.3), 2005/04/20/00/08 (ML 4.6) 2005/04/19/21/11 (ML 4.7), 2005/04/10/11/33 (ML 4.4) 2005/03/25/12/02 (ML 3.9), 2005/03/22/06/55 (ML 4.3), 2005/03/21/14/58 (ML 4.4), 2005/03/21/06/37 (ML 4.0), 2005/03/20/11/38 (ML 3.9), 2005/03/20/10/52 (ML 4.2) 2005/03/20/01/53 (ML 6.5)	11
GSU (Lat; 35.1520N Lon;128.0990E)	2005/05/01/16/23 (ML 4.3), 2005/04/20/00/08 (ML 4.6) 2005/04/19/21/11 (ML 4.7), 2005/04/10/11/33 (ML 4.4) 2005/03/25/12/02 (ML 3.9), 2005/03/24/14/37 (ML 3.7) 2005/03/22/06/55 (ML 4.3), 2005/03/21/14/58 (ML 4.4) 2005/03/21/06/37 (ML 4.0), 2005/03/20/11/38 (ML 3.9) 2005/03/20/11/08 (ML 3.7), 2005/03/20/10/52 (ML 4.2) 2005/03/20/05/32 (ML 3.9), 2005/03/20/153 (ML 6.5)	14
HKU (Lat; 36.6101N Lon;127.3602E)	2005/05/01/16/23 (ML 4.3), 2005/04/20/00/08 (ML 4.6) 2005/04/19/21/11 (ML 4.7), 2005/04/10/11/33 (ML 4.4) 2005/03/25/12/02 (ML 3.9), 2005/03/24/14/37 (ML 3.7) 2005/03/22/06/55 (ML 4.3), 2005/03/21/14/58 (ML 4.4), 2005/03/21/06/37 (ML 4.0), 2005/03/20/10/52 (ML 4.2), 2005/03/20/01/53 (ML 6.5)	11
HSB (Lat; 36.5525N Lon;126.6380E)	2005/04/10/11/33 (ML 4.4), 2005/03/25/12/02 (ML 3.9), 2005/03/24/14/37 (ML 3.7), 2005/03/22/06/55 (ML 4.3), 2005/03/21/14/58 (ML 4.4), 2005/03/21/06/37 (ML 4.0), 2005/03/20/11/38 (ML 3.9), 2005/03/20/11/08 (ML 3.7), 2005/03/20/10/52 (ML 4.2), 2005/03/20/05/32 (ML 3.9), 2005/03/20/01/53 (ML 6.5)	11
SNU (Lat; 37.4509N Lon;126.9566E)	2005/05/01/16/23 (ML 4.3), 2005/04/20/00/08 (ML 4.6) 2005/04/19/21/11 (ML 4.7), 2005/04/10/11/33 (ML 4.4), 2005/03/22/06/55 (ML 4.3), 2005/03/21/14/58 (ML 4.4), 2005/03/20/01/53 (ML 6.5)	7
TJN (Lat; 36.3775N Lon;127.3638E)	2005/05/01/16/23 (ML 4.3), 2005/04/20/00/08 (ML 4.6) 2005/04/19/21/11 (ML 4.7), 2005/04/10/11/33 (ML 4.4) 2005/03/25/12/02 (ML 3.9), 2005/03/24/14/37 (ML 3.7) 2005/03/22/06/55 (ML 4.3), 2005/03/21/14/58 (ML 4.4), 2005/03/21/06/37 (ML 4.0), 2005/03/20/11/38 (ML 3.9), 2005/03/20/11/08 (ML 3.7), 2005/03/20/10/52 (ML 4.2) 2005/03/20/05/32 (ML 3.9), 2005/03/20/01/53 (ML 6.5)	14
Total	-	89



Fig. 1. Coda wave energy of acceleration observed at NPR seismic station.

소에서 관측된 지반진동의 수직성분은 거의 증폭현상이 없으나 수평성분은 속도가 낮은 매질을 통과하여 전파 될 때에 지표부근 지층의 속도 및 밀도의 함수로 이루 어지는 지반매질 임피던스 차이에 의한 지반의 증폭효 과가 나타나는 성질을 이용하고 있다. 따라서 수평수직 비율 방법에 의하면 부지에서 수직성분의 증폭효과는 거 의 무시될 수 있고 지표관측 지반운동의 수평성분과 수 직성분의 스펙트럼 비를 이용하면 부지효과를 간단하고 유용하게 평가할 수 있다.

지반진동의 수직성분에 대한 수평성분의 지반증폭 비 율은 지반진동의 푸리에 스펙트럼을 이용하여 다음과 같 이 스펙트럼의 비율로 주어진다.

$$\log(H/V) = (\log\sqrt{0.5^*(H_1^2 + H_2^2)} - \log V$$
 (1)

식 (1)에서, H₁ 및 H₂는 각각 관측된 지반진동의 남 북 및 동서방향 수평성분의 푸리에 스펙트럼을 나타내 고 순서에는 관계가 없다. 또한 H는 수평성분, V는 수 직성분의 푸리에 스펙트럼을 각각 나타낸다.

연구자료

본 연구에서 사용한 국내 주요 8개 관측소에서 지반 진동이 관측된 15개 후쿠오카 지진 발생일자 및 규모는 Table 1에 제시되어 있다. 2005년 3월 20일 이후 발생 한 규모 3.7 이상의 15개 중규모급 후쿠오카 지진으로 부터 관측된 지반진동 자료를 대상으로 하여 분석 대상 지반진동 수를 대폭 증가시켰다.

본 연구를 위해 Table 1에서 제시된 지진들을 선택한 이유는 후쿠오카 지진은 본진을 포함하여 모두 15개의 중규모 지진이 본진 발생 이후 약 2달 이내의 단기간에 발생하였기 때문이다. 본진은 규모 6.5이고 2005 년 3 월 20일부터 2005년 5월 2일까지 비교적 짧은 시간 내 에 최소 규모 3.9 이상의 15 지진이 발생하였다.

본 연구는 기존 연구(Kim, 2013) 연구와 비교하면 BRD 관측소는 제외하였고 대신에 고리 원전부근에 위 치하고 있는 KRA 관측소를 새로이 추가하여 KHD, GKP1, GSU, HKU, HSB, KRA, SNU, TJN 을 포함 하여 모두 8개 지진관측소에 대해 분석하였다.

Fig. 1에서 제시되어 있는 바와 같이 가속도 자료 각 각에서 Coda파 에너지의 시작점은 S파 도달시간의 2 배가 되는 시점이고, 이후 약 20초 동안의 에너지를 이 용하였다. 또한 배경잡음은 P파가 도착하기 전 약 20초 동안의 에너지를 이용하였다. Table 1에 제시된 바와 같 이 수평 성분 178개 및 수직성분 89개 자료 모두 267 개의 독립적인 지반진동 자료를 처리하여 분석하였다. 지반진동의 자료타입은 지반증폭 분석에 일반적으로 이 용되는 가속도 자료이며 지반진동의 샘플링 간격은 1초 에 100개 즉 0.01 초이다. S파 에너지의 발달 정도 즉 진폭의 최대크기 및 지속시간은 지진규모 및 진앙거리 등에 따라 영향을 받지만 지반진동의 분석을 위한 시간 길이를 일률적으로 최소 시간길이 약 11초 이상 최대 시간길이 약 20초를 선택하였기 때문에 푸리에 변환 분 석 특성을 고려할 때 분석대상 포인트 숫자는 가장 가 까운 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.

Fig. 2(a) 및 Fig. 2(b)에 제시한 바와 같이 HSB 및 HKU 2개 관측소에 대해 S파, 배경잡음 및 Coda파 에 너지를 푸리에 분석한 결과를 보여 주고 있다. HSB 및 HKU 등 2개 관측소에 대해 공통적으로 전체 진동수 구간에서 S파, Coda파, 배경잡음 순서로 푸리에 분석 결과가 수준이 작아지고 있음을 보여 주고 있다. Coda 파는 back scattering 에너지에 해당하고 지각 및 상부 맨틀의 수평방향으로의 속도구조의 비균질성 때문에 기 인된다고 알려져 있다. 그리고 S파 에너지가 배경잡음



Fig 2. (a): Fourier spectrum of coda, background noise, and S wave at HKU station, (b): Fourier spectrum of coda, background noise, and S wave at HSB station.

수준보다 대수적으로 약 3 또는 그 이상의 차이로 높다. 그리고 진동수가 증가할수록 S파의 진폭이 감소하다가 특히 HKU 관측소는 다시 약 20에서 40 Hz 구간에서 갑자기 높아졌다가 다시 감소한다. 이러한 진동수 특성 을 가진 지반진동을 이용하여 동일 지반에서 관측된 S 파, 배경잡음 및 Coda파 에너지를 포함한 3가지 종류의 지반진동 에너지에 대해 지반증폭의 유사성이 유지되는 지 그 특성을 비교 분석하였다.

연구결과 및 토의

연구결과는 Fig. 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 및 10에 차례 로 제시되어 있으며 각각의 그림에서 가로축 및 세로축 은 지반진동의 진동수 값 및 지반증폭 값을 비교하기 위해 선형적으로 표시하였다. 본 연구는 Coda파 및 배 경잡음을 분석하여 제시하였고, S파 에너지를 분석한 결 과(Kim, 2013)와 비교하기 위해 3개의 평균값 결과를 동시에 제시하였다.

Fig. 3은 서해에 위치하고 있는 KHD (강화도) 관측 소에 대한 Coda파 및 배경잡음을 이용한 지반증폭 분 석 결과이며, 낮은 진동수 구간에서 약 50 Hz까지 전체 진동수 구간에서 지반증폭 값 약 1을 보여주고 있다. 3 가지 종류의 에너지를 이용한 결과 중에서 S파 에너지 를 이용한 연구결과가 전체 진동수 구간에서 상대적으 로 가장 높은 값을 보여주고 있다. 또한 지반증폭 값이 비록 작긴 하지만 Coda파, 배경잡음과 S파 에너지를 이 용한 연구결과의 최대값 및 진동수 위치(약 7 Hz)를 포



Fig. 3. H/V spectral ratio with frequency, using coda, background noise, and S wave at KHD station.

함한 2가지가 모두 일치하고 있다.

본 연구 대상의 지진관측소 가운데 후쿠오카 지진의 진앙으로부터 가장 먼 관측소에 해당하는 본 관측소는 Coda파, 배경잡음 및 S파를 이용한 분석결과의 특성이 대단히 유사하다. 따라서 진앙거리가 약 600 km 이상이 되어도 적용한 방법이 일관성을 보여주고 있어 지반증 폭 특성 분석에 효과적으로 적용되고 있음을 보여주고 있다. 하지만 보다 많은 원거리 지진관측소에 적용하여 객관성을 확인할 필요가 있다.

기존 연구(Kim, 2013)와 본 연구 결과를 동시에 비



Fig. 4. H/V spectral ratio with frequency, using coda, background noise, and S wave at GKP1 station.

교할 경우 전체 진동수 구간에서 지반증폭 값이 1과 2 의 범위에 존재하고 있어 크고 뚜렷한 정상부분이 존재 하지 않는 특징을 보여주고 있다. 따라서 이러한 특징을 고려할 때 KHD (강화도) 관측소는 특정 진동수 구간에 서 뚜렷한 지반증폭을 보이지 않는 비교적 양호한 관측 소로 판단된다. KHD (강화도) 관측소는 시추공에 설치 되지는 않았지만 발달된 암반에 설치되어 있어 위의 분 석결과와 일치하고 있다.

Fig. 4는 GKP1 (경북대) 관측소에 대해 Coda파 및 배경잡음의 지반증폭을 분석한 결과이며 0.1 Hz 이하의 저 진동수 구간부터 약 15 Hz까지 약 1에 해당하는 거 의 일정한 값을 보여주고, 다시 급하게 증가하여 약 33 Hz에서 최대값을 보여주고 있다. 이후 다소 넓은 진동 수 구간에서 걸쳐서 커다란 피크 값을 보여주고 마지막으로 약 50 Hz 부근에서 다시 급하게 감소하고 있다. 기존 연구(Kim, 2013)를 포함한 3가지 종류의 에너지를 이용한 결과에서 S파 에너지를 이용한 연구결과가 대부 분의 진동수 구간에서 상대적으로 가장 높은 값을 보여 주고 있다. 이러한 지반증폭 특징은 KHD (강화도) 관 측소와 유사하다.

또한 S파 에너지를 이용한 결과가 일부 진동수 구간 (10-20 Hz)에서 다소 벗어나는 특징을 보여 주고 있다. 3가지 에너지를 이용한 결과 모두 공통적으로 전체 진 동수 구간에서 유사한 증감 양상을 보여주고 있다. 특히 동일한 주파수 즉 약 33 Hz 부근에서 거의 동일한 최대 값을 보여주고 있어 일관성 있는 특성을 제시하여 주고



Fig. 5. H/V spectral ratio with frequency, using coda, background noise, and S wave at GSU staion.

있다.

약 33 Hz 부근에서 높은 지반증폭 값 및 피크의 진 동수 위치가 3가지 에너지를 이용한 결과와 정확하게 일치하고 있어 약 33 Hz의 진동수가 GKP1 관측소의 부지 고유 우월진동수라고 판단된다. 따라서 지반증폭 현상을 분석하는 다양한 방법이 제시되어 있으나 본 연 구에서 적용된 Coda파, 배경잡음 및 S파 에너지의 수 평 대비 수직 비율을 이용하는 방법이 지반증폭 값을 분석할 때 일관성이 있는 중요한 방법이 될 수 있다고 분석된다. 그리고 40 Hz부터 45 Hz까지 구간도 향후 더욱 많은 자료를 통해 분석해볼 필요가 있다고 판단 된다.

Fig. 5는 GSU (경상대) 관측소의 지반증폭을 보여주 고 있고, Coda파를 이용하여 분석한 결과는 낮은 진동 수에서 출발하여 약 50 Hz까지 전체 진동수 구간에서 지반증폭 값 약 1 그리고 3가지 분석결과 중에서 중간 값을 보여주고 있다. 배경잡음을 이용한 결과는 저 진동 수에서 출발하여 약 30 Hz까지 1보다 작은 값을 보여 주고 있다.

3가지 에너지를 이용한 결과 중에서 S파 에너지를 이 용한 연구결과가 전체 진동수 구간에서 상대적으로 가 장 높은 값을 보여주고 있고 배경잠음을 이용한 결과가 가장 낮은 값을 보여 주고 있다.

3가지 종류의 자료의 분석결과의 특징을 고려할 때 공통적으로 지반증폭 값이 크고 뚜렷한 정상부분이 존 재하지 않는 특징을 보여 주고 있으므로 GSU (경상대)



Fig. 6. H/V spectral ratio with frequency, using coda, background noise, and S wave at HKU station.

관측소는 뚜렷한 지반증폭을 보이지 않는 양호한 비교 적 양호한 관측소로 판단된다. GSU (경상대) 관측소는 지진파 감지기가 시추공 내부에 설치되어 있어 위의 분 석결과와 일치하고 있다.

Fig. 6은 HKU (교원대) 관측소의 지반증폭 값을 보 여주고 있다. Coda파 및 배경잡음을 이용한 분석결과는 낮은 진동수 구간부터 약 17 Hz까지 2 이상의 값을 가 진 2개 및 1개의 피크를 보여 주고 있다. 이후 진동수 구간에서는 커다란 변화없이 약 1의 지반증폭 특징을 보여주고 있다. 3가지 종류의 에너지를 이용한 결과 중 에서 S파 에너지를 이용한 연구결과가 특히 저 진동수 구간에서 상대적으로 가장 높은 값을 보여주고 있고 다 른 진동수 구간에서는 비슷한 값을 보여 주고 있다.

그리고 S과 에너지를 이용한 연구결과는 저 진동수 구간의 약 3지점(4, 7 및 16 Hz) 진동수에서 약 2와 4 사이의 상대적으로 커다란 지반증폭 값을 보여주고 있 다. 그리고 이후 약 20 Hz부터 50 Hz까지 일정하게 약 1의 지반증폭 값을 보여주고 있다.

3가지 종류의 에너지를 이용한 결과는 3 지점(4, 7 및 16 Hz) 진동수에서 최대값에 있어서 다소 차이가 존 재하지만 공통적으로 피크가 형성되는 특성을 보여 주 고 있다. 따라서 3가지 종류 에너지를 이용한 연구결과 가 일관성이 있게 상호 일치하고 있어 약 4 Hz, 7 Hz 및 16 Hz가 부지 고유의 우월진동수 구간이라고 판단되 며 복잡한 증폭 현상을 보여 주고 있으므로 관측소 하 부 지반에 대한 자세한 조사가 필요하다고 판단된다. 하



Fig. 7. H/V spectral ratio with frequency, using coda, background noise, and S wave at HSB station.

지만 3가지 종류의 분석결과의 특징을 고려할 때 HKU (교원대) 관측소는 향후 지진 관측자료를 풍부하게 축적 하여 보다 체계적으로 분석할 필요가 있다고 판단된다.

HSB (홍성) 관측소의 지반증폭 값은 Fig. 7에 제시되 어 있고, Coda파 및 배경잡음을 이용한 분석한 결과는 저 진동수 구간부터 약 50 Hz까지 거의 일정한 값 1 즉 지반증폭 현상이 거의 없는 특징을 보여주고 있다. 그리고 기존 연구(Kim, 2013)를 포함한 3가지 종류의 에너지를 이용한 결과 중에서 S파 에너지를 이용한 연 구결과가 특히 저 진동수 구간에서 상대적으로 가장 높 은 값을 보여주고 있고 다른 진동수 구간에서는 비슷한 값을 보여 주고 있다. 이러한 지반증폭 특징은 HKU (교 원대) 관측소와 유사하나 지반증폭 값이 상대적으로 대 단히 작다.

지반증폭 값이 1과 2 사이의 범위에 존재하고 있어 크고 뚜렷한 정상부분이 존재하지 않는 특징을 보여주 고 있다. 따라서 3가지 종류 자료의 분석결과의 특징을 고려할 때 HSB (홍성) 관측소는 특정 진동수 구간에서 뚜렷한 지반증폭을 보이지 않는 비교적 양호한 관측소 로 판단된다. HSB (홍성) 관측소는 지진파 센스가 시추 공에 설치되어 있어 위의 분석결과와 일치하고 있다.

Fig. 8은 KRA (고리) 관측소의 지반증폭 특성을 보 여주고 있다. Coda파 및 배경잡음을 이용한 분석한 결 과는 저 진동수에서 증가하다가 약 8 Hz에서 피크 값을 유지하고 이후 감소하다가 약 20 Hz부터 약 40 Hz까지



Fig. 8. H/V spectral ratio with frequency, using coda, background noise, and S wave at KRA station.

평탄한 모양을 보여주고 있다. 다시 약 40 Hz 부근에서 작은 피크 값을 보이다가 감소하고 있다.

3가지 종류의 에너지를 이용한 결과 중에서 S파 에너 지를 이용한 연구결과가 특히 저 진동수 구간 구간에서 상대적으로 가장 높은 값을 보여주고 있고 배경잠음을 이용한 결과가 가장 낮은 값을 보여 주고 있다. 이러한 특징은 KHD, GSU 및 HKU 관측소에서 역시 유사한 특징을 보여 주고 있다.

그리고 Coda파 및 S파(Kim, 2013) 에너지를 이용한 연구결과는 약 7 Hz에서 날카로운 모양의 최대값을 공 통적으로 나타내고 있지만 배경잡음의 경우 상대적으로 다소 넓은 진동수 구간에서 최대값을 나타내고 있다.

약 5 Hz에서 약 15 Hz까지 진동수 구간이 다른 진동 수 구간에 비해 대단히 뚜렷하고 지반증폭 값이 약 4를 초과하고 있어 3가지 종류의 분석결과를 고려할 때 약 7 Hz가 KRA 관측소 부지의 우월진동수로 판단된다.

Fig. 9는 SNU (서울대) 관측소의 지반증폭 특성을 보 여주고 있다. 저 진동수부터 약 15 Hz까지 넓은 폭의 높은 값을 나타내고 다시 감소하는 양상을 보여주고 있 다. 약 15 Hz 부근에서 계속 증가하기 시작하여 35 Hz 에서 45 Hz까지의 광대역의 진동수 구간에서 거의 4 이 상의 값을 유지하면서 2개의 지역적인 피크 값을 보여 주고 있다. 다른 관측소와 다르게 특히 30 Hz 이상의 진동수 구간에서 Coda파의 경우가 지반증폭이 가장 크 고 배경잡음 및 S파 에너지의 순서를 보여주고 있다.

그리고 의 S파 에너지를 이용한 연구결과(Kim,



Fig. 9. H/V spectral ratio with frequency, using coda, background noise, and S wave at SNU station.

2013)는 전체 진동수 구간에서 Coda파 및 배경잡음을 이용한 분석결과와 부분적으로 차이는 다소 있지만 최 대값의 진동수 위치 및 최대값 크기를 고려할 경우 전 체적으로 거의 유사한 특징을 보여주고 있다.

0.1 Hz에서 약 10 Hz 구간과 약 30 Hz 부근에서 약 45 Hz까지 구간이 여타 진동수 구간에 비해 대단히 뚜 렷하고 지반증폭 값이 약 4를 초과하고 있어 3가지 종 류 자료의 분석결과의 특징을 고려할 때 SNU 관측소 부지의 우월진동수 구간으로 판단된다.

본 연구 대상의 지진관측소 가운데 후쿠오카 지진의 진앙으로부터 KHD (강화도) 관측소에 이어서 2번째로 먼 관측소에 해당하는 본 관측소에서도 Coda파 및 배 경잡음을 이용한 분석결과와 S파 에너지를 분석한 결과 가 일관성을 보여 주고 있어 대단히 유사하다. 따라서 KHD (강화도) 관측소와 동일하게 진앙거리가 멀더라도 본 방법이 일관성이 있게 적용되고 있음을 보여주고 있 다. 하지만 보다 많은 원거리 관측소에 적용하여 객관성 을 확인할 필요가 있다.

Fig. 10은 TJN (대전 한국지질자원연구원) 관측소의 지반증폭 값을 나타내며 0.1 Hz 이하의 낮은 진동수에 서 출발하여 약 50 Hz까지 전체 진동수 구간에서 거의 1 수준의 일정한 지반증폭 값을 보여주고 있다.

3가지 종류의 파형 에너지를 이용한 결과 중에서 S파 에너지를 이용한 연구결과가 특히 저 진동수 구간에서 상대적으로 가장 높은 값을 보여주고 있고 배경잠음을 이용한 결과가 가장 낮은 값을 보여 주고 있다. 이러한



Fig. 10. H/V spectral ratio with frequency, using coda, background noise, and S wave at TJN station.

순서적인 특징은 GKP1 관측소를 제외한 거의 모든 관측소에서 공통적으로 유사한 특징을 보여 주고 있다.

S파를 이용한 기존 연구(Kim, 2013)의 결과와 본 연 구 결과를 비교할 경우 전체 진동수 구간에서 지반증폭 값이 1과 2 사이의 범위에 존재하고 있고 수개의 진동 수에서 다소 큰 값을 보여주고 있으나 뚜렷한 정상부분 이 존재하지 않는 특징을 보여주고 있다. 따라서 이러 한 3가지 종류 자료의 분석결과의 특징을 고려할 때 TJN 관측소는 특정 진동수 구간에서 뚜렷한 지반증폭 을 보이지 않는 비교적 양호한 관측소로 판단된다. 시 추공에 설치되지는 않았지만 터널 배부에 위치하고 있 는 발달된 암반에 설치되어 있어 위의 분석결과와 일치 하고 있다.

따라서 관측소의 지반증폭 특성은 2가지로 분류 가능 한 것으로 분석되었다. 첫째, 일부 관측소는 관측소 고 유의 우월진동수를 가지고 있는 것으로 분석되었다. 특 히. GKP1 관측소는 약 30-40 Hz 구간에서 특히 33 Hz, HKU 관측소는 약 4부터 15 Hz 부근까지 3개의 피크로 이루어져 있는 진동수 구간이 가능성이 있는 것 으로 분석되었다. 하지만 해당 관측소에 대해 향후 더욱 많은 지진 관측자료를 이용하여 많은 연구가 필요하다. KRA 관측소는 약 5 Hz 부근에서 약 15 Hz 구간, 마지 막으로 SNU 관측소는 0.1 Hz에서 약 10 Hz 구간과 약 25 Hz 부근에서 약 45 Hz까지 구간이 해당 관측소 고유 의 우월진동수 구간으로 분석된다.

둘째, GKP1, HKU, KRA와 SNU를 제외한 KHD,

HSB, GSU 및 TJN를 포함하는 4개 관측소는 단단한 암반층 이거나 시추공 관측소에 해당하여 증폭 현상을 거의 보여주지 않는 것으로 분석되었다. 그리고 3가지 종류의 에너지를 이용한 분석결과가 상호 매우 잘 일치 하고 있음을 보여 주었다.

결 론

관측된 지진파로부터 지진원 특성, 지각의 비탄성 및 탄성감쇠 특성을 보다 정확하게 분석하기 위해 관측소 하부의 지반증폭 효과가 반드시 제거되어야 한다. 또한 구조물의 효과적인 내진설계를 위해 해당 부지의 지반 증폭 효과는 가장 중요한 요소 가운데 하나에 해당된다. 따라서 자연과학적 및 공학적 측면 모두를 고려할 때 지반증폭 특성은 대단히 중요한 정보 가운데 하나이다. 본 연구는 Coda파 및 배경잡음을 분석하여 제시하였고, S파 에너지를 분석한 결과(Kim, 2013)와 비교하기 위해 동시에 제시하여 적용된 방법의 신뢰성 에 대한 검증을 시도하였다.

(1) 일본 후쿠오카 지역에서 발생한 지진으로부터 관 측된 새로이 Coda파 및 배경잡음을 분석한 결과와 기 존의 S파 에너지를 이용한 분석결과를 이용한 연구 결 과를 비교하였다. 특히 관측파형의 푸리에 분석 값이 대 수적으로 약 3 또는 그 이상의 차이에도 불구하고 지반 증폭의 유사성이 유지되는지를 분석하였다. 3가지 종류 의 분석결과 상호간에 대부분의 관측소에서 일부 진동 수 구간에서 차이는 다소 존재하나 대체로 유사하고 일 관성 있는 지반증폭 특성을 제시하여 주었다. 따라서 지 반증폭 현상을 분석하는 다양한 방법이 제시되어 있으 나 본 연구에서 적용된 배경잡음 및 S파 에너지의 수평 대비 수직 비율을 이용하는 방법이 지반증폭 값을 분석 하는 중요한 방법이 될 수 있다고 분석된다.

(2) 일부 관측소는 관측소 고유의 우월진동수를 가지 고 있는 것으로 분석되었다. GKP1 관측소는 약 30-40 Hz 구간에서 특히 33 Hz, HKU 관측소는 약 4부터 15 Hz 부근까지 3개의 피크로 이루어져 있는 진동수 구 간이 가능성이 있으나 향후 더욱 많은 연구가 필요하다. KRA 관측소는 약 5 Hz 부근에서 약 15 Hz 구간, 마지 막으로 SNU 관측소는 0.1 Hz에서 약 10 Hz 구간과 약 25 Hz 부근에서 약 45 Hz까지 구간이 해당 관측소 고유 의 우월진동수 구간으로 분석된다. GKP1, HKU, KRA 와 SNU를 제외한 관측소는 단단한 암반층 이거나 시추 공 관측소에 해당하여 3가지 종류의 분석결과와 일치하 고 있음을 보여 주었다.

(3) GKP1, HKU, KRA 및 SNU 관측소 등과 같이 우월진동수가 뚜렷한 부지에서 관측된 지반진동을 이용 할 경우 지진원 특성, 지각의 비탄성 및 탄성감쇠 특성 과 같은 관측된 지진파의 특성을 보다 정확하게 결정하 기 위해 부지 고유의 우월진동수를 유의하여 고려한 필 요가 있다.

(4) 진동수 구간에 따라 다소 다른 특징을 보여주고 있지만 일부 진동수 구간에서 증폭효과가 1보다 크게 초과하는 관측소에서 관측된 지반진동을 이용하여 지진 원 및 지각감쇄 특성을 신뢰성 있게 분석하기 위해 지 반의 증폭효과를 미리 제거할 필요가 있다. 일부 지반증 폭 효과가 커다란 관측소는 부지를 증폭이 거의 없는 관측소 부지를 선택하려고 시도하였으나 관측소의 전기 공급원 등을 고려하여 생활근린 시설 부근에 설치되어 부지 내에 다소의 토양층이 있어 지반증폭 현상이 있는 것으로 판단된다. 따라서 다수의 관측소에서 지반의 증 폭 값이 특정 진동수 구간에서 1보다 훨씬 초과하는 지 반증폭 현상이 나타나고 있다.

(5) 일부 지진관측소의 경우 향후 발생 지진으로부터 관측될 지반진동을 보다 많이 고려하여 신뢰성 있는 지 반증폭 효과를 분석할 필요가 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 기상기술개발관리단의 "지진기술 개발사업(CARTER 2013 -8170)"에 의한 것이며, 이에 감사드립니다.

References

- 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, 1028-1040.
- 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, 710-730.
- Borchert, R., 1970, Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay, Bull. Seism. Soc. Am., 60(2), 9-61.
- Cassidy, J. F. and Rogers, G. C., 1999, Seismic site response in the greater Vancouver, British Columbia area: spectral rations from moderate earthquakes, Can. Geotech. J. 36, 195-209.

- Castro, R. R., Mucciarelli, M., Pecor, F., and Petrungaro, C., 1997, S-wave site-response estimates using horizontal-to-vertical spectral ratios, Bull. Seism. Soc. am., 87, 256-260.
- Hartzell, S., Cranswick, E., Frankel, D., and Meremonte, M. ,1997, Variability of site response in the Los Angeles Urban area, Bull. Seism. Soc. Am., 87, 1377-1400.
- Kim, J. K., 2013, A Study of the Dynamic Amplification Characteristics of the Major Domestic Seismic Observation Sites using Ground Motions from 12 Fukuoka Earthquakes Series, J. of KOSHAM, 13, 177-185.
- Lermo J. and Francisco J. C., 1993, Site effect evaluation using spectral ratios with only one stations, Bull. Seism. Soc. am., 83, 1574-1594.
- Nakamura, Y., 1989, A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, QR RTRI, 30, 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).
- Ohmachi, T., Nakamura, Y., and Toshinawa, T. 1991, Ground motion characteristics in the San Francisco Bay area detected by microtremor measurements, Proc. 2nd Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, Missouri, pp. 1643-1648.
- Phillips, S. C. and Aki, K., 1986, Sits Amplification of Coda waves from Local earthquakes in Central California, Bull. Seism. Soc. Am., 76. 627-648.
- Rogers, A. M., Borcherdt, 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, 1925-1949.
- Seed, H. B., Toro, M. P., and Sun, J. L., 1998, Relationship between soil conditions and earthquake motions, earthquake spectra, 30, 687-729.
- Su, F, Anderson, J. G., Brune, J N., 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, 1006-1018.
- Sun, C. G., Chung, C. K., Kim, D. S., and Kim, J. K., 2007, Evaluation of Site-specific Seismic Response Characteristics at Town Fortress Areas Damaged by Historical Earthquakes, J. Geo. Eng., 17, 1-13.
- 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, 153-165.
- UBC(ICBO), 1997, Uniform building code, Structural engineering design provisions, Conference of Building Officials, Volume 2, 492pp.
- Yoon, J. K., Kim, D. S., and Bang, E. S., 2006, Development of Site Classification System and Modification of Design Response Spectra considering Geotechnical Site Characteristics in Korea (III) -

Modification of Desing Response Specra, Earthquake Engineering Society of Korea, 10, 63-72.

> 원고접수일: 2013년 11월 4일 수정본채택: 2013년 12월 20일 게재확정일: 2013년 12월 21일

김준경

교수, 소방방재학과, 세명대학교 충북 제천시 신월동 세명대학교 010-2407-3926 043-649-1319 E-mail: kjk-512@semyung.ac.kr