

4개 변전소시설 부지 인근관측소의 지반증폭 특성 및 파형에너지 수준 비교 연구

유성화¹ · 김준경^{2,*} · 위성훈¹

¹한국지질자원연구원 지진연구센터, 34132, 대전광역시 유성구 과학로 124

²세명대학교 소방방재학과, 27136, 충북 제천시 세명로 65

A Comparison Study of the Site Amplification Characteristics and Seismic Wave Energy Levels at the Sites near Four Electric Substations

Seong-Hwa Yoo¹, Jun-Kyoung Kim^{2,*}, and Soung-Hoon Wee¹

¹Earthquake Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²Semyung University

Abstract: The problem has been pointed out that the domestic design response spectrum does not reflect site amplification, particularly in the high frequency bands, including the fact that site specific response spectrum from the observed ground motions appears relatively higher than design response spectrum. Among various methods, this study applied H/V spectral ratio of ground motion for estimating site amplification. This method, originated from S waves and Rayleigh waves, recently has been extended to Coda waves and background noise for estimating site amplification. For limited time of periods, 4 electric substation sites had operated seismic stations at two separate locations (bedrock and borehole) within each substation site. H/V spectral ratio of S wave, Coda wave, and background noise, was applied to 36 accelerations of 3 macro earthquakes (Odaesan, Jeju and Gongju earthquakes), larger than magnitude 3.4, observed simultaneously at each bedrock location within 4 electric substation sites. Site amplifications at the bedrock location of 4 sites were compared among S wave, Coda wave energy, and background noise, and then compared to the previous results from the borehole location data. The site classification was also tried using resonancy frequency information at each site and location. The results suggested that all the electric substation sites showed similar site amplification patterns among S wave, Coda wave, and background noise. Each station showed its own characteristics of site amplification property in low, high and specific resonance frequency ranges. Comparison of this study to other results using different method can give us much more information about dynamic amplification of domestic sites characteristics and site classification.

Keywords: rock classification, background noise, S wave, Coda wave, site amplification,

요 약: 실제 국내에서 관측된 가속도를 이용한 스펙트럼 값이 내진설계기준보다 상대적으로 크게 나타나는 경향을 보이며, 특히 고진동수 구간에서 국내 내진설계 기준이 국내 고유의 지반증폭 특성을 제대로 반영하지 못하고 있어 문제점이 많다고 지적되어 왔다. 지반증폭 특성을 분석할 때 여러 가지 방법이 제시되어 왔으며 본 연구는 현장에서 자주 적용되고 있는 지반진동의 수평/수직 스펙트럼 비율을 이용하는 방법을 적용하였다. 이 방법은 S파 및 레일리파를 이용하는 것로부터 출발하였으나, 최근 Coda파 및 배경잡음 등에 확대 적용되어 지반의 동적인 증폭특성 연구에 많이 이

*Corresponding author: kimjk3926@gmail.com

Tel: +82-43-649-1319

Fax: +82-43-649-1787

용되고 있다. 제한된 연구 기간 동안 4개 변전소시설 관측소 각각 2개 지점(노두 및 시추공)에서 운영되었고 본 연구는 4개 관측소의 노두에서 동시에 관측된 3개 중규모 지진의 가속도 지반진동(S파, Coda파 및 배경잡음)을 이용하여 지반 증폭을 분석하였다. 분석결과는 4개 관측소 각각에 대해 기존 연구결과인 시추공 지반증폭 특성과 상호 비교하였다. 또한 각각 관측소 및 지점에서 지반의 우월진동수를 이용하여 각각 지반에 대한 등급분류도 시도하였다. 각각의 지진관측소마다 저진동수 및 고진동수 특성, 관측소 고유의 우월진동수가 서로 상이하여 관측소 고유의 증폭특성을 보여주었다. 대다수 관측소는 S파, Coda파 및 배경잡음 에너지를 분석한 결과와 많은 부분이 유사함을 보여 주었다. 물론 본 연구로부터 도출된 결과를 다른 방법에 적용하여 얻어진 결과와 비교한다면 지반의 동적 특성 및 지반분류 연구에 많은 정보를 제시할 수 있다고 판단된다.

주요어: 지반분류, 배경잡음, S파, Coda파, 지반증폭

서론

국내의 지질학적인 환경은 주로 선캠브리아기 및 중생대에 거의 기반암이 생성되어 오랜 지질 시간 동안 풍화작용을 거쳤기 때문에 대부분 지역의 기반암이 지표로부터 30 m 보다 얇은 심도에 존재하고 있다. 우리나라의 지반 분류는 NEHRP 기준을 적용하고, 설계응답스펙트럼은 1997 Uniform Building Code (ICBO, 1997)를 적용하고 있다. NEHRP은 미국 서부 지역의 지반 특성 평가를 위해 적용되고 있는 V_{S30} 기준을 적용하고 있고, V_{S30} 기준은 토양층이 아주 깊은 미국 서부 지역의 지반의 증폭 특성을 비교적 간편하게 적용하기 위한 분석방법 중 하나이다. 따라서 국내 내진설계기준 설정 시 국내 지반 특성을 제대로 반영하지 못하고 있다(Yoon et al., 2006; Kim, 2013a, 2013b).

따라서 국내 부지 고유의 응답스펙트럼 분석 결과와 국내 내진설계기준을 반영한 설계응답스펙트럼을 비교할 경우 단주기와 장주기 영역에서 많은 특성 차이를 보여 주고 있다. 특히 저진동수 구간보다 고진동수 구간에서 국내에서 관측된 가속도 스펙트럼의 지반증폭이 상대적으로 크게 나타나고 있다. 결과적으로 미국 서부 기준을 국내에 적용하는 것은 문제점이 많다고 지적되어(Sun et al., 2007; Kim, 2013a, 2013b) 왔기 때문에 국내의 고유 지반증폭 현상에 대한 연구가 필요한 실정이다. 상시미동 에너지의 수평과 수직성분의 스펙트럼 비를 이용하여 지반증폭에 대한 연구(Nakamura, 1989)도 있었고, 동일한 방법을 이용하여 S파 에너지에 대해서도 지반증폭 연구가 확대되었다. S파 에너지를 적용하는 연구의 기초는 Finn(1991)이 이론적 토대를 제시하였다. Castro et al.(1997), Lermo and Francisco(1993) 등이 멕시코 지역에서 실제 관측된 지진자료의 S파 에너지의 수

평 및 수직 성분에 적용하여 성공적인 결과를 얻었으며 이후 많은 연구자들이 동일한 지반증폭 분석 방법을 적용하고 있다. 또한 Coda파 에너지를 이용한 방법은 여러 연구자(Tucker and King, 1984; Phillips and Aki, 1986; Su et al., 1996)에 의해 연구가 수행되어 왔다.

한편, 관측된 지반진동은 지진원, 지각감쇄 및 지반의 증폭특성 등 3가지 주요 인자로 구성되어 있으며, 이 중 지반증폭 특성은 지진원 및 지각감쇄 특성과 같은 다른 지진학적 인자들을 보다 신뢰성 있게 분석하기 위해 반드시 고려되어야 하는 요소이다. 따라서 지반증폭 특성은 자연과학적 및 공학적 측면 모두 대단히 중요한 정보 중 하나이다. 또한 지반증폭 특성의 중요성은 1989년 미국 서부지역에서 발생한 Loma Prieta 지진 및 멕시코 지진(1985)의 경우에 입증되었다. 구조물이 각각의 진앙으로부터 약 250 km 및 300 km 이상 먼 진앙거리에 위치하고 있었으나 구조물 지반의 지반증폭이 높은 수준일 때 구조물에 대한 지진재해가 심각하여 지반증폭 특성의 중요성이 입증되었다(Atkinson and Cassidy, 2000). 국내에서는 지반특성에 대해 Yoon et al.(2006), Sun et al. (2007), Kim(2013a, 2013b) 등에 의해 연구되어 왔다.

본 연구는 4개 변전소 부근에서 제한된 짧은 연구 기간 동안 운영된 4개 관측소 지반에서 관측된 3개 중규모 지진의 가속도 지반진동을 이용하였다. 우선 각 관측소 지반에서 관측된 지반진동의 S파, Coda파 및 배경잡음 각각으로부터 분석된 3종류의 지반증폭 특성을 상호 비교하였다. 또한, 4개 관측소 각각 동일 부지 내에 설치된 시추공 관측소에서 관측된 지반진동을 이용하여 분석한 기존 연구 결과(Kim, 2015)와 상호 비교하였다. 4개 관측소 각각은 시추공 및 노두 등 2곳에 지진계가 설치되어 있다. 또한 4개

관측소 각각의 지반증폭 특성 분석을 위해 4개 관측소 각각에서의 시추공 및 노두 등 2곳에서 관측된 모든 지진자료에 대해 Castro et al.(1997) 등에 의해 제시된 분석방법을 적용하였다. 지반증폭 특성 분석을 수행한 결과 각각의 지진관측소 마다 저진동수 및 고진동수 특성, 관측소 고유의 우월진동수가 서로 상이하여 관측소 고유의 증폭특성을 보여주었다. 4개 관측소는 노두 및 시추공 각각에서 S파, Coda파 및 배경잡음 에너지의 지반증폭 특성이 상호 유사함을 보여 주었다. 또한 4개 관측소는 노두 및 시추공 각각에서 고유의 우월진동수를 나타내었다.

연구방법

지반의 지반증폭을 연구하는 방법은 배경잡음, S파 및 Coda파 등과 같이 파의 에너지 종류에 따라서도 분류할 수 있으며, 현재 다양한 분석 방법이 제시되어 있다. 지반증폭 효과를 분석하는 방법은 여러 가지로 분류 가능하다.

첫 번째 방법은 기준암반 관측소(Reference Site)와 비교하는 방법이다. 우선 분석대상 부지로부터 비교적 가까운 곳에 위치하고 또한 노두가 양호하게 발달된 기준지점과 지반증폭 효과를 분석하고자 하는 대상 부지에서 동시에 각각 관측된 지반진동의 푸리에 스펙트럼 비율을 이용한다. 이러한 방법은 다양한 연구자에 의해 활발하게 연구되어 왔다(Borchert, 1970; Rogers et al., 1984; Nakamura, 1989; Ohmachi et al., 1991; Lermo and Francisco, 1993; Hartzell et al., 1997; Bonilla et al., 1997; Seed et al., 1998; Cassidy et al., 1999). 하지만 이 방법을 효과적으로 적용할 수 있을 가능성은 분석대상 부지 주변 가까운 곳에 지역을 대표 가능한 암반 지반이 존재하느냐 여부에 달려 있다.

두 번째 방법은 Castro et al.(1997) 등에 의해 제시된 방법은 임의의 관측소에서 관측된 수직 및 2개의 수평성분을 포함하여 3개 성분을 이용하여 수직성분에 대한 수평성분의 푸리에 스펙트럼의 비율을 이용하는 방법이다. 따라서 주변 다른 관측소의 또 다른 지반진동 자료를 필요로 하지 않는다. 처음에는 배경잡음을 대상으로 연구가 주로 진행되었으나 S파 에너지 및 Coda파 에너지 등으로 확장되어 적용한 결과의 타당성이 입증되고 있다.

세 번째 방법은 관측과정에서 우선 지진원 및 지

각감쇠 특성을 제거한 다음, 임의 부지 그룹의 약 3-4 km 하부의 평균적인 감쇠 부분(κ_s)을 제외한 나머지를 이용하여 순수한 지반증폭을 구하는 방법이 있다. 마지막으로, 부지하부의 기하학적 모양, 전단파속도 및 탄성임피던스를 이용하여 RVT (Random Vibration Theory) 및 SHAKE 프로그램 지반진동 모사를 통한 방법이 있다.

본 연구는 두 번째 방법을 적용하였으며 각각의 지반운동에서 우선 S파 에너지, 둘째, S파 에너지에 비해 상대적으로 주시시간이 길어 늦게 도달하고 또한 상대적으로 작은 진폭 에너지를 가지고 있는 Coda파, 마지막으로, 지진으로부터 P파 에너지가 도착하기 직전 배경잡음 에너지를 포함하여 모두 3개 종류의 에너지 각각에 대해 지반증폭 결과를 분석하여 상호 비교하였다.

국내에서 특히 지진관측소의 동적 지반증폭 효과에 대한 연구가 거의 없는 실정이고, 이 방법은 비용이 많이 소요되는 하부 지반의 직접 조사와 달리 임의 관측소에서 축적된 지반진동 자료의 분석만으로 지반증폭 효과를 분석할 수 있기 때문에 효과적인 방법 가운데 하나이다. 물론 관측거리 범위 내에서 중규모 이상의 지진이 관측 기간 내에 자주 발생하여 동일 관측소에서 관측된 자료가 풍부해야 한다는 단점이 있다. 이 분석방법은 부지부근에서 관측된 지반진동의 수직성분은 거의 증폭현상이 없으나 수평성분은 속도가 낮은 매질을 통과하여 전파될 때 지표부근 지층의 속도 및 밀도의 함수로 이루어지는 지반매질 임피던스 차이에 의한 지반의 증폭효과가 나타나는 성질을 이용하고 있다. 따라서 수평/수직 스펙트럼 비율 방법에 의하면 부지에서 수직성분의 증폭효과는 거의 무시될 수 있고, 따라서 지표관측 지반운동의 수평성분과 수직성분의 스펙트럼 비를 이용하면 지반증폭 효과를 분석할 수 있다. 지반진동의 수직성분에 대한 수평성분의 지반증폭 스펙트럼 비는 지반진동의 푸리에 스펙트럼을 이용하여 다음과 같이 스펙트럼의 비율로 주어진다.

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

식 (1)에서, H_1 및 H_2 는 각각 관측된 지반진동의 남북 및 동서방향 수평성분의 푸리에 변환 스펙트럼을 나타내고 순서에는 관계가 없다. 또한 H는 수평성분, V는 수직성분의 푸리에 스펙트럼을 각각 나타낸다.

Table 1. List of Seismic Stations and Earthquake Occurrence Dates (KIGAM)

Station Name	Event Date List	Event Number
TB (태백)	2007/01/20/11/56 (ML 4.8)	3
	2008/05/31/12/59 (ML 4.2)	
	2008/10/29/00/25 (ML 3.4)	
SS (서산)	2007/01/20/11/56 (ML 4.8)	3
	2008/05/31/12/59 (ML 4.2)	
	2008/10/29/00/25 (ML 3.4)	
GP (가평)	2007/01/20/11/56 (ML 4.8)	3
	2008/05/31/12/59 (ML 4.2)	
	2008/10/29/00/25 (ML 3.4)	
AA (안산)	2007/01/20/11/56 (ML 4.8)	3
	2008/05/31/12/59 (ML 4.2)	
	2008/10/29/00/25 (ML 3.4)	
Total	-	36*

* 3 components (UD, NS, & EW) per event

연구자료

제한된 연구 기간 동안 부지 건전성 분석을 위해 4개 변전소시설 관측소 각각 2개 지점(노두 및 시추공)에서 운영되었고 본 연구는 4개 관측소의 노두에서 동시에 관측된 3개 중규모 지진의 가속도 지반진동(S파, Coda파 및 배경잡음)을 이용하여 지반증폭을 분석하였다. 기존 연구(Kim, 2015)는 4개 관측소의 노두가 아닌 시추공에서 동시에 관측된 3개 중규모 지진의 가속도 지반진동(S파, Coda파 및 배경잡음)을 이용하여 지반증폭을 분석하였다. 4개 변전소 시설 부지의 지리적 위치, 3개 지진 발생일자 및 규모는 Table 1에 제시하였으며 그 지리적 분포를 Fig. 1에 도시하였다. 단기간의 연구기간을 고려할 때 대단히 짧은 관측기간 및 현장관측 여건 때문에 4개 변전소 인근부지에서 3.0 이상의 중규모급 지진을 동시에 관측하는 것은 현실적으로 대단히 쉽지 않았다. 따라서 신호 대 잡음비가 일정 수준 이상이고 또한 4개 관측소 노두에서 공통적으로 관측된 지진자료는 단지

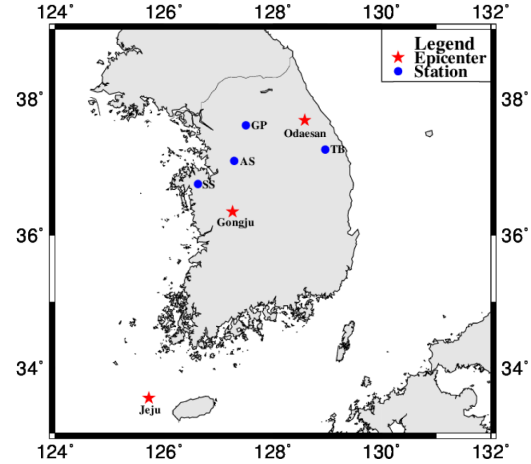


Fig. 1. Map of the seismic stations (blue circle) and earthquake epicenters (red star) used in this study.

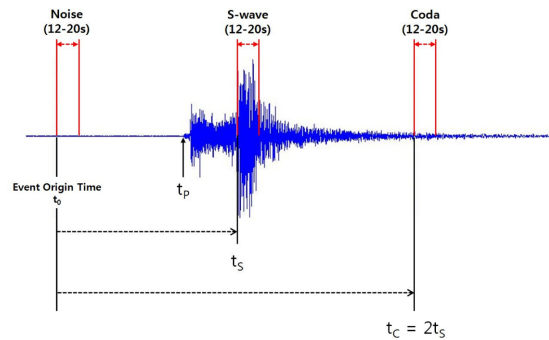


Fig. 2. Origin time, P, S, and Coda Wave Arrival Time of Acceleration Observed at Taebaek Station from the Odaesan Earthquake.

3개 지진이었으며 Table 1에 제시되어 있다. 수평 성분 24개 및 수직성분 12개 자료를 포함하여 모두 36개의 독립적인 가속도 자료를 처리하여 분석하였다. Table 2는 오대산, 제주 및 공주 지진을 포함한 3개 지진의 진앙위치 및 지진규모를 제시하였다. 오대산 지진은 최근 수년간 육지에서 발생한 지진 중에서 가장 규모가 크다.

Fig. 2은 오대산지진으로부터 TB 관측소 노두에서

Table 2. List of Seismic Stations and Earthquake Occurrence Dates (KIGAM)

Earthquake	Epicenter Location	Occurrence Dates	Focal Depth	Magnitude
Odaesan Earthquake (오대산지진)	37.6889 (±5 km), 128.5841 (±5 km)	2007/01/20/11/56	13.1 km (10~15 km)	4.8
Jeju Earthquake (제주지진)	33.5385, 125.7224	2008/05/31/12/59	19.8 km	4.2
Gongju Earthquake (공주지진)	36.3454, 127.2586	2008/10/29/00/25	5.7 km	3.4

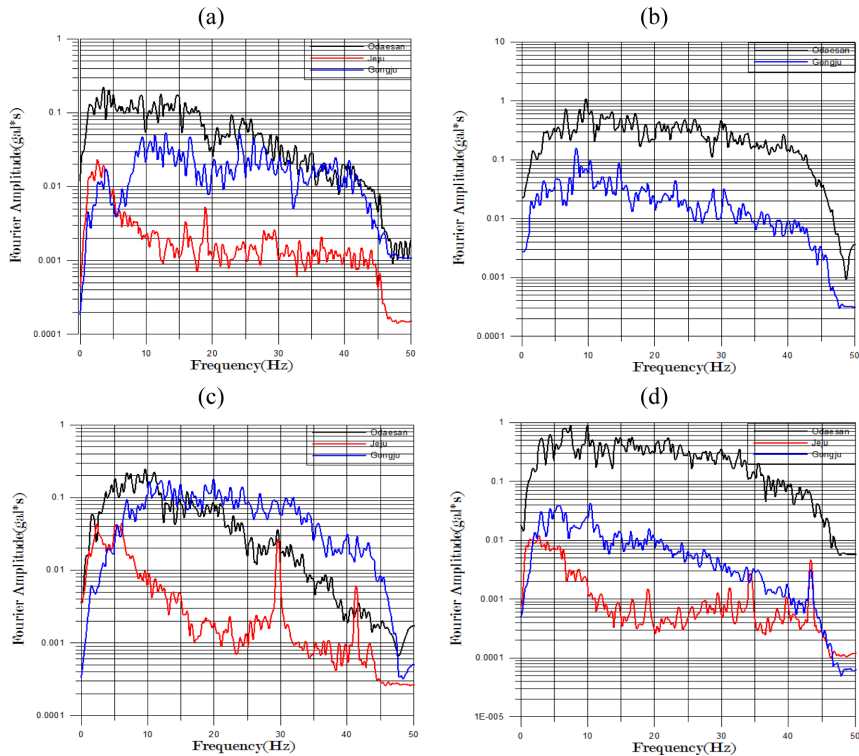


Fig. 3. Fourier Spectrum of each event at (a) AS, (b) GP, (c) SS, (d) TB station.

관측된 가속도 파형에 대해 지진발생 시각, P파 도달 시각, S파 도달시각 및 Coda파 도달시각을 각각 보여주고 있다. Coda파 에너지의 시작시점은 지진 발생 후 S파 도달시각의 약 2배가 되는 시점이고, 이후 약 12-20초 동안의 파형 에너지를 이용하였다. Coda파는 back scattering 에너지에 해당하고 지각 및 상부맨틀의 수평방향으로의 속도구조의 비균질성 때문에 기인된다고 알려져 있다. 또한 배경잡음은 P파가 도착하기 전 약 12-20초 동안의 파형 에너지를 이용하였다.

지반진동의 자료타입은 가속도 자료이며, 지반진동의 샘플링 간격은 1초에 100개 즉 0.01초이며, 나이퀴스트 진동수는 50 Hz이다. S파 에너지의 발달 정도 즉 진폭의 최대크기 및 지속시간은 지진규모 및 진앙거리 등에 따라 영향을 받지만 지반진동의 분석을 위한 시간간격을 일률적으로 최소 지속시간 약 12초 이상 최대 약 20초를 선택하였기 때문에 푸리에 변환 분석 특성을 고려할 때 분석대상 포인트 숫자는 가장 가까운 2의 배수인 모두 1,024 포인트가 된다. 50 Hz가 1,024 포인트로 표현되기 때문에 이를

고려하면 푸리에 변환 분석의 진동수 간격은 약 0.048828 Hz에 해당한다.

Fig. 3는 각각 AS, GP, SS 및 TB 등 4개 관측소의 노두에서 각각 관측된 3개 지진 각각에 대해 푸리에 변환한 결과를 보여주고 있다. 관측소 상대적인 위치, 지진의 진앙, 지진 규모와 상관관계 분석을 위해 제시하였다. 제시된 각각 그림에서 세로축은 푸리에 값이고 단위는 [gal·sec]에 해당한다. 각 지진의 S파, Coda파 및 배경잡음 등 3가지 종류의 관측파형 가운데 비교를 위해 S파 에너지를 선택하였고 3성분 중에서 수직 성분만을 분석한 결과이다. Fig. 3a는 AS 관측소의 노두에서 관측된 오대산지진(검정색), 제주지진(빨간색) 및 공주지진(파란색) 등 3개 지진의 푸리에 변환 값을 보여주고 있다. 규모와 진앙거리 모두를 고려할 때 오대산지진은 가장 큰 값을 보여주었고, 제주지진(규모 4.2)은 공주지진(규모 3.4)보다 규모가 크나 진앙거리의 영향으로 상대적으로 낮은 푸리에 변환 값을 보여주고 있다.

Fig. 3b는 GP 관측소의 노두에서 관측된 오대산지진과 공주지진의 푸리에 변환 값을 보여주고 있다.

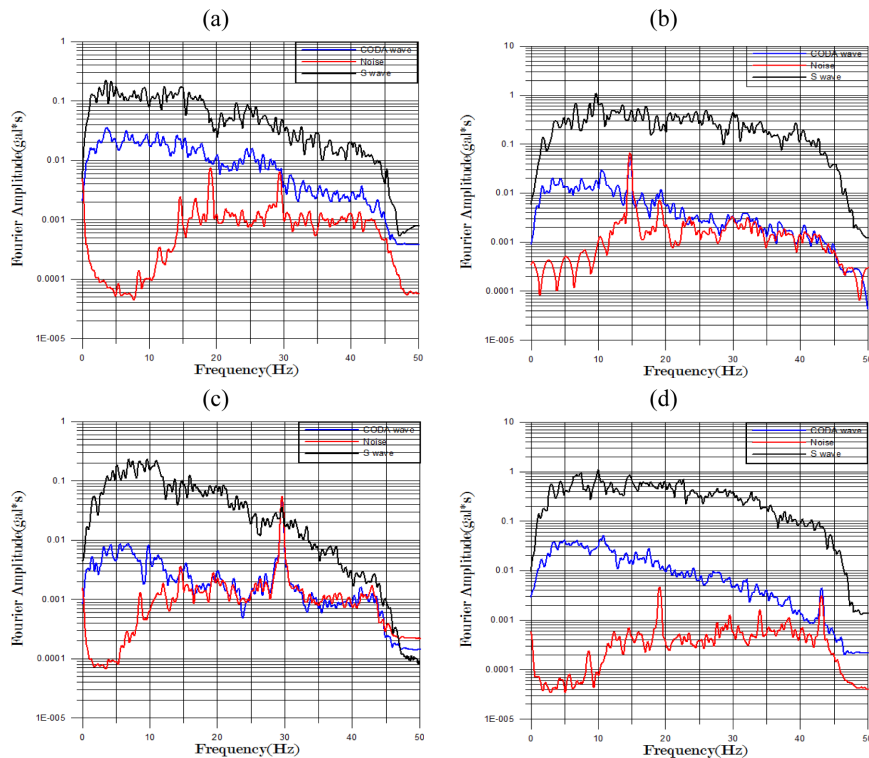


Fig. 4. Fourier Spectrum of Coda, Background Noise, and S Wave at (a) AS, (b)GP, (c)SS, (d) TB station for Gongju earthquake.

Fig. 3b는 GP 관측소의 노두에서 관측된 오대산지진(검정색)과 공주지진(파란색)의 푸리에 변환 값을 보여주고 있다. 제주지진은 잡음의 비율이 다소 높아서 푸리에 변환 값 비교에서 제외하였다. 오대산 지진은 규모가 가장 크고, 관측소로부터 가장 가깝게 위치하고 있어 공주지진으로부터 관측된 파형에 비하여 보다 큰 값을 보여주고 있다.

Fig. 3c는 SS 관측소의 노두에서 관측된 3개 지진의 푸리에 변환 값을 보여주고 있다. 공주지진(파란색), 오대산지진(검정색) 및 제주지진(빨간색)의 순서로 푸리에 변환 값이 작아지고 있음을 보여주고 있다. 서산 지역에 위치하는 관측소이기 때문에 오대산 지진에 비하여 공주지진이 규모는 작지만 가장 가깝게 위치하고, 또한 오대산 지진은 규모가 제주지진에 비해 크고 제주지진 진앙 보다 가까이 위치하고 있기 때문에 큰 값을 보여주고 있어 실제 현상과 잘 부합하고 있다. Fig. 3d는 TB 관측소에서 관측된 3개 지진의 푸리에 변환 값을 보여주고 있다. 오대산 지진(검정색), 공주지진(파란색) 및 제주지진(빨간색)의 순서로 푸리에 변환 값이 작아지고 있음을 보여

주고 있다. 비록 공주지진이 제주지진보다 지진규모는 작지만 TB 관측소로부터 진앙거리를 고려할 경우 푸리에 변환 값은 공주지진이 제주지진 보다 큰 값을 보여주고 있어 실제 현상과 잘 부합하고 있다. 따라서 AS, GP, SS 및 TB 등 4개 관측소 각각에서 관측된 3개 지진에 대해 푸리에 변환한 결과를 살펴보면, 파형 에너지를 효과적으로 분석하기 위해 지진규모와 진앙거리 모두 동시에 고려할 필요가 있다는 것을 잘 보여주고 있다.

Fig. 4는 AS, GP, SS 및 TB 등 4개 관측소 노두 각각에서 3가지 종류의 에너지의 발달정도를 분석한 결과이다. 각각 관측소에서 S파, Coda 파 및 배경잡음 등 3가지 종류의 가속도 파형의 상대적인 진동수 변화에 따른 에너지 크기를 분석하였다. 제시된 각각 그림에서 세로축은 푸리에 값이고 단위는 $[\text{gal} \cdot \text{sec}]$ 에 해당한다. 3개 지진 가운데 가장 작은 규모의 공주지진(규모 3.4)을 이용하였다. 수직 및 수평 2성분 등 3가지 성분 중 수직성분을 이용하였고, S파(검정색), Coda파(파란색) 및 배경잡음(빨간색) 등 3가지 종류의 가속도 파형을 푸리에 변환한 결과이다. 4개

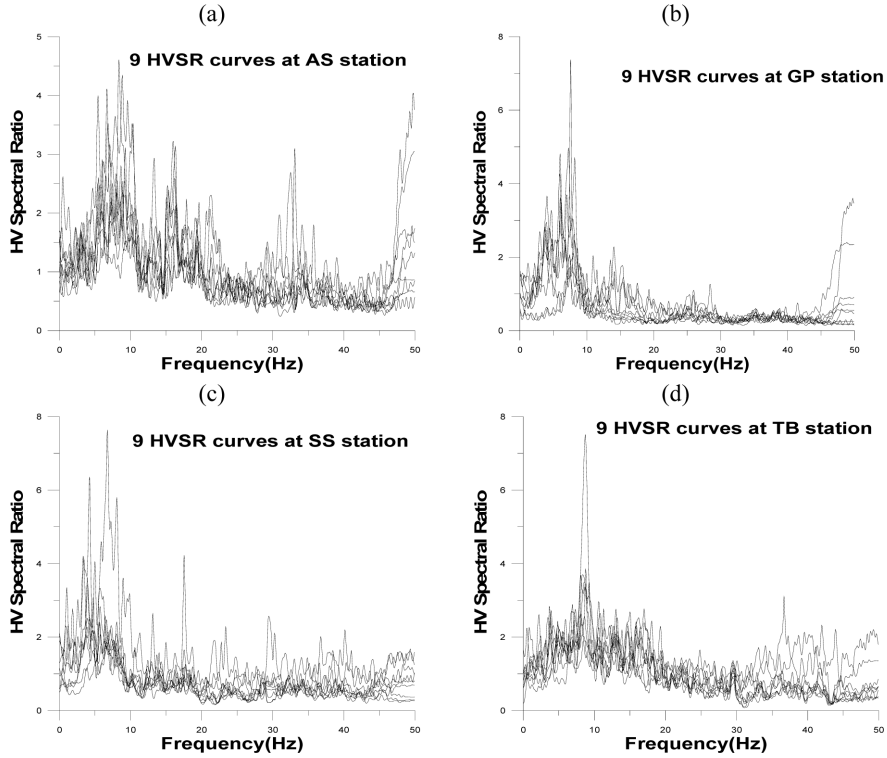


Fig. 5. H/V spectral ratio with frequency, using Coda, background noise, and S wave at (a) AS, (b) GP, (c) SS, (d) TB station.

관측소 각각에서 공통적으로 S파가 가장 크고, Coda 파 그리고 배경잡음의 순서로 작아지는 일관성을 보여주고 있다. 진동수 구간에 따라 다소 차이가 존재하지만 S파와 배경잡음의 푸리에 변환 값을 비교할 때 약 1,000배에서 최대 10,000배 이상의 값의 차이를 보여 주고 있다. 물론 SS 관측소와 GP 관측소의 경우 고진동수 일부 구간에서 배경잡음의 크기 수준이 Coda파와 서로 비슷하거나 보다 커다란 진동수 구간도 관찰되었다. 공주지진은 지진규모가 3.4이며 3개 지진 중에서 가장 작고, 관측소의 배경잡음이 수준 이상일 경우 이러한 현상이 관측가능하다. S파, Coda파 및 배경잡음 등 3종류의 관측파형에 대해 푸리에 분석 값의 수준을 분석하는 목적은 3종류의 푸리에 분석 값이 대수적으로 약 3 또는 4이상의 차이가 존재하고 있음에도 불구하고 수평수직 비율을 이용하는 지반응폭 분석방법을 이용하여 3종류의 파형 에너지를 각각 독립적으로 분석한 결과가 일관성을 갖고 있는지 검증하는 데에 있다.

연구결과 및 토의

Fig. 5은 AS, GP, SS 및 TB를 포함한 4개 관측소의 노두 부지 각각에서 3개 지진 각각에 대해 3개 종류의 파형에너지 각각의 지반응폭을 분석한 결과이다. 따라서 각각 관측소에서 9개 파형 지반응폭 분석 결과를 보여주고 있다. 각각의 그림에서 가로축 및 세로축은 지반진동의 진동수(Hz) 값 및 지반응폭 값이며, 특히 지반응폭을 효과적으로 비교하기 위해 선형적으로 표시하였다. AS 관측소의 눈금 최대값은 5이고 나머지 3개 관측소의 눈금 최대값은 8로 표시되어 있다.

SS 및 TB 관측소에 비하여 AS와 GP 등 2개 관측소는 상대적으로 마지막 부분의 고진동수 구간에서 경계 효과로 인하여 공통적으로 변동 폭이 대단히 높은 값을 보여주고 있다. 하지만 다른 진동수 구간에서 각각 관측소에서 9개 파형 지반응폭 분석결과는 변동 폭이 상대적으로 작음을 보여주고 있다.

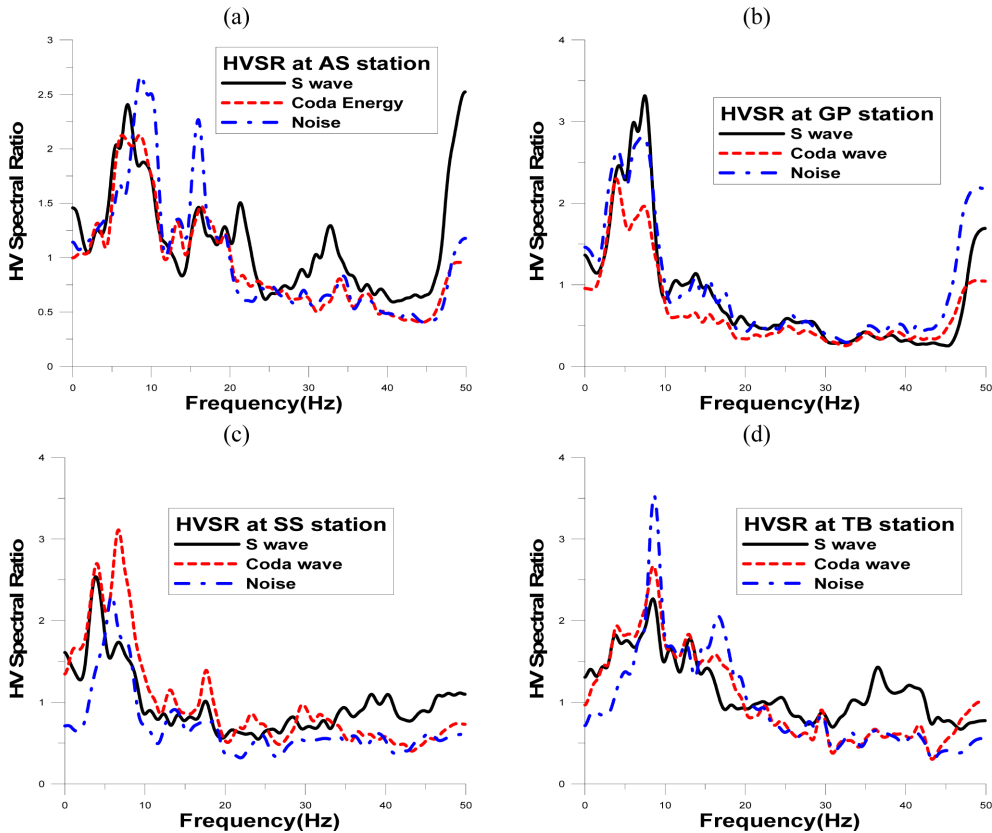


Fig. 6. H/V spectral ratio with frequency, using Coda, background noise, and S wave at (a) AS, (b) GP, (c) SS, (d) TB station.

Fig. 6a는 AS 관측소의 노두에서 관측된 S파, Coda파 및 배경잡음의 지반증폭의 평균값을 각각 분석한 결과이다. 이하 3개 관측소 모두 평균값을 나타내었다. S파, Coda파 및 배경잡음을 이용한 결과는 경계부분을 제외하고 전체 진동수 구간에서 지역적인 피크를 보이면서 최대값 약 2.5의 지반증폭을 보여주고 있다. 또한 S파, Coda파 및 배경잡음을 이용한 지반증폭은 전체 진동수 구간에서 거의 유사한 증감패턴을 보여주고 있다. 특히 S파, Coda파 및 배경잡음을 이용한 결과는 최대값이 정확하게 일치하지 않지만, S파 및 Coda파에 의한 결과는 배경잡음을 이용한 결과에 비해 보다 유사한 증감 패턴을 보여주고 있다. AS 관측소의 노두는 경계 진동수 구간을 제외하고 5 Hz에서 10 Hz 구간에서 상대적으로 커다란 피크를 보여주고 있다. 구간 중에서 약 7 Hz 부근에서 배경잡음을 비롯하여 S파 및 Coda파가 동일한 진동수에서 공통적으로 최대값을 보여주고 있어 AS 관측소 지반 고유의 우월진동수로 판단된다.

Fig. 6b는 GP 관측소의 노두에서 관측된 S파, Coda파 및 배경잡음의 지반증폭을 분석한 결과이다. S파, Coda파 및 배경잡음을 이용한 결과는 저진동수 구간(약 1 Hz 이하) 및 고진동수 구간(약 45 Hz 이상)에서 경계효과를 공통적으로 보여주고 있다. 특히 저진동수 구간은 파형에너지의 DC 성분의 크기와 밀접하게 의존한다고 알려져 있다. 또한 고진동수 구간에서 경계효과는 알리아싱에 의한 효과와 밀접하게 의존한다고 알려져 있다. S파, Coda파 및 배경잡음을 이용한 결과는 경계부분을 제외하고 전체 진동수 구간에서 지역적인 피크를 보이면서 최대값 약 3을 초과하는 지반증폭을 보여주고 있다. S파, Coda파 및 배경잡음을 이용한 결과는 최대값의 위치가 정확하게 일치하지 않지만, S파, Coda파 및 배경잡음을 이용한 지반증폭 값은 전체 진동수 구간에서 거의 유사한 증감패턴을 보여주고 있다.

약 5 Hz에서 약 10 Hz 구간이 공통적으로 최대값을 형성하는 특성을 보여주고 있다. 이 구간 중에서

약 7 Hz 부근에서 물론 Coda파를 비롯하여 S파 및 배경잡음이 공통적으로 동일한 진동수에서 최대값을 보여주고 있어 GP 관측소 지반의 고유 우월진동수로 판단된다.

Fig. 6c는 SS 관측소의 노두에서 관측된 S파 및 Coda파 및 배경잡음을 이용한 지반증폭 값을 보여주고 있다. S파, Coda파 및 배경잡음을 이용한 결과는 AS 관측소 및 GP 관측소와 다르게 저진동수 구간 및 고진동수 구간에서 경계효과를 보여주지 않고 있다. S파, Coda파 및 배경잡음을 이용한 결과는 전체 진동수 구간에서 지역적인 피크를 보이면서 최대값 약 3을 다소 초과하는 지반증폭 값을 보여주고 있다. 최대값의 위치가 정확하게 일치하지 않지만, S파, Coda파 및 배경잡음을 이용한 지반증폭 값은 전체 진동수 구간에서 거의 유사한 증감패턴을 보여주고 있다. 약 2 Hz에서 8 Hz 구간이 공통적으로 최대값을 형성하는 특성을 보여주고 있다. 이 구간 중에서 약 3 Hz 부근에서 S파 및 Coda파가 공통적으로 동일한 진동수에서 최대값을 보여주고 있어 SS 관측소 지반의 고유 우월진동수로 판단된다.

Fig. 6d은 TB 관측소의 노두에서 관측된 S파, Coda파 및 배경잡음을 이용한 지반증폭 값을 보여주고 있다. S파, Coda파 및 배경잡음을 이용한 결과는 저진동수 구간 및 고진동수 구간에서 경계효과를 보여주지 않고 있다. S파, Coda파 및 배경잡음을 이용한 결과는 전체 진동수 구간에서 지역적인 피크를 보이면서 최대값 약 3.5를 초과하는 지반증폭 값을 보여주고 있다. 최대값의 크기는 S파, Coda파 및 배경잡음의 순서대로 증가하면서 다소 차이가 있지만, 진동수 위치가 다른 3개 관측소와 달리 정확하게 일치하고 있음을 보여 주고 있다. 또한 S파, Coda파 및 배경잡음을 이용한 지반증폭 값은 전체 진동수 구간에서 거의 유사한 증감패턴을 보여주고 있다. 1개 진동수 구간(약 7 Hz에서 9 Hz 구간)이 공통적으로 최대값을 형성하는 특성을 보여 주고 있다. 이 구간 중에서 약 8 Hz 부근에서 S파 및 Coda파가 공통적으로 최대값을 보여주고 있어 TB 관측소 지반의 고유 우월진동수로 판단된다. 3가지 종류의 지진파형 에너지를 이용한 지반증폭 특성이 4개 관측소 노두 각각에서 상호 매우 잘 일치하고 있음을 보여 주었다. 4개 관측소 중에서 AS 및 GP 관측소와 같은 2개 관측소는 저진동수 구간 및 고진동수 구간에서 경계효과와 특징을 보여주었고, 이에 비해 SS 및 TB 관측

Table 3. Site Classification Condition (Period)

Site Classification	Site Classification Condition (Period T sec.)	Remarks
T _A	T < 0.10	-
T _B	0.10 < T < 0.30	-
T _C	0.30 < T < 0.50	-
T _D	0.50 < T	-

소는 경계효과가 발견되지 않았다. 4개 관측소 모두 비록 일치하는 정도에서 차이는 있지만 고유의 우월진동수(AS: 7 Hz, GP: 7 Hz, SS: 3 Hz, 및 TB: 8 Hz)를 각각 가지고 있는 것으로 분석되었다.

또한 지반의 우월진동수 또는 고유주기를 Table 3에 제시된 지반분류 방법(Yoon et al., 2006)을 이용하여 4개 관측소 노두를 분류하였다. AS, GP 및 TB 등 3개 관측소 노두는 7 Hz (>0.14초) 내지 8 Hz (0.125초)이고 주기로 환산하여 공통적으로 T_B 지반에 해당하고, SS 관측소 노두는 3 Hz (>0.33초)이고 주기로 환산된 기준할을 적용할 경우 T_C 지반으로 분류 할 수 있다. 4개 각각의 관측소에서 노두는 T_B에서 T_C의 범위에 해당하여 따라서 0.1초를 넘고 0.3초 정도에 상응하게 되므로 공학적으로 Stiff soil 부지에 해당하고 있다.

본 연구에서 분석된 결과를 전 연구(Kim, 2015)의 4개 관측소의 시추공에서의 지반증폭 특성과 비교하였다. Fig. 7a은 AS 관측소에서 노두의 지반증폭과 기존 연구(Kim, 2015)에서 제시된 시추공의 지반증폭을 비교 분석한 결과를 보여주고 있다.

시추공의 지반증폭은 상대적으로 고진동수 구간인 약 25 Hz부터 약 40 Hz 구간에서 약 2 이하의 비교적 약한 지반증폭을 보여주고 있다. 앞서 제시한 바와 같이, 부지의 지반은 고유진동수 약 7 Hz이고 따라서 T_B 지반으로 분류되며 공학적으로 Stiff soil 부지로 분석되었다. 시추공의 경우 비록 지반증폭이 약하지만 약 22 Hz 이상의 우월진동수를 이용한 지반분류를 적용하면 신선한 T_A 암반으로 분류된다. 시추공의 경우 지진계가 보다 깊은 암반 내에 설치되어 나타나는 결과라고 분석된다. Fig. 7b는 GP 관측소에서 노두의 지반증폭 결과와 기존 연구(Kim, 2015)에서 제시된 시추공의 지반증폭을 비교 분석한 결과를 보여주고 있다. 시추공의 지반증폭은 약 30 Hz부터 약 40 Hz 구간의 고진동수 구간에서 최대 약 5의 지반증폭을 보이면서 몇 개의 지역적인 극대 값들을 보여주고 있다.

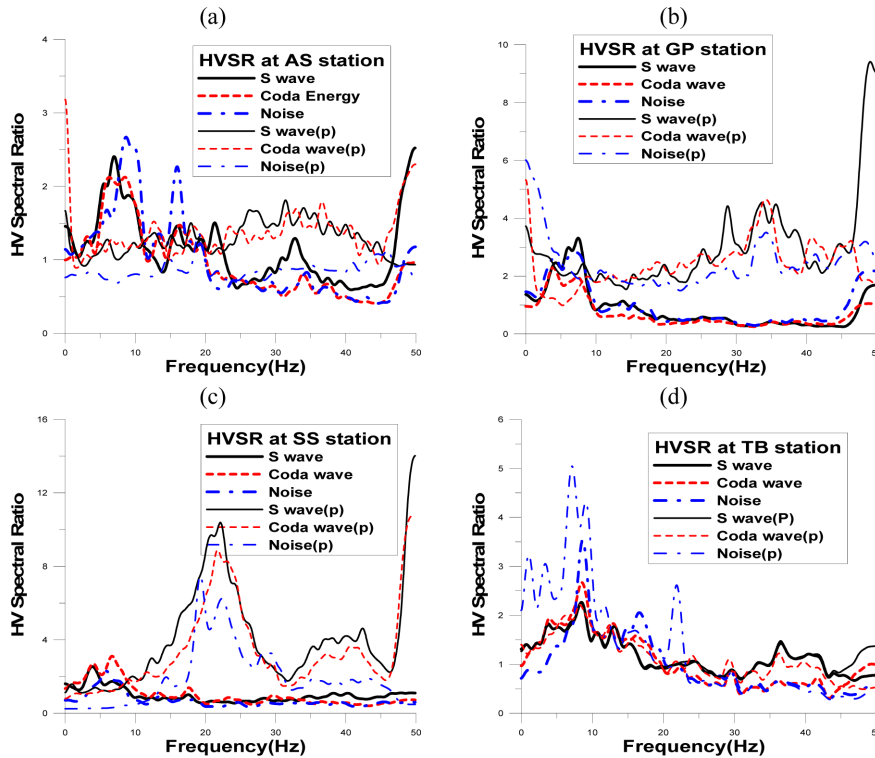


Fig. 7. Comparison of H/V spectral ratio of current and previous study at (a) AS, (b) GP, (c) SS, (d) TB station.

앞서 제시한 바와 같이 노두는 고유진동수가 약 7 Hz이고 따라서 T_B 지반으로 분류되며 공학적으로 Stiff soil 부지 정도에 해당한다. 하지만 시추공의 경우 동일 관측소에서 약 30 Hz부터 약 40 Hz 구간의 고진동수 구간에서 최대 약 5의 우월진동수를 이용한 지반분류를 적용하면 신선한 T_A 암반으로 분류된다. 시추공의 경우 지진계가 깊은 심도에 설치되어 나타나는 특징으로 분석되고, 이러한 특징은 AS 관측소의 시추공과 유사하다.

Fig. 7c는 SS 관측소의 노두 및 시추공(Kim, 2015)의 2개 지점의 지반증폭을 비교 분석한 결과를 보여주고 있다. 시추공의 지반증폭은 45 Hz 이상의 고진동수 부분에서 높은 경계효과를 보여주고 있다. 또한 특히 20 Hz 이상 고진동수 구간에서 최대 약 10의 뚜렷하고 2개의 넓은 폭을 가진 지역적 극대 값들을 보여주고 있다.

시추공의 경우 고진동수에서 AS 관측소 및 GP 관측소의 시추공의 지반증폭이 약 2의 값을 나타내는데 비하여 상대적으로 가장 큰 약 10의 지반증폭을 나타내는 특징을 보여주고 있다. 고진동수에서 지반

증폭 특성은 우월진동수를 고려하면, T_A 정도의 암반으로 구성되어 있는 것으로 분석되나, 보다 정밀한 검증을 위해 향후 현장 지구물리 탐사를 통해 비교 분석할 필요가 있다고 판단된다.

Fig. 7d는 TB 관측소의 노두 및 시추공(Kim, 2015) 등 2개 지점의 지반증폭을 비교 분석한 결과를 보여주고 있다. 전체 진동수 구간에서 지반의 증폭 값과 우월진동수를 고려할 때 노두 및 시추공의 결과가 거의 일치하는 특징을 보여주고 있다. 앞서 제시한 바와 같이 노두는 고유진동수가 8 Hz이고 따라서 T_B 지반으로 분류되며 공학적으로 Stiff soil 부지로 분석되었다. TB 관측소의 시추공 하부는 노두와 유사한 T_B 지반으로 분석되며 지표 지반이 시추공 지진계가 설치된 심도까지 연장되어 있는 것으로 분석된다.

결론

자연과학적 및 공학적 측면 모두를 고려할 때 지반증폭 특성은 대단히 중요한 정보 가운데 하나이다. 4개 변전소 부지 관측소에서 관측된 3개 지진으로부터

터 S파 에너지, Coda파 및 배경잡음 등 3개 에너지를 비교 분석하여 수평 대 수직비율 분석 방법을 적용하여 다음의 결과가 분석되었다.

(1) TB, SS, GP 및 AS를 포함한 4개 관측소 각각에서 관측된 3개 지진에 대해 푸리에 변환한 결과를 고려할 때, 파형에너지를 효과적으로 분석하기 위해 지진규모와 진앙거리 모두 동시에 고려할 필요가 있다는 것을 잘 보여주고 있다.

(2) 오대산, 공주, 제주 지역에서 발생한 지진의 3가지 종류의 파형 에너지 각각에 대한 지반증폭은 상호 밀접한 유사성을 보여주고 있다. 특히 3개 관측소는 S파와 Coda파 에너지의 지반증폭은 배경잡음에 비하여 상대적으로 보다 더욱 유사하고 일관성 있는 지반증폭 특성을 제시하고 있다.

(3) S파, Coda파 및 배경잡음 등 3가지 종류의 관측파형에 대한 푸리에 변환 값이 대수적으로 약 3 또는 4 이상의 차이가 존재하고 있음에도 불구하고 3가지 종류의 각각 관측파형을 독립적으로 분석된 지반증폭이 상호 일관성을 보여주었다. 따라서 본 연구에서 적용된 하나의 관측소에서 관측된 S파, Coda파, 배경잡음 에너지의 수평 대 수직 비율을 이용하는 방법이 지반증폭 값을 분석할 때 신뢰성이 높은 중요한 방법이 될 수 있다고 판단된다.

(4) 우월진동수를 이용한 지반분류 방법에 의하면 4개 관측소에서 노두는 T_B 에서 T_C 의 범위에 해당하고, 지진계가 설치된 시추공은 T_A 에서 T_B 범위를 가진 신선한 지반에 해당하는 것으로 분석된다.

(5) 4개 변전소 부지에 대한 지반증폭 효과 관련 분석결과와 신뢰성을 제고하기 위해 향후 발생 지진으로부터 관측 가능한 지반진동을 충분히 확보하여 분석할 필요가 있다고 판단된다.

사 사

본 연구는 2015년도 기상청 연구비(KMIPA 2015-3010-2)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. *Bulletin of Seismological Society of America*, 90, 1028-1040.

Bonilla, L.F., Steidl, J.H., Lindley, G.T., Tumarkin, A.G., and Archuleta, R.J., 1997, Site amplification in the San Fernando Valley, California. variability of site-effect estimation using the S-wave, Coda, and H/V methods. *Bulletin of Seismological Society of America*, 87, 710-730.

Borchert, R., 1970, Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay. *Bulletin of Seismological Society of America*, 60(2), 9-61.

Cassidy, J.F. and Rogers, G.C., 1999, Seismic site response in the greater Vancouver, British Columbia area: Spectral ratios from moderate earthquakes. *Canadian Geotechnical Journal*, 36, 195-209.

Castro, R.R., Mucciarelli, M., Pecor, F., and Petrongaro, C., 1997, S-wave site-response estimates using horizontal-to-vertical spectral ratios. *Bulletin of Seismological Society of America*, 87, 256-260.

Finn, W.D.L., 1991, Geotechnical engineering aspects of microzonation. *Proceedings of the 4th International Conference Seismic Zonation*, 1, 199-259.

Hartzell, S., Cranswick, E., Frankel, D., and Meremonte, M., 1997, Variability of site response in the Los Angeles Urban area. *Bulletin of Seismological Society of America*, 87, 1377-1400.

ICBO, 1997, Uniform building code, Volume 2, Structural engineering design provisions. *Conference of Building Officials*, 492 p.

Kim, J.K., 2013, A Study of the Dynamic Amplification Characteristics of the Major Domestic Seismic Observation Sites using Ground Motions from 12 Fukuoka Earthquake Series. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, 13, 177-185.

Kim, J.K., 2013, 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. *Journal of Engineering Geology*, 23(4), 435-445.

Kim, J.K., 2015, A Study of the Site Amplification Characteristics and Seismic Wave Energy Levels at the Sites Near the Electric Substations. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, 15, 169-178.

Lermo, J. and Francisco, J.C., 1993, Site effect evaluation using spectral ratios with only one stations. *Bulletin of Seismological Society of America*, 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.

National Earthquake Hazards Reduction Program, 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. Proceedings of the 4th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, Missouri, 1643-1648.
- Phillips, S.C. and Aki, K., 1986, Site Amplification of Coda waves from Local earthquakes in Central California. *Bulletin of Seismological Society of America*, 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. *Bulletin of Seismological Society of America*, 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 Zeng, Y., 1996, A Comparison of direct S-wave and Coda-wave site amplification determined from aftershocks of the Little Skull Mountain earthquake. *Bulletin of Seismological Society of America*, 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. *Journal of Geophysical and Engineering*, 17, 1-13. (in Korean)
- Tucker, B.D. and King, J.L., 1984, Dependence of Sediment-filled Valley Response on Input Amplitude and Valley Properties. *Bulletin of Seismological Society of America*, 74, 153-165.
- 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 design response spectra, *Earthquake Engineering Society of Korea*, 10, 63-72. (in Korean)

Manuscript received: January 26, 2016

Revised manuscript received: February 24, 2016

Manuscript accepted: February 25, 2016