

2017년 포항지진 스펙트럼과 한국표준설계스펙트럼의 비교

Response Spectra of 2017 Pohang Earthquake and Comparison with Korean Standard Design Spectra

허태민¹⁾ · 김정환²⁾ · 이진호³⁾ · 김재관^{1)*}

Heo, Tae Min¹⁾ · Kim, Jung Han²⁾ · Lee, Jin Ho³⁾ · Kim, Jae Kwan^{1)*}

¹⁾서울대학교 건설환경공학부, ²⁾부산대학교 건설융합학부, ³⁾부경대학교 해양공학과

¹⁾Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, ²⁾School of Urban, Architecture and Civil Engineering, Pusan National University, ³⁾Department of Ocean Engineering, Pukyong National University

/ A B S T R A C T /

On November 15, 2017, Pohang earthquake occurred. Its local magnitude was announced to be $M_L=5.4$ by Korea Meteorological Administration (KMA). Ground motion data recorded at KMA stations were obtained from their data bases. From the data, horizontal and vertical response spectra, and V/H ratio were calculated. The horizontal spectra were defined as GMRotI50 spectra. From the statistical analysis of the GMRotI50 spectra, a mean plus one standard deviation spectrum in lognormal distribution is obtained. Regression analysis is performed on this curve to determine the shape of spectrum including transition periods. Applying the same procedure, the shape and transition periods of vertical spectrum were obtained. These results were compared with the Korean standard design spectra, which were developed from domestic and overseas intra-plate earthquake records, and Gyeongju earthquake response spectra. The response spectra of Pohang earthquake were found to be almost identical with the newly proposed design spectra. Even the V/H ratios showed good agreement. These results confirmed that the method adopted when developing the standard design spectra were valid and the developed design spectra were reliable.

Key words: Pohang earthquake, Korean standard design spectra, Intra-plate earthquake, GMRotI50 spectrum, V/H ratio

1. 서론

2017년 11월 15일 포항시 북구 북쪽 9 km 지역에서 지진이 발생하였다. 15일 14시 29분에 규모 $M_L=5.4$ 의 본진이, 같은 날 16시 49분에 규모 $M_L=4.3$ 의 여진이 발생하였다 [1].

포항 지진으로 인한 지반의 진동은 기상청의 지진 관측소에서 전국적으로 기록되었으며 진앙에 아주 가까운 지역에서도 기록되었다. 이 기록들은 2016년 경주 지진과 함께 우리나라 지진 지반운동의 특성을 알아내는 데에

좋은 기회를 제공하였다. 2017년에 발표된 내진설계기준 공통적용사항의 설계스펙트럼('17 code)을 실제 지진 기록으로부터 얻은 스펙트럼과 비교하는 것은 설계스펙트럼의 타당성을 입증할 수 있는 기회가 되었다.

이를 위해서 $M_L=5.4$ 의 본진에 의한 지반진동 기록을 기상청 국가지진 종합정보시스템(이하 NECIS) [1] 데이터베이스에서 수집하고 분석하였다. 진앙거리 200 km 이하의 암반지반에서 관측된 28개의 가속도시간이력을 얻은 다음 이로부터 수평, 수직스펙트럼을 계산하였고 수평스펙트럼에 대한 수직스펙트럼의 비를 계산하였다.

수평지반운동은 어떤 한 관측점에서 방위각에 따라 변동하므로 수평방향을 대표하는 스펙트럼을 설정해야 한다. 이 연구에서는 GMRotI50 스펙트럼을 대표 스펙트럼으로 정의하는 방법을 채택하였다 [2-4]. 개별 지진 기록의 GMRotI50 스펙트럼을 계산한 다음 각 주기별로 스펙트럼 값의 분포를 통계 분석하고 신뢰도 수준에 따른 수평스펙트럼을 구하였다. 가속도

*Corresponding author: Kim, Jae Kwan

E-mail: jkwankim@snu.ac.kr

(Received February 20, 2018; Revised March 27, 2018; Accepted March 28, 2018)

스펙트럼뿐 아니라 변위스펙트럼도 계산하였다. 스펙트럼에 회귀분석을 실시하여 형상을 결정하는 전이주기들과 단주기 증폭계수를 구하였다. 수직지반운동에 대해서도 수평운동과 같은 분석을 실시하여 수직설계스펙트럼의 형상 파라미터들을 구하였다.

이러한 절차에 따라서 얻어진 포항 지진의 수평, 수직스펙트럼을 참고문헌 [5-7]에 제시된 한국표준설계스펙트럼('17 code, '97 code) 및 경주 지진의 스펙트럼과 비교하였다.

2. 포항 지진과 데이터

2.1 포항 지진 요약

2017년 11월 15일 포항 인근에서 일련의 지진이 발생하였다. 15일 14시 29분에 규모 $M_L=5.4$ 의 본진이, 같은 날 16시 49분에 규모 $M_L=4.3$ 의 여진이 발생하였다[1]. 지진의 진앙과 규모는 Table 1에 요약되어 있다. 지진을 일으킨 단층은 지표에 드러나지 않았고 아직 정확하게 식별되지 않았다. 본진에 의해서 진앙거리 200 km 이하의 암반지반 NECIS 관측망[1]의 관측소에 기록된 지반가속도 데이터를 수집하였다.

일정거리 이상으로 진앙거리가 먼 지진기록은 에너지가 감소되어 구조물에 유의미한 피해를 입히지 못한다. 그러나 모든 주기영역에서 동일한 수준으로 감쇠가 일어나지 않기 때문에 진앙거리가 먼 지진기록의 정규화된 스펙트럼은 표준설계스펙트럼의 형상에 불필요한 영향을 끼칠 수 있다. 따라서 진앙거리의 상한을 두어야 하는데 지나치게 가깝게 설정할 경우 확보 가능한 지진기록의 수가 적어져 오히려 통계분석의 신뢰도를 떨어뜨리게 된다. 이러한 측면을 고려하여 유의미한 지진응답을 야기할 수 있는 지진기록들을 충분히 확보하고자 진앙거리 200 km 이하 관측소를 설정했다.

NECIS 관측망의 관측소들은 지반분류를 위한 V_{s30} 과 같은 정량적 정보들이 제공되어있지 않다. 이 연구에서는 서울대학교 지구환경과학부 연구팀의 지문을 기본으로 암반지반에 위치한 것으로 추정되는 관측소들을 선정했다. 한편, 기상청 기술노트[8]에는 일부 기상청 관측소의 지반 특성에 대한 추정 자료가 수록되어 있다. 이 자료를 통해 선정된 관측소들 중 지반 특성을 확인할 수 있는 곳은 기반암층에 위치하거나 International Building Code 2018에서 S_A 또는 S_B 로 분류되는 지반의 고유진동수 6.333 Hz 보다 더 큰 고유진동수를 가지는 것을 확인하였다. 향후, 지속적인 표준설계 스펙트럼의 최신화와 우리나라 지진공학의 발전을 위하여 NECIS 관측소들의 지반조사와 지반분류가 반드시 필요할 것으로 생각된다.

Table 2에 관측소명과 진앙거리 그리고 PGA가 정리되어 있고 Fig. 1에는 관측소의 위치가 지도에 표시되어 있다. 관측소의 진앙 거리 분포를 Fig. 2에 히스토그램으로 나타냈고 대표적인 가속도 시간이력들을 Fig. 3에 도시하였다.

3. 수평스펙트럼

3.1 GMRot150 스펙트럼

한 관측점에서의 수평지반운동은 방위각에 따라서 변동하므로 대표하

Table 1. Main shock and aftershock of Pohang earthquake [1]

Date	Latitude	Longitude	Magnitude
2017-11-15 14:29	36.12	129.36	5.4
2017-11-15 16:49	36.12	129.36	4.3

Table 2. List of stations, epicentral distances and peak ground accelerations [1]

Name	Date	Magnitude	EpiD (km)	Station name	PGA (g)	Note
Pohang earthquake	20171115 14:29	5.4	49.19	ADO2	0.042	KMA (Sampling rate: 100 Hz)
			195.7	BAU	0.0059	
			148.0	BON	0.0034	
			189.8	BURB	0.0025	
			99.55	BUS2	0.0036	
			149.6	CHJ2	0.0042	
			125.2	CPR2	0.0038	
			57.20	DAG2	0.015	
			185.2	DGY2	0.0033	
			182.1	EMSB	0.0031	
			131.4	EURB	0.0032	
			200.0	GWYB	0.0023	
			160.7	HAMB	0.0033	
			124.5	IMWB	0.0032	
			187.2	JEO2	0.0021	
			141.7	KCH2	0.022	
			127.5	MAS2	0.050	
			130.8	MGY2	0.0043	
			193.7	NAWB	0.0049	
			142.8	OKCB	0.0030	
			170.5	OKEB	0.0031	
			8.173	PHA2	0.24	
			117.4	TBA2	0.0036	
			164.8	TOY2	0.0043	
			64.93	ULJ2	0.0058	
			51.15	USN2	0.035	
			184.4	WJU2	0.015	
143.0	YOW2	0.0027				

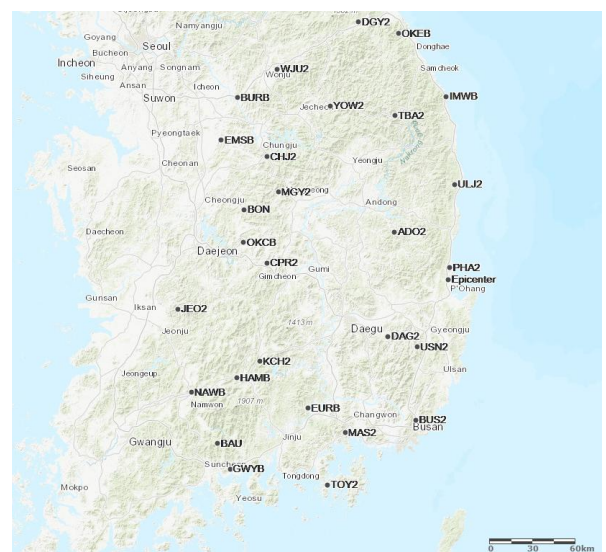


Fig. 1. Locations of KMA stations [1]

는 지반운동을 정의해야 한다. 우리나라 표준수평설계스펙트럼('17 code)은 GMRot150 스펙트럼으로 정의되었다[5]. GMRot150 스펙트럼을 계산하는 절차는 참고문헌 [5-7]에 자세히 기술되어 있다.

통계 분석을 위해 계산된 GMRot150 스펙트럼을 $T=0.01$ sec, 즉 100 Hz에서 가속도스펙트럼 값이 1.0 g가 되도록 정규화 하였다. 이렇게 하여 주어진 감쇠비에 대해서 각 관측점에서 하나의 스펙트럼 곡선이 얻어진다.

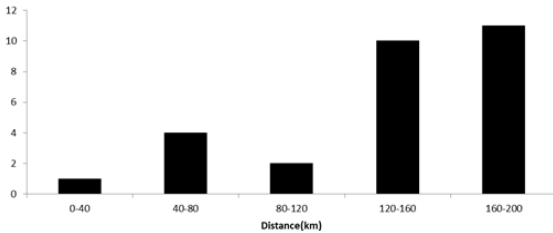


Fig. 2. Distribution of stations w.r.t. epicentral distance

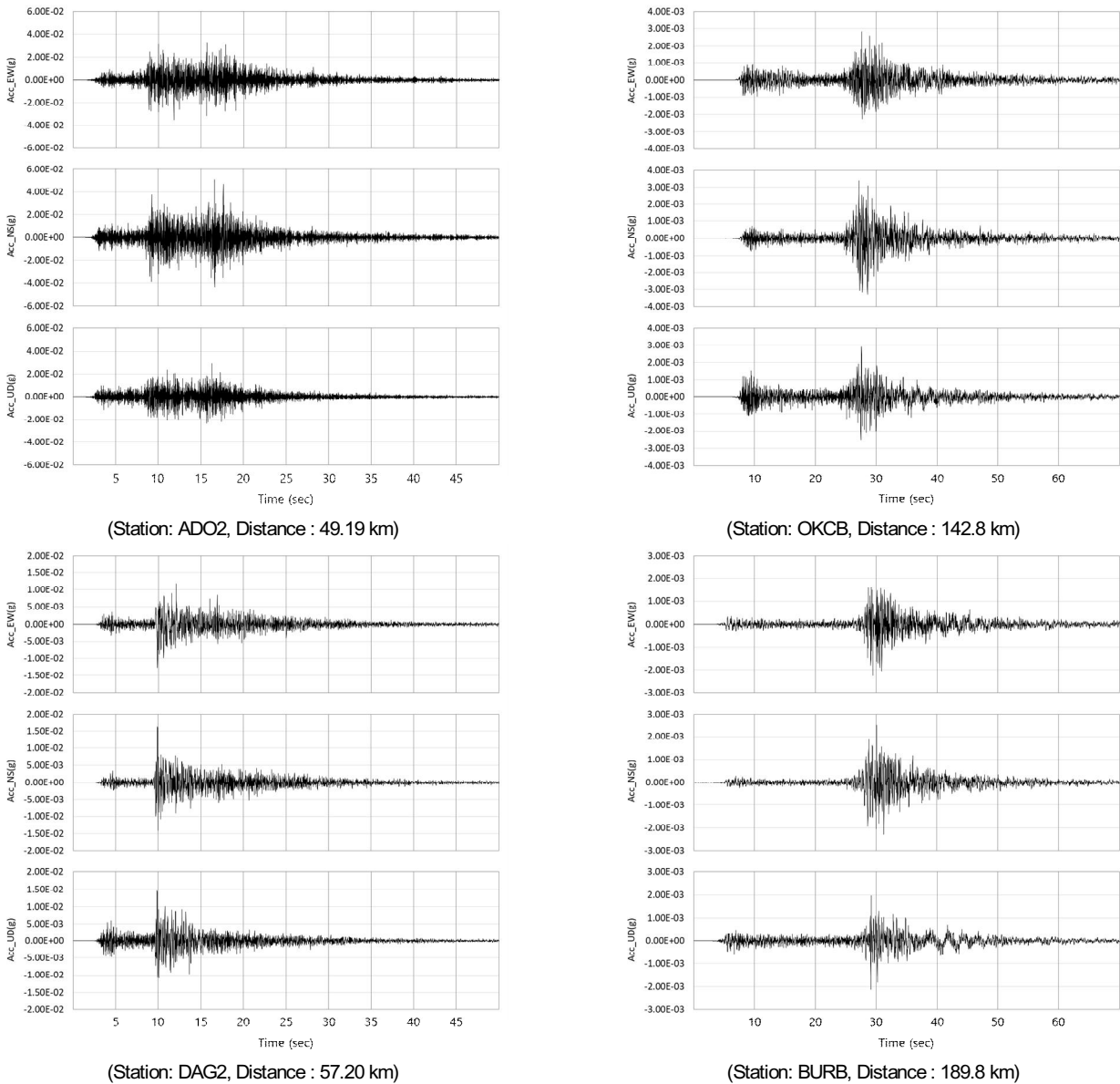


Fig. 3. Examples of recorded acceleration time histories

모든 관측점에서 GMRot150 스펙트럼을 구하면 28개의 스펙트럼 곡선들을 얻게 된다. 개별 스펙트럼 곡선은 주기에 대해서 들쭉날쭉한 모양을 갖고 특정 주기에서 대수정규분포를 갖는 것으로 알려져 있다[9]. 대수정규분포는 평균과 표준편차에 의해서 정의된다. 이 논문에서는 표준스펙트럼과 비교하기 위해 $mean + 1\sigma$ 곡선을 구하였다.

포항 지진 본진 기록의 GMRot150 스펙트럼을 Fig. 4(a)에 도시하였다. 그림에 $mean, mean + 1\sigma$ 스펙트럼도 함께 도시하였다. Fig. 4(b)에는 이 두 가지 스펙트럼만 별도로 도시하였다. 이때 감쇠비 ξ 는 5% 이다.

가속도스펙트럼은 장주기 영역에서 변화를 잘 드러내지 않는다. 그러나 변위스펙트럼에서는 장주기 영역에서 곡선의 변화가 더 분명하게 드러난다. 변위스펙트럼 SD 와 속도스펙트럼 SV , 가속도스펙트럼 SA 의 관계는 다음 식 (1)과 같다.

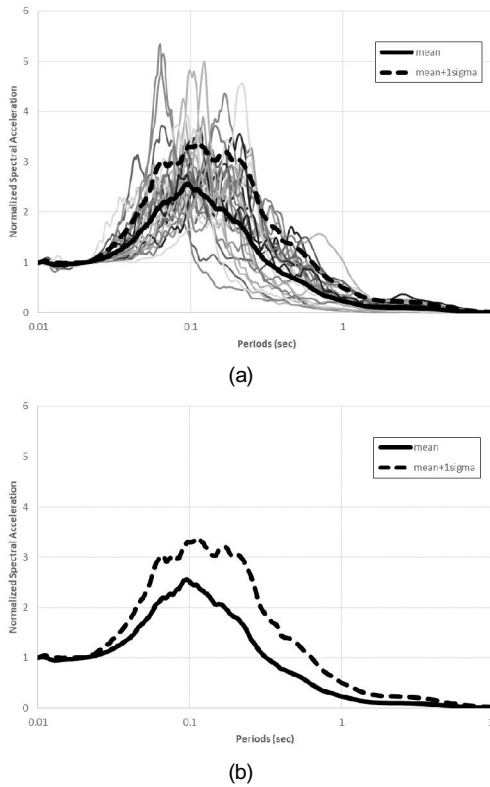


Fig. 4. Horizontal acceleration response spectra: (a) spectra for 28 records, (b) mean and mean + 1σ spectra

$$SD(\omega) = \frac{SV(\omega)}{\omega} = \frac{SA(\omega)}{\omega^2} = \frac{T^2}{4\pi^2} SA(\omega) \quad (1)$$

식(1)을 이용해서 변위스펙트럼을 계산하였고 그 결과를 Fig. 5에 도시하였다. 더불어 식(1)의 속도스펙트럼 SV와 가속도스펙트럼 SA의 관계를 이용하여 속도스펙트럼도 계산하였고 그 결과를 Fig. 6에 도시하였다.

3.2 회귀분석

표준설계스펙트럼과 비교하기 위해 참고문헌 [5-7]과 같은 방법으로 Figs. 4와 5에 제시된 가속도와 변위스펙트럼의 스펙트럼에 회귀 분석을 실시하여 설계스펙트럼의 형상과 전이주기들을 계산했다. 경주 지진 스펙트럼과 같이 ZPA (zero period acceleration)은 $T_z = 0.02$ 초이다. Fig. 7에는 회귀분석 결과를 단주기 증폭계수, 전이주기와 함께 나타내었다.

Fig. 7의 변위스펙트럼에서 그 값이 최대가 되는 $T_L \leq T \leq T_{L1}$ 에서의 값을 $\beta_D(s^2) \times PGA(g)$ 라고 하자. $\beta_D(s^2)$ 는 회귀분석에서 T_L 등과 같이 식별될 수 있고 동시에 변위설계스펙트럼도 구할 수 있다.

회귀분석 결과의 불확실성을 비교하기 위해서 Fig. 4(b)에서 계산한 mean + 1σ 스펙트럼과 mean 스펙트럼의 차를 표준설계스펙트럼을 도출하는데 사용된 55개 국내의 판내부 지진기록의 mean + 1σ 스펙트럼과 mean 스펙트럼의 차 [5]와 함께 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8을 보면 포함 지진의 스펙트럼과 참고문헌 [5]의 표준수평설계스펙트럼 불확실성의 크기는 크게 차이가 없음을 확인할 수 있다. 즉, 두 스펙트럼을 비교해보는 데에 무리가 없을 것이다.

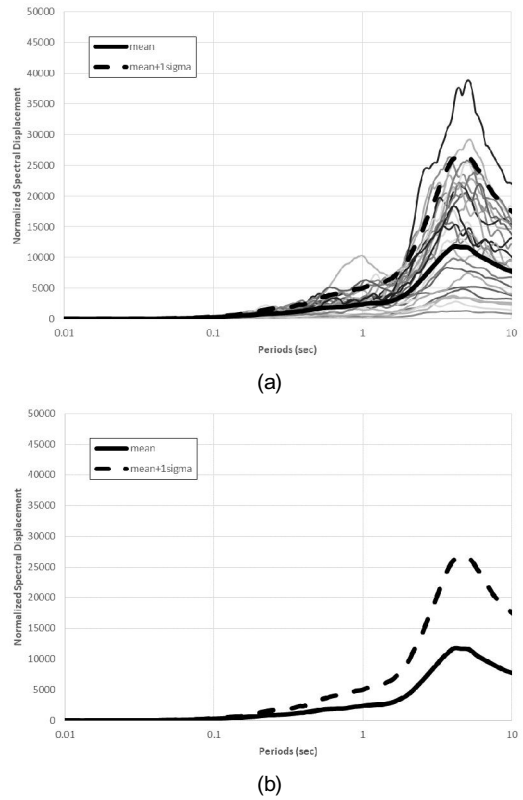


Fig. 5. Horizontal displacement response spectra: (a) spectra for 28 records, (b) mean and mean + 1σ spectra

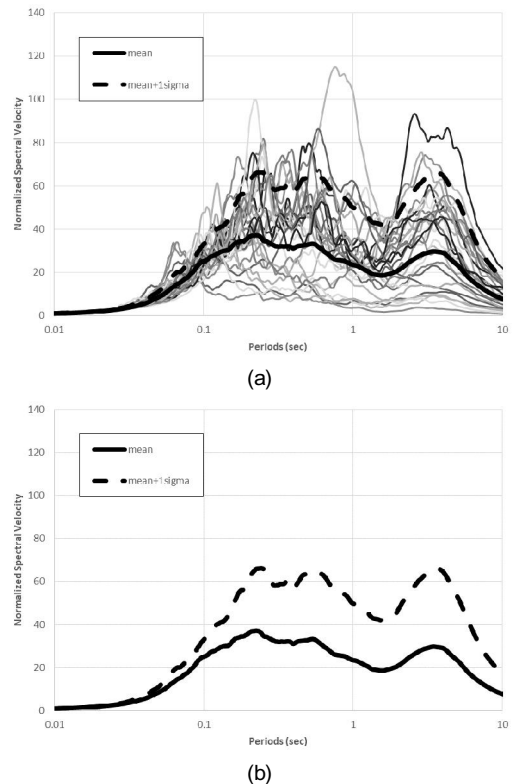


Fig. 6. Horizontal velocity response spectra: (a) spectra for 28 records, (b) mean and mean + 1σ spectra

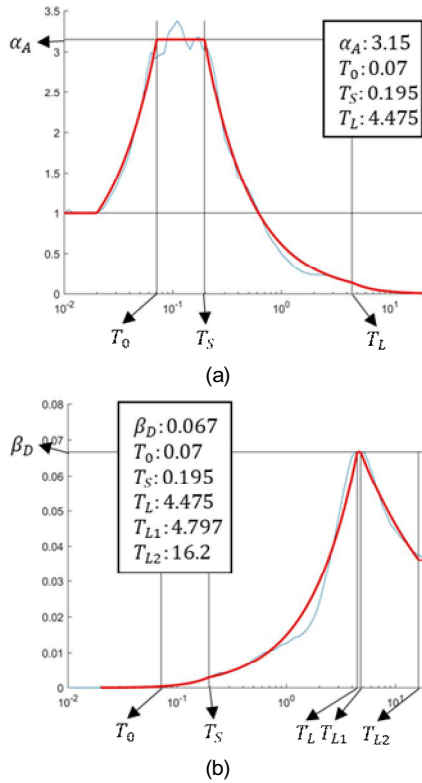


Fig. 7. Regression curve of horizontal response spectra (a) acceleration spectrum, (b) displacement spectrum (red line : regression curve, blue line : mean + 1σ spectra)

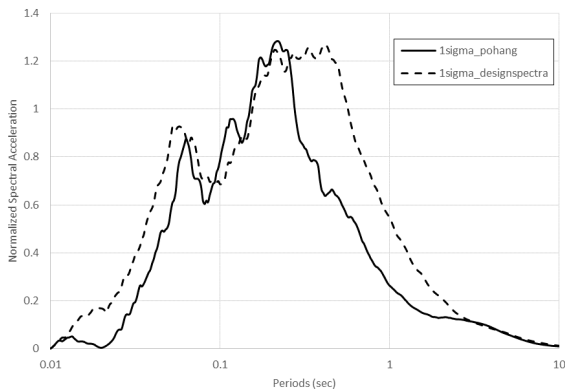


Fig. 8. 1σ of horizontal response spectra of Pohang earthquake records and design spectrum earthquake records

Figs. 4-6을 보면 다른 지진기록들과는 달리 1초 근방에서 큰 응답을 보이는 기록들이 있는데 이는 PHA2와 DGY2에서 계측된 기록이다. 두 지진 응답의 특이한 특성의 원인으로 관측소의 지반조건 등이 학계에서 논의 중이다. 본 연구에서 사용한 통계적인 방법으로 인해 두 데이터를 제외하고 26개의 지진기록으로만 회귀분석을 했을 때 전이주기와 단주기 증폭계수에 큰 변화가 없어 우선 모두 포함하여 분석하였다.

3.3 표준설계스펙트럼과의 비교

Fig. 7에 서술된 포항 지진의 수평스펙트럼을 표준설계스펙트럼('17

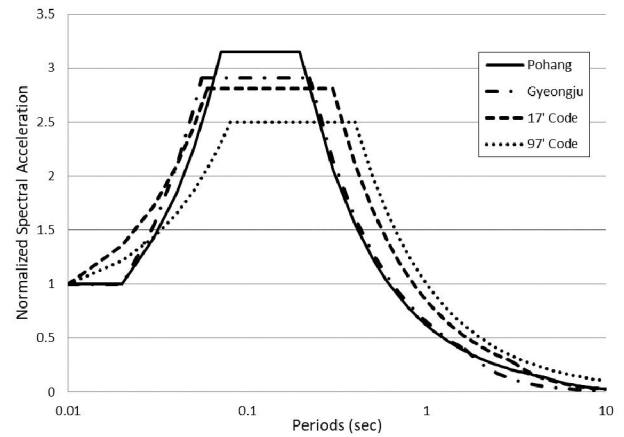


Fig. 9. Comparison of Pohang horizontal spectrum with the design spectra and the Gyeongju horizontal spectrum

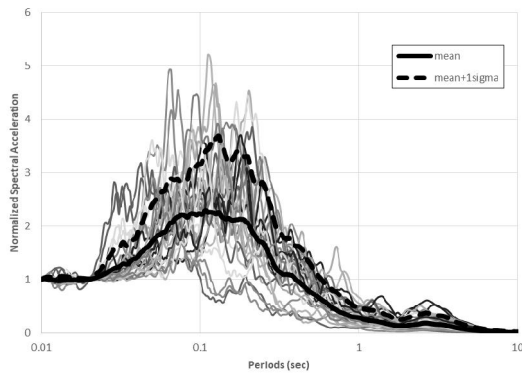
Table 3. Amplification factors and transition periods of horizontal response spectra

	α_A	Transition period (second)		
		T_0	T_S	T_L
Pohang Horizontal	3.15	0.07	0.195	4.475
Gyeongju Horizontal	2.85	0.054	0.22	1.5
'17 Code	2.8	0.06	0.3	3

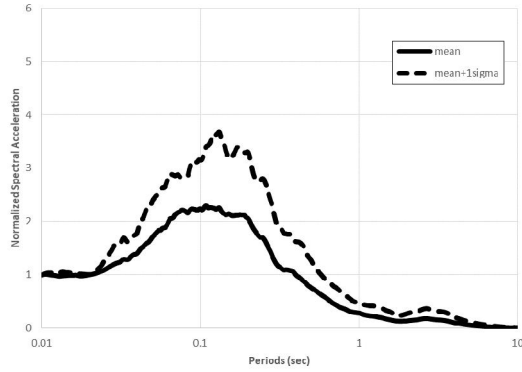
code, '97 code) 및 경주 지진의 스펙트럼과 Fig. 9와 Table 3에서 비교하였다. Fig. 9와 Table 3을 보면 포항 지진기록으로부터 계산한 수평스펙트럼이 표준설계스펙트럼('17 code)보다 가속도에 민감한 구간이 좁고 단주기가 더 증폭된 것을 알 수 있다. 이는 경주 지진의 스펙트럼에서도 관찰된 현상으로 규모가 4.5이상 7.9이하의 국내의 판내부지진들의 mean + 1σ 설계지진에 비해 경주와 포항 지진의 단주기 성분이 탁월하기 때문으로 추정된다. 포항 지진의 규모가 경주 지진보다 작았기 때문에 가속도에 민감한 구간의 증폭비가 더 큰 것도 예측되었던 결과다. 그러나 포항 지진의 장주기 전이주기가 4.475초로 표준설계스펙트럼('17 code)보다 길게 계산된 것은 특기할 만한 결과이다.

Figs. 5와 6의 속도, 변위응답스펙트럼을 보면 이번 포항 지진의 경우 경주 지진과는 다르게 속도 및 변위에 민감한 장주기 성분이 발달되어있는 것을 확인할 수 있다. 주향이동단층의 파괴였던 경주 지진[10]과는 달리 이번 포항 지진은 역단층 파괴로 알려져 있으며 이러한 단층파괴양상도 영향을 주었을 수 있다[11]. 본 연구는 통계적 기법으로 스펙트럼을 분석하고 있기 때문에 계측기록을 그대로 사용하였으며 장주기 성분이 발달된 원인은 추후 연구에서 명확히 규명할 필요가 있다.

이런 점을 고려하더라도 참고문헌 [5]에서 새롭게 제시한 우리나라 표준설계스펙트럼('17 code)이 포항 지진의 수평스펙트럼을 더 잘 설명하고 있는 것을 알 수 있다. 포항 지진의 긴 장주기 전이주기도 표준설계스펙트럼('17 code)이 내진설계기준연구 II [12]의 설계스펙트럼('97 code)의 장주기 영역에서 지나치게 보수적이고 단주기 영역에서 비보수적이었던 단점을 반영하여 수정되었다는 것을 말해준다.

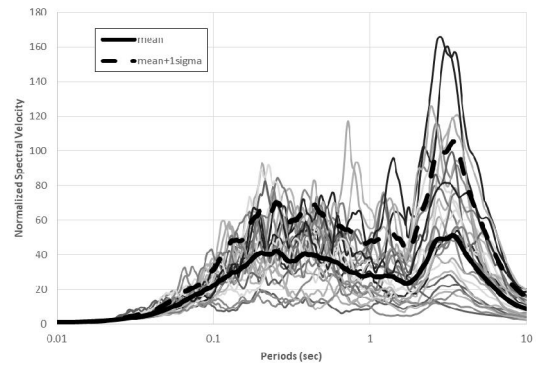


(a)

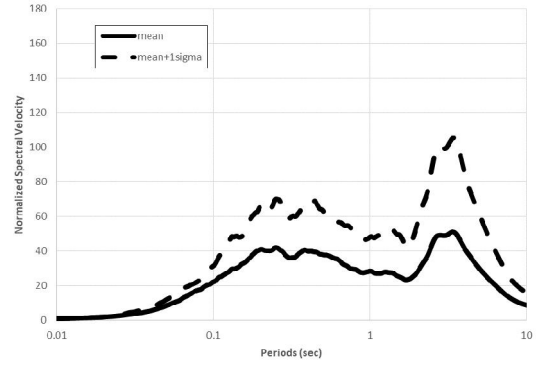


(b)

Fig. 10. Vertical acceleration response spectra: (a) spectra for 28 records, (b) mean and mean + 1σ spectra

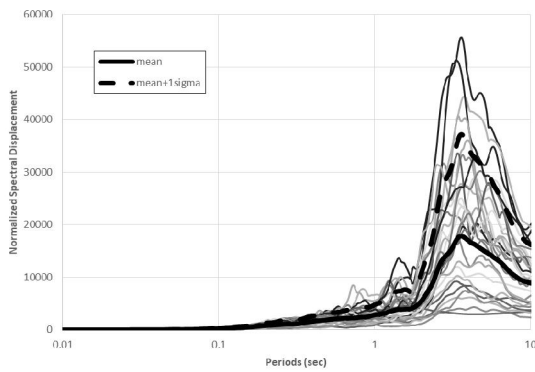


(a)

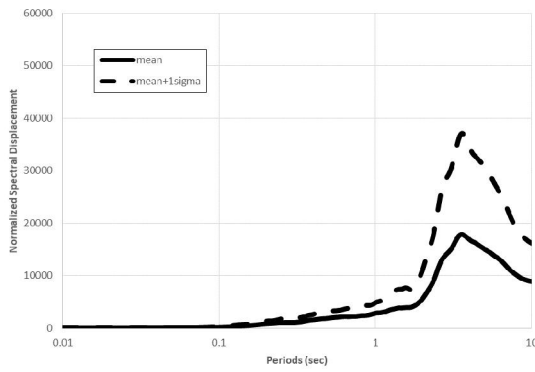


(b)

Fig. 12. Vertical velocity response spectra: (a) spectra for 28 records, (b) mean and mean + 1σ spectra

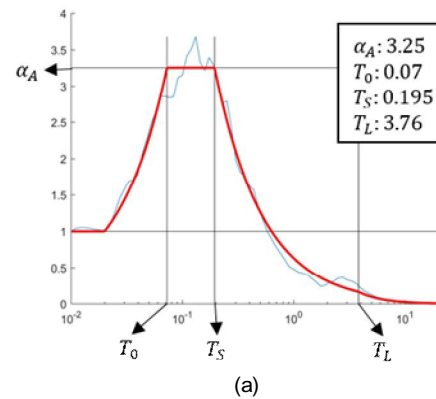


(a)

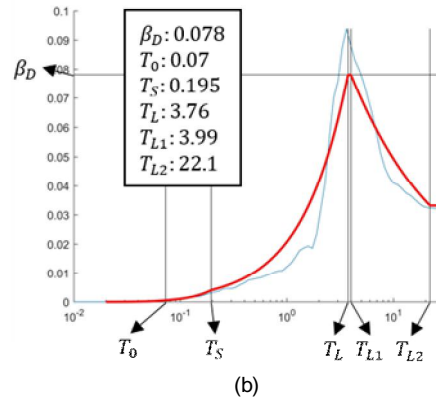


(b)

Fig. 11. Vertical displacement response spectra: (a) spectra for 28 records, (b) mean and mean + 1σ spectra



(a)



(b)

Fig. 13. Regression curve of vertical response spectra (a) acceleration spectrum, (b) displacement spectrum (red line : regression curve, blue line : mean + 1σ spectra)

4. 수직스펙트럼

4.1 수직스펙트럼과 회귀분석

수평스펙트럼과 마찬가지로 포항 지진 본진 기록의 수직스펙트럼을 Fig. 10(a)에 도시하였다. Fig. 10(a)에 $mean$, $mean + 1\sigma$ 스펙트럼도 함께 도시하였다. Fig. 10(b)에는 이 두 가지 스펙트럼만 별도로 도시하였다. 이때 감쇠비 ξ 는 5%이다.

식 (1)을 이용해서 변위스펙트럼과 속도스펙트럼을 계산하였고 그 결과를 Figs. 11 및 12에 도시하였다.

수평스펙트럼과 마찬가지로 방법으로 $mean + 1\sigma$ 수준의 가속도와 변위 스펙트럼에 회귀 분석을 실시하여 형상과 전이주기를 식별하였다. Fig. 13에는 회귀분석 결과를 단주기 증폭계수, 전이주기와 함께 나타내었다.

회귀분석 결과의 불확실성을 비교하기 위해서 Fig. 10(b)에서 계산한 $mean + 1\sigma$ 스펙트럼과 $mean$ 스펙트럼의 차를 표준설계스펙트럼을 도출하는데 사용된 55개 국내의 판내부 지진기록의 $mean + 1\sigma$ 스펙트럼과 $mean$ 스펙트럼의 차[6]와 함께 Fig. 14에 나타내었다. 수평스펙트럼과 마찬가지로 불확실성의 크기에는 크게 차이가 없음을 확인할 수 있다.

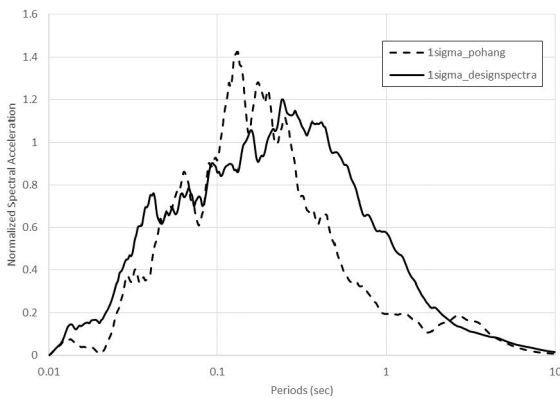


Fig. 14. 1σ of vertical response spectra of Pohang earthquake records and design spectrum earthquake records

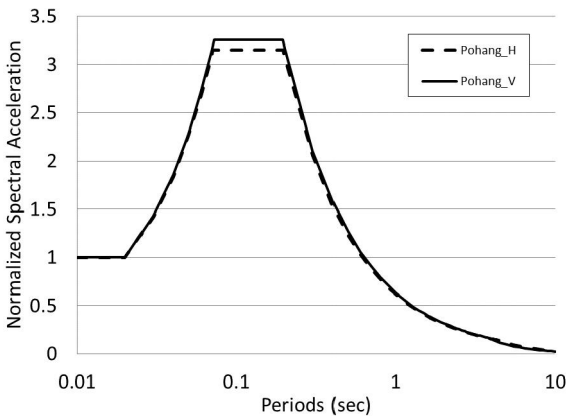


Fig. 15. Comparison of Pohang horizontal spectrum with the vertical spectrum

4.2 포항 지진 수평, 수직 스펙트럼 형상 비교

Fig. 15에는 본 연구에서 분석한 포항 지진의 수평스펙트럼과 수직스펙트럼 형상을 비교했다. Fig. 15에서 PGA는 모두 0.01 sec에서 1.0 g로 정규화 되었다. 전이주기와 단주기 증폭계수에 대한 데이터는 Table 4에 주어져 있다.

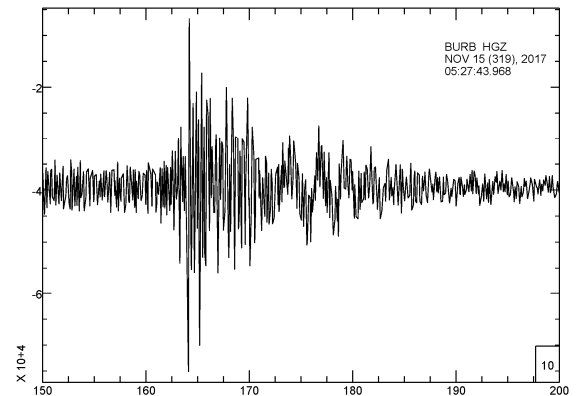
포항 지진 수직스펙트럼에서 가속도에 민감한 구간은 포항 지진 수평스펙트럼과 같이 표준스펙트럼(*17 code)에 비해서 단주기 성분이 더 발달한 것으로 보인다. 수직스펙트럼의 단주기 증폭계수가 $\alpha_A = 3.25$ 로 수평스펙트럼보다 크며 그 만큼 장주기 전이주기가 $T_L = 3.76$ 초로 더 짧아졌다. 단주기 전이주기는 $T_0 = 0.07$ 초, $T_S = 0.195$ 초로 수평스펙트럼과 동일했다.

4.3 포항 지진의 장주기 성분

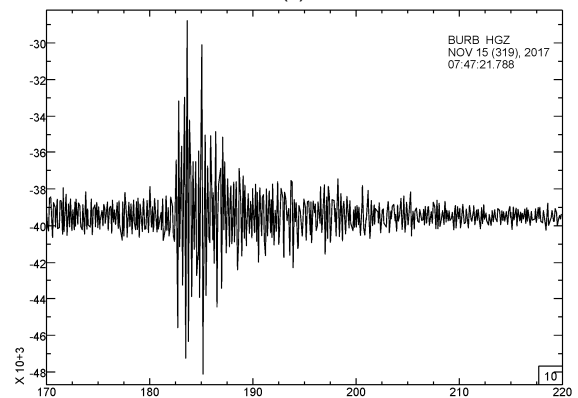
앞서 3.3절에서 서술한 바와 같이 포항 지진응답은 규모에 비해 장주기

Table 4. Amplification factors and transition periods of Pohang response spectra

	α_A	Transition period (second)		
		T_0	T_S	T_L
Pohang horizontal	3.15	0.07	0.195	4.475
Pohang vertical	3.25	0.07	0.195	3.76



(a)



(b)

Fig. 16. Acceleration time history from raw data (Station: BURB) (a) Main shock (M_L 5.4) (b) After shock (M_L 4.3)

성분이 발달했다. Fig. 16(a)에 BURB 관측소에서 기록된 포항 지진 본진의 원시 기록을 S파 도착 전후 50초간 나타내었다. S파가 도착한 후에 10초가량 장주기 진동이 기록된 것을 관찰할 수 있다. Fig. 16(b)에는 같은 날 발생한 규모 $M_L=4.3$ 의 여진이 BURB 관측소에서 관측된 원시 기록을 S파 도착 전후 50초간 나타내었다. 본진 기록과는 달리 장주기 진동이 관찰되지 않은 것을 알 수 있다. 이렇듯 포항 지진 본진의 3~5초의 장주기 영역은 매우 특이한 현상으로 보다 상세한 분석이 필요할 것으로 생각된다. 따라서 본 연구에서 제시한 장주기 전이주기가 우리나라 지진의 특성을 나타내는지는 참고로만 활용 되어야 할 것이다.

4.4 V/H 비

참고문헌 [5-7]과 같은 방법으로 감쇠비 $\xi = 5\%$ 에서 계산된 각 지진 기록의 수직스펙트럼의 값을 GMRotI50 스펙트럼 값으로 나누어서 주기마다 비를 구하였다. 이를 통해 각 지진기록마다 하나의 곡선이 얻어지고 모두 28개의 곡선이 구해진다. 이 곡선들과의 각주기마다 중앙값을 계산하여 연결한 곡선을 Fig. 17에 도시하였다. Fig. 18에는 중앙값 곡선과 주기 1초를 기준으로 나눈 두 구간의 평균값이 주어졌다.

Fig. 18에서 중앙값 곡선이 경주 지진과는 달리 장주기 영역에서 증가하

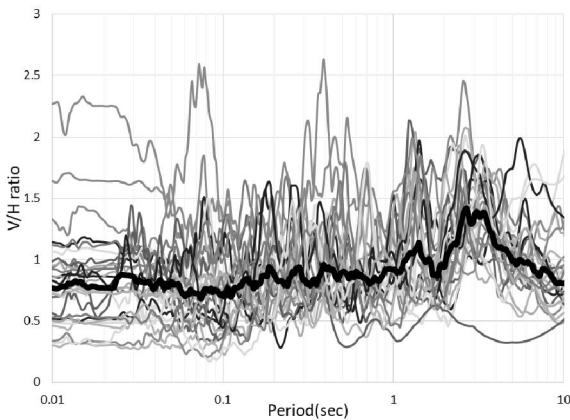


Fig. 17. V/H ratios of earthquake records and median value curve

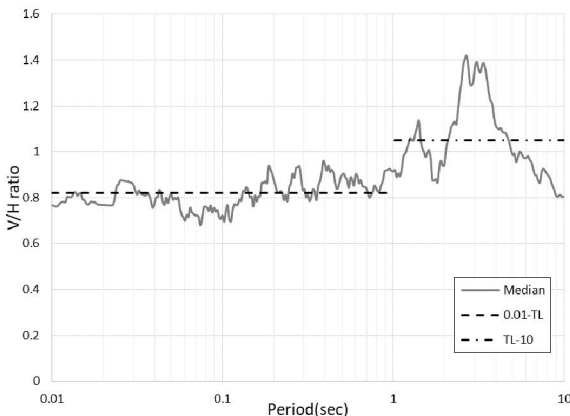


Fig. 18. Short period and long period average of the median value curve of V/H ratios

는 결과를 관찰할 수 있다 [7]. 이는 수직스펙트럼과 수평스펙트럼의 형상이 장주기 영역에서 차이가 생김을 시사하며 앞서 Table 3에서 포항 지진의 장주기 전이주기가 경주 지진과는 반대로 표준설계스펙트럼('17 code) 보다 긴 현상과 동일한 이유로 생각된다. 3.3절과 4.3절에서 서술한 바와 같이 포항 지진에서 장주기 성분이 기대 이상으로 발달한 원인에 대해 규명한 뒤에 1초 이후 장주기 영역에서의 V/H비의 검증이 필요할 것으로 생각된다. 본 연구에서는 우선, 참고로 장주기 영역의 V/H비도 함께 제시했다.

Fig. 18에서 $T=0.01$ 초에서 V/H비를 읽으면 $PGA_v / PGA_h = 0.77$ 로 얻어지며 주기 1초까지 평균값은 0.82이다. 주기 1초 이후 장주기 구간의 평균값은 1.05이다. 이 값을 국내의 설계기준에서의 값과 Table 5에서 비교하였다.

4.5 표준설계스펙트럼과 비교

Fig. 13에 서술된 포항 지진의 수직스펙트럼을 Table 5에 나타난 V/H비를 고려하여 표준수직설계스펙트럼('17 code, '97 code)과 Fig. 19, Table 6에서 비교하였다.

Table 5. Comparison of the PGA_v / PGA_h ratios

	V/H ratio	
	Short period	Long period
Pohang	0.82	1.05
Gyeongju	0.75	0.57
'17 Code	0.77	0.77
Eurocode 8 (Type 1)	0.9	0.9
Eurocode 8 (Type 2)	0.45	0.45
USNRC	1	2/3
ASCE 4-16	2/3	2/3
NEHRP	0.7	1/2

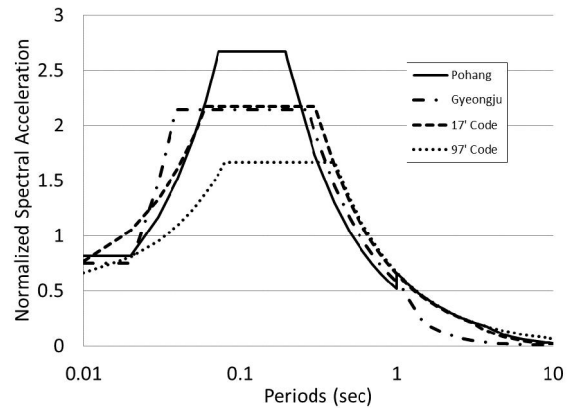


Fig. 19. Comparison of Pohang vertical spectrum with the design spectra and Gyeongju vertical spectrum

Table 6. Amplification factors and transition periods of response spectra

	$\alpha_A \times (V/H ratio)$	Transition period (second)		
		T_0	T_S	T_L
Pohang vertical	$3.25 \times 0.82 = 2.67$	0.07	0.195	3.76
Gyeongju vertical	$2.85 \times 0.75 = 2.14$	0.04	0.27	0.98
'17 Code	$2.8 \times 0.77 = 2.16$	0.06	0.3	3

현재 내진설계기준연구II [12]에서 제시하는 우리나라 표준수직설계 스펙트럼(*97 code)은 과거의 경험법칙에 기반한 것으로 모든 주기 영역에서 같은 $V/H(T) = 2/3$ 을 적용하고 있다. 최근 주기 영역에 따라 서로 다른 V/H 비를 적용하는 방법으로서의 개선이 제안되어왔다[13]. 이로 인해 과거의 표준수직설계스펙트럼(*97 code)은 3.3절에서 비교한 표준수평설계스펙트럼(*97 code) 차이에 더하여 포항 지진의 수직스펙트럼에 비해 단주기 영역에서 상당히 비보수적인 오류를 Fig. 19에서 보이고 있다. 이에 반해 참고문헌 [6]에서 새로 제시한 우리나라 표준수직설계스펙트럼(*17 code)은 기존 설계기준의 오류를 잘 보완하고 있는 것을 Fig. 19에서 확인할 수 있다. 표준수평스펙트럼(*17 code)과 마찬가지로 표준수직스펙트럼(*17 code)도 실제 우리나라 지진위험에 알맞게 포괄하며 개선되었다는 것을 포항 지진의 스펙트럼으로부터 확인할 수 있었다.

5. 결론

2017년 11월 15일 14시 29분에 발생한 규모 $M_L=5.4$ 의 본진 지진기록에 근거하여 수평 및 수직스펙트럼을 구하였다. 이 수평스펙트럼은 GMRotI50 스펙트럼으로 정의되었다. 거리 200 km 이하의 암반지반 지진 기록 28개를 통계 분석하였다.

가속도스펙트럼뿐 아니라 변위스펙트럼도 같이 얻어졌고 형상을 결정하는 파라미터도 회귀분석에 의해서 수평 $\alpha_A = 3.15$, $T_0 = 0.07$ 초, $T_S = 0.195$ 초, $T_L = 4.475$ 초, 수직 $\alpha_A = 3.25$, $T_0 = 0.07$ 초, $T_S = 0.195$ 초, $T_L = 3.76$ 초, V/H (단주기) = 0.82, V/H (장주기) = 1.05로 구해졌다.

포항 지진 스펙트럼 분석결과를 내진설계기준연구II [12]에서 제시하던 표준설계스펙트럼(*97 code)과 새롭게 개발된 우리나라 표준설계스펙트럼(*17 code)과 비교했다. 이를 통해 참고문헌 [5, 6]에 제시된 우리나라 표준설계스펙트럼(*17 code)의 적합성을 검증했고 그 결과 표준설계스펙트럼의 형상이 포항 지진의 스펙트럼을 잘 설명한다는 것을 밝힐 수 있었다.

포항 지진의 장주기 전이 주기는 경주 지진과는 달리 표준설계스펙트럼(*17 code)의 전이 주기보다 길게 계산되었다. 이는 PHA2 등에서 나타나는 1초 내외의 강한 장주기 성분과 다수의 기록에서 나타나는 3초 이상 주기 영역에서의 장주기 성분 때문인 것으로 보인다. 이러한 것은 예상외의 현상으로 현 시점에서는 분석이 충분치 않아 일반화 시키는 데는 한계가 있다.

그럼에도 불구하고 표준설계스펙트럼(*17 code)은 포항 지진의 기록으로부터 얻은 스펙트럼과 잘 일치하는 것을 확인하였다. 경주 지진 스펙트럼과의 비교결과에 더하여 표준설계스펙트럼을 도출할 때 사용된 방법이 합리적이었다는 것을 확인 할 수 있었다. 설계스펙트럼의 신뢰성은 지속적으로 향상되어야 한다. 앞으로도 국외 판내부 지진 기록을 확보하고 분석 방법을 발전시켜 지질과 지진 특성의 영향에 대해서 깊게 연구해야 할 필요가 있다.

/ 감사의 글 /

이 연구는 기상청 “기상·지진See-At기술개발연구” (KMI2017-04010)의 지원으로 수행되었습니다. 본 연구에서 사용된 지진기록은 기상청에서 제공되었고 데이터 가공에 대해 서울대학교 지구환경과학부의 자문을 받았습니다. 이에 감사드립니다. 특히 저자들은 연구의 주요 고비마다 해결의 실

마리를 제공해준 그리스 Patras 대학교의 Apostolos S. Papageorgiou 교수에게 깊은 감사의 뜻을 전합니다.

/ REFERENCES /

1. KMA. National Earthquake Comprehensive Information System. Available from: <http://necis.kma.go.kr/>
2. Kenneth W, Bozorgnia C, Bozorgnia Y. NGA Ground Motion Model for the Geometric Mean Horizontal Component of PGA, PGV, PGD and 5% Damped Linear Elastic Response Spectra for Periods Ranging from 0.01 to 10 s. Earthquake Spectra. 2008 Feb;24(1):139-171.
3. Boore DM, Watson-Lamprey JA, Abrahamson NA. Orientation-Independent Measures of Ground Motion. Bulletin of the Seismological Society of America. 2006 Aug;96(4A):1502-1511.
4. American Society of Civil Engineers (ASCE). Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. ASCE/SEI 7-10; Chapter 21. Site-specific Ground Motion Procedures for Seismic Design: c2010. p. 207-209.
5. Kim JK, Kim JH, Lee JH, Heo TM. Development of Korean Standard Horizontal Design Spectrum Based on the Domestic and Overseas Intra-plate Earthquake Records. Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea. 2016 Nov;20(6):369-378.
6. Kim JK, Kim JH, Lee JH, Heo TM. Development of Korean Standard Vertical Design Spectrum Based on the Domestic and Overseas Intra-plate Earthquake Records. Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea. 2016 Nov;20(6):413-424.
7. Kim JK, Kim JH, Lee JH, Heo TM. Response Spectra of 2016 Gyeongju Earthquake and Comparison with Korean Standard Design Spectra. Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea. 2017 Nov;21(6):277-286.
8. Han SM, Park EH, Ham IK, Park SC, Jeon YS, Jo EY, Lee CW. Technical Report for the Observation Environment of the Korean Meteorological Administration Seismic Observatory. National Institute of Meteorological Sciences. NIMR-TN-2014-007.
9. Davenport WB Jr. Probability and Random Processes: An Introduction for Applied Scientists and Engineers. New York: McGraw-Hill; c1970. 542p.
10. Kim YH, Rhie JK, Kang TS, Kim KH, Kim MO, Lee SJ. The 12 September 2016 Gyeongju Earthquakes: 1. Observation and Remaining Questions. Geosciences Journal. 2016 Dec;20(6):747-752.
11. USGS. M 5.5-7 km WSW of Heung-hai, South Korea. Available from: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2000bnrs#moment-tensor>
12. EESK, KICT. The Research of Seismic Design Code (II). Ministry of Construction and Transportation. c1997. 37p.
13. Bozorgnia Y, Campbell K. The Vertical-to-Horizontal Response Spectral Ratio and Tentative Procedures for Developing Simplified V/H and Vertical Design Spectra. Journal of Earthquake Engineering. 2004 Jun;8(2):175-207.