

지진의 규모와 거리에 따른 스펙트럼 형상과 다자유도 구조물에 대한 영향

Spectral Shape in Accordance with the Magnitude and Distance of Earthquakes and Its Effect on Multi-DOF Structures

김진우^{1)*} · 김동관²⁾ · 김호수³⁾

Kim, Jin Woo^{1)*} · Kim, Dong Kwan²⁾ · Kim, Ho Soo³⁾

¹⁾청주대학교 건축공학과 석사과정, ²⁾청주대학교 건축공학과 조교수, ³⁾청주대학교 건축공학과 교수

¹⁾Master's Student, Department of Architecture Engineering, Cheongju University, ²⁾Assistant Professor, Department of Architecture Engineering, Cheongju University, ³⁾Professor, Department of Architecture Engineering, Cheongju University

/ A B S T R A C T /

In this study earthquake records were collected for rock conditions that do not reflect seismic amplification by soil from global earthquake databases such as PEER, USGS, and ESMD. The collected earthquake records were classified and analyzed based on the magnitude and distance of earthquakes. Based on the analyzed earthquakes, the design response spectrum shape, effective ground acceleration, and amplification ratios for each period band are presented. In addition, based on the analyzed data, the story shear force for 5F, 10F, 15F, and 20F were derived through an analysis of the elastic time history for multi-DOF structures. The results from analyzing the rock earthquake record show that the seismic load tends to be amplified greatly in the short period region, which is similar to results observed from the Gyeongju and Pohang earthquakes. In addition, the results of the multi-DOF structure analysis show that existing seismic design criteria can be underestimated and designed in the high-order mode of short- and medium-long cycle structures.

Key words: Earthquake, Acceleration response spectrum, Design spectrum

1. 서론

2016년 9월 12일에 발생한 규모 5.8 경주지진과 2017년 11월 15일에 발생한 규모 5.4 포항지진은 건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00)에서 정의하는 설계응답스펙트럼의 형상에 비해 단주기 영역의 지진하중이 크고, 중장주기 영역의 지진하중이 작은 특성과 형태를 가지고 있다[1]. 또한, 국내의 지반조건은 암반까지의 심도가 15~30 m 이내로 얇은 토사조건에 해당되며, 이러한 얇은 토사조건은 단주기 영역의 지진하중을 증가시키고 있다[2]. 이와 같은 국내에서 발생한 지진특성과 지반에 의한 증폭에 따라 고주파 성분이 큰 지진동에 대한 저층건물의 피해 및 고층건물의 손상이 보고되었고[3-4], 이에 대한 내진설계가 요구된다. 912 경주지진과 1115 포항지진의 예로 6.0 미만의 지진이 20 km 이내의 단층 주변에서 발생하는 고주파 특성의 지진동이 우려되는 지역에서는 이에 대한 내진설계

가 반영되어야 한다. 하지만, 건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00)에서는 이에 대한 내진설계를 위해서는 설계응답스펙트럼 상에서 전구간의 지진하중이 증가되어 과대한 내진설계가 초래된다. 이에 반해 유럽의 내진설계 기준인 EUROCODE에서는 모멘트 규모(M_W) 5.5를 기준으로 Type1과 Type2로 다른 형상의 스펙트럼으로 다양한 조건에 대하여 내진설계를 할 수 있도록 정하고 있다[5]. 따라서, 국내에서도 EUROCODE의 Type2와 같은 설계응답스펙트럼의 정의가 필요하며, 이러한 스펙트럼의 정의는 실무자에게 있어 설계부지의 지반조건 및 지진특성에 따라 보다 합리적인 내진설계가 가능할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 태평양 지진공학 연구소(PEER; Pacific Earthquake Engineering Research Center) [6], 미국 지질조사국(USGS; U.S Geological Survey)[7], 유럽 강진동 데이터베이스(ESMD; European Strong-Motion Database)[8] 등 전세계 지진 데이터베이스로부터 토사지반의 의한 지진동 증폭이 반영되지 않은 암반 조건에 대한 지진기록을 수집하고, 지진의 규모 및 진원거리를 기준으로 수집된 지진기록을 분류 및 분석하여 분석된 지진들을 바탕으로 규모 6.0 미만의 지진이 진원거리 20 km 이내에서 발생할 경우에 대한 설계응답

*Corresponding author: Kim, Jin Woo

E-mail: wlsdn0907@naver.com

(Received November 4, 2019; Revised November 28, 2019; Accepted December 5, 2019)

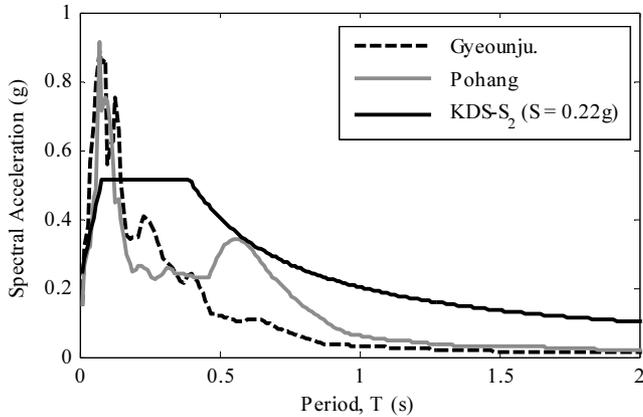


Fig 1. Response Acceleration Spectrum

Table 1. Gyeongju and Pohang Earthquake

Event	Year	Station	Magnitude	Distance (km)
Gyeounju	2016	MKL	5.8	5.9
Pohang	2017	PHA2	5.3	9

스펙트럼 형상을 제시한다. 또한 수집된 지진파를 활용하여 다자유도 구조물의 탄성시간이력해석을 수행한다. 이를 통해 경주 및 포항지진과 같은 고주파 특성의 지진이 다자유도 구조물에 미치는 영향에 대하여 분석한다.

2. 경주지진과 포항지진의 특성

경주지진의 경우 경주시 남남서쪽 11 km에서 규모 5.8의 본진이 발생하였으며 포항지진의 경우 포항시 북쪽 8 km에서 규모 5.4 본진이 발생하였다. 경주지진과 포항지진은 규모 6.0 이하의 지진으로 지속시간이 매우 짧은 지진이었으나 일부 건물에 균열이 발생하고 기둥이 파괴되는 등, 저층 및 일부 고층 구조물에 물리적 피해가 많이 발생한 것으로 보고되었다[3-4]. 특히 10층 이하 저층 건물에 대한 피해가 큰 것으로 나타났는데 국내 지반 조건은 암반까지의 심도가 15~30 m 이내로 얇은 토사조건에 해당되므로 단주기 영역의 지진하중이 증폭되어 고층건물보다는 저층건물에 특히 영향을 크게 가한 것으로 나타났다[9].

Fig. 1은 경주지진 및 포항지진의 응답가속도 스펙트럼(Acceleration Response Spectrum)을 나타내고 Table 1은 본 연구에서 사용된 경주 및 포항지진의 개요를 나타낸다.

포항지진과 경주지진은 규모가 6.0 이하이더라도 고주파 성분이 큰 특성에 의하여 0.1~0.2초에 해당하는 단주기 영역에서 지진하중이 크게 나타났으며, 때문에 단주기 구조물 및 고층건물의 고차모드에 영향을 미친 것으로 판단된다.

3. 국내 건축구조기준 및 EUROCODE 기준

국내 건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00)의 경우 2019년 3월 13일에 제정되었으며 국토교통부에서 발간하였다. 국내 건축물 내진설계기준에

Table 2. Short-Period Amplification Factor Comparison

Bedrock Depth (m)	Shear Wave Velocity (m/s)	IBC 2015	KBC 2016	KDS 41 17 00
h ≤ 20	360 ≤ V _s < 760	-	1.4	1.4
	260 ≤ V _s < 360	-	1.5	1.4
	180 ≤ V _s < 260	-	1.5	1.5
	V _s < 180	-	1.9	1.5
20 < h	360 ≤ V _s < 760	1.2	1.2	1.4
	180 ≤ V _s < 360	1.4	1.4	1.4
	V _s < 180	1.7	1.9	1.3

Table 3. 1s-Period Amplification Factor Comparison

Bedrock Depth (m)	Shear Wave Velocity (m/s)	IBC 2015	KBC 2016	KDS 41 17 00
h ≤ 20	360 ≤ V _s < 760	-	1.4	1.4
	260 ≤ V _s < 360	-	1.6	1.4
	180 ≤ V _s < 260	-	1.6	1.6
	V _s < 180	-	3.2	1.6
20 < h	360 ≤ V _s < 760	1.6	1.6	2.0
	180 ≤ V _s < 360	2.0	2.0	2.0
	V _s < 180	3.2	3.2	2.7

서 최대고려지진은 국가지진위험지도의 2400년 재현주기에 해당되며 그 유효지반 가속도(S)의 크기는 지진구역계수(Z)에 2400년 재현주기에 해당하는 위험도계수를 곱한 값으로 한다. 기본설계지진은 스펙트럼가속도가 최대고려지진에 의한 값의 2/3 수준에 해당하는 지진으로 정의한다[10]. 유효지반가속도(S)와 지반조건에 맞는 지반증폭계수를 통하여 식 (1)~(2)와 같이 단주기와 주기 1초의 설계스펙트럼 가속도를 도출할 수 있다.

$$S_{DS} = S \times 2.5 \times F_a \times 2/3 \tag{1}$$

$$S_{D1} = S \times F_v \times 2/3 \tag{2}$$

Tables 2 and 3은 IBC(International Building Code)와 국내 건축구조기준의 단주기 및 1초 주기의 지반증폭계수를 나타낸다. 건축구조기준(KBC2016)에서는 지반증폭계수를 IBC(International Building Code) 기준을 참고하고 있다. IBC 기준은 연약층의 깊이가 100~300 m인 캘리포니아 지역에서 실측된 지반운동(Loma Preta, 1989)을 기반으로 하고 있다 [11]. 반면 국내지반의 특성은 캘리포니아 지역과는 매우 다른 기반암의 깊이가 30 m 이내에 존재한다. 이를 고려하여 KDS 41 17 00에서 단주기 및 1초 주기 지반증폭계수를 일부 개정하였으나 개정된 내용을 반영하더라도 경주 및 포항지진과 같은 고주파 특성의 지진과는 설계응답스펙트럼의 형상이 상이한 것으로 판단된다.

김동수[9], 김동관[2] 등 국내 학자의 선행연구에 따르면 암반까지의 심도가 얇은 국내의 지반조건에서는 단주기에서 더 큰 증폭이 나타나고, 장주기에서 작은 증폭이 나타나는 것으로 결과가 도출되었다. 또한 국내에서 발

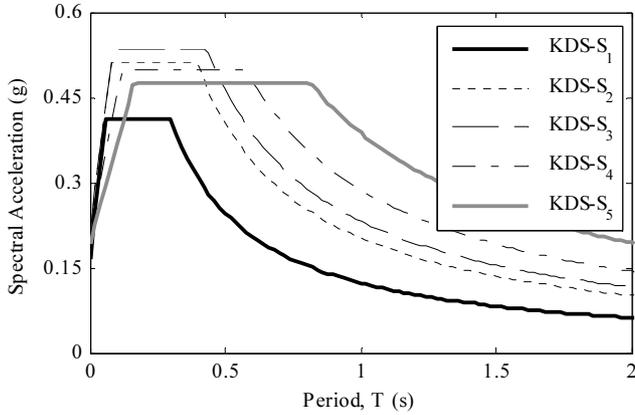
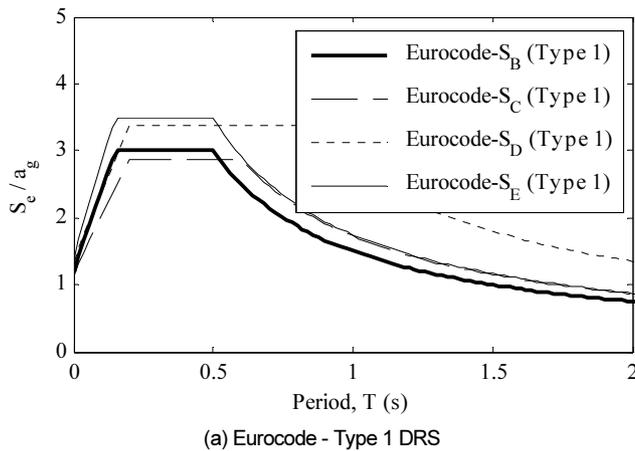
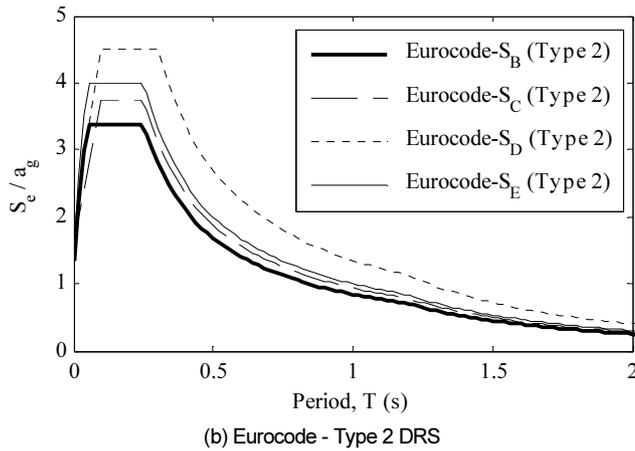


Fig. 2. Korean Design Response Spectrum (KDS 41 17 00)



(a) Eurocode - Type 1 DRS



(b) Eurocode - Type 2 DRS

Fig. 3. European Design Response Spectrum (Eurocode 8)

생한 경주지진 및 포항지진의 응답스펙트럼을 확인한 결과 중장주기 영역의 지진하중 보다는 단주기 영역에서 매우 큰 증폭이 나타났다. 단주기 영역에서 큰 증폭이 발생하는 경우 저층 건물 및 고층 건물의 고차모드에 영향을 미칠 수 있어 설계시 주의가 요구된다. 하지만 이러한 단주기 지진특성을 고려하기 위하여 설계응답가속도에 반영하는 경우 Fig. 2와 같이 전구간에 대한 지진하중이 증가되어 과도한 내진설계가 초래된다.

반면 EUROCODE에서 제시하는 설계응답스펙트럼의 경우 규모(M_W) 5.5를 기준으로 Type -I과 Type -II로 다른 형상의 스펙트럼을 제시하고 있

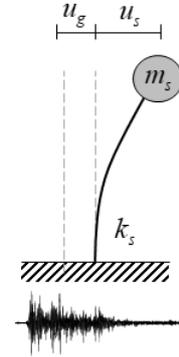


Fig. 4. Fixed Base Model

으며 Fig. 3(b)와 같이 Type - II는 규모(M_W) 5.5 이하의 지반운동에 대하여 사용하도록 정의하고 있다[5]. 따라서 국내 기준과 유사한 Type - I 스펙트럼 보다는 Type - II와 같은 형태의 스펙트럼 형상이 경주 및 포항지진과 같은 단주기 지진특성을 고려하였을 때 더 유사한 것으로 판단된다.

4. 지진기록의 수집 및 통계

4.1 지진기록의 수집

전 세계적으로 규모 5.0 이상, 계측위치의 전단파속도 760 m/s 이상의 301가지 암반지진기록을 수집하였다. 지진기록의 수집은 국외지진의 경우 태평양 지진공학 연구소(PEER; Pacific Earthquake Engineering Research Center), 미국 지질조사국(USGS; U.S Geological Survey), 유럽 강진동 데이터베이스(ESMD; European Strong-Motion Database)에서 수행되었으며 국내지진의 경우 국가지진종합정보시스템(NECIS)에서 수행되었다.

수집된 암반지진기록을 이용하여 응답가속도 스펙트럼을 도출하였으며 방법은 Fig. 4와 같은 단자유도 구조물에 지반운동에 의한 외력이 작용하는 경우 식 (3)과 같이 Lagrange Equation으로 운동방정식을 도출할 수 있다. 도출된 운동방정식을 상태-공간 방정식(State-Space Equation)으로 운동방정식의 해를 구할 수 있으며 이를 통해 구조물 주기(T_n)와 감쇠비(ζ)에 따른 구조물의 변위(u_s)를 구할 수 있다.

$$m\ddot{u}_s + c\dot{u}_s + ku = -m\ddot{u}_g \quad (3)$$

$$\omega_n = \sqrt{k/m} \quad (4)$$

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} = 2\pi \sqrt{m/k} \quad (5)$$

$$\zeta = \frac{c}{2m\sqrt{mk}} = \frac{c}{2m\omega_n} \quad (6)$$

$$u_s = S_d(T; \zeta) \quad (7)$$

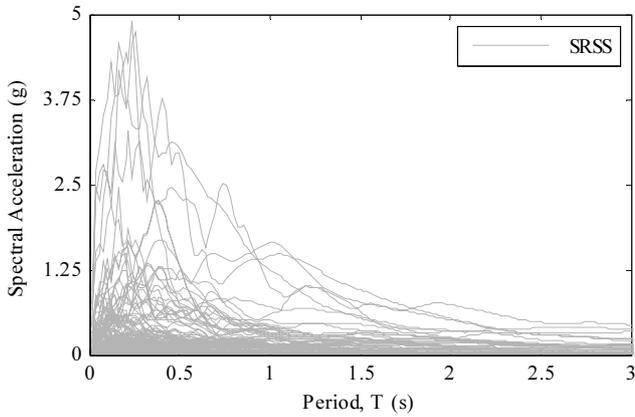


Fig. 5. Acceleration Response Spectrum from 301 Rock-Earthquake Records

여기서 w_n 은 고유각진동수(Natural Circular Frequency of Vibration)을 의미한다. 식 (8)과 같이 도출된 구조물의 변위에 고유각진동수의 제곱을 곱하면 구조물의 응답가속도를 구할 수 있다[12].

$$S_a = \omega_n^2 u_s = \left(\frac{2\pi}{T_n}\right)^2 u_s \tag{8}$$

위와 같은 방법으로 수집된 남북, 동서 방향의 가속도시간이력을 통하여 고유진동주기에 따른 응답가속도 스펙트럼을 도출하였다. 이때 응답가속도 스펙트럼의 감쇠율은 5%를 적용하였다. 남북, 동서 방향의 2축에 대한 응답가속도 스펙트럼을 식 (9)와 같이 SRSS하였으며, 수집된 301가지 암반지진기록의 응답가속도 스펙트럼은 Fig. 5와 같다.

$$SRSS = \sqrt{S_{a,x}^2 + S_{a,y}^2} \tag{9}$$

4.2 지진기록의 통계

Table 4와 같이 수집된 암반지진기록을 규모와 거리에 따라서 분류하였으며, 각 변수별 응답가속도 스펙트럼을 산정하여 평균값을 도출하였다. 여기서 유효지반가속도(S)는 Fig. 6과 같이 응답스펙트럼 가속도의 T=0 일 때의 응답가속도이며, 최대 단주기 응답가속도(S_{MS})의 경우 ATC 3-06 유효지반가속도 결정방법에 근거하여 식(10)과 같이 0.1~0.5 s 응답가속도 스펙트럼 크기의 평균으로 산정하였다[13].

$$S_{MS} = \frac{\int_{0.1}^{0.4} S_a dt}{0.4 - 0.1} \tag{10}$$

단주기 최대 응답가속도(S_{MS})의 경우 진원과의 거리가 증가할수록 그 크기가 급격하게 작아지는 것을 확인할 수 있으며 규모 7.0이 넘는 강진이 라도 거리가 40 km가 넘어가면 거리에 따른 지반의 감쇠효과로 응답가속도 스펙트럼 평균값이 0.098 g로 작아지는 것을 확인할 수 있다. 지속시간

Table 4. Classification by Magnitude and Distance

Magnitude	Distance (km)	EQ Count	S (g)	S_{MS} (g)	Duration (s)
5.0 ≤ M < 5.5	R < 20	13	0.070	0.269	4.6
	20 ≤ R < 40	20	0.018	0.072	8.9
	40 ≤ R	63	0.003	0.014	30.7
5.5 ≤ M < 6.0	R < 20	4	0.102	0.369	6.2
	20 ≤ R < 40	5	0.046	0.193	6.7
	40 ≤ R	19	0.012	0.043	13.0
6.0 ≤ M < 6.5	R < 20	4	0.155	0.634	7.9
	20 ≤ R < 40	3	0.047	0.223	9.8
	40 ≤ R	38	0.017	0.063	18.2
6.5 ≤ M < 7.0	R < 20	11	0.399	1.395	9.3
	20 ≤ R < 40	12	0.144	0.498	22.6
	40 ≤ R	68	0.026	0.095	29.0
7.0 ≤ M	R < 20	7	0.391	1.629	19.2
	20 ≤ R < 40	2	0.037	0.150	27.2
	40 ≤ R	32	0.038	0.098	39.8

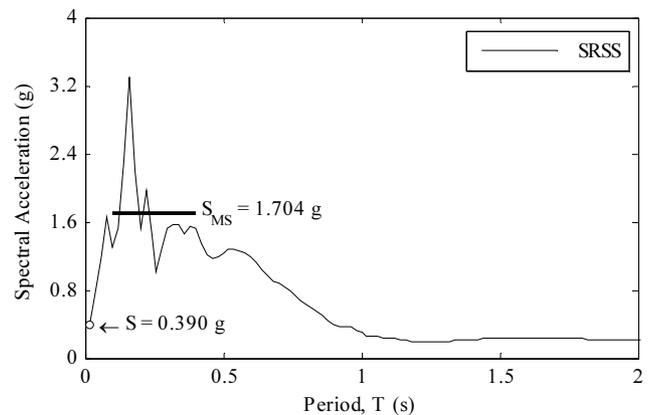


Fig. 6. Effective Peak Ground Acceleration(S) or S_{MS}

의 경우 거리가 증가할수록 증가하는 것으로 나타났는데 이는 거리가 증가할수록 지반의 영향으로 인한 고주파 성분이 감소하여 진동주기가 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

5. 규모와 거리에 따른 스펙트럼 형상 도출

5.1 규모와 거리에 따른 변수

Fig. 7은 통계처리 된 301가지 암반지진기록을 이용하여 규모와 거리별 평균응답스펙트럼 중에서 규모가 5.0 이상 5.5 미만인 경우를 나타낸다. 실선은 통계화된 암반지진기록의 평균값을 뜻하며 점선은 평균과 표준편차의 합으로 나타내었다. 진원과의 거리가 멀어질수록 지반의 감쇠효과로 응답가속도의 크기는 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있으며 비교적 감쇠의 영향이 적은 진원이 20 km 이내인 경우 약 0.1~0.4초의 단주기 영역에서 급격하게 커지는 것을 확인할 수 있다.

건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00)에서는 유효지반가속도(S)에 지반증폭계수와 함께 2.5배를 증폭한 값에 2/3 수준을 단주기 영역에 해당하는 설계응답가속도(S_{Ds})로 정의하고 있으나 본 연구에서는 지반증폭이 반영되지 않은 암반지진기록을 이용하여 도출한 유효지반가속도(S)에 비하여 단주기 및 중장주기 응답가속도의 증폭비를 산정하였으며 증폭비의 산정방법은 식 (11)~(13)과 같다. 각각 단주기(α_A), 1초주기(α_V), 3초주기(α_D)에 따른 평균 증폭비 및 표준편차를 Table 5에 나타내었다.

$$\alpha_A = \frac{\int_{0.1}^{0.5} S_a dt}{0.5-0.1} \times \frac{1}{S} \tag{11}$$

$$\alpha_V = S_{1s} \times \frac{1}{S} \tag{12}$$

$$\alpha_D = S_{3s} \times \frac{1}{S} \tag{13}$$

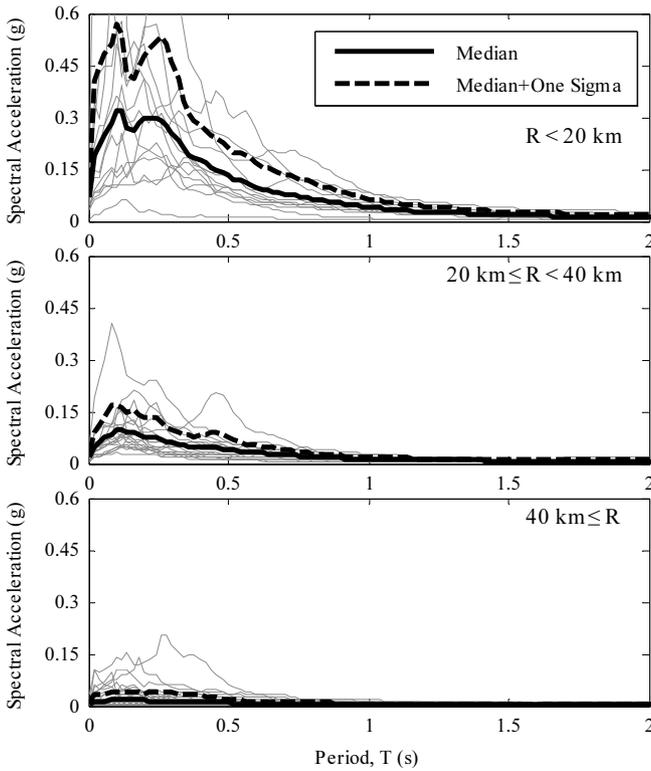


Fig. 7. Response Acceleration Spectrum ($5.0 \leq M_W < 5.5$)

Table 5. Amplification Ratio

Magnitude	Distance (km)	Median			Median+One Sigma		
		α_A	α_V	α_D	α_A	α_V	α_D
$5.0 \leq M < 5.5$	$R < 20$	3.86	0.59	0.07	4.07	0.60	0.07
	$20 \leq R < 40$	4.03	0.67	0.18	4.11	0.62	0.19
	$40 \leq R$	4.35	0.89	0.16	4.63	0.73	0.15
$5.5 \leq M < 6.0$	$R < 20$	3.62	0.69	0.10	3.60	0.62	0.09
	$20 \leq R < 40$	4.15	0.47	0.07	4.20	0.39	0.09
	$40 \leq R$	3.54	1.37	0.27	4.03	1.28	0.26
$6.0 \leq M < 6.5$	$R < 20$	4.09	0.84	0.23	4.26	0.83	0.29
	$20 \leq R < 40$	4.73	0.84	0.30	4.94	0.89	0.34
	$40 \leq R$	3.61	1.71	0.40	4.19	1.72	0.41
$6.5 \leq M < 7.0$	$R < 20$	3.50	1.56	0.29	3.72	1.80	0.28
	$20 \leq R < 40$	3.46	1.70	0.50	3.63	1.69	0.73
	$40 \leq R$	3.68	1.36	0.34	3.98	1.52	0.33
$7.0 \leq M$	$R < 20$	4.17	1.25	0.49	4.65	1.18	0.54
	$20 \leq R < 40$	4.01	2.06	0.79	4.60	3.04	0.91
	$40 \leq R$	2.59	2.06	0.75	2.58	1.93	0.73

단주기 영역의 증폭비(α_A)의 경우 거리와 규모에 상관없이 최소 2.59 배에서 최대 4.73배 까지 크게 증폭되는 것을 알 수 있으며, 1초주기의 증폭비(α_V) 및 3초주기의 증폭비(α_D)는 단주기 영역에 비하여 급격하게 작은 값으로 나타났으며 규모와 거리가 증가할수록 다소 증가하는 것으로 나타났다.

5.2 스펙트럼 작성

본 연구에서 제시하는 설계응답스펙트럼의 경우 Fig. 8과 같다. 이때, 유효지반가속도(S)는 0초 주기의 스펙트럼 가속도이다.

유효지반가속도(S)를 통하여 구간별 설계응답스펙트럼의 작성법은 식 (14)~(17)과 같다.

$$0 \leq T \leq T_s, S_a = \frac{0.6 \times S \times \alpha_A}{T_0 \times T} + S \tag{14}$$

$$T_0 < T \leq T_s, S_a = S \times \alpha_A \tag{15}$$

$$T_s < T \leq 3, S_a = \frac{S \times \alpha_V}{T} \tag{16}$$

$$3 < T, S_a = \frac{S \times \alpha_D \times 3}{T^2} \tag{17}$$

본 연구에서 제시하는 스펙트럼 작성법에 따른 지반증폭이 반영되지 않

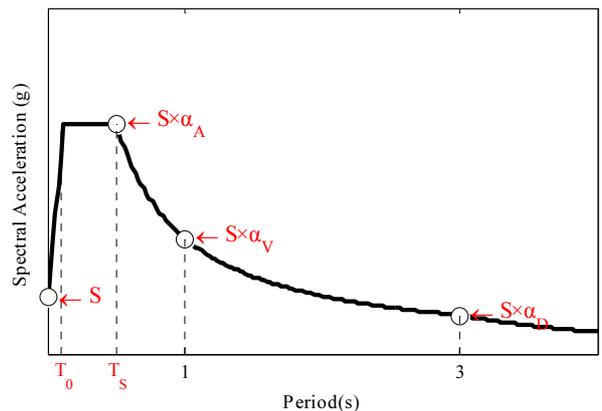


Fig. 8. Design Response Spectrum Preparation Method

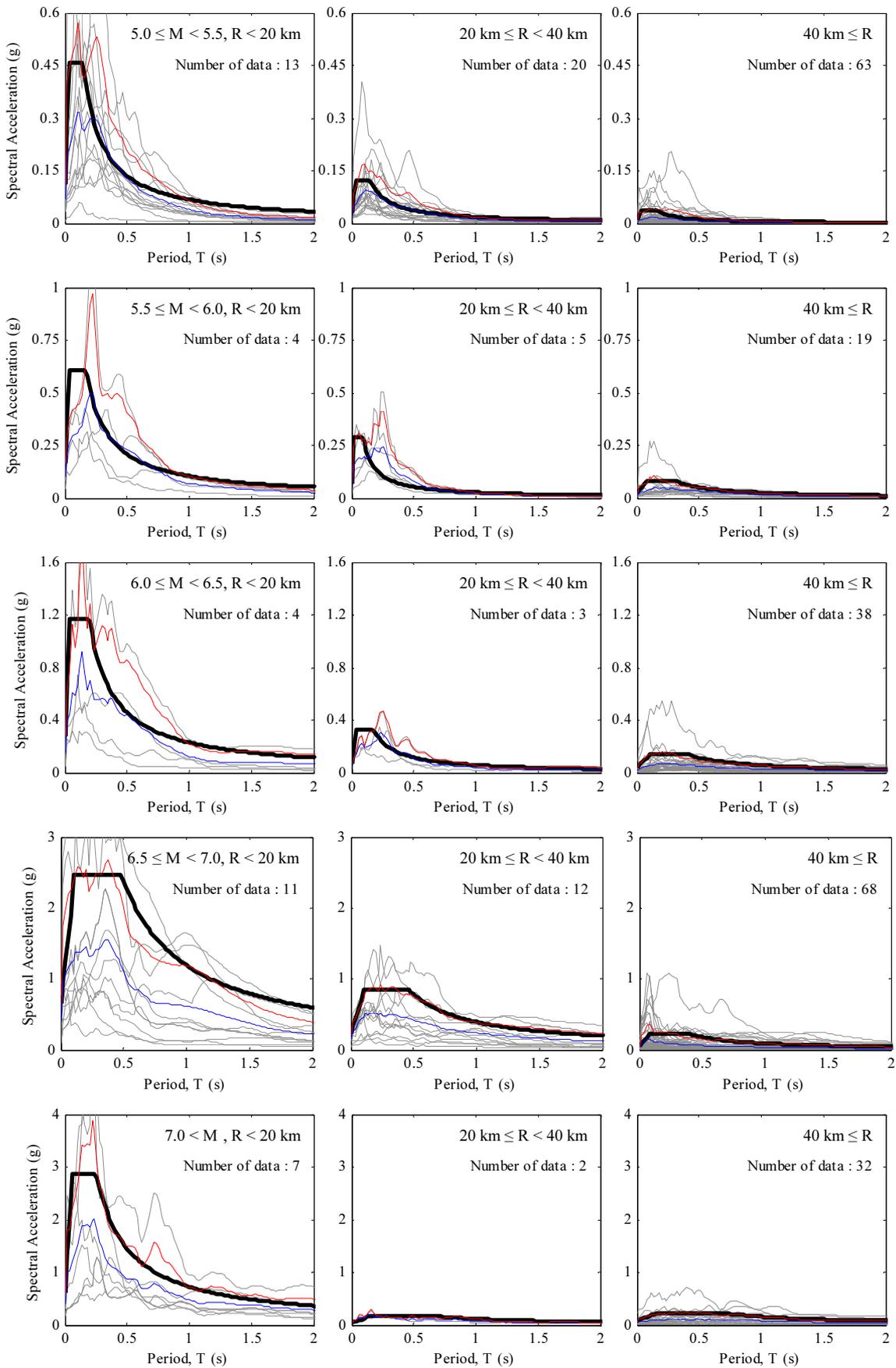


Fig. 9. Spectrum Shape by Magnitude and Distance

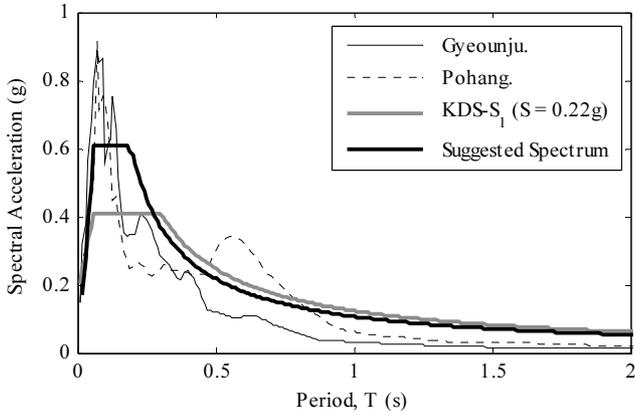


Fig. 10. Suggested Spectrum

은 암반지진기록의 스펙트럼 형상은 Fig. 9와 같다. 규모 6.5 이상 7.0 미만 에 해당하는 스펙트럼을 제외한 나머지 경우에서 모두 0.3 초 주기대역 이 하에서 최대 응답가속도가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한, Fig. 10과 같이 규모 5.5 이상 6.0 미만, 거리 20 km 미만의 지진기록의 응답스펙트럼 이 KDS-S₁에 해당하는 설계응답스펙트럼 보다 경주 및 포항지진의 응답 스펙트럼 형상과 유사한 것으로 판단된다.

6. 다자유도 구조물에 대한 영향

6.1 해석모델

본 절에서는 고주파 특성의 지진이 다자유도 구조물에 미치는 영향을 분 석하기 위하여 수집된 암반지진기록 중 규모 5.5 이상 6.5 미만, 거리 20 km 이하에 해당하는 8개의 암반지진기록을 사용하여 탄성시간이력해석을 수 행하였다. 분석 모델은 지상 5층, 10층, 15층, 20층으로 설정하였으며 모드 별 진동주기 및 진동수는 Table 6과 같다. 원활한 다자유도 해석을 위하여 본 구조물을 Fig. 11과 같이 해석 모델에서 심플 모델로 치환하여 사용하였 다. 해석 모델의 층별 질량을 심플 모델의 점 질량으로 입력하였으며 기둥의 강성을 조절하여 해석 모델과 유사한 진동주기를 가지도록 설정하였다.

6.2 입력 지진파

심플모델에 적용하는 지진파는 5장에서 규모 5.5 이상 6.5 미만, 거리 20 km 이하, 8개의 암반지진기록을 이용하여 탄성시간이력해석을 수행하였 다. 해석은 MIDAS 프로그램을 이용하였으며 사용된 입력 암반지진기록 의 시간이력곡선은 Fig. 12와 같다.

시간이력곡선을 사용하여 Fig. 13과 같이 응답가속도 스펙트럼을 도출 하였으며 이때 감쇠비는 5%를 사용하였다. 총 8개의 응답가속도 스펙트럼 평균값을 점선으로 표기하였으며 국내 건축물 내진기준(KDS 41 17 00)에 서 제시하는 s₁ 지반과 유효지반 가속도(S)를 0.22 g로 고려한 설계응답가 속도 스펙트럼과 비교하였을 때, 평균값이 0.5초 이하 단주기대역에서 크 게 이탈한 형태를 보이며 중장주기로 넘어갈수록 KDS 기준 설계응답스펙 트럼 보다 작은 값을 가지는 것으로 나타났다.

Table 6. Vibration Cycle of Research Model

Story	Mode No	Analysis Model			Simple Model		
		Period (s)	Freq (Hz)	Mass (%)	Period (S)	Freq (Hz)	Mass (%)
5F	1	0.498	2.01	67.6	0.492	2.03	67.8
	2	0.085	11.74	21.9	0.086	11.65	21.8
	3	0.033	30.48	7.2	0.035	28.84	7.1
	4	0.019	52.97	3.0	0.021	47.35	2.7
10F	1	1.077	0.93	52.4	1.010	0.99	52.1
	2	0.279	3.59	23.9	0.259	3.86	24.6
	3	0.099	10.14	9.2	0.094	10.70	9.5
	4	0.055	18.22	6.5	0.053	18.83	6.5
15F	1	1.224	0.82	50.2	1.223	0.82	46.9
	2	0.287	3.48	23.0	0.321	3.12	23.3
	3	0.119	8.44	10.2	0.138	7.23	12.2
	4	0.061	16.50	5.6	0.072	13.97	5.5
20F	1	1.979	0.51	45.3	1.991	0.50	49.5
	2	0.535	1.87	23.5	0.454	2.20	23.8
	3	0.211	4.74	10.3	0.174	5.74	10.6
	4	0.116	8.63	6.9	0.094	10.62	6.0

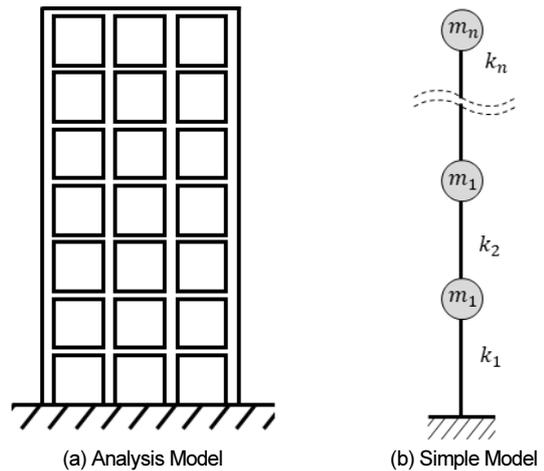


Fig. 11. Research Model

6.3 탄성시간이력해석 결과

규모 5.5 이상 6.5 미만, 거리 20 km 미만에 해당하는 암반지진기록 8개 를 심플 모델에 적용하고 MIDAS 프로그램을 이용하여 탄성시간이력해석 을 수행하였다. 또한, Fig. 14와 같이 남북, 동서 방향의 지진에 대한 해석결 과로 구해진 층 전단력을 SRSS하여 각 층에 해당하는 전단력을 도출하였 으며, 유효지반가속도(S)가 0.176 g이고, KDS-S₁ × 1.3에 해당하는 응 답스펙트럼 해석의 해석결과 값과 비교 · 분석하였다.

지상 5층에 해당하는 모델의 경우 Fig. 14(a)에서와 같이 응답가속도 스 펙트럼에서 0.5초에 해당하는 지진하중이 입력 지진파의 평균보다 KDS 설계응답스펙트럼 값이 작은 것으로 나타났으며 이와 마찬가지로 층 전단 력 검토에서도 KDS 설계응답스펙트럼 기준값보다 입력지진파의 평균 층 전단력이 크게 나타난 것으로 판단된다.

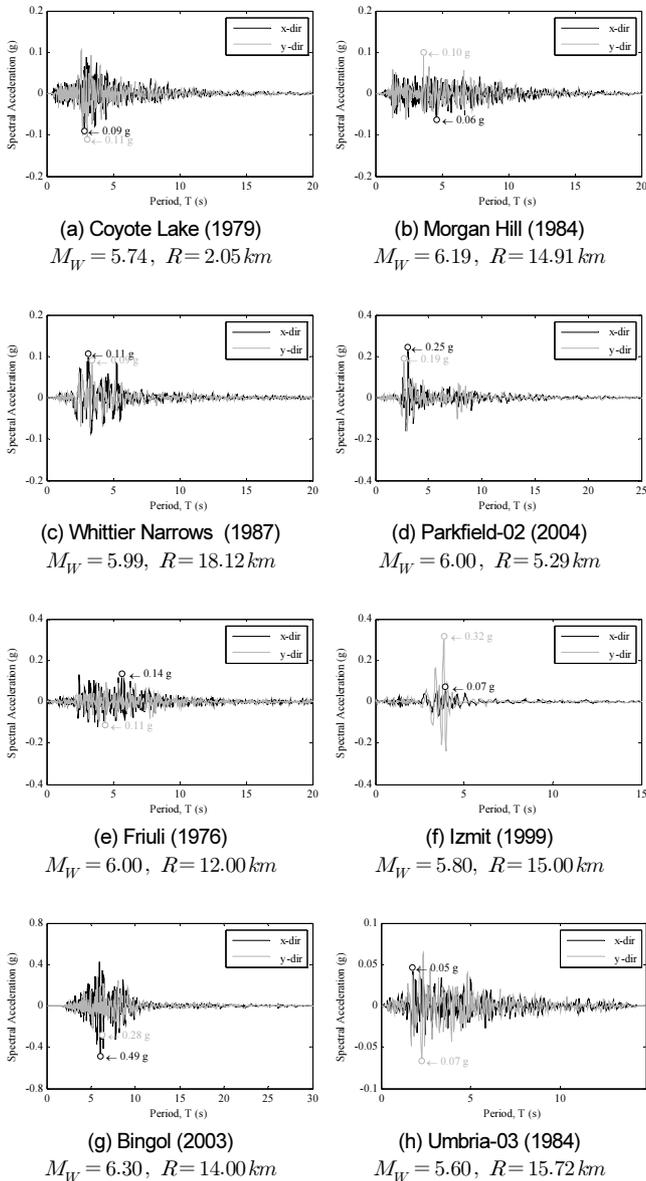


Fig. 12. Input Seismic Wave

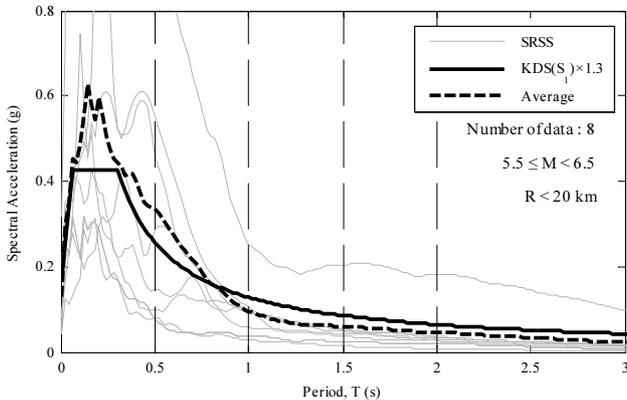


Fig. 13. Input Response Acceleration Spectrum (SRSS)

지상 10층에 해당하는 모델의 경우 응답가속도 스펙트럼에서 1.0초에 해당하는 지진하중이 입력 지진파의 평균보다 KDS 설계응답스펙트럼 값

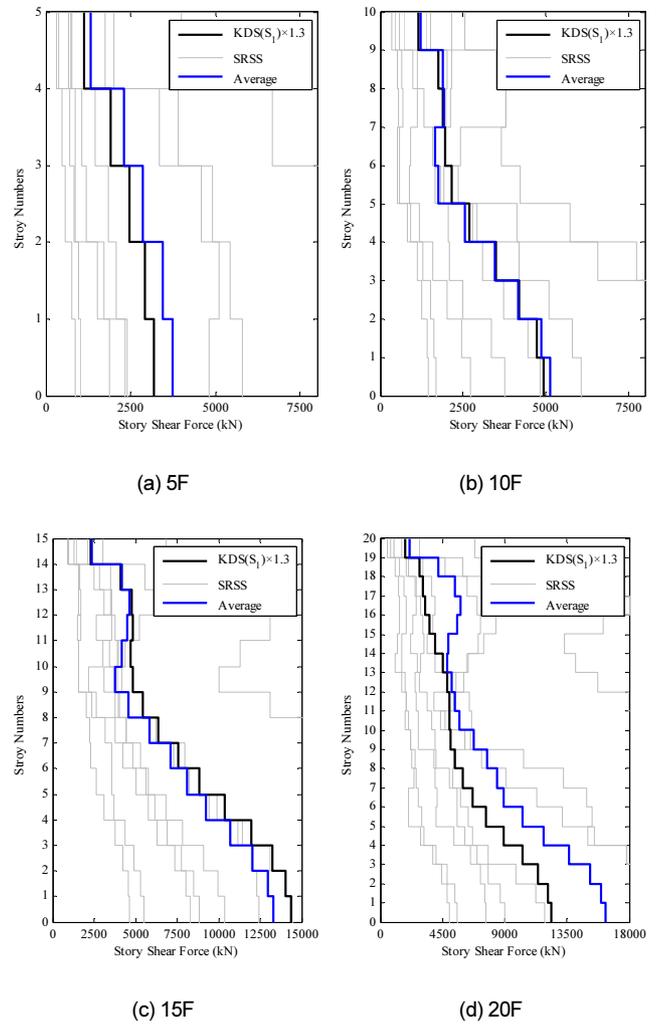


Fig. 14. Story Shear Force Diagram

이 큰 것으로 나타났으나 층 전단력 검토 결과 입력 지진파의 평균 층 전단력 값과 KDS 설계응답스펙트럼 기준값이 유사하게 나타났다. 이는 고차모드에 대한 영향으로 지상 10층 모델의 경우 2차 모드의 주기가 0.094초의 매우 단주기에 해당하고 질량참여율이 24.6%로 나타났다. 이에 대한 영향으로 1차 모드 주기에 대한 지진하중은 KDS 설계응답스펙트럼보다 작지만 층전단력의 경우 유사하게 나타난 것으로 판단된다.

지상 15층에 해당하는 모델의 경우 응답가속도 스펙트럼에서 1.2초에 해당하는 지진하중이 입력 지진파의 평균보다 KDS 설계응답스펙트럼 값이 큰 것으로 나타났으며 이에 대한 영향으로 층전단력 검토 결과 입력 지진파의 평균 층전단력 값이 KDS 설계응답스펙트럼 기준의 층전단력보다 작게 나타난 것으로 판단된다.

지상 20층에 해당하는 모델의 경우 응답가속도 스펙트럼에서 2.0초에 해당하는 지진하중이 입력 지진파의 평균보다 KDS 설계응답스펙트럼 값이 큰 것으로 나타났으나 층전단력 검토 결과 입력 지진파의 평균 층전단력 값이 KDS 설계응답스펙트럼 기준의 층전단력보다 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 고차모드에 대한 영향으로 지상 20층 모델의 경우 2차 모드 주기가 0.454초에 해당하고 질량참여율이 23.8%로 나타나 고차모드의 영향으로 인해서 KDS 설계응답스펙트럼 값보다 크게 나타난 것으로

판단된다.

종합적인 분석결과 지상 5층과 같은 단주기 건물의 경우 암반지진기록의 단주기 증폭 특성으로 인하여 기존 건축물 내진설계기준과 비교하였을 때 과소 평가되어 설계될 우려가 있다. 지상 10층과 지상 15층은 KDS 설계 응답스펙트럼 기준과 비교하였을 때 비교적 유사한 결과를 나타내었으나 지상 20층과 같은 장주기 구조물의 경우 고차모드의 영향으로 층 전단력 검토에서 KDS 설계응답스펙트럼 기준보다 크게 나타났다. 따라서, 암반지진 기록의 단주기 특성이 단주기 구조물과 장주기 구조물의 고차모드에 영향을 크게 가하는 것으로 사료된다.

7. 결론

본 연구에서는 PEER, USGS, ESMD 등을 포함한 세계 지진 데이터베이스에서 지반에 의한 증폭이 반영되지 않은 암반지진기록을 수집하였으며 수집한 데이터를 규모 및 지진 거리로 분류한 분석 결과에 근거하여 진원 거리 20 km 이내에 발생한 규모 5.5 이상 6.5 미만의 지진기록을 지상 5층 지상 10층, 지상 15층, 지상 20층에 해당하는 2차원 다자유도 구조물에 적용하여 탄성시간이력해석을 수행을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 지반증폭이 반영되지 않은 암반지진기록의 응답가속도 스펙트럼을 분석한 결과 단주기 영역에서는 기존 스펙트럼보다 응답가속도가 커지는 것으로 나타났으며 중장주기로 갈수록 급격하게 감소하는 것을 알 수 있었다.
- 2) 국내 지반조건은 해외지반조건 상태보다 심도가 낮은 지반조건에 해당하므로 단주기에서 더 큰 지진하중의 증가가 예상되며, 이는 경주, 포항 지진시 관측된 경향과 유사하다.
- 3) 진원거리 20 km 이내에 발생한 규모 5.5 이상 6.5 미만의 암반지진기록을 이용한 2차원 다자유도 구조물 해석의 층 전단력 검토 결과로 지상 5층과 같은 단주기 구조물의 경우 암반지진기록의 단주기 지진하중 증폭 특성에 의하여 국내 기준보다 층 전단력의 값이 크게 나타나는 것으로 나타났다.
- 4) 중장주기 구조물의 경우 응답가속도 스펙트럼 상에서 지진하중은 국내 내진설계기준(KDS 41 17 00)에서 제시하는 설계응답스펙트럼의 값보다 작았지만 고차모드의 영향으로 인하여 층 전단력은 기준을 초과하는 것으로 나타났다.
- 5) 기존 건축물 내진설계기준(KDS 41 17 00)에서 정의한 스펙트럼의 경우 일반적인 구조물의 내진설계를 수행하는데 있어서 의미가 있으나 단주기 구조물 및 중장주기 구조물의 고차모드에 있어서 과소평가되어 설계 될 수 있다.
- 6) 기존 KDS 설계응답스펙트럼과 함께 Eurocode Type-2와 같은 설계응답스펙트럼의 정의가 만들어진다면 경주 및 포항지진과 같은 고주파 특성의 지진을 고려하여 단주기 구조물 및 고층건물에 대한 내진설계를 수행할 수 있을 것으로 판단된다.
- 7) 본 연구에서 규모 5.5 이상 6.5 미만, 거리 20 km 이하에 해당하는 8개의

암반지진기록을 사용하여 탄성시간이력해석을 수행하여 고주파 특성의 지진이 다자유도 구조물에 미치는 영향을 평가하였다. 다만 8개의 암반지진기록에 대하여 평가한 것이므로 표본에 한계가 있으며 후속연구를 통해 좀 더 많은 표본에 대한 분석을 수행할 예정이다.

/ 감사의 글 /

본 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2018R1C1B5047500), 또한 본 논문은 2018~2019년도 청주대학교 연구장학 지원에 의한 것임.

/ REFERENCES /

1. KDS 41 17 00 Building Seismic Design: Standard, Seoul: Architectural Institute of Korea, c2019, 123 p.
2. Kim DW, An Effect of very shallow soft soil and basement structure on elastic design response spectrum; Seoul University, c2008.
3. Lee CH, Park JH, Kim TJ, Kim SY, Kim DK, Damage Potential Analysis and Earthquake Engineering-related Implications of Sep. 12, 2016 M5.8 Gyeongju Earthquake, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2016;20(7):527-536.
4. Lee CH, Kim SY, Park JH, Kim DK, Kim TJ, Park KH, Comparative Analysis of Structural Damage Potentials Observed in the 9.12 Gyeongju and 11.15 Pohang Earthquakes, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2018;22(3):175-184.
5. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, 1998-1:2004, European Committee for Standardization, c2004, 299 p.
6. Pacific Earthquake Engineering Research Center [Internet]. Available from: <https://peer.berkeley.edu>
7. U.S. Geological Survey [Internet]. Available from: <https://www.usgs.gov/>.
8. European Strong-Motion Database [Internet]. Available from: <https://www.isesd.hi.is>.
9. Yoon JK, Kim DS, Bang ES, Development of Site Classification System and Modification of Design Response Spectra considering Geotechnical Site Characteristics in Korea (I), Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2006;10(2):39-50.
10. KDS 17 10 00 Seismic Design: General, 1st ed, Seoul: Earthquake Engineering Society of Korea, c2018, 21 p.
11. International Building Code, International Code Council, Country Club Hills Illinois, c2003.
12. Chopra AK, Dynamics of structures, 2nd Edition, Prentice Hall, c2000.
13. Applied Technology Council, Tentative provisions for the development, of seismic regulations for buildings, ATC-3-06 (NBS SP-510). Washington, DC: U,S Government Printing Office; c1978.