

세계지진기록에 근거한 우리나라의 지진하중 평가

Evaluation of Seismic Load Level in Korea based on Global Recorded Earthquake Ground Motions

황경란^{1)*} · 이한선¹⁾ · 김승직²⁾

Hwang, Kyung Ran^{1)*} · Lee, Han Seon²⁾ · Kim, Sung Jig³⁾

¹⁾고려대학교 건축사회환경공학부, ²⁾계명대학교, 건축공학과

¹⁾School of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea University, ²⁾Department of Architectural Engineering, Keimyung University

/ A B S T R A C T /

This paper briefly introduces the design seismic loads in Korea (KBC 2009). Then, over 10,000 recorded earthquake ground accelerograms, with their magnitude ranging from 4.0 to 8.0 and their epicentral distance ranging from 0 to 200 km, were used to examine the appropriateness of seismic load defined in Korea known as a low-to-moderate seismicity region. The following conclusions are drawn based on the results: (1) The effective peak ground accelerations (EPA) of recorded earthquake accelerograms under $M \leq 6.0$ and $R \geq 15$ km appear to be less than that of MCE in Korea for all site conditions defined in KBC 2009. (2) The design spectrum (two-thirds of the intensity of MCE) in KBC 2009 is comparable to those of earthquake records in the magnitude 6 - 7 and the epicentral distance less than 50 km. Therefore, (3) the intensity of Korean design earthquake is considered to be overly high since the Korea peninsula is generally conceived to be a low-seismicity region.

Key words: Seismic Load, Design Response Spectrum, Low-to-Moderate Seismicity Regions, Effective peak ground acceleration

1. 서론

우리나라 내진설계기준인 KBC 2009[1]에서 제시하는 우리나라 설계 지진하중은 재현주기 2400년의 지진위험도로 정의한 최대지진 가속도 스펙트럼의 2/3 값으로 정의한다. 2013년 12월 소방방재청에서 공표한 우리나라 국가지진위험지도에 따르면 평균재현주기 2400년을 기준으로 강원 북부, 제주 지역을 제외한 지역의 지진구역계수 또는 유효지반가속도(S)는 0.22 g이다. 국제적인 관점에서 재현주기 2500년 예상지진의 유효지반가속도(Effective PGA, EPA)로 약진(Low), 중진(Moderate), 강진(High) 지역을 분류하자면, 대략적으로 EPA 0.25 g 이하는 약진, 0.25 g에서 0.5 g 까지는 중진, 0.5 g 이상은 강진지역으로 분류할 수 있다. (Table 1) 이에 따르면 우리나라의 경우 유효지반가속도가 0.22 g이므로 약진지역 중에서도 큰 편에 속하며, 일반적으로 이러한 지역을 중약진지역이라고 부른다.

그러나 KBC 2009에 따라 우리나라 지역계수 $S = 0.22$ g를 적용하여 설계지진하중을 산정한 결과, 지반 및 내진등급에 따라 내진설계범주를

Table 1. Low, moderate, and high seismicity

Level	Effective PGA*	Cities
Low	~ 0.25 g	London, Melbourne, Seoul, Hong Kong
Moderate	0.25 g ~ 0.5 g	Wenchuan (Sichuan), Christchurch
High	0.5 g ~	Taiwan, Tokyo, LA, San Francisco

* Effective PGA (EPA) is based on return period of 2,500 years.

Table 2. Seismic Design Categories

Site Class	KBC 2009 [1]					IBC 2000 [2] Sacramento, CA, SDC II
	S_{DS} *	S_{D1} *	Seismic Design Category (SDC)			
			Special	I	II	
S_A	0.293	0.117	C	B	B	B
S_B	0.366	0.146	D	C	C	C
S_C	0.439	0.234	D	D	D	D (C)
S_D	0.527	0.336	D	D	D	D
S_E	0.732	0.497	D	D	D	D

* Seismic Zone 1, $S = 0.22$ g

*Corresponding author: Hwang, Kyung Ran

E-mail: dh8149@korea.ac.kr

(Received May 4, 2015; Revised June 23, 2015; Accepted July 21, 2015)

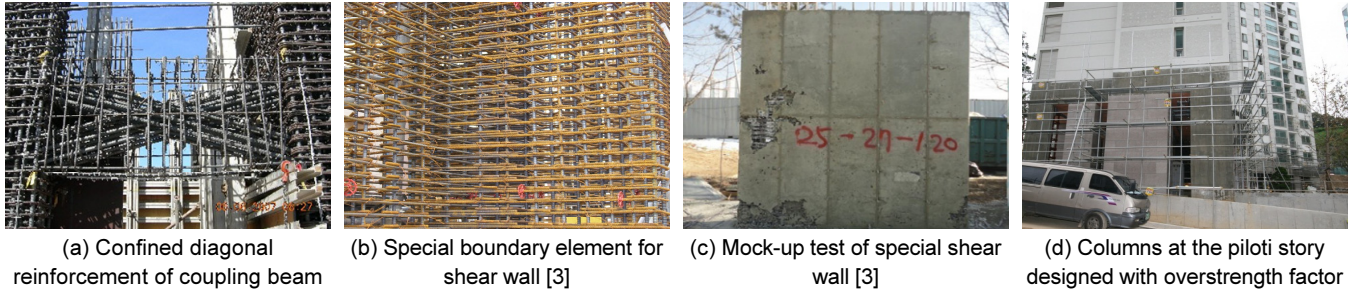


Fig. 1. Problems of current seismic design in KBC 2009

Table 2와 같이 분류해보면, S_c 지반의 내진등급 II(일반적인 건물, $I = 1.0$)에서도 내진설계범주가 D로 결정되었으며, 이는 강진지역인 미국 캘리포니아의 새크라멘토(Sacramento)의 내진설계범주와 동일하였다.

또한 현업에서는 Fig. 1과 같이 강진지역에서 주로 사용하는 대각 보강 상세를 갖는 연결보 및 특수 전단벽 상세를 적용하기도 한다. 특히, 우리나라 벽식 건물의 벽체두께가 일반적으로 150~300 mm 임을 감안했을 때, 특수 전단벽 상세를 적용할 경우, 철근 배근이 촘촘하여 벽체 타설 시 큰 어려움이 발생하고, 심한 경우 시공이 불가능한 경우도 일어난다. 또한 과도한 초과강도계수를 적용하면서, 필로티 기둥이 필로티의 역할을 할 수 없을 정도로 부재가 커지는 상황도 발생하였다. 이러한 과다설계를 피하기 위해, 현업에서는 보다 정밀한 방법인 비선형 동적 시간이력해석을 수행하여 부재의 거동을 직접 확인하거나, 내진성능기반설계를 수행하기도 한다.

이러한 문제의 근본적인 원인은 우리나라가 중앙진지역임에도 설계지진하중이 상당히 크기 때문이라고 사료된다. 따라서 본 연구에서는 우리나라 지진하중을 세계적으로 발생한 실제 기록 지진과 비교, 분석하여 중앙진 지역의 지진하중으로써 적합한 수준인지 평가하고자 한다. 이를 위해, 미국 Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center의 PEER ground motion database[4]에서 제공하는 실제 지진 시 계측된 지진파 중 10642개의 지진파를 이용하였으며, 이외에도 해외 유명 지진기록과 우리나라 설계 응답 스펙트럼을 비교하여 평가하였다.

2. 우리나라 지진하중의 변천사 및 중앙진지역인 호주의 지진하중 소개

2.1. 우리나라 지진하중의 변천사 및 현 지진하중의 수준

우리나라에 건물의 내진설계기준이 처음으로 등장한 것은 1988년으로, 이는 1985년 멕시코 지진에서 보여준 막대한 피해에 자극을 받아 수립되었다. 이후 Table 3과 같이 지진하중이 변해왔다. 특히 2005년에 발표된 KBC 2005는 이전의 지진하중과는 대폭 변화하였으며, 미국의 기준인 IBC 2000에 큰 영향을 받았다. 이후 현재 주로 사용하는 KBC 2009가 개정되었으며, KBC 2005에서 약간의 수정(지진력저항시스템의 추가 및 일부 계수 값 수정)이 있었으나, 지진하중의 크기는 변하지 않았다.

AIK 1988의 지역계수로 정의된 설계 PGA 값은 0.12 g 또는 0.08 g 이었다. EESK 97에서는 지진력을 산정하는 식이 크게 변하였으며, 이는 미국의 UBC 97과 유사하다. 또한 지역계수 값은 0.11 g 또는 0.07 g으로 수

Table 3. Histories of Korean Seismic Load

Design codes	Base shear
AIK 1988 (allowable stress design)	$V = \frac{AIS}{1.2\sqrt{T}R}W \leq \frac{1.75AI}{R}W \quad \text{or} \quad V = \frac{1.5AIS}{R}W$ <p>A: zone factor (0.12, 0.08), I: importance factor, S: site factor (3 groups), R: response modification factor, T: fundamental period, DE* level: EQ with return period of 500 yrs</p>
EESK 97** (strength design)	$V = \frac{C_v I}{RT}W \leq \frac{2.5C_d I}{R}W$ <p>C_a, C_v: seismic coefficient (0.11, 0.07), I: importance factor, R: response modification factor, T: fundamental period, Site factor: 6 groups, DE* level: EQ with return period of 500 years</p>
AIK 2000 (allowable stress design)	$V = \frac{AIS}{1.2\sqrt{T}R}W \leq \frac{1.75AI}{R}W$ <p>A: zone factor (0.11, 0.07), I: importance factor, S: soil factor (4 groups), R: response modification factor, T: fundamental period, DE* level: EQ with return period of 500 yrs</p>
KBC 2005, 2009 (strength design)	$V = \frac{S_{D1}}{(R/I_E)T}W \leq \frac{S_{DS}}{R/I_E}W$ <p>S_{D1}, S_{DS}: spectral accelerations at period 1sec and 0.2sec, respectively, I: importance factor, R: response modification factor, T: fundamental period, Site factor: 5 groups (S_A, S_B, S_C, S_D, S_E), DE* = (2/3) × MCE* (return period of 2500 years)</p>

* DE: Design Earthquake, MCE: Maximum Considered Earthquake

** EESK 97 is a research report which was not implemented into the design code.

정되었다. AIK 2000에서는 AIK 1988와 비교하여, 지역계수의 값이 0.01 g 만큼 줄었으며, 지반의 분류가 수정되었다. KBC 2005에서는 이전의 지역계수와는 전혀 다른 개념을 도입하였다. 지역계수를 2400년 재현주기를 갖는 최대지진(Maximum Considered Earthquake, MCE)의 유효지반가속도로 정의하였으며, 이는 0.22 g 또는 0.14 g 이다. 이에 따른 설계지진의 수준은 최대지진의 증폭효과를 고려하여 최대지진의 2/3 값으로 정의한다. 이는 KBC 2005 이전의 설계지진의 정의(재현주기 500년 지진)와는 크게 달라졌다. Fig. 2에서는 AIK2000과 KBC 2005의 탄성 설계 스펙트럼을 비교하였다. KBC 2005의 스펙트럼은 AIK 2000에 비해 지반이 약해질수록 크게 증폭되며, 전체적으로 설계지진하중이 크게 증가되었다. KBC 2009의 설계 스펙트럼은 KBC 2005와 동일하며, 현재까지 우리나라의 설

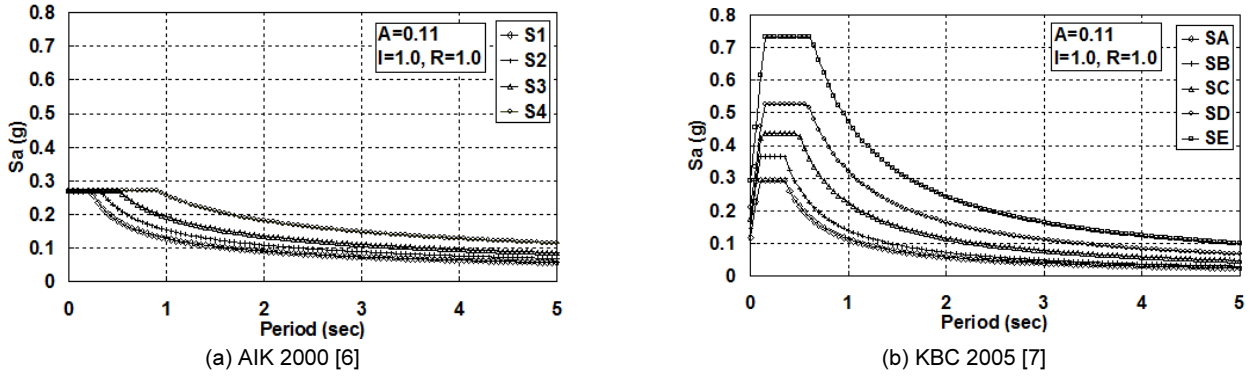


Fig. 2. Elastic design spectrum (strength design level)

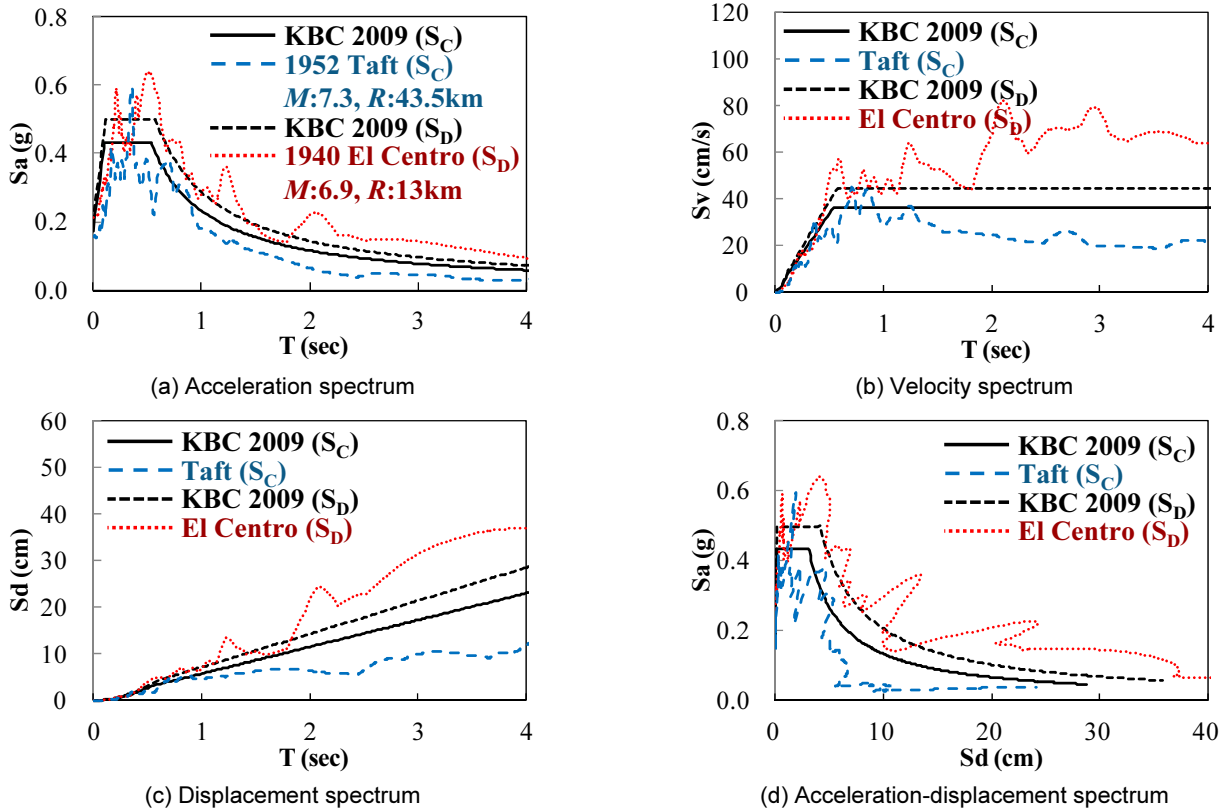


Fig. 3. Comparison among KBC2009, 1940 El Centro, and 1952 Taft Spectra

계 응답 스펙트럼에서는 변위일정구간을 반영하고 있지 않다.

Fig. 3에서는 미국의 1940년 El Centro 지진 (S_D 지반) 및 1952년 Taft 지진 (S_C 지반)과 우리나라 서울의 설계 스펙트럼을 각각의 지반의 조건에 맞게 비교하였다. 그 결과, 우리나라 설계 스펙트럼이 규모 6.9 및 7.3 지진과 비슷한 수준이었다. 다음 3장에서는 다양한 세계지진기록과 우리나라 설계지진하중을 비교하였다.

지진하중의 크기에 따른 KBC 2009의 내진설계범주를 Table 4와 같이 분류하였다[5]. Table 4에서는 재현주기 2400년 우리나라 최대지진의 유효지반가속도(EPA) 크기에 따라, 중요도별 내진설계범주를 분류하였다. 이때 유효지반가속도는 암반인 S_B 지반에 해당하는 값이다. 우리나라 지역 계수 1에 해당하는 S_B 지반의 유효지반가속도는 0.22 g이며, 이에 상응하는 내진설계범주는 중요도와 상관없이 D로 결정된다. 내진설계범주 D를 적

Table 4. Classification of facilities to “seismic design categories” [5]

EPA on rock under MCE	Special facilities	High consequences	Ordinary facilities	Temporary, not for people
$EPA < 0.045 g$	A	A	A	A
$0.045 g < EPA < 0.05 g$	B	A	A	A
$0.05 g < EPA < 0.06 g$	B	B	A	A
$0.06 g < EPA < 0.075 g$	B	B	B	A
$0.075 g < EPA < 0.085 g$	B	B	B	B
$0.085 g < EPA < 0.1 g$	D	B	B	B
$0.1 g < EPA < 0.12 g$	D	D	B	B
$0.12 g < EPA < 0.15 g$	D	D	D	B
$0.15 g < EPA$	D	D	D	D

* Special facilities: essential in post-disaster emergency, or with hazardous contents.

** High consequences: large occupancy, congregation areas, etc.

용할 경우, 강진지역의 내진설계수준으로 설계할 수밖에 없는 결과를 야기한다.

2.2 호주의 지진하중 현황 (AS 1170.4 [8])

호주는 우리나라와 같이 중앙지진지역이면서 판내부 지진(Intraplate Earthquake)의 특성을 가진 곳이며, 판내부 중앙지진에 관한 연구는 지난 20년간 지속적으로 수행되어 왔다. 그 결과, 지진의 특성에 대한 정성적인 평가가 가능할 정도의 수준으로 발전하였다. 우리나라의 지진 환경과 비슷하지만 우리나라의 지진하중과는 큰 차이가 있어 소개하고자 한다.

호주의 설계 스펙트럼[8]의 가장 큰 특징은 속도일정구간과 변위일정구간이 변하는 주기(T_2)를 1.5초로 정의하였다는 점이다. Lam 외 3인 [9, 10]은 판내부 중앙지진에 대한 감쇠식 및 스펙트럼을 개발하였으며, T_2 를 산정하기 위한 식(1)을 제안하였다.

$$T_2 = 0.5 + 0.5(M - 5) \tag{1}$$

여기서 M 은 규모를 의미하며, 호주 기준에서는 규모를 7로 가정하여 T_2 를 1.5초로 정의하였다. 또한 이를 증명하기 위해 후속연구 또한 수행되었다. 규모 7이하 진앙거리 32~35 km의 실제 미국 PEER 센터의 중앙지진 데이터를 이용하여 변위 스펙트럼을 분석하였으며, 대부분의 T_2 는 1.5초 이내에 존재함을 알 수 있었다[11]. T_2 의 정의는 호주 내진설계기준뿐만 아니라 유럽의 유로코드[12] 및 미국 내진설계지침[13]에서도 찾아볼 수 있다. 유로코드[12]의 경우 규모 5.5 이상의 지진에 대해서는 2초, 규모 5.5 이하의 지

진은 1.2초로 적용하도록 한다. 미국의 FEMA 450지침[13]에서는 규모 5.5이하에서는 T_2 는 2.5초이고, 이후 규모가 증가할수록 T_2 도 증가하며, 규모가 약 6.5일 때 T_2 는 4초이다.

Fig. 4는 지반조건이 S_B 일 때 우리나라 서울의 설계 스펙트럼과 약진지역인 호주 남동부 지역인 멜버른의 스펙트럼을 비교한 결과를 보여준다. 호주의 내진설계기준[8]에서는 건축물의 수명 내에 지진에 대해 건축물 내 또는 근처의 인명을 보호하고 높은 안전도를 제공할 수 있는 충분한 강성, 강도, 연성도를 가지고 있어야 한다고 명시하고 있으며, 이러한 상태를 극한한계상태(Ultimate Limit States, ULS)라고 정의하고 있다. 이에 따라 일반적인 건축물 설계 시에 설계지진하중은 재현주기 500년의 지진으로 정의하고 있으며, 지역계수(호주기준에서는 이를 재해계수, hazard factor (Z)라고 정의한다.)를 재현주기 500년 지진으로 제시하였다. 호주 남동부 지역인 멜버른, 시드니, 캔버라의 지역계수(Z)는 0.08 g이며, 이에 확률계수($k_p=1.8$)를 곱하여 2500년 재현주기 지진으로 변환하면 $k_p Z = 0.14$ g로, 서울의 지역계수 0.22 g의 약 64% 수준이다. 이러한 이유로 설계 응답 스펙트럼에서 서울의 설계지진하중이 멜버른 보다 훨씬 크게 나타났다. 또한 Fig. 4(a)에서 가속도 일정구간이후 멜버른 스펙트럼의 가속도 값이 서울의 것보다 가파르게 감소하는데, 이는 멜버른의 스펙트럼에서 속도 일정구간이 시작되는 T_1 이 0.3초로 서울의 T_1 보다 약 0.25초 정도 짧으며(Fig. 4(b)), 변위일정구간이 시작되는 T_2 를 1.5초(Fig. 4(c))로 정의하였기 때문이다.

호주의 설계 응답 스펙트럼에서 가속도일정구간과 속도일정구간의 경계 주기 T_1 , 속도일정구간과 변위일정구간의 경계 주기 T_2 는 Fig. 4(d)와 같이 가속도-변위 응답 스펙트럼으로도 나타낼 수 있다. 구조물의 주기가 T_1 보다 작으면 설계 요구량이 최대 응답 가속도($S_{a,max}$)로 일정하게 결정되며, T_2 보

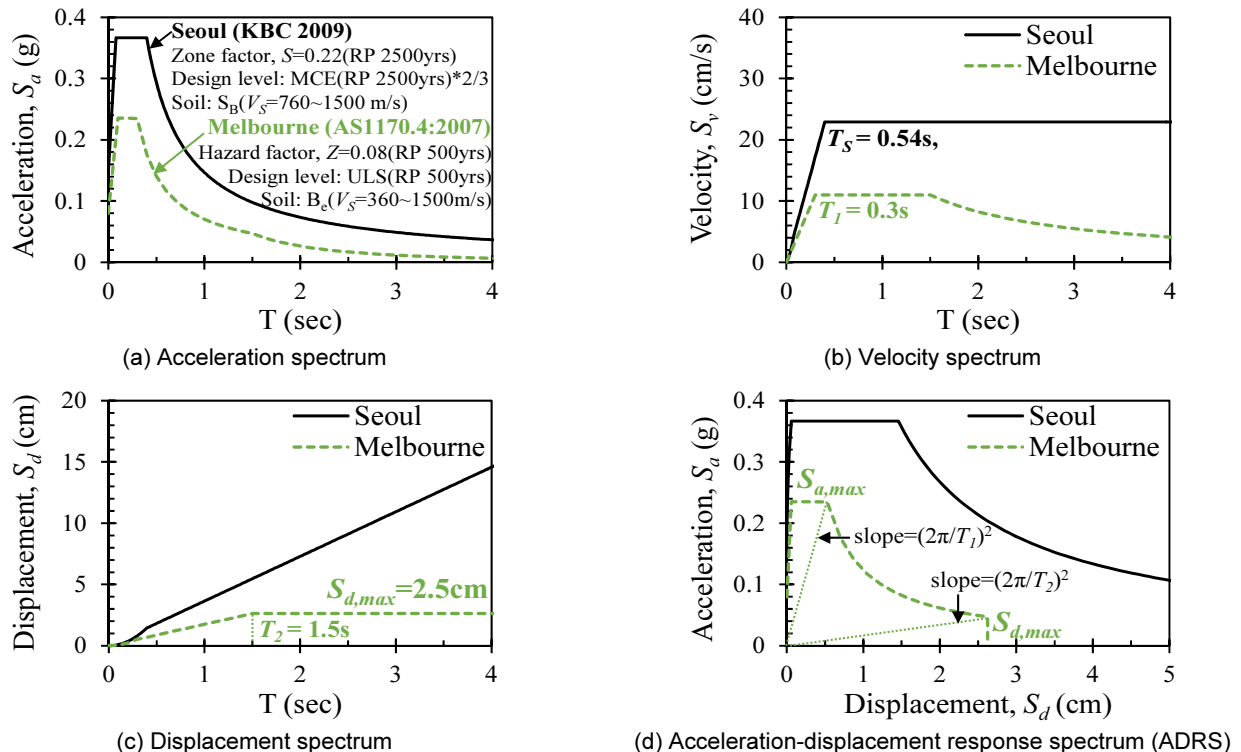


Fig. 4. Design spectra for Seoul (KBC 2009) and Melbourne (AS 1170.4:2007): low-to-moderate seismicity regions (RP: Return Period, ULS: Ultimate Limit States, V_S : shear wave velocity)

다 크면 설계 요구량은 최대 응답 변위($S_{d,max}$)로 일정하게 정해진다. 또한 구조물의 주기가 T_1 과 T_2 사이에 존재할 때, 즉 응답 속도 일정구간에서는 설계 에너지 요구량이 일정하게 결정된다. 따라서 가속도-변위 응답 스펙트럼을 이용할 경우 최대 응답 구간 내에서는 고유주기와 상관없이 일정한 값을 가지기 때문에, 고유주기의 불확실성에 따른 설계 오류를 줄일 수 있다[14].

3. 세계지진기록에 근거한 우리나라의 지진하중 수준

3.1 세계지진기록 데이터의 유효지반가속도 비교

세계 지진 기록과 우리나라 지진하중 수준을 평가하기에 앞서, 우리나라의 지진발생빈도와 타 중앙진지역의 지진발생빈도와 비교해보았다. 중앙진지역이고 판내부에 위치한 곳에 대해, 국가별로 최근 50년 동안 규모 5이상의 지진이 내륙에서 발생한 횟수를 Table 5[15]에 나타냈다. 국가별 면적이 다르기 때문에, 1,000,000 km²를 기준으로 하여 정규화하였으며, 한반도는 국토 규모에 비해 정규화된 지진발생 빈도가 13회로 다른 중앙진지역과 비교하였을 때 높은 편으로 보인다. 그러나 한반도 내에서 최근 50년간 발생한 규모 5이상의 지진은 모두 5.3이하로 크지 않았다. 또한 한반도 근처의 해상에서 발생한 지진까지 포함할 경우 규모 5이상의 지진은 6회(규모 5.0~5.3)이다. 해상에서 발생한 지진까지 포함한다면, 한반도의 200 km 범위 내 해역으로 확장한 면적(한반도 크기의 약 2.5배 = 558,000 km²)을 적용하여 1,000,000 km²로 정규화 할 경우 약 10회 정도로 중국의 중동부 지역과 영국 제도와 비슷한 수준을 보인다.

본 장에서는 우리나라의 지진하중 수준이 중앙진지역의 지진하중으로 써 합당한 수준인지 평가해보기 위해, 실제 지진 기록 데이터와 비교해보고자 한다. 그러나 우리나라의 판내부 지진 기록 데이터는 매우 부족한 실정이며, 규모 5이상의 지진의 기록은 소수에 불과하다. 따라서 본 연구에서는 이러한 지진데이터의 부족함을 극복하기 위해, 미국 Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center의 PEER ground motion database [4]에서 제공하는 실제 지진 시 계측된 지진파 중 10,642개의 지진파를 이용하여, 규모 4~8과 진앙거리 0~200 km에 해당하는 지진파의 유효지반가

Table 5. Number of $M \geq 5$ intraplate earthquake events on land in a 50 year period [15]

Country	Land Area (km ²)	N($M \geq 5$) in 50 years [Recorded Number]	N($M \geq 5$) in 50 years [Recorded Number Normalized to 1,000,000 km ²]
Australia	7,692,024	45	6
Brazil	8,515,767	33	4
Eastern US	2,291,043	13	5 - 6
Eastern & Central China	1,550,974	14	9
France	674,843	4	6
Southern India	635,780	3	5
Germany	357,021	1	3
British Isles	315,134	3	9 - 10
Peninsular Malaysia	131,598	<1	<1
Korean Peninsula [14]	223,348	3	13
Total	22,722,554	120	Average = 5

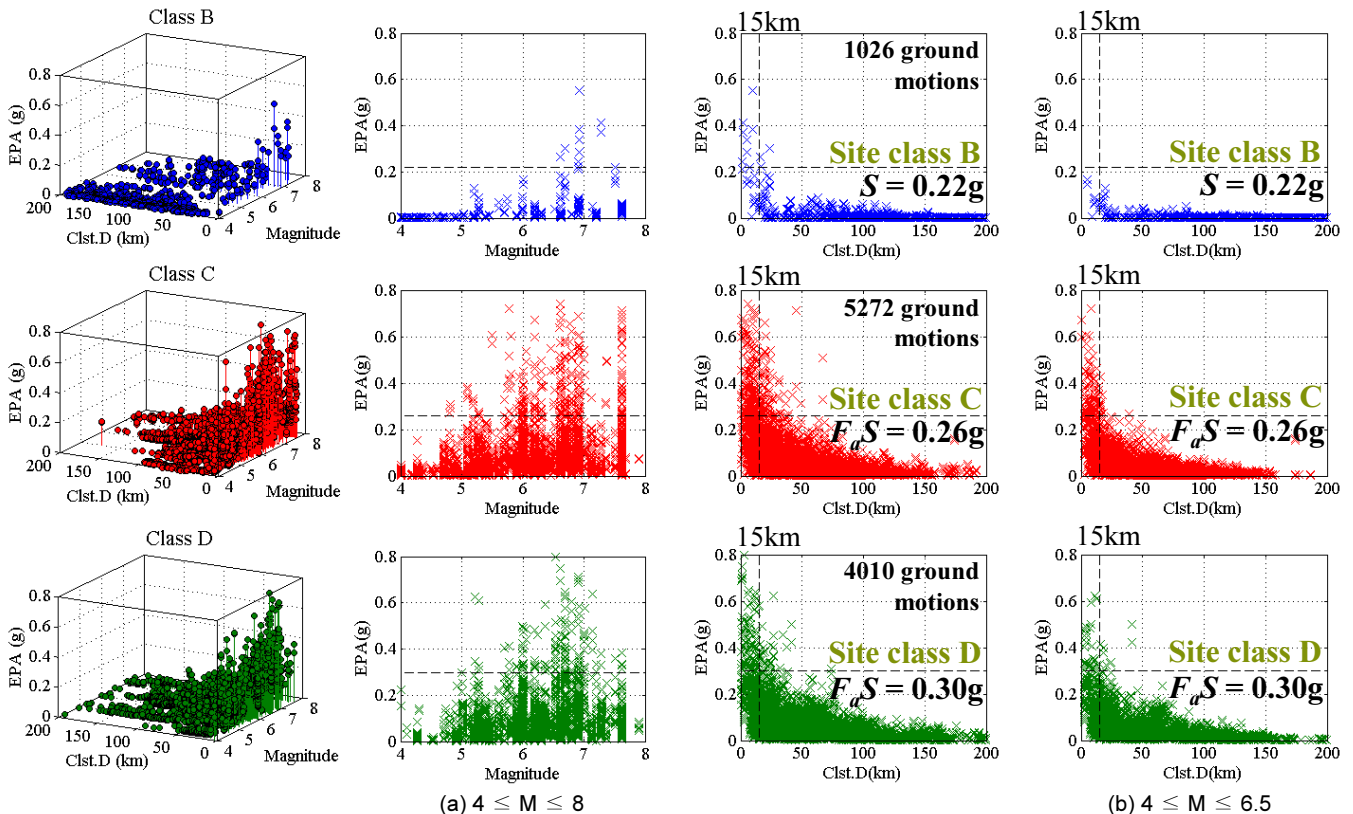


Fig. 5. Effective PGA

Table 6. Earthquake scenario for low seismicity region based on PDD Table [9, 11, 16]

Bound	Scenario		Peak Displacement Demand (PDD)	Effective Peak Ground Acceleration (EPA)
	Magnitude (M)	Rupture Distance (R)		
Lower	6	30 km	20 mm	0.09 g
Mid	6	20 km	35 mm	0.16 g
Upper	6	15 km	50 mm	0.22 g

속도(Effective Peak Ground Acceleration, EPA)를 구해 비교하였다 (Fig. 5(a)). 유효지반가속도(EPA)는 0.1초부터 0.5초 범위의 스펙트럼 가속도(5% 감쇠율)를 평균한 값에 2.5를 나눈 값이다.

S_B 지반에서 계측된 1,026개의 지진파의 약 50% 정도는 규모 5보다 작았으며, 일부 진앙거리(Clst.D) 25 km 내의 규모 6.5이상 지진파의 EPA만이 0.22 g를 초과하였다. 반면 S_C 지반(5,272 개의 지진파) 및 S_D 지반(4,010 개의 지진파)의 경우, 규모가 5~6 정도로 작더라도 진앙거리 약 50 km 이내에서 계측된 지진파의 EPA는 지반증폭계수를 반영하여 산정한 KBC 2009 기준의 EPA 값(S_C: 0.26 g 및 S_D: 0.30 g)보다 크게 나타났다. 그러나 진앙거리 50 km 이외에서 계측된 EPA 값은 거의 대부분 기준 값 이내에 존재하였다. Fig. 5에서 보이듯이, 규모 5이상의 지진은 규모와 관계없이 진앙거리가 가까울수록 EPA 값은 크게 나타났으며, 규모 7이상의 지진이라도 진앙거리가 50 km를 넘어서면 EPA 값은 작았다. 일반적으로 중앙진지역의 최대지진을 규모 6~6.5로 예상하지만, Fig. 5를 통해 지진의 규모만으로 지진의 크기를 예측하는 것은 부적절하는 것을 알 수 있다.

Lam[9, 16] 및 Lumantarna[11]는 지진감쇠모델과 응답 스펙트럼 관계를 이용하여, 규모 6을 기준으로 진앙거리를 달리한 시나리오를 Table 5에서 최대변위요구량(PDD) 및 예상유효지반가속도(EPA)과 함께 제시하였다. 우리나라 최대지진의 EPA는 0.22 g이므로, 본 연구에서는 현재 우리나라 최대지진의 예상시나리오를 규모(M) = 6, 진앙거리(R) = 15 km로 가정하고자 한다.

3.2 세계지진기록의 스펙트럼과 현 설계 응답 스펙트럼과의 비교

Figs. 6(a)-(f)에서는 Fig. 5의 실제 계측 지진파 중 규모(M) 6이하 및 규모 6이상 6.5 미만, 진앙거리(R) 15 km 이내 및 15 km 이외로 구분하여 지반 조건에 맞게 스펙트럼을 분류하였으며, KBC 2009의 최대지진(Maximum Considered Earthquake, MCE) 및 설계지진(Design Earthquake, DE)의 스펙트럼과 비교하였다. 보통 진앙거리가 10 km 이내를 근거리지진(near-fault earthquake)으로, 10 km 이상은 원거리지진(far-fault earthquake)으로 정의하지만, Fig. 6에서는 진앙거리 15 km를 기준으로 분류하였다. 이는 앞 절에서 우리나라 최대지진의 예상시나리오로 가정한 규모 6, 진앙거리 15 km와 직접적으로 비교해보기 위함이며, 본 연구에서는 편의상 15 km 이하를 근거리지진, 15 km 이상을 원거리지진으로 명하고자 한다. Fig. 6에서 근거리지진은 붉은색 점선으로, 원거리지진은 파란색 실선으로 표시하였으며, KBC 2009의 최대지진 스펙트럼은 흑색 굵은 점선으로, 설계지진 스펙트럼은 흑색 굵은 실선으로 나타났다. 또한 Fig. 6에서는 가속도 스펙트럼뿐만 아니라, 속도 일정영역과 가속도 일정영역 등의 크기를 직접적으로 비교하기 위해 속도 및 변위 스펙트럼과 가속도-변위 스펙트럼도 제시하였다.

Figs. 6(a)와 (b)에서 S_B 지반에서 계측된 실제 기록 지진 스펙트럼과 이에 상응하는 KBC 2009 최대지진을 비교하였으며, 최대지진 스펙트럼은 규모 6이상 6.5이하의 근거리지진보다도 상당히 크게 나타났다. 최대지진의 2/3 값에 해당하는 설계지진도 스펙트럼의 속도 및 변위 일정구간에서 실제 지진보다 훨씬 크게 나타났다. 실제 지진이 특히 변위 스펙트럼에서 모든 계측된 지진파가 약 1초 이후에 일정한 값을 가지며 KBC 2009의 스펙트럼과는 큰 차이를 보였고, T = 1.5초 일 때 최대지진의 변위 스펙트럼 값은 실제 지진의 최대값보다 약 3배 정도 큰 값을 가졌다.

Fig. 6(c)는 S_C 지반에서 계측된 규모 6이하의 실제 기록 지진 스펙트럼과 KBC 2009의 최대지진 및 설계 스펙트럼을 비교하였다. 가속도 일정구간에서는 진앙거리와는 상관없이 기록 지진의 가속도 스펙트럼이 KBC 스펙트럼 값보다 크게 나타나는 것처럼 보이나, 이는 특정 주기에서 가속도가 증폭되는 현상이다. Fig. 5(b)와 같이 규모 6.5이하 S_C 지반의 EPA 값은 진앙거리가 15 km 보다 멀 경우, 모든 EPA 값은 지반계수를 고려한 최대지진의 지역계수 값 0.26 g(F_aS)보다 작게 나타난다. 속도 및 변위 일정구간에서는 일부 장주기 영역에서 증폭되는 경우를 제외하고는 최대지진의 스펙트럼 이내에 존재하는 것을 관찰할 수 있었다. 변위 스펙트럼에서는 약 5개의 데이터를 제외하고는 모두 1초 이후에서 일정한 범위 내에 존재한다. 반면 S_C 지반의 규모 6이상 6.5이하의 지진 기록의 스펙트럼(Fig. 6(d))은 거의 KBC 2009의 최대지진 스펙트럼과 유사한 수준으로 보이며, 지진기록이 원거리지진임에도 불구하고 속도와 변위 일정구간에서도 상당히 증폭되는 현상을 관찰할 수 있었다. 특히 변위 스펙트럼에서는 약 2초 이후에서도 변위 값이 일정한 범위 내에 있지 않고, 증폭되는 지진기록이 상당히 많이 나타났다.

S_D 지반의 지진기록 스펙트럼과 이에 상응하는 KBC 2009 최대지진 스펙트럼의 비교 결과(Figs. 6(e), (f))는 거의 S_C 지반과 유사하였다. 또한 Fig. 5(b)에서 규모 6.5이하 S_D 지반의 EPA 값은 진앙거리 15 km보다 멀 경우, 약 5개의 기록지진을 제외하고는 대부분의 EPA 값은 지반계수를 고려한 최대지진의 지역계수 값 0.30 g(F_aS)값보다 작았다. 규모 6이하일 때 (Fig. 6(e))는 원거리지진의 속도 및 변위 스펙트럼은 거의 KBC 2009의 최대지진 뿐만 아니라 설계지진 스펙트럼 이내에 존재하였으며, 근거리지진의 스펙트럼도 최대지진의 스펙트럼과 유사하였다. 또한 S_D 지반에서도 변위 스펙트럼에서 대부분의 지진기록 스펙트럼이 1초 이후에 일정한 범위 내에 수렴되었다. 규모 6이상 6.5이하(Fig. 6(f))일 때 기록지진의 스펙트럼은 KBC 2009 최대지진 스펙트럼과 유사한 수준이었으며, 변위 일정구간을 추정하기 어려운 경우가 다수 관찰되었다.

Figs. 6 (a), (b), (c), (e)의 가속도-변위 응답스펙트럼을 보면, 규모 6이하 진앙거리가 15 km 보다 멀 경우, 대부분의 지진기록의 변위 값이 일정한 범위 내에 존재하였다. 이는 중앙진의 최대 변위는 특정 값으로 정의할 수 있음을 보여준다.

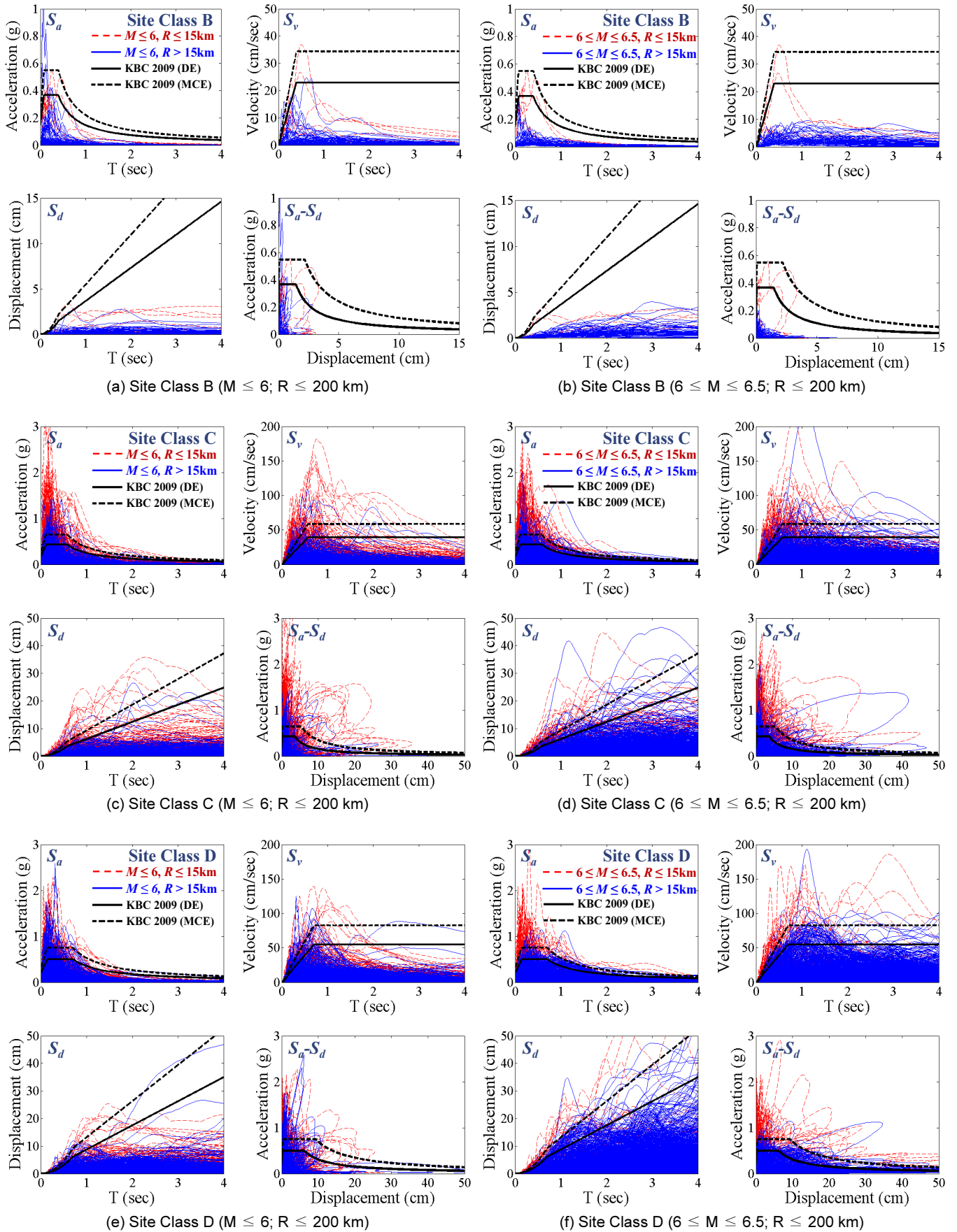


Fig. 6. Comparison of recorded spectra

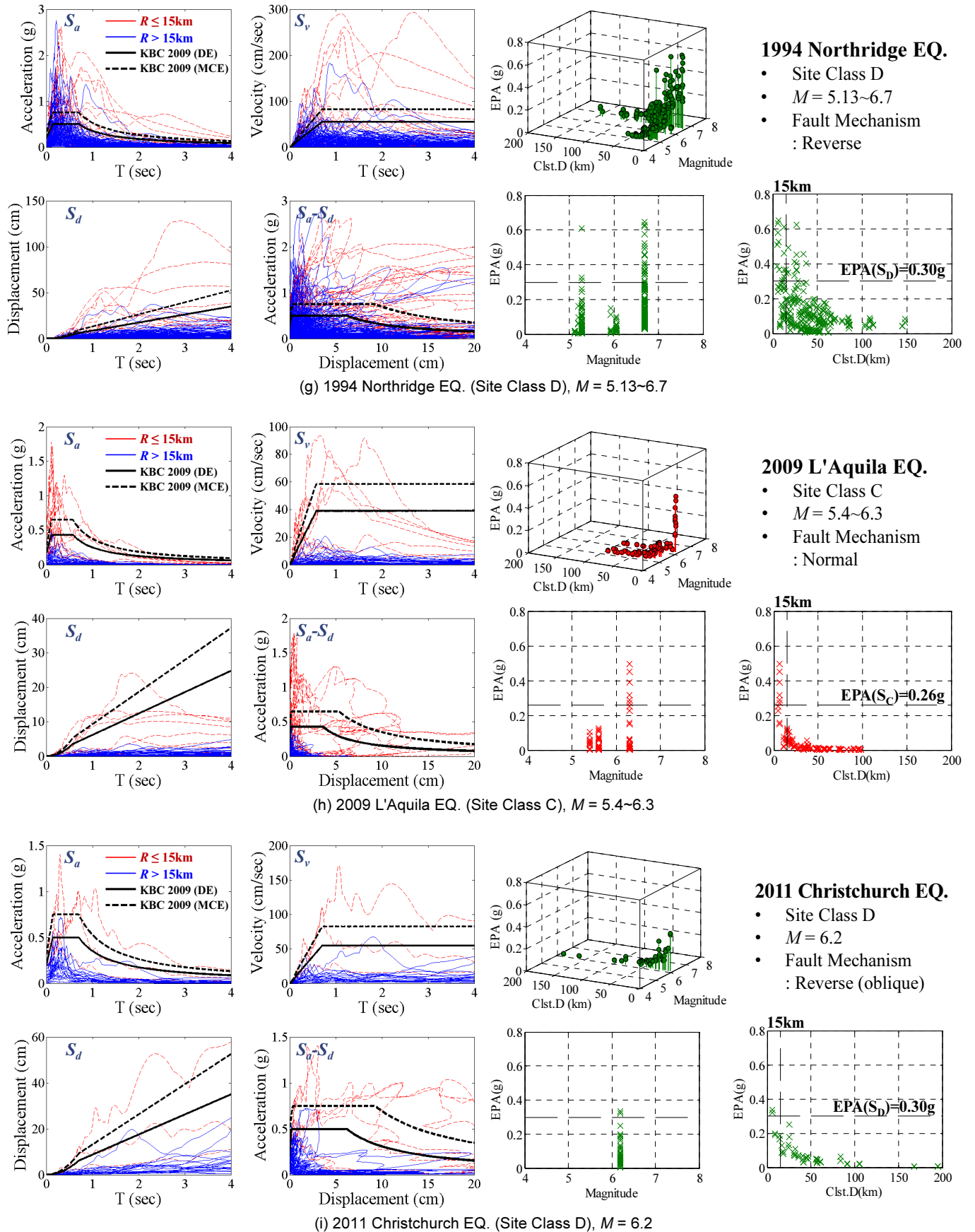


Fig. 6. Comparison of recorded spectra (continued)

Figs. 6(g), (h), (i)는 순서대로 1994년 Northridge 지진, 2009년 L'Aquila 지진, 2011년 Christchurch 지진의 기록지진과 KBC 2009 최대 지진 및 설계지진의 스펙트럼과 비교한 결과를 보여준다. 위의 세 지진은 강진지역에 발생하였지만, 규모 6~7 사이이며, 지진의 규모에 비해 피해 수준이 큰 지진이다.

1994년 Northridge 지진의 규모는 6.7이며, Fig. 6(g)는 여진까지 포함하였다. 또한 Fig. 6(g)는 Northridge 지진기록 중 S_D 지반에서 계측된 지진기록만을 나타내었다. 지진의 규모가 6.5 이상으로 큰 만큼 원거리에서 계측된 지진일지라도 EPA 값은 우리나라 재현주기 2400년의 지역계수에 지반계수를 곱한 값인 0.3 g 보다 크게 나타났다. 그러나 속도 및 변위 일정 구간에서 원거리 지진기록은 KBC 2009의 최대지진 스펙트럼과 거의 유사한 수준으로 나타났다. 또한 변위스펙트럼에서 원거리 지진은 2초 이후로 대부분 일정한 범위의 변위 값을 가지는 것을 볼 수 있다.

2009년 L'Aquila 지진(이탈리아)의 규모는 6.3이며, 여진까지 포함하여 S_C 지반에서 계측된 지진기록의 스펙트럼과 EPA 값을 Fig. 6(h)에 나타내었다. 또한 2011년 Christchurch 지진(뉴질랜드)의 규모는 6.2이며, S_D 지반에서 계측된 지진기록의 스펙트럼과 EPA 값을 Fig. 6(i)에 제시하였다. 두 기록지진의 공통점으로 진양거리 10 km 이내의 몇몇의 근거리지진을 제외하면, 재현주기 2400년의 지역계수에 지반계수를 곱한 값(S_C 지반: 0.26 g, S_D 지반: 0.3 g)보다 작게 나타났다. 또한 진양거리 10 km 보다 먼 곳에서 계측된 기록지진의 스펙트럼은 KBC 2009의 최대지진의 스펙트럼 이내에 존재하였으며, 특히 Christchurch 기록지진의 스펙트럼은 설계지진의 스펙트럼보다도 작게 나타난 경우가 많았다. 반면 L'Aquila 지진은 변위 스펙트럼에서 근거리지진이라도 1초 이후에 일정한 범위의 변위 값을 보이지만, Christchurch 지진의 변위 스펙트럼은 원거리지진에서도 1초 이후에 갑자기 증폭하거나, 변위 값이 크지는 않지만 계속 증가하는 경우도 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 우리나라의 지진하중 수준이 중약진지역의 지진하중으로 적합한 수준인지 평가하기 위해, 현 우리나라 KBC 2009 지진하중의 현황과 문제점을 파악하고, 우리나라 지진하중을 세계적으로 발생한 실제 기록 지진과 비교, 분석하였다. 미국 PEER ground motion database[4]에서 제공하는 실제 지진 시 계측된 지진파 중 10642개의 지진파를 이용하였으며, 이외에도 해외 유명 지진기록과 우리나라 설계 응답 스펙트럼을 비교하여 평가하였다. 이 뿐만 아니라, 본 연구에서는 중약진지역인 호주의 지진하중을 소개하고, 우리나라 지진하중과도 비교해 보았다. 그 결론은 다음과 같다:

(1) 현재 우리나라 설계지진하중(KBC 2009)은 1940년 El Centro 지진(규모 6.9, 진양거리 13 km)과 1952년 Taft 지진(규모 7.3, 진양거리 43.5 km)과 유사한 수준이었으며, 이는 중약진지역으로 보기 힘들 정도로 지나치게 높다. 또한 재현주기 2400년의 지진구역 1에 해당하는 지역계수(유효지반가속도)는 0.22 g로, 이 값에 따른 내진설계범주는 강진지역인 미국 캘리포니아 Sacramento의 내진설계범주와 동일하다. 이는 과다설계를 야기하며, 현재 중약진지역인 우리나라에서도 특수 단단벽 상재 및 대각 보강상재를 갖는 연결보를 적용하게 되었다.

- (2) 세계지진기록의 유효지반가속도(EPA)값을 통해, 규모 5이상의 지진은 규모와 관계없이 진양거리가 가까울수록 EPA가 크게 나타났다. 일반적으로 중약진지역의 최대지진을 규모 6~6.5로 예상하지만, 이를 통해 지진의 규모만으로 지진의 크기를 예측하는 것은 부적절하다는 것을 알 수 있었다. 본 연구에서는 우리나라 최대지진의 시나리오를 규모 6, 진양거리 15 km로 가정하였다. 규모 6이하 진양거리 15 km의 지진기록에서 EPA 값은 지반조건과 상관없이 대부분 우리나라 최대지진의 EPA 값 이내에 존재하였다.
- (3) 세계지진기록의 스펙트럼 분석을 통해 우리나라 설계 스펙트럼이 중약진지역임에도 불구하고 중진지역의 스펙트럼과 비슷한 수준이며, 특히 현재 우리나라 설계 스펙트럼은 변위일정구간을 반영하고 있지 않고 있어 장주기 영역에서는 과다한 값을 가지는 것을 알 수 있었다. 설계 스펙트럼에서 변위일정구간을 반영한다면 일정한 스펙트럼 변위 값을 이용한 설계를 수행하여, 지진에 대한 과다설계를 줄이고 합리적인 설계로 이어질 수 있을 것으로 기대한다.
- (4) 호주는 예상지진에 기반하여 변위 설계법을 제시하였다. 중약진지진 경우 구조물의 변위가 어떤 상한선을 넘지 않을 뿐만 아니라 그 크기가 크지 않기 때문에, 이러한 상한선의 변위 이상을 견딜 수 있는 구조물은 안전한 것으로 평가한다. 이는 우리나라와 같이 중약진이면서 비내진상세를 가진 구조물이 많은 경우, 지진에 대한 과다설계를 줄이고 합리적인 설계로 이어질 수 있으므로, 추후 적극 도입하는 것이 바람직할 것으로 보인다.

/ 감사의 글 /

이 연구는 2014년 정부의 재원으로 국토교통부 도시건축 연구개발사업(13AUDP-B066083-01)의 연구비 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

/ REFERENCES /

1. AIK, Korean Building Code, KBC 2009. Architectural Institute of Korea, Seoul, Korea, c2009.
2. ICC, International Building Code, IBC 2000. International Code Council, Country Club Hills, IL, c2000.
3. Chung KR, Chung HJ, Kang MS, Kim SH, Park KM. Eliminating special seismic boundary of special shear wall system using NLTHA, Korea Concrete Institute Conference, 2013 Fall: 1-2, c2013.
4. PEER Ground Motion Database, Available from : <http://ngawest2.berkeley.edu/site>
5. Fardis MN, Comments on the seismic design provisions of the Korean Building Code 2009, Opinion paper, c2014.
6. AIK, AIK 2000, Architectural Institute of Korea, Seoul, Korea, c2001.
7. AIK, Korean Building Code, KBC 2005. Architectural Institute of Korea, Seoul, Korea, c2005.
8. AS 1170.4, Structural Design Actions Part 4: Earthquake Actions in Australia, Standards Australia, NSW, Australia, c2007.

9. Lam N, Wilson J, Chandler A, and Hutchinson G. Response spectral relationships for rock sites derived from the component attenuation model. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 2000;29(10): 1457–1489.
10. Lam N, Wilson J, Chandler A, and Hutchinson G. Response spectrum modelling for rock sites in low and moderate seismicity regions combining velocity, displacement and acceleration predictions. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 2000;29(10):1491–1525.
11. Lumantarna E, Wilson JL, Lam NTK. Bi-linear displacement response spectrum model for engineering applications in low and moderate seismicity regions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2012;43: 85–96.
12. CEN. European Standard EN 1998–1:2004 Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. Comite European de Normalisation, Brusells. c2004.
13. Federal Emergency Management Agency. NEHRP Recommendation Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other structures Part II: Commentary (FEMA 450–2), Washington, c2003.
14. Wilson JL, Lam, NT, and Griffith MC. Earthquake design of buildings in Australia using velocity and displacement principles. *Australian Journal of Structural Engineering*. 2006;6(2):103.
15. Korea Meteorological Administration, Available from : <http://www.kma.go.kr/>
16. Looi DTW, Hee MC, Tsang HH, Lam NTK. Earthquake loading model in the proposed National Annex to Eurocode 8 for peninsular Malaysia, IStructE Conference 2013, Beijing and Shanghai. c2013.