

국내외 판내부 지진기록을 이용한 한국 표준수평설계스펙트럼의 개발

Development of Korean Standard Horizontal Design Spectrum Based on the Domestic and Overseas Intra-plate Earthquake Records

김재관^{1)*} · 김정환²⁾ · 이진호³⁾ · 허태민¹⁾

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

¹⁾서울대학교 건설환경공학부, ²⁾한국원자력연구원 종합안전평가부, ³⁾부경대학교 해양공학과

¹⁾Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, ²⁾Integrated Safety Assessment Division, Korea Atomic Energy Research Institute, ³⁾Department of Ocean Engineering, Pukyong National University

/ A B S T R A C T /

The design spectrum for Korea, which is known to belong to an intra-plate region, is developed from the ground motion records of the earthquakes occurred in Korea and overseas intra-plate regions. The horizontal spectrum is defined as geometric mean spectrum, GMRot150. From the statistical analysis of the geometric mean 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. The developed design spectrum is valid for the estimation both spectral acceleration and displacement.

Key words: Korea, Design spectrum, Intra-plate earthquake, Geometric mean spectrum, Horizontal ground motion

1. 서론

탄성설계스펙트럼은 설계지진하중을 표현하는 여러 가지 방법 중에서 가장 널리 사용되는 형식이다. 최근 비탄성 거동에 기반한 설계 방법이 확산되고 있어서 가속도시간이력을 직접 사용하는 방향으로 발전하고 있지만 여전히 탄성설계스펙트럼을 포괄해야 하는 요구조건을 만족해야 한다. 따라서 비탄성 거동에 기반한 설계가 널리 사용될지라도 탄성설계스펙트럼은 지진하중을 표현하는 가장 중요한 형식으로서 그 지위를 잃지 않을 것이다.

우리나라의 설계지진하중은 우리나라에서 발생한 지진의 기록을 사용하여 구하는 것이 가장 이상적일 것이다. 그러나 우리나라는 큰 지진이 자주 발생하지 않고 지진계로 관측을 시작한 시간도 오래되지 않았다. 최근 기상청이 지진관측망을 확대 구축하는 사업을 추진하여 최근에 발생한 지진의 기록은 많아지고 있지만 강진 기록의 수는 여전히 제한적이다. 우리나라 지진학자들은 우리나라에서 예상되는 최대지진의 크기를 규모 6.8로 추정하고 있다. 강진국가에서 지진위험도 해석과 설계스펙트럼 도출에는 일반적

으로 규모 5.0 이상의 지진에 의한 기록이 사용되고 있다. 말하자면 고려하는 지진 크기의 하한이 규모 5.0인 것이다[1]. 그 이유는 규모 5.0 이하의 지진에 의해서는 유의미한 구조적 피해가 거의 발생하지 않기 때문이다[2]. 그러나 규모의 하한을 5.0으로 정하면 설계스펙트럼을 구하는 데 사용될 수 있는 우리나라에서 발생한 지진의 수는 극히 적다. 그리고 규모 5.0이하의 지진에 의해서 경미한 피해가 발생할 가능성이 있다. 그런데 USGS의 자료에 따르면 규모 4.5 이하의 지진에 의해서는 지진 피해가 거의 발생하지 않는다고 한다. 그래서 이 연구에서는 고려하는 지진의 크기의 하한을 규모 4.5로 결정하였다. 그러므로 우리나라 설계스펙트럼을 구하기 위해서는 규모가 4.5에서 7.0 정도인 우리나라에서 발생한 지진의 기록이 필요하다.

우리나라에서 기록된 최대지진은 규모 5.2로 평가되는 울진지진(2004년)이다.¹⁾ 만약 우리나라 지진기록만 사용한다면 규모 5.2에서 규모 7.0까지 범위의 지진에 대한 데이터가 결여된다. 심각한 피해는 주로 이 범위에 속하는 지진에 의해서 발생하는 것을 감안할 때 다른 대안을 사용해서 필요한 정보를 확보할 필요가 있다. 이 목적에는 세 가지 방법을 사용할 수 있을 것이다. 첫 번째는 경험적 그린함수법(Empirical Green's Function

*Corresponding author: Kim, Jae Kwan

E-mail: jkwankim@snu.ac.kr

(Received May 18, 2016; Revised July 1, 2016; Accepted July 4, 2016)

1) 본 논문의 게재가 확정된 다음인 2016년 9월 12일에 규모 5.8의 경주 지진이 발생하였다. 따라서 이 논문에서 제시한 설계스펙트럼은 경주 지진의 기록을 사용하지 않고서 얻어진 것이다.

method, EGF)으로 작은 규모의 지진 기록으로부터 큰 규모의 지진 기록을 합성할 수 있는 방법이다[3-9]. 실제 지진 기록을 그린함수로 사용하기 때문에 진원특성과 전파경로 및 부지특성까지 반영할 수 있는 장점을 가지고 있다. 두 번째 방법은 Boore 등이 제안한 추계학적 방법이다[10-14]. 세 번째는 우리나라와 지진환경이 유사한 해외 판내부지역에서 발생한 지진 기록을 활용하는 것이다.

EGF 방법은 실제 적용하였을 때 장주기 영역에서 오차가 확대되는 문제가 있다는 것을 발견하였다. 이 문제에 대해서는 별도의 논문에서 보고할 계획이다. 추계학적 방법을 적용하기 위해서는 우리나라 지진원에 대한 평균적인 특성들과 지속시간 등에 대한 정보가 필요하다. 그런데 본 연구는 비탄성설계스펙트럼과 지속시간 등을 구하는 과제의 일부로 추진되었기 때문에 실제 지진기록을 사용할 필요가 있었다. 이러한 이유로 이 연구에서는 최종적으로 국내의 판내부지진 기록을 사용하여 설계스펙트럼을 구하는 방안을 채택하였다.

한 관측점에서 수평지반운동은 직교하는 2축 방향 운동으로 표현되고 이 두 가지 운동은 같지 않다. 다르게 표현하자면 수평지반운동은 방위각에 따라서 변동한다. 그런데 수평설계스펙트럼은 한 관측점에서는 유일하게 정해져야 할 필요가 있다. 즉 한 관측점에서는 하나의 대표적인 스펙트럼이 정의되어야 한다. 이 연구에서는 2축 방향으로 각각 구해지는 두 개의 스펙트럼의 기하평균을 취해서 대표하는 스펙트럼으로 정의하는 방법을 채택하였다[15, 16]. 직교하는 좌표계도 방위각 방향으로 회전할 수 있으므로 기하평균스펙트럼도 여러 가지 방식으로 나타낼 수 있다. 여기서는 GMRot150를 채택하였는데 더 자세한 내용은 본문에서 설명하기로 한다.

개별 지진 기록의 기하평균스펙트럼을 계산한 다음 각 주기별로 스펙트럼 값의 분포를 통계 분석하고 신뢰도 수준에 따른 설계스펙트럼을 제시하

였다. 가속도설계스펙트럼과 동시에 변위설계스펙트럼도 얻어졌다. 결과를 판내부에 속하는 유럽과 호주의 설계스펙트럼과 비교하였고[17, 18], 국내 지진기록과 국외지진기록의 설계스펙트럼을 별도로 분석해서 비교하였다.

판내부 지진 기록은 구하기가 쉽지 않았다. 관측 기록 중에서 암반이나 단단한 지반에서 관측된 지진 기록의 수는 더욱 제한적이다. 그러나 한정된 개수의 기록으로 분석하였지만 통계적으로 유의한 결과가 얻어졌다. 이 결과를 우리나라 설계스펙트럼으로 채택하는 것은 관계 전문가들이 의견을 수렴해서 결정할 사안이라고 생각된다.

연구를 수행하면서 고무적인 사항과 개선되어야 할 사항들을 인지하게 되었다. 기상청이 지진관측망을 잘 구축하였기 때문에 비록 규모는 작지만 좋은 지진기록을 확보할 수 있었다. 그런데 국외 판내부 지진 기록을 구하는 문제는 앞으로 지속적으로 노력해야 할 사항이라고 생각된다. 그리고 판내부에 속하더라도 지역마다 지질과 지진 특성에 차이가 있을 수 있기 때문에 이러한 특성들에 대해서 지진학자들이 분담하여 연구할 필요가 있다고 생각된다.

2. 지진 목록과 분류

분석에는 총 18개 지진에 의해 진앙거리 200 km 이하의 관측소에 관측된 55개 지진기록이 사용되었다. 그 중에서 국내 지진 기록은 5개 지진에서 관측된 24개 기록으로 구성되어있고 국외 지진 기록은 13개 지진에서 관측된 31개 기록으로 구성되어있다. 규모 4.5 이상인 국내 지진의 개수는 더 많다. 그러나 진앙거리가 200 km 이하이고 암반에서 관측된 기록으로 제한하면 5개 지진으로 줄어든다[19].

Table 1에 국내 지진 기록을 수록하였다. 이 지진기록의 규모와 거리에

Table 1. List of domestic earthquake records [19]

Name	YEAR	M/D	HR/MN	Magnitude	EpiD(km)	Station name
Hong island Earthquake	2003	0322	2038	4.9	85.44	HUK
					164.15	MOP
					199.20	BUS
Offshore Uljin Earthquake	2004	0529	1914	5.2	199.10	CHJ
					164.44	DAG
					168.22	DGY
					7.52	DGY
					144.77	BON
					152.31	CEA
					69.37	CHC
Odaesan Earthquake	2007	0120	2056	4.8	105.43	CHJ
					104.51	CWO
					112.72	ICN
					162.69	MUS
					180.14	PHA
					149.48	SEO
					68.39	SKC
					149.31	SWO
					70.07	TBA
					56.75	WJU
Offshore Sinan Earthquake	2013	0420	2321	4.9	187.02	GBI
Seogyongnyeolbi island Earthquake	2014	0401	0448	5.1	101.48	GBI
					147.00	DEI
					116.29	BAR

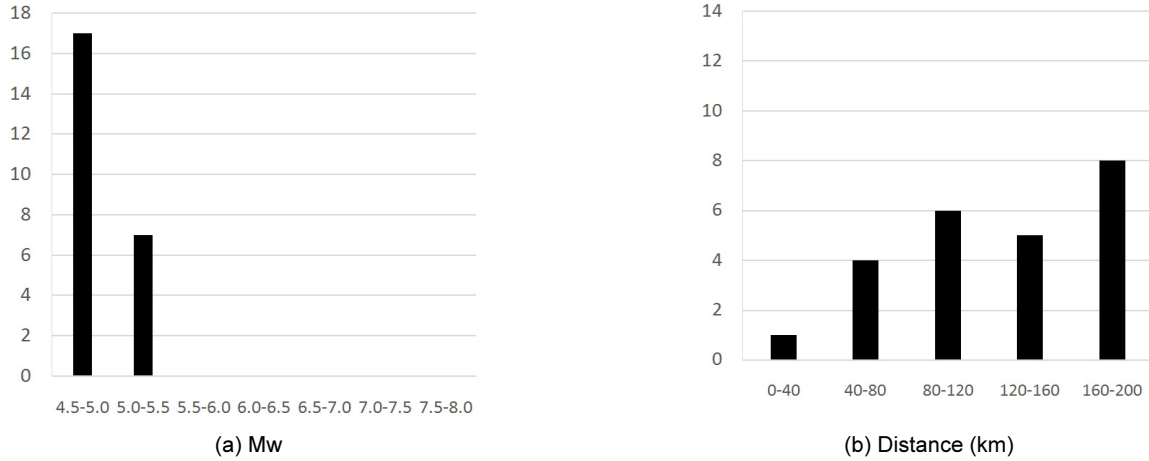


Fig. 1. Distribution of domestic earthquake records: (a) Frequency histogram w.r.t. magnitude, (b) Frequency histogram w.r.t. distance

Table 2. List of overseas intra-plate earthquake records

Location	Name	YEAR	M/D	HR/MN	Magnitude	EpiD(km)	Station name	
America	Borah Peak, ID-01	1983	1028	1406	6.88	108.10	ANL-768 Power Plant	
						94.34	PBF	
						86.15	TRA-642 ETR Reactor Bldg	
	Borah Peak, ID-02	1983	1029	2329	5.1	23.20	CEM	
						50.43	HAU	
	Nahanni, Canada	1985	1223		6.76	6.80	Site 1	
						6.52	Site 2	
						22.36	Site 3	
	Saguenay, Canada	1988			5.9	154.92	Quebec	
						37.77	Chicoutimi-Nord	
62.31						St-Andre-du-Lac-St-Jean		
Denali, Alaska	2002	1103		7.9	67.70	Carlo (temp)		
					61.85	R109 (temp)		
Mineral, Virginia	2011	0823			5.8	53.80	CVVA	
Europe	Roermond, Netherlands	1992	0413	0120	5.3	57.67	GSH	
						82.71	OLF	
						103.49	WBS	
Iran	Gazli, USSR	1976	0517		6.8	12.82	Karakyr	
	Tabas, Iran	1978	0916		7.35	20.63	Dayhook	
						55.24	Tabas	
	Manjil, Iran	1990	0620			7.37	40.43	Abbar
	Bam, Iran	2003				6.5	1.00	BAM
	Zarand, Iran	2005	0222	0225	6.4	19.66	Chatrood	
						95.85	Bardsir	
						94.24	Sirch	
53.28						Deh-Loulou		
23.62						Qadrooni Dam		
India	Koynanagar, India	1967			6.5	22.98	Shirinrood Dam	
						61.38	Davaran	
						10.80	KNI	

따른 히스토그램을 Fig. 1(a)와 Fig. 1(b)에 각각 제시하였다. 지진 기록은 모두 규모 5.0 근처에 모여 있는 것을 알 수 있다.

국외 지진 기록은 Table 2에 수록하였다. 이 지진기록의 규모와 거리에

따른 히스토그램을 Fig. 2(a)와 Fig. 2(b)에 각각 제시하였다. 국내 기록에 비해서 비교적 규모가 큰 지진에 의한 기록이 많고 규모가 넓은 범위에 펼쳐져 분포되어 있는 것을 알 수 있다.

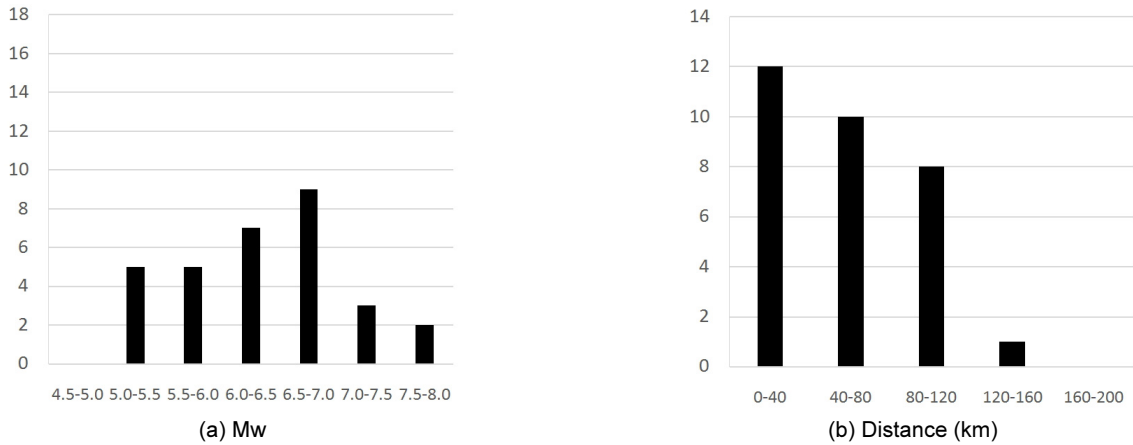


Fig. 2. Distribution of overseas intra-plate earthquake records: (a) Frequency histogram w.r.t. magnitude, (b) Frequency histogram w.r.t. distance



Fig. 3. Regional distribution of overseas intra-plate earthquake records

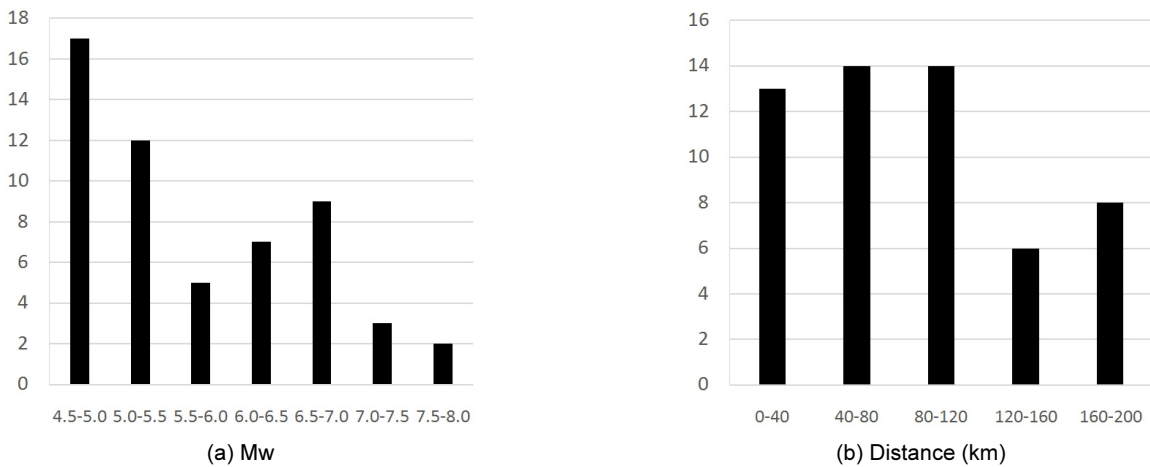


Fig. 4. Distribution of domestic and overseas intra-plate earthquake records: (a) Frequency histogram w.r.t. magnitude, (b) Frequency histogram w.r.t. distance.

국외 지진기록의 지역별 분포를 Fig. 3에 정리하였다. 지진은 대부분 북미 대륙과 유럽, 이란 그리고 인도에서 발생한 것을 알 수 있다. 아직 이 목록

으로는 세계 전체의 판내부지역을 망라하지는 못하고 있다는 것 또한 인지할 수 있다.

국내, 국외 지진 기록을 합친 기록의 규모와 거리에 따른 분포를 Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)에 히스토그램으로 나타냈다.

비록 규모 5.0 근처 기록이 상대적으로 많지만 규모 6.0 이상의 지진 기록도 상당수 포함되어 있어서 전체적으로 균형을 맞추어주고 있다. 거리에 따라서는 비교적 고른 분포를 보이고 있다.

3. 분석 방법과 절차

3.1 기하평균스펙트럼

한 관측점에서의 지진기록은 직교하는 두 축 방향으로의 2 개의 가속도 성분으로 구성된다. 이 두 축은 x, y 라고 하자. 그리고 주기 T 에서 x 축 방향 스펙트럼을 $S_x(T)$, y 축 방향 스펙트럼을 $S_y(T)$ 라고 하자. 이 두 스펙트럼의 기하평균스펙트럼 $S_{xy}(T)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$S_{xy}(T) = \sqrt{S_x(T)S_y(T)} \tag{1}$$

(x, y) 좌표계에 대해서 반 시계 방향으로 각도 θ 만큼 회전한 좌표계를 (x', y') 이라고 하자. 그러면 이 좌표계에 대해서도 기하평균스펙트럼을 정의할 수 있다.

$$S_{x'y'}(T) = \sqrt{S_{x'}(T)S_{y'}(T)} \tag{2}$$

일반적으로 $S_{xy}(T)$ 는 $S_{x'y'}(T)$ 와 다를 것이다. 우리는 각도를 일정한 증분 $\Delta\theta$ 로 증가시켜가면서 $\theta_n = n\Delta\theta$ 에 대해서 기하평균스펙트럼을 계산할 수 있다. 그러면 $S_{xy}(T)$ 의 값은 어떤 범위에 분포될 것이며 이 분포의 50%에 해당되는 값을 취해서 GMRotD50라고 부르고 있다.

GMRotD50를 채택할 경우에는 주기 T 에 따라서 기하평균스펙트럼이 계산되는 방위각 θ 가 달라지게 된다. 즉, GMRotD50에 의한 스펙트럼은 실제 계측된 시간이력의 스펙트럼을 그대로 표현하지 못한다. 따라서 기하평균의 50%ile 의미를 유지한 채로 주기에 무관하게 방위각을 결정할 필요가 있다. 이를 위해 주기에 따른 GMRotD50의 변동을 최소화 하는 방법으로 대표 방위각을 선정하여 그 방향의 기하평균스펙트럼을 구한 것을 GMRotD50이라고 부른다. 이 연구에서 채택한 스펙트럼은 바로 GMRotD50이다[15-16, 20].

통계분석을 위해서 이렇게 계산된 기하평균스펙트럼은 $T = 0.01\text{sec}$, 즉 100 Hz에서 가속도스펙트럼 값이 1.0g가 되도록 정규화하였다. 여기서 g 는 중력가속도를 의미한다. 이렇게 하여 주어진 감쇠비에 대해서 각 관측점에서 하나의 스펙트럼 곡선이 얻어진다.

3.2 통계분석 방법

앞에서 서술한 절차에 따라서 모든 관측점에서 기하평균스펙트럼을 구하면 우리는 일련의 스펙트럼 곡선을 얻게 된다. 개별 스펙트럼 곡선은 주기에 대해서 들쭉날쭉한 모양을 갖고 특정 주기에서는 일련의 스펙트럼 값이

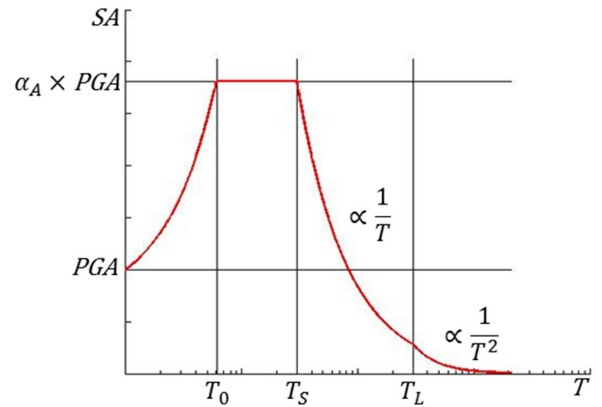


Fig. 5. The shape of a typical acceleration design spectrum

어떤 확률 분포를 갖게 된다. 이 스펙트럼은 대수정규분포를 갖는 것으로 알려져 있다[21]. 대수정규분포의 특성은 평균 mean과 분포의 폭 파라미터인 표준편차 σ 에 의해서 서술될 수 있다. 원하는 신뢰도에서 스펙트럼은 $\text{mean} + t\sigma$ 형태로 정의될 수 있다. t 는 표준편차 σ 의 배수를 의미하고 그 값은 신뢰도에 따라서 결정될 수 있다. 각 주기별로 $\text{mean} + t\sigma$ 에 해당되는 값을 연결하면 $\text{mean} + t\sigma$ 이 얻어진다. 만약 $t = 0$ 이면 초과 확률이 50%인 평균스펙트럼이 얻어지고 $t = 1$ 이면 초과 확률이 약 16%인 $\text{mean} + 1.0\sigma$ 스펙트럼이 얻어진다.

원하는 신뢰도 수준에 따라서 t 의 값을 결정하면 해당하는 스펙트럼 곡선을 얻을 수 있다. 이 곡선은 개별 지진 기록의 스펙트럼보다는 매끈하지만 설계스펙트럼으로 가공하기 위해서는 회귀분석이 필요하다. 세계 여러 나라 설계기준에서 채택하는 가속도설계스펙트럼은 대체로 Fig. 5에 예시한 조각적 연속함수의 형태로 주어진다.

Fig. 5의 설계스펙트럼은 4개의 구간으로 구분된다. 각 구간은 절점주기 혹은 전이주기인 T_0, T_S, T_L 을 경계로 구분된다. 원점은 $T = 0.01$ 초를 나타낸다. 이 주기에서 가속도스펙트럼은 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration, PGA)와 같아진다. 그런데 어떤 지진 기록에서는 가속도스펙트럼이 PGA와 같아지는 주기 T_2 가 $T = 0.01$ 초보다 더 길 수 있다. T_0 는 가속도스펙트럼이 평탄한 구간이 시작되는 주기, T_S 는 가속도에 민감한 구간과 속도에 민감한 구간의 전이주기, T_L 은 속도에 민감한 구간과 변위에 민감한 구간의 전이주기이다. 설계스펙트럼의 형상을 결정하기 위해서는 각 구간에서 곡선의 함수 형태가 미리 정해져야 한다. 수평설계스펙트럼 곡선은 원점에서 T_0 까지 구간에서는 직선으로 증가하고, T_0 에서 T_S 까지 구간에서는 수평직선, T_S 에서 T_L 까지 속도에 민감한 구간에서는 $1/T$ 에 비례하여 감소하는 곡선, T_L 이상에서는 $1/T^2$ 비례하여 감소하는 곡선의 형상을 갖는 것으로 알려져 있다. 최종적으로 가속도가 평탄한 구간에서 가속도설계스펙트럼의 최대지반가속도(PGA)에 대한 비인 증폭계수 α_A 를 알아야 한다.

증폭계수 α_A 와 전이주기 T_0, T_S, T_L 은 통계분석 결과로 얻은 $\text{mean} + t\sigma$ 가속도스펙트럼 곡선에 회귀분석을 실시해서 구할 수 있다. 그런데 장주기 영역에서 가속도스펙트럼의 값은 작아진다. 따라서 T_L 이 정확하게 식별되지 않을 우려가 있다. 그러나 변위스펙트럼에서는 장주기 영역에서 곡선의 변화가 더 분명하게 드러날 수 있다. 변위스펙트럼 SD와 가속도스펙트럼 SA의 관계는 다음과 같다.

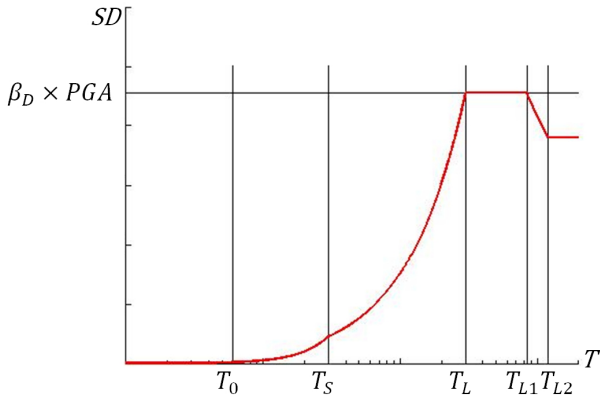


Fig. 6. The shape of a typical displacement design spectrum

$$SD(\omega) = \frac{SA(\omega)}{\omega^2} = \frac{T^2}{4\pi^2} SA(\omega) \quad (3)$$

이 식에 따르면 SD는 속도에 민감한 구간에서는 주기 T에 비례하여 직 선적으로 증가하고 변위에 민감한 구간에서는 일정한 상수이다. 변위스펙 트럼의 전형적인 형상을 Fig. 6에 예시하였다. 변위스펙트럼은 $T \geq T_L$ 구간 에서 일정한 값을 유지하다가 다시 감소하고 T가 계속 길어지면 다시 일정 한 값으로 수렴하는 경향을 보인다. 이 두 가지 전이주기를 T_{L1}, T_{L2} 로 명명 하기로 하자. 만약 변위설계스펙트럼을 별도로 제시해야 한다면 전이주기 T_{L1}, T_{L2} 도 식별되어야 할 필요가 있다. Fig. 6에서 우리는 T_L 은 변위스펙트 럼에서 더 명확하게 식별될 수 있다는 것을 볼 수 있다.

이 연구에서 T_L, T_{L1}, T_{L2} 은 변위스펙트럼에서 식별하고 T_L 이 고정된 조 건에서 가속도스펙트럼으로부터 증폭계수 α_A 와 전이주기 T_0, T_S 를 식별 하는 방안을 채택하였다. 그리고 회귀분석에서 제공근제곱합(SRSS) 오차 를 최소화하는 방법을 사용하여 목표 함수의 파라미터를 구했다. 변위스펙 트럼에서 그 값이 최대가 되는 $T_L \leq T \leq T_{L1}$ 에서의 값을 $\beta_D \times PGA$ 라고 하자. β_D 는 회귀분석에서 T_L 등과 같이 식별될 수 있고 동시에 변위설계스펙트 럼도 구할 수 있다.

4. 분석 결과

국내의 55개 지진기록의 기하평균스펙트럼을 Fig. 7(a)에 도시하였다. 그림에 mean, mean + 1.0σ 스펙트럼도 함께 도시하였다. Fig. 7(b)에는 이 두 가지 스펙트럼만 별도로 도시하였다.

회귀분석을 실시하기 전에 표본의 적정성을 검정하였다. 즉 Type 3 오 류가 발생하는지 Cross Validation 방법으로 확인하였다. 55개 지진 기록 에서 각 데이터 1개씩을 제외한 54개 데이터로 구성된 55개의 표본을 작성 하였다. 이 55개의 표본의 각각에서 mean, mean + 1.0σ를 구하고 변동 성을 조사하였고 그 결과를 Fig. 8(a),(b)에 각각 도시하였다. 이 결과들에서 표본에 따른 변동이 아주 작다는 것을 볼 수 있다. 결과적으로 55개 지진 기록으로 구성된 표본이 적정하다는 것이 검증되었다고 하겠다.

두 가지 신뢰도에 대한 스펙트럼에 회귀분석을 실시하여 설계스펙트럼 을 구하였다. 앞서 설명한 바와 같이 변위스펙트럼에서 T_L, T_{L1}, T_{L2} 를 식별

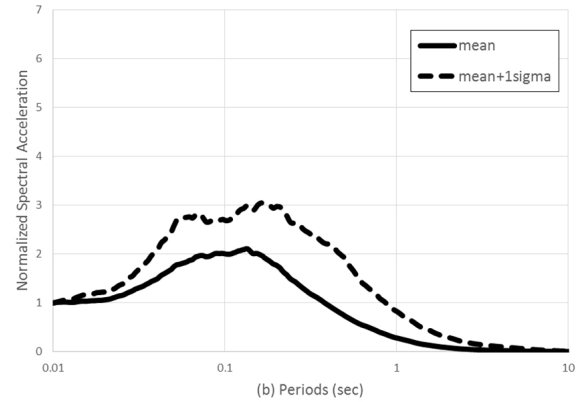
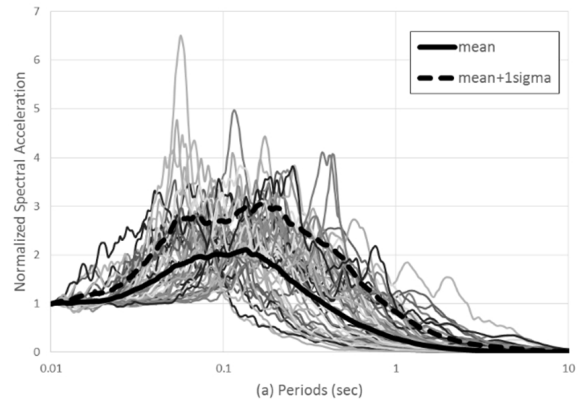


Fig. 7. Geometric mean spectra: (a) spectra for 55 records, (b) mean and mean + 1.0σ spectra

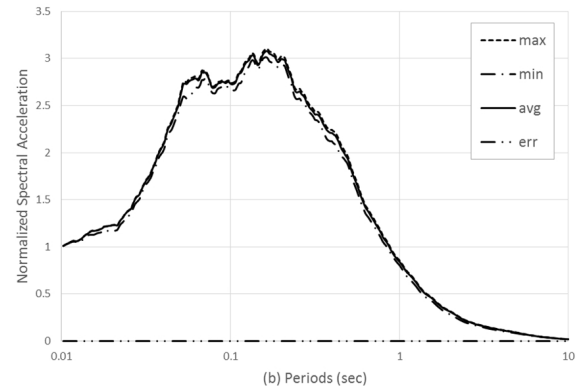
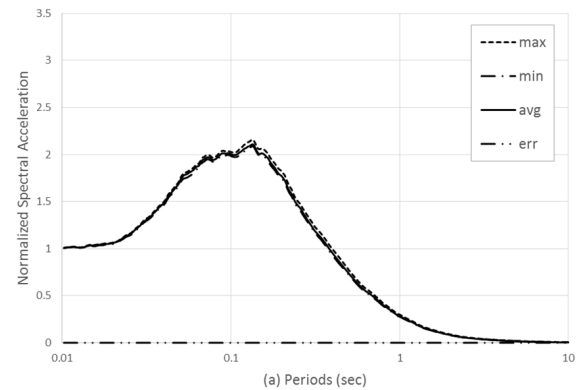


Fig. 8. Cross Validation results: (a) mean spectrum, (b) mean + 1.0σ spectrum

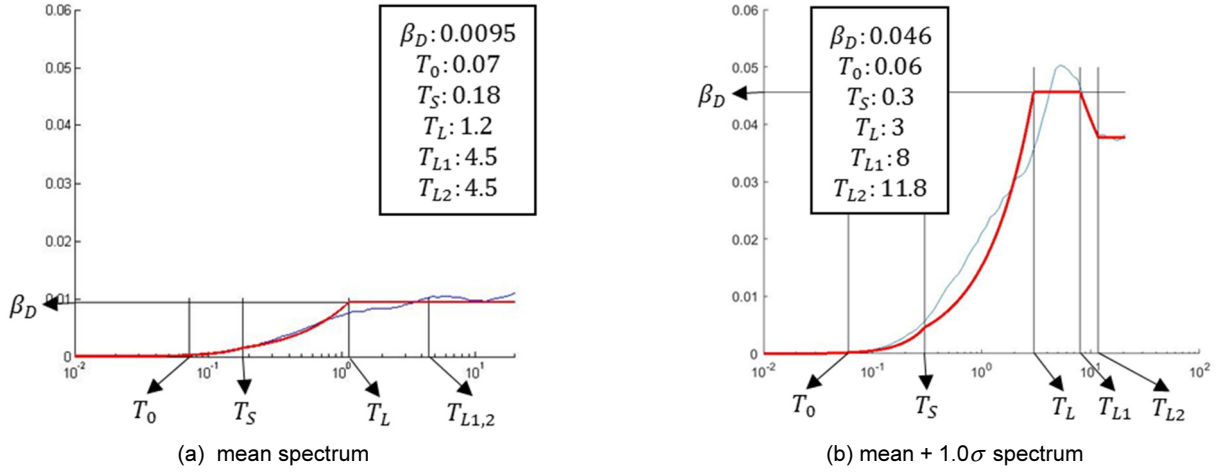


Fig. 9. Displacement spectra and their parameters: (a) mean spectrum, (b) mean + 1.0σ spectrum

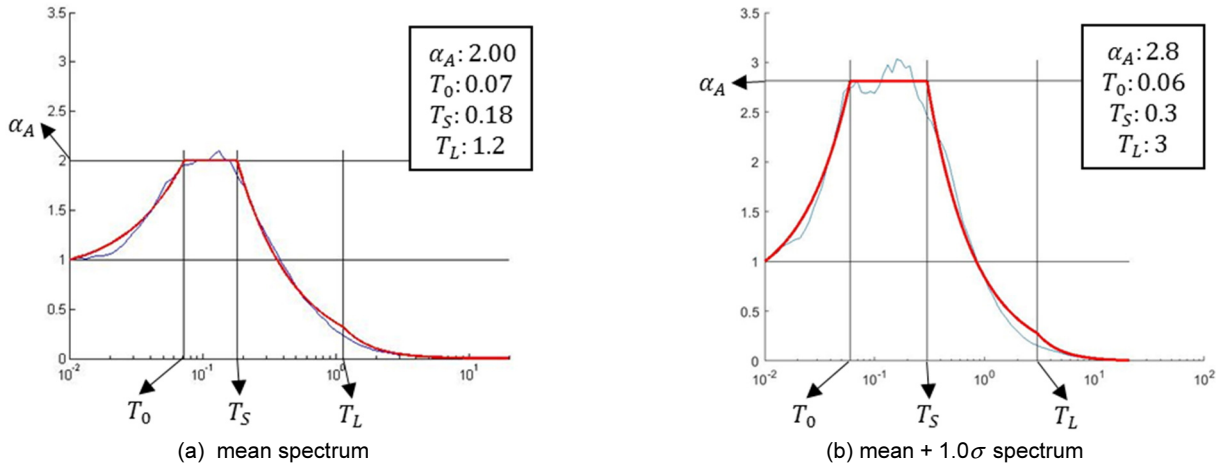


Fig. 10. Acceleration spectra and their parameters: (a) mean spectrum, (b) mean + 1.0σ spectrum

Table 3. Comparison of amplification factors

	Mean Spectrum	mean + 1.0σ spectrum
Newmark & Hall	2.12	2.71
This Study	2.00	2.8

하여 Fig. 9에 그 결과를 제시하였다.

mean 스펙트럼에서 $T_L = 1.2$ 초, $\beta_D = 0.0095s^2$, mean + 1.0σ 스펙트럼에서 $T_L = 3$ 초, $\beta_D = 0.046s^2$ 으로 식별되었다. T_L 을 고정시키고 T_L 에서의 가속도스펙트럼을 $SA(T_L) = (4\pi^2/T_L^2)SD(T_L) = (4\pi^2/T_L^2)\beta_D \times PGA$ 로 고정시킨 다음 가속도스펙트럼에서 회귀분석을 실시하였다. 그 결과로 얻어진 설계스펙트럼과 전이주기 및 증폭계수를 Fig. 10에 제시하였다.

먼저 가속도에 민감한 구간에서 증폭계수를 Newmark and Hall spectrum[22]과 Table 3에서 비교하였다.

앞서 언급하였듯이 설계기준에서는 보수적으로 mean + 1.0σ 스펙트럼을 채택하고 있다. 이 연구에서 얻은 설계스펙트럼을 판내부 지역에 속하는 유럽과 호주의 설계스펙트럼과 비교하였다. Fig. 11에는 곡선들이 비교되어 있고 Table 4에는 증폭계수와 전이주기들이 비교되어 있다.

Eurocode 8에는 설계지진의 규모에 따라서 두 가지 설계스펙트럼이 제

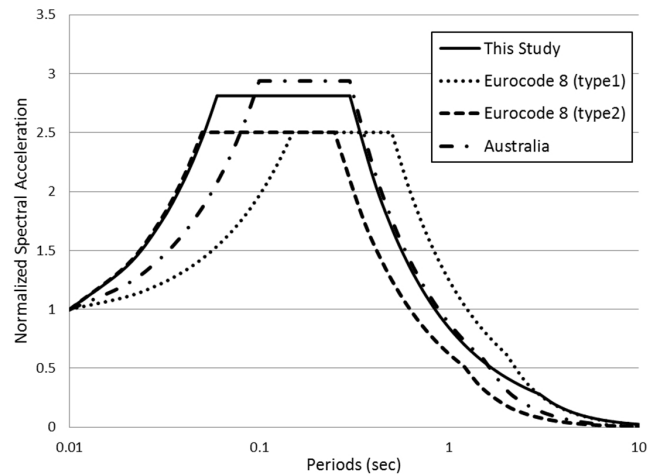


Fig. 11. Comparison of mean + 1.0σ spectrum with the design spectra for various overseas intra-plate regions

시되어 있다. 설계지진의 규모가 5.5 이상인 지진에 대해서는 Type1 설계스펙트럼이 사용되고 규모가 5.5 이하이면 Type 2 설계스펙트럼이 적용된다[17]. 이 연구에서 제시된 mean + 1.0σ 스펙트럼은 단주기 영역에서는

Table 4. Comparison of parameters of mean + 1.0σ spectrum with those of design spectra for various overseas intra-plate regions

	α_A	Transition Period (second)		
		T_0	T_S	T_L
This Study	2.8	0.06	0.3	3
Eurocode 8 (Type 1)	2.5	0.15	0.5	2
Eurocode 8 (Type 2)	2.5	0.05	0.25	1.2
Australia	2.94	0.1	0.3	1.5

Type 2, 장주기 영역에서는 Type 1 설계스펙트럼의 형상과 유사하다. 호주의 설계스펙트럼과 비교하면 단주기 영역으로 확장되었고 장주기 영역에서는 유사한 경향을 보여주고 있다. 증폭계수는 Eurocode 8의 값보다는 크고 호주의 기준에 비하면 작다.

5. 국내외 지진의 비교

연구에 사용된 지진 기록은 국내 지진 기록과 국외 지진 기록으로 구성된다. 국내, 국외 지진 기록이 최종 결과에 어떻게 기여하는지 분석하여 보았다.

3절에서 서술한 절차에 따라서 전이주기와 증폭계수를 식별하여 조각별 연속함수 형태의 설계스펙트럼을 구하였다. Fig. 12에서는 전체 기록을 사용한 설계스펙트럼과 비교하였다. Table 5에는 전이주기와 증폭계수가 비교되어 있다.

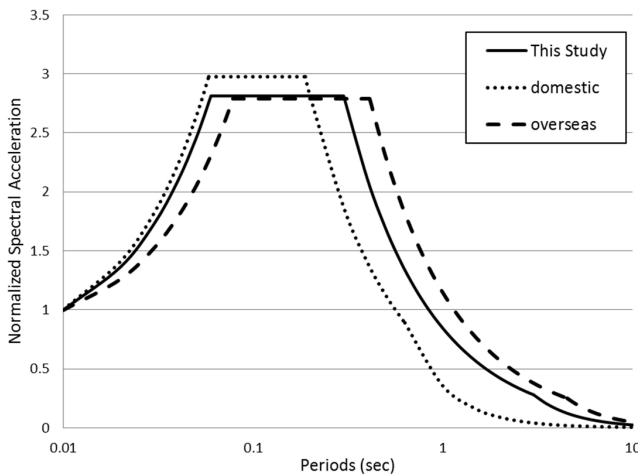


Fig. 12. Comparison of spectra between domestic and overseas earthquakes

Table 5. Comparison of spectrum parameters between domestic and overseas earthquakes

	α_A	Transition Period (second)		
		T_0	T_S	T_L
Domestic	2.97	0.06	0.19	0.6
Overseas	2.79	0.08	0.41	4.5

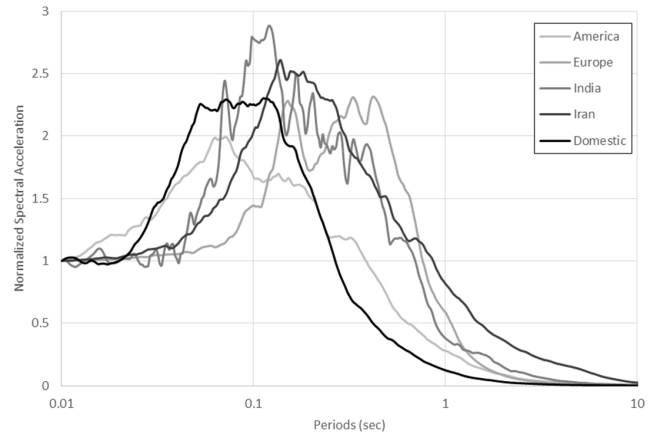


Fig. 13. Comparison of mean spectra of the records from the various overseas intra-plate and domestic regions

국내 지진의 설계스펙트럼은 단주기 영역이 잘 발달되어 있고 국외 지진의 설계스펙트럼은 장주기 영역이 잘 발달되어 있는 것을 알 수 있다. 전체 기록을 사용한 설계스펙트럼은 단주기 장주기 영역에서 고르게 발달한 형상을 갖고 있고 국내 지진 기록만 사용한 경우에 비해서 가속도에 민감한 구간은 장주기 영역으로 확대된 것을 알 수 있다. 어떻게 보면 국내 지진 기록만 사용한 경우에 비해서 보수적이라고 생각할 수 있다.

국외 지진 기록은 크게 분류하면 북미, 유럽, 이란, 인도 지역의 기록으로 구분될 수 있다. 각 지역 기록에 의한 평균스펙트럼을 회귀분석을 하지 않은 상태로 Fig. 13에서 비교하였다.

Fig. 13에서 우리나라 지진의 응답스펙트럼은 외국 판내부지진에 비해서 단주기 영역으로 치우친 것을 좀 더 명확하게 관찰할 수 있다. 그 원인 중 하나는 우리나라 지진의 응답스펙트럼은 규모 5.2 이하의 작은 지진에 의한 것이었기 때문이라고 추정할 수 있다. 또 하나의 원인은 우리나라 지진의 진원 특성이 해외 판내부 지진과는 다를 수 있다는 가능성이 있다.

Fig. 10, 11, 12에 제시된 설계스펙트럼을 구할 때는 우리나라의 지진 기록 24개 그리고 국외 지진 기록 31개가 사용되었다. 통계분석 과정에서 우리나라에서 발생한 작은 규모의 지진이 상대적으로 크게 기여하였을 가능성도 있다. 가중치의 영향을 알아보기 위해서 Fig. 13의 5개 지역 평균스펙트럼에 동일한 가중치를 부여하여 구한 mean 스펙트럼(5Group_mean)을 Fig. 7에 제시된 55개 지진 기록의 대수정규분포 mean 스펙트럼(55Data_mean)과 Fig. 14에서 비교하였다.

지역별로 동일한 가중치를 부여한 mean 스펙트럼의 증폭비는 55개 지진 기록의 대수정규분포 mean 스펙트럼의 증폭비보다 약간 작다는 것을 Fig. 14에서 확인할 수 있다. 그러나 지역별로 동일한 가중치를 부여한 mean 스펙트럼 곡선이 전체적으로 장주기 영역으로 약간 이동한 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 데이터의 통계분석 방법이 결과에 영향을 미칠 수 있다는 것을 의미한다.

그런데 전체 지진 기록의 수가 많지 않아서 지역적으로 가중치를 부여하는 방법으로는 대수정규분포 mean + 1.0σ 스펙트럼을 얻기가 어렵다. Fig. 10에 제시된 설계스펙트럼은 단주기 영역에서는 국내 지진의 영향이 주로 반영되고 장주기 영역에서는 국외 지진의 영향이 주로 반영된 결과라는 것을 Fig. 13에서 알 수 있다.

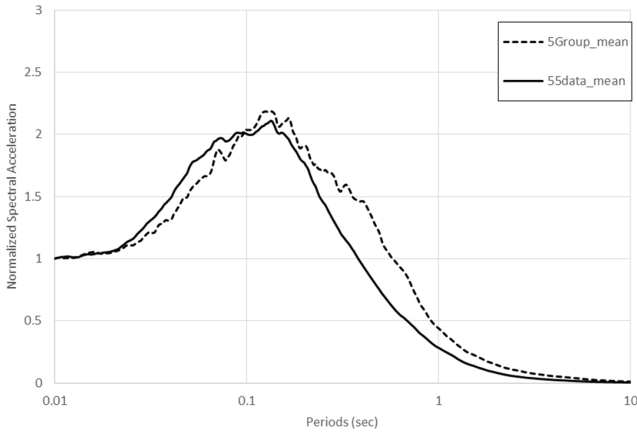


Fig. 14. Comparison of mean spectra of the regional 5 groups of Fig. 13 and Fig. 7

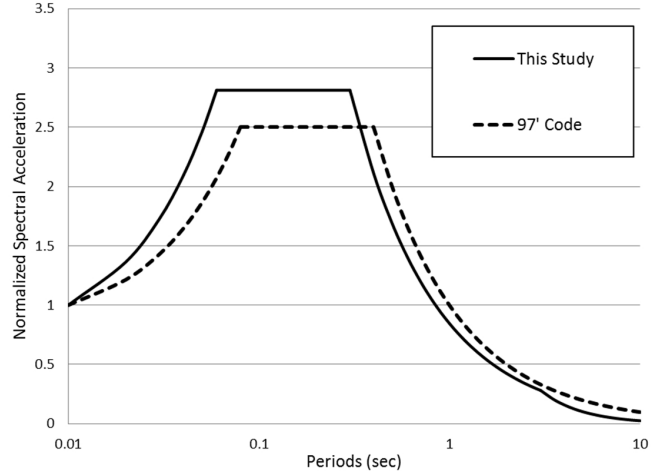


Fig. 15. Comparison of mean + 1.0σ spectrum with the design spectra for 1997 design code

6. 토 의

6.1 국내 설계스펙트럼과 비교

본 연구 결과로 제시되는 수평설계스펙트럼과 기존 우리나라 내진설계 기준Ⅱ [23]의 설계스펙트럼의 형상을 Fig. 15에 그리고 증폭계수와 전이 주기는 Table 6에 비교하였다.

본 연구에서 제시하는 스펙트럼은 내진설계기준연구Ⅱ [23]의 스펙트럼에 비하여 가속도에 민감한 구간의 전이주기가 단주기 영역으로 이동하고 증폭비가 증가했다. 즉 주기가 0.34초보다 작은 단주기 구조물의 설계지진하중은 증가할 수 있다. 그러나 주기가 0.34초보다 긴 속도와 변위에 민감한 구간에 있는 장주기 구조물의 경우에는 지진하중의 크기가 감소한다.

새로운 스펙트럼에서는 속도와 변위에 민감한 구간의 경계인 장주기 전이 주기(T_L)가 제시되었다. 장주기 구조물의 내진설계에서는 변위스펙트럼이 중요한 설계 변수가 된다. 장주기 전이주기가 명시되어 있지 않으면 설계변위의 값이 비현실적으로 크게 계산되는 불합리한 결과가 얻어진다. 본 연구의 결과로 제시된 설계스펙트럼을 채택하면 이러한 문제가 해결될 수 있다.

6.2 장주기 전이주기 T_L

장주기 전이주기 T_L 은 진원 스펙트럼에서 식별되는 모서리주기 T_C 와 근사적으로 같다고 한다. 모서리주기 T_C 와 지진 규모 M 과의 관계에 대해서 여러 공식이 존재하는데 다음 식에서 얻어지는 모서리주기 T_C 는 전이주기 T_L 과 비교적 잘 일치하는 것으로 알려져 있다[24].

$$\log T_L \cong \log T_C = -1.25 + 0.2M$$

설계지진규모가 알려져 있다면 이 공식을 이용해서 근사적으로 T_L 을 추정할 수 있다. 변위스펙트럼의 회귀분석에서 추정된 T_L 은 3초이고 식(3)로부터 역으로 계산하면 규모 5.8의 지진에 해당되는 것을 알 수 있다. 그런데 이 연구에서 구한 T_L 은 규모 4.5부터 규모 7.9까지 범위의 지진을 통계 처리하여 얻은 결과이므로 규모를 특정하는 것은 큰 의미가 없을 것이다.

Table 6. Comparison of parameters of mean + 1.0σ spectrum with those of the design spectra for 1997 design code

	α_A	Transition Period (second)		
		T_0	T_S	T_L
This Study	2.8	0.06	0.3	3
97' Code	2.5	0.08	0.4	-

앞서 Table 4에서 외국 기준에 제시된 전이주기와 비교하였다. $T_L = 3$ 초는 유럽과 호주에 비해서 값이 크다. 그러나 우리나라와 지진 특성이 비슷하다고 알려진 미국 북동부 지역의 T_L 은 FEMA P-750[25]에 6초로 주어져 있다. 이러한 여러 가지 사항들을 고려한다면 본 연구에서 얻은 전이주기 $T_L = 3$ 초는 합리적인 값이라고 추정할 수 있다.

7. 결 론

국내외 판내부 지진기록에 근거하여 수평설계스펙트럼을 구하였다. 이 스펙트럼은 기하평균스펙트럼으로 정의되었다. 규모 4.5 이상의 국내외 판내부 지진 기록 55개를 통계 분석하였다. 기록의 개수는 많지는 않지만 통계적으로 유의한 결과를 얻을 수 있었다.

가속도설계스펙트럼뿐 아니라 변위설계스펙트럼도 같이 얻어졌고 형상을 결정하는 파라미터도 회귀분석에 의해서 $\alpha_A = 2.8$, $T_0 = 0.06$ 초, $T_S = 0.3$ 초, $T_L = 3$ 초로 구해졌다. 장주기 전이주기 T_L 을 제시하여 장주기 영역에서 설계하중과 설계변위가 합리적으로 결정될 수 있는 근거를 제공하였다.

결과를 외국의 설계스펙트럼과 비교하였다. 단주기 영역에서는 Eurocode 8의 Type2 설계스펙트럼과 유사하였고 장주기 영역에서는 호주의 설계스펙트럼과 유사한 특성을 보였다.

내진설계기준연구Ⅱ [23]에 제시된 설계스펙트럼과 비교하였을 때 본 연구에서 제시한 설계스펙트럼을 적용한다면 주기가 0.34초보다 짧은 단주기 구조물의 경우에는 설계하중이 증가하고 주기가 0.34초보다 긴 장주기 구조물의 경우에는 설계하중이 감소하게 된다. 특히 전이주기 T_L 이 3초로 명확하게 제시되었기 때문에 변위에 민감한 영역에서 설계변위는 크게

감소할 것으로 예상된다.

서론에서 언급하였듯이 본 연구의 결과는 규모 4.5 이상의 국내 지진과 국외 판내부 지진 기록을 사용하여 얻었다. 여러 가지 제약 조건으로 인해서 더 많은 수의 기록을 확보하지 못하였고 지진학적 관점에서 더 자세하게 분석하지는 못했다. 실제 지진기록을 이용한 우리나라 지진해충을 구하는 본격적인 연구는 이제 시작되었다고 해도 지나치지 않을 것이다. 앞으로 후속 연구를 통해서 본 연구의 한계를 극복하고 좀 더 개선된 결과가 제시되기를 기대한다.

/ 감사의 글 /

본 연구는 정부(국민안전처)의 재원으로 재난안전기술개발사업단의 지원을 받아 수행된 ‘지진가속도 분석 등을 통한 설계지반운동 표시방법 고도화기술 개발’ [MPSS-자연-2013-71] 과제의 지원을 받아 수행한 연구입니다. 이에 감사드립니다. 특히 저자들은 연구의 주요 고비마다 해결의 실마리를 제공해준 그리스 Patras 대학교의 Apostolos S. Papageorgiou 교수에게 큰 감사를 드리고, 구하기 어려운 판내부 지진 데이터를 흔쾌히 공유한 미국 Notre Dame 대학교의 George P. Mavroedis 교수에게도 깊은 감사의 뜻을 전합니다. 그리고 좋은 의견을 제시하여 논문의 품질을 높여준 익명의 심사위원님들께 심심한 감사를 드립니다.

/ REFERENCES /

1. McGuire RK, Seismic hazard and Risk Analysis, EERI Monograph MNO-10, Oakland, California, USA: Earthquake Engineering Research Institute; c2004, 221 p.
2. Nakamura Y, Real-Time Information Systems for Hazard Mitigation, 11th World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico; 1996 Jun 23-28:Paper No. 2134, c1996.
3. Hartzell SH, Earthquake Aftershocks as Green's Functions, Geophysical Research Letters, 1978 Jan;5(1):1-4.
4. Kamae K, Irikura K, Pitarka A, A Technique for Simulating Strong Ground Motion Using Hybrid Green's Functions, Bulletin of the Seismological Society of America, 1998 Apr;88(2):357-367.
5. Mueller CS, Source Pulse Enhancement by Deconvolution of an Empirical Green's Function, Geophysical Research Letters, 1985 Jan;12(1):33-36.
6. Kanamori H, A Semi-Empirical Approach to Prediction of Long-Period Ground Motions from Great Earthquakes, Bulletin of the Seismological Society of America, 1979 Dec;69(6): 1645-1668.
7. Irikura K, Semi-empirical Estimation of Strong Ground Motions During Large Earthquakes, Bull. Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ, 1983 Jun;33-2(298):63-104.
8. Imagawa K, Mikami N, Mikumo T, Analytical and Semi-Empirical Synthesis of Near-Field Seismic Waveforms for Investigating the Rupture Mechanism of Major Earthquakes, J. Phys. Earth, 1984 Aug;32:317-38.

9. Mikumo T, Miyatake T, Numerical Modeling of Realistic Fault Rupture Processes, Chapter 3 in Seismic Strong Motion Synthetics Edited by B.A. BOLT, ACADEMIC PRESS, INC; c1987.
10. Boore DM, Stochastic Simulation of High-frequency Ground Motions Based on Seismological Models of the Radiated Spectra, Bulletin of the Seismological Society of America, 1983 Dec;73(6A): 1865-1894.
11. Boore DM, Simulation of Ground Motion Using the Stochastic Method, Pure and Applied Geophysics, 2003;160:635-676.
12. Jo ND, Baag CE, Stochastic Prediction of Strong Ground Motions in Southern Korea, Earthquake Engineering Society of Korea, 2001 Aug;5(4):17-26.
13. Jo ND, Baag CE, Estimation of Spectrum Decay Parameter κ and Stochastic Prediction of Strong Ground Motions in Southern Korea, 2003 Dec;7(6):59-70.
14. Junn JG, Jo ND, Baag CE, Stochastic prediction of ground motions in southern Korea, Geosciences Journal, 2002 Sep;6(3):203-214.
15. 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.
16. 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.
17. Comité Européen de Normalisation, Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings, Comité Européen de Normalisation;c2004.
18. Standards Association of Australia, AS1170, 4 Minimum design loads on structures:Part 4: Earthquake Loads - AS1170, 4 and Commentary; c2007.
19. KMA, Domestic Earthquake List, Available from: http://www.kma.go.kr/weather/earthquake_volcano/domesticlist.jsp
20. American Society of Civil Engineers (ASCE), Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE/SEI 7-10; 2010, Chapter 21, Site-specific Ground Motion Procedures for Seismic Design; p. 207-209.
21. Davenport WB Jr, Probability and random processes: an introduction for applied scientists and engineers, New York: McGraw-Hill; c1970, 542 P.
22. Newmark NM, Hall WJ, Earthquake Spectra and Design, EERI Monograph Series Vol. 3, Oakland, California, USA: Earthquake Engineering Research Institute; c1982, 103 p.
23. EESK, KICT, The Research of Seismic Design Code(II), Ministry of Construction and Transportation, c1997, 37 p.
24. BSSC, NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures (FEMA 450) Part 1: Provisions, Part 2: Commentary, 2003 Edition, Washington, DC, USA: Federal Emergency Management Agency; c2003.
25. BSSC, NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures (FEMA P-750), 2009 Edition, Washington, DC, USA: Federal Emergency Management Agency; c2009, 86 p.