

# 한국 표준설계스펙트럼의 감쇠보정계수에 대한 연구

## A Study on the Damping Correction Factors for the Korean Standard Design Spectrum

허태민<sup>1)</sup> · 김정환<sup>2)</sup> · 이진호<sup>3)</sup> · 김재관<sup>1)\*</sup>

Heo, Tae Min<sup>1)</sup> · Kim, Jung Han<sup>2)</sup> · Lee, Jin Ho<sup>3)</sup> · Kim, Jae Kwan<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>서울대학교 건설환경공학부, <sup>2)</sup>부산대학교 건설융합학부, <sup>3)</sup>부경대학교 해양공학과

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

### / A B S T R A C T /

In this study, we develop and propose damping correction factors for the Korean standard design spectra. The newly proposed Korean standard design spectra has been given only for 5% damping ratio. But in practice, engineers need design spectra for damping values other than 5%. To obtain design spectra for various damping values from the standard spectra, damping correction factors are derived. These factors modify the shape of design spectra in accordance with the damping ratio. Response spectra for various damping values are calculated from the earthquake records that had been used to calculate standard design spectra. They consist of 55 records from 18 earthquakes occurred in overseas intraplate regions and Korea. The regressed spectra for the damping values ranging from 0.5% to 50% are compared with standard spectra at three regions acceleration, velocity and displacement sensitive regions. The regression analysis of these data rendered formula for damping correction factors. Finally, a single formula for damping correction factors is recommended that is valid for both horizontal and vertical design spectra and that is applicable to the entire range of periods. One thing to note that recommended damping correction factors is valid for the design spectrum of the rock grounds because the design spectra was developed based on the earthquake records of the rock ground.

**Key words:** Seismic design, Korea standard design spectra, Damping ratio, Damping correction factors, Damping factor, Regression analysis

## 1. 서론

탄성응답스펙트럼은 설계지진하중을 표현하는 여러 가지 형식 중에서 가장 널리 사용되는 형식이다. 어떤 특정 지반가속도에 대한 응답스펙트럼은 감쇠비와 주기의 함수이다. 감쇠비는 구조물의 재료의 성질과 변형의 크기에 따라 달라지고 감쇠장치, 지진격리장치, 진동제어장치 등의 설치 여부에 따라 그 값이 50% 이상 큰 값을 가질 수도 있다. 반면에 액체 저장탱크의 출렁임(sloshing) 운동의 경우에는 감쇠비가 0.5%로 아주 낮아질 수도 있다. 따라서 설계스펙트럼은 넓은 폭에서 변동하는 다양한 감쇠비 값에 대해서 주어져야 할 필요가 있다.

이 문제에 대한 해결책으로 외국의 내진설계기준에서는 크게 두 가지 방

안이 사용되고 있다. 첫 번째는 대표적인 몇 개 감쇠비에 대해서 각각 설계스펙트럼을 제시하는 것으로 미국원자력위원회(USNRC) [1]가 채택한 방법이다. 두 번째는 교량과 건물과 같이 일반적인 구조물의 내진설계에서 채택하는 방안인데 5% 감쇠비에 대해서 표준설계스펙트럼을 제시하고 다른 값의 감쇠비에 대해서는 감쇠보정계수를 제공해서 설계스펙트럼의 높이를 조정하여 설계에 적용시키는 방식이다 [2-7].

우리나라에서는 1997년 내진설계기준연구(Ⅱ) [8]에서 제시된 5% 감쇠비에 대한 설계스펙트럼을 내진설계에 널리 적용하여 왔다. 그런데 다른 값의 감쇠비에 대한 보정계수가 제시되어 있지 않았다. 최근 도로교의 설계기준 [9]에서 보정계수가 제시되었는데 외국 기준에 제시된 공식을 비판적 검토 없이 그대로 차용하여 우리나라와 같은 판내부지진에도 적용가능한 지에 대한 의문을 내포하고 있다.

최근 우리나라에서 모든 시설의 내진설계에 공통적으로 적용되는 표준 설계스펙트럼이 개발되었고 이는 참고문헌 [10, 11]에 보고되었다. 이 표준 설계스펙트럼은 우리나라에서 발생한 지진의 기록과 우리나라와 지진 특

\*Corresponding author: Kim, Jae Kwan

E-mail: jkwankim@snu.ac.kr

(Received October 25, 2017; Revised November 25, 2017; Accepted December 8, 2017)

성이 비슷하다고 판단되는 해외 판내부 지역에서 발생한 지진의 암반지반 기록으로부터 구해졌다. 제안한 설계스펙트럼의 예측은 2016년 9월 12일 경주지진의 기록에서 구한 응답스펙트럼과 거의 일치하는 좋은 결과를 보여주었다. 그러나 이 설계스펙트럼은 기본적으로 5% 감쇠비에 대해서 개발되었으며 앞서 언급하였듯이 5%보다도 훨씬 넓은 범위에서 타당한 설계스펙트럼이 제시될 필요가 있다. 개별 감쇠비에 대해서 각각 설계스펙트럼을 제시하는 것도 하나의 방법이겠지만 이 연구에서는 감쇠보정계수를 제시하는 좀 더 쉽고 간편한 방법을 채택하였다.

감쇠보정계수 공식을 구하기 위해서 이 연구에서는 표준설계스펙트럼을 도출하는데 사용된 지진기록 및 분석방법과 동일한 기록과 방법을 사용하였다. 0.5%에서 50%에 걸친 감쇠비 범위에서 특정 감쇠비에 대한 기하평균스펙트럼(GMRotI50)을 계산하였고  $mean + 1\sigma$  스펙트럼을 회귀분석하였다. 이 곡선 맞춘 스펙트럼의 가속도에 민감한 구간, 속도에 민감한 구간, 변위에 민감한 구간의 좌표를 구하고 이를 5% 스펙트럼의 좌표와 비교해서 감쇠보정계수를 계산할 수 있는 데이터를 얻었다. 이 데이터로부터 여러 감쇠보정계수 공식의 후보들의 prediction error를 계산, 비교하여 적합한 공식을 정하였고 비선형회귀분석을 통해 공식의 계수를 결정하였다.

연구 결과로 도출된 감쇠보정계수는 해외 기준에 제시된 값들과 범위 내에서 합리적으로 유사했다. 그런데 이 연구에서는 넓은 범위의 감쇠비에 대해서 타당한 감쇠보정계수를 제시하였고 우리나라 지진 및 해외 판내부지진 기록으로부터 직접 구했다는 측면에서 큰 의미를 찾을 수 있을 것이다. 다만, 도출된 감쇠보정계수가 표준설계스펙트럼을 도출하는데 사용된 암반지반 기록으로부터 계산되었기 때문에 암반지반의 스펙트럼에 한하여 적용된다는 것을 유의해야 한다. 향후 이 연구에서 개발된 감쇠보정계수의 토사지반 스펙트럼에의 적용 가능성을 검토하고 토사지반 스펙트럼에 적합한 감쇠보정계수 개발에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다. 이 연구 결과는 전문가들의 의견 수렴을 거쳐서 「내진설계기준 공통적용사항」으로 제정되었고 2017년 7월 1일부로 시행되었다 [12].

## 2. 감쇠에 따른 설계스펙트럼의 형상에 관한 국내외 기준 현황

### 2.1 국내 기준 현황

우리나라 건축구조설계기준(KBC 2011)은 설계스펙트럼을 제시하고는 있으나 감쇠비에 따른 형상 변화에 관한 조항은 별도로 제시하고 있지 않다 [13]. 도로교설계기준의 경우에는 감쇠비에 따른 형상 변화에 관하여 두 가지 조항이 제시되어 있다. 하나는 지진격리교량의 내진설계에 적용되고 다른 하나는 케이블교량의 내진설계에 적용된다. 도로교설계기준(한계상태설계법)(2014) [9]에서는 지진격리교량의 경우 감쇠비에 따른 표준설계스펙트럼 형상을 보정하는 감쇠계수를 Table 1과 같이 정의하고 있다.

**Table 1.** Damping factors,  $B$  for isolated bridges [9]

	Equivalent Damping Ratio $\beta$ (%) for Isolated Bridges				
	$\leq 2$	5	10	20	30
B	0.8	1.0	1.2	1.5	1.7

여기서 증가감쇠비  $\beta(\%)$ 는 본 논문에서 사용되는  $\xi(\%)$ 와 같이 백분율 감쇠비를 의미한다. 표준설계스펙트럼의 가속도 스펙트럼 값을 계수  $B$ 로 나누어서 설계지진하중을 구한다. 그런데 Table 1의 감쇠계수는 미국 AASHTO [2]가 제시하는 계수와 같다.

케이블 교량의 경우에는 도로교설계기준(한계상태설계법)-케이블교량 편 [9]에 감쇠비가 5%가 아닌 경우 식 (1)을 사용하여 가속도 스펙트럼을 보정하도록 규정하고 있다.

$$C_D = \sqrt{\frac{10}{5 + \xi(\%)}} \geq 0.55 \tag{1}$$

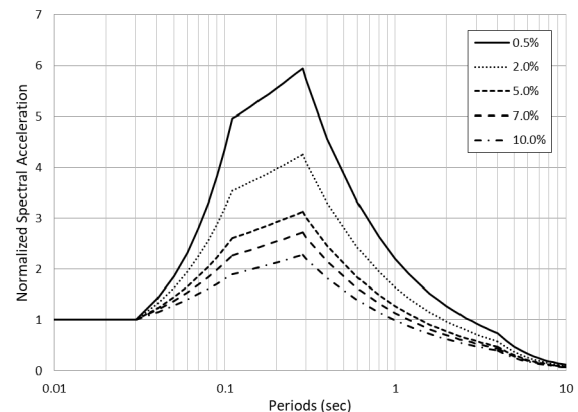
여기서  $\xi$ 는 백분율 감쇠비를 나타낸다. 식 (1)은 Eurocode 8 [6]이 제시하고 있는 형상 변화 공식과 같다.

### 2.2 국외 기준 현황

미국, 유럽 그리고 일본의 순서로 현황을 기술했다.

#### 2.2.1 미국 원자력 시설에 관한 미국원자력위원회(USNRC) 규제 기준의 관련 규정

서론에서 언급하였듯이 USNRC [1]는 대표적인 감쇠비에 대해서 수평,



**Fig. 1.** USNRC horizontal design spectra for various damping values [1]

**Table 2.** Amplification factors for control points of horizontal spectra [1]

Percent of Critical Damping	Amplification Factors for Control Points (g)			
	Transition Period (second)			
	$T_A=1/33s$	$T_0=1/9s$	$T_S=2/7s$	$T_L=4s$
0.5	1.0	4.96	5.95	0.74
2.0	1.0	3.54	4.25	0.58
5.0	1.0	2.61	3.13	0.47
7.0	1.0	2.27	2.72	0.43
10.0	1.0	1.90	2.28	0.39

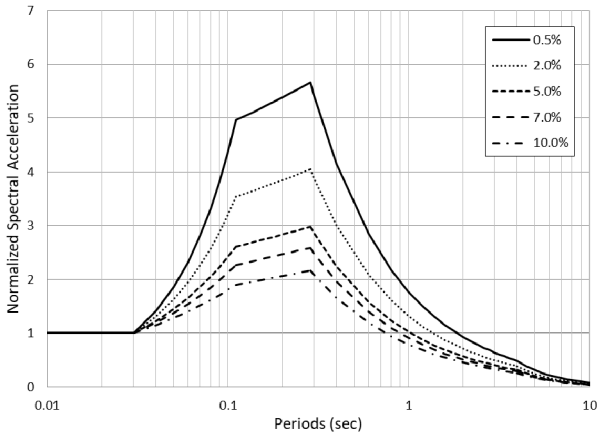


Fig. 2. USNRC vertical design spectra for various damping values [1]

Table 3. Amplification factors for control points of vertical spectra [1]

Percent of Critical Damping	Amplification Factors for Control Points (g)			
	Transition Period (second)			
	$T_A=1/33s$	$T_0=1/9s$	$T_s=2/7s$	$T_L=4s$
0.5	1.0	4.96	5.67	0.49
2.0	1.0	3.54	4.05	0.38
5.0	1.0	2.61	2.98	0.32
7.0	1.0	2.27	2.59	0.29
10.0	1.0	1.90	2.17	0.26

수직 설계스펙트럼을 별도로 제시하고 있다. Fig. 1과 Table 2에는 감쇠비에 따른 수평 스펙트럼의 형상과 통제주기에서 스펙트럼 좌표를 제시하고 있다. Fig. 1은 최대지반가속도 1.0 g에 대해서 정규화 되었다. Fig. 2와 Table 3에는 감쇠비에 따른 수직 스펙트럼의 형상과 전이주기에서 스펙트럼 값을 제시하고 있다. USNRC의 기준은 감쇠비 0.5%에 대해서도 스펙트럼을 제시하고 있고, 수직과 수평 스펙트럼을 별도로 제시하고 있다. 예시된 감쇠비 사이의 스펙트럼 값은 선형 보간 해서 구한다.

### 2.2.2 미국 AASHTO Guide Specifications for Seismic Isolation Design [2]

AASHTO Guide Specifications for Seismic Isolation Design은 감쇠비에 따른 표준설계스펙트럼 형상 기준을 감쇠계수(Damping factor)를 이용해서 정의하고 있다. 감쇠비에 따라서 변하는 설계스펙트럼의 스펙트럼 가속도를 보정하는 감쇠계수는 Table 4와 같이 설정되었다. 이 표에 주어지지 않은 감쇠비에서의 감쇠계수는 보간법을 통하여 계산하도록 되어 있으며, 2%이하의 감쇠비에서는 0.8로 고정된 값을 사용하도록 되어 있는 것이 특징이다. Isolation은 장주기 영역의 변위에 민감한 구간의 응답에 큰 영향을 받기 때문에 설계스펙트럼의 변위에 민감한 구간에서 스펙트럼 가속도 값의 감쇠비에 따른 변화에 잘 맞는 형상 기준을 제시하고 있다.

Table 4를 Table 1과 비교하여 보면 감쇠비 30%까지는 두 표의 값이 일치한다는 것을 알 수 있다.

Table 4. Damping factors,  $B$  for isolation [2]

$B$	Damping (Percentage of Critical)						
	$\leq 2$	5	10	20	30	40	50
	0.8	1.0	1.2	1.5	1.7	1.9	2.0

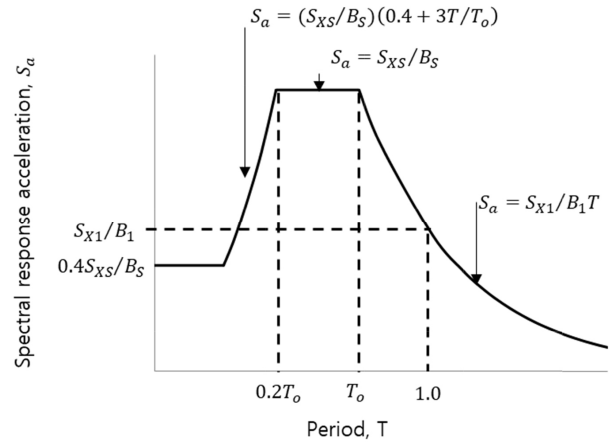


Fig. 3. General response spectrum in FEMA 273 [3]

Table 5. Damping factors,  $B_s$  and  $B_1$  in FEMA 273 [3]

	Damping (Percentage of Critical)						
	$< 2$	5	10	20	30	40	$50 <$
$B_s$	0.8	1.0	1.3	1.8	2.3	2.7	3.0
$B_1$	0.8	1.0	1.2	1.5	1.7	1.9	2.0

### 2.2.3 NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings [3]

미국 NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 273)에서는 Fig. 3과 Table 5에서와 같이 주기에 따라서 감쇠계수를 다르게 제시하고 있다. 여기서는 가속도에 민감한 구간에서 증폭계수의 축소비율을 의미하고  $B_1$ 은 속도에 민감한 구간에서 증폭계수의 축소비율을 나타낸다. 장주기 영역에서는 감쇠의 영향이 감소하는 현상을 고려하면 합리적인 규정이라고 하겠다. 그러나 실무에서는 조금 복잡할 수 있다.

### 2.2.4 Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures [4]

미국 Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures (FEMA 440)의 형상 기준에서는 식(2)와 같이 백분율 감쇠비에 대한 연속 함수 형태로 감쇠계수를 제시하고 있다.

$$B = \frac{4}{5.6 - \ln \beta_{eff} (\%)} \quad (2)$$

식(2)는 NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures (FEMA P-750) [5]와 ATC-40

[14]과 잘 일치하는 것으로 알려져 있다.

### 2.2.5 유럽 Eurocode의 형상 기준

Eurocode 8 [6]에서는 감쇠비의 영향을 나타내는 인자  $\eta$  를 다음과 같이 정의한다.

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5 + \xi(\%)}} \geq 0.55 \tag{3}$$

여기서  $\eta$ 는  $C_D$ 와 같은 감쇠보정계수로써, 식 (2)와 마찬가지로 백분율 감쇠비에 대한 함수로 감쇠의 영향을 표현한다. 이 감쇠보정계수는  $\xi = 5\%$ 에서  $\eta = 1$ 이 되도록 정규화되어 있다. 식(1)은 식(3)과 같다는 것을 알 수 있다.

### 2.2.6 일본 도로교시방서의 형상 기준

일본 도로교시방서 [7]에서는 표준설계스펙트럼의 감쇠보정계수를 다음 식으로 나타내고 있다.

$$C_D = \frac{1.5}{40h + 1} + 0.5 \tag{4}$$

여기서,  $h$ 는 감쇠비를 나타내며 백분율 단위가 아닌 단순 비율 값이다.

### 2.3 국내외 기준 현황 분석 결과

USNRC에서는 감쇠비에 따라서 수평, 수직 설계스펙트럼을 제공하고 있다. 그리고 0.5% 감쇠비에 대해서도 스펙트럼을 제공한다. 이러한 측면에서 감쇠의 영향을 가장 자세하게 반영하고 있다고 생각된다. 그러나 10%보다 큰 감쇠비에 대해서는 규정되어 있지 않다.

일반 건축물과 교량의 설계에 대해서는 대표적인 감쇠에 대해서 이산 보정계수를 제공하거나 보정계수를 감쇠비에 대한 연속적인 함수의 형태로 제시하고 있다. 그러나 수평, 수직에 대해서 구분은 하지 않고 있다. 감쇠비가 2%보다도 작은 경우에 대해서는 정보가 제공되어 있지 않다. 그러나 가속도와 속도에 민감한 구간을 구분해서 감쇠계수를 규정하고 있는 경우도 있다.

작은 값에서 큰 값의 넓은 범위에서 타당한 감쇠비에 대한 연속 함수 형태의 보정계수가 사용에 편리할 것으로 생각된다. 좀 더 가속도에 민감한 구간과 속도에 민감한 구간에 대해서 구분해서 보정계수를 정의한다면 더 엄밀할 수 있을 것이다. 그러나 실제 적용에서는 번거로울 가능성이 있다. 수평과 수직 스펙트럼을 구분해서 감쇠보정계수를 제시할 수 있으나 이 방법도 실무 적용에 불편을 초래할 가능성이 있다.

**Table 6.** List of domestic earthquake records [15]

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
Offshore Uljin Earthquake	2004	0529	1914	5.2	199.20	BUS
					199.10	CHJ
					164.44	DAG
					168.22	DGY
					7.52	DGY
Odaesan Earthquake	2007	0120	2056	4.8	144.77	BON
					152.31	CEA
					69.37	CHC
					105.43	CHJ
					104.51	CWO
					112.72	ICN
					162.69	MUS
					180.14	PHA
					149.48	SEO
					68.39	SKC
					149.31	SWO
Offshore Sinan Earthquake	2013	0420	2321	4.9	187.02	GBI
					101.48	GBI
Seogyongnyeolbi island Earthquake	2014	0401	0448	5.1	147.00	DEI
					116.29	BAR

### 3. 지진 목록과 분류

분석에는 참고문헌 [10, 11]과 같은 지진기록이 사용되었다. 국내 지진 기록은 5개 지진에서 관측된 24개 기록으로 구성되어있고 국외 지진 기록

은 13개 지진에서 관측된 31개 기록으로 구성되어있다. Table 6에 국내 지진 기록을 수록하였다.

국외 지진 기록은 Table 7에 수록하였다.

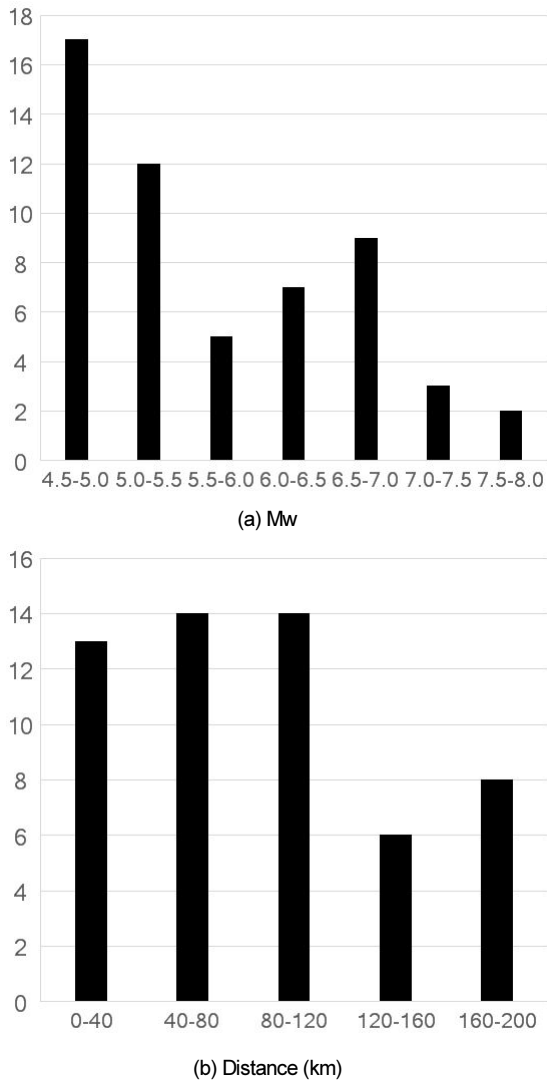
국외 지진기록의 지역별 분포를 Fig. 4에 정리하였다. 지진은 대부분 북미 대륙과 유럽, 이란 그리고 인도에서 발생한 것을 알 수 있다. 아직 이 목록

**Table 7.** 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	
						86.15	TRA-642 ETR Reactor Bldg	
	Nahanni, Canada	1985	1223			6.80	Site 1	
						22.36	Site 3	
	Saguenay, Canada	1988				154.92	Quebec	
						37.77	Chicoutimi-Nord	
						62.31	St-Andre-du-Lac-St-Jean	
						93.99	Les Eboulements	
	Denali, Alaska	2002	1103			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	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
	Zarand, Iran	2005	0222	0225	6.4	19.66	Chatrood	
						95.85	Bardsir	
						94.24	Sirch	
						53.28	Deh-Loulou	
						23.62	Qadrooni Dam	
						22.98	Shirinrood Dam	
	61.38	Davaran						
India	Koynanagar, India	1967			6.5	10.80	KNI	



**Fig. 4.** Regional distribution of overseas intra-plate earthquake records



**Fig. 5.** Distribution of domestic and overseas intra-plate earthquake records: (a) Frequency histogram w.r.t. magnitude, (b) Frequency histogram w.r.t. distance

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

국내, 국외 지진 기록을 합친 기록의 규모와 거리에 따른 분포를 Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)에 히스토그램으로 나타냈다.

비록 규모 5 근처 기록이 상대적으로 많지만 규모 6 이상의 지진 기록도 상당수 포함되어 있어서 전체적으로 균형을 맞추어주고 있다. 거리에 따라서는 비교적 고른 분포를 보이고 있다.

## 4. 분석 방법과 절차

감쇠보정계수를 수평, 수직 운동에 대해서 별도로 구하고 최종 결과를 비교하여 하나의 공식을 제시할지 여부를 결정하기로 한다. 각 성분의 운동에 대해서 먼저 감쇠비에 따른 응답스펙트럼을 계산하고 통계분석과 회귀분석 과정을 거쳐서 설계스펙트럼을 구한다. 그다음에 감쇠비에 따른 설계스펙트럼 값의 변화를 분석하여 감쇠보정계수를 구한다.

## 4.1 감쇠비에 따른 응답스펙트럼 계산

### 4.1.1 수평 응답스펙트럼

5% 감쇠비에 대한 표준수평스펙트럼의 계산 방법과 절차는 참고문헌 [10]에 상세하게 서술되어 있다. 기본적으로 5%가 아닌 다른 값의 감쇠비에 대한 스펙트럼 계산은 표준스펙트럼의 계산과정과 실질적으로 같다. 고려된 감쇠비는 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20, 30, 40, 50%로 모두 16개 이산(Discrete) 값이다.

한 관측점에서의 수평지반운동은 방위각에 따라서 변동한다. 이러한 변동을 고려하여 한 관측점을 대표하는 수평지반운동으로 기하평균스펙트럼이 사용된다. 기하평균스펙트럼은 직교하는 두 개 수평축 방향으로의 스펙트럼의 기하평균으로 정의된다. 다양한 형태의 기하평균스펙트럼 중에서 이 연구에서 채택한 것은 GMRot150 [16-18]이다. 이에 대한 설명은 참고문헌 [10]에 서술되어 있다.

각 지진기록마다 기하평균스펙트럼을 계산하고 통계분석을 위해서 이렇게 계산된 기하평균스펙트럼은  $T=0.01$  sec, 즉 100 Hz에서 가속도 스펙트럼 값이 1.0 g가 되도록 정규화하였다. 여기서 g는 중력가속도를 의미한다. 이렇게 하여 주어진 감쇠비에 대해서 각 관측점에서 하나의 스펙트럼 곡선이 얻어지고 55개 기록에 대해서 55개 곡선이 얻어진다.

### 4.1.2 수직 응답스펙트럼

5% 감쇠비에 대한 표준수직스펙트럼의 계산 방법과 절차는 참고문헌 [11]에 상세하게 서술되어 있다. 기본적으로 5%가 아닌 다른 값의 감쇠비에 대한 스펙트럼 계산은 표준스펙트럼의 계산과정과 같다. 고려된 감쇠비는 4.1.1 절과 마찬가지로 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20, 30, 40, 50%로 16개 값이다.

## 4.2 감쇠비에 따른 설계스펙트럼 계산

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 값은 어떤 확률 분포를 갖게 된다. 응답스펙트럼은 대수정규분포를 갖는 것으로 알려져 있다 [19]. 대수정규분포의 특성은 평균  $mean$ 과 분포의 폭 파라미터인 표준편차  $\sigma$ 에 의해서 서술될 수 있다. 원하는 신뢰도에서 스펙트럼은  $mean + t\sigma$  형태로 정의될 수 있다.  $t$ 는 표준편차  $\sigma$ 의 배수를 의미하고 그 값은 신뢰도에 따라서 결정될 수 있다. 각 주기별로  $mean + t\sigma$ 에 해당하는 값을 연결하면  $mean + t\sigma$ 이 얻어진다. 만약  $t = 0$ 이면 초과 확률이 50%인 평균스펙트럼이 얻어지고  $t = 1$ 이면 초과 확률이 약 16%인  $mean + 1.0\sigma$  스펙트럼이 얻어진다. 이 연구에서는  $mean + 1.0\sigma$  스펙트럼만 대상으로 하였다.

원하는 신뢰도 수준에 따라서 의 값을 결정하면 해당하는 스펙트럼 곡선을 얻을 수 있다. 이 곡선은 개별 지진 기록의 스펙트럼보다는 부드럽지만 설계스펙트럼으로 가공하기 위해서는 회귀분석이 필요하다. 세계 여러 나라 설계기준에서 채택하는 설계가속도스펙트럼은 대체로 Fig. 6에 예시한



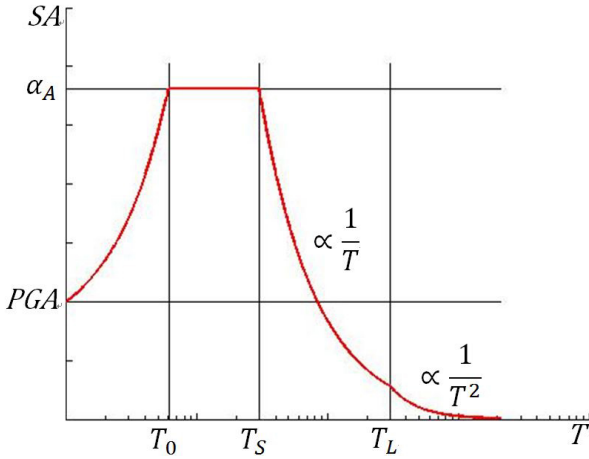


Fig. 6. The shape of a typical acceleration design spectrum

조각적 연속함수의 형태로 주어진다.

Fig. 6의 설계스펙트럼은 4개의 구간으로 구분된다. 각 구간의 절점주기 혹은 전이주기인  $T_0$ ,  $T_S$ ,  $T_L$ 을 경계로 구분된다. 원점은  $T=0.01$ 초를 나타낸다. 이 주기에서 가속도 스펙트럼은 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration, PGA)와 같아진다. 그런데 어떤 지진 기록에서는 가속도 스펙트럼이 PGA와 같아지는 주기(영주기, Zero Period)  $T_z$ 가 0.01초보다 더 길 수 있다.  $T_0$ 는 가속도 스펙트럼이 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  $1/T^2$ 에 비례하여 감소하는 곡선의 형상을 갖는 것으로 알려져 있다. 최종적으로 가속도가 평탄한 구간에서 가속도 스펙트럼의 최대지반가속도(PGA)에 대한 비인 증폭계수  $\alpha_A$ 를 알아야 한다.

증폭계수  $\alpha_A$ 와 전이주기  $T_0$ ,  $T_S$ ,  $T_L$ 은 통계분석 결과로 얻은 가속도  $mean + 1.0\sigma$  스펙트럼 곡선에 회귀분석을 실시해서 구할 수 있다. 그런데 장주기 영역에서 가속도 스펙트럼의 값은 작아진다. 따라서  $T_L$ 이 정확하게 식별되지 않을 우려가 있다. 그러나 변위 스펙트럼에서는 장주기 영역에서 곡선의 변화가 더 분명하게 드러날 수 있다. 변위 스펙트럼  $SD$ 와 가속도 스펙트럼  $SA$ 의 관계는 다음과 같다.

$$SD(\omega) = \frac{SA(\omega)}{\omega^2} = \frac{T^2}{4\pi^2} SA(\omega) \quad (5)$$

이 식에 따르면  $SD$ 는 속도에 민감한 구간에서는 주기  $T$ 에 비례하여 직선적으로 증가하고 변위에 민감한 구간에서는 일정한 상수이다. 변위 스펙트럼의 전형적인 형상을 Fig. 7에 예시하였다. 변위 스펙트럼은  $T \geq T_L$  구간에서 일정한 값을 유지하다가 다시 감소하고  $T$ 가 계속 길어지면 다시 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보인다. 이 두 가지 전이주기를  $T_{L1}$ ,  $T_{L2}$ 로 명명하기로 하자. 만약 설계변위스펙트럼을 별도로 제시해야 한다면 전이주

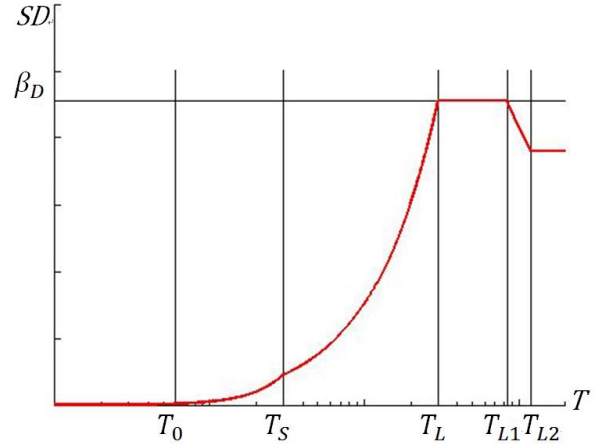


Fig. 7. The shape of a typical displacement design spectrum

기  $T_{L1}$ ,  $T_{L2}$ 도 식별되어야 할 필요가 있다. Fig. 7에서 우리는  $T_L$ 은 변위 스펙트럼에서 더 명확하게 식별될 수 있다는 것을 볼 수 있다.

이 연구에서  $T_L$ ,  $T_{L1}$ ,  $T_{L2}$ 은 변위 스펙트럼에서 식별하고  $T_L$ 이 고정된 조건에서 가속도 스펙트럼으로부터 증폭계수  $\alpha_A$ 와 전이주기  $T_0$ ,  $T_S$ 를 식별하는 방안을 채택하였다. 그리고 회귀분석에서 제곱근제곱합(SRSS) 오차를 최소화하는 방법을 사용하여 목표 함수의 파라미터를 구했다. 변위 스펙트럼에서 그 값이 최대가 되는  $T_L \leq T \leq T_{L1}$ 에서의 값을  $\beta_D$ 라고 하자.  $\beta_D$ 는 회귀분석에서  $T_L$  등과 같이 식별될 수 있고 동시에 설계변위스펙트럼도 구할 수 있다.

### 4.3 감쇠보정계수 공식 도출

통계분석을 통해서 수평운동과 수직운동에 대해서 각각 감쇠비에 따른 일련의 설계가속도스펙트럼이 얻어진다. 16개 감쇠비에 대해서 16개 곡선이 대응한다. 앞서 언급하였듯이 이 곡선들은  $PGA = 1.0g$ 가 되도록 정규화되었으며 각 곡선은 가속도, 속도, 변위에 민감한 구간으로 구분된다. 감쇠비가 변하면 각 구간의 스펙트럼도 변한다. 각 구간에서의 감쇠비에 따른 스펙트럼 좌표 높이의 변화를 알면 감쇠비에 따른 설계스펙트럼을 구할 수 있다. 설계스펙트럼의 구축 방법에 따라서 3개 구간,  $T_0 \leq T \leq T_S$ ,  $T_S \leq T \leq T_L$ ,  $T \geq T_L$ 에서 각 구간에서 1개 값의 주기에 대한 스펙트럼 값만 있으면 충분하다. 이 연구에서 가속도에 민감한 구간인  $T_0 \leq T \leq T_S$ ,  $T = 1.0$ 초 속도에 민감한 구간인  $T \geq T_L$ 에서는  $T = 4.0$ 초, 변위에 민감한 구간인  $T_S \leq T \leq T_L$ 에서는 스펙트럼 값의 변화를 조사하였다. 각 구간별로 감쇠비에 따른 스펙트럼 값을 5% 감쇠비에 대한 값으로 나누어서 정규화하였다.

이런 과정을 거쳐서 우리는 감쇠비에 따른 스펙트럼 값의 비를 구할 수 있고 16개 감쇠비에 대해서 구간마다 16개 데이터 짝을 얻게 된다. 이 데이터를 2차원 좌표 평면에 도시할 수 있고, 또 회귀분석을 실시해서 감쇠보정계수 공식을 도출할 수 있다. 감쇠보정계수 공식은 각 구간마다 별도로 제시할 수도 있고, 주기의 전 구간에서 유효한 하나의 함수로 제시할 수도 있다.

특정 감쇠비에 대한 감쇠보정계수 공식이 제시되면 그 값을 표준설계스펙트럼을 곱하여 그 감쇠비에 대한 설계스펙트럼을 얻을 수 있다.

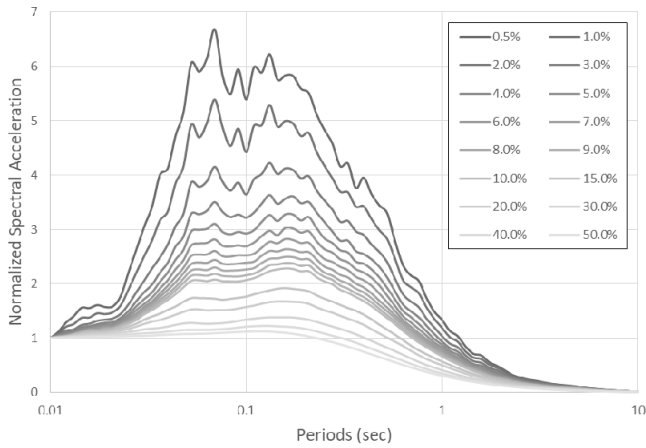


Fig. 8.  $mean + 1\sigma$  Horizontal acceleration spectra for 16 damping ratios

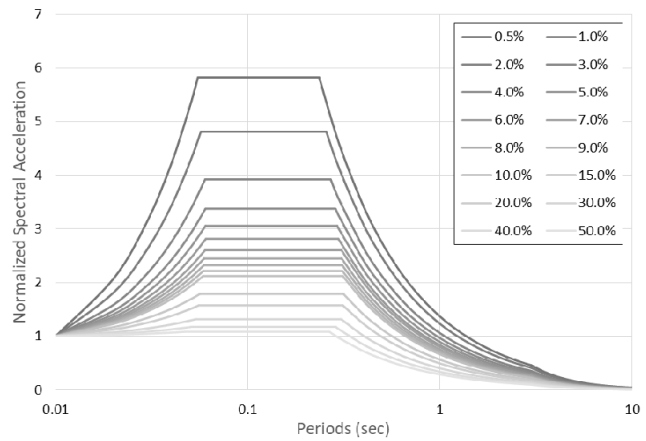


Fig. 9. Regression analysis of horizontal spectra for 16 damping ratios

Table 8. Parameters of horizontal spectra for 16 damping ratios

Damping Ratio (%)	$\alpha_A$	Transition Period (second)		
		$T_0$	$T_s$	$T_L$
0.5	5.82	0.055	0.24	3
1	4.81	0.057	0.26	3
2	3.92	0.060	0.27	3
3	3.37	0.060	0.29	3
4	3.06	0.060	0.29	3
5	2.81	0.061	0.30	3
6	2.60	0.060	0.31	3
7	2.45	0.059	0.31	3
8	2.32	0.059	0.31	3
9	2.22	0.059	0.31	3
10	2.12	0.059	0.31	3
15	1.79	0.056	0.32	3
20	1.57	0.056	0.31	3
30	1.31	0.053	0.31	3
40	1.17	0.051	0.29	3
50	1.08	0.047	0.27	3

## 5. 수평스펙트럼 감쇠보정계수

앞서 서술한 분석 방법과 절차에 따라서 수평설계스펙트럼과 수직설계스펙트럼에 대한 감쇠보정계수를 구하였다.

### 5.1 수평스펙트럼 감쇠보정계수

감쇠비 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20, 30, 40, 50%에 대한  $mean + 1\sigma$  스펙트럼을 Fig. 8에 제시하였다.

Fig. 8에 제시된 스펙트럼의 각각에 대해서 4.2절에 서술한 방법과 절차에 따라서 회귀분석을 실시하여 감쇠비에 따른 스펙트럼과 전이주기를 구하여 Fig. 9와 Table 8에 제시하였다. 장주기 전이주기는  $T_L = 3$ 초로 고정하였다.

Fig. 9에서 우리는 감쇠비가 증가함에 따라서 스펙트럼의 높이가 감소하는 것을 볼 수 있다. 그 감소율은 감쇠비가 작을 때는 크고 감쇠비가 클 때는 작아지는 것을 또한 알 수 있다. Fig. 9와 Table 8에서 또 하나 특기할 현상은 가속도가 평탄한 구간  $T_0 \leq T \leq T_s$ 는 감쇠비에 따라 달라진다는 것이다. 이 현상은 중요한 시사점을 던져준다. 만약 우리가 5% 감쇠비에 대응하는 스펙트럼을 표준으로 선정하고 전이주기를 고정시킨 다음 감쇠보정계수를 사용해서 스펙트럼의 크기와 형상을 조정한다면 그 결과 얻어지는 설계스펙트럼은 Fig. 9에 주어진 실제 스펙트럼과는 다를 수 있다는 것이다.

이러한 측면까지 고려한다면 USNRC [1]의 설계스펙트럼 제시 방식이 가장 합리적이라는 것을 알 수 있다. 그러나 이러한 방식을 일반 건물과 교량에도 엄격하게 적용하는 것은 더 생각할 필요가 있다.

앞서 서술한 바와 같이 Fig. 9로부터  $T = 0.2$ 초,  $T = 0.1$ 초,  $T = 0.4$ 초에서 각 감쇠비에 대응하는 스펙트럼의 값을 읽어서 5% 감쇠비에 대한 값으로 나누는 값을 Table 9에 제시하였다. 이 표에서 우리는  $T = 0.1$ 초와  $T = 0.4$

Table 9. Horizontal spectrum ratio at various periods and damping ratio

Damping ratio (%)	Spectrum ratio for various periods		
	0.2s	1s	4s
0.5	2.07	1.64	1.64
1	1.71	1.48	1.48
2	1.39	1.27	1.27
3	1.20	1.16	1.16
4	1.09	1.07	1.07
5	1.00	1.00	1.00
6	0.925	0.959	0.959
7	0.870	0.904	0.904
8	0.825	0.863	0.863
9	0.788	0.825	0.825
10	0.754	0.794	0.794
15	0.636	0.674	0.674
20	0.559	0.590	0.590
30	0.467	0.484	0.484
40	0.417	0.404	0.404
50	0.385	0.346	0.346



초의 스펙트럼 비가 같다는 것을 알 수 있다. 이것은 감쇠비별 스펙트럼 형상을 결정할 때 장주기 전이주기를  $T_L = 3$ 초로 고정하였기 때문이다. 장주기 전이주기는 진원 스펙트럼에서 식별되는 모서리 주기  $T_C$ 와 근사적으로 같다고 한다 [10]. 따라서 구조물의 감쇠비에 대해서는 독립이므로 표준설계스펙트럼과 같은 값으로 고정하였다.

이 결과로부터 우리는 2.2.3절 NEHRP의 Table 5와 같이  $T \leq T_s$ 인 단주기 영역과  $T \geq T_s$ 인 장주기 영역의 두 영역에서만 감쇠보정계수를 구하면 된다는 것을 알 수 있다. Fig. 10에는 이 감쇠보정계수를 좌표 평면에 도시하였다.

감쇠보정계수 공식을 구하기 위해서 Table 9과 Fig. 10에 나타난 감쇠보정계수에 회귀분석을 실시하였다. 단주기 영역과 장주기 영역, 그리고 통합된 영역의 3 가지 경우에 대한 회귀함수를 구하였다.

먼저 회귀함수 후보로 다음 3 가지 함수 형식을 고려하였다.

$$C_D(\xi) = \left( \frac{a}{b + \xi} \right)^c \quad (6.1)$$

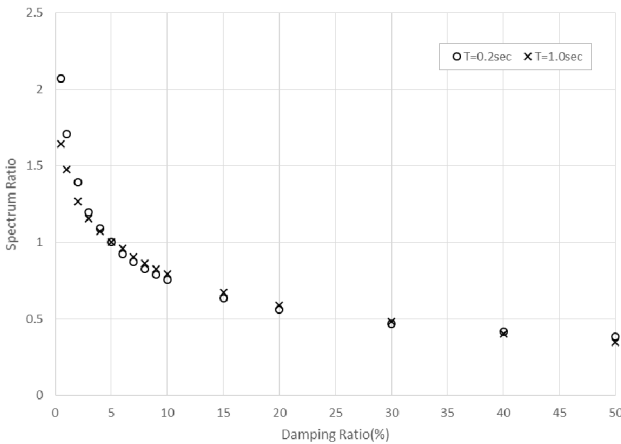


Fig. 10. Plots of damping ratio and spectrum ratio data pairs: for short period,  $T = 0.2s$  and for long period,  $T = 1.0s$

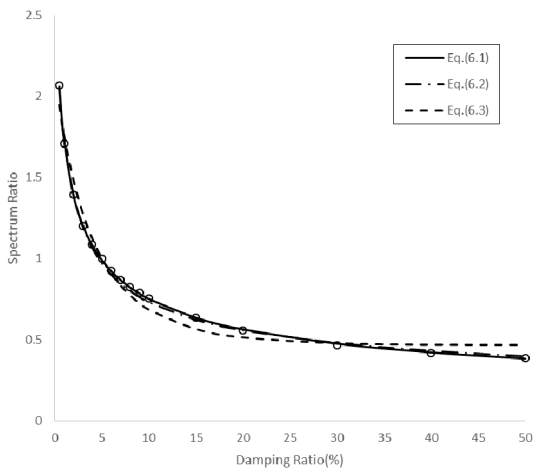


Fig. 11. Least square fit functions for the data in the short period range

$$C_D(\xi) = \left( \frac{a_1}{b_1 + \xi} \right)^{c_1} + \left( \frac{a_2}{b_2 + \xi} \right)^{c_2} \quad (6.2)$$

$$C_D(\xi) = \exp[a + \exp(b + c \times \xi)] \quad (6.3)$$

여기서  $\xi$ 는 백분율 감쇠비이고  $a, b, c, a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$ 는 회귀분석을 통해서 구해지는 상수이다. 예시적으로 단주기 영역, 즉  $T = 0.2$ 초에 대해서 이 상수들을 최소제곱맞춤법에 의해서 구하였고 그 결과는 Fig. 11에 도시하였다.

3가지 형태의 회귀함수 후보 중에서 가장 우수한 함수를 결정하기 위해서 Prediction error를 계산하였다. 그 값들은 함수 (6.1), (6.2), (6.2)에 대해서 각각 0.215, 0.32, 1.0로 얻어졌다. 이 결과에 근거하여 식 (6.1) 형태의 함수를 목표회귀함수로 결정하였다.

Table 9, Fig. 10의 데이터와 식 (6.1)을 사용하여 단주기 영역과 장주기 영역, 그리고 통합된 영역의 3 가지 경우에 대한 회귀함수를 구하면 다음과 같다.

$$C_D(\xi) = \left( \frac{5.5}{0.5 + \xi} \right)^{0.43}, \text{ for } T = 0.2 \text{ sec} \quad (7.1)$$

$$C_D(\xi) = \left( \frac{8.45}{3.45 + \xi} \right)^{0.56}, \text{ for } T = 1.0 \text{ sec} \quad (7.2)$$

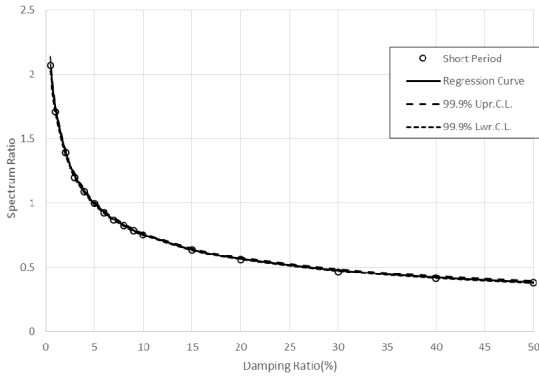
$$C_D(\xi) = \left( \frac{6.42}{1.42 + \xi} \right)^{0.48}, \text{ for entire range of } T \quad (7.3)$$

위 식을 좌표평면에서 그래프로 각각 나타내면 Fig. 12와 같다.

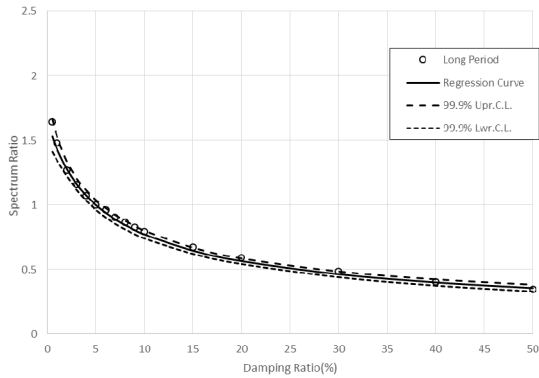
위 Fig. 12에는 bootstrap으로 계산한 회귀곡선의 99.9% 신뢰띠 (Confident Band)가 함께 나타나있다. 일반적으로 95% 또는 99% 신뢰띠를 사용하지만, 그 구간이 식별이 어려운 정도로 짧아 99.9% 신뢰띠를 나타내었다. 그만큼 비선형회귀분석의 결과가 데이터를 잘 설명한다는 것을 알 수 있다.

단주기 영역 감쇠보정계수 공식은 장주기 영역 공식에 비해서 감쇠비에 따라, 특히, 감쇠비가 작을 경우 더 가파르게 변동하는 것을 보여준다. Fig. 12(c)를 보면 통합된 영역에서 계산된 감쇠보정계수 공식이 단주기 영역과 장주기 영역 감쇠보정계수를 모두 잘 설명하는 것을 알 수 있다. 따라서 통합된 영역의 감쇠보정계수를 통일안으로써 사용할 수 있을 것이다. 그러나 5%보다 작은 감쇠비에서는 단주기 영역과 장주기 영역의 감쇠보정계수의 차이가 유의미하여 원자력발전소와 같이 각 영역에서의 감쇠보정계수를 정확하게 책정해야 하는 경우에는 Fig. 12(a), (b)를 참고하는 것이 좋을 것이다.

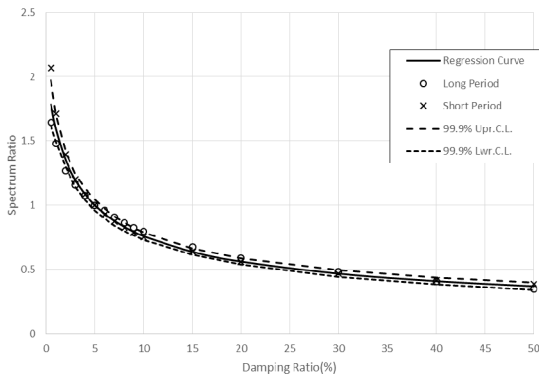
위 분석에서 구한 세 가지 감쇠보정계수를 외국 기준에서의 감쇠보정계수와 비교하였다. Fig. 13(a)에서는 단주기 영역 감쇠보정계수 공식을 Fig. 13(b)에서는 장주기 영역 감쇠보정계수 공식을 USNRC 수평설계스펙트럼 기준, 미국 FEMA 273의 감쇠보정계수와 각각 비교하였다. Fig. 13(c)에서는 전체 주기 영역에 대한 감쇠보정계수 공식을 AASHTO, FEMA 440, Eurocode 8, 일본도로교 시방서의 계수와 비교하였다. 감쇠비가 2%



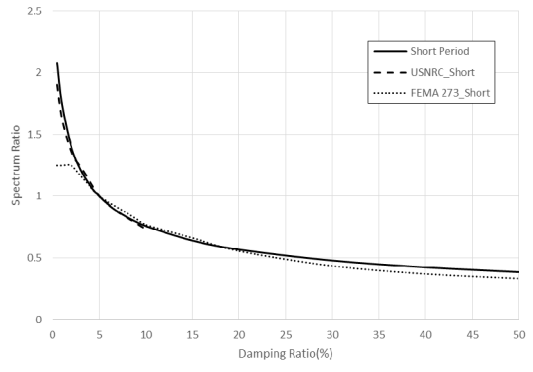
(a)



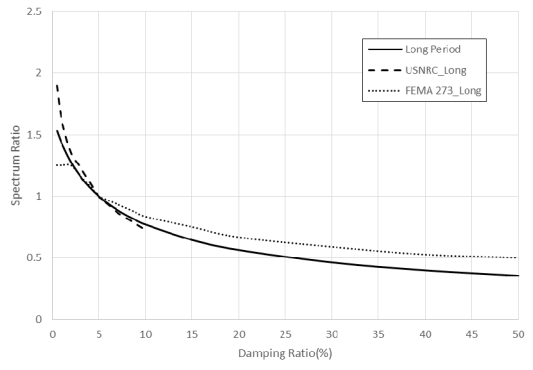
(b)



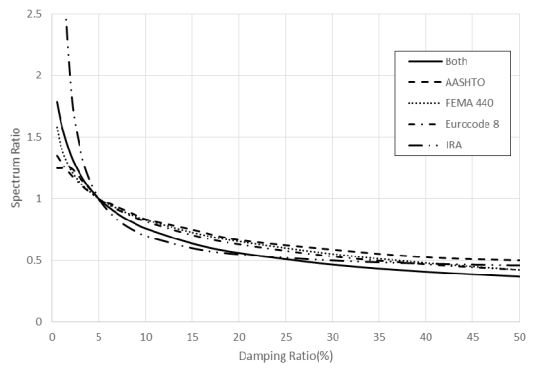
(c)



(a)



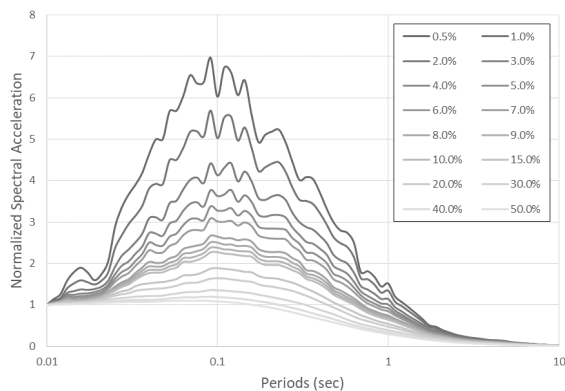
(b)



(c)

**Fig. 12.** Regressions curves for three period ranges: (a) for short period,  $T=0.2s$ , (b) for long period,  $T=1.0s$ , (c) for both short and long periods

**Fig. 13.** Comparison of damping correction factors with those of other design codes: (a) for short period,  $T=0.2s$ , (b) for long period,  $T=1.0s$ , (c) for both short and long periods



**Fig. 14.**  $mean + 1\sigma$  Vertical acceleration spectra for 16 damping ratios

보다 작은 경우에도 제안한 감쇠보정계수는 미국 NRC 기준과 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 그러나 AASHTO, Eurocode 8, 일본도로교 시방서는 감쇠비가 작을 경우 잘 맞지 않는 것을 관찰할 수 있다.

### 5.2 수직스펙트럼 감쇠보정계수

감쇠비 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20, 30, 40, 50%에 대한  $mean + 1\sigma$  스펙트럼을 Fig. 14에 제시하였다

Fig. 14에 제시된 스펙트럼의 각각에 대해서 4.2절에 서술한 방법과 절차에 따라서 회귀분석을 실시하여 감쇠비에 따른 스펙트럼과 전이주기를 구하여 Fig. 15과 Table 10에 제시하였다. 장주기 전이주기는  $T_L = 3$ 초로

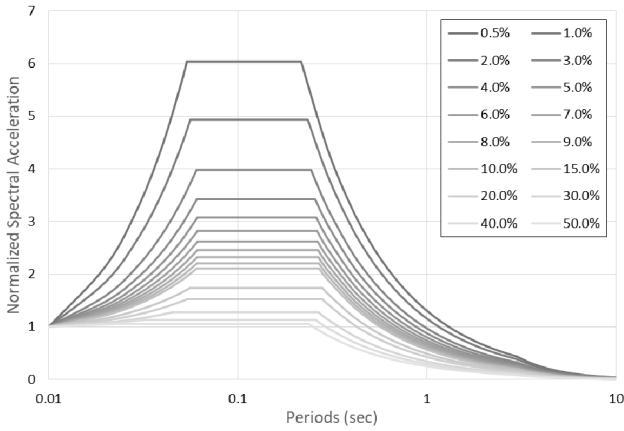


Fig. 15. Regression analysis of vertical spectra for 16 damping ratios

Table 10. Parameters of vertical spectra for 16 damping ratios

Damping Ratio (%)	$\alpha_A$	Transition Period (second)		
		$T_0$	$T_S$	$T_L$
0.5	6.04	0.054	0.22	3
1	4.93	0.056	0.23	3
2	3.98	0.060	0.24	3
3	3.42	0.061	0.26	3
4	3.07	0.061	0.26	3
5	2.82	0.061	0.26	3
6	2.62	0.061	0.26	3
7	2.46	0.061	0.27	3
8	2.32	0.061	0.27	3
9	2.21	0.061	0.27	3
10	2.11	0.061	0.27	3
15	1.73	0.056	0.28	3
20	1.52	0.054	0.28	3
30	1.27	0.045	0.27	3
40	1.13	0.032	0.26	3
50	1.05	0.022	0.24	3

고정하였다.

Fig. 15도 Fig. 9와 마찬가지로 감쇠비가 증가함에 따라서 스펙트럼의 값이 감소하는 것을 볼 수 있다. 또 가속도가 평탄한 구간  $T_0 \leq T \leq T_S$ 이 감쇠비에 따라 달라진다는 것도 확인된다. 수평스펙트럼에서도 관찰된 이 현상은 만약 우리가 5% 감쇠비에 대응하는 스펙트럼을 표준으로 선정하고 전이주기를 고정시킨 다음 감쇠보정계수를 사용해서 스펙트럼의 크기와 형상을 조정한다면 그 결과 얻어지는 설계스펙트럼은 Fig. 15에 주어진 실제 스펙트럼과는 다를 수 있다는 중요한 시사점을 똑같이 던져준다.

앞서 서술한 바와 같이 Fig. 15로부터  $T=0.2$ 초,  $T=1.0$ 초에서 각 감쇠비에 대응하는 스펙트럼의 값을 읽어서 5% 감쇠비에 대한 값으로 나눈 값을 Table 11에 제시하였다. 수평스펙트럼에서와 같이 장주기 전이주기를 고정하여  $T=0.2$ 초와  $T=4.0$ 초의 값이 같으므로  $T \leq T_S$ 인 단주기 영역과  $T \geq T_S$ 인 장주기 영역의 두 영역에서 감쇠보정계수를 구했다. Fig. 16에는 이 데이터를 좌표 평면에 도시하였다.

Table 11. Vertical spectrum ratio at various periods and damping ratio

Damping ratio (%)	Spectrum ratio for various periods	
	0.2s	1s
0.5	2.14	1.76
1	1.75	1.56
2	1.41	1.31
3	1.21	1.19
4	1.09	1.08
5	1.00	1.00
6	0.929	0.936
7	0.871	0.882
8	0.823	0.837
9	0.782	0.799
10	0.747	0.765
15	0.615	0.659
20	0.540	0.577
30	0.452	0.460
40	0.401	0.394
50	0.374	0.337

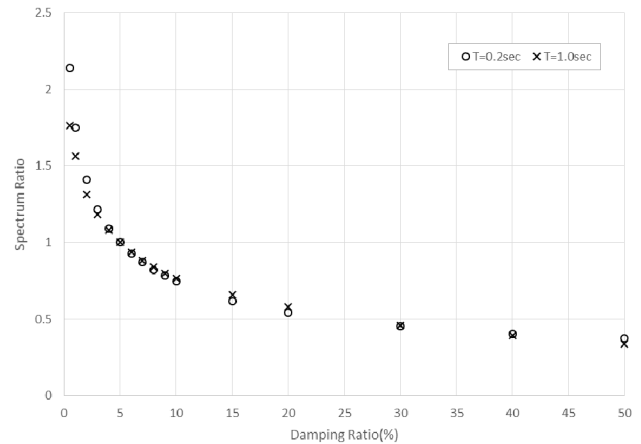


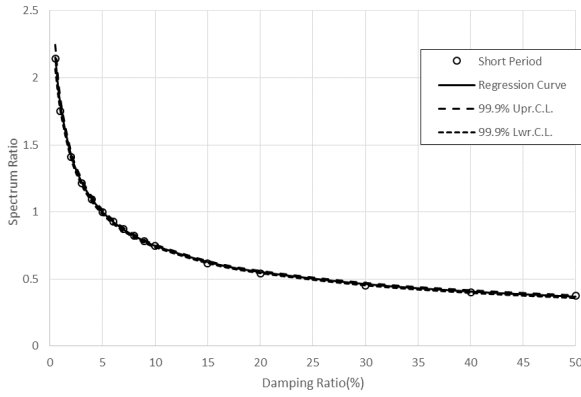
Fig. 16. Plots of damping ratio and spectrum ratio data pairs: for short period,  $T=0.2$  s and for long period,  $T=1.0$  s

감쇠보정계수 공식을 구하기 위해서 Table 11과 Fig. 16에 주어진 감쇠보정계수에 회귀분석을 실시하였다. 5.1절과 마찬가지로 식 (6.1)을 사용하여 단주기 영역과 장주기 영역, 그리고 통합된 영역의 3 가지 경우에 대한 회귀함수를 구하면 다음과 같다.

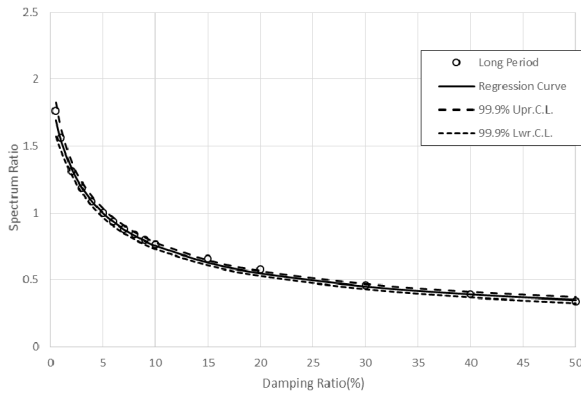
$$C_D(\xi) = \left( \frac{5.5}{0.5 + \xi} \right)^{0.45}, \text{ for } T=0.2\text{sec} \quad (8.1)$$

$$C_D(\xi) = \left( \frac{7.15}{2.15 + \xi} \right)^{0.53}, \text{ for } T=1.0\text{sec} \quad (8.2)$$

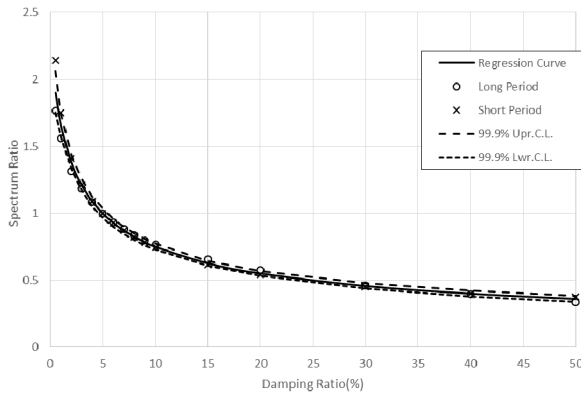
$$C_D(\xi) = \left( \frac{6.1}{1.1 + \xi} \right)^{0.48}, \text{ for entire range of } T \quad (8.3)$$



(a)



(b)

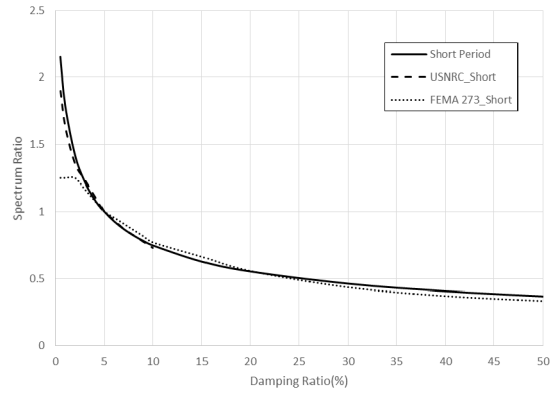


(c)

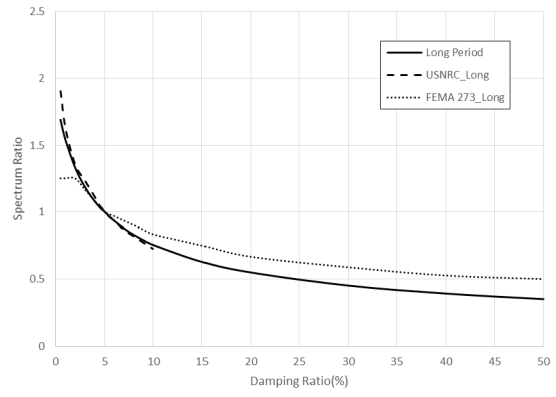
**Fig. 17.** Regressions curves for three period ranges: (a) for short period,  $T=0.2$  s, (b) for long period,  $T=1.0$  s, (c) for both short and long periods

위 식을 좌표평면에서 그래프로 각각 나타내면 Fig. 17과 같다. Fig. 12와 마찬가지로 99.9% 신뢰도를 함께 나타내었다.

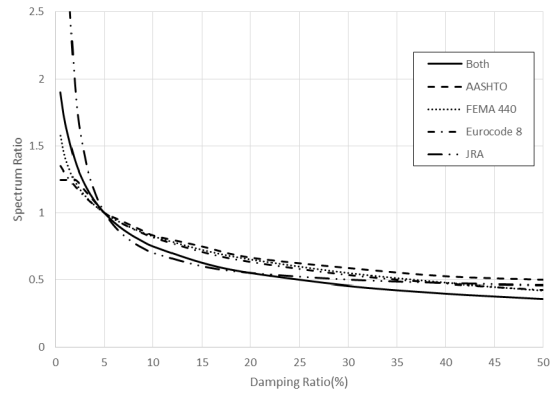
Fig. 12와 같이 단주기 영역 감쇠보정계수는 장주기 영역 감쇠보정계수에 비해서 감쇠비가 작을 경우 단주기 영역에서 가파르게 변동하는 것을 보여준다. Fig. 17(c)도 Fig. 12(c)에서와 같이 통합된 영역에서 계산된 감쇠보정계수가 모든 감쇠응답비율을 잘 설명하고 있는 것을 보여준다. 그리고 수직 감쇠보정계수도 5%보다 작은 감쇠비에서 단주기 영역과 장주기 영역의 감쇠응답비율의 차이가 유의미했다. 수직 감쇠보정계수 역시 통합된 영역에서 계산된 통일안을 사용해도 무방하지만 경우에 따라서 Fig. 17(a), (b)의 알맞은 값을 적용하여 사용하면 좋을 것이다.



(a)



(b)



(c)

**Fig. 18.** Comparison of damping correction factors with those of other design codes: (a) for short period,  $T=0.2$  s, (b) for long period,  $T=1.0$  s, (c) for both short and long periods

위 분석에서 구한 세 가지 감쇠보정계수 공식을 외국 기준에서의 감쇠보정계수와 비교하였다. Fig. 18(a)에서는 단주기 영역 감쇠보정계수 공식을 Fig. 18(b)에서는 장주기 영역 감쇠보정계수 공식을 USNRC 수직설계스펙트럼 기준, 미국 FEMA 273의 보정계수와 각각 비교하였다. Fig. 18(c)에서는 전체 주기 영역에 대한 감쇠보정계수 공식을 AASHTO, FEMA 440, Eurocode 8, 일본도로교 시방서의 계수와 비교하였다. 감쇠비가 2%보다 작은 경우에 제한한 감쇠보정계수는 미국 NRC 기준과 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 그러나 다른 기준들은 잘 맞지 않았다.

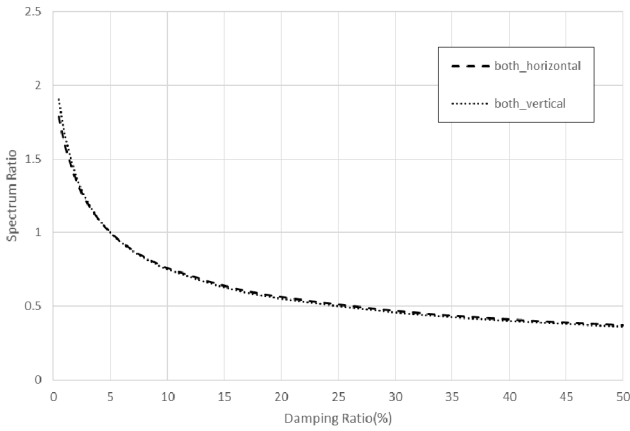


Fig. 19. Comparison of damping correction factors between horizontal and vertical spectra for both short and long periods

## 6. 수평, 수직 스펙트럼 감쇠보정계수의 비교

USNRC 기준을 제외하고는 앞에서 검토한 외국 기준에서 수평, 수직 스펙트럼에 대해서 별도로 감쇠보정계수를 제시하고 있지 않다. 수평, 수직 스펙트럼에 대해서 같은 감쇠보정계수를 사용할 수 있는 가능성을 알아보기 위해서 통합된 영역의 감쇠보정계수를 비교하였다. Fig. 19에서는 곡선들을 비교하였다.

Fig. 19를 보면 통합된 영역에서 구해진 수평과 수직 감쇠보정계수가 모든 감쇠비에 대해서 거의 같다는 것을 알 수 있다. 즉, 통일된 하나의 감쇠보정계수를 사용해도 무방할 것이다. 더욱이 새롭게 제안된 표준설계스펙트럼 [10,11]도 수평과 수직에서 같은 형상을 갖는 것을 고려할 때 통일된 감쇠보정계수를 설계기준으로 정하는 것은 합리적이라고 할 수 있다. 지진하중에서 수평하중이 지배적이며 표준설계스펙트럼에 V/H비를 곱하여 수직설계스펙트럼을 계산하는 방법을 고려할 때, 수평 통합된 영역에서 계산된 감쇠보정계수를 통일된 안으로써 제안한다면 실무설계의 편의성 역시 고려할 수 있다.

## 7. 단일안 감쇠보정계수

지금까지 5절과 6절에서 단주기 영역, 장주기 영역, 통합된 영역에서 수평, 수직 감쇠보정계수를 계산했고 6개의 감쇠보정계수가 통일된 단일안으로 대표될 수 있음을 알 수 있었다. 이는 실무의 편의성의 측면을 고려하여 감쇠보정계수를 선정할 수 있음을 의미한다. 단, Fig. 12(a), (b) 그리고 Fig. 17(a), (b)에서 확인된 바와 같이 5% 보다 작은 감쇠비의 구조물 중 위험도가 높은 경우에는 식 (7.1), (7.2)와 (8.1), (8.2) 중 해당하는 감쇠보정계수를 사용하여 설계스펙트럼을 계산하는 것이 더욱 합리적일 수 있을 것이다.

지진하중에서 수평하중이 지배적이며 표준설계스펙트럼에 V/H비를 곱하여 수직설계스펙트럼을 계산하는 방법을 고려하여 새롭게 제안된 표준설계스펙트럼 [10, 11]에 적합한 감쇠보정계수를 선정할 수 있었다.

이에 따라 2017년 7월 1일부로 시행된 내진설계기준 공통적용사항에서는 아래 식 (9.1)과 (9.2)와 같이 통합된 영역에서 수평 감쇠보정계수를 단일안으로 선정하였다.

$$C_D(\xi) = 1, T=0 \tag{9.1}$$

$$C_D(\xi) = \left( \frac{6.42}{1.42 + \xi} \right)^{0.48}, T_0 \leq T \tag{9.2}$$

이때,  $0 < T_0 < T$ 의 구간에서는 직선보간하여 사용하도록 하며 위 감쇠보정계수는 암반지반의 표준설계스펙트럼에 한하여 적용한다.

## 8. 결론

국내외 판내부 지진기록에 근거하여 수평, 수직 스펙트럼의 감쇠보정계수를 구하였다. 국내외 판내부지진 데이터에 근거한 이러한 연구는 국내에서는 최초로 시도된 것이라는 측면에서 큰 의의가 있다고 할 수 있겠다.

제안한 감쇠보정계수 공식은 아주 작은 감쇠비에서 큰 감쇠비에 걸쳐서 유효하다. 외국 기준의 감쇠비와 비교하였을 때 전체적으로 경향은 일관적이고 신뢰도도 높다는 것을 확인할 수 있었다. 특히 고무적인 것은 감쇠비가 작은 영역에서 USNRC의 기준과 잘 일치한다는 것이다. 이것은 이 논문에서 제시한 감쇠보정계수 공식이 Eurocode 8 등에서 사용하는 것보다도 적용 범위가 넓다는 것을 의미한다.

감쇠보정계수는 단주기 영역과 장주기 영역, 그리고 통합된 영역에 대한 것을 모두 계산하였고 통일된 단일안으로 대표될 수 있다는 것을 확인했다. 이는 실무의 편의성의 관점에서 수평, 수직 스펙트럼에 대해서 단일안 감쇠보정계수 공식을 사용할 수 있다는 것을 시사한다. 이에 따라 내진설계기준 공통적용사항으로 제정된 것과 같이 식 (9.1)과 (9.2)를 우리나라 지반특성에 적합한 감쇠보정계수로 선정할 수 있었다.

서론에서 언급하였듯이 본 연구의 결과는 규모 4.5 이상의 국내 지진과 국외 판내부 지진 암반지반 기록을 사용하여 얻었다. 여러 가지 제약 조건으로 인해서 더 많은 수의 기록을 확보하지 못하였고 토사지반 기록으로부터 토사지반 스펙트럼에의 적용가능성을 확인해보지는 못했다. 실제 지진기록을 이용한 우리나라 지진하중을 구하는 본격적인 연구는 이제 시작되었다고 해도 지나치지 않을 것이다. 앞으로 후속 연구를 통해서 본 연구의 한계를 극복하고 좀더 완전한 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 제공해주신 그리스 Patras 대학교의 Apostolos S. Papegeorgiou 교수께 큰 감사를 드리고, 구하기 어려운 판내부 지진 데이터를 흔쾌히 공유한 미국 Notre Dame 대학교의 George P. Mavroedis 교수께도 깊은 감사의 뜻을 전합니다.

/ REFERENCES /

1. U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC). Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants (Regulatory Guide 1.60). Washington, DC, USA, c2014, p. 5-9.
2. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Guide Specifications for Seismic Isolation Design, AASHTO, c2000, 28 p.
3. Federal Emergency Management Agency (FEMA). NHERP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA 273), FEMA, c1997, Chapter 2, p. 22-23.
4. Federal Emergency Management Agency (FEMA). Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures (FEMA 440), FEMA, c2005, Chapter 6, p. 5-6.
5. Federal Emergency Management Agency (FEMA). NEHRP Recommended Seismic Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures (FEMA P-750), FEMA, c2009, p. 221-22.
6. 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, 40 p.
7. Japan Road Association, Standard Specification for Highway Bridges of Japan, Japan Road Association, c2002, Chapter 4, 7 p.
8. EESK, KICT, The Research of Seismic Design Code(II), Ministry of Construction and Transportation, c1997.
9. Korea Road Association, Korean Highway Bridge Design Code(Limit state design) Cable Bridge part, Ministry of Construction and Transportation, c2014, Chapter 9, p. 10.
10. 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.
11. 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.
12. Ministry of Public Safety and Security, Available from: [http://www.mpss.go.kr/safe/open/0014/0001/?jsessionid=ljNaj7+-0-HkfNzMuMW-eZ7q,node41?boardId=bbs\\_000000000000041&mode=view&cntId=8636&category=%EC%9E%AC%EB%82%9C%EA%B4%80%EB%A6%AC%EC%8B%A4&pageIndex=&searchCondition=all&searchKeyword=%EB%82%B4%EC%A7%84%EC%84%A4%EA%B3%84%EA%B8%B0%EC%A4%80%20%EA%B3%B5%ED%86%B5%EC%A0%81%EC%9A%A9%EC%82%AC%ED%95%AD](http://www.mpss.go.kr/safe/open/0014/0001/?jsessionid=ljNaj7+-0-HkfNzMuMW-eZ7q,node41?boardId=bbs_000000000000041&mode=view&cntId=8636&category=%EC%9E%AC%EB%82%9C%EA%B4%80%EB%A6%AC%EC%8B%A4&pageIndex=&searchCondition=all&searchKeyword=%EB%82%B4%EC%A7%84%EC%84%A4%EA%B3%84%EA%B8%B0%EC%A4%80%20%EA%B3%B5%ED%86%B5%EC%A0%81%EC%9A%A9%EC%82%AC%ED%95%AD)
13. Architectural Institute of Korea, Korean Building Code And Commentary 2016, Ministry of Construction and Transportation, c2016.
14. Applied Technology Council (ATC). Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, California Seismic Safety Commission, c1996.
15. Korea Meteorological Administratuib, Domestic Earthquake List, Available from: [http://www.kma.go.kr/weather/earthquake\\_volcano/domesticlist.jsp](http://www.kma.go.kr/weather/earthquake_volcano/domesticlist.jsp)
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. Davenport WB Jr, Probability and random processes: an introduction for applied scientists and engineers, New York: McGraw-Hill; c1970, 542 p.