

도로교 내진설계 스펙트럼에 부합하는 표준 PSD함수의 제안

A Proposal of Reference Power Spectral Density Functions Compatible with Highway Bridge Design Spectra

최동호* · 이상훈** · 고정훈***

Choi, Dong Ho · Lee, Sang Hoon · Koh, Jung Hoon

Abstract

Acceleration time history used in the seismic analysis of nuclear power plant structures should envelop a target power spectral density (PSD) function in addition to the design response spectrum in order to have sufficient energy at each frequency for the purpose of ensuring adequate load. The safety for complex long-span highway bridges cannot be over-emphasize. An alternative method to improve the seismic capacity is to ensure the minimum PSD function of the applied seismic load. This study proposes a technical scheme to obtain the reference power spectral density function by using artificial earthquakes which are compatible with the highway bridge design spectrum.

Keywords : design spectrum, required power spectral density function, artificial earthquakes, highway bridge structures

요 지

원전 구조물의 내진해석에서 사용하는 시간이력 함수는 적절한 하중을 보장하기 위하여 설계응답스펙트럼에 부합할 뿐만 아니라 최소 PSD함수 이상의 PSD함수를 갖도록 함으로서 각각의 진동수에서 일정 크기 이상의 에너지를 갖고 있어야 한다. 도로교 구조물에서도 구조물의 대형화와 정교화로 인한 구조물의 공공 기능의 안전성이 더욱 강조되어, 설계 목적의 PSD함수의 규정이 필요하지만 적절한 절차가 개발이 되지 않아 현실적으로 적용하기 어려운 실정이다. 본 연구에서는 다수의 인공지진을 이용하여 표준 PSD함수를 계산하는 절차를 제시하고 현재의 도로교 내진설계 스펙트럼에 부합하는 표준 PSD 함수를 제안하였다.

핵심용어 : 내진설계 스펙트럼, PSD함수, 인공지진, 도로교

1. 서 론

응답스펙트럼 해석법은 지진하중과 같은 동하중에 대한 구조물의 동적 응답량을 얻기 위한 해석방법으로 사용되어 왔다. 이때 지진응답해석의 입력하중은 지진하중에 대한 단자유도계의 응답을 진동수와 감쇠특성으로 간단히 표현한 응답스펙트럼이 사용된다. 따라서 지진응답해석의 입력하중으로서 설계스펙트럼은 시간이력 함수 형태의 지진하중보다 동적특성 특성을 효과적이면서도 편리하게 정의할 수 있는 장점이 있어 일반적으로 입력지진하중으로 사용되어 왔다. 한편, 구조물의 최대 응답, 분산 및 확산구간 등을 예측하기 위하여 진동수영역 해석을 하는 경우 입력하중으로 PSD함수(Power Spectral Density Function)가 요구된다. 여기서 PSD함수는 각 진동수에서 시간이력 함수의 에너지를 표시한 값을 의미한다. 원자력 분야의 지진응답해석에서는 시간이력 함수의 PSD함수를 계산하여 규제기준에서 제시한 최소

PSD함수의 포괄을 명시함으로써 입력 하중의 안전을 강화하고 있다(Standard Review Plan-Section 3.7.1). 그 이유는 내진설계에서 시간이력 함수에 대한 PSD함수 요건을 추가함으로써 시간이력의 응답스펙트럼은 물론 진동수 별로 에너지가 충분하지 않은 입력운동을 지진응답해석에서 사용할 수 없도록 하기 위함이다(Lee 등, 1993).

한편, 최근에 건설되는 도로교 구조물은 대형화와 정교화로 인하여 공공 기능의 안전성이 더욱 강조되는 추세에 따라 시간이력함수의 최소 PSD함수 포괄규정을 확대 적용하려는 움직임을 보이고 있으나, 적절한 절차가 개발되어 있지 않아 현실적으로 적용할 수 없는 상황이어서 시급히 설계기준에 부합하는 PSD함수의 작성이 요구되는 실정이다. 이에 따라 본 연구에서는 도로교 내진설계 규정에 명시된 설계스펙트럼으로부터 표준 PSD함수를 계산하는 절차를 제시하고, 현재의 도로교 내진설계 스펙트럼에 부합하는 표준 PSD함수를 제안하였다.

*정회원 · 교신저자 · 한양대학교 공과대학 토목공학과 부교수 (E-mail : samga@hanyang.ac.kr)

**정회원 · 한양대학교 토목공학과 박사과정 · 한국전력기술(주) 책임기술원 (E-mail : shjrl@kopec.co.kr)

***한양대학교 토목공학과 석사과정 (Email : gossi1701@hanyang.ac.kr)

입력하중으로서 PSD함수를 합리적으로 정의하기 위해서 설계 응답스펙트럼을 기초로 하여 PSD함수를 유도하려는 시도가 있었지만 설계 응답스펙트럼으로부터 수학적으로 PSD함수를 직접 유도할 수 없기 때문에 근사적인 방법을 통하여 PSD함수를 얻는 방법이 이용되고 있다. Pfaffinger (1983)는 다항식으로 PSD함수를 정의하고 최소자승법을 이용하여 PSD함수의 자유변수를 계산하는 방법을 제안하였다. 그 후 Park(1992, 1995)은 PSD함수를 Dirac delta 함수로 가정하고, 최소자승법을 이용하여 Dirac delta 함수의 계수값을 결정하여 PSD함수를 결정하는 방법을 제안하였다. 그러나 이 방법은 계산된 PSD함수의 변곡점이 설계 응답스펙트럼의 변곡점과 일치하지 않는 문제점이 있다. Mertens과 Preumont(1997)은 전통적으로 설계 응답스펙트럼의 제곱비를 PSD함수에 순차적으로 곱하여 최종 PSD함수를 구하는 방법에서 문제점을 보완한 방법을 발표하였다. 이로부터 계산된 PSD함수는 설계 응답스펙트럼의 감쇠비에 의한 영향과 첨두지반 가속도의 크기가 증가하는 기존의 문제점이 제거되어 실용성이 개선되었다. 본 연구에서는 기존의 연구결과를 중심으로 설계 응답스펙트럼에 부합하는 PSD함수를 계산하고 실무적으로 편리하게 사용할 수 있는 PSD함수를 정의하였다.

2. 설계 응답스펙트럼에 부합하는 PSD 함수 작성 절차

미국 원자력규제위원회에서 발표한 지진응답해석의 입력운동으로 사용되는 시간이력에 대한 PSD 요구조건(Standard Review Plan-Section 3.7.1)과 그와 관련된 연구결과를 활용하여 도로교 설계 응답스펙트럼에 부합하는 PSD함수를 계산하는 절차를 다음과 같이 제안하였다.

먼저 응답스펙트럼이 작은 오차로 설계 응답스펙트럼에 일치하는 충분한 시간이력 자료를 확보해야 한다. 시간이력 자료는 설계 응답스펙트럼에 부합하는 지진기록이 가장 바람직하나 이러한 지진기록들을 만족스럽게 확보하는 것은 우리 나라와 같은 지역에서는 현실적으로 불가능하므로 인공적인 방법을 통해 설계 응답스펙트럼에 부합하는 시간이력을 작성하는 것이 효과적이다. 인공적으로 시간이력을 작성하는 기술은 이미 1970년대 중반부터 개발되어 실무에 적용되고 있으며(Gasparini와 Vanmarcke, 1976), 최근에는 설계 응답스펙트럼에서 요구하는 응답특성을 거의 정확히 구현하는 인공적인 시간이력을 작성하는 것도 가능해졌다(Choi와 Lee, 2006).

인공 시간이력은 임의의 위상각을 포함한 다양한 성분의 주기함수의 합으로 구성된 가속도 시간이력 $Z(t)$ 로 정의할 수 있으며 식 (1)과 같이 표현된다.

$$Z(t) = I(t) \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i t + \psi_i) \quad (1)$$

여기서 A_i , ω_i 및 ψ_i 는 각각 i 번째 주기함수의 진폭, 진동수 및 위상각에 해당하며, $I(t)$ 는 정상상태의 임의진동 파형을 비정상상태의 임의진동 파형으로 변환시켜주는 세기함수(Deterministic intensity function)이다.

시간이력 $Z(t)$ 의 Fourier 응답을 $F(\omega_i)$ 라 하면 PSD 함수 $S_i(\omega)$ 는 식 (2)와 같이 미국 원자력규제위원회에서 제시한 식을 이용하여 구한다(Standard Review Plan-Section 3.7.1; Philippacopoulos, 1989).

$$S_i(\bar{\omega}) = \frac{2|F_i(\bar{\omega})|^2}{2\pi T_i}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (2)$$

여기서 N 은 PSD함수를 구성하기 위해 사용된 전체 시간이력 개수이며, $\bar{\omega}$ 는 PSD 함수 영역에서 사용된 진동수이다. T_i 는 비정상(Non-stationary) 형태로 구성된 시간이력에서 강진지속시간을 의미하고, 시간이력의 누적에너지에 대한 선형 경사구간으로부터 결정된다. 시간 t_p (p 는 총 누적에너지에 대한 백분율)에서의 누적에너지 $E_i(t_p)$ 는 식 (3)과 같이 정의된다(Philippacopoulos, 1989).

$$E_i(t_p) = \int_0^{t_p} a_i^2(t) dt, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (3)$$

여기서 $a_i(t)$ 는 각각의 시간이력이며, 누적에너지에 대한 선형 경사구간을 명백히 결정하기 어려운 경우 일반적으로 식 (3)으로부터 계산된 누적에너지 전체의 5%와 75%에 해당하는 시간을 강진구간의 경계로 간주하여 T_i 를 구할 수 있으며, 이를 수식으로 표현하면 식 (4)와 같다.

$$T_i = t_p(75\%) - t_p(5\%), \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (4)$$

식 (2)로부터 계산된 PSD 함수의 값은 기복이 매우 크므로 응답특성의 일관성을 파악하기 어렵다. PSD함수의 기복현상을 제거하기 위한 첫 번째 작업으로서 식 (2)로부터 구한 여러 개의 PSD 함수를 평균화한다. 평균화된 PSD함수를 $S_m(\bar{\omega})$ 라 하면 식 (5)와 같이 나타낼 수 있으며, 식 (2)에서 계산된 PSD 함수에 비하여 기복현상이 대폭 감소한다.

$$S_m(\bar{\omega}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i(\bar{\omega}), \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (5)$$

또한, 각각의 시간이력에 대응되는 강진지속시간 T_i 에 대한 평균값을 계산함으로써 등가 강진지속시간인 T_D 를 얻을 수 있다.

$$T_D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (6)$$

다음으로 PSD함수를 더욱 평탄화 시키기 위하여 기준 진동수로부터 $\pm 20\%$ 범위내의 평균화된 PSD함수를 그 지점의 PSD함수로 사용하며, 이러한 작업을 이동평균이라고 하며 이동평균 작업은 PSD함수의 모든 진동수대역에 걸쳐 계산한다. 이동평균을 거쳐 계산된 PSD함수는 거의 직선에 가까운 형태를 보이며, 설계기준으로 사용하기 위하여 구간별로 등가 선형화 시킨다. 경험적으로 이동평균을 거쳐 계산된 PSD함수의 변곡점은 설계 응답스펙트럼에서 정의된 진동수의 위치와 거의 일치하는 경향을 보이므로 설계 응답스펙트럼의 통계진동수와 동일한 값들을 PSD함수의 구간 설정에 적용한다. 설정된 구간에 속하는 PSD함수들에 대하여 최소자승법을 적용하여 선형식을 계산한다. 각 구간들에 대하여 계산된 선형식들을 다음과 같은 요구조건을 만족시키도록 보정한다.

표 1. 지진구역 구분

지진구역	행정 구역 ⁵⁾	
I	시	서울특별시, 인천광역시, 대전광역시, 부산광역시, 대구광역시, 울산광역시, 광주광역시
	도	경기도, 강원도 남부 ¹⁾ , 충청북도, 충청남도, 경상북도, 경상남도, 전라북도, 전라남도 북동부 ²⁾
II	도	강원도 북부 ³⁾ , 전라남도 남서부 ⁴⁾ , 제주도

주: 1) 강원도 남부(군, 시) : 영월, 정선, 삼척시, 강릉시, 동해시, 원주시, 태백시
 2) 전라남도 북동부(군, 시) : 장성, 담양, 곡성, 구례, 장흥, 보성, 화순, 광양시, 나주시, 여수시, 순천시
 3) 강원도 북부(군, 시) : 홍천, 철원, 화천, 횡성, 평창, 양구, 인제, 고성, 양양, 춘천시, 속초시
 4) 전라남도 남서부(군, 시) : 무안, 신안, 완도, 영광, 진도, 해남, 영암, 강진, 고흥, 함평, 목포시
 5) 행정구역의 경계를 통과하는 교량의 경우에는 구역계수가 큰 값을 적용한다.

(1) 각 구간에서 계산된 선형식은 구간 변곡점에서 서로 일치해야 한다.

(2) 선형식에 따라 계산된 전체 진동수 구간에 대한 누적 PSD함수는 이동평균을 거친 PSD함수의 누적값과 같거나 그 이상이어야 한다.

(3) 위의 과정을 거쳐 보정된 선형식은 이동평균 PSD함수와 유사한 경향을 보여야 한다.

시간이력의 PSD함수와 비교하기 위한 최소 PSD함수 요구조건은 위의 과정에 따라 계산된 구간별 선형 PSD함수에 감소율을 적용하여 얻는다. 감소율은 PSD함수를 계산하기 위하여 사용된 각각의 시간이력의 PSD함수에 대한 확률론적 신뢰도에 따라 달라질 수 있지만, 이들 분포가 정상상태의 Gaussian 과정을 따른다고 가정하는 경우 미국 원자력규제위원회에서는 원자력 분야의 설계 응답스펙트럼(Regulatory Guide 1.60)에 대한 최소 PSD함수 요구조건을 위하여 0.8을 제시하였다. 이러한 감소율은 사용된 시간이력의 분포가 아주 특이하지 않다면 실무분야에서도 수정 없이 적용될 수 있는 것으로 판단되므로 도로교 설계 응답스펙트럼을 위한 최소 PSD 함수 요구조건에도 같은 값을 적용하였다.

3. 국내 도로교 설계 응답 스펙트럼

2005년 발표된 도로교 설계기준(2005)의 내진설계에 사용되는 설계 응답스펙트럼은 교량형식, 가속도계수, 위험도계수 및 지반특성에 따라 구체적인 형태가 결정된다. 본 연구에서 지진격리교량에 대한 분류는 제외되었다.

3.1 가속도계수

지진재해도 해석 결과에 근거하여 우리나라의 지진구역을

표 2. 지진구역계수 (재현주기 500년에 해당)

지진구역	I	II
구역계수	0.11	0.07

표 3. 위험도계수

재현주기 (년)	500	1000
위험도계수 I	1	1.4

I구역과 II구역으로 구분하고(표 1), 각 지진구역에서의 평균 재현주기 500년 지진지반운동에 해당하는 지진구역계수를 표 2와 같이 구역 I에서는 0.11, 구역 II에서는 0.07로 정의하였다. 평균재현주기별 최대유효지반가속도의 비를 의미하는 위험도계수는 표 3과 같으며, 위험도 계수는 교량의 내진등급에 따라 결정된다. 교량이 위치할 부지에 대한 지진지반운동의 가속도계수 A는 내진등급별 설계지진의 재현주기에 해당하는 위험도계수를 지진구역에 따른 지진구역계수에 곱하여 계산한다.

3.2 지반계수

교량의 지진하중을 결정하기 위해서는 지반의 상태에 따라 지진파의 응답스펙트럼이 달라지는 것이 고려되어야 하며, 이것의 영향은 지반계수 S를 통하여 고려된다. 지반계수 S는 표 4에서 정의된 지반종류에 근거하여 1.0에서 4.0사이의 값을 갖는다.

3.3 탄성지진응답계수

설계하중을 결정할 때 사용되는 탄성지진응답계수 C_{sm} 은 식 (7)의 응답스펙트럼 식으로부터 구한다.

표 4. 지반의 분류 및 지반계수

지반종류	지반종류의 호칭	지표면 아래 30 m 토층에 대한 평균값			지반계수 S
		전단파속도 (m/s)	표준관입시험 (N치 ¹⁾)	비배수전단강도 (kPa)	
I	경암지반 보통암지반	760 이상	-	-	1.0
II	매우 조밀한 토사지반 또는 연암지반	360에서 760	> 50	> 100	2.0
III	단단한 토사지반	180에서 360	15에서 50	50에서 100	3.0
IV	연약한 토사지반	180미만	< 15	< 50	4.0
V	부지 고유의 특성평가가 요구되는 지반				

주: 1) 비점착성 토층만을 고려한 평균 N치

표 5. 가속도계수와 지반계수에 따라 분류된 설계응답스펙트럼의 종류

재현주기	위험도계수(I)	지진구역	지진구역계수	가속도계수(A)	지반종류	지반계수(S)	NAME
I 등급 1000년	1.4	구역 I	0.11	0.154	I	1	SII-A
					II	1.2	SIII-A
					III	1.5	SIII-A
					IV	2	SIIV-A
		구역 II	0.07	0.098	I	1	SII-B
					II	1.2	SIII-B
					III	1.5	SIII-B
					IV	2	SIIV-B
II 등급 500년	1	구역 I	0.11	0.11	I	1	S2I-A
					II	1.2	S2II-A
					III	1.5	S2III-A
					IV	2	S2IV-A
		구역 II	0.07	0.07	I	1	S2I-B
					II	1.2	S2II-B
					III	1.5	S2III-B
					IV	2	S2IV-B

$$C_{sm} = \frac{1.2AS}{T_m^{2/3}} \quad (7)$$

여기서 T_m 은 m 번째 진동모드의 주기이며 C_{sm} 값은 2.5A보다 크게 취할 필요는 없다.

3.4 설계 응답스펙트럼의 분류

설계 응답스펙트럼은 식 (7)의 가속도계수와 지반계수에 따라 구체적인 형태가 결정되며, 표 5와 같이 16종류로 구분된다. 1등급 교량은 “S1”, 2등급 교량은 “S2”라고 명명하였으며, 지반의 종류에 따라서 “I”, “II”, “III”, “IV”로 나누었고, 지진구역에 따라서 “A”, “B”로 구분하였다. 다시 16가지로 구분된 스펙트럼의 크기를 정규화하면 그림 1과 같이 지반 종류에 따라 4개의 응답스펙트럼 형태로 압축된다. 그림 1에서와 같이 4종류의 응답스펙트럼은 주기의 침두부가 일정한 상태에서 스펙트럼의 증폭구간에서 차이를 보이

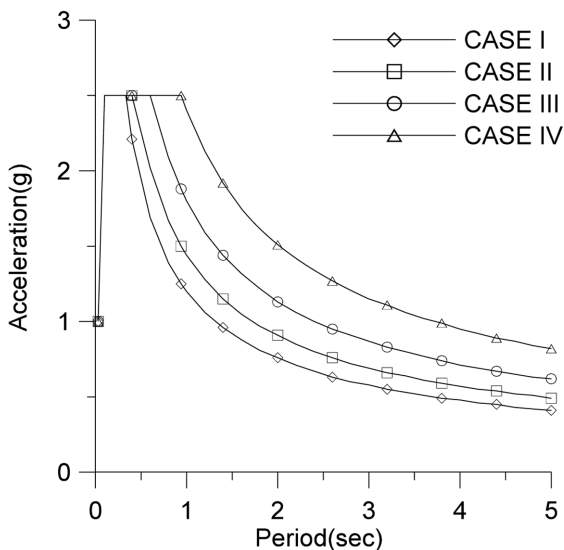


그림 1. 1 g의 가속도에 대한 설계 응답스펙트럼의 종류

고 있으며, 그 중 가장 좁은 증폭대역을 갖는 스펙트럼을 I라 하고 가장 넓은 증폭대역을 갖는 스펙트럼을 IV로 지정하였다.

3.5 감쇠비 2%의 설계 응답스펙트럼 작성

위에서 분류된 설계 응답스펙트럼은 감쇠비 5%를 기준으로 작성한 것이다. 그러나 PSD함수는 감쇠비 2%의 설계 응답스펙트럼을 기준으로 계산하는 것이 절차화 되어 있다 (Standard Review Plan-Section 3.7.1, 1989; Shinozuka 등, 1988). 실제로 감쇠비가 다른 응답스펙트럼을 사용할 경우 PSD함수의 값에 영향을 주기 때문에 합리적인 PSD함수를 계산하기 위해서는 감쇠비에 의한 PSD함수의 영향을 보정하거나(Mertens와 Preumont, 1997) 원천적으로 감쇠비 2% 설계 응답스펙트럼으로부터 PSD함수를 계산해야 한다. 본 연구에서는 참고문헌에서 제시된 감쇠비 2% 설계 응답스펙트럼으로부터 PSD함수를 얻기 위해 감쇠비 5% 설계 응답스펙트럼에 대응하는 감쇠비 2% 설계응답스펙트럼을 새롭게 제안하였다.

감쇠비 5% 설계 응답스펙트럼으로부터 감쇠비 2% 설계 응답스펙트럼을 구하는 방법은 두 가지로 나누어 생각할 수 있다. 첫 번째 방법은 최대 증폭구간에서 식 (8)의 감쇠보정 계수(케이블강교량설계지침(안), 2005)를 감쇠비 5% 설계 응답스펙트럼에 곱하여 감쇠비 2% 설계 응답스펙트럼으로 변환하는 것이다.

$$C_d = \sqrt{7/(2+\xi)}, \quad \xi = \text{감쇠비}(\%) \quad (8)$$

두 번째 방법은 여러 개의 시간이력을 생성해서 직접 감쇠비 2% 설계 응답스펙트럼을 구하는 방법으로서 절차는 다음과 같다. 먼저 감쇠비 5% 설계 응답스펙트럼에 부합하는 인공 시간이력을 100개씩 생성하고 생성된 인공 시간이력들에 대하여 감쇠비 2%와 감쇠비 5%의 응답스펙트럼을 계산하고 각 감쇠비 값들에 대하여 평균한 응답스펙트럼을 구한

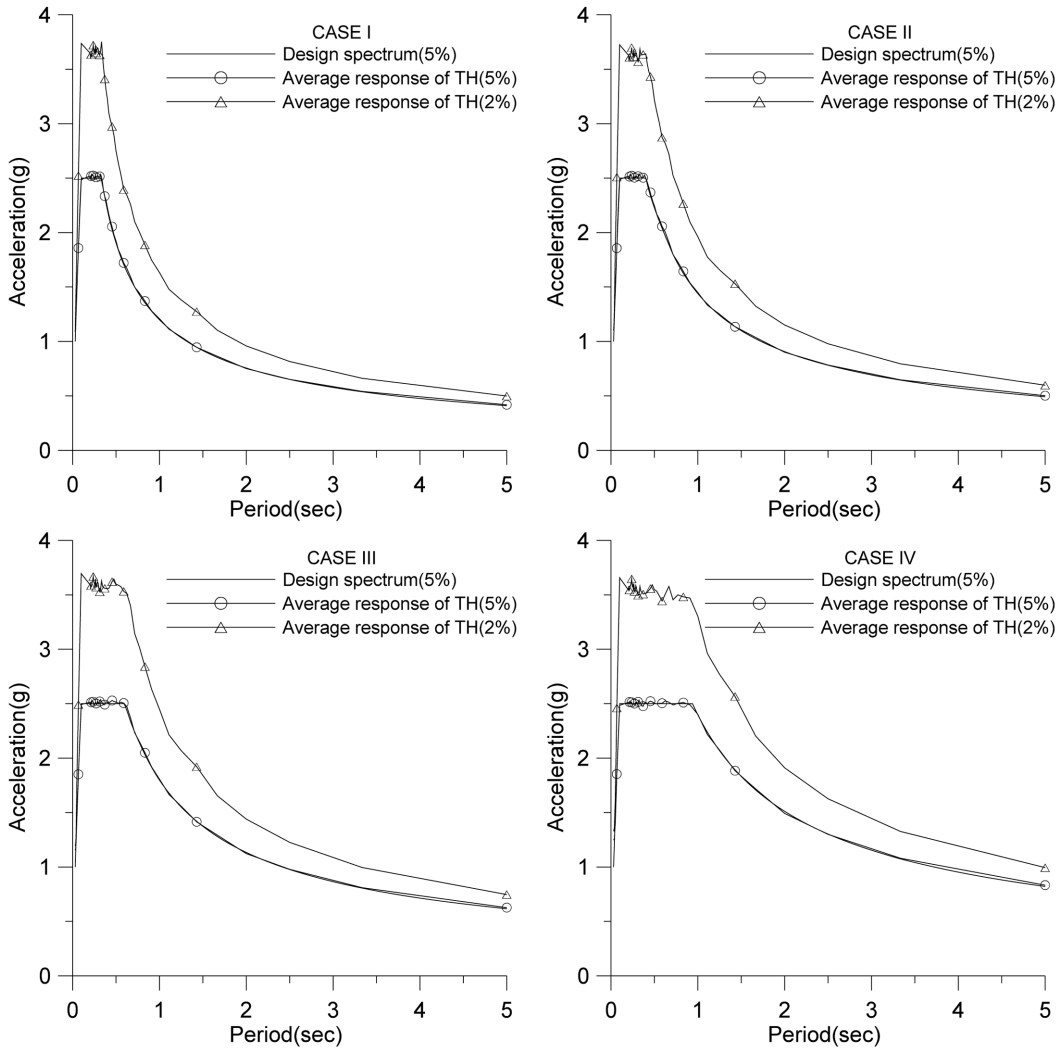


그림 2. 감쇠비 2%와 5%에 대하여 계산된 평균 응답스펙트럼과 기존 설계 응답스펙트럼의 비교

다. 이때 인공 시간이력을 설계 응답스펙트럼에 최대한 접근 시키는 방법을 적용하여, 통계적으로 감쇠비 5% 평균 응답스펙트럼을 설계응답스펙트럼에 일치시켰다(Choi와 Lee, 2006). 그림 2는 감쇠비 2%와 감쇠비 5%에 대하여 계산된 평균 응답스펙트럼과 기존의 설계 응답스펙트럼을 비교한 그림이다. 평균 응답스펙트럼과 기존 설계 응답스펙트럼의 정량적 비교를 위하여 평균 응답스펙트럼을 구간별로 수식화한다. 주기의 구간 설정은 기존 설계 응답스펙트럼의 변곡점을 그대로 이용한다. 구간별로 수식화된 응답스펙트럼을 기존의 설계 응답스펙트럼과 일치하도록 조정계수를 구하여 계산된 감쇠비 5% 설계응답스펙트럼을 기존 설계 응답스펙트럼과 일치시킨다. 다시 조정계수를 감쇠비 2%의 수식화된 응답스펙트럼에 적용하면 감쇠비 2% 설계 응답스펙트럼을 계산할 수 있다. 이와 같은 작업을 I, II, III, IV에 대하여 수행해서 완성된 감쇠비 2% 설계 응답스펙트럼 곡선을 그림 3에 나타내었다.

두 방법에 의하여 제시된 감쇠비 2% 설계응답스펙트럼을 결정하기 위하여 통계적 절차에 따라 제시된 감쇠비 2%와 감쇠비 5% 설계 응답스펙트럼의 첨두부에서 증폭율과 식 (8)에 의해 계산된 감쇠보정계수와 상호 비교하였으며, 구체적인 값을 표 6에 정리하였다. 표 6의 결과에 따라 보수적

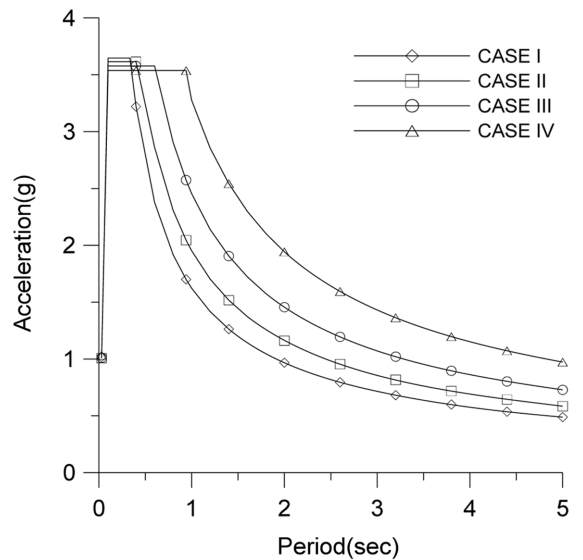


그림 3. 통계적 절차에 의해 작성된 감쇠비 2% 설계 응답스펙트럼 곡선

인 값을 제공한 후자의 방법을 채택하여 1.417에서 1.467의 증폭율을 기존 5% 설계 응답스펙트럼에 적용함으로써 최종적인 감쇠비 2% 설계 응답스펙트럼을 결정한다.

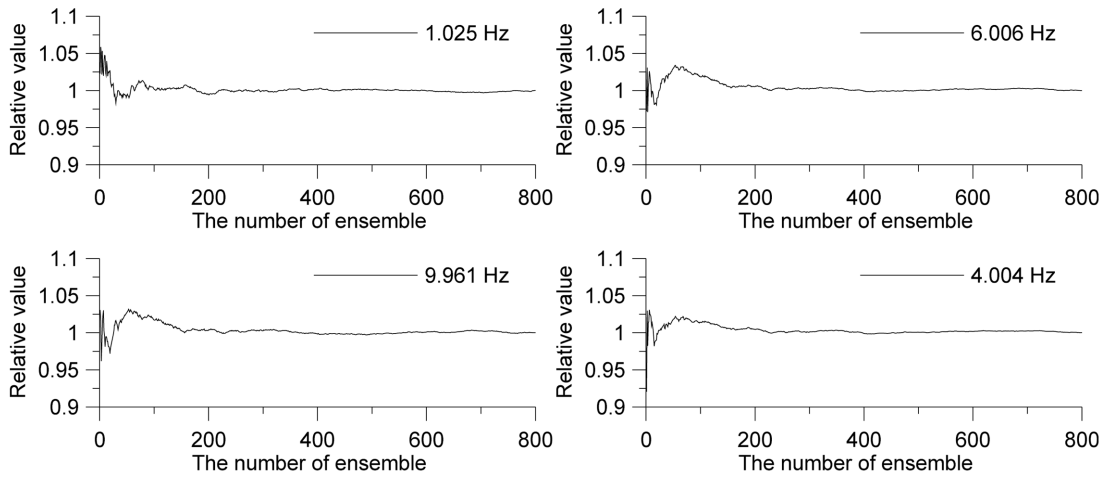


그림 4. 시간이력 양상블 크기에 따른 선택된 진동수 지점에서 PSD값의 변화

표 6. 감쇠보정계수와 증폭율의 비교

	DRS(Cd)	DRS(TH)
I	1.323	1.467
II	1.323	1.453
III	1.323	1.437
IV	1.323	1.417

4. PSD함수의 계산

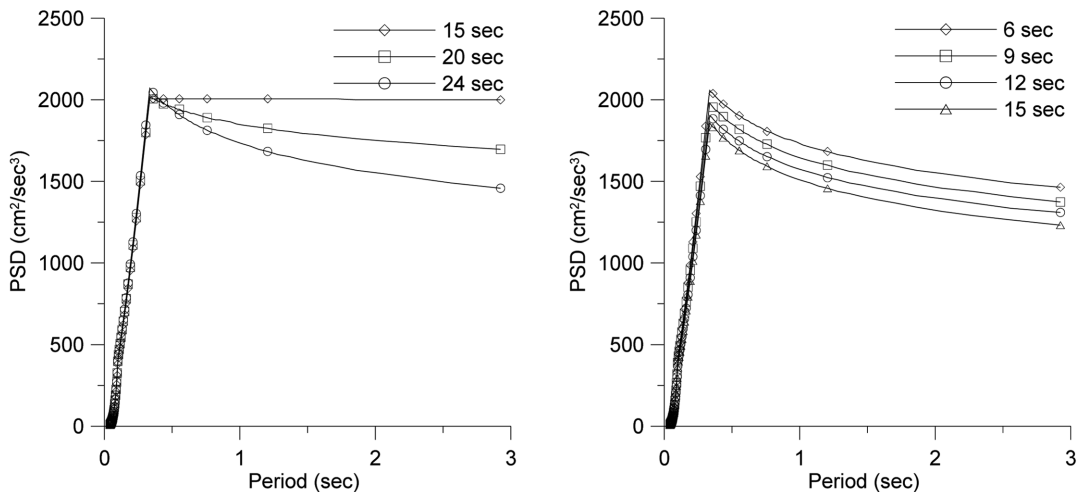
4.1 시간이력의 양상블 평가

감쇠비 2% 설계 응답스펙트럼을 기준으로 PSD함수를 계산하기 위해서는 식 (1)을 이용해 작성된 많은 인공 시간이력을 필요로 한다. 그러나, 과거 PSD함수의 계산에 사용된 시간이력의 수는 각 연구자들마다 각각 다르며 이에 관한 적용 근거가 없었기 때문에 최종 PSD함수 계산을 위하여 적절한 시간이력의 검토가 필요하므로 미국 원자력규제위원회 설계 응답스펙트럼을 이용하여 시간이력의 수에 따른 PSD함수의 변동성을 확인하였다. 인공 시간이력 양상블을 800개까지 증가시키면서 최종 상태의 PSD함수를 계산하고

몇몇 진동수의 PSD 값의 변화를 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서와 같이 PSD함수의 계산에 사용되는 시간이력의 수를 증가시키기에 따라 PSD값의 변동성이 감소하였지만 일정한 수의 양상블 조합 이상에서는 더 이상 감소하지 않았다. 이러한 현상이 나타나는 구간은 시간이력의 수에 의해 변동성이 더 이상 제거되지 않는 구간으로 간주된다. 이러한 변동성을 전체 변동성의 약 1% 비율로 보았을 때 최소 100개 이상의 시간이력이 사용되어야 하는 것으로 나타났다. 이 값은 Shinozuka 등(1988)의 연구에서 사용된 20개의 시간이력보다 많은 값이며, 본 연구의 PSD 함수 계산에도 100개의 시간이력을 사용하였다.

4.2 PSD함수의 계산 구간

PSD함수는 0.3Hz에서 24Hz범위에서 계산되었다. 이 범위는 Standard Review Plan의 Section 3.7.1에서 제시된 구간을 따른 것으로 구조물의 고유진동수를 판단하여 구조물의 잠재적 손상가능성이 큰 시간이력의 진동수 대역을 의미하며 주기 값을 기준으로 하는 경우 0.04초에서 3.3초의 범위에 해당된다. 이 범위는 국내 교량 설계 응답스펙트럼을 정의하는 주기대역과도 벗어나지 않는다.



(a) 지속시간의 변화가 PSD함수에 미치는 영향

(b) 강진구간의 변화가 PSD함수에 미치는 영향

그림 5. PSD함수의 파라미터들에 대한 민감도 분석

4.3 인공 시간이력의 생성과 최초 PSD함수의 계산

식 (1)을 적용하여 100개의 인공지진 시간이력의 응답스펙트럼 중앙값이 목표 설계응답스펙트럼을 만족하도록 생성하였다. 이때 인공 시간이력의 지속시간과 강진운동 구간에 대한 규정은 국내 교량 내진설계에 명시되어 있지 않으므로 Standard Review Plan의 Section 3.7.1에 명시 되어있는 10-24 초의 지속시간과 6-15 초의 강진운동 구간을 적용하였다. 먼저 시간이력의 지속시간과 강진운동 구간의 변화에 따른 PSD함수의 민감도 해석을 수행하여 그림 5와 같은 결과를 얻었다. 여기서 사용된 스펙트럼은 최대 지반가속도가 1 g인 경암 및 보통암 지반에 대한 도로교 내진설계 스펙트럼으로서 이에 대응하는 목표 PSD함수를 나타낸 것이다. 그림 5(a)는 강진운동 구간을 6초로 고정시키고 총 지속시간을 규정에서 명시된 구간을 만족하는 15초, 20초 및 24초로 달리하였을 때의 PSD함수의 변화를 나타낸 그림이고, 그림 5(b)는 총 지속시간을 24초로 고정하고 강진운동 구간을 6초, 9초, 12초 및 15초로 달리하였을 때 PSD함수의 변화를 나타낸 그림이다. 시간이력에서 저진동수 성분을 충분히 포함하기 위해서는 충분한 지속시간을 가질 필요가 있고 이를 위해서 일반 산업분야도 다르지 않겠지만 원전분야의 지진 해석에서는 일반적으로 20-24초의 지속시간을 갖는 시간이력이 사용된다. 강진지속시간이 일정한 경우에는 그림 5(a)에서와 지진지속시간이 증가할수록 PSD함수가 낮아지는 현상이 있지만 충분한 지속시간을 보장하기 위해서 본 연구에서는 24초 지속시간을 갖는 인공지진파를 선택하였다.

한편 일정한 지속시간을 갖는 시간이력의 PSD함수는 강진지속시간과 반비례한다는 사실을 그림 5(b)의 민감도 해석을 통해 알 수 있었다. 즉, 시간이력에서 에너지 성분에 기여도가 큰 강진구간만을 고려하기 위하여 PSD함수 계산에서 전체 지진지속시간이 아닌 전체 시간이력 에너지의 약 70%에 해당하는 시간구간만이 실제 계산에 이용되는데 이때 강진지속시간을 증가시키면 PSD값에 비례해서 증가하는 영향보다 PSD값에 반비례하는 강진지속시간의 영향이 더 지배적이어서 전체적인 PSD값이 감소하게 된다. 따라서 본 연구에서는 13초의 강진지속시간 보다 높은 PSD함수를 제공하는 6초의 강진지속시간을 선택하였으며, 이 값은 전문가들이 제시하는 최소 강진지속시간과 같다(Philippacopoulos, 1989). 결과적으로 본 연구에서 사용된 24초와 6초의 지진지속시간과 강진지속시간은 PSD함수의 수준을 평균 정도로 유지시켜줄 수 있는 값들로서 이는 PSD함수 고유의 목적인 특정

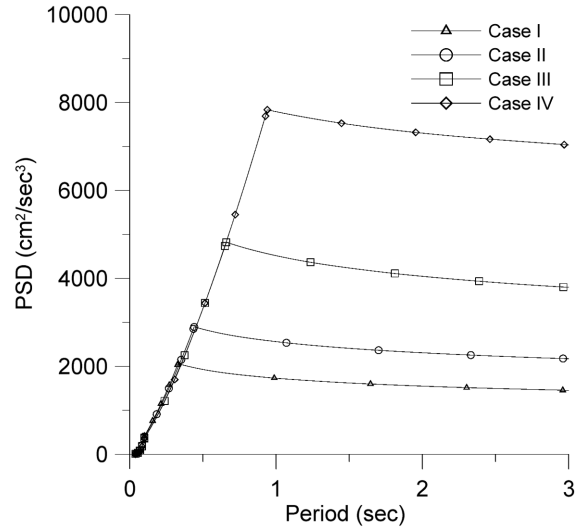


그림 6. 설계 응답스펙트럼에 대응되는 기준 PSD함수

진동수의 에너지가 지나치게 낮은 입력운동이 사용되는 것을 방지하고 PSD함수 요건으로 인하여 설계하중에 추가적인 부담을 주지 않는 값들이라고 볼 수 있다.

4.4 기준 PSD함수의 계산

식 (2)로부터 계산된 100개의 PSD함수를 이용하여 식 (5)에 따라 평균 PSD함수를 계산하고 다시 진동수를 기준으로 이동평균을 취한 PSD함수를 계산한다. 계산된 PSD함수를 설계기준화 하기 위하여 구간별로 선형화한다. 선형화를 위한 구간의 경계는 설계 응답스펙트럼의 구간과 동일한 구간을 취한다. 2장에서 기술된 절차에 따라 4개 유형으로 구분된 설계 응답스펙트럼에 대하여 구간별로 선형화된 PSD함수 $S_T(\bar{w})$ 를 그림 6과 표 7과 같이 얻었다. $S_T(\bar{w})$ 로부터 식 (9)와 같이 계수 γ 를 곱하여 최소요구 PSD함수 $S_{MIN}(\bar{w})$ 를 얻는다.

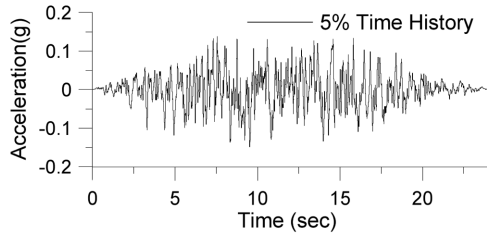
$$S_{MIN}(\bar{w}) = \gamma S_T(\bar{w}) \quad (9)$$

여기서 최소요구 PSD함수는 입력운동으로 사용되는 시간이력의 PSD함수가 최소로 만족해야 하는 수준이며, 계수 γ 는 2장의 절차에서 기술한 바와 같이 0.8을 적용하였다.

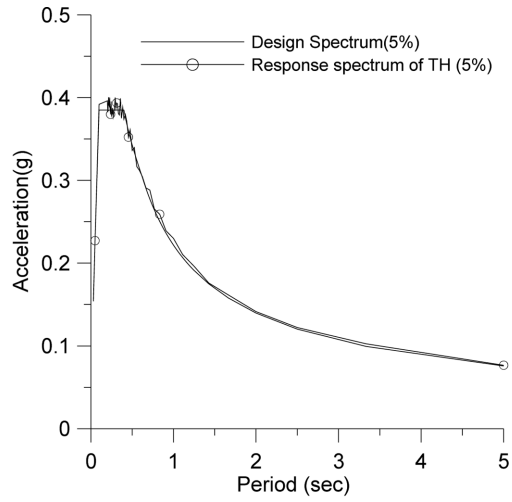
최종적으로 4개의 설계 응답스펙트럼 유형에 대응하는 최소요구 PSD함수식에 식 (10)과 같이 가속도계수의 제곱을 곱하면 해당 설계 응답스펙트럼에 부합하는 최소요구 PSD함수인 $S_O(\bar{w})$ 를 얻는다.

표 7. 설계 응답스펙트럼에 대응되는 기준 PSD함수

Case		Control point			
		1st	2nd	3rd	4th
I	Period(sec)	0.04	0.10	0.33	3.33
	PSD(cm ² /sec ³)	10.69	419.10	2060.87	1431.55
II	Period(sec)	0.04	0.10	0.44	3.33
	PSD(cm ² /sec ³)	9.84	407.67	2897.82	2139.39
III	Period(sec)	0.04	0.10	0.66	3.33
	PSD(cm ² /sec ³)	8.42	376.84	4823.86	3734.30
IV	Period(sec)	0.04	0.10	0.94	3.33
	PSD(cm ² /sec ³)	7.49	368.79	7835.48	6968.47



(a) 인공 시간이력



(b) 시간이력의 감쇠비 5% 응답스펙트럼

그림 7. 내진설계 응답스펙트럼에 부합하는 인공 시간이력 (I등급 교량, 지진구역I, 연암, 감쇠비=5%)

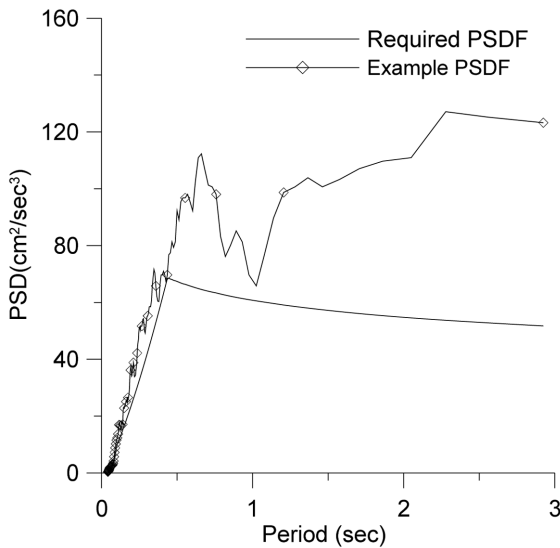


그림 8. 인공 시간이력의 PSD함수와 최소요구 PSD함수의 비교

$$S_O(\bar{\omega}) = A^2 S_{MIN}(\omega) \quad (10)$$

4.5 설계 응답스펙트럼과 최소요구 PSD함수를 만족하는 시간이력 작성

지금까지 국내 교량에 대한 설계 응답스펙트럼의 특성에 부합하는 PSD함수 작성절차를 구체적으로 기술하였다. 작성된 최소요구 PSD함수 기준의 타당성을 확인하기 위하여 실제 내진설계에서 적용할 수 있는 설계 응답스펙트럼의 형태를 선정하고, 스펙트럼 조건을 만족하는 인공 시간이력을 생성하여 최소요구 PSD함수와 비교하였다. 예제 해석에서 사용된 내진설계 조건은 국내 I등급 교량(재현주기 1000년), 지진구역I이며, 대상지반은 연암을 선정하였다. 주어진 설계조건의 가속도 계수는 0.154이며, 설계 응답스펙트럼 조건을 만족하는 지속시간 24초의 인공 시간이력을 생성하였다. 그림 7(a)는 중력가속도 g값을 기준으로 예제해석을 위해 생성된 인공 시간이력이며, 그림 7(b)는 시간이력의 감쇠비 5% 응답스펙트럼과 설계 응답스펙트럼을 함께 비교한 그래프이다. 식 (2)를 적용하여 일차적으로 PSD함수를 계산하

고 진동수를 기준으로 $\pm 20\%$ 범위의 PSD함수 값들의 평균 값을 취하는 이동평균 작업을 거쳐 얻어진 인공 시간이력의 PSD함수는 최소요구 PSD함수를 만족함을 알 수 있으며, 그림 8에 비교결과를 나타내었다.

5. 결 론

본 연구에서는 국내 교량의 지진응답해석에서 사용되는 입력운동을 결정할 때, 입력운동의 요건으로서 정의되는 설계 응답스펙트럼에 부합하는 PSD함수 작성절차를 기술하고 설계요건으로 사용 가능한 최소요구 PSD함수를 제안하였다. 또한 PSD함수 작성절차의 일환으로서 감쇠비 5%의 설계 응답스펙트럼으로부터 감쇠비 2% 설계 응답스펙트럼을 새로 정의 하였으며, 미국 원자력규제위원회 내진설계 기준의 내용을 기본으로 PSD함수를 도출하였다. PSD함수의 계산과정에서 안전성을 보장하기 위하여 기준이 되는 감쇠비 2%의 설계응답스펙트럼과 이를 만족하는 시간이력을 생성하여 설계 응답스펙트럼과 이에 대응되는 최소요구 PSD함수를 비교함으로써 본 연구로부터 제시된 절차와 PSD함수가 적정함을 보였다.

감사의 글

이 논문은 건설교통 R&D정책 인프라사업, “성능중심의 건설기준 표준화”과제 (’06~’11) 연구결과의 일부입니다.

참고문헌

- 건설교통부(2005) 도로교설계기준.
- 대한토목학회(2005) 케이블강교량설계지침(안).
- Bendat, J.S. and Piersol, A.G. (1986) *Random Data - Analysis and Measurement Procedure*. 2nd Ed., John Wiley & Sons, New York.
- Choi, D.-H. and Lee, S.-H. (2006) Multi-damping earthquake design spectra-compatible motion histories. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 226, No. 12., pp. 221-230.
- Gasparini, D.A. and Vanmarcke, E.H. (1976) *Simulated Earth-*

- quake Motions Compatible with Prescribed Response Spectra*, Evaluation of Seismic Safety of Buildings Report No. 2, Publication No. R76-4, Dept. of Civil Eng., MIT, Cambridge, Massachusetts.
- Lee, Y.I., Kim, J.S., Lee, S.H., and Rieck, P.J. (1993) Impact of power spectral density function licensing requirement on Replicate Nuclear Power Plant Seismic Design. *12th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*, K01/7, pp. 31-36.
- Mertens, P.G. and Preumont, A. (1997) Improved generation and application of artificial time histories and PSD functions *Trans. of the 14th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*, Lyon, France, pp. 333-341.
- Park, Y.J. (1992) Nonlinear 3-D piping analysis under stochastic dynamic Loads: response spectrum approach, *ASME/PVP Conf.*, ASME, New York, N.Y., Vol. 237-1, pp. 217-222.
- Park, Y.J. (1995) New conversion method from response spectrum to PSD functions. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 121, No. 12.
- Pfaffinger, D.D. (1983) Calculation of power spectra from response spectra *J. of Engrg. Mech. Div., ASCE*, Vol. 115, No. 1, pp. 357-372.
- Philippacopoulos, A. J. (1989) *Recommendations for Resolution of Public Comments on USI A-40, Seismic Design Criteria*, NUREG/CR-5347, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Brookhaven National Laboratory.
- Shinozuka, M., Mochio, T., and Samaras, E.F. (1988) *Power Spectral Density Functions Compatible with NRC Regulatory Guide 1.60 Response Spectra*, NUREG/CR-3509, Department of Civil Engineering and Engineering Mechanics, Columbia University in the City of New York.
- U.S. NRC (1973) *Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants*, Regulatory Guide 1.60, Rev. 1.
- U.S. Nuclear Regulatory Commission (1989) *Standard Review Plan-Section 3.7.1*, Revision 2.
- (접수일: 2007.6.13/심사일: 2007.10.23/심사완료일: 2007.11.13)