

구조물 동적해석을 위한 현행 내진설계기준의 입력 지반 운동 선정 조건 타당성 평가 - I 선정방법

Assessment of Code-specified Ground Motion Selection Criteria with Accurate Selection and Scaling Methods - I Ground Motion Selection

하성진¹⁾ · 한상환^{2)*} · 지현우²⁾

Ha, Seong Jin¹⁾ · Han, Sang Whan^{2)*} · Ji, Hyun Woo²⁾

¹⁾한국전력공사 전력연구원, ²⁾한양대학교 건축공학과

¹⁾Korea Electric Power Research Institute, ²⁾Department of Architecture, Hanyang University

/ A B S T R A C T /

For estimating the seismic demand of buildings, most seismic design provisions permit conducting linear and nonlinear response history analysis. In order to obtain reliable results from response history analyses, a proper selection of input ground motions is required. In this study, an accurate algorithm for selecting and scaling ground motions is proposed, which satisfies the ASCE 7-10 criteria. In the proposed algorithm, a desired number of ground motions are sequentially scaled and selected from a ground motion library without iterations.

Key words: Seismic design provision, Response history analysis, Ground motion, Selection, Algorithm

1. 서론

현행 내진설계기준(ASCE 7-10[1], Eurocode 8[2], NZS1170.5:2004[3])에서는 구조물의 지진응답을 결정하기 위하여 등가정적해석(equivalent lateral force analysis), 모드응답스펙트럼(modal response spectrum analysis), 선형 및 비선형 시간이력해석(linear and nonlinear response history analyses)과 같은 해석방법들을 사용할 수 있도록 허용한다. 이중 등가정적해석은 낮은 내진설계범주(SDC)로 분류된 건물이나 일정높이 이하의 정형 건물에만 허용된다. 높은 SDC로 분류된 건물이나, 일정높이 이상의 고층건물이나 비정형 건물은 모드스펙트럼 해석이나 선형 및 비선형 시간이력해석과 같은 동적 해석을 수행하여야 한다. 시간이력해석은 인공 또는 실제 지반운동가속도를 입력하중으로 사용하므로 구조물의 정확한 응답 평가가 가능하다.

현행 내진설계기준인 ASCE 7-10[1]에서는 구조물의 동적해석에 필요한 입력 지반운동을 선정하기 위해 특정 지진 재해 수준에 대하여 대상 지역의 예상 가능한 지진 규모, 거리, 지반 조건, 단층 형태 등을 고려해야 하며, 선정된 지반운동의 응답 스펙트럼이 목표 스펙트럼(설계스펙트럼, 등재해

도스펙트럼)에 유사하게 조정하도록 요구하고 있다. 이에 따라 목표 스펙트럼에 적합한 지반운동 선정 방법과 관련한 연구들이 다수 진행되어 왔다(Shantz[4], Ay and Akkar[5], Han and Seok[6], Ha and Han[7]).

Ay and Akkar[5]는 지진 라이브러리 내에서 가능한 모든 지반운동들의 조합을 고려하여 목표 스펙트럼의 평균에 유사한 다수의 지반운동 응답 스펙트럼 선정 알고리즘을 제안하였다. 이 방법은 목표스펙트럼에 잘 맞는 지반운동을 정확하게 선정할 수 있지만 지진라이브러리 내의 지반운동이 많은 경우 가능한 조합수가 급격하게 증가되어 지반운동 선정을 위하여 많은 소요 시간을 필요로 한다. 이러한 과도한 시간 요구를 해결하기 위하여 Kottke and Rathje[8]는 모든 지반운동의 조합을 고려하는 대신 지반운동은 순차적으로 선정하는 알고리즘을 개발했다. 그러나 이 방법은 지반운동의 크기를 조절하는 과정이 매우 복잡하고, 지반운동 데이터베이스의 크기가 증가할수록 여전히 과도한 소요 시간을 요구하게 된다.

최근에는 많은 수의 지반운동을 보유한 라이브러리에서 다수의 지반운동을 효율적으로 선정할 수 있는 시뮬레이션 기반의 선정 방법이 개발되었다(Jayaram et al.[9], Wang[10], Han et al.[11]). 이 방법은 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 목표 스펙트럼과 유사한 지반운동 응답 스펙트럼을 효율적으로 선정할 수 있지만, 시뮬레이션 기반의 지반운동 선정 방법은 절차가 까다롭고 동일한 목표 스펙트럼과 지진 데이터베이스를 사용하더라도 선정 결과가 매번 달라진다.

*Corresponding author: Han, Sang Whan

E-mail: swan@hanyang.ac.kr

(Received March 8, 2017; Revised June 8, 2017; Accepted June 16, 2017)

본 연구에서는 구조물의 2차원 동적해석을 위해 필요한 지반운동을 선정하기 위하여, 현행 내진설계기준의 요구조건에 부합하는 지반운동 선정 알고리즘을 개발하였다. 제안된 방법은 기존의 방법과 달리, 목표 스펙트럼에 근사한 응답 스펙트럼을 갖는 지반운동을 순차적으로 선정하며, 선정된 응답 스펙트럼의 분산을 매우 최소화할 수 있는 방법이다.

2. ASCE 7-10 지반운동 선정 조건

본 연구에서는 단자유도 시스템의 2차원 해석에 필요한 효율적인 지반운동 선정 방법을 제안하였다. ASCE 7-10[1] 16.1.4절에 따르면 2차원 동적 해석에서는 사용된 지반운동의 수가 7개 이하인 경우, 설계 부재력과 설계 층간 변위와 같은 요구 설계 응답은 사용된 모든 지반운동으로 얻은 지진 응답 중 최댓값으로 결정하도록 하고 있다. 반면, 7개 이상의 지반운동을 사용할 경우에는 설계 응답이 사용된 모든 지반운동으로 얻은 지진 응답의 평균을 사용하여 결정할 수 있다.

ASCE 7-10[1] 16.1.3절에서는 구조물의 동적 해석을 수행하기 위해 필요한 입력 지반운동의 선정 요구 조건을 명시하고 있다. 여기서, 해석에 필요한 지반운동의 수는 최소 3개 이상이며, 실제 지반운동기록을 구할 수 없는 경우에는 필요한 수만큼 적절한 모의 지반운동을 생성하여 사용할 수 있도록 하고 있다. 그리고 2차원 해석을 수행하는 경우에는 선정된 지반운동들의 5% 감쇠비 응답 스펙트럼의 평균값이 $0.2 T_n$ (T_n =고유주기)에서 $1.5 T_n$ 의 범위의 설계스펙트럼보다 작지 않도록 조정하여야 한다. 만약 3차원 해석을 수행하는 경우, 각 지반운동은 지반운동 가속도의 수평성분 쌍으로 구성된다. 그리고 개별 지반운동의 성분별로 5% 감쇠비의 응답스펙트럼을 작성한 뒤, 주기별로 제곱합제곱근 (SRSS) 스펙트럼을 계산하고 이 SRSS 스펙트럼의 평균이 설계스펙트럼보다 작지 않도록 조정해야 한다. 지반운동의 크기를 조절해야 하는 경우에는 두 수평성분에 대해 동일한 배율조정계수를 적용하여야 한다.

그러나 위 ASCE 7-10[1]의 지반운동 선정 조건에서는 선정된 지반운동에 대한 고유의 배율조정계수 결정 절차에 대해서 언급하고 있지 않다 (Reyes and Kalkan[12]). Fig. 1은 임의의 설계스펙트럼에 대하여 ASCE 7-10[1]의 요구 조건에 적합하도록 선정된 7개의 지반운동의 평균 응답 스펙트럼을 나타내고 있다.

Fig. 1(a)~(c)에서, 사용된 지반운동은 모두 동일하고 유사한 평균 응답 스펙트럼을 갖지만, 사용된 배율조정계수에 따라 응답 스펙트럼의 편차에 큰 차이를 나타내고 있다. 이러한 이유로 ASCE 7-10[1]의 요구 조건에 명확히 부합하는 하나의 특정한 지반운동 집단을 선정하는 것이 매우 어렵다.

3. 지반운동 선정 방법 제안

3.1 목표 스펙트럼 및 지진 라이브러리

본 연구에서 사용한 목표 스펙트럼은 ASCE 7-10[1]에서 제시한 설계 스펙트럼으로써 KBC 2016[13]에 따른 지진구역계수 (S)는 0.22 g이고 지반종류는 S_B 인 것으로 가정하였고 단층 형태는 고려하지 않았다. 그리고 PEER에서 제공하는 NGA database (Chiou[14])로부터 다음의 조건을 갖는 72개의 지반운동을 수집하여 지진 라이브러리를 구축하였다.

- 지진 규모 (M) : 6.5 ~ 7.4
- Joyner-Boore distance (R_{JB}) : 10 ~ 20 (km)
- 전단파속도 (V_{S30}) : 360 ~ 1500 (m/s)

Fig. 2에서 본 연구에서 사용된 설계스펙트럼과 지진 라이브러리 내 지반운동의 응답 스펙트럼을 함께 나타내고 있다.

3.2 지반운동의 배율조정

본 연구에서는 ASCE 7-10[1] 조건에 적합한 지반운동을 선정하기 위하여 정확하고 효율적인 방법을 제안한다. ASCE 7-10[1]에서 지반운동의 조정을 허용하므로 본 연구에서 제안된 방법에서도 지반운동의 조정을 허용하여 선정한다. 하지만 본 방법은 지반운동 조정을 허용하지 않는 경우에도 적용이 가능하다. 우선 지진 라이브러리 내 모든 지반운동들에 대하여 목표 스펙트럼과 유사한 크기를 갖도록 조정한다. 이렇게 라이브러리 내의 모든 지반운동을 조정된 후 원하는 수의 지반운동을 선정하면 선정된 지반운

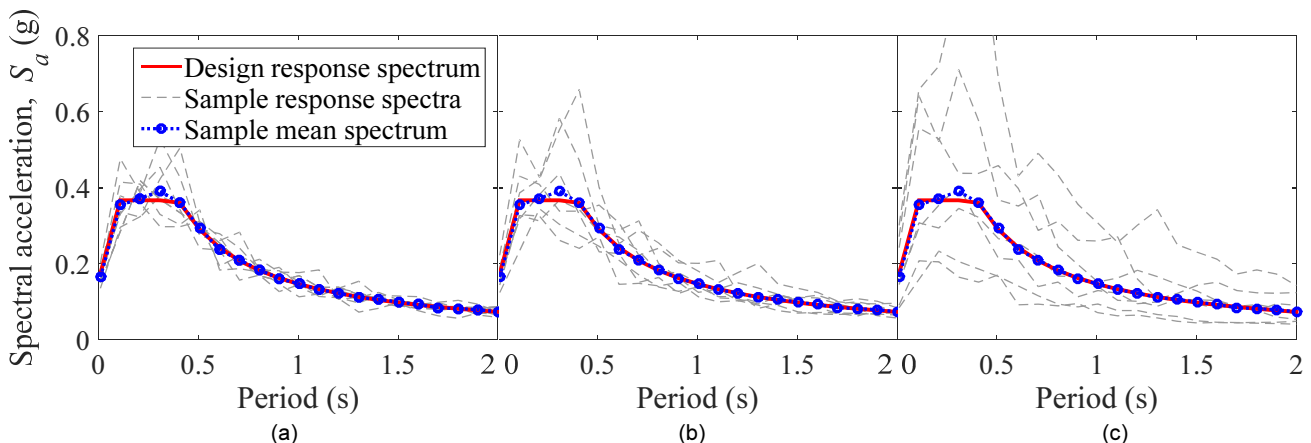


Fig. 1. Design response spectrum and sample mean and individual response spectra of 7 ground motions calibrated with different scaling factors

동들의 응답스펙트럼의 분산이 감소한다. 이에 대한 결과는 다음 절의 예제로부터 자세히 설명되어 있다.

먼저, 라이브러리 내의 개별적인 지반운동이 목표스펙트럼과 근접하도록 하기 위한 조정계수(s)의 선정은 반복계산이 필요 없는 Han and Seok[6]의 연구에 따라 결정한다. 대상 지반운동들에 대한 배율 조정계수는 다음 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\mu_{\Delta} = \frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} \Delta_i = \frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} [\ln S_a^{target}(T_i) - \ln S_a(T_i)] \quad (1)$$

$$s = \exp(\mu_{\Delta}) \quad (2)$$

여기서, $\ln S_a^{target}(T_i)$ 와 $\ln S_a(T_i)$ 는 각각 주기 T_i 에서 로그 목표스펙트럼과 지반운동의 로그 응답스펙트럼이다. Fig. 3(a)에는 라이브러리 내 하나의 지반운동에 대하여 위의 절차를 따른 스케일링 전후의 지반운동 응답스펙트럼과 설계스펙트럼이 나타나 있다. 스케일링은 ASCE 7-10[1]에 따라

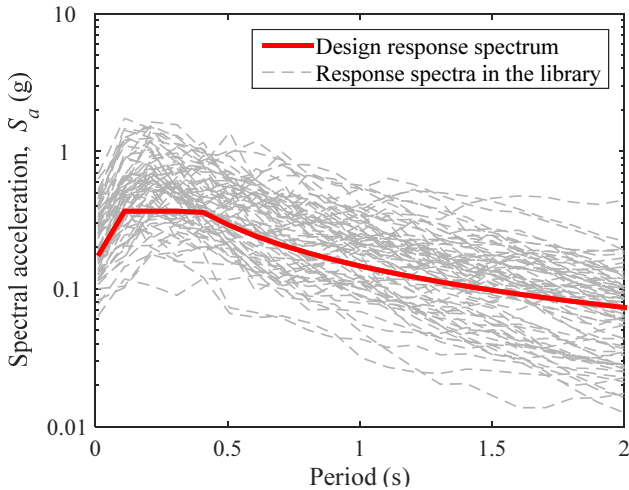
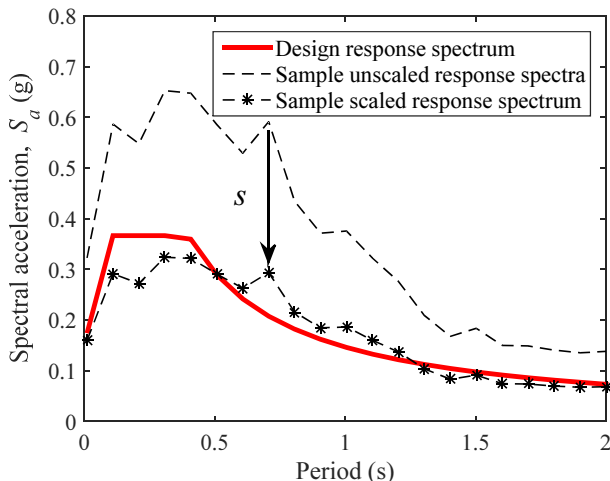


Fig. 2. Target response spectrum and sample response spectra of ground motions in the library



(a) finding scale factor

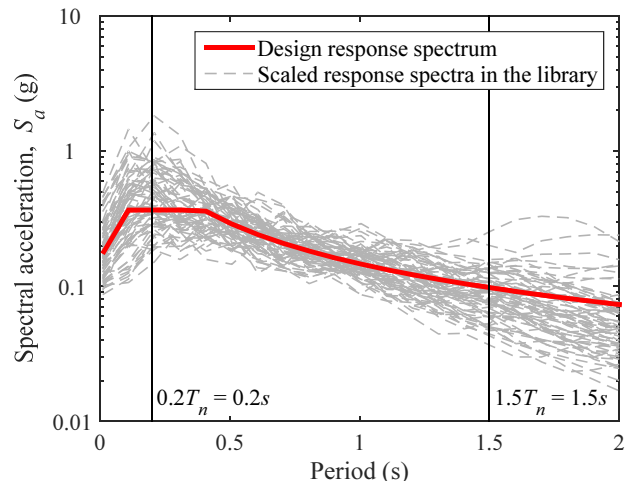
구조물의 고유주기 (T_n)를 1초로 가정하여 $0.2T_n - 1.5T_n$ 에 대하여 수행하였다. Fig. 3(b)는 지반운동의 수가 72개인 라이브러리의 모든 지반운동들의 개별적인 응답스펙트럼이 주기가 $0.2s$ ($0.2T_n$)에서 $1.5s$ ($1.5T_n$) 범위의 목표 (설계)스펙트럼에 근접하도록 식(1)과(2)를 이용하여 조정한 것이다. 라이브러리 내 모든 지반운동 응답스펙트럼을 목표스펙트럼과 유사하도록 배율조정하게 되면 라이브러리 내의 지반운동 응답스펙트럼의 $0.2T_n$ 에서 $1.5T_n$ 까지의 분산이 조정전의 지반운동의 응답스펙트럼들의 분산 (Fig. 2)에 비하여 매우 작아진다.

3.3 7개 미만의 지반운동 선정 방법

ASCE 7-10[1] 16.1.4에 따르면 3개에서 7개 미만의 지반운동을 선정할 경우, 구조물의 내진 설계를 위한 요구응답은 선정된 지반운동들을 사용하여 해석한 구조물의 응답들의 최댓값을 사용하도록 요구한다. 본 연구에서는 설계스펙트럼과 잘 일치하도록 조정된 라이브러리의 모든 지반운동 중 일치 정도가 가장 높은 원하는 수의 지반운동을 순차적으로 선정한다. 각 개별적 지반운동의 목표스펙트럼과의 일치 정도는 식 (3)에 따라 각 주기 (T_i)의 로그 목표스펙트럼 ($\ln S_a^{target}(T_i)$)과 배율 조정된 지반운동의 로그 응답스펙트럼 ($\ln s \times S_a(T_i)$)의 차이의 제곱을 주어진 범위의 모든 주기에 대하여 누적한 sum of squared error (SSE)를 이용하여 계산할 수 있다. 즉 SSE 값이 적을수록 목표스펙트럼과 지반운동의 스펙트럼 사이의 일치 정도가 높아지는 것이다.

$$SSE = \sum_{i=1}^{n_p} [\ln S_a^{target}(T_i) - \ln s \times S_a(T_i)]^2 \quad (3)$$

Fig. 4(a)에는 구조물의주기 (T_n) 1초로 가정하여 0.2초 ($0.2T_n$)와 1.5초 ($1.5T_n$) 범위 내에서 지반운동 라이브러리 안의 184개 지반운동 중 가장 SSE가 작은 3개의 지반운동은 편차가 매우 적은 것을 알 수 있다. 이 그림에서 보이는 것처럼 세 개의 선정된 지반운동이 주어진 범위 내에서 설계스펙트럼과 매우 잘 일치한다. 따라서 본 연구에서 제안한 7개 미만의 지반운



(b) scaled response spectra

Fig. 3. Design response spectrum and scaled sample response spectra in the library

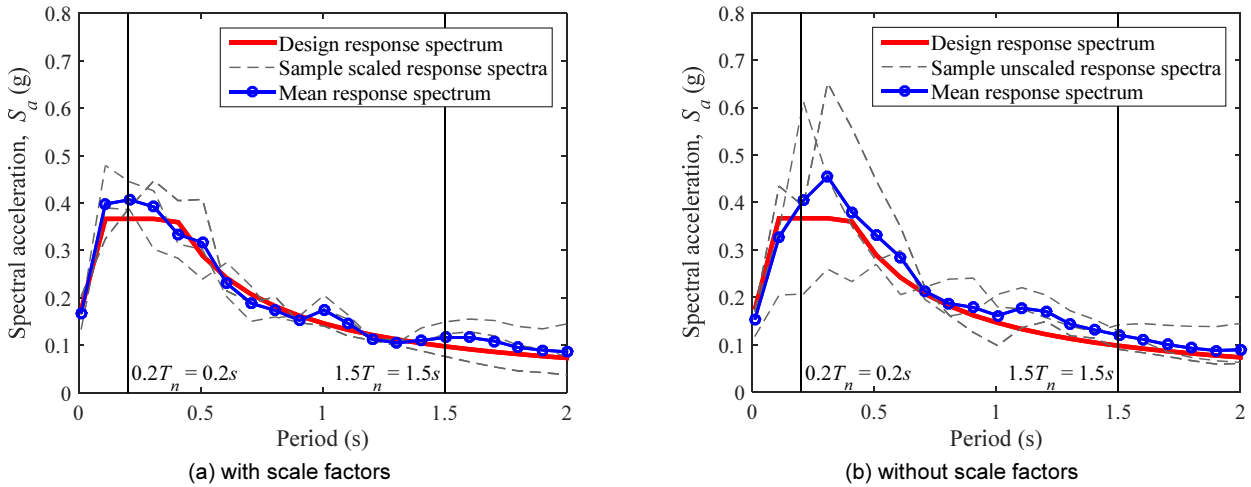


Fig. 4. Design response spectrum and selected 3 sample response spectra

동 선정 방법은 목표스펙트럼과 매우 근접한 지반운동을 선정할 수 있는 것이라 할 수 있다. Fig. 4(b)는 라이브러리의 스케일 하지 않은 지반운동을 이용하여 세 개의 지반운동을 찾은 결과이다. Fig. 4(a)와 비교하면 Fig. 4(b)의 스펙트럼들의 분산이 더 큰 것을 알 수 있다. 따라서 라이브러리의 지반운동을 스케일링 한 후 지반운동을 선정하면 목표 (설계)스펙트럼에 더 일치하는 지반운동을 선정할 수 있다.

3.4 7개 이상의 지반운동 선정 방법

앞에서도 언급하였지만 7개 이상의 지반운동을 선정할 경우, 선정된 지반운동들을 사용하여 해석한 구조물 요구응답들의 평균값을 내진설계에서 사용하도록 허용하고 있다(ASCE 7-10[1]). 따라서 7개 이상의 원하는 수만큼의 지반운동을 선정할 경우 개별적인 응답스펙트럼들의 평균이 $0.2T_n - 1.5T_n$ 에서 설계스펙트럼에 가장 잘 맞는 조합을 찾아내야 한다. 72개의 지반운동을 포함한 라이브러리를 사용한다면 7개를 선정할 경우 약 1.5×10^9 개의 많은 조합이 발생한다. 이를 모두 고려하여 가장 적합한 평균스펙트럼을 갖는 7개의 지반운동을 찾는 것은 매우 큰 계산량이 요구된다. 본 연구에서는 7개 이상의 지반운동을 선정할 경우 설계스펙트럼과 선정된 지반운동의 평균응답스펙트럼이 가장 잘 일치하는 지반운동을 선정하기 위한 방법을 다음과 같이 제안한다. 7개 이상의 지반운동을 선정하는 경우에도 라이브러리의 모든 지반운동은 3.2절에 따라 설계스펙트럼 또는 목표 스펙트럼에 근접하도록 조정된 후 아래 기술한 방법에 따라 지반운동을 라이브러리의 조정된 지반운동들 중 순차적으로 선정한다.

3.4.1 첫 번째 지반운동 선정 ($k=1$)

첫 번째 지반운동은 지진 라이브러리 내에서 목표 스펙트럼과 가장 유사한 응답 스펙트럼을 갖는 지반운동으로 결정한다. 두 스펙트럼의 일치 정도는 3.3절의 식(3)의 SSE 를 이용하여 평가할 수 있으며, 지진 라이브러리 내에서 SSE 가 가장 작은 지반운동이 첫 번째 지반운동으로 정해진다. 즉, 7개 미만의 지반운동을 선정할 경우와 7개 이상의 지반운동을 선정할 경우, 동일한 지반운동이 첫 번째 지반운동으로 선정된다.

3.4.2 $k(\geq 2)$ 번째 지반운동 선정

첫 번째 지반운동을 선정된 후, $k(\geq 2)$ 번째 지반운동은 미리 선정된 지반운동과 함께 평균 응답 스펙트럼이 목표 스펙트럼에 일치하도록 순차적으로 선정된다. 동일한 지반운동이 반복적으로 선정되는 것을 피하기 위해 미리 선정된 $k-1$ 개의 지반운동을 지진 라이브러리에서 제외시킨다. 따라서 $k(\geq 2)$ 번째 지반운동은 남아있는 $n_L - (k-1)$ 개 지반운동 중 하나로 결정된다. 목표 스펙트럼 ($\ln S_a^{target}(T_i)$)과 지반운동의 평균 응답 스펙트럼 ($\mu_{\ln S_a}(T_i)$)의 일치 정도는 다음의 식들을 통해 계산된다.

$$SSE_s = \sum_{i=1}^{n_s} [\ln S_a^{target}(T_i) - \mu_{\ln S_a}(T_i)]^2 \quad (4)$$

$$\mu_{\ln S_a}(T_i) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k [\ln s_j \times S_{aj}(T_i)] \quad (5)$$

여기서, $\ln s_j \times S_{aj}(T_i)$ 는 $j(\leq k)$ 번째 배율 조정된 지반운동의 로그 응답 스펙트럼으로 라이브러리의 조정된 지반운동들 중 선정된 하나이다. $k(\geq 2)$ 번째 지반운동을 선정하기 위해, 미리 선정된 $k-1$ 개 지반운동과 라이브러리 내의 하나의 후보 지반운동에 대해 식(4)의 SSE_s 를 계산한다. $n_L - (k-1)$ 개의 지반운동이 라이브러리 내에 남아있으므로 총 $n_L - (k-1)$ 개의 SSE_s 를 얻는다. 그 중, 가장 작은 SSE_s 를 만드는 지반운동이 $k(\geq 2)$ 번째 지반운동으로 선정된다. Fig. 5는 이미 선정된 첫 번째 지반운동과 라이브러리 내 남아있는 지반운동들 중 서로 다른 세 후보 지반운동에 대한 평균 응답스펙트럼을 나타내고 있다 ($k=2$). 이들 중 Fig. 5(a)의 후보 지반운동이 가장 적은 $SSE_s (= 0.05)$ 를 가지며 설계스펙트럼과 가장 유사하다. 따라서 이들 중에서는 Fig. 5(a)의 지반운동이 두 번째 ($k=2$) 지반운동으로 선정된다. 이 작업은 k 가 원하는 지반운동의 개수 ($=n_g$)가 선정 될 때까지 반복된다. Fig. 6(a)는 주기 1초의 구조물에 대해 0.2초와 1.5초 범위 안에서 라이브러리에 포함된 72개의 조정된 지반운동 중 제안된 방법으로 선정된 7개 지반운동 응답 스펙트럼과 설계스펙트럼을 함께 나타낸 것인데, 지반운동의

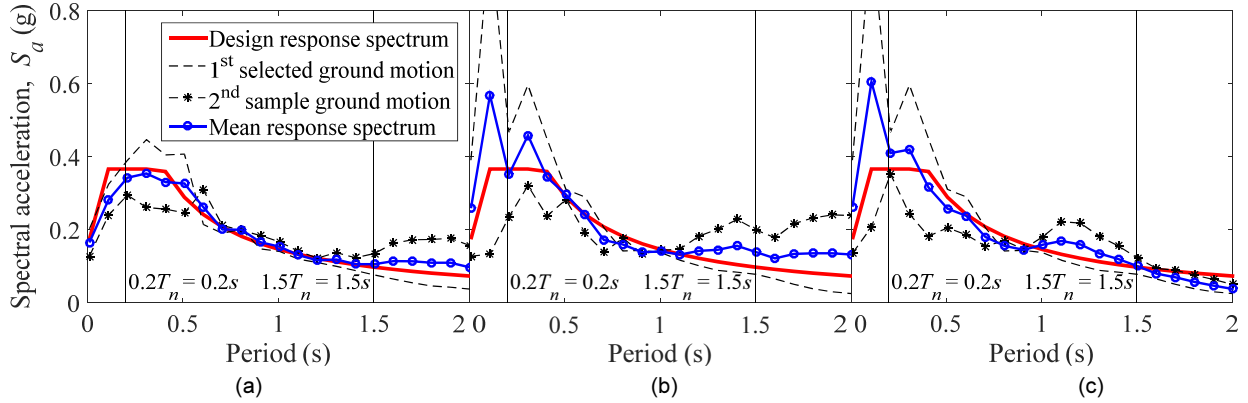


Fig. 5. Target and sample mean response spectrum

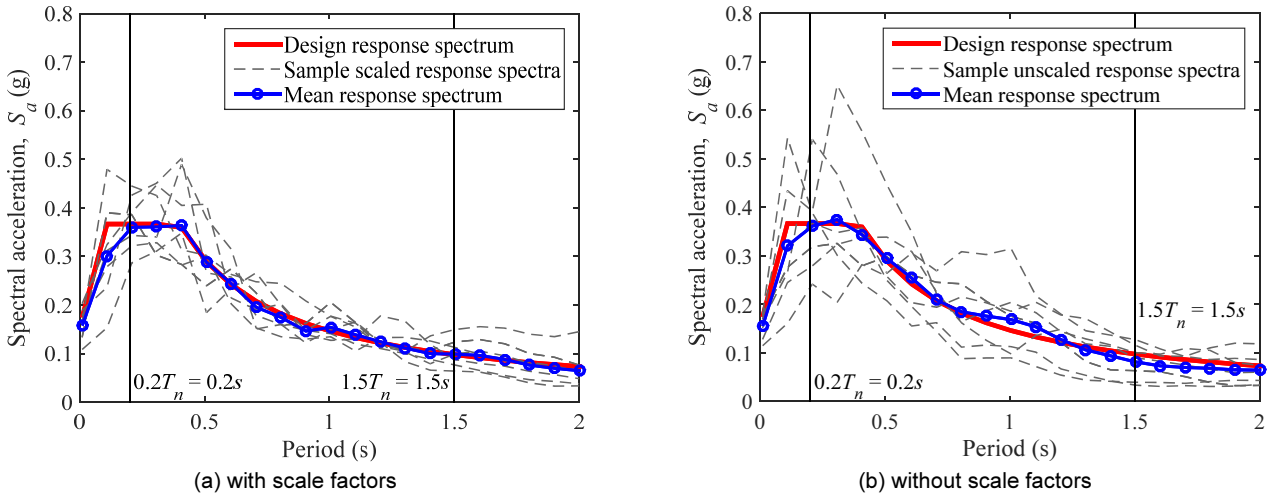


Fig. 6. Design response spectrum and selected 7 sample response spectra

평균 응답 스펙트럼이 설계스펙트럼과 매우 유사하다. 선정된 지반운동의 편차는 매우 적은 것을 알 수 있다. Fig. 6(b)는 라이브러리의 스케일 하지 않은 지반운동을 이용하여 제안된 방법으로 7개의 지반운동을 찾은 결과이다. Fig. 6(b)의 선정된 지반운동들의 스펙트럼의 분산이 Fig. 6(a)의 조정된 지반운동을 사용하여 선정된 지반운동의 응답스펙트럼의 분산보다 더 큰 것을 알 수 있다. 따라서 라이브러리의 지반운동을 스케일링 한 후 지반운동을 선정하는 것이 더 분산이 적은 정확한 선정 결과를 주는 것이라 할 수 있다.

3.4.3 지반운동 재조정

3.4.1과 3.4.2절의 절차에서 선정된 지반운동은 설계스펙트럼과 매우 유사한 평균 응답 스펙트럼을 가지지만, ASCE 7-10[1] section 16.1.3.1에서는 지반운동 평균 응답 스펙트럼이 목표 (설계) 스펙트럼보다 작지 않도록 요구하고 있다. 따라서 선정된 지반운동들은 평균 응답 스펙트럼이 정해진 주기 범위 내에서 설계스펙트럼보다 더 큰 값을 갖도록 하기 위하여 재조정되어야 한다. 이를 위해, 식 (6)으로부터 각 주기에서의 목표 스펙트럼과 선정된 지반운동의 평균 응답스펙트럼의 차 (Δ_i)를 평가한다.

$$\Delta_i = \ln S_a^{target}(T_i) - \mu_{\ln S_a}(T_i) \quad (6)$$

여기서, $\mu_{\ln S_a}(T_i)$ 는 3.3절과 3.4.2절에서 목표 스펙트럼에 적합하도록 배율 조정하여 선정된 지반운동의 로그 평균 응답 스펙트럼이다. Δ_i 가 음의 값이면 선정된 지반운동 응답스펙트럼의 평균이 목표스펙트럼 값보다 적은 것이므로 지반운동을 조정할 필요가 없다. 따라서 각 주기에 대한 Δ_i 중 최댓값을 이용하여 식 (7)과 같이 선정된 지반운동을 재조정한다.

$$\ln s_k^* = (\ln s_k) + \max(\Delta_i) \quad (k = 1 \sim n_g) \quad (7)$$

여기서, s_k 는 3.3절 또는 3.4.2절에서 선정된 k 번째 지반운동의 배율조정 계수이고 s_k^* 는 재조정된 k 번째 지반운동의 배율조정계수이다.

Fig. 7은 Fig. 4(b)의 평균 응답 스펙트럼과 설계스펙트럼의 차이 (Δ_i)를 나타낸 그래프이다. 각 주기에 대한 Δ_i 중, 최댓값으로 Fig. 4(b)의 지반운동을 모두 재조정하면 정해진 주기 범위 내에서 설계스펙트럼보다 큰 지반운동 평균 응답 스펙트럼을 얻는다.

Fig. 8(a)와 (b)는 각각 3개의 지반운동을 선정된 Fig. 4(b)와 7의 지반운동을 선정된 Fig. 6(b)의 지반운동을 재조정 한 뒤, 평균 응답 스펙트럼을 설계스펙트럼과 함께 나타낸 것이다. 재조정 결과, ASCE 7-10[1]의 요구 조건대로 각각의 평균 응답 스펙트럼이 설계스펙트럼보다 더 큰 값을 갖는 것으로 나타났다.

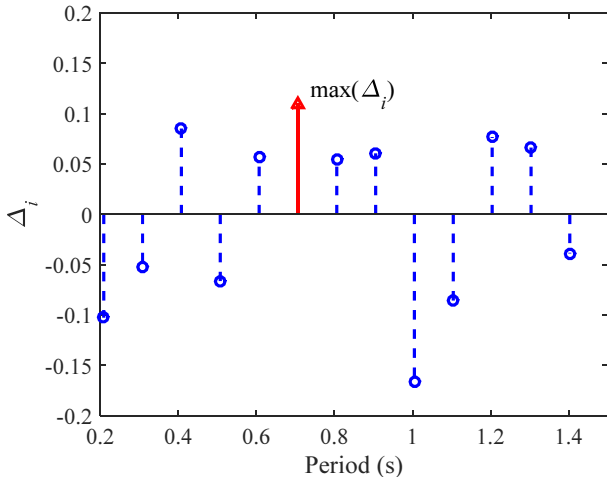
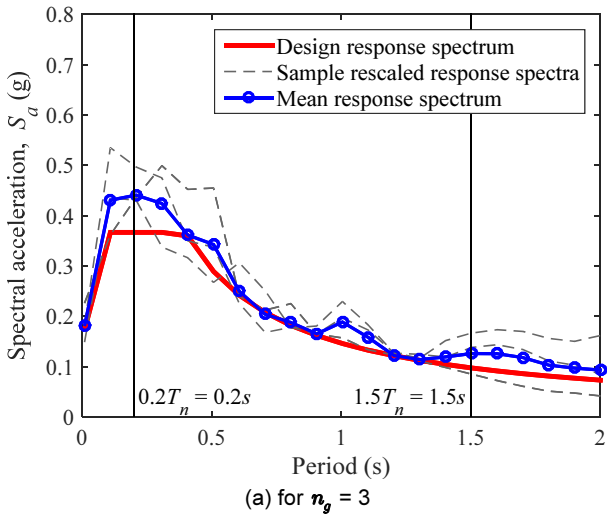
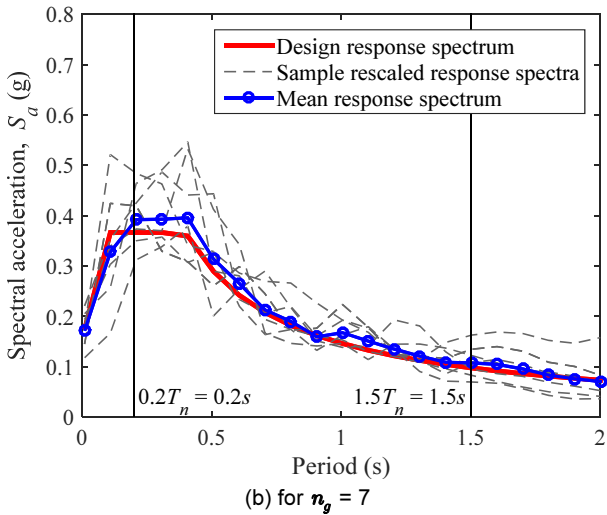


Fig. 7. Re-scale factor of selected scaled ground motions for $n_g=3$



(a) for $n_g = 3$

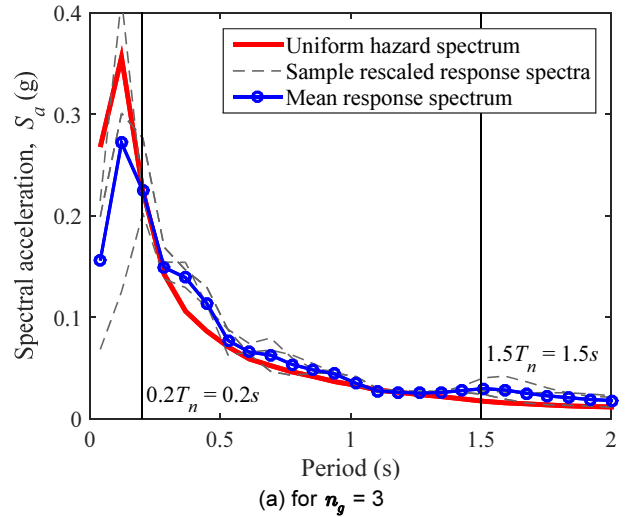


(b) for $n_g = 7$

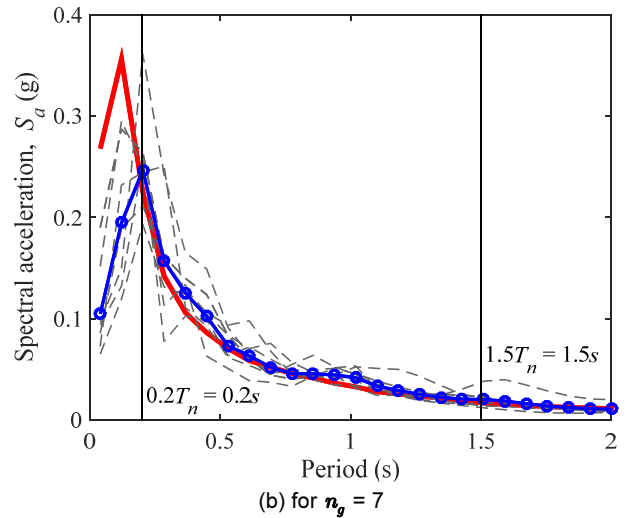
Fig. 8. Sample selected and scaled response spectra after re-scaling

4. 목표스펙트럼에 따른 지반운동 선정 결과

제안된 방법은 평균을 갖는 목표 스펙트럼에 적합한 지반운동 선정 방법으로써 본 연구에서 제시된 설계스펙트럼뿐만 아니라 등재해도 스펙트럼



(a) for $n_g = 3$



(b) for $n_g = 7$

Fig. 9. Uniform hazard spectrum and selected and scale response spectra for $T_n = 1s$

이나 조건부 평균 응답 스펙트럼에 대해서도 적용이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 등재해도 스펙트럼과 조건부 평균 응답 스펙트럼 각각에 대해서도 제안된 방법을 사용하여 지반운동을 선정하고, 결과의 타당성을 평가하였다.

4.1 등재해도 스펙트럼에 적합한 지반운동 선정

현행내진설계기준 (ASCE 7-10[1])에서는 대상 지역의 지반정보가 불명확하거나 지반종류가 S_r 인 경우에는 설계스펙트럼 대신 부지공유의 등재해도 스펙트럼을 작성하여 사용하도록 하고 있다. 등재해도 스펙트럼은 대상 지역의 확률론적 재해분석 (probabilistic seismic hazard analysis, PSHA)을 통해 작성되는 것으로써 구조물의 모든 스펙트럼 주기에서 동일한 초과확률을 갖는 응답 스펙트럼이다.

본 연구에서 사용된 등재해도 스펙트럼은 Han and Choi[15] 이 서울지역을 대상으로 작성한 것으로써, Fig. 9에는 50년에 10%의 초과확률을 갖는 서울지역의 등재해도 스펙트럼이 나타나있다. 이를 목표스펙트럼으로 하여 여왕장에서 사용한 지진 라이브러리 및 지반운동 선정 방법을 사용하여 3

Table 1. Selected ground motions for UHS (Fig. 9)

		No.	Earthquake	Year	Station	Magnitude	Scale factor
n_g	3	1	Loma Prieta	1989	UCSC, 000	6.93	0.4
		2	San Fernando	1971	LAKE HUGHES, 291	6.61	1.1
		3	Northridge	1994	SUNSET, 280	6.69	0.3
	7	1	Loma Prieta	1989	UCSC, 000	6.93	0.4
		2	Cape Mendocino	1992	FORTUNA BLVD, 090	7.01	2.6
		3	Northridge	1994	BIG TUJUNGA, 262	6.69	0.4
		4	San Fernando	1971	LAKE HUGHES, 201	6.61	0.4
		5	Northridge	1994	BIG TUJUNGA, 352	6.69	0.3
		6	Loma Prieta	1994	UCSC, 090	6.69	0.2
		7	Northridge	1994	T. CANYON FS, 270	6.69	0.4

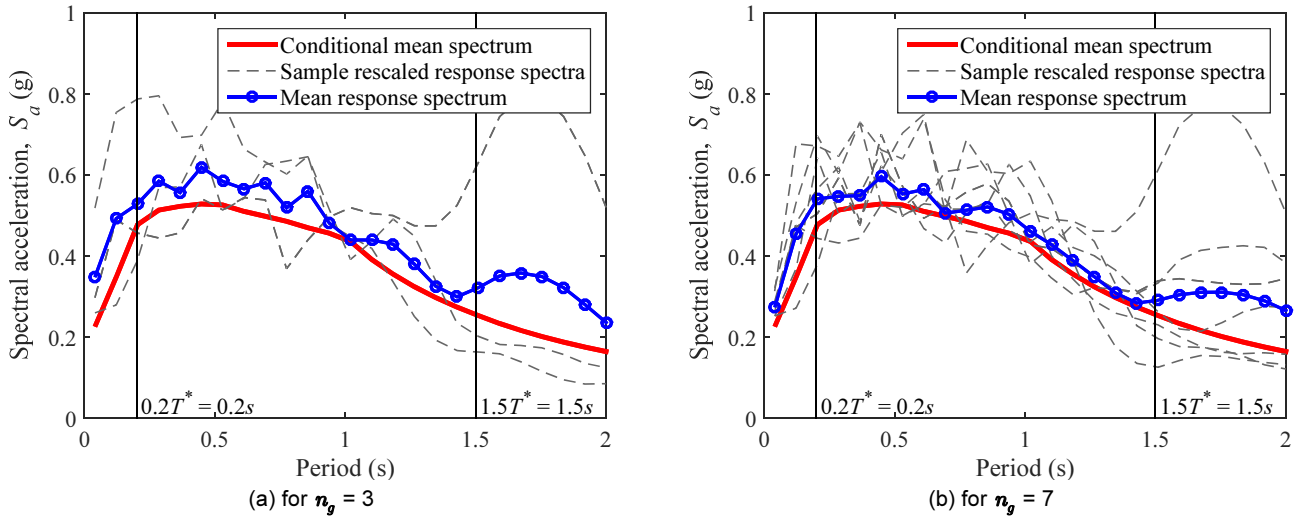


Fig. 10. Conditional mean response spectrum and selected and scale response spectra for $T^* = 1s$

개 및 7개의 지반운동을 선정하여 각각 Fig. 9(a)와 (b)에 나타냈다. 구조물의 고유주기를 1s로 가정하여 선정된 결과, 실제스펙트럼을 목표스펙트럼으로 사용한 것과 마찬가지로 선정된 지반운동 응답 스펙트럼이 주어진 주기 범위 ($0.2T_n^* - 1.5T_n^*$) 내에서 등재해 스펙트럼과 유사하며 평균 응답스펙트럼은 등재해 스펙트럼보다 작지 않은 것으로 나타났다. 선정된 지반운동과 배율조정계수는 Table 1에 정리되어있다.

4.2 조건부 응답 스펙트럼에 적합한 지반운동 선정

조건부 응답 스펙트럼은 구조물의 고유 주기 혹은 미리 결정된 하나의 특정 구조물 주기 (T^*)에 대하여, 지반운동 응답 스펙트럼의 크기와 형상을 고려하여 결정되는 목표스펙트럼으로써, Baker[16]에 의해 제안되었다.

이 스펙트럼은 등재해도 스펙트럼 또는 설계스펙트럼이 모든 스펙트럼 주기에서 동일한 초과확률을 갖기 때문에, 이들 스펙트럼을 목표스펙트럼으로 하여 얻은 지반운동을 사용하여 해석할 경우에 발생할 수 있는 과도한 해석 결과를 보완하기 위해 개발되었다. 또한, 실제 계측된 지반운동의 경우, 모든 주기에서 동일한 초과확률을 갖는 스펙트럼은 존재하지 않는다.

조건부 응답스펙트럼을 작성하기 위한 식은 다음과 같다.

$$\mu_{\ln S_d(T_i) | \ln S_d(T^*)} = \mu_{\ln S_d}(M, R, T_i, etc) + \rho(T_i, T^*) \epsilon(T^*) \sigma_{\ln S_d}(T_i) \tag{8}$$

여기서, $\mu_{\ln S_d(T_i) | \ln S_d(T^*)}$ 는 구조물 고유주기 (T^*)에 대한 i 번째 주기 T_i 에서의 조건부 응답스펙트럼이고, $\mu_{\ln S_d}(M, R, T_i, etc)$ 와 $\sigma_{\ln S_d}(T_i)$ 는 각각 지반운동예측식으로부터 결정되는 시나리오 응답스펙트럼의 평균과 분산이다. 그리고 $\rho(T_i, T^*)$ 는 주기 T^* 와 T_i 사이의 지반운동 상관관계이고 $\epsilon(T^*)$ 는 T^* 의 스펙트럼형상이다. 자세한 조건부 응답스펙트럼 작성 절차는 Baker[16]에 제시되어 있다.

본 연구에서 사용된 조건부 응답 스펙트럼의 지진 시나리오는 지진 규모가 M7.0, 진원거리는 30 km, 전단파속도는 760 m/s, 단층 형태는 주향 이동단층 (strike-slip fault)을 갖는 것으로 가정하였다. 이 정보를 이용하여 Boore and Atkinson[17]이 제안한 지반운동예측식 (ground motion prediction equation)을 사용하여 Baker[16]의 절차를 따라 조건부 응답 스펙트럼을 작성하였다. 이때, 구조물의 고유주기는 1s이고 응답 스펙트럼 형상 계수 (shape factor, ϵ)는 2인 것으로 가정하였으며 작성된 조건부 응답 스펙트럼이 Fig. 10에 나타나있다.

등재해도 스펙트럼과 마찬가지로 동일한 지진 라이브러리를 사용하여 제안된 방법으로 조건부 응답 스펙트럼에 적합한 지반운동을 각각 3개, 7개

Table 2. Selected ground motions for CMS (Fig. 10)

		No.	Earthquake	Year	Station	Magnitude	Scale factor
n_g	3	1	Cape Mendocino	1992	FORTUNA BLVD, 000	7.01	2.7
		2	Northridge	1994	SUNSET, 280	6.69	0.3
		3	Irpina	1980	CALITRI	6.90	1.6
	7	1	Cape Mendocino	1992	FORTUNA BLVD, 000	7.01	2.4
		2	Loma Prieta	1989	CL. DAM SW ABUT, 195	6.93	1.8
		3	Loma Prieta	1989	A. DAM L ABUT, 250	6.93	4.2
		4	Landers	1992	JOSHUA TREE, 000	7.28	0.9
		5	Loma Prieta	1994	A. DAM L ABUT, 340	6.69	4.0
		6	Cape Mendocino	1992	FORTUNA BLVD, 090	7.01	2.3
		7	Loma Prieta	1994	MT GLEASON, 260	6.69	1.6

선정한 결과, Fig. 10(a) 및 (b)와 같이 선정된 지반운동 응답 스펙트럼은 편차가 적고 조건부 응답스펙트럼과 매우 유사한 것으로 나타났다. 선정된 지반운동과 배율조정계수는 Table 2에 정리되어있다.

5. 결론

본 연구에서는 구조물의 응답 스펙트럼 해석 및 시간이력해석과 같은 동적해석에서 필요한 입력 지반운동을 선정하기 위하여, ASCE 7-10[1]에서 요구하는 지반운동 선정 절차를 모두 만족하는 지반운동 선정 방법을 제안하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 제안된 방법은 몬테카를로 시뮬레이션과 같은 복잡한 절차를 사용하지 않고 지진 라이브러리 내의 지반운동에 대해 첫 번째부터 원하는 수의 지반운동 까지 순차적으로 지반운동을 선정하므로 기존의 방법과 비교하여 입력 지반운동 선정 및 배율조정 절차가 단순하여 소요 시간을 크게 단축시킬 수 있다.
- 2) 제안된 방법은 평균을 갖는 모든 목표 스펙트럼에 대해 적용이 가능하기 때문에 내진설계기준에서 제시하고 있는 설계스펙트럼 뿐만 아니라 부지고유의 등재해도 스펙트럼 또는 조건부 응답 스펙트럼에 대해 적합한 지반운동을 선정할 수 있다.
- 3) 본 연구에서 제안된 방법의 정확성을 평가하기 위하여 설계스펙트럼과 등재해도 스펙트럼, 그리고 조건부 응답 스펙트럼을 목표 스펙트럼으로 하여 제안된 방법으로 지반운동을 선정한 결과, 선정된 지반운동 응답 스펙

트럼 평균의 크기와 형상이 목표 스펙트럼과 매우 유사하며 동시에 응답 스펙트럼의 분산은 매우 작은 것으로 나타났다.

/ 감사의 글 /

본 논문은 2017년도 한국연구재단이 주관하는 중견연구자지원사업(NRF-2017R1A2B3008937)의 지원을 받아 수행되었습니다.

/ REFERENCES /

1. ASCE, Minimum design loads for building and other structures (ASCE 7-10), American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, c2010
2. CEN, ENV 1998-1 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, c2004.
3. NZS, NZS 1170.5: 2004 Structural design actions, Part 5: earthquake actions - New Zealand, New Zealand Standard, Wellington, New Zealand, c2004.
4. Shantz TJ, Selection and scaling of earthquake records for nonlinear dynamic analysis of first mode dominate bridge structures, Proceedings of the 8th US national conference on earthquake engineering, San Francisco, CA, USA, c2006.
5. Ay BO, Akkar S, A procedure on ground motion selection and scaling for nonlinear response of simple structural systems, Earthq Eng Struct D, 2012 Oct;41(12):1693-1707.
6. Han SW, Seok SW, Efficient Procedure for Selecting and Scaling Ground Motions for Response History Analysis, J Struct Eng-ASCE, 2014 Jan;140(1):06013004
7. Ha SJ, Han SW, An efficient method for selecting and scaling ground motions matching target response spectrum mean and variance, Earthq Eng Struct D, 2016 Jul;45(8):1381-1387.
8. Kottke A, Rathje EM, A semi-automated procedure for selecting and scaling recorded earthquake motions for dynamic analysis, Earthq Spectra, 2008 Nov;24(4):911-932.
9. Jayaram N, Lin T, Baker JW, A computationally efficient ground-motion selection algorithm for matching a target response spectrum mean and variance, Earthq Spectra, 2011 Aug;27(3):797-815.
10. Wang G, A ground motion selection and modification method capturing response spectrum characteristics and variability of scenario earthquakes, Soil Dyn and Earthq Eng, 2011 Apr;31(4): 611-625.
11. Han SW, Ha SJ, Seok SW, Efficient and accurate procedure for selecting ground motions matching target response spectrum, Nonlinear Dynam, 2014 Oct;78(2):889-905.

12. Reyes JJ, Kalkan E. How many records should be used in an ASCE/SEI-7 ground motion scaling procedure? *Earthq Spectra*, 2012 Aug;28(3):1223-1242.
13. AIK, Architectural Institute of Korea. Korean Building Code, KBC 2016. c2016.
14. Chiou B, Darragh R, Gregor N, Silva W. NGA project strong motion database. *Earthq Spectra*, 2012;Feb:24(1), 3-44.
15. Han SW, Choi YS. Seismic hazard analysis in low and moderate seismic region-Korean peninsula. *Struct Saf*, 2008 Nov;30(6):543-558.
16. Baker JW. Conditional mean spectrum: Tool for ground-motion selection. *J Struct Eng-ASCE*, 2010 Feb;137(3):322-331.
17. Boore DM, Atkinson G,M. Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s. *Earthq Spectra*, 2008 Feb;24(1):99-138.