

Matlab을 이용한 지진파 선정 최적 알고리즘 개발

An Development of Optimization Matlab Codes for Selecting Ground Motions

전 주 희* 박 병 준* 하 성 진**
 Jeon, Ju-Hee Park, Byung-Jun Ha, Seongjin

Abstract

The selection of accurate ground motion is very important for the time history analysis of the structure. The purpose of this study is to propose an accurate and efficient method to select the ground motions according to the mean and variance of the target response spectrum. This paper proposes a simplified method to find solutions for differential equations with commercial software. The proposed method is more accurate and applicable to target spectrum which has mean and variance. This algorithm sequentially selects the first ground motion to the desired ground motion. In order to verify the accuracy of the proposed algorithm, the ground motions were selected from the NGA database using the method for target response spectrum with a ground motion prediction equation.

키워드 : 목표스펙트럼, 선정, 지반운동, 지진파, 라이브러리, 자동화 알고리즘

Keywords : Target Response Spectrum, Selection, Ground Motion, Seismic, Library, Automation Algorithm

1. 서 론

구조물의 동적 해석을 수행할 때에는 신뢰도가 높은 결과를 얻기 위해 목표 스펙트럼에 적합한 지반운동을 다수 선정하여야 한다. 신뢰할 수 있는 결과를 얻기 위해 선 연구에서 일반적으로 사용하고 있는 선형 및 비선형 응답이력 해석이 매우 중요하다. 현재의 내진설계기준에서는 개별 지반운동에 대해 5%감쇠비 응답 스펙트럼의 평균값이 0.2배에서 1.5배의 범위에 해당되는 주기에 대해 목표 스펙트럼 값보다 작지 않게 설계되도록 권장하고 있다. 목표스펙트럼을 재현하고 이와 가장 근사한 지반운동을 선정하는 과정을 거쳐 목표스펙트럼의 평균과 분산을 잘 재현하는 지반운동을 선정하고자 한다. 지금까지 목표스펙트럼에 적합한 지반운동을 선정하기 위해 평균과 분산, 상관관계를 고려한 여러 연구들이 수행되어 왔다.(Seok and Han (2012), Ha et al. (2015), Jayaram et al. (2011), Kottke and Rathje (2008)) 그러나 이 방법들은 여러 번에 걸쳐 반복계산을 요구하거나 매번 지반운동의 선정 결과가 다르게 나타나는 등의 문제점을 수반하고 있다. 또한 계산 절차가 매우 까다롭고 복잡하며 선정 절차를 이해하기에 어려움이 있다는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 평균과 분산을 동시에 고려한 지반운동의 선정 알고리즘을 제안하고자 한다. 이 방법은 기존의 방법보다 더 정확하고 반복계산이 없으며 절차가 매우 단순하다. 효율적이며 정확한 지반운동 선정 알고리즘을 제시하며 예제를 통해서 결과를 보여주고자 한다. 본 연구에서 제안하고 있는 알고리즘에는 복잡한 계수 없이 미분방정식의 해를 상용 소프트웨어로 찾아내는 단순화된 방법을 적용시키고 있다.

2. 기존 문헌 고찰

목표스펙트럼과 가장 근사하게 재현된 지반운동을 찾기 위해서 지진규모, 진원거리, 지반조건 등에 해당하는 지반운동 라이브러리를 구축한다. 찾고자 하는 지반운동의 개수에 따라 라이브러리에 속해있는 개개의 응답스펙트럼과 목표스펙트럼을 하나씩 비교하여 가장 근사한 지반운동을 선정한다. Seok and Han[1]의 연구에서는 지반운동의 변동성을 고려하지 못하며 각각의 지반운동마다 새롭게 계산해야 하는 등 다수의 반복계산과정을 요구하고 있다.

$$\mu_{\ln S_a(T_i)} = \frac{1}{n_g} \sum_{j=1}^{n_g} \ln S_{aj}(T_i) \tag{1}$$

$$\sigma_{\ln S_a(T_i)} = \sqrt{\frac{1}{n_g} \sum_{j=1}^{n_g} (\ln S_{aj}(T_i) - \mu_{\ln S_a(T_i)})^2} \tag{2}$$

* 전 한국교통대 건축학부 건축공학전공 연구원
 ** 한국교통대 건축학부 건축공학전공 부교수, 공학박사
 (Corresponding author : School of Architecture, Korea University of Transportation, sjha@ut.ac.kr)

이 연구는 2022년 한국연구재단(NRF-2020R1F1A1076867)의 지원을 받아 수행하였음

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

위의 식(3), 제곱합오차(SSE, Sum of Square Error)를 통해 목표 스펙트럼과 응답 스펙트럼의 평균과 분산을 고려한 근사함의 정도를 평가할 수 있다(Jayaram et al.[3], Han et al.[5]). 위의 식에서 n_p 와 n_g 는 각각 고려주 기수와 선정하고자 하는 지반운동의 총 개수를 나타내며, $\mu_{\ln S_a}^{target}(T_i)$ 와 $\sigma_{\ln S_a}^{target}(T_i)$ 는 주기 T_i 에서의 목표 스펙트럼의 평균과 표준편차를 의미하고 있다. $\mu_{\ln S_a}(T_i)$ 와 $\sigma_{\ln S_a}(T_i)$ 는 응답 스펙트럼의 평균과 표준편차를 의미한다. 여기서 $\ln S_{aj}(T_i)$ 는 주기에서의 j번째 지반운동의 응답스펙트럼에 로그를 붙여준 값이다. 식(3)에서의 w 는 분산오차에 대한 가중치로 1의 값을 사용하도록 제안하고 있다. 제곱합오차의 값이 0에 가까운 값을 가질수록 지반운동의 집단이 목표 스펙트럼의 평균과 분산에 가장 근사하다고 할 수 있다.

Ha, Park and Han (2015)의 연구에서는 배율조정계수가 포함되어있다. 지반운동에서의 배율조정은 지반운동의 라이브러리에 포함된 수가 적을 경우 요구되기도 한다. 우리나라와 같이 중·약진 지역의 경우 큰 규모의 지반운동 수가 적은편이기 때문에 더더욱 배율조정이 필수적이다. 대다수의 내진설계기준과 성능평가방법에서는 배율조정을 허용하고 있다. 배율조정계수를 사용할 경우 제곱합오차식은 같지만 평균과 표준편차를 나타내는 수식은 각각 식(4), 식(5)로 다르다.

$$\mu_{\ln S_a}(T_i) = \frac{1}{n_g} \sum_{j=1}^{n_g} \ln s_j \times S_{aj}(T_i) \quad (4)$$

$$\sigma_{\ln S_a}(T_i) = \sqrt{\frac{1}{n_g} \sum_{j=1}^{n_g} (\ln s_j \times S_{aj}(T_i) - \mu_{\ln S_a}(T_i))^2} \quad (5)$$

$$\ln s = \mu_{\Delta} = \frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} [\mu_{\ln S_a}^{target}(T_i) - \ln S_a(T_i)] \quad (6)$$

위의 식(4), (5)에서는 j번째 지반운동에 대한 배율조정계수인 s_j 가 포함되어있는 것을 볼 수 있다. s_j 를 계산하는 식은 식(6)이고, 이것은 평균 배율조정계수로 첫 번째 지반운동의 경우 사용할 수 있지만 두 번째 지반운동부터는 평균뿐만 아니라 분산을 함께 고려해야 하기 때문에 사용할 수 없다. 따라서 분산 배율조정계수를 개발하였고 그 과정은 다음과 같다. [식(7) ~ 식(11)]

$$SSE_V = \sum_{i=1}^{n_p} (V_{\ln S_a}^{target}(T_i) - V_{\ln S_a}(T_i))^2 \quad (7)$$

$$\frac{dSSE_V}{dx} = \frac{4n_p}{j^2} [(\ln s_j^\sigma)^3 + (3j\mu_A)(\ln s_j^\sigma)^2 + (j\mu_B + 2j^2\mu_{A^2}) \times (\ln s_j^\sigma) + j^2\mu_{AB}] \quad (8)$$

$$\ln s_j^\mu = \frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} [\mu_{\ln S_a}^{target}(T_i) - \mu_{\ln S_a}(T_i)] \quad (9)$$

$$\ln s_k = \ln s_k^* + \ln s_j^\mu \quad (k=1 \sim j) \quad (10)$$

$$SSE_\mu = \sum_{i=1}^{n_p} (\mu_{\ln S_a}^{target}(T_i) - \ln s \cdot S_a(T_i))^2 \quad (11)$$

식(8)에서 사용된 계수들($\mu_A, \mu_B, \mu_{A^2}, \mu_{AB}$)은 Table 1에 제시되어 있다. 이와 같이 기존의 연구는 절차가 매우 복잡하며 한눈에 보기에 이해하기가 어려움이 있고 지반운동이 변화함에 따라 해당 절차를 매번 반복계산 해야 한다는 반자동화 알고리즘으로서의 한계를 가지고 있음을 확인할 수 있다.

Table 1. Coefficients in Eq. (8)

$\mu_A = \frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} A_i = \frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} (\mu_{\ln S_a}^* - \mu_{\ln S_a}^{j-1})$
$\mu_B = \frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} B_i = \frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} (V_{\ln S_a}^* - V_{\ln S_a}^{target})$
$\mu_{A^2} = \frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} A_i^2, \mu_{AB} = \frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} A_i B_i$

3. 지반운동 선정 알고리즘 제안

본 연구에서는 기존 연구에 의해 제시된 제곱합오차식을 기반으로 하여 다음과 같은 새로운 식을 제안한다.

$$SSE^{scale} = \sum_{i=1}^{n_p} [(\mu_{\ln S_a}^{target}(T_i) - \mu_{\ln S_a}^{scale}(T_i))^2 + w \times (\sigma_{\ln S_a}^{target}(T_i) - \sigma_{\ln S_a}^{scale}(T_i))^2] \quad (12)$$

$$\mu_{\ln S_a}(T_i) = \frac{1}{n_g} \sum_{k=1}^{n_g} \ln s_{n_g} \times S_{ak}(T_i) \quad (12.1)$$

이 알고리즘에서 주목할 만한 부분은 복잡한 계수를 사용하지 않았다는 것이다. 미분방정식의 해를 상용 소프트웨어로 찾아내는 단순한 원리를 적용시켰다. 기존의 연구와 비교해 보았을 때 식이 매우 간단해졌음을 확인할 수 있다. 응답 스펙트럼이 변경되어도 미지수를 계산하는 복잡한 과정을 반복할 필요 없이 적용이 가능한 자동화 알고리즘이라는 것이 특징이다.

첫 번째 지반운동의 선정 시에는 지반운동 응답 스펙트럼의 분산이 존재하지 않으므로 평균만 고려하여 결정한다. 우선 구축된 라이브러리 내에 있는 여러 지반운동들 중에서 식(11)의 해가 가장 작은 지반운동이 첫 번째 지반운동으로 선정된다.

$k(k \geq 2)$ 번째 지반운동을 선정하기 위해서는 첫 번째

지반운동을 선정할 때 사용된 방법과는 다른 방법을 적용해야 한다. 첫 번째 지반운동은 목표 스펙트럼의 평균만을 고려한 가장 근사한 지반운동으로 결정되었다면 k 번째 즉, 두 번째 지반운동부터 n_g 개까지의 지반운동은 목표 스펙트럼의 평균과 분산을 동시에 고려하여 선정해야 한다. k번째 지반운동을 선정할 때에는 지반운동 라이브러리에서 k-1번째 지반운동을 선정 한 후에 남아있는 지반운동들($n_{Library} - k + 1$) 중 하나로 결정하도록 한다. SSE^{scale} 을 미분한 $\frac{dSSE}{ds}$ 가 최솟값을 가지는 미지수 S_{n_g} 를 선정하는 위의 절차를 라이브러리 내의 모든 지반운동을 대상으로 실행시키고 가장 작은 SSE값을 가지는 지반운동을 k번째 지반운동으로 선정한다. $\frac{dSSE}{ds}$ 에 대한 풀이는 공학용 소프트웨어 Matlab의 solve함수를 이용하였다. 제안된 방법의 순서는 다음과 같다.

- 1) 목표 지진 시나리오 및 설계 스펙트럼 결정한다.
- 2) 지반운동의 라이브러리(데이터베이스)를 구축한다.
- 3) 첫 번째 지진과 선정
 - (3.1) 식(11)이 최솟값이 되는 지반운동을 선정한다.
- 4) k번째 지진과 선정
 - (4.1) $\frac{dSSE}{ds}$ 이 최솟값이 되는 미지수 S_{n_g} 를 선정한다.
 - (4.2) 모든 후보 지반운동에 대해 반복하여 식(12)가 최소인 값을 선정한다.
- 5) 원하는 지반운동의 개수 n_g 에 도달할 때까지 4)의 과정을 반복해 최종적인 지반운동집단을 구축한다.

4. 지반운동 선정 결과 및 분석

앞의 장에서 제안한 알고리즘의 정확성을 검증하기 위해 시나리오를 기반으로 한 목표 스펙트럼을 이용하여 지반운동 선정 결과를 제시한다.

목표 지진 시나리오는 지진 규모 M7.0, 진원거리 15km, 전단파 속도(V_{s30}) 360 m/s, 단층조건은 역단층(Reverse Fault)을 가지는 것으로 가정하였다. NGA database에서 목표 지진 시나리오와 유사한 조건 범위에 해당하는 지반운동으로 라이브러리를 구축하고 목표 스펙트럼에 가장 유사한 지반운동 7개를 선정하도록 하였

다. 각각 다른 조건을 가진 라이브러리를 3가지(34개, 82개, 158개)경우로 구축하여 그 결과를 통해 알고리즘을 검증하고자 한다. 목표스펙트럼과 응답스펙트럼의 근사한 정도는 식(3)의 값으로 평가할 수 있으며 그 값이 0에 가까울수록 목표 스펙트럼의 평균과 분산을 잘 재현한다.

Fig. 1은 34개의 지반운동 라이브러리(지진 규모 M6.6-7.2, 진원거리 15-25km, 전단파속도 480-360 m/s)에 대해 7개의 지반운동을 선정 한 결과이다. (a)Seok and Han의 연구에서 SSE=4.46, (b)Ha, Park and Han의 연구에서 SSE=0.77, 본 연구에서 SSE=0.81의 값을 보이고 있다. 특히, 배율조정이 적용되지 않은 (a)의 지반운동 선정결과와 배율조정이 적용된 (b), (c)의 SSE값이 큰 차이를 보인다는 것을 보아 배율조정이 반드시 필요하다는 결과를 얻을 수 있다.

Fig. 2에서는 라이브러리 조건을 변경하여 34개보다 큰 82개의 지반운동 라이브러리를 구축하였고 응답 스펙트럼의 근사한 정도를 평가하는 제곱합오차값이 전반적으로 감소되는 결과를 가져왔다. 제안하고 있는 알고리즘의 결과, 기존의 방법(Ha, Park and Han)과 매우 유사함을 확인할 수 있고 절차가 보다 더 단순하고 항상 일정한 지반운동 선정결과를 보여주고 있음을 예시를 통해 확인이 가능하다.

Fig. 3은 158개의 지반운동 라이브러리를 가진다. 라이브러리 범위가 넓어지면 목표 스펙트럼에 더 근사할 것이라는 생각과 달리 잘 재현하지 못한다는 결과를 보이고 있다. 즉, 라이브러리의 크기가 증가하더라도 반드시 더 나은 선정결과를 가져오지 않는다는 한계점이 존재한다는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 목표 스펙트럼에 근사하게 재현된 지반운동을 선정하는 절차를 제안하였다. 기존의 연구에서는 다수의 반복계산과 까다로운 계산절차로 인해 알고리즘의 적용에 한계가 있다. 특히, 같은 조건 내에서 지진파 선정 결과가 서로 상이하게 나오는 등 정확한 내진성능 평가에 있어서 부족한 단점이 있다.

반면 본 연구에서는 단순한 절차를 제안하여 실무에서도 쉽게 적용 가능한 방법을 제안하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

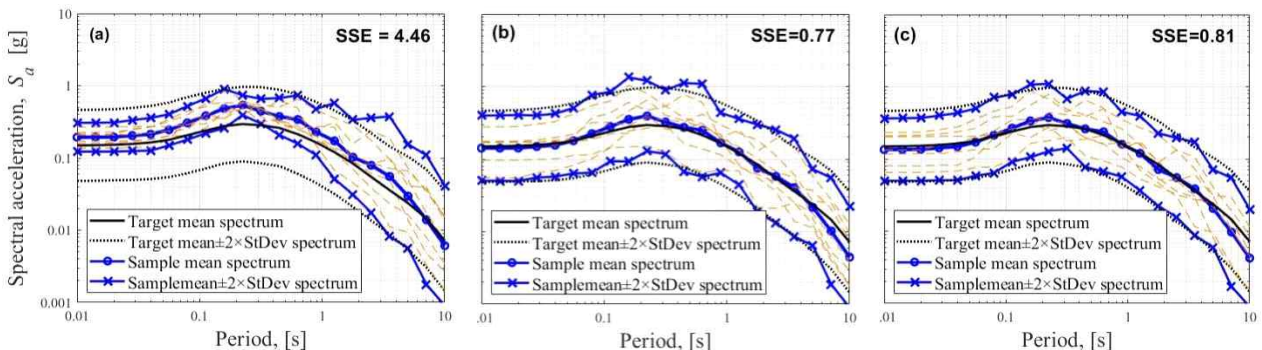


Fig. 1. Target and sample mean response spectra $n_p : 34$

(a) Seok and Han (b)Ha, Park and Han (c)Sample response spectra

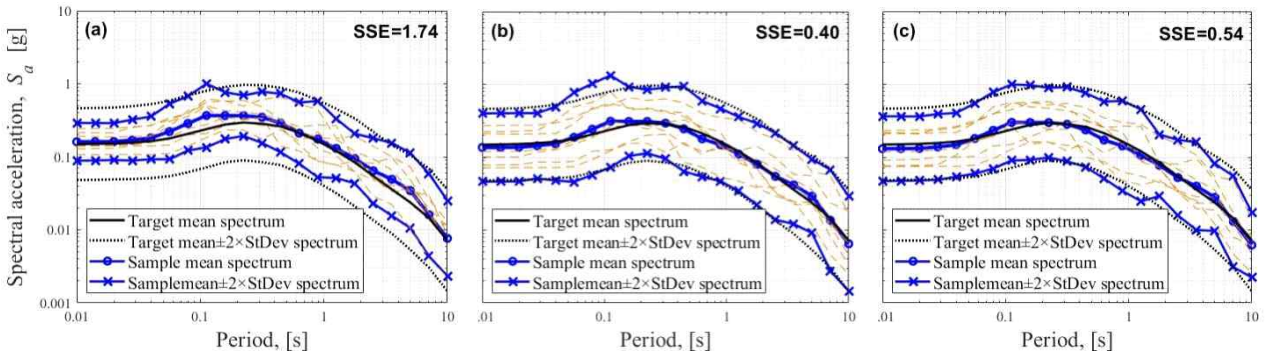


Fig. 2. Target and sample mean response spectra $n_p : 82$
 (a) Seok and Han (b) Ha, Park and Han (c) Sample response spectra

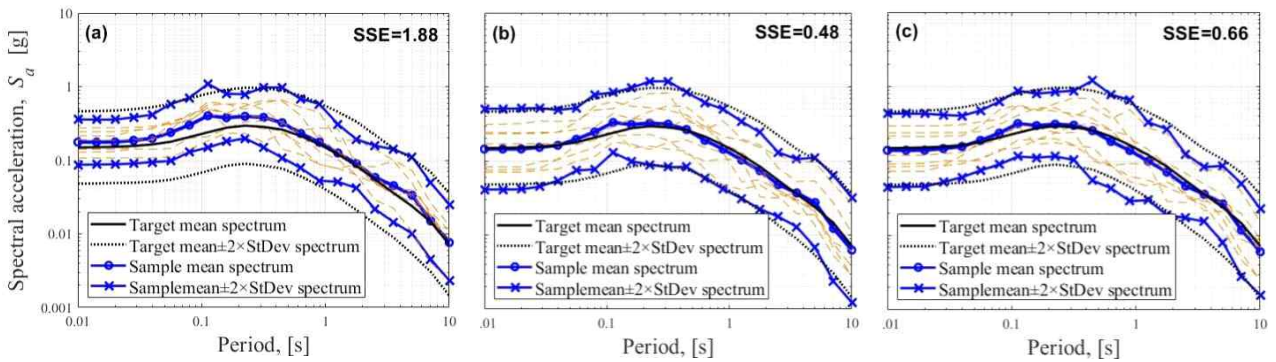


Fig. 3. Target and sample mean response spectra $n_p : 158$
 (a) Seok and Han (b) Ha, Park and Han (c) Sample response spectra

1) 기존에 개발된 지반운동 선정 알고리즘은 목표 스펙트럼을 잘 재현해내나 반복적인 계산을 요구하고 매우 복잡하고 이해하기 어려운 과정을 가짐과 동시에 선정 결과값에 일관성이 떨어진다는 단점이 있다. 하지만 제안된 방법은 식이 매우 단순하고 항상 일정한 지반운동 선정 결과를 도출해내고 있다.

2) 기존에 개발된 지반운동 선정 알고리즘은 반자동화된 절차로 스펙트럼이 달라짐에 따라 계수를 결정하는 복잡한 절차를 또 다시 반복해야 한다는 반자동화 알고리즘이라는 한계를 가지지만 본 연구의 알고리즘은 어떤 스펙트럼이 적용되어도 자동화된 방법으로 지반운동을 선정할 수 있다.

3) 본 연구에서 제안한 알고리즘의 효율성을 검증하기 위해 다양한 조건으로 구성된 지반운동 라이브러리 34개, 82개, 158개에 적용해보았다. 그 결과 라이브러리의 크기가 증가하더라도 반드시 더 나은 선정 결과를 가져오지는 않았다. 본 연구에서 제안한 방법의 SSE와 기존 연구의 SSE가 매우 유사하며 보다 정확한 값을 도출해내고 있음을 알 수 있다.

REFERENCES

1. Seok and Han. (2012). Efficient Simulation-based Algorithm for Selecting Ground Motions Considering Mean and Variance of a Target Response Spectrum, Earthquake Engineering Society of Korea, 28(2)

2. Ha, Park and Han. (2015). A Method for Selecting Ground Motions Matching a Target Response Spectrum - I Algorithm, COSEIK Annual Conference, 1-2

3. Jayaram N, Lin T, Baker JW. (2011). A computationally efficient ground motion selection algorithm for matching a target response spectrum mean and variance. Earthquake Spectra, 27(3):797-815

4. Kottke AR, Rathje EM. (2008). A semi-automated procedure for selecting and scaling recorded earthquake motions for dynamic analysis. Earthquake Spectra. 24(4):911-932

5. Han SW, Ha SJ, Seok SW. (2014). Efficient and accurate procedure for selecting ground motions matching target response spectrum. Nonlinear Dynam. 78(2):889-905

6. Naeim F, Alimoradi A, Pezeshk S. (2004). Selection and scaling of ground motion time histories for structural design using genetic algorithms. Earthquake Spectra. 20(2):413-426.

7. Han SW, Ha SJ, Cho SW. A Simple Method for Selecting Ground Motions Considering Target Response Spectrum Mean, Variance and Correlation - I Algorithm. J Earthquake Eng. 20(1):55-62