

## 목표스펙트럼에 근사한 평균응답스펙트럼을 갖는 지반운동집단의 효율적인 선정방법

### Efficient Method for Selecting Ground Motions with a Mean Response Spectrum Matching a Target Spectrum

한상환<sup>1)</sup> · 석승욱<sup>2)</sup>

Han, Sang Whan · Seok, Seung Wook

**국문 요약** >> 본 연구에서는 지반운동 라이브러리에서 목표스펙트럼에 근사한 평균응답스펙트럼을 갖는 한 개 혹은 다수의 지반운동을 선정하는 효율적인 방법을 제안하고자 한다. 지반운동 선정 시 목표스펙트럼의 형상과 크기를 맞추어야 하는데 이 두 가지를 독립적으로 고려할 수 있다는 기존 연구결과에 따라 본 연구에서도 형상이 가장 유사한 지반운동을 찾고 크기를 맞추기 위하여 배율조정계수를 사용한다. 형상을 맞추기 위해 각 주기에서 목표스펙트럼과 지반운동 평균응답스펙트럼의 차이 값의 표준편차가 최소가 되도록 하여 선정하는 방법을 제안하였다. 형상이 결정된 후 그 크기를 맞추기 위해 본 연구에서 제안한 배율조정계수를 찾는 방법은 기존 연구와 달리 한번에 찾을 수 있도록 제안하였다. 40개의 지반운동 라이브러리로부터 제안한 방법을 이용하여 목표스펙트럼에 근사한 평균스펙트럼을 갖는 7개의 지반운동기록을 선정한 결과, 그 정확성과 계산소요시간에 있어 모두 만족할만한 결과를 보였다.

**주요어** 효율적인 방법, 지반운동기록 선정, 목표스펙트럼, 형상, 배율조정

**ABSTRACT** >> This paper proposes an efficient method for selecting ground motions with the mean response spectrum matching a target spectrum. Since former studies reported that the shape and amplitude of the response spectra can be treated independently for selecting ground motions, this study first selects ground motions such that the shape of their mean response spectrum matches that of the target spectrum, then scales the ground motions. To select the ground motions best matching the shape of the target response spectrum, the standard deviation of the difference between the target response spectrum and the mean response spectrum of the selected ground motions needs to be minimized. Unlike the existing procedure, the scaling factor can be computed without iteration. Based on the selection results of 7 ground motions from a library of 40 ground motions, the proposed method is verified as an accurate and efficient method.

**Key words** Efficient method, Ground motion records selection, Target spectrum, Shape, Scaling

## 1. 서론

IBC2006<sup>(1)</sup>에서는 대상 구조물의 지진응답을 정확히 예측하기 위해 지반조건에 상응하는 지반운동기록을 이용하여 비선형 시간이력해석을 수행하도록 요구한다. 시간이력 해석을 위한 입력하중으로 적합한 지반운동은 기존에 기록

된 실제 지반운동들 중에서 선정하거나 인공지반운동을 생성하여 얻을 수 있다. 본 연구의 목표는 기존에 기록되어 있던 지반운동기록들 중 입력하중으로써 목표스펙트럼에 적합한 지반운동 선정을 위한 알고리즘을 개발하는 것이다.

현행 내진설계기준<sup>(1)</sup>에서는 일반적인 2차원 동적 해석을 수행하는 경우 개별 지반운동에 대해 작성된 5%감쇠비 응답스펙트럼의 평균값이 해석을 수행하는 방향의 구조물 고유주기의 0.2배부터 1.5배 사이에 해당되는 주기에 대해서 설계응답스펙트럼보다 작지 않게 하도록 권장하고 있다. 그러나 Site-Specific Ground Motion Procedures를 수행할 경우 확률론적 재해도 분석(Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PSHA)을 통해 예측한 최대예상지진(Maximum

<sup>1)</sup> 정회원·한양대학교 건축공학과, 교수

<sup>2)</sup> 한양대학교 대학원 석사과정

(교신저자: staynearyou@gmail.com)

본 논문에 대한 토의를 2011년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2011. 6. 8 / 수정일 1차: 2011. 7. 18, 2차: 2011. 7. 27 / 게재확정일 : 2011. 7. 27)

© 2011EESK www.eesk.or.kr

Considered Earthquake, MCE)을 기준으로 설계응답스펙트럼을 작성하고 이에 적합한 입력하중을 선정하도록 명시하고 있다. 이때 그 선정 기준은 제시되어 있지 않으나 개별 지반운동 응답스펙트럼의 평균값이 위에서 결정된 설계응답스펙트럼과 근사하게 만드는 지반운동을 입력하중으로 선정하면 될 것으로 여겨진다. 이러한 접근은 Kottke and Rathje<sup>(3)</sup>의 연구에서도 수행된 바 있다.

본 연구에 쓰인 목표스펙트럼은 PSHA를 기초로 만들어진 등재해스펙트럼(UHS)과 Site-Specific Ground Motion Procedures에 해당하는 설계응답스펙트럼으로 제한한다. 이러한 목표스펙트럼은 PSHA을 통해 이미 분산의 일정부분을 포함한다는 점에서 목표스펙트럼의 분산을 0으로 맞추도록 권장하고 있다.<sup>(3)</sup> 즉, 선정된 개별 지반운동 응답스펙트럼으로 계산한 주기에 따른 분산값이 응답스펙트럼의 평균값과 더불어 입력하중 선정의 중요한 고려사항임을 의미한다. 그러나 현행 내진설계기준에서는 이를 고려하기 위한 기준이 제시되어 있지 않다.

목표 스펙트럼을 대상으로 지반운동기록 선정절차를 제안하기 위해 수행된 여러 연구는 다음과 같다.<sup>(2,4)</sup> Naeim et al.<sup>(2)</sup>은 목표스펙트럼과 맞는 배율을 조정된 지반운동을 선정하기 위하여 Genetic Algorithm을 이용하였다. Kottke and Rathje<sup>(3)</sup>은 목표스펙트럼에 대해 배율조정을 통하여 지반운동기록을 찾는 반자동화(Semi-automated)된 절차를 개발하였다. 이 방법은 선정과정에서 많은 경우의 수로 인하여 계산소요시간이 증가하여 일부의 경우에는 컴퓨터 메모리용량 초과로 계산이 중단되는 경우가 발생한다. Jayaram et al.<sup>(4)</sup>은 지반운동의 배율조정을 한 경우와 하지 않은 경우 모두 적용이 가능한 지반운동기록 선정 알고리즘을 제안하였다. 그러나 기존의 두 연구<sup>(3),(4)</sup> 모두 배율조정 시 계산량이 크게 소요되는 반복계산을 요구한다.

이에 본 연구에서는 목표스펙트럼에 근사한 지반운동을 선정하기 위한 효율적인 알고리즘을 제안하였다.

## 2. 기존 연구 분석 및 새로운 지반운동 선정방법 제안의 필요성

목표스펙트럼에 근사한 지반운동기록을 찾기 위해서는 먼저 지진규모, 진원거리, 지반조건 등에 상응하는 지반운동 기록 라이브러리를 구축해야 한다. 만약 찾고자 하는 지반운동기록이 한 개라면, 라이브러리에 속한 개개의 지반운동 응답스펙트럼과 목표스펙트럼을 하나씩 비교하여 가장 근사한 것을 선정할 수 있다. 한편, 지반운동 라이브러리에서 다수의 지반운동을 선정하고자 한다면, 그 경우의 수는 다

음과 같다.

$$n_{trial} = \frac{n_L!}{n_g!(n_L - n_g)!} \quad (1)$$

여기서,  $n_{trial}$ 은 모든 경우의 수를 의미하고  $n_L$ 과  $n_g$ 는 각각 라이브러리에 속한 지반운동의 수와 선정하고자 하는 지반운동기록의 수를 의미한다( $n_L > n_g$ ).

이 모든 경우의 수( $n_{trial}$ )에 대해, 각각의 경우에 해당하는 지반운동 응답스펙트럼의 평균과 목표스펙트럼을 비교함으로써 스펙트럼 간의 근사한 정도를 판별할 수 있다. 이를 통해 최종적으로 목표스펙트럼과 가장 근사한  $n_g$ 개의 지반운동기록을 의미하는 지반운동집단(Ground Motion Records Set)을 결정한다. 그러나  $n_{trial}$ 은  $n_L$ 과  $n_g$ 가 조금만 증가하여도 그 수가 컴퓨터 메모리의 한계를 넘어설 만큼 기하급수적으로 증가하여 연산에 제약을 받는 경우가 종종 발생한다.

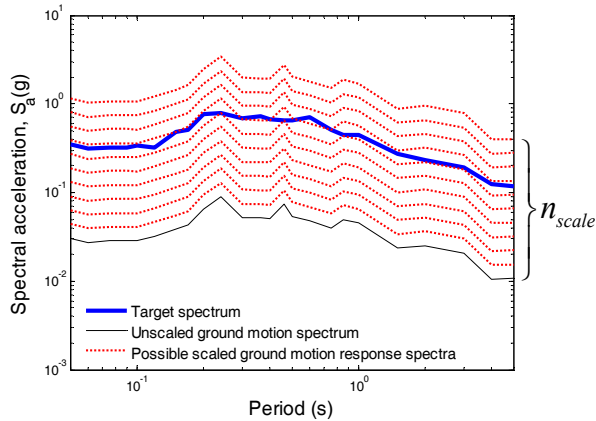
Kottke and Rathje<sup>(3)</sup>은 이러한 계산상의 어려움을 해결하기 위하여 목표스펙트럼과 가장 근사한 두 개의 지반운동기록을 먼저 선정한다. 이때의 경우의 수는 식 (1)을 이용하여 구할 수 있다[ $= n_L!/2!(n_L-2)!$ ]. 그 후 라이브러리의 남은 지반운동기록들 중 이미 선정된 지반운동을 포함하여 계산한 평균응답스펙트럼이 목표스펙트럼과 가장 근접한 지반운동 하나를 선정한다. 이러한 절차를 원하는 수의 지반운동을 찾을 때까지 반복한다. 위 방법에 의한 계산량은 다음과 같다.

$$n_{Kottke} = \frac{n_L!}{2!(n_L-2)!} \times [(n_L-2) + (n_L-3) + (n_L-n_g+1)] \quad (2)$$

이 방법을 통하여 선정된 지반운동은 모든 경우의 수( $n_{trial}$ )를 고려하여 선정된 지반운동 결과와 비교하여 목표스펙트럼과 근사한 정도에 큰 차이가 없음을 보고 하고 있다. 그럼에도 불구하고 처음에 최적조합을 찾을 때  $n_L$ 과  $n_g$ 의 증가에 따라 여전히 많은 수의 계산량을 요구하였다. 또한 Kottke and Rathje<sup>(3)</sup>가 제안한 절차는 계산과정이 복잡하여 간단한 알고리즘으로 정립되지 못하는 한계를 보였다.<sup>(4)</sup>

이후 Jayaram et al.<sup>(4)</sup>은 목표스펙트럼을 재현하는  $n_g$ 개의 모의 목표(target)스펙트럼에 대하여 식 (3)의 오차제곱합(SSE, Sum of Squared Errors)을 최소화 하는 지반운동을 첫 번째부터  $n_g$  번째까지 순차적으로 하나씩 찾아나가는 자동화된 알고리즘을 제안하였다.

$$SSE = \sum_{i=1}^{n_p} (\ln Sa_i - \ln Sa_i^{target})^2 \quad (3)$$



〈그림 1〉 배율조정에 따른 계산량의 도식화

여기서,  $i$ 는 로그스케일 간격의  $i$ 번째 주기를,  $n_p$ 는 고려하는 주기의 총 개수를 의미하며  $\ln Sa^{target}$ 와  $\ln Sa$ 은 각각 로그를 취한 목표스펙트럼과 지반운동 응답스펙트럼을 나타낸다.

만약 지반운동기록을 선정함에 있어 배율조정이 허용될 경우, 배율조정된 지반운동을 식 (3)을 통해 판별하기 위해서는 로그 응답스펙트럼( $\ln Sa$ ) 자리에 크기가 조정된 로그 응답스펙트럼( $\ln Sa_i^{Scaled}$ )—배율조정계수(SF,  $s$ )를 적용( $\ln Sa_i^{Scaled} = s \cdot \ln Sa_i$ )한 크기가 조정된 응답스펙트럼—을 넣어 계산을 수행하여야 한다. 이때 로그를 취한 배율조정계수( $\ln s$ )는 사용자에게 의하여 결정된다. 즉, 사용자가 최대허용 배율조정계수(Maximum Acceptable Scale Factor,  $s_{max}$ )와 배율조정계수의 간격( $d_s$ )을 입력함으로써, 배율조정 시 한 개의 지반운동에 대해 요구되는 계산 량( $n_{scale}$ )을 결정할 수 있다. 그림 1은 배율조정에 따른 계산 량을 도식화한 것이다.

$$n_{scale} = \frac{s_{max}}{d_s} \quad (4)$$

식 (4)를 통해 예상할 수 있듯이, 큰 최대허용 배율조정계수와 작은 배율조정계수 간격은 배율조정을 하지 않을 경우와 비교하여 지반운동 한 개에 대하여  $n_{scale}$  배의 계산량을 요구(그림 1)하여 결국  $n_L$ 과  $n_g$ 가 커짐에 따라 전체 계산량을 매우 크게 증가시키는 원인이 된다.

한편, 배율조정계수는 보통 2~4사이의 범위 내로 제한하도록 권장<sup>(5)</sup>하지만, 이것은 어디까지나 엔지니어의 편리에 의해 규정된 것이지 배율조정의 정량적 평가에 의한 것은 아니다.<sup>(6)</sup> 따라서 경우에 따라 큰 배율조정 범위의 허용은 한 개의 지반운동에 대한 계산량을 더욱 증가시킬 수 있다. 이에 본 논문에서는 지반운동 배율조정의 효율성을 높이기 위한 새로운 선정방법을 다음 장에 제안하였다.

### 3. 목표스펙트럼과 가장 근사한 한 개의 지반운동기록 선정

#### 3.1 배율조정에 유리한 지반운동기록 선정방법 제안

라이브러리에 속한 모든 지반운동기록 중 목표스펙트럼과 가장 근사한 한 개의 지반운동 응답스펙트럼이 되기 위한 조건은 응답스펙트럼의 형상(Shape)과 크기(Amplitude)가 모두 목표스펙트럼의 그것과 잘 근사해야 한다는 것이다. 따라서 목표스펙트럼과 응답스펙트럼의 근사한 정도를 판별하기 위해 로그스케일로 계산한 두 스펙트럼의 차( $\Delta_i$ )를 다음과 같이 정의하였다.

$$\Delta_i = \ln Sa_i^{target} - \ln Sa_i \quad (5)$$

여기서,  $i$ 는 로그스케일 간격의  $i$ 번째 주기를 의미하며  $\ln Sa$ 와  $\ln Sa^{target}$ 은 각각 로그스케일의 지반운동 응답스펙트럼과 목표스펙트럼을 나타낸다

그림 2와 3은 임의로 정한 로그스케일의 목표스펙트럼과 지반운동 응답스펙트럼 차( $\Delta_i$ )의 변동을 통해 두 스펙트럼의 형상 관계를 이해하는 데 도움을 주기 위하여 나타난 것이다. 그림 2와 비교했을 때, 그림 3의 (a), (b)와 같이 각 주기에 따른  $\Delta_i$ 의 변동이 작다는 것은 두 스펙트럼의 형상이 충분히 유사하다는 것을 의미한다. 다시 말해서, 라이브러리에 속한 모든 지반운동기록 중  $\Delta_i$ 의 표준편차( $\sigma_{\Delta}$ )를 최소로 만드는 것이 목표스펙트럼의 형상과 가장 근사한 지반운동기록이라 판단할 수 있다.

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\frac{1}{n_p - 1} \sum_{i=1}^{n_p} (\Delta_i - \mu_{\Delta})^2} \quad (6)$$

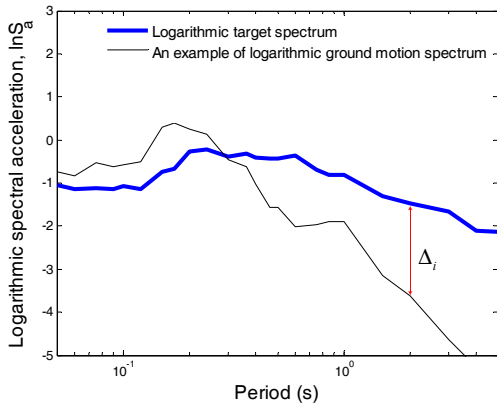
여기서

$$\mu_{\Delta} = \frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} \Delta_i \quad (7)$$

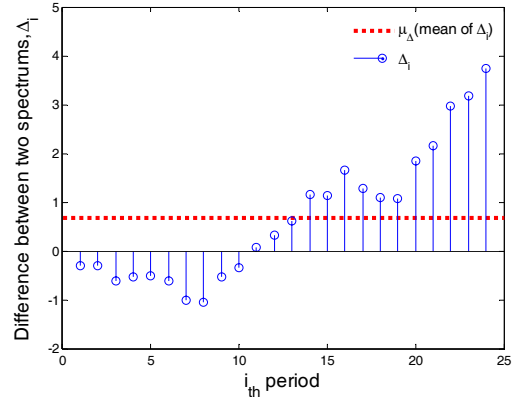
$$= \frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} (\ln Sa_i^{target} - \ln Sa_i)$$

위 식에 표기된  $n_p$ 는 고려하는 주기의 총 개수이다.

목표스펙트럼과 형상이 근사한 지반운동기록을 위의 방법을 통하여 찾았다면 지반운동의 크기를 목표스펙트럼에 맞게 조정하여야 한다. 이를 위해, 임의의 배율조정계수( $s$ )가 적용된 지반운동 응답스펙트럼을 로그스케일로 나타내

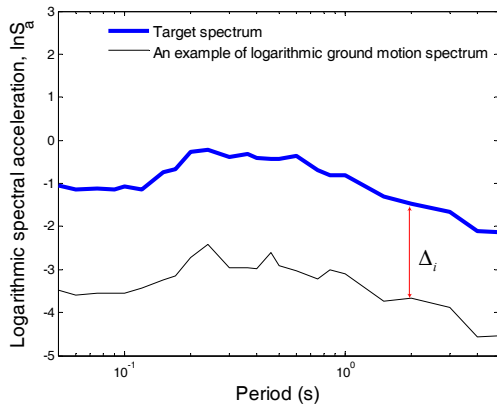


(a) 목표스펙트럼과 지반운동 응답스펙트럼 (Log scale)

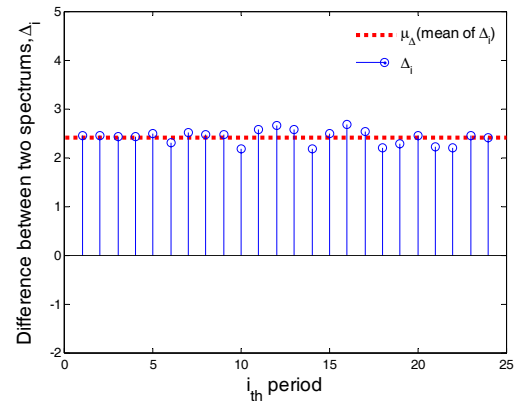


(b) 주기에 따른 두 스펙트럼의 차(Δi)

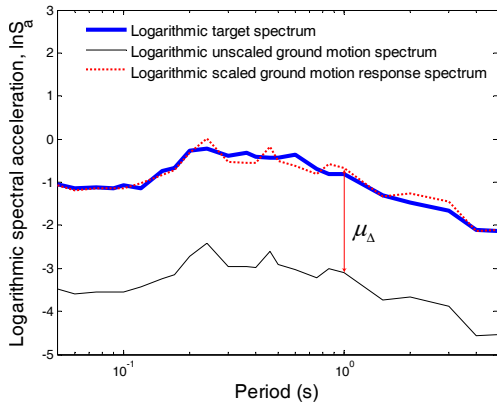
〈그림 2〉 목표스펙트럼과 지반운동 응답스펙트럼의 형상이 근사하지 않는 예



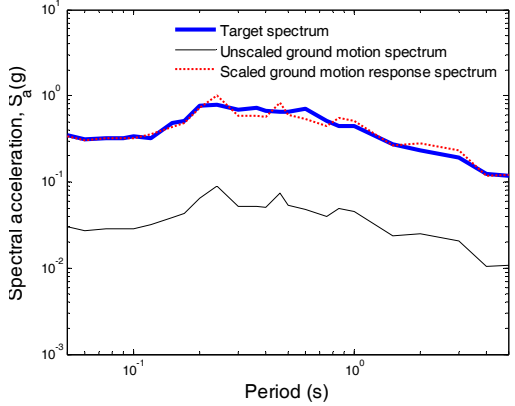
(a) 목표스펙트럼과 지반운동 응답스펙트럼 (Log scale)



(b) 주기에 따른 두 스펙트럼의 차(Δi)



(c) 목표스펙트럼에 맞추어 배율조정된 지반운동 응답스펙트럼(Log scale)



(d) 목표스펙트럼에 맞추어 배율조정된 지반운동 응답스펙트럼(Linear scale)

〈그림 3〉 목표스펙트럼과 지반운동 응답스펙트럼의 형상이 잘 근사한 예

면 다음과 같다.

$$\ln Sa_i^{scaled} = \ln(s \cdot Sa_i) = \ln s + \ln Sa_i \quad (8)$$

그렇다면 목표스펙트럼에 맞도록 배율이 조정된 지반운동 응답스펙트럼의 배율조정계수( $s^*$ )를 결정하는 것은 그림 3(b)를 통해서 유추해 볼 수 있다. 그림에서 나타내는 로그 스케일로 계산된 목표스펙트럼과 지반운동 응답스펙트럼

차( $\Delta_i$ )의 평균( $\mu_\Delta$ )이란 것은, 고려하는 주기 내에서 두 스펙트럼간 크기 차이의 평균을 의미한다. 따라서, 지반운동 로그 응답스펙트럼( $\ln Sa_i$ )에  $\mu_\Delta$ 을 더할 경우 목표스펙트럼에 근사하도록 배율이 조정된 지반운동 로그 응답스펙트럼[( $\ln Sa_i^{scaled} \cdot s^*$ )]이 된다(그림 3(c)).

$$(\ln Sa_i^{scaled})^* = \mu_\Delta + \ln Sa_i \quad (9)$$

결국, 식 (8)과 (9)를 비교함으로써 구하고자 하는 배율조정계수( $s^*$ )에 대해 다음과 같은 결론을 이끌어 낼 수 있다.

$$\ln s^* = \mu_{\Delta} \tag{10}$$

$$s^* = e^{\mu_{\Delta}} \tag{11}$$

정리하면, 제일 먼저 라이브러리에 속한 모든 지반운동기록에 대해 각 주기별로  $\Delta_i$ 를 계산한다. 그 중에서 목표스펙트럼의 형상과 가장 유사한( $\sigma_{\Delta}$ 을 최소로 하는) 지반운동기록을 찾는다(그림 3(b)). 다음으로 선정된 지반운동의 배율조정계수( $s^*$ )를 식 (11)을 이용하여 계산하고, 이를 식 (12)와 같이 적용하면 목표스펙트럼과 근사하게 된다(그림 3(c)와 (d)). 따라서 지반운동과 지반운동을 조정하는 배율조정계수가 결정된다.

$$(Sa_i^{scaled})^* = s^* \cdot Sa_i = e^{\mu_{\Delta}} \cdot Sa_i \tag{12}$$

참고로 배율조정을 하지 않고 지반운동기록을 선정하고자 할 때는 다음의  $\sum_{\Delta}$ 을 최소로 만드는 지반운동을 찾으면 된다. 이것은 기존연구<sup>(4)</sup>의 오차제곱합(SSE)과 동일하다(식 (3)과 비교).

$$\sum_{\Delta} = \sum_{i=1}^{n_p} (\Delta_i)^2 = \sum_{i=1}^{n_p} (\ln Sa_i^{target} - \ln Sa_i)^2 \tag{13}$$

### 3.2 제안된 방법의 효율성 및 타당성

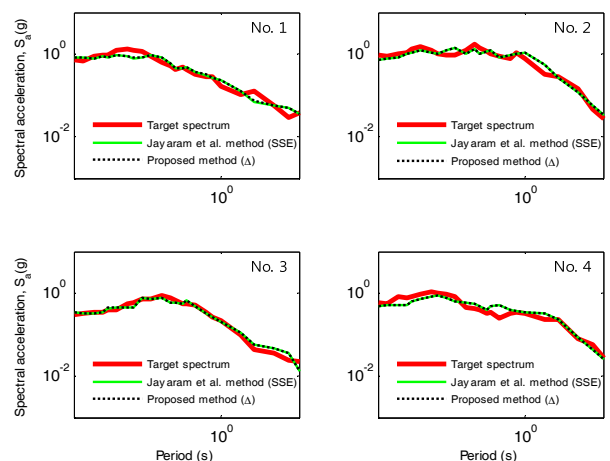
Jayaram et al.<sup>(4)</sup>의 연구는 목표스펙트럼을 재현하는  $n_g$ 개의 모의 목표스펙트럼을 생성하고 개별 모의 목표스펙트럼과 가장 근사한 지반운동을 선정하는 방식을 따른다. 따라서 한 개의 지반운동 선정 결과의 효율성과 타당성은 임의의 모의 목표스펙트럼에 대해 3.1절에 제안된 방법( $\Delta$ 를 이용한 방법)과 Jayaram et al.<sup>(4)</sup>이 제안한 방법(SSE를 이용한 방법)으로 각각 지반운동을 선정하여 그 결과를 비교함으로써 입증할 수 있다.

PEER의 강진지반운동데이터베이스(Strong Motion Database)<sup>(8)</sup>에 속한 392개의 지반운동 라이브러리( $M=6\sim 8$ ;  $R=0\sim 50$  km; 단단한 지반)로부터, 임의의 10개의 목표스펙트럼에 대하여 위의 두 방법을 이용하여 각각의 지반운동기록을 선정한 결과, 두 방법 모두 동일한 지반운동기록을 선정하였다. 여기서 SSE를 계산하기 위해 필요한 최대허용 배율조정계수( $s_{max}$ )와 배율조정계수 간격( $d_s$ )은 각각 5와 0.01을 입력하였다. 표 1에는 SSE와  $\Delta$ 를 이용한 방법으로 계산

한 배율조정계수와 그에 따른 목표스펙트럼과의 오차(Error)를 정리하였다. 오차는 식 (3)으로 계산하였다. 식 (3)에서 사용하는  $\ln Sa_i$ 은 배율조정계수를 적용한 지반운동 응답스펙트럼( $\ln Sa_i^{scaled}$ )을 의미한다. 표 1의 목표스펙트럼 1번부터 4번을 대상으로 선정된 지반운동 스펙트럼을 그림 4에 나타냈다. 선정된 10개의 지반운동기록 모두에 대해 제안된 방법( $\Delta$ )이 SSE를 이용한 방법에 비해 근소하지만 더 작은 오차를 나타낸 것을 확인할 수 있다. 이것은 제안된 방법( $\Delta$ )이 배율조정계수를 보다 정확하게 계산 하기 때문이다. 또한 제안된 방법은 배율조정계수를 반복된 연산 없이 단번에 계산하기 때문에, 이전의 배율조정 방식(그림 1)과 비교하여 계산량을  $1/n_{scale}$  배로 줄일 수 있다. 예를 들면 392개의 지반운동 라이브러리에서 목표스펙트럼에 맞는 한 개의 지반운동을 선정한다면 SSE를 이용한 방법은 배율조정계수( $s_{max}$ )와 배율조정계수 간격( $d_s$ )이 각각 5와 0.01으로 정할 경우 총 196,000( $=5/0.01 \times 392$ )번의 반복계산이 요구되지

〈표 1〉 SSE와  $\Delta$ 를 이용한 지반운동기록 선정결과 비교 ( $s_{max} = 5$ ,  $d_s = 0.01$ 일 때)

Target spectrum number	Scale factor		Error (using Eq. (3))	
	SSE	$\Delta$	SSE	$\Delta$
1	0.30	0.303800	1.507073	1.503270
2	2.52	2.521393	1.306909	1.306902
3	2.17	2.174483	0.898932	0.898830
4	0.78	0.784684	1.886041	1.885180
5	1.06	1.059971	1.205708	1.205708
6	1.68	1.678593	1.146531	1.146514
7	3.31	3.306037	1.470391	1.470357
8	2.64	2.635538	1.341545	1.341477
9	3.69	3.687659	1.417984	1.417975
10	3.78	3.778760	0.938498	0.938495



〈그림 4〉 SSE와  $\Delta$ 를 이용한 지반운동기록 선정결과

만, 본 연구에서 제안한  $\Delta$ 를 이용한 방법은 라이브러리에 포함된 각각의 지반운동에 대하여 배율을 한번에 결정하므로 총 392번의 계산만을 요구한다.

## 4. 지반운동기록 선정 알고리즘

### 4.1 알고리즘의 제안

3장에서는 목표스펙트럼과 가장 근사한 한 개의 지반운동기록을 찾는 방법에 대해 설명하였다. 본 장에서는 찾으려는 지반운동기록이 한 개가 아닌 여러 개일 경우, 목표스펙트럼에 가장 근사한 평균응답스펙트럼을 갖는 지반운동들의 선정방법을 제안한다.

Kottke and Rathje<sup>(3)</sup>은 로그스케일로 나타낸 스펙트럼의 형상과 크기의 관계가 독립적이라는 점을 활용하여 목표스펙트럼에 적합한 평균응답스펙트럼을 정할 수 있는 방법을 제안하였다. 배율을 조정된 지반운동 집단의  $i$  번째 주기의 평균응답스펙트럼( $\mu_{\ln Sa_i}^{scaled}$ )은 식 (14)와 같이 계산한다.

$$\mu_{\ln Sa_i}^{scaled} = \frac{1}{n_g} \left[ \ln(s_1 \cdot Sa_{1,i}) + \ln(s_2 \cdot Sa_{2,i}) + \dots + \ln(s_j \cdot Sa_{j,i}) + \dots + \ln(s_{n_g} \cdot Sa_{n_g,i}) \right] \quad (14)$$

여기서,  $j$ 는 선정하고자 하는  $n_g$ 개의 지반운동들 중  $j$ 번째 지반운동을 의미한다.

식 (14)에서 배율조정계수( $\ln s_j$ ) 부분과 응답스펙트럼( $\ln Sa_{j,i}$ ) 부분을 분리하여 전개하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mu_{\ln Sa_i}^{scaled} &= \frac{1}{n_g} (\ln s_1 + \ln s_2 + \dots + \ln s_j + \dots + \ln s_{n_g}) \\ &+ \frac{1}{n_g} (\ln Sa_{1,i} + \ln Sa_{2,i} + \dots + \ln Sa_{j,i} + \dots + \ln Sa_{n_g,i}) \quad (15) \\ &= \mu_{\ln s} + \mu_{\ln Sa_i} \end{aligned}$$

결국, 식 (15)에서 배율을 조정된 지반운동의 평균응답스펙트럼( $\mu_{\ln Sa_i}^{scaled}$ )은 배율을 조정하지 않은 지반운동의 평균응답스펙트럼( $\mu_{\ln Sa_i}$ )과 배율조정계수의 평균값( $\mu_{\ln s}$ )으로 구성된다. 따라서  $\mu_{\ln s}$ 는 평균응답스펙트럼의 크기를 결정하고,  $\mu_{\ln Sa_i}$ 는 평균응답스펙트럼의 형상을 결정한다. 이러한 사실을 근거로 하여 Kottke and Rathje<sup>(3)</sup>은 처음에 목표스펙트럼의 형상과 가장 가까운 최적으로 조합된 두 개의 지반운동기록을 먼저 찾고, 나머지 지반운동기록을 순차적으

로 하나씩 선정하는 방식으로 목표스펙트럼의 형상과 근사한 지반운동집단을 찾았다. 이후 각각의 지반운동기록에 대한 배율조정계수를 결정하였다. 그러나 이 방법을 이용하여 지반운동 집단을 선정할 경우 많은 지반운동 응답스펙트럼의 조합이 요구되어 많은 계산량을 필요로 한다. 결국 라이브러리가 커지고 선정해야 하는 지반운동의 수가 많아지게 되면 계산소요시간이 수시간 걸리거나 심지어는 컴퓨터 메모리의 한계를 넘어서는 일이 발생할 수 있다. 예를 들어 이 방법을 따를 경우 500개의 지반운동 라이브러리에서 20개의 지반운동을 선정하려 한다면 식 (2)에 의해 약  $1.1 \times 10^9$  [ $= 500! / 2! / (500-2)! \times (498+497+\dots+481)$ ]번의 계산량을 필요로 한다. 1000개의 지반운동 라이브러리로부터 20개의 지반운동을 선정하려 할 경우  $8.9 \times 10^9$  [ $= 1000! / 2! / (1000-2)! \times (998+997+\dots+981)$ ]번의 계산량이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 첫 번째 지반운동부터  $n_g$ 번째 지반운동까지 순차적으로 하나씩 선정해 나가는 방식을 채택함으로써 계산량을 크게 줄이면서 정확한 결과를 얻는 방법을 제안한다. 이렇게 할 경우 500개의 지반운동 라이브러리로부터 20개의 지반운동을 선정할 시, 총 계산량은 9810 ( $= 500+499+\dots+481$ )번으로 기존연구에 비해 훨씬 줄어들어 소요시간을 줄일 수 있다. 이와 같은 선정방식은 이미 Jayaram et al.<sup>(4)</sup>의 Greedy Optimization Algorithm에서 그 타당성이 입증된 바 있다. 다음의 예는 제안하는 알고리즘의 이해를 돕기 위하여 지반운동 선정과정을 설명한 것이다.

만약 목표스펙트럼과 가장 근사한  $j$  ( $\leq n_g$ )번째 지반운동기록을 선정하고자 한다면, 목표스펙트럼과 평균응답스펙트럼 차를 이용하여 그 지반운동기록을 찾을 수 있다. 목표스펙트럼과 배율조정 하지 않은  $j$ 번째까지의 지반운동들의  $i$  번째 주기에서 평균응답스펙트럼과 목표응답스펙트럼의 차를  $\Delta_{i(j)}$ 라 하면 그 계산식은 아래와 같다.

$$\Delta_{i(j)} = \ln Sa_i^{target} - \mu_{\ln Sa_i(j)} \quad (16)$$

$$\text{여기서 } \mu_{\ln Sa_i(j)} = \frac{1}{j} (\ln Sa_{1,i} + \ln Sa_{2,i} + \dots + \ln Sa_{j-1,i} + \ln Sa_{j,i}) \quad (17)$$

이 때, 식 (17)은  $i$ 번째 주기에서 나타난  $j$ 번째까지 지반운동들의 평균응답스펙트럼에 대한 형상을 의미한다. 여기서  $j-1$ 번째까지의 지반운동 응답스펙트럼( $\ln Sa_{1,i} + \ln Sa_{2,i} + \dots + \ln Sa_{j-1,i}$ )은 이미 알고 있는 정보이다(지반운동기록을 순차적으로 선정하였기 때문에). 따라서 찾고자 하는  $j$ 번째 지반운동은 그것의 응답스펙트럼( $\ln Sa_{j,i}$ )을 식 (17)에 넣음으로써  $j$ 번째 지반운동까지 포함한  $i$ 번째 주기의  $\Delta_{i(j)}$ 을 고려하는 전주기에 대하여 표준편차( $\sigma_{\Delta(j)}$ )를 계산했을 때,

그것을 가장 작게 만드는 것이다(그림 5(a)와 (b)). 표준편차  $\sigma_{\Delta(j)}$ 는 다음의 식을 통해 계산할 수 있다.

$$\sigma_{\Delta(j)} = \sqrt{\frac{1}{n_p - 1} \sum_{i=1}^{n_p} (\Delta_{i(j)} - \mu_{\Delta(j)})^2} \quad (18)$$

$j$ 번째 지반운동이 선정되었다면, 이때 고려하는 전 주기에 대한  $j$ 번째까지의 지반운동 평균응답스펙트럼과 목표스펙트럼 차의 평균( $\mu_{\Delta(j)}$ )은 식 (19)와 같이 계산한다(그림 5(c)).

$$\mu_{\Delta(j)} = \frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} \Delta_{i(j)} = \frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} (\ln Sa_i^{target} - \mu_{\ln Sa_i(j)}) \quad (19)$$

$\sigma_{\Delta(j)}$ 를 최소화하는  $j$ 번째 지반운동까지 찾았다면 지반운동의 평균스펙트럼을 목표스펙트럼에 맞출 수 있도록 배율을 조정하여야 한다. 평균응답스펙트럼의 배율은 형상과 독립적으로 식 (15)의  $\mu_{\ln s}$ 에 의해 결정됨을 설명한 바 있다. 또한 3장에서 한 개의 지반운동기록을 선정할 때  $\ln s^* = \mu_{\Delta}$ 라고 하였다[식 (10)]. 이와 같은 맥락에서  $j$ 번째까지의 지반운동 평균응답스펙트럼에 대한 배율조정계수인  $\mu_{\ln s(j)}^*$ 은  $\mu_{\Delta(j)}$ 와 같다고 할 수 있다.

$$\mu_{\ln s(j)}^* = \frac{1}{j} (\ln s_1 + \ln s_2 + \dots + \ln s_{j-1} + \ln s_j^*) = \mu_{\Delta(j)} \quad (20)$$

여기서  $j-1$ 번째까지의 지반운동기록에 대한 배율조정계수 ( $\ln s_1 + \ln s_2 + \dots + \ln s_{j-1}$ )는 이미 알고 있는 정보이다. 이것을 바탕으로 식 (20)을 정리하면  $j$ 번째로 선정된 지반운동기록의 배율조정계수( $\ln s_j^*$ )를 구할 수 있다(그림 5(c)).

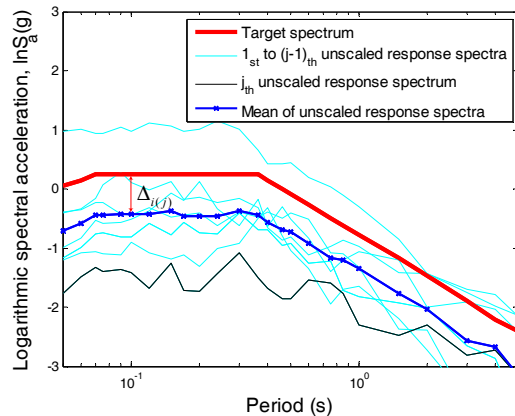
$$\ln s_j^* = j \cdot \mu_{\Delta(j)} - (j-1) \cdot \mu_{\Delta(j-1)} \quad (21)$$

결국, 지금까지 예제를 통해 정리된 식 (16)~(21)은  $j$ 번째 지반운동기록을 선정하고 그 배율조정계수( $\ln s_j^*$ )를 계산하기 위해 유도된 일반식이다. 이것은 식 (16)과 (21)에  $j=1$ 을 대입하면 각각 식 (5)와 (10)이 됨을 확인함으로써 그 일반성을 검증할 수 있다.

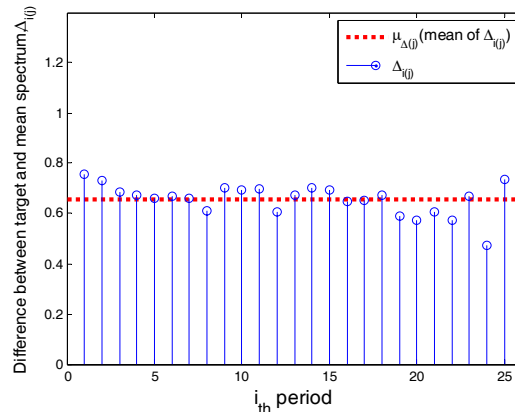
이제 일반 식을 이용하여 목표스펙트럼과 근사한  $n_g$ 개의 지반운동기록을 찾아보기로 한다. 첫 번째 지반운동기록부터  $n_g$ 번째 지반운동기록에 이르는 선정과정은 다음과 같다.  $j=1$ 일 때, 3장에서 제안된 방법( $\Delta$ )에 의해 첫 번째 지반운동기록을 선정하고 배율조정계수를 구한다. 다음으로  $j=2$ 일 때, 첫 번째로 선정된 지반운동을 제외한 라이브러리의 모든 지반운동에 대하여 식 (17)과 (16)을 차례로 계산하고,

식 (18)을 이용하여  $\Delta_{i(j=2)}$ 의 표준편차( $\sigma_{\Delta(j=2)}$ )를 최소로 만드는 두 번째 지반운동기록을 선정한다. 이때 식 (21)로부터 두 번째로 선정된 지반운동기록의 배율조정계수( $\ln s_{j=2}^*$ )를 계산한다. 이와 같은 방식으로 위의 과정을  $j = n_g$ 일 때까지 반복 수행하여 지반운동집단을 완성한다.

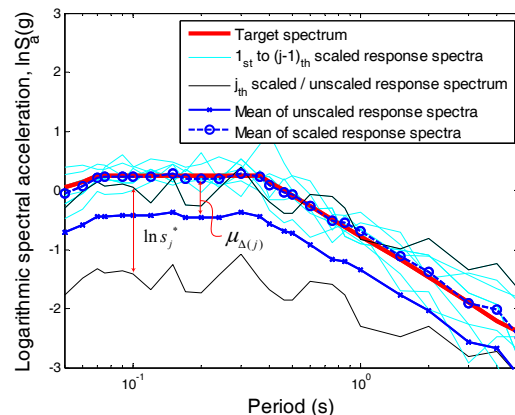
참고로 배율조정을 하지 않고 지반운동집단을 선정하고



(a) 평균응답스펙트럼의 형상이 목표스펙트럼과 근사하도록 만드는  $j$ 번째 지반운동 선정



(b) 주기에 따른 목표스펙트럼과  $j$ 번째 지반운동을 포함한 평균응답스펙트럼의 차( $\Delta_{i(j)}$ )



(c) 평균응답스펙트럼과 목표스펙트럼 차의 평균( $\mu_{\Delta(j)}$ )과  $j$ 번째 지반운동 배율조정계수( $\ln s_j^*$ )와의 관계

〈그림 5〉  $j$ 번째 지반운동기록의 선정과정

자 할 때는 아래의  $\sum \Delta_{(j)}$ 을 최소로 만드는  $j$ 번째 지반운동 기록을 찾으면 된다. 다시 말해서,  $j=1$ 을 대입하여 식 (22)를 최소로 하는 첫 번째 지반운동기록을 찾는다. 다음으로  $j=2$ 일 때, 첫 번째 지반운동을 고정된 채 식 (17)을 통해  $\mu_{\ln Sa_i(j=2)}$ 을 계산하여 마찬가지로 식 (22)를 최소로 하는 두 번째 지반운동기록을 찾는다. 이와 같은 방식으로  $j=n_g$ 일 때까지 반복 수행하면 지반운동집단을 완성할 수 있다.

$$\sum \Delta_{(j)} = \sum_{i=1}^{n_p} (\Delta_{i(j)})^2 = \sum_{i=1}^{n_p} (\ln Sa_i^{target} - \mu_{\ln Sa_i(j)})^2 \quad (22)$$

이상의 방법은 서론에서 언급한대로 목표 분산(=0)을 맞추기 위한 특별한 과정을 수행하고 있지 않다. 그러나 위 방법을 이용하여 최종적인 지반운동집단의 선정 시 기존 연구의 결과와 비교하여 목표 분산을 잘 고려하고 있음을 보였다(4.2절 참고). 이는 알고리즘 상에서 지반운동을 하나씩 선정해 나갈 때 목표스펙트럼과 가장 가까운 지반운동을 선정하여 표준편차를 최소화하기 때문이다(그림 5(c)).

최종적으로 목표스펙트럼과 가장 근사한 평균스펙트럼을 갖는 배율조정된 지반운동집단을 지반운동 라이브러리부터 선정하는 알고리즘은 다음과 같이 요약할 수 있다.

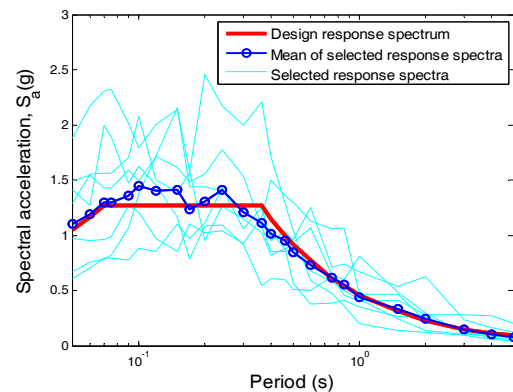
- (1) Step 1: 목표스펙트럼 결정  
대상지역의 위치, 지반조건, 재현주기 등에 의해 목표스펙트럼을 결정한다.
- (2) Step 2: 라이브러리 구축  
지진규모, 진원거리, 지반조건 등에 근거하여 지반운동기록 라이브러리를 구축한다.
- (3) Step 3: =1 대입
- (4) Step 4: 배율조정을 할 경우, 라이브러리의 모든 지반운동기록에 대해 식 (16)의  $\Delta_{(j)}$  및 식 (18)의  $\sigma_{\Delta(j)}$  계산. 그렇지 않을 경우, 식 (22)를 계산
- (5) Step 5:  $\sigma_{\Delta(j)}$  [배율조정하지 않을 경우, 식 (22)]을 최소로 만드는 한 개의 지반운동기록을 선정하고 라이브러리에서 그 지반운동기록을 제외시킴. 배율조정을 하지 않는 경우 Step 8로 이동.
- (6) Step 6: 식 (21)로부터 선정된  $j$ 번째 지반운동기록의 배율조정계수( $\ln s_j^*$ ) 계산
- (7) Step 7: 배율조정된  $j$ 번째 지반운동 응답스펙트럼 계산( $Sa_j^{scaled} = e^{\ln s_j^*} \cdot Sa_j$ )
- (8) Step 8: 만약  $j < n_g$ 이면  $j$ 를 1만큼 증가시킨 후 Step 4로 회귀, 그렇지 않으면 알고리즘 종료

### 4.2 알고리즘의 적용

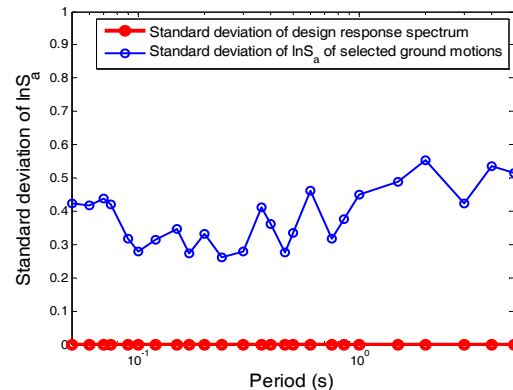
제안된 알고리즘의 적용 결과는 다음과 같다.

목표스펙트럼을 결정하기 위해, Northern California 지역의 보통암 지반(Rock Site)을 대상으로 IBC 2006<sup>(1)</sup>에 따라 설계스펙트럼을 작성하였다(Kottke and Rathje<sup>(3)</sup>의 연구에서 제시한 목표스펙트럼과 동일). 또한 미국지질조사국(USGS) 사이트에서 제공하는 지역의 재해도 분류(Deaggregation of the Hazard at the Site)<sup>(7)</sup>를 이용하여 대상지역에 발생할 것으로 예상되는 평균 지진규모( $M \approx 7$ )와 진원거리( $R \approx 10$ km)를 구하였다. 다음으로 PEER의 강진지반운동데이터 베이스<sup>(8)</sup>로부터 대상지역의 지진규모, 진원거리, 지반조건과 비슷한 조건에 해당하는 평면상의 서로 직교하는 두 성분을 모두 포함한 총 40개(20쌍)의 지반운동기록을 라이브러리로 구축하였다( $M=6.7\sim 7.3$ ;  $R=0\sim 10$  km; 단단한 지반). 위의 목표스펙트럼과 라이브러리는 기존연구<sup>(3)</sup>의 결과와 직접적인 비교를 하기 위해 기존연구<sup>(3)</sup>와 동일한 것으로 결정하였다.

구조물의 고유주기에 관계없이 모든 주기영역(0~5sec)에 대해 목표스펙트럼(설계스펙트럼)과 근사한 7개의 지반운동기록을 선정한 결과, 그림 6(a)와 같이 선정된 지반운동집단



(a) 설계스펙트럼과 평균응답스펙트럼



(b) 선정된 지반운동집단의 표준편차

〈그림 6〉 제안된 알고리즘을 이용한 지반운동집단 선정 결과



의 평균응답스펙트럼은 설계스펙트럼과 매우 근사하였다. 또한 제안된 알고리즘으로 선정된 지반운동 응답스펙트럼의 표준편차(=0.34~0.61; 그림 6(b))는 목표 표준편차(=0)를 맞추기 위하여 식 (2)의 수많은 경우의 수를 고려한 기존 연구 결과(=0.2~0.7)<sup>(3)</sup>와 비교하여 유사한 결과를 나타냈다. 소요시간의 측면에서 보면, 기존연구<sup>(3)</sup>의 경우 한 시간 정도 걸리던 계산이 제안된 알고리즘을 통해 수행하면 단 수초에 원하는 지반운동집단을 선정할 수 있었다. 결론적으로 제안된 알고리즘은 소요시간과 지반운동기록 선정결과 모두 만족할만한 수준의 결과를 도출하였다.

### 5. 결론

본 연구에서는 배율조정을 이용하여 목표스펙트럼과 근사한 지반운동기록을 찾는 알고리즘을 제안하였다. 이때, 알고리즘에 적용할 지반운동기록 선정방법( $\Delta$ )을 제안하였고, 이를 통해 배율조정계수를 정확히 구해낼 수 있는 동시에 기존 방법(SSE 이용한 방법)과 비교하여 한 개의 지반운동기록 선정 시  $1/n_{scale}$  배만큼 계산량을 줄일 수 있었다. 본 연구에서 제안한 방법에 따라 선정한 지반운동집단의 평균 응답스펙트럼은 목표스펙트럼과 거의 일치하였을 뿐더러 기존 연구와 비교하여 목표 분산을 잘 만족시킴을 보여주었다. 또한 사용자가 쉽게 사용할 수 있는 알고리즘으로 정립되지 않았던 기존연구<sup>(3)</sup>는 40개의 라이브러리에서 7개의 지반운동을 선정할 때 한 시간 정도 소요된 반면, 제안된 알고리즘을 이용할 경우 수초 내로 원하는 결과를 얻을 수 있었다.

### 감사의 글

본 논문은 교육과학기술부(MEST) 우수연구센터 육성사업인 한양대 친환경건축센터(2011-0001415)의 지원과 한국연구재단(2010-0027812)의 지원으로 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

### 표 기

- $n_g$  : 선정하고자 하는 지반운동기록의 수
- $n_L$  : 라이브러리에 속한 지반운동기록의 수
- $n_{trial}$  : 지반운동기록 선정 시 고려해야 할 모든 경우의 수 (계산량)
- $n_{scale}$  : 배율조정 시 한 개의 지반운동에 요구되는 계산량
- $i$  :  $i$ 번째 주기

- $j$  :  $j$ 번째 지반운동 응답스펙트럼
- $n_p$  : 고려하는 주기의 총 개수
- $\ln Sa^{target}$  or  $\ln Sa_i^{target}$  : ( $i$ 번째 주기에서의) (로그) 목표스펙트럼
- $Sa$  or  $\ln Sa$  or  $\ln Sa_i$  or  $\ln Sa_{j,i}$  : ( $i$ 번째 주기에 대한) ( $j$ 번째 지반운동기록의) (로그) 응답스펙트럼
- $Sa^{scaled}$  or  $\ln Sa^{scale}$  : 배율조정된 지반운동 (로그) 응답스펙트럼
- $s$  or  $\ln s$  or  $\ln s_j$  : ( $j$ 번째 지반운동기록의) (로그) 배율조정계수
- $s_{max}$  : 최대허용 배율조정계수
- $d_s$  : 배율조정계수 간격
- SSE : 지반운동기록 선정을 위한 기존의 기준식
- $\Delta$  : 제안된 지반운동기록 선정 방법
- (윗첨자)\* : 찾고자 하는 대상을 표현
- ( $j$ ) : 3장에서 찾고자 하는 대상으로써  $j$ 번째 지반운동기록을 표현
- $\Delta_i$  or  $\Delta_{i(j)}$  : ( $i$ 번째 주기에 대한) 목표스펙트럼과 (평균)응답스펙트럼의 차
- $\mu_{\Delta}$  or  $\mu_{\Delta i(j)}$  :  $\Delta_i$  (or  $\Delta_{i(j)}$ )의 평균
- $\sigma_{\Delta}$  or  $\sigma_{\Delta i(j)}$  :  $\Delta_i$  (or  $\Delta_{i(j)}$ )의 표준편차
- $\mu_{\ln Sa}^{scaled}$  or  $\mu_{\ln Sa_i}^{scaled}$  : ( $i$ 번째 주기에서의) 배율조정된 지반운동 집단의 평균응답스펙트럼
- $\mu_{\ln Sa}$  or  $\mu_{\ln Sa_i}$  : ( $i$ 번째 주기에서의) 지반운동 응답스펙트럼의 평균
- $\sigma_{\ln Sa}$  or  $\sigma_{\ln Sa_i}$  : ( $i$ 번째 주기에서의) 지반운동 응답스펙트럼의 표준편차
- $\sum_{\Delta}$  or  $\sum_{\Delta(j)}$  : 배율조정을 하지 않을 경우 한 개의 지반운동기록을 찾기 위한 기준식
- $\mu_{n_s(j)}$  : ( $j$ 번째 배율조정계수를 찾고자 할 때) 배율조정계수의 평균
- $\mu_{\ln Sa(j)}$  : ( $j$ 번째 응답스펙트럼을 찾고자 할 때) 평균응답스펙트럼
- $M$  : 지진규모
- $R$  : 진원거리

### 참고 문헌

1. IBC 2006, *International Building Code*, International Code Council, Delmar Publishers, 2006.
2. Naeim, F., Alimoradi, A., and Pezeshk, S., "Selection and scaling of ground motions time histories for structural

- design using genetic algorithms,” *Earthquake Spectra* 20, 413-426, 2004.
3. Kottke, A.R., and Rathje, E.M., “A semi-automated procedure for selecting and scaling recorded earthquake motions for dynamic analysis,” *Earthquake Spectra* 24, 911-932, 2008.
  4. Jayaram, N., Lin, T., and Baker, J.W., “A computationally efficient ground-motion selection algorithm for matching a target response spectrum mean and variance,” *Earthquake Spectra*, in press, 2011.
  5. Bommer, J.J., and Acevedo, A.B., “The use of real earthquake accelerograms as input to dynamic analysis,” *Earthquake Engineering*, Vol. 8, No. 4, 1-50, 2004.
  6. Watson-Lamprey, J., and Abrahamson, N., “Selection of ground motion time series and limits on scaling,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26, 477-482, 2006.
  7. USGS, 2008 Interactive Deaggregation (Beta), <http://eqint.cr.usgs.gov/deaggint/2008/> (last verified 03/29/2010), 2008
  8. PEER strong motion database, 2000. <http://peer.berkeley.edu/smcat> (last accessed June 29, 2005)