

요구곡선 산정방법에 따른 능력스펙트럼법의 유효성 평가 및 비교

Effect of Demand Spectrums on the Accuracy of Capacity Spectrum Method

김 홍 진* 민 경 원** 박 민 규***
Kim, Hongjin Min, Kyung-Won Park, Minkyu

국문요약

비선형시스템을 등가의 선형시스템으로 치환하는 것은 해석이 간단하다는 매우 중요한 장점을 제공하지만 구조물의 실제 비선형거동을 정확하게 모델링하지 못하기 때문에 능력스펙트럼법의 정확도는 정확한 등가주기와 등가감쇠비의 산정과 구해진 등가감쇠비에 따른 탄성응답스펙트럼의 수정방법과 그에 따른 요구곡선의 산정에 영향을 받는다. 본 논문에서는 요구곡선의 산정방법에 따른 능력스펙트럼법의 정확성을 분석하였다. 이를 위해 ATC-40과 Euro Code에서 제안한 감소 계수 등의 유효성을 평가하였다. Newmark와 Hall의 수정계수에 기초로 한 ATC-40에서 주어진 감소 계수에 의해 구해진 가속도 응답에 비해 Euro Code에서 주어진 감소 계수를 이용하여 구한 가속도 응답이 실제 평균 응답에 보다 유사함을 알 수 있었다. 그리고 유사가속도 응답을 이용한 방법과 절대가속도 응답을 이용한 방법을 이용하여 요구곡선을 산정하여 능력스펙트럼법의 정확성을 검증해 보았다. 절대가속도 응답을 이용한 결과가 전반적으로 유사가속도 응답을 이용한 결과에 비해 커짐을 알 수 있었고, 능력스펙트럼법이 전반적으로 응답을 과소평가하는 경향이 있어서 이러한 큰 값을 주는 것이 좀 더 정확한 결과를 줄 수 있었다. 하지만 탄성 최대 강도에 대한 항복 강도의 비가 커질수록 그리고 항복 후 강성비가 커질수록 이러한 결과의 차이는 거의 없어짐을 알 수 있었다.

주요어 : 능력스펙트럼법, 요구곡선, 유사가속도 응답, 절대가속도 응답, 응답 감소 계수

ABSTRACT

While transforming the inelastic system into the equivalent elastic one gives an advantage of simpler analysis, the actual inelastic behavior of the system is hardly modeled in the capacity spectrum method (CSM). Therefore, the accuracy of CSM depends on the precise estimation of equivalent period and damping ratio as well as the modification of the elastic response spectrum and the corresponding demand spectrum. In this paper, the effect of demand spectrums on the accuracy of CSM is evaluated. First, the response reduction factors provided in ATC-40 and Euro Code are evaluated. Numerical analysis results indicated that the acceleration responses obtained using the factor of Euro Code are closer to the actual response than those obtained using the factors of ATC-40. Next, the accuracy of CSM is evaluated constructing the demand spectrum using the absolute acceleration responses and pseudo acceleration responses. The results obtained using the absolute acceleration responses were found to be generally larger than those obtained using the pseudo ones. Since CSM often underestimates the response, the use of absolute acceleration response gives the response relatively closer to the exact ones. However, the difference becomes negligible as the hardening ratio and the yield strength ratio become larger.

Key words : capacity spectrum method, demand spectrum, pseudo acceleration response, absolute acceleration response, response reduction factor

1. 서 론

ATC-40과 FEMA-273에서 채택한 능력스펙트럼법은 1970년대에 처음 소개되었으며, 건축물의 내진 성능을 간단히 평가하기 위한 방법이다.⁽¹⁾⁻⁽³⁾ 이 방법은 탄성 응답스펙트럼에 의해 구해진 요구곡선과 구조물의 횡하중에 저항하는 능력곡선을 이용하는 방법으로, 두 곡선의 교차점을 구하여 대략적인 구조물의 내진성능을 평가한다. 여기서 구조물의 비선형 거동의 영향은 등가주기와 등가감쇠비로 표현되어 탄성 응답스펙트럼을 수정함으로써 나타낸다. 즉, 지진에 의한 구조물의 최대 비선형 응답을 구하기 위하여 등가주기와 등가감쇠를 갖는 탄성 구조물의 변위를 구함으로써 비탄성 시스템의 동적 해석을 생

략할 수 있다.

이처럼 비선형시스템을 등가의 선형시스템으로 치환하는 것은 해석이 간단하다는 매우 중요한 장점을 제공하지만 구조물의 실제 비선형거동을 정확하게 모델링하지 못하기 때문에 능력스펙트럼법의 정확도는 첫째로 정확한 등가주기와 등가감쇠비의 산정에 영향을 받는다. 일반적으로 비선형거동을 하는 시스템은 강성저하와 연성거동에 의한 감쇠효과의 증가를 보이며, 이는 등가의 선형시스템에서 각각 등가주기와 등가감쇠비로 표현된다. 이러한 등가주기와 등가감쇠비를 정확히 산정하기 위해 많은 연구가 수행되었다. Miranda⁽⁴⁾는 264개의 지진에 대한 비선형 동적해석을 통해 ATC-40, Güllan, Kowalsky, 그리고 Iwan 등에 의해 주어진 등가주기와 등가감쇠비의 정확성을 비교 평가하였다. 우선, 각각의 주기의 시스템에 대해 시스템의 연성도를 가정한 후, 주어진 연성도에 따른 등가주기와 등가감쇠비를 갖는 등가의 선형시스템의 최대변위를 구하였다. 그리고, 얻어진 최대변위를 비선형 동적해석에서 구해

* RIST 선임연구원, 공학박사(대표저자: hongjinkim@cricmail.net)

** 정회원 · 단국대학교 건축대학 부교수, 공학 박사

*** 단국대학교 건축대학 석사과정

본 논문에 대한 토의를 2004년 8월 31일까지 학회에 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2004. 3. 5 / 심사종료일 : 2004. 4. 20)

진 최대 변위와 비교하는 방법을 통해 정확성을 평가하였다. 김홍진 등⁽⁵⁾은 상기 기술한 방법들을 이용하여 등가주기와 등가감쇠비를 산정한 후, ATC-40에서 제시한 절차B에 따라 등가선형시스템의 최대변위를 구하고 이를 비선형해석을 통해 얻어진 최대 변위값과 비교함으로써 능력스펙트럼법의 유효성을 평가하였다.

둘째로, 능력스펙트럼법의 정확도는 구해진 등가감쇠비에 따른 탄성 응답스펙트럼의 수정방법과 그에 따른 요구곡선의 산정에 영향을 받는다. 구조물의 요구곡선은 가속도-변위의 관계로 나타내어 지는데 ATC-40과 FEMA-273에서는 등가감쇠를 갖는 구조물의 가속도와 변위의 스펙트럼 값을 구하기 위하여 두 개의 응답 감소 계수 (Response reduction factors)를 사용한다. 이 때 변위와 가속도 응답간의 관계는 구조물의 응답이 조화응답이라는 가정 하에 구해진다. 즉, 임의의 주기 구조물의 최대 가속도 응답은 최대 변위 응답 값에 고유진동수의 제곱을 곱함으로써 구한다. 이는 구조물이 고유진동수를 갖는 조화거동을 하는 경우 최대 변위가 발생할 때 구조물의 최대 전단력이 발생한다는 가정에 의한다. 이 경우, 구해지는 가속도 응답을 최대 절대가속도 응답과 구분하기 위하여 유사 가속도 응답이라 한다.

감쇠비가 0일 때 절대가속도 응답과 유사가속도 응답은 일치하며, 10%이하인 작은 감쇠비에서는 두 값이 거의 유사하여 같이 쓸 수 있다. 하지만, 큰 감쇠비에서는 둘의 값이 완전히 다르다. 따라서 부가 감쇠장치가 추가되는 등 구조물의 감쇠가 클 경우, 전단력은 스프링과 감쇠기에서의 힘의 합으로 계산되어야 하므로, 유사가속도 응답은 최대 전단력을 계산하기 위한 절대가속도를 대신할 수 없다. 더구나, 실제 지진 하중하에서 구조물이 비탄성 거동을 할 경우 조화거동을 한다는 가정을 만족시킬 수 없다. 이에 Lin 등⁽⁶⁾은 유사가속도 응답 대신 절대가속도 응답을 사용하여 요구곡선을 산정함으로써 능력스펙트럼법을 개선하고자 하였다.

ATC-40과 FEMA-273에서 사용되는 감쇠효과의 증가에 의한 응답의 감소는 Newmark와 Hall⁽⁷⁾이 제안한 감소 계수에 기초하여 구해진다. 이 때 응답 감소 계수를 가속도 구간과 속도 구간으로 구분하여 사용하기 때문에 두 구간의 경계에서 감쇠비가 커질수록 강한 비연속성을 가진다. 또한 주기가 0초에 가까워질수록 실제 구조물은 강제거동을 함으로써 가속도 응답은 감쇠비와 상관없이 최대 지반가속도 값으로 수렴되는 반면, 감소 계수를 이용한 경우는 이러한 강제거동을 표현해 내지 못하므로 단주기 구조물의 경우 능력스펙트럼법의 오차가 크게 나타난다.

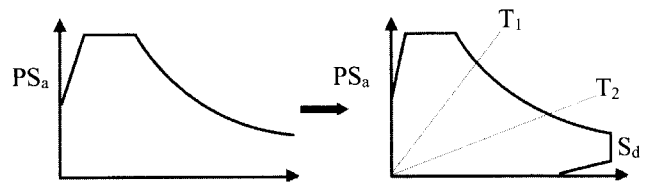
본 논문에서는 요구곡선의 산정에 따른 능력스펙트럼법의 유효성을 평가하고 정확성을 분석하였다. 이를 위해 ATC-40과 FEMA-273에서 사용되고 있는 Newmark와 Hall이 제안한 감소 계수와 Euro Code에서 제안한 감소 계수 등의 유효성을 평가하였다. 그리고 유사가속도 응답을 이용한 방법과 절대가속도 응답을 이용한 방법을 이용하여 요구곡선을 산정하여 능력스펙트럼법의 정확성을 검증해 보았다. 수치해석은 구조물

의 주기 및 연성도, 요구되는 탄성강도에 대한 항복강도비, 초기 선형 탄성강도에 대한 항복 후 강성비가 다른 여러 단자유도 구조물에 대하여 수행하였다. 지진하중으로는 단일 지진의 경우에 대해서는 El Centro 1940 지진데이터를 이용하였고, 여러지진의 평균 응답에 대한 영향을 살펴보기 위하여 ATC-40에서 제안하는 진원으로부터 10km이상의 지역에서 측정된 10개의 지진자료를 사용하였다. 각 지진은 두 개의 성분을 가지므로, 모두 20개의 지반가속도를 사용하여 평균응답을 계산하였다. 구조물의 정확한 내진 성능을 구하기 위해서는 능력곡선의 정확한 산정 또한 영향을 미치나 본 논문에서 이에 대한 논의는 생략한다.

2. 요구곡선 (Demand Spectrum)

2.1. 요구곡선의 산정

요구곡선은 일반적으로 그림 1(a) 와 같이 주기에 대한 유사가속도 응답, 유사속도 응답, 또는 변위 응답의 관계로 표현되는 것을 변위와 유사가속도 응답의 관계로 하나의 그래프에 변환한다. 그 변환은 그림 1(b)와 같이 유사가속도 응답은 수직축에 표기하고, 변위 응답은 수평축에 표기하는 ADRS (Acceleration Displacement Response Spectrum) 의 형식으로 표현한다. 이 변환에는 식 (1)의 관계를 이용한다.



(a) 주기 - 유사가속도 응답의 관계 (b) 변위 - 유사가속도 응답의 관계
그림 1 요구곡선

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi} PS_a \quad (1)$$

여기서 S_d 와 PS_a 는 각각 변위 응답스펙트럼 값과 유사가속도 응답스펙트럼 값을 나타내며, T 는 구조물의 주기이다. 이는 식 (2)에 의해 표현되는 유사가속도 응답과 변위 응답의 관계에서 유도되었다.

$$PS_a = \omega^2 S_d \quad (2)$$

여기서 ω ($\omega = 2\pi/T$)는 고유진동수이다. 그림 1(b)의 요구곡선에서 주기축은 T_1 과 T_2 로 표현된 방사선 방향이 된다.

2.2 최대 전단력

질량이 m , 감쇠가 c , 강성이 k 인 단자유도 구조물로 모델링 되는 통상적인 구조물들은 다음과 같은 운동 방정식에

의해 지진진동의 영향을 받는다.

$$m \ddot{x}_i(t) + \dot{x}(t) + kx(t) = 0 \quad (3)$$

여기서 $\ddot{x}_i(t)$ 는 절대가속도로 $\dot{x}(t) + \ddot{x}_g(t)$ 와 일치한다. 그리고 $x(t)$, $\dot{x}(t)$, $\ddot{x}(t)$ 그리고 $\ddot{x}_g(t)$ 는 각각 상대 변위, 상대 속도, 상대 가속도 그리고 지반 가속도이다. 식 (3)에 의한 운동 방정식에서의 변위와 절대가속도 응답스펙트럼은 Duhamel 적분 등을 사용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$S_d \equiv |x(t)|_{\max} = -\frac{1}{\omega\sqrt{1-\xi^2}} |S(t)|_{\max} \quad (4)$$

$$S_a \equiv |\ddot{x}_i(t)|_{\max} = |\omega^2(1-2\xi^2)x(t) + 2\xi\omega C(t)|_{\max} \quad (5)$$

여기서,

$$S(t) = \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin \omega_d(t-\tau) d\tau \quad (6)$$

$$C(t) = \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \cos \omega_d(t-\tau) d\tau \quad (7)$$

이고 $\omega_d = \omega\sqrt{1-\xi^2}$, ξ 는 감쇠비, 그리고 S_a 는 절대가속도이다. 식 (3)의 운동방정식에 지배되는 구조물의 설계 목적을 위한 최대 전단력 V 는 일반적으로 감쇠비가 작은 경우 식 (8)과 같이 스프링의 최대력으로 계산된다.⁽⁸⁾

$$V = k|x(t)|_{\max} = kS_d = m\omega^2 S_d = mPS_a \quad (8)$$

하지만 부가 감쇠장치가 추가되는 등 구조물의 감쇠가 클 경우, 전단력은 위와 달리 스프링과 감쇠기에서의 힘의 합으로 계산되어진다. 그러므로 전단력을 구하는 식은 다음과 같다.⁽⁹⁾

$$V = |kx(t) + \hat{c}\dot{x}(t)|_{\max} = |m\ddot{x}_i(t)|_{\max} = mS_a \quad (9)$$

여기서, \hat{c} 는 구조물 본래의 감쇠와 추가된 감쇠의 합이다. 이 경우, 최대 전단력은 질량에 유사가속도인 PS_a 를 곱한 것이 아니라 최대 절대가속도인 S_a 를 곱한 것과 같다.

감쇠비에 따른 PS_a 와 S_a 의 평균비를 20개 지진에 대하여 구하여 그림 2에 나타내었다. 사용된 20개의 지진가속도는 ATC-40에서 제안하는 진원으로부터 10km이상의 지역에서 측정된 10개의 지진자료의 각 두 개씩의 수평성분이며, 주어진 목표 응답스펙트럼과 일치되도록 FEMA-273에서 제시하는 절차를 사용하여 크기를 조정하여 사용하였다.^{(2),(10)} 목표 응답스펙트럼은 S_D 지반에 해당하는 지진계수인 $C_a=0.4$, $C_i=0.6$ 을 사용하여 구하였다. 그림에서 감쇠값이 0일 때, PS_a 와 S_a 는 일치하며, 10%이하인 작은 감쇠비에서는 두

값이 거의 유사함을 알 수 있다. 하지만, 큰 감쇠비에서는 PS_a 와 S_a 가 완전히 다르며, PS_a 는 최대 전단력을 계산하기 위한 절대가속도를 대신할 수 없음을 알 수 있다.

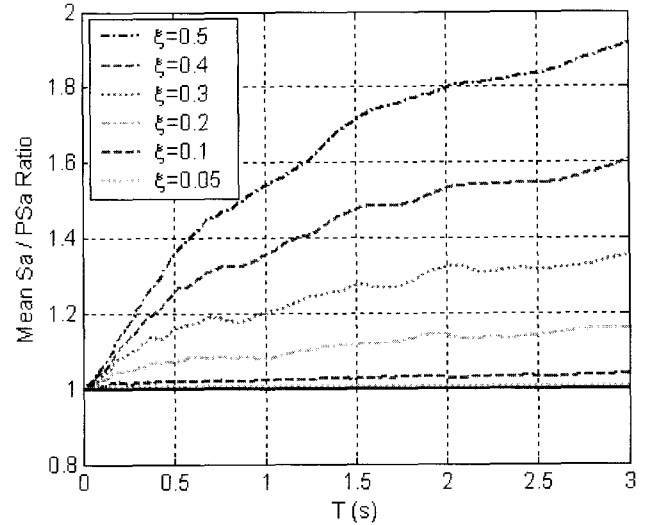


그림 2 감쇠비에 따른 20개 지진을 이용한 평균 유사가속도 응답과 절대가속도 응답의 비율

2.3 최대 절대가속도 응답과 유사가속도 응답의 관계

전술한 바와 같이, 그림 1에 보여지는 스펙트럼의 가속도는 최대 절대가속도 응답이 아닌 유사가속도 응답인데, 이는 조화거동을 하는 구조물일 경우 최대 변위가 발생 할 때의 가속도 응답을 의미한다. 최대 절대가속도 응답과 유사가속도 응답 사이의 대략적인 관계는 최대 응답 구간동안 단자유도시스템이 고유진동수 ω 의 조화거동을 받는다고 가정함으로써 얻을 수 있다. 그림 3에 조화거동을 하는 구조물의 변위와 전단력의 관계를 나타내었다. 그림에서 최대 절대가속도 응답은 최대 변위 응답보다 작은 변위 응답이 발생하는 시간에서 일어난다는 것을 알 수 있으며, 둘 사이의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽¹¹⁾

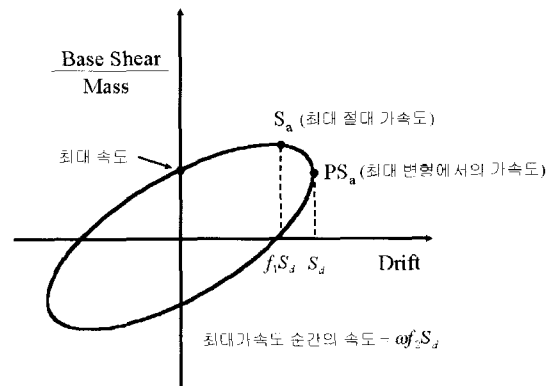


그림 3 조화거동을 하는 구조물의 변위와 전단력의 관계

$$S_a = (f_1 + 2\xi f_2) PS_a \quad (10)$$

여기서,

$$f_1 = \cos[\tan^{-1}(2\xi)], \quad f_2 = \sin[\tan^{-1}(2\xi)] \quad (11)$$

이다. f_1 과 f_2 요소는 설계를 위해 부재력을 얻기 위한 유용한 조합요소를 나타낸다. 즉, 최대 가속도에서의 변위 응답은 대략적으로 최대 변위 응답의 f_1 배한 것과 같다. 그리고, 최대 절대가속도가 일어나는 순간의 부재력은 최대 층간변위가 일어나는 순간의 힘에 f_1 배한 것과 최대 층간변위에 주파수 ω 를 곱한 것과 같은 최대속도가 일어나는 순간의 힘에 f_2 배한 것의 선형조합으로 얻을 수 있다. 식 (10)은 아래 식 (12)와 같이 단순화시킬 수 있다.

$$S_a = \sqrt{1 + 4\xi^2} PS_a \quad (12)$$

단, 이 근사관계식은 선형 탄성거동과 점성거동에 대해서만 유효하다.

3. 응답 감소 계수 (Response reduction factor)

3.1 ATC-40과 FEMA-273

ATC-40과 FEMA-273에서는 Newmark와 Hall이 제안한 감쇠비와 스펙트럼응답과의 관계에 기초하여, 산정된 등가감쇠비에 대해 가속도 구간과 속도 구간으로 구분하여 요구곡선을 수정할 수 있는 응답 감소 계수를 사용한다. ATC-40에서 주어진 등가감쇠비에 따른 응답 감소 계수의 산정식은 다음과 같다.

$$SR_A = \frac{3.21 - 0.68 \ln(\xi_{eq})}{2.12}, \quad T \leq T_o \quad (13)$$

$$SR_V = \frac{2.31 - 0.41 \ln(\xi_{eq})}{1.65}, \quad T > T_o \quad (14)$$

여기서 ξ_{eq} 는 퍼센트(%)로 표현되는 구조물의 등가감쇠비, 그리고 SR_A 와 SR_V 는 각각 가속도 구간의 응답 감소 계수와 속도 구간의 응답 감소 계수이다. 식 (13)과 (14)에서 T_o 는 가속도 구간과 속도 구간을 나누는 주기로 아래와 같은 식에 의하여 구해진다.

$$T_o = 0.2 T_s \quad (15)$$

$$T_s = \frac{C_v}{2.5 C_a} \quad (16)$$

FEMA-273에서 주어진 감소 계수 B_s 와 B_1 은 각각 SR_A 와 SR_V 의 역수와 같다. 구해진 감소 계수에 의한 요구곡선의 수정은 그림 4와 같이 5% 감쇠비 요구곡선에 구간별로 각각의 감소 계수를 곱하여 이루어진다.

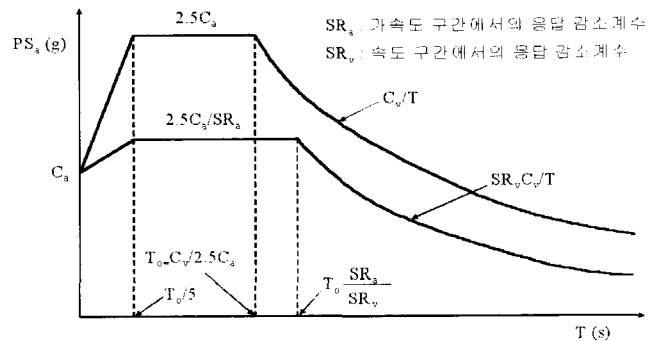


그림 4 감소 계수에 의한 5% 감쇠비 요구곡선의 수정

3.2 Euro Code

Euro Code에서는 비록 능력스펙트럼법을 위하여 제시된

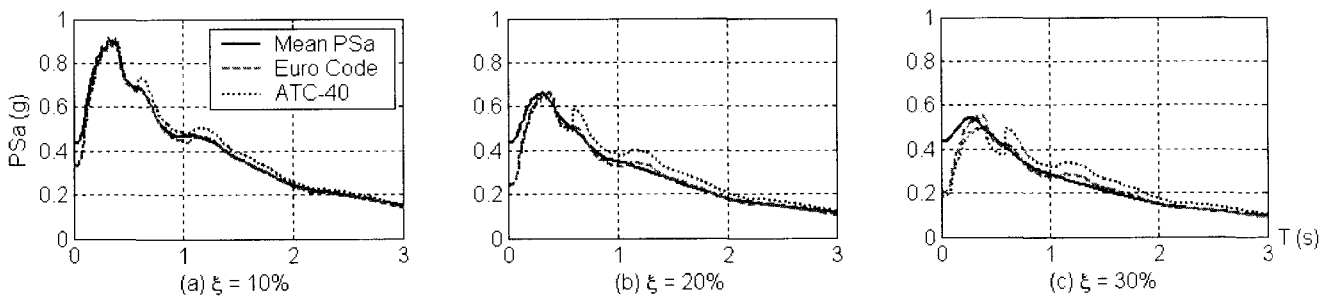


그림 5 감쇠비별 20개 지진의 평균 유사가속도 응답

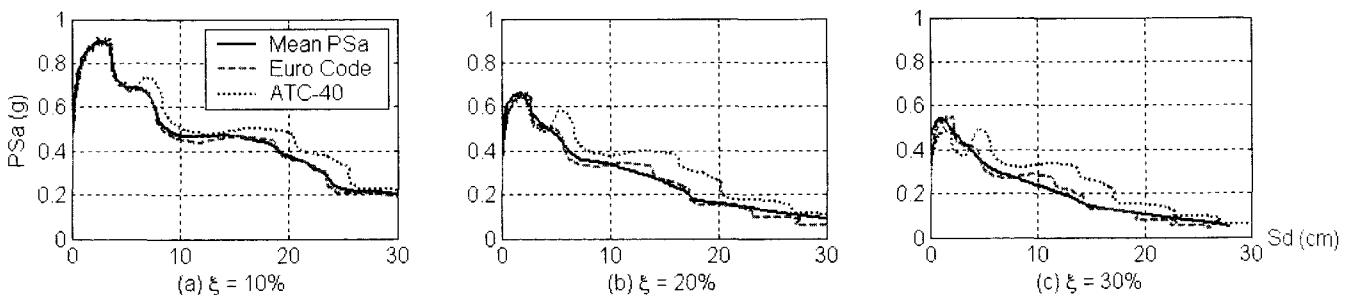


그림 6 감쇠비별 20개 지진의 평균 유사가속도 응답을 이용한 요구곡선

것은 아니지만 ATC-40과 FEMA-273와 유사하게 감소 계수에 의해 감쇠비에 따른 5% 감쇠비의 가속도 응답을 수정하도록 하고 있다.⁽¹²⁾ Euro Code에서는 앞의 두 기준과는 달리 아래와 같이 하나의 감소 계수에 의하여 응답을 수정한다.

$$\eta = \sqrt{7/(2 + \xi_{c,q})} \quad (17)$$

그림 5는 앞서 사용된 20개 지진에 대한 평균 가속도 응답을 감쇠비가 각각 10%, 20%, 그리고 30%인 경우에 대하여 나타내었다. 그림에서 실선은 20개 지진의 감쇠비별 평균 유사 가속도를 나타내며, 점선은 ATC-40과 FEMA-273에서 주어진 응답 감소 계수와 Euro Code에서 주어진 감소 계수를 이용하여 5% 감쇠비를 갖는 구조물에 대한 평균 가속도 응답에 각각의 감소 계수를 곱하여 구한 가속도 응답을 나타낸다. ATC-40과 FEMA-273에 주어진 응답 감소 계수를 이용하여 구한 가속도 응답을 구하기 위한 T_0 는 표준응답스펙트럼을 이용한 경우와 달리 직접적으로 구할 수는 없으나, 20개 지진의 크기를 조절하기 위하여 사용된 C_a 와 C_v 값을 이용하여 식 (15)와 (16)에 의하여 구하였다. 그림에서 감쇠비가 상대적으로 작은 경우에는 ATC-40과 FEMA-273에서 주어진 응답 감소 계수와 Euro Code에서 주어진 감소 계수를 이용하여 구한 가속도 응답 모두 해당 감쇠비의 평균 가속도 응답과 큰 차이를 보이지 않으나, 감쇠가 커짐에 따라 그 차이가 커짐을 알 수 있다. 특히 Newmark와 Hall의 수정계수에 기초로 한 ATC-40과 FEMA-273에서 주어진 감소 계수에 의해 구해진 가속도 응답에 비해 Euro Code에서 주어진 감소 계수를 이용하여 구한 가속도 응답이 실제 평균 응답에 보다 유사함을 알 수 있다. 또한 ATC-40과 FEMA-273방법의 경우 가속도 구간과 속도 구간의 경계인 $T_0 = 0.6$ 초를 경계로 감쇠비가 커질수록 강한 비연속성을 가짐을 알 수 있다. 단, 주기가 0초에 가까워질수록 구조물이 강제거동을 함으로써 실제 가속도 응답은 감쇠비와 상관없이 하나의 최대 지반가속도 값으로 수렴되나, 감소 계수를 이용한 경우는 이러한 강제거동이 나타나지 않음을 알 수 있다.

그림 6에는 앞서 그림 5에서 구한 가속도 응답스펙트럼을 이용하여 구한 요구곡선을 나타내었다. 그림에서 ATC-40과 FEMA-273에서 주어진 응답 감소 계수를 사용하여 구한 요구곡선이 감쇠비가 커질수록 평균 가속도 응답과 비교하여 오차가 더욱 커짐을 알 수 있다. 특히 그림 5에서 나타나는 비연속

성 때문에 요구곡선에서 하나의 가속도 응답 값에 해당하는 변위 응답 값이 4개까지 나오는 경우가 생김을 알 수 있다.

4. 요구곡선의 산정에 따른 능력스펙트럼법의 유효성 평가

4.1 단일 지진

요구곡선의 산정에 따른 능력스펙트럼법의 유효성 평가를 위하여 우선 El Centro 지진을 이용한 단일 지진인 경우에 대하여 살펴보았다. 예제 구조물은 Chopra⁽¹³⁾ 등이 능력스펙트럼법의 정확성을 평가하기 위하여 사용한 것으로 연성도가 2, 4 그리고 6이고 주기가 0.5초와 1초인 구조물에 대하여 살펴보았다. 6개의 예제 구조물은 표 1에 정리되어 있다. 여기서 구조물의 항복 후 강성비는 0이고, F_y 는 항복강도, D_y 는 항복 변위, 그리고 w 는 구조물의 무게이다. 동일한 예제에 대하여 Lin 등⁽⁶⁾은 유사가속도 응답 대신 절대가속도 응답을 사용하여 요구곡선을 산정하여 능력스펙트럼법을 개선하고자 하였다. 표에서 6번째 열의 $D_{est,PSa}$ 는 유사가속도 응답을 사용하여 예측된 구조물의 최대변위를, 7번째 열의 $D_{est,Sa}$ 는 Lin 등이 제안한 절대가속도 응답을 사용하여 예측된 구조물의 최대변위를, 그리고 마지막 열의 D_{exact} 는 비선형 시간이력해석에 의한 최대 비선형응답을 나타낸다.

본 논문에서는 좀더 광범위한 유효성 평가를 위하여 0.1초부터 3.0초까지의 주기를 갖는 구조물들에 대하여 유사가속도 응답과 절대가속도 응답을 이용한 방법에 대하여 각각 비교해 보았다. 또한 항복 후 강성비가 해석결과에 미치는 영향에 대하여 살펴보기 위하여 항복 후 강성비, α 를 0, 0.1, 0.2, 0.3, 그리고 0.4인 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 단, 구조물의 연성도는 Chopra 등과 동일하게 2, 4, 그리고 6인 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 이를 위해, ATC-40에서 제시한 방법을 이용하여 등가주기와 등가감쇠비를 산정한 후, 수렴성을 확보하기 위하여 절차B에 따라 성능점을 산정하였다.

해석결과는 그림 7부터 그림 11까지에 정리하여 나타내었다. 그림 7에서 동그라미와 네모로 표현된 각각 6개의 점들이 표 1에 나타난 Chopra 등과 Lin 등이 해석한 구조물을 표시한다. 그림에서 절대가속도 응답을 사용한 경우의 결과가 전반적으로 유사가속도 응답을 사용한 경우보다 큰 결과 값을 주는 것을 알 수 있다. 유사가속도 응답을 사용한 능력스펙트럼

표 1 예제구조물의 특성 및 El Centro 지진에 대한 응답 ($\alpha=0$)

	System Properties			System Response(cm)			
	$T(s)$	F_y/w	$D_y (cm)$	μ	$D_{est,PSa(13)}$	$D_{est,Sa(6)}$	D_{exact}
System 1	0.5	0.1257	0.7801	6	3.536	4.88	4.654
System 2	0.5	0.1783	1.106	4	3.075	3.65	4.402
System 3	0.5	0.3411	2.117	2	3.284	3.31	4.210
System 4	1.0	0.07141	1.773	6	7.922	11.71	10.55
System 5	1.0	0.1032	2.562	4	4.453	8.31	10.16
System 6	1.0	0.1733	4.302	2	5.318	5.367	8.533

법이 응답에 대해 과소평가하는 경우 절대가속도 응답을 사용하는 것이 개선된 결과를 가져오나, 반대로 과대평가하는 경우에는 오히려 더욱 큰 과대평가를 하는 것을 알 수 있다. 특히, 그림 7에서 알 수 있듯이, Lin 등의 논문에서 살펴본 6개의 구조물의 경우 유사가속도 응답을 사용한 능력스펙트럼법이 응답에 대해 과소평가하는 경우였기 때문에 절대가속도 응답을 사용한 결과가 좋다고 보고되었으나, 해석결과 절대가속도를 사용하는 것이 항상 나은 결과를 주지는 않는 것으로 나타났다.

4.2 20개 지진

요구곡선의 산정에 따른 능력스펙트럼법의 보다 일반적인 유효성 평가를 하기 위하여 20개 지진에 대한 평균 응답을 통한 해석을 수행하였다. 앞서의 경우와 달리, 일반적인 경우는 구조물의 연성도가 주어지지 않고 해석을 통해 성능곡선과 요구곡선이 만나는 성능점을 얻어야 연성도를 구할 수 있음을 고려하여, 성능곡선을 가정한 후 상기 기술된 방법들을 이용하여

일반적인 능력스펙트럼법의 절차에 따라 성능점을 구하였다.

능력스펙트럼법들의 정확성을 검증하기 위해 사용된 예제 구조물은 주기가 각각 0.1부터 3.0초까지 0.1초씩 변할 때, 탄성 최대 강도에 대한 항복 강도의 비, e 를 각각 0.1, 0.3, 0.5로 고정시키고, 항복 후 강성비, α 는 각각 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4를 가지는 총 450개의 단자유도 구조물이다. 여기서 탄성 최대 강도에 대한 항복 강도의 비, e 는 아래의 식과 같이 주어진다. ⁽¹⁰⁾

$$e = \frac{F_y}{mPS_{a,5}} \quad (18)$$

여기서, m 은 구조물의 질량, 그리고 $PS_{a,5}$ 는 5% 감쇠비의 목표 응답스펙트럼에서 구조물의 탄성주기에 해당하는 최대 유사가속도 값이다. 이 경우 항복변위, D_y 는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$D_y = \frac{ePS_{a,5}T_a^2}{4\pi^2} \quad (19)$$

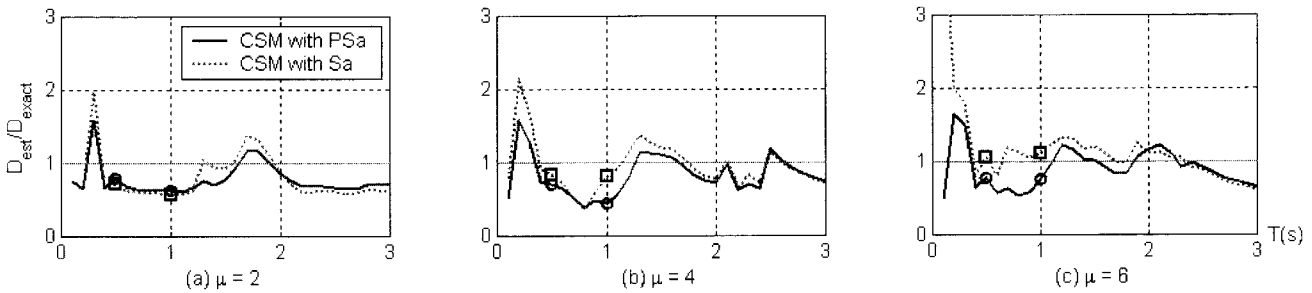


그림 7 절대가속도 응답과 유사가속도 응답을 사용한 능력스펙트럼법의 정확성 비교, 단일지진 ($\alpha=0$)

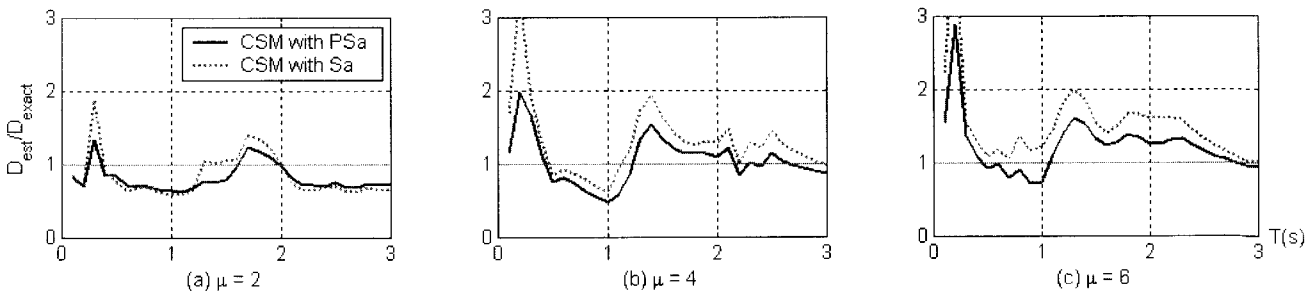


그림 8 절대가속도 응답과 유사가속도 응답을 사용한 능력스펙트럼법의 정확성 비교, 단일지진 ($\alpha=0.1$)

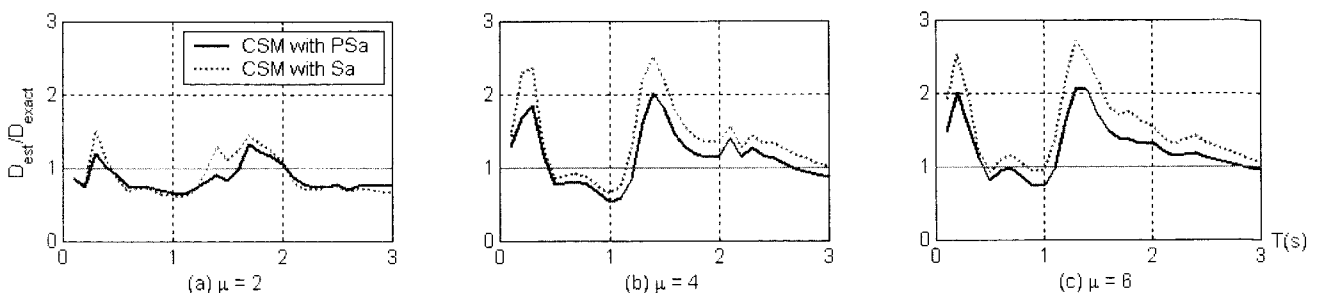


그림 9 절대가속도 응답과 유사가속도 응답을 사용한 능력스펙트럼법의 정확성 비교, 단일지진 ($\alpha=0.2$)

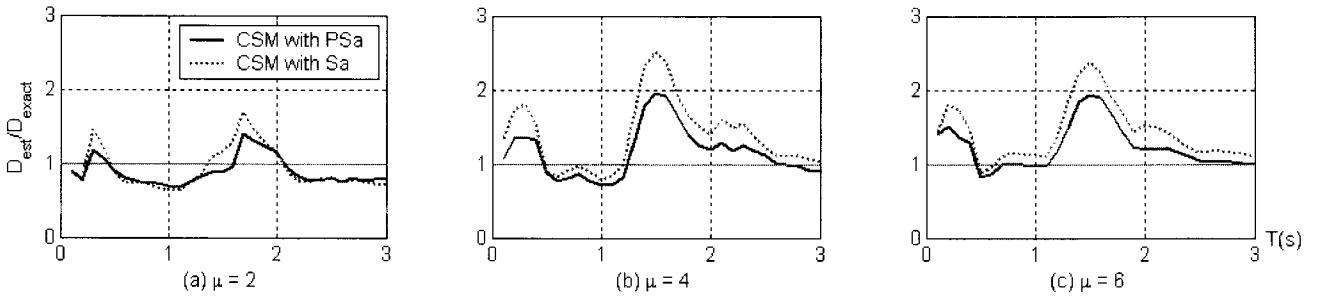


그림 10 절대가속도 응답과 유사가속도 응답을 사용한 능력스펙트럼법의 정확성 비교, 단일지진 ($\alpha=0.3$)

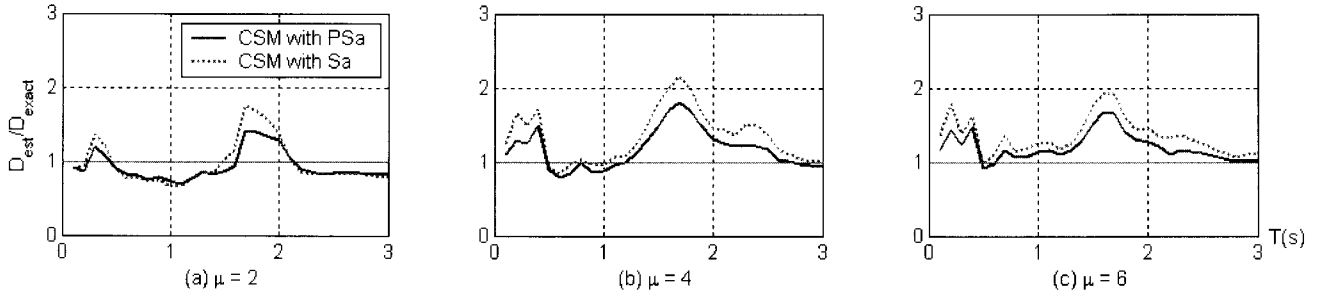


그림 11 절대가속도 응답과 유사가속도 응답을 사용한 능력스펙트럼법의 정확성 비교, 단일지진 ($\alpha=0.4$)

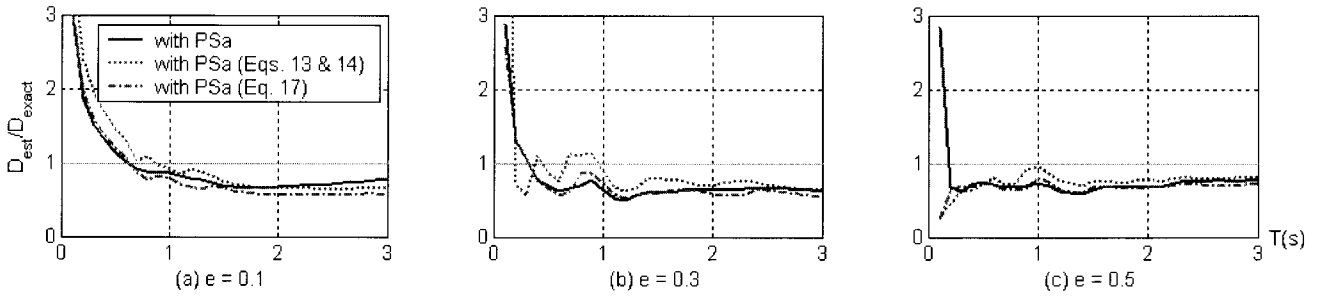


그림 12 응답 감소 계수를 이용한 요구곡선의 수정에 따른 능력스펙트럼법의 최대변위 예측 비교 ($\alpha=0$)

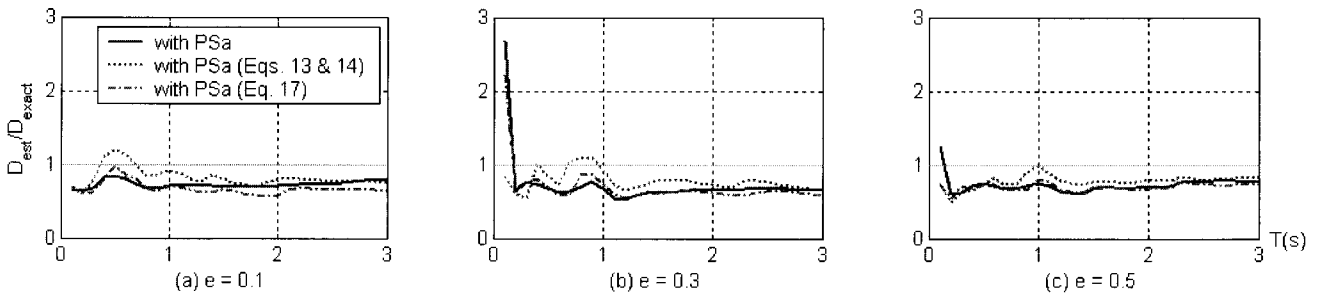


그림 13 응답 감소 계수를 이용한 요구곡선의 수정에 따른 능력스펙트럼법의 최대변위 예측 비교 ($\alpha=0.1$)

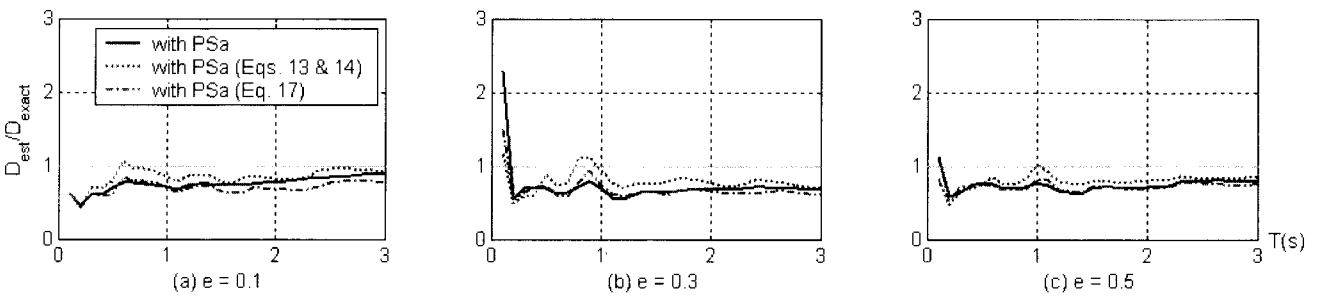


그림 14 응답 감소 계수를 이용한 요구곡선의 수정에 따른 능력스펙트럼법의 최대변위 예측 비교 ($\alpha=0.2$)

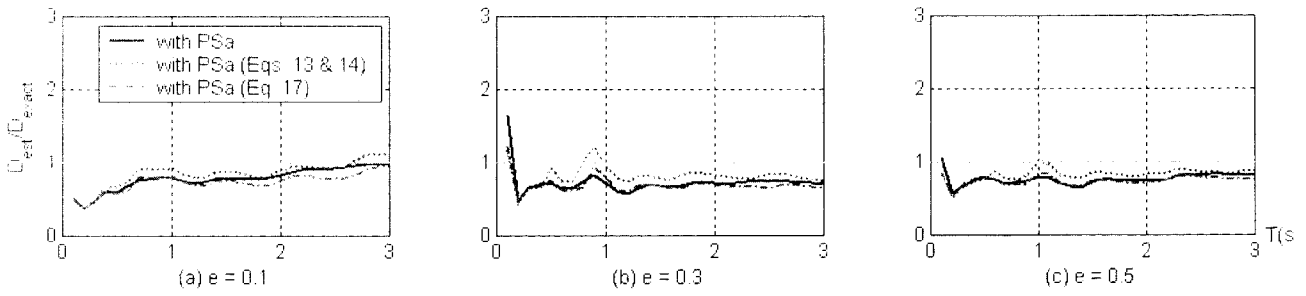


그림 15 응답 감소 계수를 이용한 요구곡선의 수정에 따른 능력스펙트럼법의 최대변위 예측 비교 ($\alpha=0.3$)

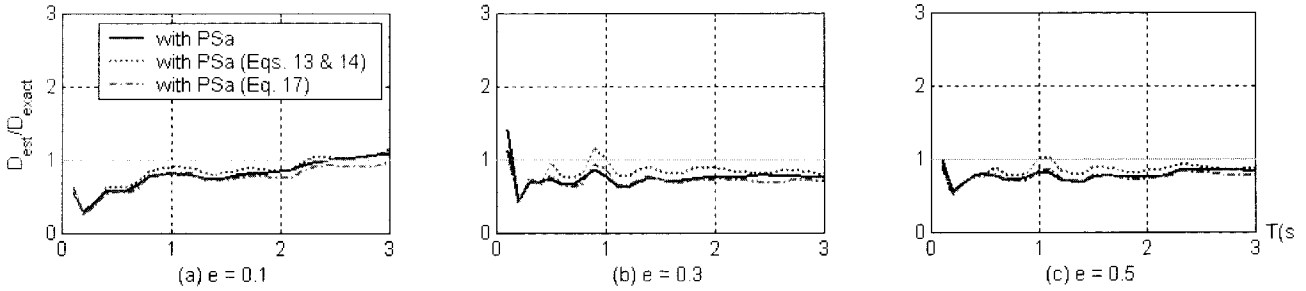


그림 16 응답 감소 계수를 이용한 요구곡선의 수정에 따른 능력스펙트럼법의 최대변위 예측 비교 ($\alpha=0.4$)

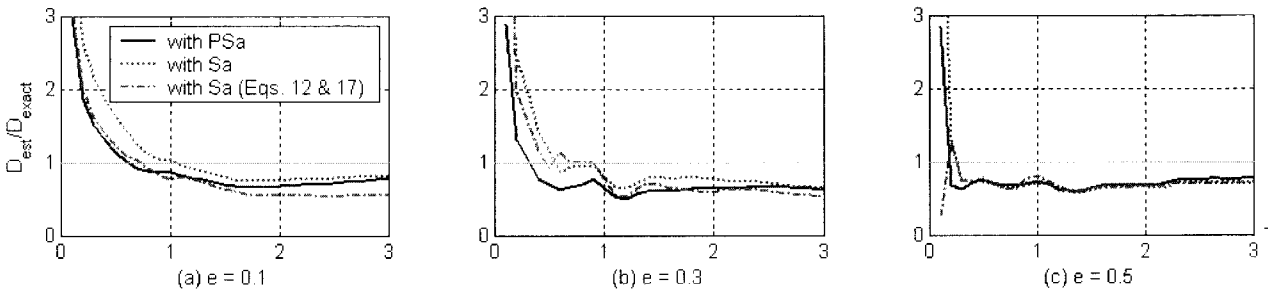


그림 17 절대가속도 응답과 유사가속도 응답을 사용한 능력스펙트럼법의 정확성 비교, 20개 지진 ($\alpha=0$)

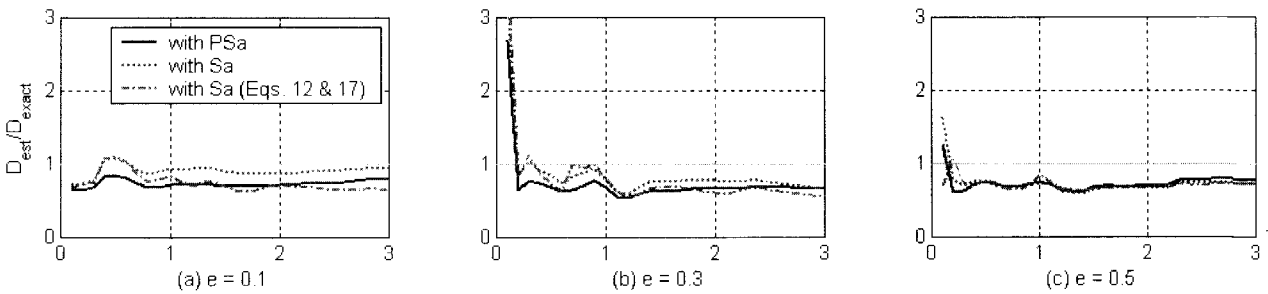


그림 18 절대가속도 응답과 유사가속도 응답을 사용한 능력스펙트럼법의 정확성 비교, 20개 지진 ($\alpha=0.1$)

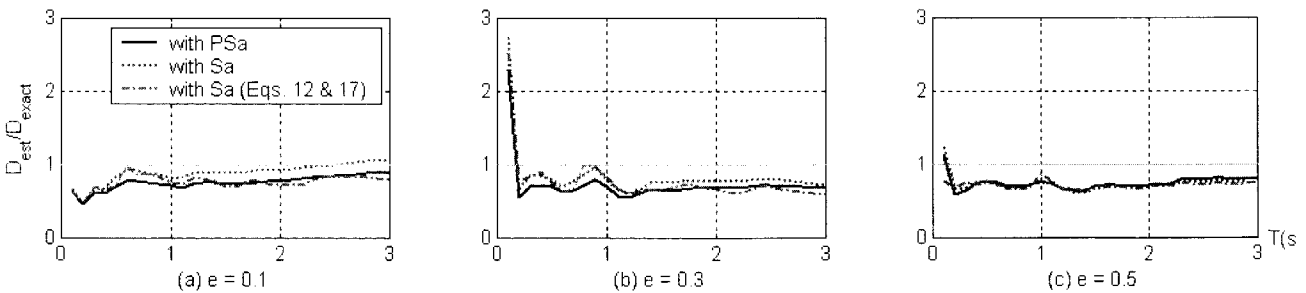


그림 19 절대가속도 응답과 유사가속도 응답을 사용한 능력스펙트럼법의 정확성 비교, 20개 지진 ($\alpha=0.2$)

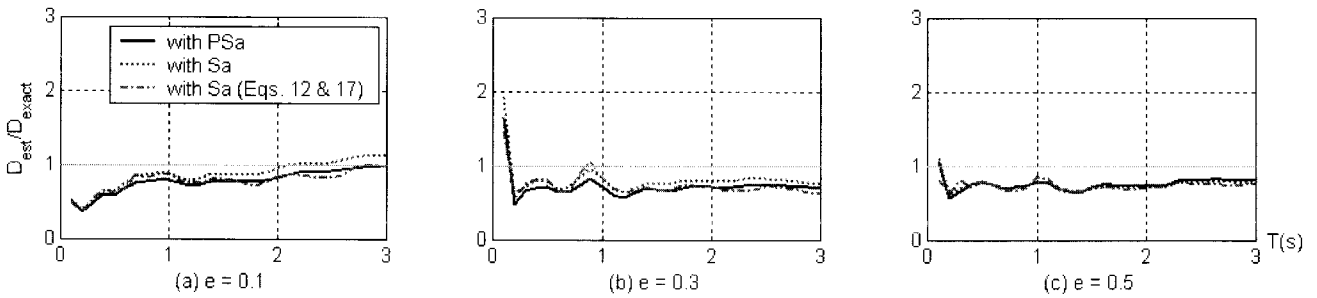


그림 20 절대가속도 응답과 유사가속도 응답을 사용한 능력스펙트럼법의 정확성 비교, 20개 지진 ($\alpha=0.3$)

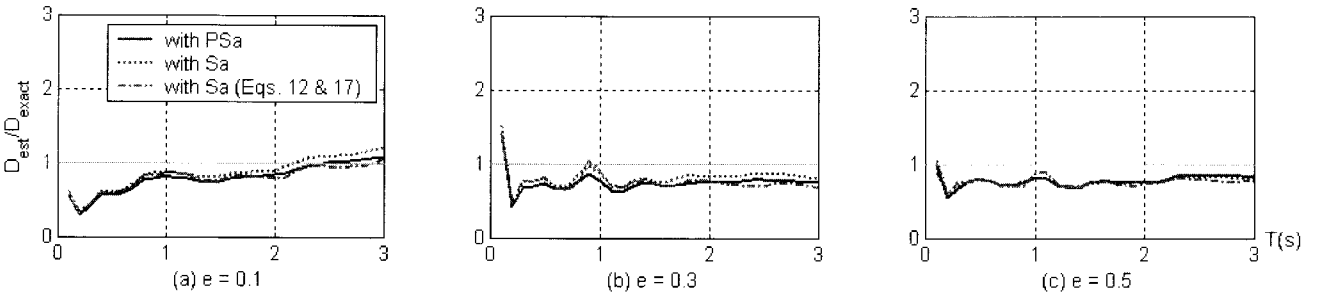


그림 21 절대가속도 응답과 유사가속도 응답을 사용한 능력스펙트럼법의 정확성 비교, 20개 지진 ($\alpha=0.4$)

탄성 최대 강도에 대한 항복 강도의 비와 항복변위를 구하기 위한 목표 응답스펙트럼은 앞서 사용한 S_D 지반에 해당하는 지진계수인 $C_a=0.4$, $C_b=0.6$ 을 사용하여 구하였다.

그림 12부터 그림 16까지는 구해진 등가감쇠비를 이용한 요구곡선의 수정방법에 따른 능력스펙트럼법의 해석결과를 나타내었다. 그림에서 실선은 절치B에서 매단계 구해진 등가감쇠와 등가주기를 갖는 구조물의 20개 지진에 의한 평균 유사가속도 응답을 직접 구하여 해석을 수행한 결과이고, 점선들은 각각 ATC-40과 FEMA-273에서 주어진 응답 감소 계수와 Euro Code 에서 주어진 응답 감소 계수를 이용하여 5% 유사가속도 응답을 수정하여 해석을 수행한 결과이다. 이렇게 응답 감소 계수를 이용하여 능력곡선을 수정하는 경우는 매단계 20개 지진의 평균 가속도 응답을 직접 구하는 경우에 비해 현저히 빠른 계산속도를 보인다.

그림에서 평균 가속도 응답을 사용하여 요구곡선을 수정한 경우의 결과와 두 종류의 응답 감소 계수를 사용하여 구한 결과 값에는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 단, 주기가 짧은 구조물과 탄성 최대 강도에 대한 항복 강도의 비가 작고 항복 후 강성비가 0에 가까워 비선형성이 클 경우 각 방법에 의한 결과 값은 서로 크게 차이를 알 수 있다. 이는 그림 5에서 보았듯이 짧은 주기 구조물에 대해 응답 감소 계수를 이용하여 요구곡선을 구하는 경우 강제거동에 대하여 고려할 수 없기 때문이며, 능력스펙트럼법 자체의 정확성이 구조물의 주기가 짧고 비선형성이 클수록 오차가 많아지는 것에 기인한다고 볼 수 있다.

그림 17부터 그림 21까지는 유사가속도 응답과 절대가속도 응답을 이용하여 요구곡선을 산정하는 방법을 이용하여 능력스펙트럼법의 해석결과를 나타내었다. 이 경우 매 단계 구해진 등가감쇠와 등가주기를 갖는 구조물의 20개 지진의 평균

유사가속도 응답을 구하는 것과 응답 감소 계수를 이용하여 유사가속도 응답을 구하는 것이 앞서 보았듯이 해석결과에 큰 차이를 보이지 않는 것을 고려하여, 절대가속도 응답을 식 (17)과 식 (12)에 주어진 관계식을 이용하여 5% 감쇠비의 유사가속도 응답을 수정하여 구하는 방법을 이용하여 계산에 소요되는 시간을 줄여보았다. 이러한 방법에 의한 결과는 그림에서 일점쇄선으로 표현되었다. 역시 매 단계 평균 유사가속도 또는 절대가속도 응답을 구하는 방법에 비해 현저히 빠른 계산속도를 보였다.

그림에서 탄성 최대 강도에 대한 항복 강도의 비가 작은 경우, 즉 $e = 0.1$ 일때, El Centro 지진을 이용하여 단일지진에 대하여 해석했던 결과와 유사하게 절대가속도 응답을 이용한 결과가 전반적으로 유사가속도 응답을 이용한 결과에 비해 커짐을 알 수 있다. 그러나 단일지진의 경우와 달리 20개 지진의 평균 응답을 이용한 경우, 능력스펙트럼법이 전반적으로 응답을 과소평가하는 경향이 있어서 이러한 큰 값을 주는 것이 좀더 정확한 결과를 줄 수 있다. 하지만 탄성 최대 강도에 대한 항복 강도의 비가 커질수록 그리고 항복 후 강성비가 커질수록 세가지 방법에 의한 결과의 차이는 거의 없어짐을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 요구곡선의 산정방법에 따른 능력스펙트럼법의 정확성을 분석하였다. 이를 위해 첫째, ATC-40과 Euro Code에서 제안한 감소 계수 등의 유효성을 평가하였다. 수치 해석을 통하여, 감쇠비가 상대적으로 작은 경우에는 ATC-40과 FEMA-273에서 주어진 응답 감소 계수와 Euro Code에서 주어진 감소 계수를 이용하여 구한 가속도 응답 모두 해당 감

쇠비의 평균 가속도 응답과 큰 차이를 보이지 않으나, 감쇠가 커짐에 따라 그 차이가 커짐을 알 수 있었다. 특히 Newmark와 Hall의 수정계수에 기초로 한 ATC-40과 FEMA-273에서 주어진 감소 계수에 의해 구해진 가속도 응답에 비해 Euro Code에서 주어진 감소 계수를 이용하여 구한 가속도 응답이 실제 평균 응답에 보다 유사함을 알 수 있었다. 또한 ATC-40과 FEMA-273에서 주어진 응답 감소 계수를 이용하는 경우, 감쇠비가 커질수록 가속도 구간과 속도 구간의 경계로 강한 비연속성을 가짐을 알 수 있다. 단, 주기가 0초에 가까워질수록 구조물이 강체거동을 함으로써 실제 가속도 응답은 감쇠비와 상관없이 하나의 최대 지반가속도 값으로 수렴되나, 감소 계수를 이용한 경우는 이러한 강체거동이 나타나지 않음을 알 수 있었다. 그리고, ATC-40과 FEMA-273에서 제안한 응답 감소 계수를 사용할 경우, 가속도 응답에서 나타나는 비연속성 때문에 요구곡선으로 변환하였을 경우 하나의 가속도 응답 값에 해당하는 변위 응답 값이 4개까지 나오는 경우가 생김을 알 수 있었다.

둘째로, 유사가속도 응답을 이용한 방법과 절대가속도 응답을 이용한 방법을 이용하여 요구곡선을 산정하여 능력스펙트럼법의 정확성을 검증해 보았다. El Centro 1940 지진 데이터를 이용한 단일 지진의 경우의 해석에서 Lin 등이 보고하였던 결과와 달리, 절대가속도 응답을 사용한 응답예측이 유사가속도 응답을 사용하는 것보다 항상 나은 결과를 주지는 않는 것으로 나타났다. 보다 일반적인 경향을 알아보기 위하여 20개 지진을 이용한 해석에서도 절대가속도 응답을 이용한 결과가 전반적으로 유사가속도 응답을 이용한 결과에 비해 커짐을 알 수 있었다. 그러나 단일지진의 경우와 달리 20개 지진의 평균 응답을 이용한 경우, 능력스펙트럼법이 전반적으로 응답을 과소평가하는 경향이 있어서 이러한 큰 값을 주는 것이 좀 더 정확한 결과를 줄 수 있다. 하지만 탄성 최대 강도에 대한 항복 강도의 비가 커질수록 그리고 항복 후 강성비가 커질수록 세가지 방법에 의한 결과의 차이는 거의 없어짐을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (R01-2003-000-11584-0) 및 스마트사회기반시설 연구 센터의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Applied Technology Council, "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings," *Report ATC-40*, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996.

2. Federal Emergency Management Agency, "NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings," *Reports FEMA-273 (Guidelines) and 274 (Commentary)*, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, 1997.
3. Rosenblueth, E. and Herrera, I., "On a kind of hysteretic damping," *Journal of Engineering Mechanics Division ASCE*, 1964, Vol. 90, pp. 37-48.
4. Miranda, E. and Ruiz-García, J., "Evaluation of approximate methods to estimate maximum inelastic displacement demands," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2001, Vol. 31, pp. 561-582.
5. 김홍진, 민경원, 이상현, 박민규, "최대 비탄성 변위 응답 예측을 위한 기존 능력 스펙트럼법들의 유효성 평가 및 비교", 한국지진공학회 논문집, 제8권 제2호, 2004, pp. 33-44
6. Lin, Y-Y. and Chang, K-C., "An improved capacity spectrum method for ATC-40," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2003, Vol. 32, pp. 2013-2025.
7. Newmark, N. M. and Hall, W. J., *Earthquake spectra and design*, Monograph Ser, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California, 1982.
8. Chopra, A. K., *Dynamics of structures*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1995.
9. Sadek, F., Mohraz, B., and Riley, M. A., "Linear procedures for structures with velocity-dependent dampers," *Journal of Structural Engineering ASCE*, 2000, Vol. 126, No. 8, pp. 887-895.
10. Whittaker, A., Constantinou, M., and Tsopelas, P., "Displacement estimates for performance-based seismic design," *Journal of Structural Engineering ASCE*, 1998, Vol. 124, No. 8, pp. 905-912.
11. Tsopelas, P., Constantinou, M. C., Kircher, C. A., and Whittaker, A. S., "Evaluation of simplified methods of analysis for yielding structures," *Technical Report NCEER-97-0012*, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, 1997.
12. Eurocode 8, *Design provisions for earthquake resistance of structures, Part 1-1: General rules and rules for building-seismic actions and general requirements for structures*, ENV, 1998, CEN.
13. Chopra, A. K., and Goel, R. K., "Evaluation of NSP to estimate seismic deformation: SDF systems," *Journal of Structural Engineering ASCE*, 2000, Vol. 126(4), pp. 482-490.