

최대 비탄성 변위 응답 예측을 위한 기존 능력스펙트럼법들의 유효성 평가 및 비교

Evaluation of Capacity Spectrum Methods for Estimating the Peak Inelastic Responses

김 홍 진^{*} 민 경 원^{**} 이 상 현^{***} 박 민 규^{****}
Kim, Hongjin Min, Kyung-Won Lee, Sang-Hyun Park, Minkyu

국문요약

탄성응답스펙트럼을 사용하는 능력스펙트럼법은 비선형 시스템을 등가의 선형시스템으로 치환하여 주어진 지진 하중에 대한 구조물의 최대 비선형거동을 예측한다. 본 연구의 목적은 이러한 능력스펙트럼법들의 정확성을 검증하고, 예측 특성을 비교하는 것이다. 이를 위해, ATC-40, Gülkan, Kowalsky, 그리고 Iwan이 제시한 방법을 이용하여 등가주기와 등가감쇠비를 산정한 후, ATC-40에서 제시한 절차B에 따라 성능점을 산정하였다. 전반적으로 ATC-40 방법은 구조물의 응답을 과소평가하여 안전하지 못한 설계결과를 가져 올 수 있으며, Gülkan과 Kowalsky의 방법은 과대평가하는 경향을 가지고 있다. Iwan이 제시한 방법은 ATC-40 방법과 Gülkan과 Kowalsky 방법의 중간 값을 예측함으로써, 비교적 정확한 값에 가까운 최대변위를 산출하였다. 그리고, Kowalsky방법은 항복 후 강성비에 따라 등가감쇠비를 음수로 산정함으로써 예측 값을 제시하지 못하는 경우가 있음을 확인하였다.

주요어 : 능력스펙트럼법, 등가주기, 등가감쇠비, 비탄성응답, 비탄성해석

ABSTRACT

In the capacity spectrum method(CSM) using a linear response spectrum, the peak response of an inelastic system under a given earthquake load is estimated transforming the system into the equivalent elastic one. The CSM for estimating the peak inelastic response is evaluated in this paper. The equivalent period and damping ratio are calculated using the ATC-40, Gülkan, Kowalsky, and Iwan methods, and the performance points are obtained according to the procedure B of ATC-40. Analysis results indicate that the ATC-40 method generally underestimates the peak response resulting in the unsafe design, while the Gülkan and Kowalsky methods overestimate the responses. The Iwan method produces the values between those by the ATC-40 method and the Gülkan and Kowalsky methods, and estimates the responses relatively closer to the exact ones. Further, it is found that the Kowalsky method gives the negative equivalent damping ratios depending on the hardening ratios, and thereby can not be used to estimate the responses in some cases.

Key words : Capacity spectrum method, equivalent period, equivalent damping ratio, inelastic response, nonlinear analysis

1. 서 론

최근 내진설계의 개념으로 널리 사용되고 있는 성능에 기초한 내진 설계법에서 가장 문제가 되는 것은 구조물의 최대 변위응답이 주어진 성능수준을 만족하는지를 검토하기 위한 간단하고 유효한 방법을 개발하는 것이다.^{(1),(2)} ATC-40과 FEMA-273에서는 설계 지진하중에 대한 구조물의 비탄성 변위를 예측하기 위해 간단한 비선형 해석절차들을 제시하고 있다.^{(3),(4),(5)} 이 중에서 능력스펙트럼법을 이용한 방법들은 기본적으로 탄성응답스펙트럼을 이용하는 것으로 비선형 시스템을 등가의 선형시스템으로 치환하여 구조물의 최대 비선형거동을 예측하는 것이라 할 수 있다. 이처럼 비선형 시스템을 등가의 선형시스템으로 치환하는 것은 해석이 간단하다는 중요한 장점을 제공하지만 구조물의 실제 비선형거

동을 정확하게 모델링하지 못하기 때문에 고유주기, 요구되는 탄성강도에 대한 항복강도비, 초기 선형탄성강도에 대한 항복 후 강성비, 그리고 설계지진의 특성과 같은 요인에 의하여 그 정확도가 다르게 된다.⁽³⁾

일반적으로 비선형거동을 하는 시스템은 강성저하와 연성거동을 보이며, 이는 각각 주기와 감쇠를 증가시키는 효과를 가져온다. 따라서, 비선형 시스템을 등가의 선형시스템으로 치환하는 경우, 증가된 주기와 감쇠비를 등가의 주기와 감쇠비로 표현해야 한다.

Rosenblueth and Herrera⁽⁶⁾는 할선강성(secant stiffness)을 이용하여 등가주기를 산정하였고, 등가감쇠비는 비선형시스템의 최대 비선형거동에 의해 소산된 에너지가 등가의 선형시스템에 의해 흡수된 에너지와 같다는 가정에 의하여 구하였다. ATC-40에서는 이 방법이 구조물의 유효감쇠비를 크게 평가하여 응답을 과소평가하는 경향이 있기 때문에, 수정 계수를 사용하여 이를 보정하는 방법이 제시되었다. Gülkan⁽⁷⁾은 할선강성을 이용하여 구조물의 등가주기를 산정한 다음 철근콘크리트 프레임에 대한 동적가진실험을 통해 나타난 최대변위응답을 예측한 후, 연성도에 따라 동일한 최대변위

* RIST 선임연구원, 공학 박사(대표저자 : hongjinkim@criemail.net)

** 단국대학교 건축대학 부교수, 공학 박사

*** 서울대학교 공학연구소 객원 연구원, 공학 박사

**** 단국대학교 건축대학, 석사과정

본 논문에 대한 토의를 2004년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다. (논문접수일 : 2004. 1. 6 / 심사종료일 : 2004. 3. 8)

응답을 예측하도록 하였다. 즉 실험결과를 회귀분석함으로써 등가주기와 등가감쇠비를 산정하였다. Kowalsky⁽⁶⁾ 역시 활선강성을 이용하여 등가주기를 산정한 후에, Takeda 이력 모델을 이용하여 비재하 강성계수가 0.5인 시스템에 대하여 등가감쇠비에 대한 식을 유도하였다. Iwan⁽⁹⁾은 9개 주기의 구조물에 대하여 12개의 지진에 대한 비선형 동적수치해석을 수행한 후, 주어진 연성도에 대해 통계적으로 가장 작은 오차를 주는 주기와 감쇠비를 찾는 방법을 이용하여 등가주기와 등가감쇠비를 산정하였다.

Miranda⁽¹⁰⁾는 264개의 지진에 대한 비선형 동적해석을 통해 상기 기술된 방법들에 의해 주어진 등가주기와 등가감쇠비의 정확성을 비교 평가하였다. 우선, 주어진 주기의 시스템에 대해 시스템의 연성도를 가정한 후, 주어진 연성도에 따른 등가주기와 등가감쇠비를 갖는 등가의 선형시스템의 최대변위를 구하였다. 그리고 얻어진 최대변위를 비선형 동적해석에서 구해진 최대 변위와 비교하는 방법을 통해 정확성을 평가하였다. 즉, Miranda는 연성도를 변화시켜가면서 각 방법의 유효성을 검증하였다. 그러나 능력스펙트럼법을 적용하여 구조물의 성능을 평가하는 일반적인 경우는 연성도가 주어지지 않으며, 해석을 통해 성능곡선과 요구곡선이 만나는 성능점을 얻어야 연성도를 구할 수 있다. 또한, 항복 후 강성비가 0인 완전 탄성-소성 거동을 보이는 구조물에 대해서만 해석을 수행하였다.

본 연구의 목적은 기존의 연구에서 주어진 능력스펙트럼법들의 정확성을 검증하고, 예측 특성을 비교하는 것이다. 이를 위해, ATC-40, Gülkan, Kowalsky, 그리고 Iwan이 제시한 방법을 이용하여 등가주기와 등가감쇠비를 산정한 후, ATC-40에서 제시한 절차B에 따라 성능점을 산정하였다.

각 방법의 정확성은 비선형 시간이력해석 결과와 비교함으로써 검증하였다. 구조물의 주기, 요구되는 탄성강도에 대한 항복강도비, 그리고 초기 선형탄성강도에 대한 항복 후 강성비에 따라 결정되는 각기 다른 능력곡선을 가지는 84개의 단자유도 구조물에 대한 수치해석을 수행하였으며, 지진 하중으로는 ATC-40에서 제안하는 진원으로부터 10km이상의 지역에서 측정된 10개의 지진자료를 사용하였다. 각 지진은 두 개의 성분을 가지므로, 모두 20개의 지반가속도를 사용하여 평균응답을 계산하였다.

2. 등가 선형 시스템

능력스펙트럼법은 요구곡선으로 탄성응답스펙트럼을 이용하며, 이는 비선형 시스템을 등가의 선형시스템으로 치환함을 의미한다. 따라서, 해석의 정확성은 등가의 선형시스템의 등가주기와 등가감쇠비의 정확도에 따라 다르게 된다.

지진 하중을 받는 비탄성 이력 거동을 하는 단자유도 시스템의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\ddot{x} + 2\zeta_o\omega_o\dot{x} + \frac{F(x)}{m} = -\ddot{x}_g \quad (1)$$

여기서, x 는 상대변위, \ddot{x}_g 는 지반 가속도, 그리고 m , ζ_o , $F(x)$ 은 각각 시스템의 질량, 감쇠비, 그리고 복원력을 나타낸다. 구조물의 고유진동수 ω_o 는 다음과 같다.

$$\omega_o = \sqrt{\frac{k_o}{m}} = \frac{2\pi}{T_o} \quad (2)$$

여기서, k_o 와 T_o 는 시스템의 초기 강성과 진동 주기이다. 능력스펙트럼법에서 비탄성 시스템의 최대응답은 등가 선형 시스템의 최대응답으로 변환할 수 있다. 이때, 등가 선형 시스템의 응답 x_{eq} 는 다음과 같이 주어진다.

$$\ddot{x}_{eq} + 2\zeta_{eq}\omega_{eq}\dot{x}_{eq} + \omega_{eq}^2x_{eq} = -\ddot{x}_g \quad (3)$$

여기서, ζ_{eq} 와 ω_{eq} 는 등가 선형 시스템의 등가 감쇠비와 등가 고유진동수이다.

이러한 등가주기와 등가감쇠비를 구하는 방법들에는 ATC-40 방법, Gülkan 방법, Kowalsky 방법, 그리고 Iwan 방법 등이 있는데 ATC-40 방법, Gülkan 방법, 그리고 Kowalsky 방법은 같은 등가의 주기를 사용하는 반면 Iwan 방법은 위의 세 방법들과 다른 등가주기를 사용한다. 등가주기와 등가감쇠비를 산정하는 구체적인 내용을 살펴보면 다음과 같다.

2.1 ATC-40

그림 1(a)에서와 같이 이선형(bilinear) 힘-변위관계를 가지는 단자유도 시스템의 활선강성에 대한 구조물의 유효주기는 다음과 같다.⁽⁶⁾

$$T_{eq} = T_o \sqrt{\frac{\mu}{1 + \alpha\mu - \alpha}} \quad (4)$$

여기서, μ 는 연성도, α 는 탄성강성에 대한 항복 후 강성의 비를 나타낸다.

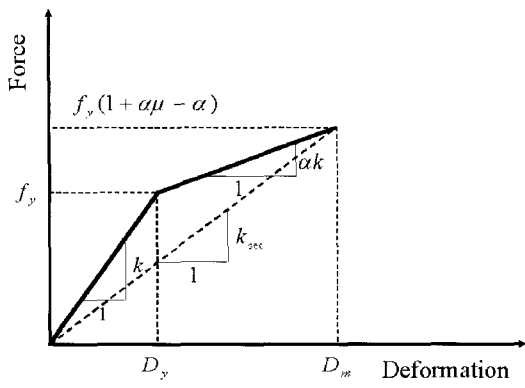
유효감쇠비는 비탄성 시스템의 최대 비탄성거동에 의해 소산된 에너지가 등가선형시스템에 의해 흡수된 에너지와 같다는 가정에 의하여 구한다.

$$\zeta_{eff} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_S} \quad (5)$$

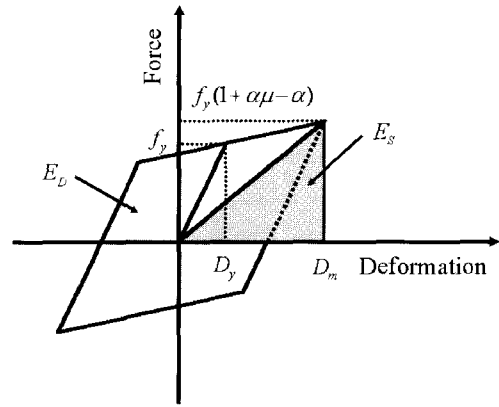
최대변위가 주어질 때, 그림 1(b)에서와 같이 소산된 에너지 E_D 와 탄성변형에 의해 흡수된 에너지 E_S 를 각각 구할 수 있으며, 유효감쇠비는 다음과 같다.

$$\zeta_{eff} = \frac{2}{\pi} \frac{(\mu - 1)(1 - \alpha)}{\mu(1 + \alpha\mu - \alpha)} \quad (6)$$

지진하중이 발생하는 대부분의 시간에서 변위는 최대 응답보다 작다. 따라서, 조하 하중에 기초한 식 (5)와 식 (6)에 의해 계산되는 등가 점성 감쇠비는 과대 평가되며, 이는 응답의 과소 평가를 유발한다. ATC-40에서는 이력소산에 의해



(a) 이선형 시스템의 힘-변위 관계



(b) 이력 에너지 소산에 의한 유효점성감쇠

그림 1 단자유도시스템의 비탄성응답

증가되는 구조물의 감쇠비를 산정 할 때, 다음과 같이 수정 계수 α 를 사용하여 보정한다.⁽⁴⁾ 따라서, 전체 구조물의 등가 감쇠비는 다음과 같이 주어진다.

$$\zeta_{eq} = \zeta_o + \alpha \zeta_{eff} \quad (7)$$

2.2 Güllkan이 제시한 방법

Güllkan은 활선강성을 이용하여 구조물의 등가주기를 산정하였다.⁽⁷⁾ 즉, 식 (4)와 같은 등가주기를 사용하였다. Güllkan은 철근콘크리트 프레임에 대한 동적가진실험을 통해 나타난 최대 비탄성변위응답을 계측한 후 연성도에 따라 동일한 최대변위응답을 예측하도록 하는 실험결과를 선형회귀분석함으로써 등가감쇠비를 산정하였다.

$$\zeta_{eq} = \zeta_o + 0.2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\mu}} \right) \quad (8)$$

식 (8)은 이력거동에 의해 증가되는 감쇠비의 크기의 최대치를 0.2로 제한하고 있으며, 항복 후 강성비의 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다.

2.3 Kowalsky가 제시한 방법

등가 점성 감쇠비에 대한 식을 유도하기 위하여 Takeda 모델을 사용하였고, 주기 변화를 정의하기 위해 최대 변위에서의 활선 강성을 사용하였다.⁽⁸⁾ Takeda모델에서 비재하시 강성 계수는 0.5로 가정하였고, 제안한 등가감쇠비는 아래와 같다.

$$\zeta_{eq} = \zeta_o + \frac{1}{\pi} \left(1 - \frac{1-\alpha}{\sqrt{\mu}} - \alpha\sqrt{\mu} \right) \quad (9)$$

식 (9)로부터, Kowalsky는 감쇠비를 산정하는데 있어 항복 후 강성비의 영향을 고려했음을 알 수 있다.

2.4 Iwan이 제시한 방법

Iwan은 9개 주기의 구조물에 대하여 12개의 지진에 대한 비선형 동적수치해석을 수행한 후, 주어진 연성도에 대해 통

계적으로 가장 작은 오차를 주는 주기와 감쇠비를 찾는 방법을 이용하여 등가주기와 등가감쇠비를 산정하였다. 12개의 지진 지반운동을 사용한 시간이력해석의 결과와 탄성 쿨롱 슬립 요소들의 조합으로 주어진 이력 모델을 사용하여 아래와 같은 주기 변화와 등가 감쇠비를 평가하였다.⁽⁹⁾

$$T_{eq} = [1 + 0.121 (\mu - 1)^{0.933}] T_o \quad (10)$$

$$\zeta_{eq} = \zeta_o + 0.0587 (\mu - 1)^{0.371} \quad (11)$$

식 (10)과 식 (11)로부터, 구조물의 등가주기와 등가감쇠비를 산정하는데 있어 Iwan은 항복 후 강성비의 영향을 고려하지 않았음을 알 수 있다.

그림 2는 각 방법들에 의해 산정된 항복 후 강성비와 연성도에 따른 등가주기의 변화를 보여준다. 등가주기는 탄성주기에 의해 정규화되었다. ATC-40, Güllkan, 그리고 Kowalsky에 의해 제시된 방법은 등가주기를 모두 활선강성을 이용하였기 때문에 동일하며, 이를 Secant method로 표기하여 Iwan이 제시한 방법과 비교하였다. 그림 2로부터 연성도가 증가할수록 모든 방법이 구조물의 등가주기를 증가시킴을 알 수 있다. Iwan에 의한 결과는 앞서 예측한 바와 같이 항복 후 강성비의 영향을 받지 않으며, Secant method는 항복 후 강성비가 증가함에 따라 등가주기를 작게 평가함을 알 수 있다. 따라서, 항복 후 강성비가 0.05, 0.15로 작은 경우에는 Secant method가 Iwan에 의한 결과보다 큰 경향을 보이나, 항복 후 강성비가 증가함에 따라 Secant method가 Iwan에 의한 값보다 큰 연성도 범위가 존재하게 됨을 알 수 있다. 그림 3은 항복 후 강성비와 연성도에 따른 등가감쇠비의 변화를 보여준다. 그림에서 Iwan과 Güllkan에 의한 결과는 매우 유사한 결과를 보여주며, 항복 후 강성비의 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 또한, 연성도의 증가에 따라 등가감쇠비가 단조증가하는 경향을 보여주며, 증가된 등가감쇠비의 최대치가 약 15%로 제한되어 있음을 알 수 있다. ATC-40에서 주어지는 등가감쇠비는 연성도가 증가함에 따라 증가하여 최대값에 도달한 후 다시 감소함을 알 수 있다. 즉, 최대등가 감쇠비를 주는 연성도 값이 각각의 항복 후 강성비에 대하여

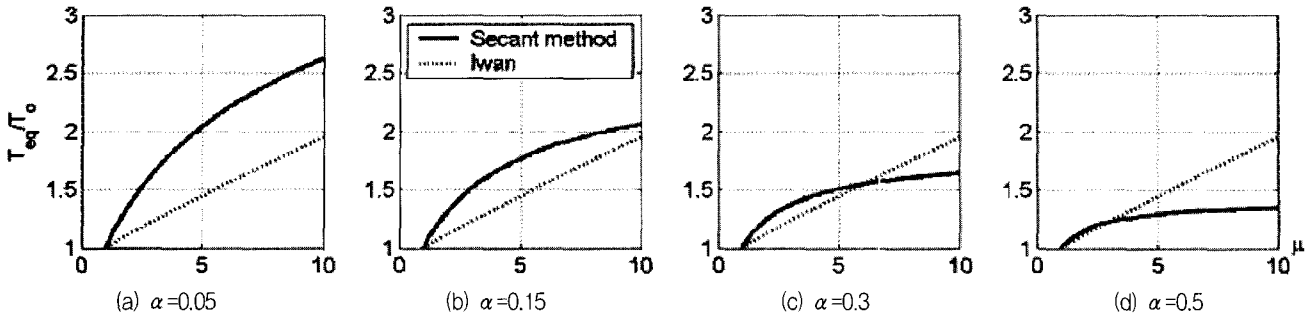


그림 2 항복 후 강성비와 연성도에 따른 등가주기의 변화

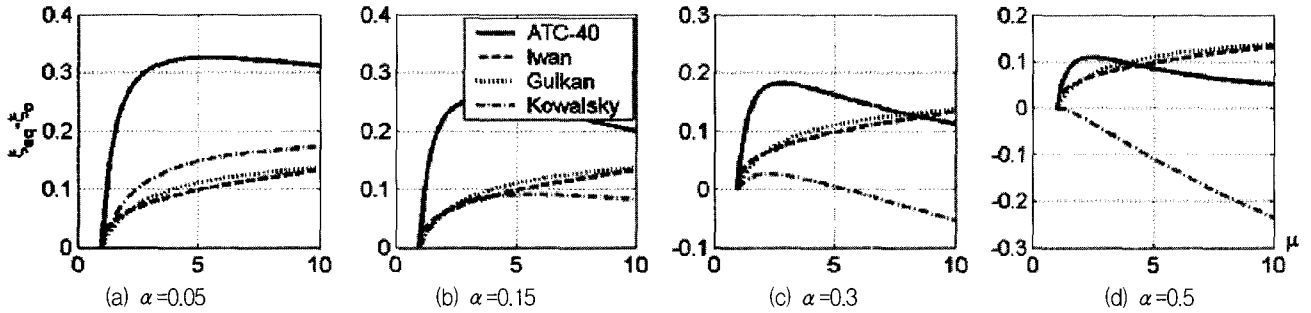


그림 3 항복 후 강성비와 연성도에 따른 등가감쇠비의 변화

존재한다. 이 최대등가감쇠비는 항복 후 강성비가 커질수록 작아진다. 그리고, 비록 수정계수를 사용하여 과도한 감쇠비를 보정하였으나, 항복 후 강성비가 작은 경우에는 모든 방법 중에서 가장 큰 등가감쇠비를 산정한다. Kowalsky 방법은 항복 후 강성비가 0.05인 경우는 ATC-40과 Iwan 혹은 Gulkan에 의한 값의 중간값을 산정하나, 항복 후 강성비가 커질수록 작은 값을 산정하여 항복 후 강성비가 0.3 혹은 0.5인 경우 음수 값을 산정함으로써 해석을 수행할 수 없는 단점을 가지고 있다.

각 방법에서 제시한 등가주기와 등가감쇠비를 사용한 개략적인 방법의 정확성을 평가하기 위하여 등가선형시스템의 예측변위와 비탄성 시간이력해석을 통해 얻어진 정확한 최대변위의 비를 비교 분석하였다. 해석에 사용된 20개의 지진 가속도는 주어진 목표응답스펙트럼과 일치되도록 크기를 조정하여 사용하였다. 목표응답스펙트럼은 S_D 지반에 해당하는 지진계수인 $C_a=0.4$, $C_v=0.6$ 을 사용하여 구하였다. 크기의 조정은 FEMA-273에서 제시하는 절차를 사용하였다.⁽⁵⁾ 그림 4는 목표 응답스펙트럼과 그에 따라 스케일된 지진하중에 의한 평균응답스펙트럼을 보여준다. 1.4배된 목표응답스펙트럼과 SRSS(Square Root of Sum of Squares) 조합된 응답스펙트럼 또한 그림에 나타나 있다.

그림 5에 항복 후 강성비가 0.05인 경우에 대하여 연성도가 주어져 있을 때 등가선형시스템의 예측변위와 비탄성 시간 이력해석을 통해 얻어진 정확한 최대변위의 비를 나타내었다. 그림에서 D_{est} 는 등가선형시스템에 의한 최대변위이고, D_{exact} 는 비선형 해석을 통해 얻어진 최대변위를 나타낸다. 그리고 1보다 작은 값들은 제안된 방법들이 D_{exact} 보다 과소 평가되었고, 1보다 큰 값들은 과대 평가되었음을 의미한다.

그림 5에서 ATC-40에서 사용되는 방법은 전반적으로 D_{exact} 보다 과소평가 함을 알 수 있다. Gulkan방법은 D_{exact} 보다 크게 평가하는 보수적인 경향을 나타낸다. 특히, 주기가 1초보다 작을 때는 약 30% 이상 과대평가하고, 주기가 1초보다 클 때는 약 10~20%정도 과대평가한다. Kowalsky의 방법은 전반적으로 Gulkan방법과 비슷한 경향을 보이며, 크기에 있어서는 작게 평가하여, D_{exact} 에 가까운 값을 보인다. 두 방법의 경향이 비슷한 것은 두 방법에 의한 등가주기가 할선 강성에 기초하여 동일하며, 그림 3에서 확인할 수 있듯이 항복 후 강성비가 0.05인 경우에는 등가감쇠비가 유사한 변화 경향을 보이기 때문이다. 그리고 주기가 0.2초보다 작은 경우를 제외하면, Iwan의 방법이 가장 D_{exact} 에 가까운 값을 제시한다.

일반적으로 Iwan의 방법은 최대 변위를 과소평가하는 경향을 나타낸다. 그러나 주기가 0.2초보다 클 때의 과소평가

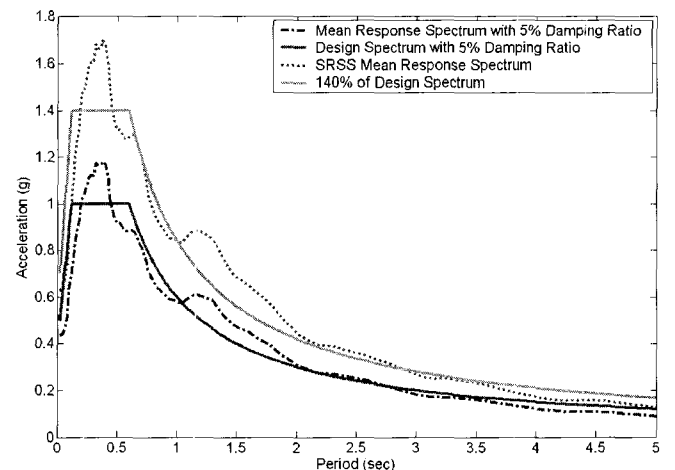


그림 4 20개 지진의 평균 가속도 응답스펙트럼

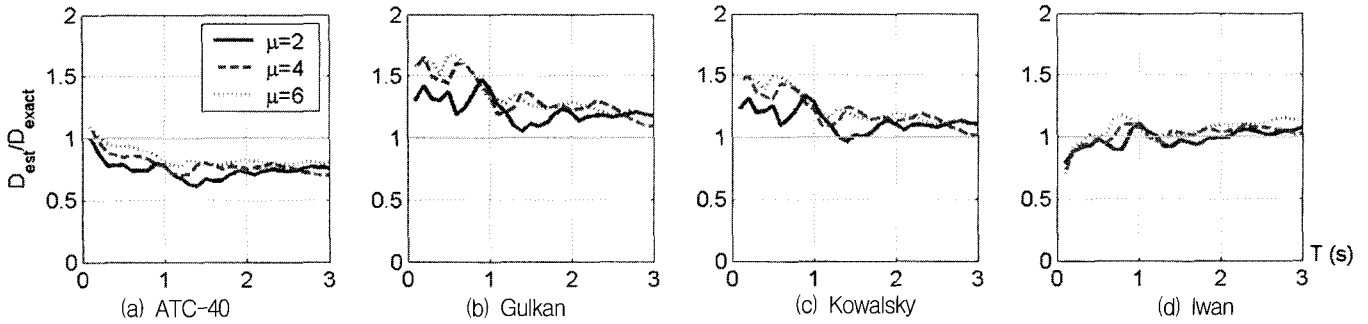


그림 5 등가주기와 등가감쇠비를 사용한 개략적인 방법과 비탄성 시간이력해석을 통해 얻어진 최대변위의 비($\alpha=0.05$)

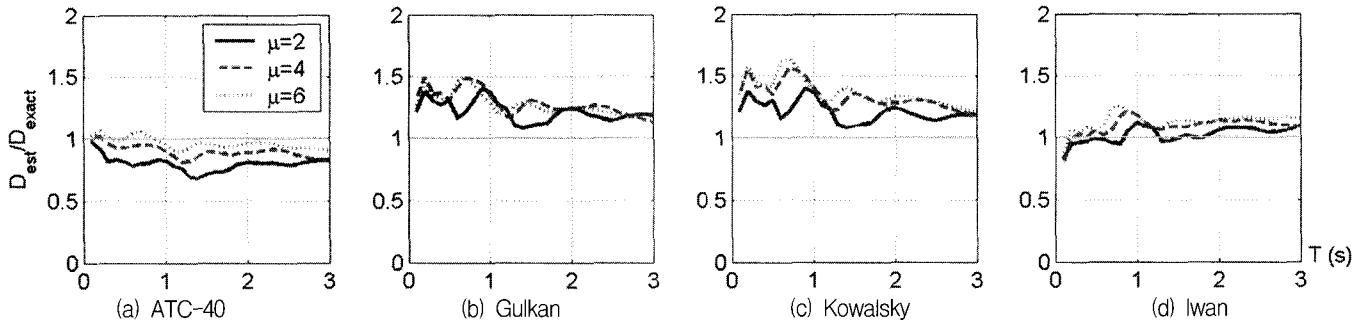


그림 6 등가주기와 등가감쇠비를 사용한 개략적인 방법과 비탄성 시간이력해석을 통해 얻어진 최대변위의 비($\alpha=0.15$)

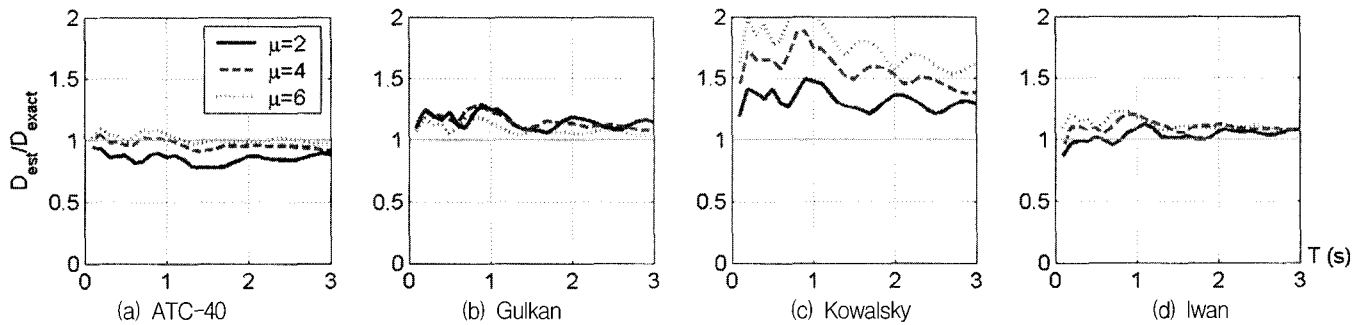


그림 7 등가주기와 등가감쇠비를 사용한 개략적인 방법과 비탄성 시간이력해석을 통해 얻어진 최대변위의 비($\alpha=0.3$)

정도는 평균적으로 10%보다 작다. 또한 과소평가는 변위 연성도 비율의 증가에 따라 증가한다. 주기가 1.0초 이상일 때, ATC-40방법을 제외하고는 일반적으로 모든 수준의 비탄성 변형에 대하여 평균 오차율이 10%이하로 평가된다.

항복 후 강성비가 각각 0.15와 0.3으로 증가하였을 때의 등가선형시스템의 예측변위와 비탄성 시간이력해석을 통해 얻어진 정확한 최대변위의 비는 그림 6과 7에 나타나 있다. ATC-40방법은 항복 후 강성비가 0.05인 경우와 같이 일반적으로 과소평가하나, 과소평가의 정도가 크게 줄어들어 D_{exact} 에 가까운 값을 산정함을 알 수 있다. 항복 후 강성비가 0.05인 경우, 전반적으로 비슷한 결과를 보여주었던 Gülkan방법과 Kowalsky의 방법은 항복 후 강성비가 커질수록 매우 다른 예측 경향을 나타낸다. Gülkan방법의 경우, 과다하게 평가했던 항복 후 강성비가 0.05인 경우에 비해 작은 예측 값을 산정함으로써 D_{exact} 에 가깝거나 다소 작은 값을 예측하는 반면, Kowalsky방법은 과대평가 경향이 더욱 커져 항복 후 강성비가 0.3인 경우 약 50%에서 100% 이상까지 D_{exact} 보다 크게 평가함을 알 수 있다. Iwan방법의 경우 항복 후 강

성비에 관계없이 가장 D_{exact} 에 가까운 예측값을 보여주고 있다. 단지 주기가 0.5초 이하인 단주기 구조물의 경우, 항복 후 강성비가 0.05인 경우에 과소평가했던 경향이 항복 후 강성비가 증가하면서 과다하게 평가하는 경향으로 바뀔 수 있다. 항복 후 강성비가 0.5인 경우에 대한 해석 역시 같은 결과를 보여 여기서는 생략하였다. 단 이 경우, Kowalsky 방법은 전술한 바와 같이 등가감쇠비를 음수값으로 주기 때문에 예측값을 구하지 못하였다.

3. 능력스펙트럼법

능력스펙트럼법은 건물의 내진성능을 간단하게 평가하기 위해 개발된 방법으로 건물의 지진에 대한 저항능력을 나타내는 성능곡선과 지진에 의해 주어지는 변위 응답스펙트럼으로 표현되는 요구곡선을 하나의 그래프에서 표현한 후, 그 두 곡선의 교차점을 구함으로써 비선형 시간이력해석 없이 지진에 의한 구조물의 최대변위를 구할 수 있다. ATC-40에서는 절차A와 절차B를 제시하고 있는데, 절차A는 구해진

등가감쇠비가 음수가 나올 경우 다시 초기값으로 돌아가기 때문에 수렴하지 않는 문제점을 가지고 있다. 따라서, 본 연구에서는 수렴성을 확보하기 위하여 절차B를 사용하여 구조물의 최대변위를 계산하였다. 다음은 절차B의 간략한 계산 과정이다.^{(4),(11)}

- Step 1 : 정적해석을 통해 구조물의 능력곡선을 그리고, 5% 감쇠비에 대한 탄성 변위 응답스펙트럼을 작성한다.
- Step 2 : 변위 응답스펙트럼으로부터, 구조물의 탄성거동시 주기에 상응되는 초기 최대변위 D_i 를 계산한다.
- Step 3 : 연성도 $\mu = D_i/D_y$ 를 계산한다.
- Step 4 : Step 3에서 구해진 μ 를 이용하여 식 (4) 혹은 식 (10)로부터 등가주기 T_{eq} 와, 식 (7), (8), (9), 혹은 식 (11)로부터 등가감쇠비 ζ_{eq} 를 산정한다.
- Step 5 : T_{eq} 와 ζ_{eq} 인 진동 특성을 갖는 선형 단자유도 시스템의 최대 유사 가속도 A 와 최대 변위 D 를 계산하고, 그때의 좌표를 구한다.
- Step 6 : Step 5에서 구해진 점들에 의해 곡선이 그려지면, 이것이 능력곡선과 교차되는지 점검한다. 만일 교차하지 않는다면, Step 5에서 구해진 D 값을 새로운 D_i 값으로 치환하고 Step 3~6을 반복한다.
- Step 7 : 교차점에서의 변위값에 의해 주어진 지진에 대한 구조물의 최대 비선형 변위가 주어진다.

4. 능력스펙트럼법의 검증

능력스펙트럼법들의 정확성을 검증하기 위해 사용된 예제 구조물은 주기가 각각 0.3, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0초 일 때,

탄성 최대 강도에 대한 항복 강도의 비, e 를 각각 0.1, 0.3, 0.5로 고정시키고, 항복 후 강성비는 0.05, 0.15, 0.3, 0.5를 가지는 총 84개의 단자유도 구조물이다. 여기서 탄성 최대 강도에 대한 항복 강도의 비는 아래 식 (12)와 같이 주어진다.⁽⁹⁾

$$e = \frac{F_y}{mS_a} \tag{12}$$

여기서, m 은 구조물의 질량, F_y 는 항복강도, 그리고 S_a 는 5% 감쇠비의 목표응답스펙트럼에서 구조물의 탄성주기에 해당하는 최대가속도 값이다. 이 경우 항복변위, D_y 는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$D_y = \frac{eS_a T_o^2}{4\pi^2} \tag{13}$$

그림 8-10과 부록 A의 표 1-7은 84개의 단자유도 구조물에 대하여 주어진 응답스펙트럼에 대하여 2장에 기술된 방법에 따라 스케일된 20개 지반가속도를 사용해 구한 수치해석 결과를 보여준다. 구해진 결과는 20개의 지진에 대한 평균값을 나타낸다. 전술된 4가지 방법에서 제시된 등가주기와 등가감쇠비에 따른 D_{est} 는 20개 지진의 평균응답스펙트럼을 이용하여 구하였고, 비선형 시간이력해석에 의한 D_{exact} 는 각각의 지진에 대한 최대 비선형응답의 평균값을 나타낸다. 표 1-7에서 Kowalsky방법은 전술한 바와 같이 등가감쇠비를 음수로 산정함으로써 예측값을 제시하지 못하는 경우가 있다. 따라서, Kowalsky방법에 의한 결과는 그림 8-10에는 나타나지 않았다.

$e=0.1$ 인 경우의 해석결과를 보여주는 그림 8에서 $\alpha=0.05$,

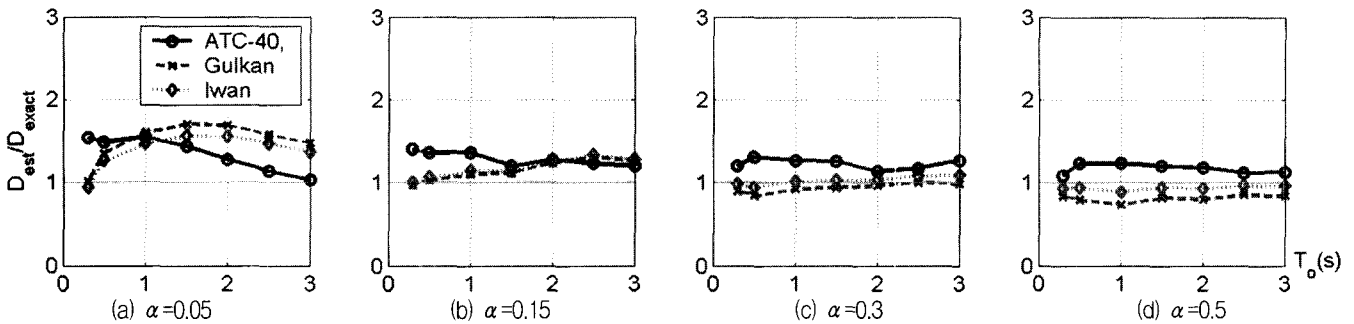


그림 8 능력스펙트럼법과 비선형 시간이력에 의한 최대변위응답의 비($e=0.1$)

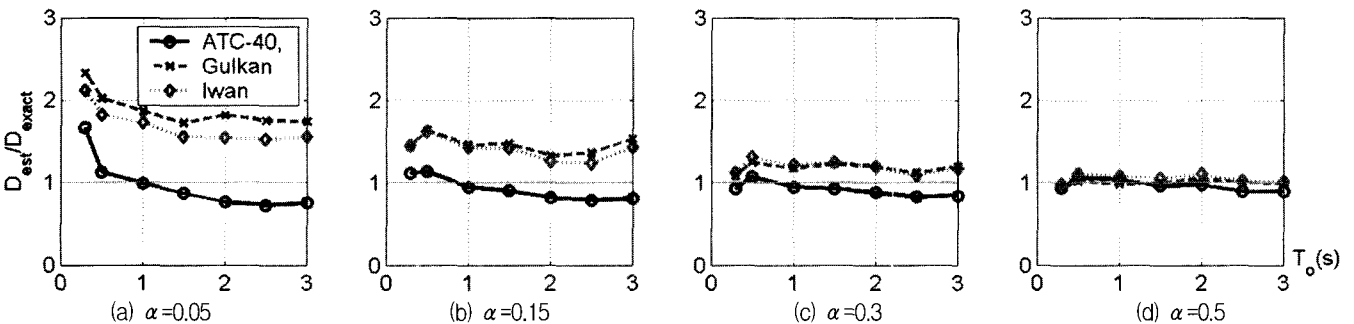


그림 9 능력스펙트럼법과 비선형 시간이력에 의한 최대변위응답의 비($e=0.3$)

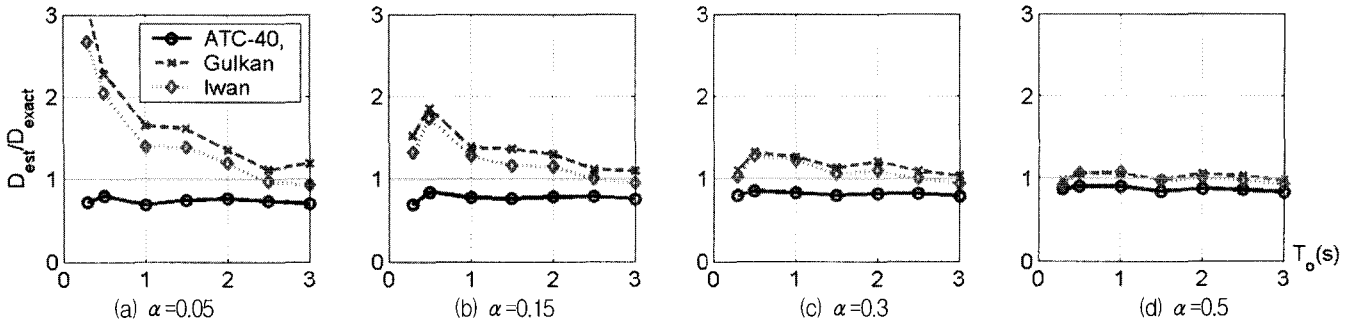


그림 10 능력스펙트럼법과 비선형 시간이력에 의한 최대변위응답의 비($e=0.5$)

$\alpha=0.15$ 인 경우, 모든 방법이 전 구간에 걸쳐 D_{exact} 보다 큰 예측값을 보이고 있다. 주기가 작은 구간에서는 ATC-40이 가장 큰 예측값을 보이지만, 이러한 경향은 주기가 증가함에 따라 반전되어 장주기 구조물의 경우 ATC-40이 가장 작은 예측값을 보인다. $\alpha=0.3, 0.5$ 인 경우에는 ATC-40이 가장 큰 예측값을 보이며, Gülkan방법이 가장 작은 값을 산정하며, Iwan방법은 중간 값을 산정함으로써 D_{exact} 에 가장 근접한 값을 산정한다.

$e=0.3$ 인 경우의 해석결과를 보여주는 그림 9에서는 그림 8에서 확인되었던 경향이 나타나지 않고 있다. ATC-40방법이 α 값에 관계없이 모든 방법 중에서 가장 작은 최대 변위 값을 산정한다. Gülkan방법과 Iwan방법은 일반적으로 D_{exact} 보다 큰 값을 산정하며, Iwan방법이 D_{exact} 에 근접한 값을 산정한다. 전체적으로 모든 방법이 주기가 1초 보다 작은 경우에는 응답을 크게 평가하는 경향을 가짐을 알 수 있다. 그러나 모든 방법은 α 값이 증가함에 따라 D_{exact} 에 근접한 값을 산정하는 경향을 가지고 있다.

$e=0.5$ 인 그림 10은 전체적인 경향이 $e=0.3$ 인 그림 9의 경우와 매우 유사함을 확인할 수 있다. 단지, 전 구간에 걸쳐 ATC-40이 D_{exact} 보다 작은 값을 산정함으로써 ATC-40을 사용하여 구조물의 성능을 평가하는 경우 주의가 요구된다.

5. 결 론

본 연구에서는 주어진 지진하중에 대하여 선형응답스펙트럼을 이용하여 구조물의 최대 비선형 변위를 구하기 위해 FEMA-273과 ATC-40에서 제시된 능력스펙트럼법의 정확성을 검증하였다. 이를 위해 ATC-40, Gülkan, Kowalsky, 그리고 Iwan이 제시한 방법을 이용하여 등가주기와 등가감쇠비를 산정한 후, ATC-40에서 제시한 절차B에 따라 성능점을 산정하여, 각 방법의 예측경향을 비교 분석하였다. 비탄성 시간이력해석 결과와 비교한 결과, 각 방법들은 항복 후 강성비, 주기, 그리고 탄성 최대 강도에 대한 항복 강도의 비에 따른 다음과 같은 예측 경향을 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 전반적으로 ATC-40은 구조물의 응답을 과소평가하여 안전하지 못한 설계결과를 가져올 수 있으며, Gülkan과 Kowalsky방법은 과대평가하는 경향을 가지고 있다. 그리고, Iwan이 제시한 방법이 ATC-40방법과 Gülkan과 Kowalsky

방법의 중간 값을 예측함으로써, 비교적 정확한 응답에 가까운 값을 산출함을 확인할 수 있었다. 그리고, Kowalsky방법은 항복 후 강성비에 따라 등가감쇠비를 음수로 산정함으로써 예측값을 제시하지 못하는 경우가 있었다.

각 방법의 오차를 줄이기 위해 등가주기와 등가감쇠비를 산정하는 것에 대한 추후의 연구와 함께, 요구곡선의 특성에 따라 주어지는 능력스펙트럼의 정확성에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부 국가지정연구실(M1-0203-00-0068) 및 한국과학재단 지정 스마트사회기반시설 연구센터의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 민경원, 김형섭, "지진하중을 받는 구조물의 성능에 기초한 마찰감쇠기 설계", 한국지진공학회 논문집, 제7권, 제6호, 2003.
2. 김진구, 최현훈, "능력스펙트럼법을 이용한 점성 감쇠기의 적정 감쇠비 산정", 한국지진공학회 논문집, 제5권, 제1호, 2001, pp. 45-52.
3. Whittaker, A., Constantinou, M., and Tsopelas, P., "Displacement estimates for performance-based seismic design," *Journal of Structural Engineering ASCE*, Vol. 124, No. 8, 1988, pp. 905-912.
4. Applied Technology Council, "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings," *Report ATC-40*, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996.
5. 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.
6. Rosenblueth, E. and Herrera, I., "On a kind of hysteretic damping," *Journal of Engineering Mechanics Division ASCE*, Vol. 90, 1964, pp. 37-48.
7. Gülkan, P. and Sozen, M., "Inelastic response of reinforced concrete structures to earthquake motions," *ACI Journal*,

- Vol. 71, 1974, pp. 604-610.
8. Kowalsky, M., Priestley, M. J. N., and Mac Rae, G. A., "Displacement-based design of RC bridge columns in seismic regions," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 24, 1995, pp. 1623-1643.
 9. Iwan, W. D. and Gates, N. C., "The effective period and damping of a class of hysteretic structures," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 7, 1979, pp. 199-211.
 10. Miranda, E. and Ruiz-García, J., "Evaluation of approximate methods to estimate maximum inelastic displacement demands," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 31, 2001, pp. 561-582.
 11. 송종걸, "역량스펙트럼 방법을 이용한 교량의 내진성능 평가," 대한토목학회 논문집, Vol. 22, No. 5-A, 2001, pp. 1011-1021.

부록 A

표 1 $T_0=0.3$ 초인 단자유도 구조물의 응답

e	α	D_y (cm)	A_y (g)	D_{est} (cm)				D_{exact} (cm)
				ATC-40	Gülkan	Kowalsky	Iwan	
0.1	0.05	0.2280	0.1	9.6658	9.9759	10.1650	9.1312	6.2377
	0.15			6.5951	5.3419	-	5.4816	4.8250
	0.3			4.7769	3.4861	-	3.8060	3.7597
	0.5			4.2455	2.5296	-	3.0550	3.4413
0.3	0.05	0.6839	0.3	3.3302	6.2300	5.5765	5.7570	3.3467
	0.15			2.8602	4.3815	5.2252	4.2651	3.0017
	0.3			2.5658	3.1782	-	3.2576	2.6917
	0.5			2.7897	2.6304	-	2.8861	2.6776
0.5	0.05	1.1399	0.5	1.9425	4.6032	4.6239	3.8887	2.7847
	0.15			1.9772	3.5245	4.2384	3.2576	2.5430
	0.3			2.0379	3.0954	4.8422	2.9935	2.4449
	0.5			2.2219	2.6149	-	2.6362	2.4545

표 4 $T_0=1.5$ 초인 단자유도 구조물의 응답

e	α	D_y (cm)	A_y (g)	D_{est} (cm)				D_{exact} (cm)
				ATC-40	Gülkan	Kowalsky	Iwan	
0.1	0.05	2.2797	0.04	23.9790	32.4708	30.5227	30.7254	25.4065
	0.15			25.0371	27.6648	36.9184	27.7563	24.484
	0.3			26.7875	22.8623	-	24.5834	24.7255
	0.5			25.8669	18.4411	-	21.0311	23.6731
0.3	0.05	6.8392	0.12	15.1873	27.9227	26.3668	25.6681	21.6347
	0.15			15.4917	25.4269	27.6157	24.0666	20.1000
	0.3			16.4901	21.6400	35.8278	21.3595	20.2004
	0.5			19.4544	20.4832	-	21.3817	21.1422
0.5	0.05	11.3986	0.2	15.7743	24.1290	26.3668	20.9440	22.6397
	0.15			16.1943	23.0539	27.6157	21.1232	22.1683
	0.3			17.0673	22.6842	33.5995	21.4387	22.1491
	0.5			18.7296	21.9722	-	21.5204	22.1826

표 2 $T_0=0.5$ 초인 단자유도 구조물의 응답

e	α	D_y (cm)	A_y (g)	D_{est} (cm)				D_{exact} (cm)
				ATC-40	Gülkan	Kowalsky	Iwan	
0.1	0.05	0.6333	0.1	12.0938	15.9434	15.1662	14.6996	9.4398
	0.15			10.7369	10.3642	-	10.5279	8.3917
	0.3			7.9180	6.7439	-	7.2027	6.9658
	0.5			7.9962	5.4010	-	6.3002	6.7621
0.3	0.05	1.8998	0.3	4.6136	10.9740	9.0507	9.3190	6.0344
	0.15			4.5990	7.4097	8.2118	7.0363	5.5844
	0.3			4.7700	6.4862	11.1659	6.4570	5.4065
	0.5			5.1614	5.5600	-	5.8423	5.2819
0.5	0.05	3.1663	0.5	4.1389	7.3082	9.0507	6.4076	5.3897
	0.15			4.2017	6.9226	8.2118	6.1255	5.3242
	0.3			4.3258	6.3152	9.9323	5.7483	5.2427
	0.5			4.5418	5.4765	-	5.2117	5.1885

표 5 $T_0=2.0$ 초인 단자유도 구조물의 응답

e	α	D_y (cm)	A_y (g)	D_{est} (cm)				D_{exact} (cm)
				ATC-40	Gülkan	Kowalsky	Iwan	
0.1	0.05	3.0396	0.03	25.4473	34.6571	32.4268	32.8541	28.8053
	0.15			28.7222	32.3541	38.9817	32.3458	29.1955
	0.3			31.7521	28.5063	-	30.2318	30.8503
	0.5			34.2061	24.6174	-	28.1875	30.4431
0.3	0.05	9.1189	0.09	19.7752	34.1537	31.5017	31.3091	25.6378
	0.15			20.4767	31.0148	34.0605	29.4500	24.3458
	0.3			21.7625	28.6545	39.8642	28.3180	25.0411
	0.5			24.6303	26.2700	-	27.3214	26.9441
0.5	0.05	15.1982	0.15	20.0252	31.4406	31.5017	28.0874	27.3904
	0.15			20.6501	30.6602	34.0605	27.6091	26.2042
	0.3			21.3901	29.2024	39.8642	27.2139	26.0542
	0.5			22.8506	27.2146	-	26.2635	27.3916

표 3 $T_0=1.0$ 초인 단자유도 구조물의 응답

e	α	D_y (cm)	A_y (g)	D_{est} (cm)				D_{exact} (cm)
				ATC-40	Gülkan	Kowalsky	Iwan	
0.1	0.05	1.5198	0.06	18.7105	26.4995	24.7292	24.6892	19.1185
	0.15			17.6417	19.3395	28.5374	19.4668	18.0031
	0.3			20.1074	16.3969	-	17.7214	17.029
	0.5			21.0569	13.6106	-	16.0184	17.5743
0.3	0.05	4.5595	0.18	10.9868	19.7601	18.0895	18.3439	14.2885
	0.15			11.3887	18.4682	19.9338	17.6118	13.3752
	0.3			12.0960	16.5112	-	16.5174	12.9666
	0.5			13.6560	14.3562	-	15.2702	13.8882
0.5	0.05	7.5991	0.3	10.3974	19.1959	18.0895	16.5844	13.9011
	0.15			10.7156	17.7840	19.9338	15.9968	13.6400
	0.3			11.2452	16.5305	25.7841	15.3266	13.4912
	0.5			12.2769	14.8378	-	14.5492	13.6963

표 6 $T_0=2.5$ 초인 단자유도 구조물의 응답

e	α	D_y (cm)	A_y (g)	D_{est} (cm)				D_{exact} (cm)
				ATC-40	Gülkan	Kowalsky	Iwan	
0.1	0.05	3.7995	0.024	26.5002	36.0565	33.9058	34.4459	30.0714
	0.15			29.6639	34.6879	39.6456	34.5338	31.4721
	0.3			34.4505	32.3481	-	33.9855	33.5237
	0.5			39.2859	29.0975	-	32.8456	36.0541
0.3	0.05	11.3986	0.072	23.2715	36.5989	33.8398	34.0330	29.9061
	0.15			24.0723	35.6956	36.9747	34.0174	29.2648
	0.3			25.6962	33.7041	47.5642	33.1257	29.3633
	0.5			28.5903	30.7770	-	31.5786	32.1914
0.5	0.05	18.9977	0.12	24.7170	37.0808	33.8398	32.1294	31.3922
	0.15			25.1319	35.0726	36.9747	31.7005	30.6273
	0.3			26.3543	33.5305	47.5642	31.3460	30.9199
	0.5			28.3753	32.6185	-	31.6807	32.6402

표 7 $T_0=3.0$ 초인 단자유도 구조물의 응답

e	α	D_y (cm)	A_y (g)	D_{est} (cm)				D_{exact} (cm)
				ATC-40	Gülkan	Kowalsky	Iwan	
0.1	0.05	4.5595	0.02	27.3914	36.0092	34.1020	34.6100	32.0793
	0.15			30.0389	36.1057	40.0439	35.8163	32.4411
	0.3			35.1887	34.4917	-	35.9608	35.8976
	0.5			40.1751	32.3557	-	35.9355	37.8572
0.3	0.05	13.6784	0.06	26.0864	38.9425	35.0869	35.9591	34.9303
	0.15			27.1045	38.1876	38.4593	36.0233	34.0345
	0.3			28.8024	36.6909	52.5959	35.9692	33.9419
	0.5			32.8390	35.6976	-	36.5247	35.5175
0.5	0.05	22.7973	0.1	28.4570	39.9192	35.0869	36.3860	34.9598
	0.15			29.4430	39.8557	38.4593	36.5162	34.9239
	0.3			30.5421	39.3028	52.5959	36.4551	35.2546
	0.5			32.4183	37.7231	-	36.2148	36.4996