

# 면진격리 고무베어링 설계법을 이용한 구조물의 성능점 예측

## Determination of Structural Performance Point Utilizing The Seismic Isolation Rubber Bearing Design Method

김 장 훈\*                      좌 동 훈\*\*  
Kim, Jang Hoon              Jwa, Dong Hoon

### 국문요약

면진격리 고무베어링의 설계법을 수정하여 구조물의 성능점 예측을 위한 간편한 해석방법을 제안하였다. 이러한 적용이 가능한 것은 구조물이 지진력의 작용으로 인하여 손상을 입게 되면 구조물의 항복 후 강성은 연화되고, 이로 말미암아 구조물의 동적 특성이 장주기화 하기 때문이다. 제안된 해석법이 기존의 방법에 비하여 우월한 것은 능력스펙트럼법이 요구하는대로 보유능력곡선과 요구량스펙트럼을 가속도-변위 좌표계로 치환하지 않고서도 비교적 정확한 성능점을 예측할 수 있다는 것이다. 제안된 방법의 타당성은 문헌에서 보이는 정확한 값과의 비교에 의하여 입증하였다.

**주요어** : 감쇠계수, 등가감쇠비, 성능점, 유효강성, 유효주기

### ABSTRACT

The seismic base isolation design approach has been reviewed and modified to fit the nonlinear static analysis procedure for determination of the performance point of structures in a simpler way. Such an adaptation may be possible for the fact that a structural system under development of damage due to earthquake loading keeps softening to result in period shifting toward longer side. The superiority of the proposed method to the state-of-the-practice approach is that the reasonably accurate performance point can be obtained without constructing the so-called acceleration displacement response spectrum required in application of capacity spectrum method. The validity of the proposed approach was verified by comparing the predicted values to the exact ones presented in the literature.

**Key words** : damping coefficient, equivalent damping ratio, performance point, effective stiffness, effective period

## 1. 서 론

과거부터 현재까지의 설계규준은 안전하고 경제적인 구조물의 설계를 위하여 강도감소계수에 의하여 평가절하된 보유능력(underestimated capacity)이 하중계수에 의하여 평가절상된 요구량(overestimated demand)을 초과하도록 구조부재의 재료 및 단면을 조정하는 과정을 규정하고 있다. 이렇게 하여 설계된 구조물은 부재별로 적절한 안전계수를 확보할 수 있겠지만, 항복이후 극한상태에 도달하기까지 구조물의 거동에 대한 언급이 없으므로 이러한 설계규준규정들은 블랙박스 같은 존재라고 할 수 있다. 즉 구조물에 영향을 주는 하중조건, 재료 및 기하학적 조건들을 입력시키거나 규준식을 따라 정리하다 보면 구조부재의 적절한 단면을 얻게 되지만, 설계된 구조물의 거동예측은 설계자의 영역밖에 놓이게 된다는 의미이다. 그러므로 구조물의 거동예측을 위하여는 설계된 구조물을 예상되는 지진에 대하여 해석하는 별도의 단계가 필요하게 된다.

90년대 초부터 등장한 변위에 기초한 설계법이나 그 이후 소개된 성능에 기초한 설계법은 거동예측을 위한 해석과정을 설계단계에 포함시킨 방법으로 거동요구량이 구조물의

힘-변위 관계 보유능력곡선과 응답스펙트럼간 상관관계로부터 계산된다. 즉 계산되거나 가정된 초기 변위요구량에 따라 이력거동에 의한 에너지 소산량이 계산되고, 에너지 소산량에 의하여 등가감쇠비가 정하여지며, 이는 다시 응답스펙트럼상의 변위요구량의 값을 변화시킴으로서 각 변수의 영향을 추적하는 반복계산 과정을 통하여 최종적으로 수렴하게 되는 최대 변위요구량(성능점)을 구하게 된다. 여기서 주목할 것은 보유능력과 요구량을 서로간의 상대적인 크기를 비교하기 위한 단순한 물리량으로서 취급하는 단계를 넘어서 서로 영향을 주고받는 상관관계에 있는 물리량으로 인식한 것이다. 이러한 새로운 개념의 설계법은 AASHTO<sup>(1)</sup>, UBC<sup>(2)</sup> 및 FEMA-222A<sup>(3)</sup> 등의 면진격리 시스템(seismic base isolation)을 위한 설계법에 암시되어 있으며, ATC-40<sup>(4)</sup> 및 FEMA-273<sup>(5)</sup> 등에서는 설계된 구조물의 정적 비탄성 해석을 위하여 사용하도록 소개되었다.

그러나 ATC-40 등의 해석지침에서는 성능점을 구하는 작업이 상당히 복잡하여 실무엔지니어들이 사용하기에 편안하지 않은 면이 있다. 즉 변위기초설계법에서는 변위응답스펙트럼을 이용하여 성능점을 구하게 되고, 성능기초설계법에서는 보유능력곡선과 요구량스펙트럼을 유사가속도-변위(ADRS) 형태의 능력스펙트럼으로 치환하여 성능점을 구하게 되므로 적용에 있어서 그 과정의 번거로움을 피할 수 없다. 이러한 복잡성을 해결하고자 김진구·방성혁<sup>(6)</sup>은 변위기초설계법을 개선하여 능력스펙트럼법을 대체할 수 있는 방안을 제시하

\* 정회원 · 아주대학교 건축학부, 부교수(대표지자 : kimjh@ajou.ac.kr)

\*\* (주) 에스텍 컨설팅그룹 건축구조팀, 엔지니어

본 논문에 대한 토의를 2003년 8월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다. (논문접수일 : 2003. 2. 5 / 심사종료일 : 2003. 4. 9)

였지만, 그것은 근본적으로 변위기초설계법과 동일한 것으로서 그 적용에 있어서 원론적인 수준을 벗어나지 못하고 있다. 그러므로 본 논문에서는 AASHTO에 소개된 면진격리 베어링 설계법을 적절히 개선하여 구조물의 성능점을 보다 간편하게 구하면서 동시에 능력스펙트럼법 이상의 정확성을 유지할 수 있는 실용적인 방안을 제시하고자 한다.

2. 탄성응답스펙트럼

구조물의 설계를 위한 기준의 등가정적 지진력은 밀면전 단력으로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = C_s W \tag{1}$$

여기서  $C_s$ 는 지진응답계수(밀면전단력계수)이고,  $W$ 는 구조물의 무게이다. 지진응답계수  $C_s$ 는 각 기준에 따라 다음과 같은 여러 가지 형태로 정의된다.

KS<sup>(7)</sup>에서는

$$C_s = \frac{A I_E S}{1.2 R T^{1/2}} \leq 1.75 \frac{A I_E}{R} \tag{2}$$

UBC<sup>(2)</sup>에서는

$$C_s = \frac{1.25 Z I S}{R T_1^{2/3}} \leq 2.75 \frac{Z I}{R} \tag{3}$$

AASHTO<sup>(8)</sup>에서는

$$C_s = \frac{1.2 A S}{R T^{2/3}} \leq 2.5 \frac{A}{R} \tag{4}$$

여기서  $A$ 와  $Z$ 는 지역계수,  $I_E$ 와  $I$ 는 중요도계수,  $S$ 는 지반계수,  $R$ 은 반응수정계수이고,  $R=1$ 이면  $C_s$ 는 탄성지진응답계수가 된다. 위 식에서 장주기 구조물의 설계지진력은 주기가 길어짐에 따라  $1/T^{1/2}$  또는  $1/T^{2/3}$ 의 비율로 감소하여 지반응답스펙트럼의 일반적인 감소속도  $1/T$ 에 비하여 상당히 완만하게 감소함을 알 수 있다. 이는 유연한 장주기 구조물의 안정(stability)을 보장하기 위한 설계시 배려라고 할 수 있다.

그러나 지진에 의한 거동예측을 고려하여야 하는 변위기초 설계법이나 능력스펙트럼법에서는 설계시 고려한 안전계수를 배제하여야 보다 적절한 실제적인 거동예측 값을 구할 수 있게 된다. 이러한 시각에서 볼 때 ATC-40에서 사용하고 있는 그림 1의 5% 감쇠 탄성스펙트럼은 거동예측을 위한 해석에 적합한 것이라고 하겠다. 그림에서  $C_A$ 는 유효최대가속도(EPA)로서  $2.5C_A$ 가 가속도 지배구간에서 5% 감쇠비의 단주기 구조시스템의 평균최대응답이 되도록 정하여진다.  $C_V$ 는 5% 감쇠비 1초 주기 구조시스템의 평균최대응답이며,  $C_V/T$ 는 속도지배구간인 중·장주기 구조시스템의 유사가속도 응답이 된다.  $C_A$  및  $C_V$ 는 지역계수, 진원까지의 거리 및 지반상태 등을 고려하여 정해지며, 그 산정방법이

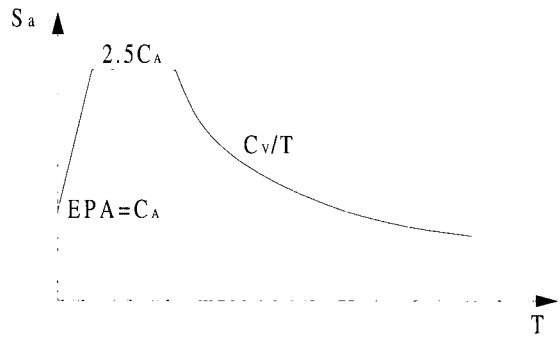


그림 1 ATC-40 5% 감쇠 탄성응답스펙트럼

ATC-40에 소개되어 있으므로 본 논문에는 포함시키지 않기로 한다. 비탄성·비선형거동을 고려하여야 하는 구조물을 등가감쇠비를 사용하여 응답스펙트럼에 의하여 해석하는 방법은 복잡한 해석과정을 거치지 않는 편리한 동적 해석 방법으로서 변위기초설계법 및 성능기초설계법의 근간이 되고 있다.

3. AASHTO 면진격리 고무베어링 설계법

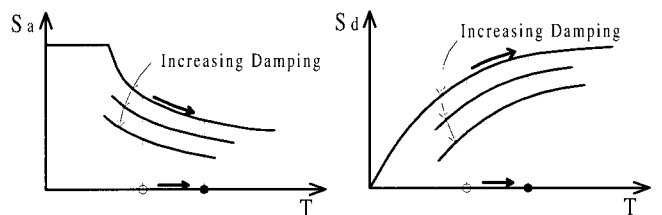
면진격리 고무베어링을 사용하는 목적은 그림 2(a)에서 보이는 바와 같이 구조물의 기본진동주기를 길게 하여 지진력을 구조물이 탄성거동 할 수 있는 정도로 줄이고자 함이다. 그러나 고무베어링의 설치로 인한 구조물의 유연성은 그림 2(b)와 같이 변위요구량의 증가를 수반하게 된다. 해석을 위한 장주기 구조물의 응답스펙트럼은 탄성 지반응답스펙트럼을 따르게 되므로 식 (4)의 지진응답계수는 5% 감쇠를 고려할 때 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_s = \frac{A S}{T_e} \leq 2.5 A \tag{5}$$

여기서  $T_e$ 는 면진격리 고무베어링을 포함한 구조시스템의 유효기본주기로서 변위가 증가함에 따라 증가하며 다음과 같이 구한다.

$$T_e = 2\pi \sqrt{\frac{W}{\sum k_{eff} g}} \tag{6}$$

여기서  $W$ 는 구조물의 무게이며  $g=9810\text{mm/s}^2$ 는 중력가속도이다.  $\sum k_{eff}$ 는 면진격리 고무베어링의 유효강성의 합을 의미하고, 개개의 면진격리 고무베어링의 유효강성은 매번의



(a) Acceleratio Spectrum (b) Displacement Spectrum

그림 2 면진격리 베어링시스템의 응답

반복하중에 의한 그림 3의 이력거동 힘-변위 관계곡선으로부터 다음과 같이 구한다.

$$k_{eff} = \frac{F_{max} - F_{min}}{d_i^+ - d_i^-} = \frac{F_{max}}{d_i^+} \quad (7)$$

여기서  $F_{max}$ ,  $F_{min}$  은 베어링에 작용하는 최대 및 최소 수평전단력이고,  $d_i^+$ ,  $d_i^-$  는 그에 상응하는 최대 및 최소 변위이다.  $F_{max}$ ,  $F_{min}$ ,  $d_i^+$  및  $d_i^-$  는 실험이나 해석에 의한 보유능력곡선으로부터 구한다. 식 (5)에 감쇠효과를 고려하면

$$C_s = \frac{AS}{T_e B} \quad (8)$$

여기서  $B$ 는 감쇠계수(damping coefficient)로서 유효감쇠비  $\zeta_e = 0.05$  일 때  $B = 1$ 이 되고, 여러 감쇠비에 대하여 표 1에 예시된 바와 같으며 서로 다른 등가감쇠비간 감쇠계수는 직선보간에 의한다. 표에서  $B_S$ 는 단주기 구간에 적용되는 감쇠계수이고,  $B_L$ 은 장주기 구간에 적용되는 감쇠계수이다. 이를 Newmark and Hall<sup>(9)</sup>이 제안한 15.9% 초과 확률의 동적 증폭계수(dynamic amplification factor)  $\zeta_e = 0.05$ 의 것에 대하여 무차원화 한 값과 비교하면  $\zeta_e = 0.1$ 까지의 비교적 낮은 감쇠비 하에서는 서로의 값이 근사함을 알 수 있다. 아울러 ATC-40에 제시된  $B_L$ 과는 전 감쇠비간에 걸쳐 유사함을 알 수 있다. AASHTO<sup>(1)</sup> 면진격리 고무베어링 설계법에서는 속도 지배구간에서의 감쇠계수만을 보여주고 있는데 이는 면진격리 고무 베어링이 설치된 구조시스템은 이미 중·장주기화 하였기 때문이다.

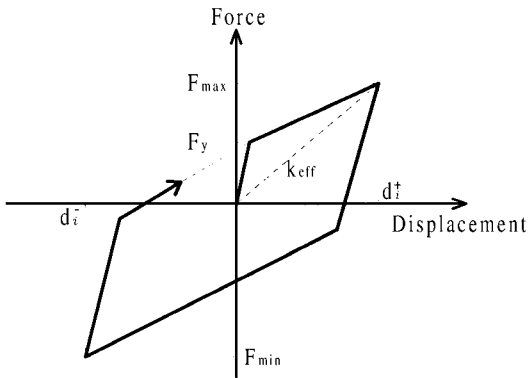


그림 3 면진격리 고무베어링의 이선형 거동모델

면진격리 고무베어링의 감쇠는 낮은 이력감쇠 값을 가지므로 감쇠비와 유효감쇠비 간의 차이가 없이 점탄성 감쇠기구에 의한 손실률(loss factor)로서 나타낼 수 있으며 그림 3의 이선형화 모델로부터 다음과 같이 정의된다.<sup>(10)</sup>

$$\zeta_e = \frac{1}{2\pi} \times \frac{TotalArea}{\Sigma k_{eff} d_i^2} \quad (9)$$

여기서  $TotalArea$ 는 모든 면진격리 고무베어링의 이력거동 힘-변위 곡선에 둘러싸인 면적의 합이며,  $d_i$ 는 면진 베어링의 최대 수평변위이다.

탄성 구조시스템의 최대 유사가속도응답  $S_a$ 와 최대 변위응답  $S_d$ 는 다음과 같은 관계가 있다.

$$S_a = \omega^2 S_d = C_s g \quad (10)$$

여기서  $\omega = 2\pi/T_e$ 는 구조시스템의 주파수이다. 식 (8)을 식 (10)에 대입하여 최대 변위응답을 구하여 정리하면 다음과 같다.

$$S_d = d_i = \frac{250 A S T_e}{B} \quad (11)$$

이상의 식들을 살펴보면 밀면전단력  $F$ 를 구하기 위하여 유효기본주기  $T_e$ 와 감쇠계수  $B$ 가 필요하고, 이를 위하여는 유효강성  $\Sigma k_{eff}$  및 최대 수평변위  $d_i$ 가 필요하게 된다. 다시 유효강성과 최대 수평변위를 구하기 위하여는 역으로 기본주기와 감쇠계수가 필요하게 되므로 면진격리 고무베어링의 설계는 반복계산과정을 거쳐야 함을 알 수 있다. 설계순서를 정리하면 다음과 같다.

- [1단계] 수직하중을 고려하여 적절한 면진격리 베어링의 고무판 및 철판의 평면크기, 두께 및 수 등을 정하고 그림 3과 같은 베어링의 이선형 힘-변위 보유능력 이력곡선을 구한다.
- [2단계] 지역계수  $A$  및 지반계수  $S$ 를 정한다.
- [3단계] 베어링의 최대 수평변위  $d_i$ 를 가정한다.
- [4단계] 식 (6), (7), (9)와 표 1을 이용하여  $T_e$ ,  $\Sigma k_{eff}$ ,  $\zeta_e$  및  $B$ 를 계산한다.
- [5단계] 식 (11)을 이용하여 최대 수평변위  $d_i$ 를 계산한다. 이전 계산과정의 최대변위와 비교하여 그 차이가

표 1 다양한 감쇠계수의 비교

Equivalent damping ratio $\zeta_e$ (%)	Damping coefficient								
	AASHTO <sup>(1)</sup>	Newmark and Hall <sup>(9)</sup>		ATC-40 <sup>(4)</sup>					
		$B$	$B_S$	$B_L$	Behavior Type A		Behavior Type B		Behavior Type C
				$B_S$	$B_L$	$B_S$	$B_L$	$B_S$	$B_L$
5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
10	1.20	1.36	1.25	1.28	1.20	1.29	1.20	1.28	1.20
20	1.50	2.14	1.68	1.82	1.52	1.78	1.52	1.79	1.49
30	1.70	3.21	2.09	2.36	1.80	2.33	1.82	-	-

충분히 작으면 계산된  $d_i$ 가 최종적인 최대 변위가 되고 설계과정은 여기서 종료된다. 만일 이전 계산 과정의  $d_i$ 와 차이가 충분히 작지 않으면 이 단계에서 계산된  $d_i$ 를 가지고 4단계로 돌아간다.

[6단계] 만일 최대 변위를 줄이거나 늘리고자 하면 면진격리 고무베어링의 고무판 두께나 수를 조정하여 1단계부터 모든 과정을 반복한다.

본 논문의 목적이 면진격리 고무베어링의 설계자체에 있는 것이 아니라 그 설계과정을 이용하여 비탄성·비선형 거동이 예측되는 일반 구조물의 성능점을 구하는 방안을 제시하는 것이므로 더 이상의 면진베어링에 대한 논의는 하지 않기로 한다.

#### 4. 내진성능평가에의 적용

구조물의 내진성능평가는 예상되는 지진에 대한 구조물의 최대 변위 예측과 이 최대변위를 구조물이 전체적으로 그리고 국부적으로 수용할 수 있는지 여부를 포함한다. 그러므로 ATC-40 및 FEMA-273에는 "성능점"이라 일컫는 최대 변위를 구조물의 보유능력곡선과 요구량 응답스펙트럼간의 상관관계를 이용하여 구하는 방법과 구조물의 성능목표에 따라 수용 가능한 층간 변위 한계가 제시되어 있다. 면진격리 고무베어링의 내진설계 방법을 비탄성거동이 예측되는 일반구조물의 내진성능평가에 적용하기 위하여는 면진베어링시스템과 구조물간 거동의 유사성 및 차이점을 살펴볼 필요가 있다.

##### 4.1 유사성 및 차이점

면진격리 고무베어링이 설치된 구조시스템과 일반 구조물간 거동 유사성은 횡변위 요구량이 위험단면(critical section) 혹은 국부적인 부분에 집중된다는 것이다. 면진격리된 구조물의 횡변위 요구량은 대부분 고무베어링의 전단변형에 의하여 충족된다. 마찬가지로 일반 구조물에 가해지는 지진에 의한 비탄성 횡변위 요구량 역시 최대 응력 발생지점인 소성힌지의 회전능력에 의하여 충족된다. 또 다른 유사점은 그림 4에서 보이듯이 횡변위 요구량이 증가함에 따라 유효강성이 감소한다는 점이다. 힘-변위 보유능력곡선(capacity envelope)상의 모든 점은 고유한 유효강성 값을 가지고 있음에 주목할 필요가 있다.

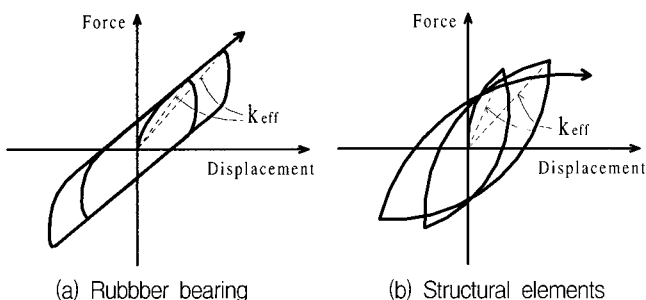


그림 4 이력거동의 비교

면진격리 고무베어링과 구조물간 거동의 차이점은 외력의 원인이 제거된 후 원상복귀능력(re-centering property) 여부에 있다. 면진격리 고무베어링은 원상복귀능력이 있지만 일반 구조물은 소성변형 후 손상된 부분이 영구변형으로 남게 된다. 또 다른 차이점은 면진격리 고무베어링의 이력에너지가 일반구조물의 이력에너지에 비하여 무시할 정도로 작다는 것이다. 이상 열거된 차이점으로 인하여 AASHTO 면진격리 고무베어링 설계법을 일반 구조물의 내진성능평가에 적용함에 있어 오차발생의 원인이 될 수도 있지만, 오차의 크기가 수용할만하고 제안된 해석방법이 기존의 방법에 비하여 간편하면서도 비슷한 정확성을 유지한다면 문제가 되지 않으리라고 생각한다.

##### 4.2 성능점 계산에의 적용

면진격리 고무베어링 설계에서 고려하였던 바와 마찬가지로 그림 1의 탄성응답스펙트럼을 이용하여 지진응답계수를 구하면 다음과 같다.

$$C_s = \frac{C_v}{T} \leq 2.5 C_A \quad (12)$$

여기에 등가감쇠비의 영향을 고려하면

$$C_s = \frac{C_v}{TB} \quad (13)$$

여기서  $B$ 는 표 1의 AASHTO 값을 사용하기로 한다. 이는 구조물에 반복하중이 가해짐에 따라 구조물의 손상이 증가할수록 구조시스템은 장주기화 되므로 ATC-40에서 제시된  $B_L$  값을 사용하여야 하는데 구조물의 거동형태간  $B_L$  값의 차이가 크지 않고 AASHTO의  $B$  값과도 유사하므로 계산과정의 단순화를 위하여 굳이 거동형태를 구별할 필요가 없기 때문이다. 표에서  $B$ 를 정하기 위하여는 등가감쇠비  $\zeta_e$ 를 계산하여야 한다. 등가감쇠비는 구조물의 점탄성 감쇠비  $\zeta_o$ 와 이력감쇠비의 합으로 그림 5<sup>(4)</sup>에 따라 다음과 같이 정할 수 있다.<sup>(10)</sup>

$$\zeta_e = \zeta_o + \frac{\kappa}{4\pi} \frac{E_D}{E_{so}} \quad (14)$$

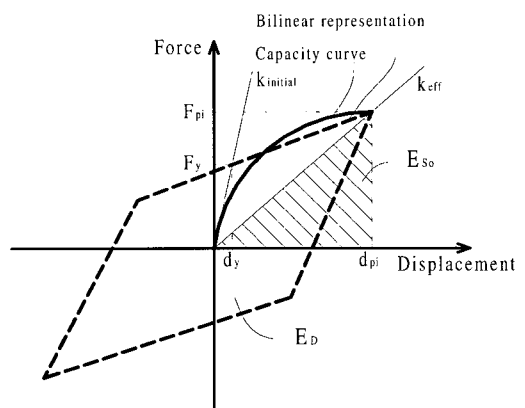


그림 5 등가감쇠비의 정의

여기서  $E_D$ 는 이력감쇠에 의하여 소산된 에너지 양으로서 이선형 이력곡선에 의하여 둘러싸인 면적이며,  $E_{so} = F_{pi} d_{pi} / 2$ 는 최대변형에서의 변형에너지를 의미한다. 다선형 이력곡선을 이선형 이력곡선으로 치환하는 방법은 그림 6에서 보이듯이 주어진 최대점에서 각 곡선에 의하여 둘러싸인 면적이 같도록 항복점을 정하는 방법을 사용한다. 따라서 최대점에 따라 항복점도 변하게 된다.  $x$ 는 등가감쇠수정계수로서 구조시스템 이력거동의 불완전성을 반영한다. 즉 식 (14)의 등가감쇠비를 계산하기 위하여 사용한 그림 5의 이선형 이력거동 모델은 온전한 평행사변형 꼴이지만 실제 철근콘크리트나 철골구조시스템은 재료 및 결합방식의 불완전성으로 인하여 그림 7과 같이 평행사변형 꼴의 일정부분만을 차지하게 되며 이는 결국 이력에너지 소산 및 이에 따른 등가감쇠비가 이선형 이력모델에 비하여 저평가 되어야 함을 의미한다. 하지만 ATC-40의 등가감쇠수정계수는 힘-변위 항복점 및 최대점에 의하여 결정되기 때문에 지진하중에 의한 구조물 거동의 반복성 및 피로의 누적으로 인한 에너지 소산능력 감퇴를 고려하지 못하는 제한적인 면도 있다. 그러므로 구조물의 이력거동에 대한 등가감쇠비를 보다 적절하게 평가하기 위하여는 에너지 흡수효율에 근거하여 등가감쇠비를 정하여야 한다.<sup>(11)</sup> 이상에서 논의된 바를 정리하면 식 (14)의 등가감쇠비는 다음과 같이 된다.<sup>(4)</sup>

$$\zeta_e = 0.05 + \frac{0.637 x (F_y d_{pi} - d_y F_{pi})}{F_{pi} d_{pi}} \quad (15)$$

탄성구조시스템의 최대 유사가속도응답과 최대 변위응답과

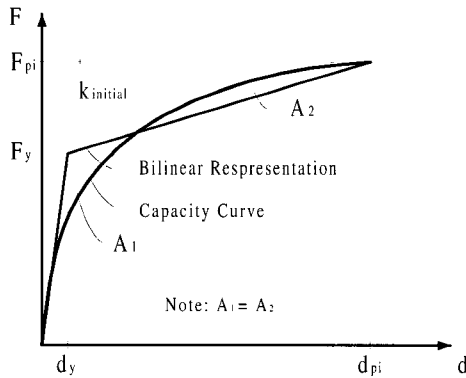


그림 6 이선형 거동모델의 결정

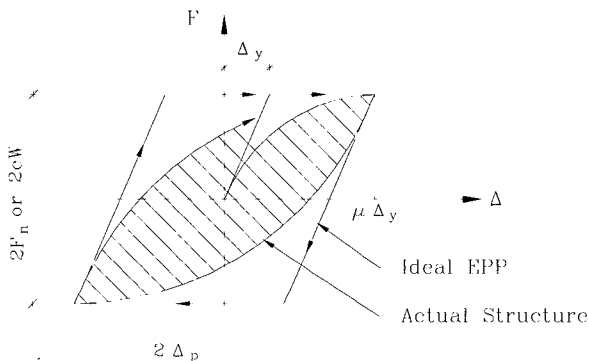


그림 7 에너지흡수효율의 정의

의 관계를 고려하면 식 (13)을 식 (10)에 대입하여 다음과 같이 이선형 보유능력곡선상 지붕층 최대 변위응답(즉 성능점)을 구할 수 있다. 이를 위하여  $T = T_e$ 로 한다.

$$d_{pi} = \frac{250 C_V T_e}{B} \quad (16)$$

이상의 식들은 면진격리 고무베어링의 경우와 마찬가지로 서로의 함수관계에 있기 때문에 초기치를 가정하여 반복 계산에 의하여 주어진 보유능력곡선과 요구량 스펙트럼으로부터 최대 응답을 구할 수 있다. 해석순서를 정리하면 다음과 같다.

- [1단계] 횡하중에 대한 비탄성 비선형 해석을 수행하여 규준에 따라 설계된 구조물의 보유능력곡선을 구한다.
- [2단계] 성능목표에 요구되는 지반운동 수준을 결정하고 이에 따른  $C_A$ 와  $C_V$ 를 정한다.
- [3단계] 초기 성능점  $d_{pi}$ 를 가정하고 이선형 보유능력곡선을 작성한다.
- [4단계] 식 (6), (7), (15)와 표 1을 이용하여  $T_e$ ,  $k_{eff}$ ,  $\zeta_e$  및  $B$ 를 구한다.
- [5단계] 식 (16)을 이용하여 지붕층 최대변위  $d_{pi}$ 를 구한다. 이전 계산과정의 최대변위와 비교하여 그 차이가 충분히 작으면 계산된  $d_{pi}$ 가 최종적인 최대변위가 되고 6단계를 수행한다. 만일 이전 계산과정의  $d_{pi}$ 와의 차이가 충분히 작지 않으면 이 단계에서 계산된  $d_{pi}$ 를 가지고 4단계로 돌아가 계산과정을 반복 수행한다.
- [6단계] 만일 지붕층 최대변위에 의한 층간 변위 및 접합부 변형량이 개별 부재의 변형능력을 초과하면 적절한 내진보강을 한 후 1단계부터 모든 과정을 반복한다.

### 5. 검증을 위한 적용예제

본 절에서는 성능점을 찾기 위하여 제안된 단순계산법을 ATC-40 Appendix A<sup>(12)</sup> 예제에 적용해 봄으로써 그 효율성을 검증하고자 한다. 예제 건물은 미국 California주 Stanford의 Escondido Village에 있는 중층 건물로 평면과 입면은 그림 8과 같으며, 기준층 층고는 2.769m이고 지붕층까지의 건물높이는 22.15m이며 무게는 52700kN이다. 지반조건은 단단한 지반인  $S_D$ 이고 지역계수는  $Z=0.4$ 이며, 이에 따라 계산된 지진계수는  $C_A=0.47$ ,  $C_V=0.76$ 이다. 예제에 따르면 기존 건물의 상태는 충분한 연성을 확보하지 못하였다고 판단되어 내진보강 후 건물의 장변방향 및 단변방향에 대한 해석을 수행하였다.

비탄성 비선형 정적해석을 통하여 구한 건물의 각 방향별 보유능력곡선이 예제에서 이미 주어졌기에 이를 이용하여 본 논문에서 제안된 방법에 따라 성능점을 구하기 위한 과정을 정리하면 그림 9와 같이 된다. 단, 해석결과의 객관적인 비교를 위하여 등가감쇠비 감소계수  $x$ 는 ATC-40의 방법대로 최대변위에 근거하여 정하였다. 그러나 보다 적절한

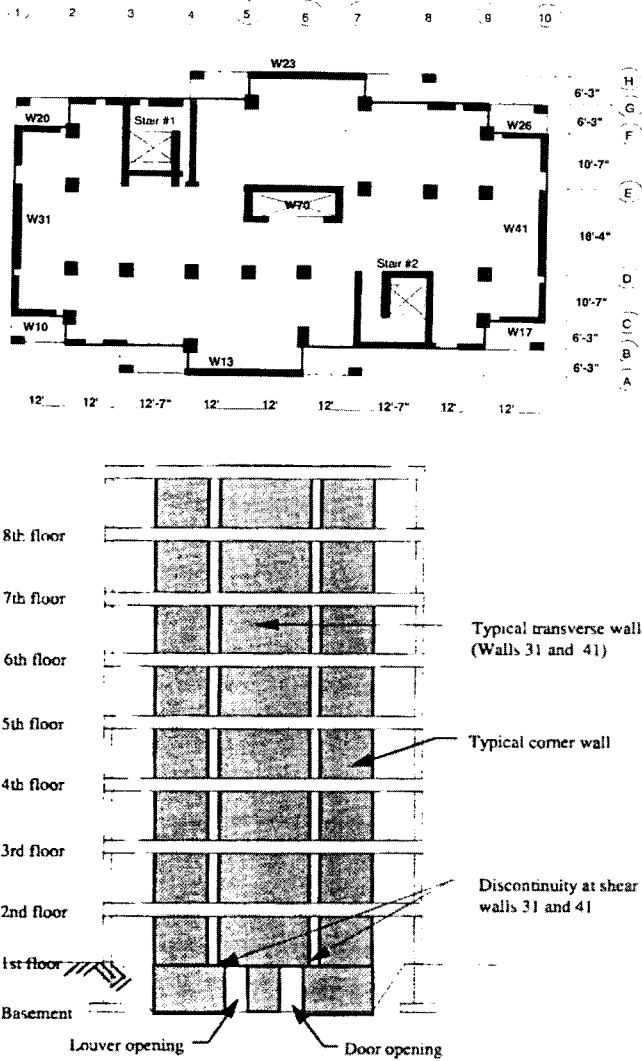


그림 8 예제 건물의 평면 및 입면

등가감쇠비를 평가하기 위하여는 에너지 흡수효율에 근거한 등가감쇠비 감소계수를 사용하여야 한다. 또한 여러 가지 방법으로 구한 각 방향별 성능점이 표 2에 정리·비교되어 있다. 능력스펙트럼법과 비탄성 비선형 시간이력해석법에 의한 최대변위는 예제에 주어져 있다. 제안된 단순한 방법으로 구한 성능점은 장변방향이 304mm이고 단변방향이 357mm로서 ATC-40의 능력스펙트럼법에 의하여 구한 값과는 상당히 차이가 나지만, 비탄성 비선형 시간이력 해석법에 의하여 구한 값과 비교하면 능력스펙트럼법에 비하여 더욱 근사함을 알 수 있다. 이는 제안된 단순한 해석방법이 복잡한 과정을 요하는 능력스펙트럼법에 비하여 더욱 정확한 값을 예측하고 있음을 밝히고 있는 것이라고 하겠다. 하지만 이에 대한 보편적인 결론을 내리기 위하여는 특이한 형상의 힘-변위 보유능력 곡선을 갖는 다양한 구조시스템을 대상으로 제안된 해석법을 적용할 필요가 있다. 이는 추후 연구를 통하여 달성하고자 한다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 구조물의 보유능력에 근거한 최대변위 요

구량인 성능점을 구하기 위한 간편한 해석방법을 제안하였으며, 연구결과 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) AASHTO 면진격리 고무베어링 설계법을 개선하여 얻은 성능점 계산방법은 ATC-40에 제시된 ADRS 스펙트럼을 작성하여야 하는 능력스펙트럼법에 비하여 간단명료한 방법이며 동시에 더욱 정확하게 성능점을 예측할 수 있음을 예제를 통하여 보여 주었다. 이에 대한 보편적인 결론을 위하여는 특이한 형상의 힘-변위 보유능력 곡선을 갖는 다양한 구조시스템을 대상으로 제안된 해석법을 적용할 필요가 있음이 지적되었다.
- (2) 등가감쇠비에 의한 감쇠계수는 속도지배구간인 중·장주기 구간에서 등가감쇠비 0.3까지 AASHTO와 ATC-40에서 제시한 값 사이에 큰 차이가 없었으므로 해석의 편의를 위하여 AASHTO의 값을 사용할 수 있다고 사료된다.
- (3) 구조물의 이력거동에 의한 등가감쇠비를 보다 적절하게 평가하기 위하여는 에너지 흡수효율에 근거한 등가감쇠비 감소계수를 사용하여야 함이 지적되었다. 이를 위한 추후 연구가 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 1999년 한국과학기술재단 특정기초연구의 부분적인 지원에 의하여 수행되었음을 밝히며, 이에 감사 드린다.

## 참 고 문 헌

1. AASHTO, *Guide Specifications for Seismic Isolation Design*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., U.S.A., 1991.
2. UBC, *Uniform Building Code*, International Conference of Building Officials, California, U.S.A., 1994.
3. NEHRP, *Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings: 1994 Edition*, FEMA 222A, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., U.S.A.
4. ATC-40, *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings: Volume 1*, Applied Technology Council, 1996.
5. NEHRP, *Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings*, FEMA 273, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., U.S.A., 1997.
6. 김진구, 방성혁, "직접 변위설계법을 이용한 구조물의 내진성능평가", 한국지진공학회 논문집, Vol. 6, No. 2, 2002. 4, pp. 1-7.
7. 대한건축학회, 건축물 하중기준 및 해설, 태림문화사, 2000.
8. AASHTO, *Standard Specifications for Highway Bridges: Division I-A Seismic Design*, 15th Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., U.S.A., 1992.
9. Newmark, N. M. and Hall, W. J., "Earthquake Spectra

	Longitudinal Direction	Transverse Direction
step 1	CA=0.47, CV=0.76	CA=0.47, CV=0.76
step 2	$d_{pi} = 250\text{mm}$ 가정	$d_{pi} = 300\text{mm}$ 가정
step 3	$k_{eff} = 35.0\text{ kN/mm}$ , $T_e = 2.46\text{ sec}$ $\alpha = 0.54$ , $\zeta_e = 0.273$ (27.3%), $B \approx 1.646$	$k_{eff} = 25.3\text{ kN/mm}$ , $T_e = 2.90\text{ sec}$ $\alpha = 0.58$ , $\zeta_e = 0.266$ (26.6%), $B \approx 1.632$
step 4	$d_{pi} = 284\text{mm}$	$d_{pi} = 338\text{mm}$
No Good	$(d_{pi})_2 = 284\text{mm} \neq (d_{pi})_1 = 250\text{mm}$	$(d_{pi})_2 = 338\text{mm} \neq (d_{pi})_1 = 300\text{mm}$
Return to step 2	$d_{pi} = 284\text{mm}$ 재가정	$d_{pi} = 338\text{mm}$ 재가정
step 3	$k_{eff} = 31.4\text{ kN/mm}$ , $T_e = 2.60\text{ sec}$ $\alpha = 0.53$ , $\zeta_e = 0.272$ (27.2%), $B \approx 1.644$	$k_{eff} = 23.2\text{ kN/mm}$ , $T_e = 3.02\text{ sec}$ $\alpha = 0.59$ , $\zeta_e = 0.268$ (26.8%), $B \approx 1.636$
step 4	$d_{pi} = 300\text{mm}$	$d_{pi} = 351\text{mm}$
No Good	$(d_{pi})_2 = 300\text{mm} \neq (d_{pi})_1 = 284\text{mm}$	$(d_{pi})_2 = 351\text{mm} \neq (d_{pi})_1 = 338\text{mm}$
Return to step 2	$d_{pi} = 300\text{mm}$ 재가정	$d_{pi} = 351\text{mm}$ 재가정
step 3	$k_{eff} = 30.0\text{ kN/mm}$ , $T_e = 2.66\text{ sec}$ $\alpha = 0.55$ , $\zeta_e = 0.281$ (28.1%), $B \approx 1.662$	$k_{eff} = 22.5\text{ kN/mm}$ , $T_e = 3.07\text{ sec}$ $\alpha = 0.59$ , $\zeta_e = 0.267$ (26.7%), $B \approx 1.634$
step 4	$d_{pi} = 304\text{mm}$	$d_{pi} = 357\text{mm}$
O.K.	$(d_{pi})_2 = 304\text{mm} \approx (d_{pi})_1 = 300\text{mm}$	$(d_{pi})_2 = 357\text{mm} \approx (d_{pi})_1 = 351\text{mm}$

그림 9 제안된 방법에 의한 예제 건물 해석과정

표 4 각 해석방법별 지붕층 최대변위 비교

해석방법	장변방향 지붕층 변위		단변방향 지붕층 변위	
	$d_{bi}$ (mm)	시간이력에 의한 무차원화 한 값	$d_{bi}$ (mm)	시간이력에 의한 무차원화 한 값
능력스펙트럼법 <sup>(12)</sup>	350.5	1.23	411.5	1.26
<b>제안된 방법</b>	<b>304</b>	<b>1.07</b>	<b>357</b>	<b>1.09</b>
비선형 시간이력 <sup>(12)</sup>	284.5	1.0	327.7	1.0

and Design," Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, Calif., 1982.

10. Chopra, A. K., *Dynamics of Structures — Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prentice Hall International, Inc., 1995.

11. 김장훈, 좌동훈, "에너지 흡수효율에 의한 철근콘크리트 구조물의 감쇠비 수정계수 결정", 콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, Vol. 14, No. 2, 2002. 10., pp. 161-166.

12. ATC-40, *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings: Volume 2—Appendices*, Applied Technology Council, 1996.