

지진하중을 받는 구조물의 성능에 기초한 마찰감쇠기 설계

Performance Based Design of Friction Dampers for Seismically Excited Structures

민 경 원*
Min, Kyung-Won

김 형 섭**
Kim, Hyoung-Seop

국문요약

이 논문의 주된 목적은 지진을 받는 구조물의 비탄성 거동을 제어하기 위해 Coulomb 마찰감쇠기의 제어성능을 산출하는 것이다. 능력스펙트럼법을 이용하여 다양한 건물의 내진성능이 평가되나, 만약 평가된 성능수준이 목표수준에 미치지 못할 때는 추가적인 감쇠비를 산출하게 된다. 추가적인 감쇠비를 얻기 위한 마찰감쇠기의 최대 마찰력은 등가 점성 감쇠의 개념을 사용하여 산정된다. 이와 같이 제안된 방법의 효과를 증명하기 위해, 다양한 주기와 항복 후 강성비를 가진 단자유도 구조물들에 대하여 수치해석을 수행하였다.

주요어 : coulomb 마찰 감쇠기, 내진 성능, 능력스펙트럼법, 등가 점성 감쇠

ABSTRACT

The main objective of this paper is to evaluate the control performance of a coulomb friction damper(CFD) for controlling the inelastic behavior of seismically excited structures. The seismic performances of various buildings are evaluated using capacity spectrum method(CSM), and the additional dampings are calculated if the evaluated performance levels of the buildings are below the target level. Maximum friction force of the CFD to achieve additional damping is provided using the concept of equivalent viscous damping. Numerical simulations for single degree of freedom(SDOF) systems with various structural periods and post yield stiffness ratios demonstrate the effectiveness of the proposed procedure.

Key words : coulomb friction damper, seismic performance, capacity spectrum method, equivalent viscous damping

1. 서 론

미국 서부의 1989년 Loma Prieta 지진과 1994년 Northridge 지진 등 최근의 지진에 의한 큰 경제적 손실로 인해 내진 설계법의 개선 요구가 대두되었다. 일본 또한 Kobe지진으로 인한 막대한 피해가 발생함에 따라, 현 내진설계법의 문제점을 파악하고 규명하고자 하는 노력을 기울이기 시작하였다. 이러한 배경에서 성능에 기초한 설계법이 대두하였으며 인위적으로 감쇠를 증가시키는 감쇠장치를 사용하여 구조물의 내진성능을 향상시키려는 연구가 많이 진행되고 있다. Lin 등⁽¹⁾(2003)은 성능에 기초한 설계법의 하나인 직접변위 설계법을 적용하여 다양한 형태의 수동형 감쇠기 설계를 수행하였다. 이러한 성능에 기초한 설계법의 주된 관심은 외부하중에 의해 생기는 건물의 최대 변위이다. 따라서 변위를 기준으로 기존건물의 성능을 쉽고 간편하게 평가하는 방법에 대한 연구가 활발하게 진행중이다. 그 중 비탄성 정적해석인 능력스펙트럼법(Capacity Spectrum Method)은 간편하게 건물의 비탄성 거동을 고려하여 기존건물의 내진성능을 평가하기 위한 방법으로 많이 적용되고 있다.^{(2),(3)} 또한 능력스펙트럼법을 이용하여 감쇠기가 설치된 건물의 내진성능을 평가하는 방법도 다양하게 이루어지고 있다. 최현훈⁽⁴⁾(2000) 등은 능력스펙트럼법을 사용하여 주기와 항복후 강성비가 다

른 건물들의 내진성능을 평가한 후 목표변위에 따른 요구감쇠비를 산정하였다. 그리고, 이를 달성할 수 있도록 점성유체 감쇠기의 용량을 산정하였다. 선형거동을 하는 점성유체 감쇠기의 효과는 정확히 감쇠비로 치환될 수 있기 때문에, 이 방법은 선형의 점성유체감쇠기에는 타당하다 할 수 있다. Li and Reinhorn⁽⁵⁾(1995) 등은 능력스펙트럼법을 사용하여 마찰감쇠기가 설치된 건물의 내진보강법을 제시하고, 이를 실험으로 검증하였다. 그러나, 감쇠장치가 설치된 후의 성능점을 제시할 뿐, 설치되기 전의 응답을 평가하고, 정해진 목표변위를 달성할 수 있도록 마찰감쇠기를 설계할 수 있는 절차는 제시하지 못하였다. 외란에 의해 발생한 구조물의 에너지를 소산시키는 장치로서 마찰의 메커니즘을 이용한 마찰 감쇠기는 건축뿐만 아니라 다른 공학분야에 많이 사용되고 있다.

본 논문에서는 능력스펙트럼법을 이용하여 구조물의 성능을 평가한 후, 비선형 감쇠장치의 하나인 마찰감쇠기를 사용하여 구조물의 목표변위를 달성할 수 있는 방법을 제시한다. 여기서, 목표변위는 구조물이 비탄성 거동을 방지하기 위해서 항복변위로 선정하였다. 다음으로, 직사각형으로 가정된 마찰감쇠기의 에너지 이력곡선을 이용하여 감쇠기를 설계할 수 있는 식을 유도하였다. 이 식을 이용하면 목표변위에 따른 마찰감쇠기의 설계 파라미터인 최대 마찰력을 반복과정을 거치지 않고 산정할 수 있다. 이렇게 설계한 마찰감쇠기를 다양한 주기와 항복 후 강성비를 가지는 건물에 적용하여, 이 논문에서 제시하는 과정으로 설계한 방법의 정확성을 검증한다.

* 단국대학교 건축대학 건축공학과 부교수, 공학박사
(대표저자 : kwmin@dankook.ac.kr)

** 단국대학교 건축대학 건축공학과, 석사과정

본 논문에 대한 토의를 2003년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2003. 7. 22 / 심사종료일 : 2003. 11. 18)

2. 능력스펙트럼법을 이용한 요구감쇠비 산정

$$\beta_{eff} = \beta + \alpha\beta_{eq} \quad (3)$$

2.1 능력스펙트럼(Capacity Spectrum)

여기서, α 는 유효감쇠비에 따른 감쇠조정계수⁽²⁾이다. 또한 등가점성 감쇠비는 식 (4)와 같다.

능력곡선은 지진력을 등가의 층하중으로 변환해서 구조물에 가하여(pushover) 변위를 산정하고 이를 밀면전단력과 최상층 변위에 의해 얻어진 곡선을 말하며, 능력스펙트럼이라고도 한다. 그러한 밀면전단력을 층하중으로 분리하는 방법에는 여러 가지가 있지만⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾ 본 논문에서는 1차 모드가 지배적인 구조물에 대하여 밀면전단력을 건물의 총질량과 1차 모드형상계수에 따라 분배하였다. 산정된 능력스펙트럼을 요구스펙트럼과 하나의 그래프에 나타내기 위해서 식 (1)를 이용하여 응답가속도(S_a)와 응답변위(S_d)로 나타내야 한다.

$$\beta_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_S} = \frac{2(S_{ay}S_{dp} - S_{dy}S_{ap})}{\pi S_{ap}S_{dp}} \quad (4)$$

그림 1은 구조물의 이력곡선으로 E_D 는 이력거동에 의하여 소산되는 에너지를 말하며 마름모의 면적이다. E_S 는 구조물의 최대 변형에너지로 그림에서 회색의 삼각형 면적으로 나타낼 수 있다. S_{ap} 는 구조물의 초기 항복점에서의 가속도이고 S_{dy} 는 그때의 변위이다.⁽⁴⁾ 또한 S_{ap} 와 S_{dp} 는 각각 성능점에서의 가속도와 변위이다.

$$S_a = \frac{V}{M_1^*} \quad S_d = \frac{\Delta_R}{\Gamma_1 \phi_{R1}} \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Gamma = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \phi_{i1}}{\sum_{i=1}^n m_i \phi_{i1}^2} \\ M_1^* = \frac{\left(\sum_{i=1}^n m_i \phi_{i1} \right)^2}{\sum_{i=1}^n m_i \phi_{i1}^2} \end{array} \right.$$

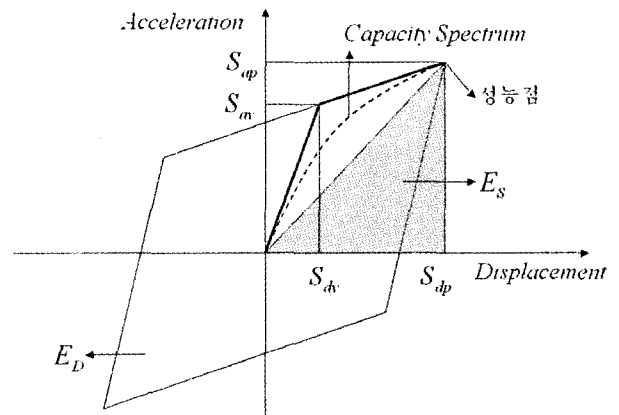


그림 1 구조물의 이력곡선

여기서,

- ϕ_{i1} : 1차 모드에서 i 층의 모드 형상 계수
- Γ_1 : 1차 모드에 대한 참여계수
- M_1^* : 1차 모드에 대한 유효모드 질량
- Δ_R : 지붕층의 변위
- ϕ_{R1} : 지붕층의 1차모드형상
- m_i : i 층의 질량

2.2 요구스펙트럼(Demand Spectrum)

3. 마찰 감쇠기

요구스펙트럼은 특정한 지진에 대한 구조물의 고유주기 (T_n)에 따른 최대 응답변위의 관계로 표현된다. 능력스펙트럼과 요구스펙트럼을 하나의 그래프에 나타내기 위하여 S_a , S_d 의 형식으로 표현한다. 이 변환에는 식 (2)가 이용된다.

마찰감쇠기는 오랫동안 생산되고 발전되어 왔다. 최초의 적용은 건축이 아닌 Bogie 트럭의 레일에 사용되었고, 1980년대 중반이후부터 내진공학과 건축분야에 적용되기 시작하였다. Pall 등⁽⁹⁾(1980)은 구조물의 지진응답을 감소시키기 위하여 마찰감쇠기를 사용하였다. 구조물의 에너지 소산을 위해 제안된 마찰감쇠기에는 상대적으로 낮은 비용과 함께 설치 및 유지가 쉽다는 장점 때문에 건축물뿐만 아니라 항공기 엔진의 터빈 및 각종 기계류에 사용되고 있다. 마찰감쇠기의 에너지 소산 형태는 일반적으로 마찰력과 변위의 관계로 볼 때 직사각형으로 되어 에너지 소산이 크다. 그리고 그러한 능력은 하중크기나 가진 진동수에 의해 크게 영향을 받지 않는다. 또한 기계적인 메카니즘과 마찰을 일으키는 표면의 재료에 따라 다양한 설계가 가능하다. 따라서 새로운 형태의 마찰감쇠기를 구조물에 적용하기 위한 연구가 계속 진행 중이다. Roik 등⁽¹⁰⁾(1988)은 3단계로 지배되는 마찰요소를 통하여 구조물의 응답을 제어하려는 시도를 하였고, Mualla와 Belev⁽¹¹⁾(2002)는 정교한 마찰감쇠기가 설치된 단자유도의 철골 프레임에 대하여 조화하중에 대한 응답제어를 시도하였고, 성능에 기초한 설계법에 의하여 건축물의 신축 혹은 보강을 위하여 마찰감쇠기 설계 방법을 제안하였다.

$$S_d = \frac{T_n^2}{4\pi^2} S_a \quad (2)$$

2.3 구조물의 성능점 및 유효감쇠비 산정

위에서 나타낸 능력스펙트럼곡선과 요구스펙트럼곡선을 하나의 그래프에 나타낸 방식을 가속도-변위응답스펙트럼(Acceleration Displacement Response Spectrum) 이라고 하며, 그 두 개의 교차점을 이용해서 성능점을 산정한다.⁽²⁾

구조물이 비탄성 변형을 하면 이력거동으로 인하여 에너지 소산이 생겨 이에 따른 등가점성 감쇠비(β_{eq})가 추가적으로 생긴다. 그러므로 유효감쇠비(β_{eff})는 식 (3)에서와 같이 구조물의 고유감쇠비(β)에 등가점성 감쇠비를 합산해야 한다.

3.1 Coulomb 감쇠기

외란으로부터 구조물의 손상을 줄이기 위해 효과적으로 사용된 마찰감쇠기에는 여러 가지가 있다. 그 중 일반적으로 많이 사용되는 것으로는 효과적이면서도 비교적 간단한 기계적 메카니즘이 결합된 Coulomb 마찰감쇠기가 있다. 그림 2에서와 같이 질량의 미끄러짐에 반대로 작용하는 마찰력인 F 와 질량-강성 시스템으로 이루어진 운동방정식은 식 (5)와 같다. 마찰력(F)은 속도의 방향과 반대로 작용한다. 즉, 그림 2의 물체가 왼쪽에서 오른쪽으로 운동한다면($\dot{u} > 0$) 마찰력은 왼쪽으로 작용하고($+F$), 질량이 오른쪽에서 왼쪽으로 작용하면($\dot{u} < 0$) 마찰력은 그 반대로($-F$) 작용한다. 이 각각의 미분방정식은 선형이다. 그러나, 매번 반주기마다 방향이 바뀌므로 비선형이라 할 수 있다. 따라서 특별한 경우를 제외하고는 정확한 해를 산출하는 것은 불가능하다. Coulomb 마찰감쇠기의 에너지 소산은 변위의 폭에 비례한다. 즉, 소산된 에너지는 그림 3의 마찰력과 변위의 이력 폐곡선의 면적(E_{DF})을 나타내는 식 (7)과 같다.

$$m\ddot{u} + ku + F = P(t) \tag{5}$$

$$F = F_d \times \text{sgn}(\dot{u}) \tag{6}$$

$$E_{DF} = \int F_d du = 4 \times F_d u_d \tag{7}$$

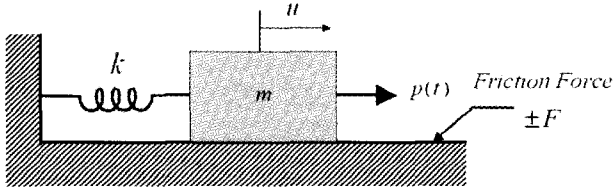


그림 2 마찰력과 질량-강성 시스템

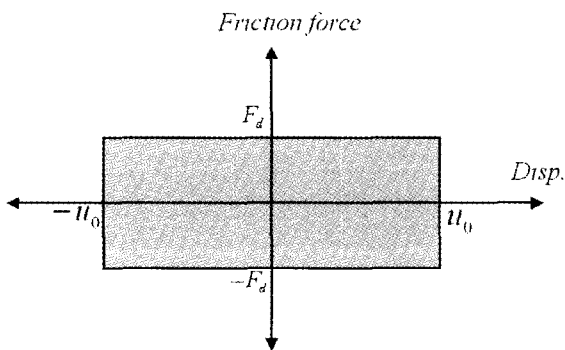


그림 3 마찰감쇠기의 에너지 이력곡선

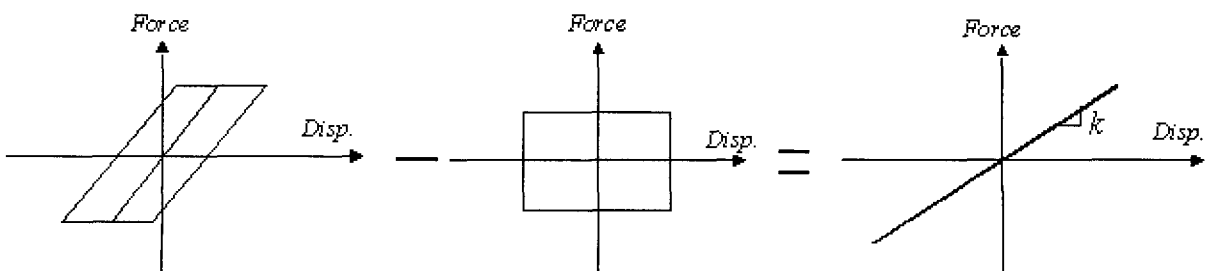


그림 4 마찰감쇠기에 의한 에너지 소산의 원리

여기서 u_o , F_d 는 각각 그림 2에서 나타내는 마찰면의 변위와 최대마찰력이다.

3.2 마찰감쇠기 설계

본 논문에서는 그림 4와 같이 비탄성 거동을 하는 건물의 경우, 소산에너지가 큰 마찰감쇠기를 설치하여 탄성거동을 유도하는 마찰감쇠기의 설계를 목적으로 한다. 마찰감쇠기가 설치된 경우에 구조물의 유효감쇠비(β_{eff})는 구조물의 고유감쇠비와 등가감쇠비에 마찰감쇠기의 에너지 소산에 의한 감쇠비를 추가하면 된다. 따라서 식 (8)과 같다.

$$\beta_{eff} = \beta + \alpha\beta_{eq} + \beta_d \tag{8}$$

여기서 β_d 는 마찰감쇠기에 의하여 추가된 감쇠비이고, 그러한 감쇠비는 다음 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\beta_d = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{E_{DF}}{E_S} \tag{9}$$

여기서, E_{DF} 는 마찰감쇠기에 의해 소산된 에너지를 나타낸다. 이 논문에는 구조물의 비탄성 거동을 방지하기 위해 목표변위를 항복변위점으로 선정하였으므로 구조물의 이력거동에 의한 에너지(E_b)는 "0"이 되기 때문에 식 (4)에서 β_{eq} 는 "0"이 된다. 또한 식 (9)의 분모는 탄성변형에너지를 나타내며 다음 식 (10)과 같다.

$$E_S = \frac{1}{2} \cdot K_{eff} \cdot u_0^2 \tag{10}$$

여기서 K_{eff} 는 구조물의 유효 탄성강성⁽⁴⁾이다. 식 (7)과 식 (10)을 식 (9)에 대입하고, 층간변위가 마찰면의 변위가 같다는 가정하에 전개를 하면 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\beta_d = \frac{2F_d}{\pi K_{eff} u_T} = \frac{2F_d}{\pi K_{u_T}} \left(\frac{T_{eff}}{T_n} \right)^2 \tag{11}$$

여기서, T_n , T_{eff} 는 각각 구조물의 고유주기와 유효주기⁽¹⁾이고, K 는 구조물의 탄성강성이다. 또한 u_T 는 식 (10)의 u_o 와 같이 마찰면의 변위를 의미하는 것으로써, 결국 여기서는 목표변위를 의미한다. 이 식에서 마찰감쇠기의 최대마찰력을 산정할 수 있는 식 (12)를 유도할 수 있다.

$$F_d = \frac{\pi}{2} \cdot u_T \cdot K \cdot \left(\frac{T_n}{T_{eff}} \right)^2 \cdot \beta_d \quad (12)$$

이 식에서 알 수 있듯이 임의의 구조물에 대해 강성 및 고유 주기는 고정값이므로 성능에 기초한 설계법에 기초하여 목표변위를 설정하고 비탄성 정적해석법인 CSM법을 사용하여 목표변위를 만족하기 위한 요구감쇠비를 산정하면 마찰 감쇠기를 설계하기 위해 필요로 하는 최대마찰력을 산정할 수 있다. 따라서 반복과정을 거치지 않고 필요로 하는 마찰 감쇠기를 설계할 수 있다.

4. 수치해석

4.1 능력스펙트럼법 검증

본 논문의 예제 구조물로는 이선형으로 비선형 거동을 하는 것으로 가정하였으며, 구조물의 질량은 1.0ton으로 정규화 시켰다. 주기는 0.5, 1.0, 1.5, 3.0초, 항복 후 강성비(α)는 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5를 가지는 24개의 단자유도 건물들을 이용하였다. 그리고, UBC-97의 재현주기 1000년의 붕괴 방지 수준의 표준설계스펙트럼⁽¹²⁾에 의해 능력스펙트럼법을 사용하여 그림 5와 같이 내진성능을 평가하고 적정 감쇠비를 산정하였다. 그림 5는 주기가 1.0초이고 항복 후 강성비가 0.3인 구조물의 경우에 대한 하나의 예제를 보여준다.

기존의 연구자들에 의해 건물의 특성에 따른 능력스펙트럼법의 정확성에 관한 검증은 많이 수행되었다.^{(13),(14)} 본 논문에서도, 사용되는 구조물에 있어서 감쇠기 설계를 위해서는 능력스펙트럼의 정확성이 먼저 검증되어야 한다. 이를 위해, 그림 6과 같이 표준설계스펙트럼과 유사한 스펙트럼을 발생시키는 인공지진⁽¹⁵⁾을 이용하여 시간이력해석을 수행하였다. 그 결과는 표 1에 나타내었다. 시간이력해석결과와 능력스펙트럼법의 오차를 보여주는 그림 7에서 알 수 있듯이, 능력스펙트럼법에 의한 방법은 주기가 1초와 3초인 건물에서 다소 과소평가가 되는 것으로 나타났으며, 0.5초와 1.5초인 건물에서는 다소 과대평가가 되는 것으로 나타났다. 여기서, 주기가 같은 건물에서는 항복 후 강성비(α)에 관계없이

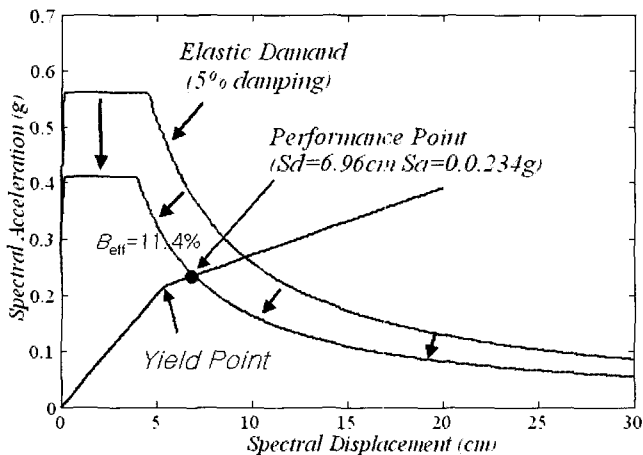


그림 5 성능점 산정 ($T_n=1$ 초, $\alpha=0.3$)

과대평가, 혹은 과소평가가 전체적으로 같은 경향을 보임을 알 수 있다. 그러나, 전체적으로 능력스펙트럼법에 의해 산정된 변위와 시간이력해석에 의해 산정된 변위의 오차가 비교적 작은 것으로 나타났으며, 능력스펙트럼법은 충분히 감쇠기 설계에 적용이 가능한 방법이라 판단된다.

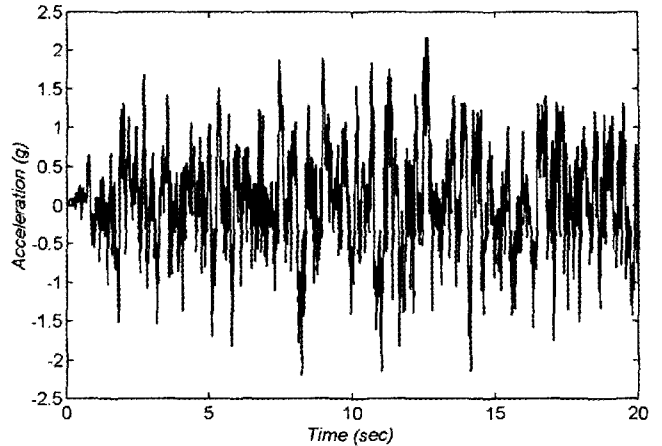


그림 6 재현주기 1000년의 스펙트럼과 유사한 인공지진

표 1 구조물에 따른 CSM의 정확성 검증

T_n	α	K	D_y	D_s	D_h
0.5	0.05	157.9	1.52	3.55	3.29
	0.1			3.57	3.31
	0.2			3.34	3.34
	0.3			3.47	3.34
	0.4			3.39	3.33
	0.5			3.41	3.31
1.0	0.05	39.48	5.32	6.73	6.85
	0.1			6.79	6.76
	0.2			6.85	6.89
	0.3			6.96	7.14
	0.4			7.10	7.29
	0.5			7.17	7.37
1.5	0.05	17.55	8.55	10.31	9.92
	0.1			10.30	9.89
	0.2			10.44	9.88
	0.3			10.57	9.87
	0.4			10.68	9.86
	0.5			10.8	9.85
3.0	0.05	4.4	18.25	21.20	25.2
	0.1			21.16	25.1
	0.2			21.36	25.0
	0.3			21.53	24.9
	0.4			21.74	24.8
	0.5			22.05	24.7

T_n : 구조물의 고유주기(초)

α : 항복후 강성비

K : 구조물의 탄성강성(kN/m)

D_y : 항복 변위(cm)

D_s : 성능점 변위(cm)

D_h : 시간이력해석에 의한 변위(cm)

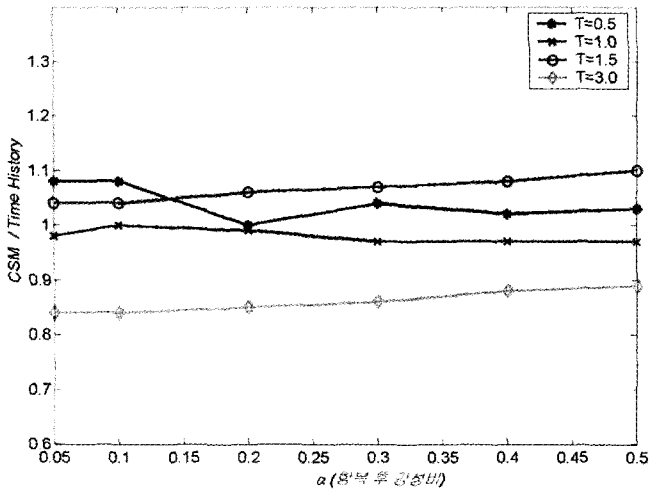


그림 7 시간이력해석에 대한 CSM의 변위비

24개의 예제구조물 중 주기가 0.5, 1.0초이고 항복 후 강성비가 각각 0.2인 구조물에 위에서 생성한 인공지진을 가하여 비탄성 해석을 수행한 결과 그림 8, 9와 같이 탄성영역을 벗어나서 비선형 이력거동을 하고 있는 것을 알 수 있다. 즉, 구조물이 탄성거동을 하기 위해서는 추가적인 감쇠기가 필요하다는 것을 알 수 있다.

4.2 마찰감쇠기 설계 및 결과 검증

주기와 항복후 강성비가 다른 24개의 예제구조물에 대해

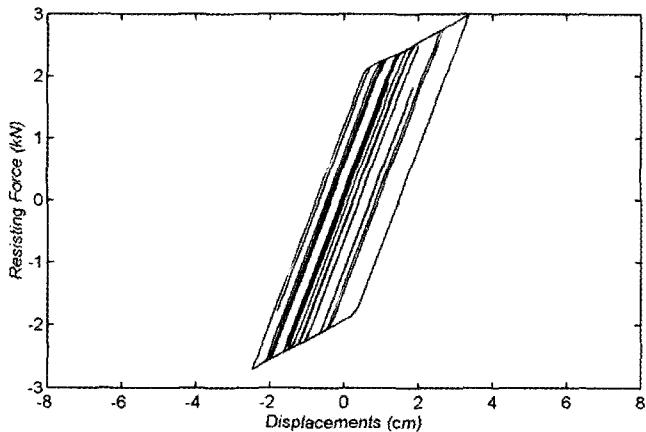


그림 8 비제어시 구조물의 에너지 이력곡선($T_n=0.5$ 초, $\alpha=0.2$)

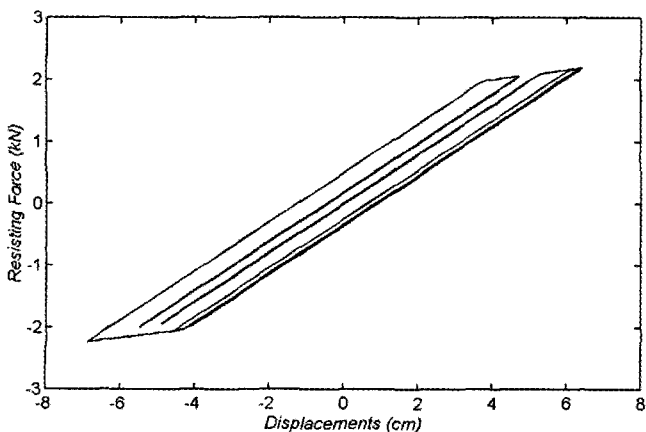


그림 9 비제어시 구조물의 에너지 이력곡선($T_n=1.0$ 초, $\alpha=0.2$)

여 각각 능력스펙트럼법에 의해 구조물에 발생할 수 있는 최대변위를 산정하고, 건물의 비탄성 거동의 방지목적으로 감쇠기를 설계하기 위해 목표변위를 항복변위로 설정한 후 요구감쇠비를 산정하였다. 산정된 요구 감쇠비와 목표변위, 그리고 제어하려는 구조물의 강성과 주기를 식 (12)에 대입하면 마찰감쇠기의 가장 중요한 설계변수인 최대 마찰력을 산정할 수 있다. 따라서, 마찰감쇠기를 반복 수행 없이 선택할 수 있다. 그림 10, 11, 12, 그리고 13은 각각 고유주기가 0.5, 1.0초이고 항복후 강성비가 0.2인 구조물들에서 위의 과정대로 감쇠기를 설계하여 적용시킨 후의 최대변위 제어모습과 제어력의 시간이력을 나타낸다. 즉, 설계한 마찰감쇠기를 건물에 적용한 결과, 응답이 감소된 것을 알 수 있고, 그때의 제어력은 항상 일정한 힘이 속도의 반대방향으로 작용하는 전형적인 Coulomb 감쇠기의 제어력을 보이고 있다. 그리고 제어력의 에너지 소산곡선은 그림 14, 15와 같이 사각형의 형상을 띄고 있다. 또한, 그림 8, 9에서와 같이 비탄성 이력거동을 하던 구조물이 마찰감쇠기를 적용한 결과 그림 16, 17과 같이 탄성 거동을 하고 있음을 알 수 있다.

위와 같은 방법으로 24개 구조물의 해석을 수행한 결과는 표 2에 나타내었다. 표 2에서, 마찰감쇠기를 사용하여 목표변위에 가깝도록 변위응답을 줄일 수 있음을 확인 할 수 있다. 그림 18은 목표변위에 대한 제어 후의 변위비(R)를 나타내는 그림으로써, 주기가 증가할수록 변위 비는 증가하고, 또한 항복 후 강성비가 증가할수록 변위비가 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, 제안된 방법은 주기와 항복 후 강성비가 증가할수록 감쇠기의 용량을 작게 산정한다. 그 중 주기가 가장 짧은 0.5초인 건물에서는 항복 후 강성비에 따라 제어효

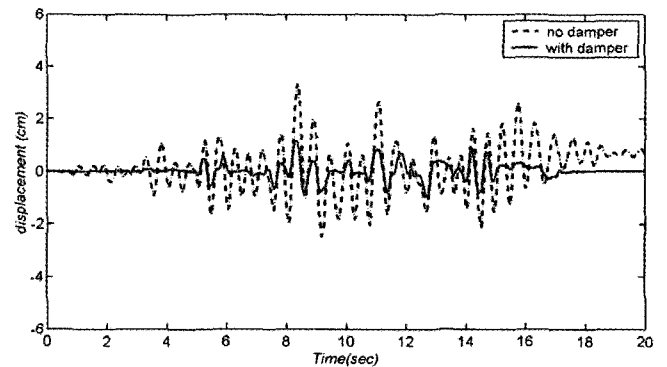


그림 10 비탄성 시간이력 해석($T_n=0.5$ 초, $\alpha=0.2$)

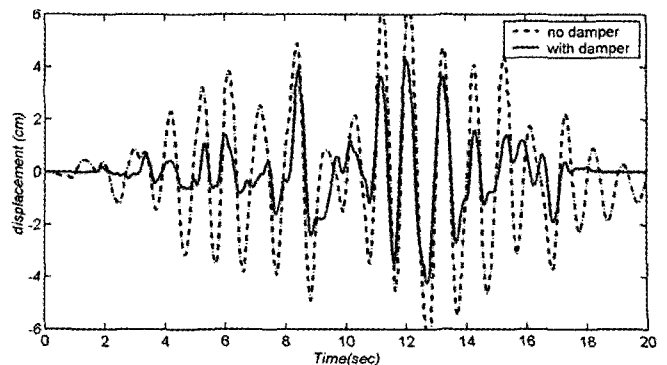


그림 11 비탄성 시간이력 해석($T_n=1.0$ 초, $\alpha=0.2$)

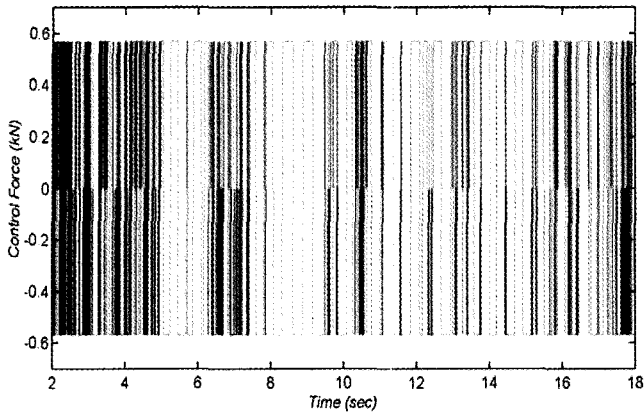


그림 12 제어력의 시간이력($T_n=0.5$ 초, $\alpha=0.2$)

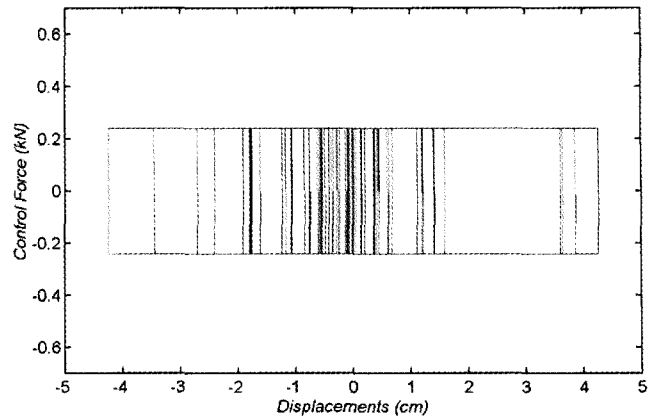


그림 15 제어력의 에너지 소산($T_n=1.0$ 초, $\alpha=0.2$)

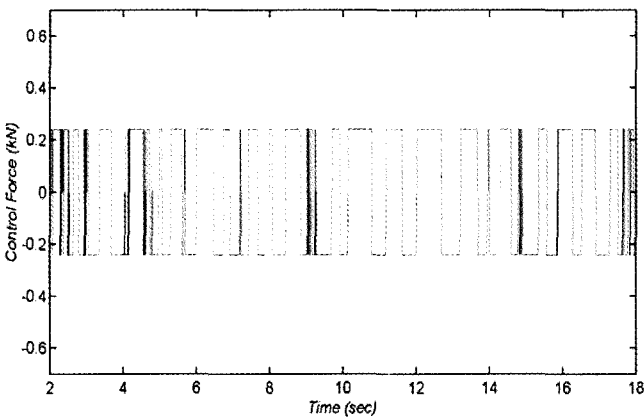


그림 13 제어력의 시간이력($T_n=1.0$ 초, $\alpha=0.2$)

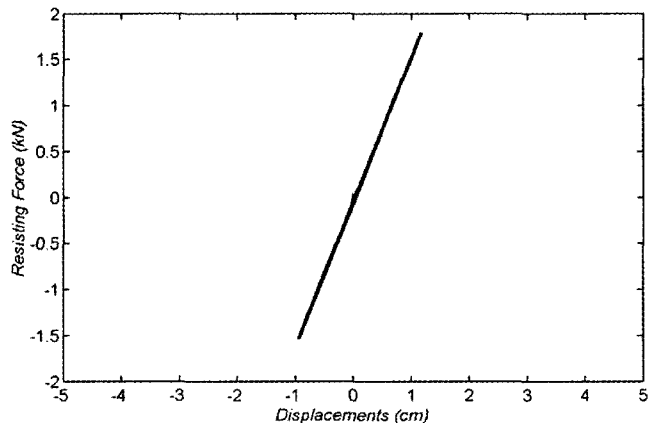


그림 16 제어시 구조물의 에너지 이력곡선($T_n=0.5$ 초, $\alpha=0.2$)

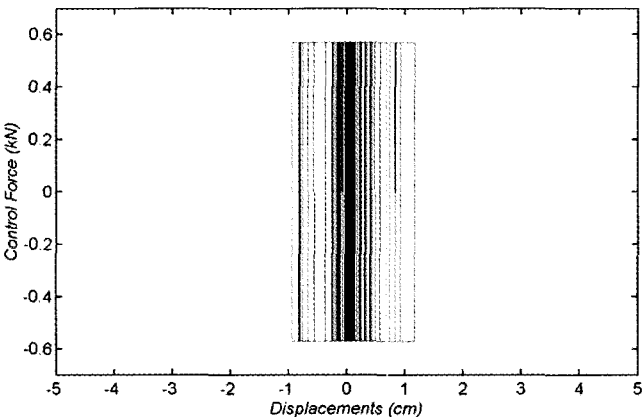


그림 14 제어력의 에너지 소산($T_n=0.5$ 초, $\alpha=0.2$)

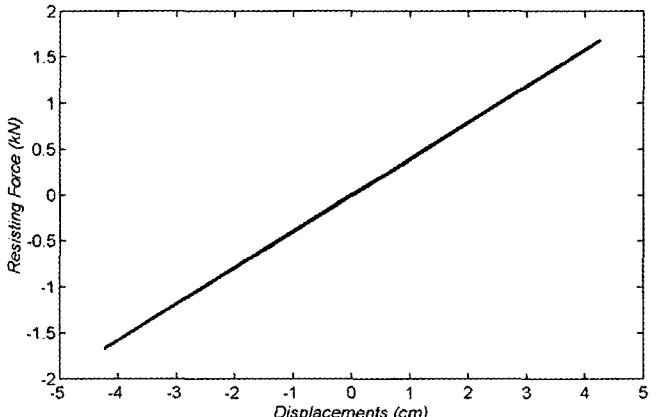


그림 17 제어시 구조물의 에너지 이력곡선($T_n=1.0$ 초, $\alpha=0.2$)

과의 편차가 가장 심하게 나타났다. 1.0초와 1.5초인 구조물의 제어효과는 만족스러운 것으로 나타났으나, 주기가 3초인 건물에서는 조금 과소 제어되는 경향을 나타내었다.

5. 결 론

본 논문에서는 먼저 비선형 정적해석법인 능력스펙트럼법을 사용하여 구조물의 내진성능을 평가하고 검증하였다. 다음으로 구조물이 비선형으로 거동하는 것을 막기 위해 목표변위를 항복변위로 선정하여, 마찰감쇠기에 의한 에너지 소산곡선이 사각형이라는 가정 하에 마찰감쇠기를 설계하였다. 설계된 마찰감쇠기를 구조물에 적용하여 비탄성 시간이

력을 수행한 결과, 주기와 항복후 강성비가 증가할수록 목표변위에 대한 제어 후의 변위비가 증가하는 것을 알 수 있었다. 결과적으로는, 주기가 0.5초로 다른 구조물에 비해 단 주기인 경우를 제외하고는 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다. 즉, 제안된 방법을 이용하면 구조물에 따라 정확성의 차이는 있지만 초기 설계 시 요구되는 마찰 감쇠기의 능력을 산정할 수 있다.

주기와 항복 후 강성비가 커질수록 마찰감쇠기의 크기를 작게 산정하고, 장주기 구조물의 경우 과소제어되는 경향을 보이는 사실로부터, 이를 고려하는 추후의 연구가 필요하다. 또한, 다자유도 건물에 적용을 위한 연구가 수행되어야 한다.

표 2 감쇠기 설계 및 해석결과

T_n	α	F_d	D_t	β_d	D_d
0.5	0.05	0.754	1.52	20	0.80
	0.1	0.679		18	0.83
	0.2	0.569		15.1	1.16
	0.3	0.452		12	1.55
	0.4	0.362		9.6	1.84
	0.5	0.275		7.3	2.25
1.0	0.05	0.280	5.32	8.5	3.94
	0.1	0.264		8	4.08
	0.2	0.241		7.3	4.26
	0.3	0.211		6.4	4.58
	0.4	0.178		5.4	4.99
	0.5	0.153		4.7	5.33
1.5	0.05	0.160	8.55	6.8	7.26
	0.1	0.153		6.5	7.32
	0.2	0.139		5.9	7.52
	0.3	0.126		5.3	7.75
	0.4	0.111		4.7	8.03
	0.5	0.094		4	8.33
3	0.05	0.067	18.25	5.3	19.41
	0.1	0.064		5.1	19.67
	0.2	0.059		4.7	20.11
	0.3	0.054		4.3	20.56
	0.4	0.047		3.75	21.21
	0.5	0.040		3.2	21.84

F_d : 마찰감쇠기의 제어력(kN)
 D_t : 목표변위(cm)
 β_d : 요구 감쇠비(%)
 D_d : 감쇠기 설치후 변위(cm)

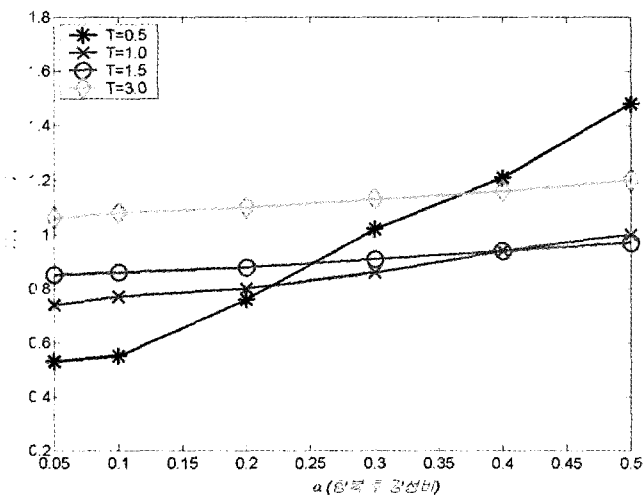


그림 18 주기에 따른 오차율

감사의 글

이 연구는 2002학년도 단국대학교 대학연구비 지원으로 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- Lin, Y. Y., Tsai, M. H., Hwang, J. S., and Chang, K. C., "Direct Displacement-Based Design for Building with Passive Energy Dissipation Systems," *Engineering Structures*, Vol. 25, 2003, pp. 25-37.
- Applied Technology Council, "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings," *Report ATC-40*, 1996. 11.
- FEMA-273, "NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings," Report No. FEMA-273, *Federal Emergency Management Agency*, Washing D.C, 1997. 5.
- 최현훈, "비선형 정적해석법을 이용한 점성 유체 감쇠기의 설계에 관한 연구", 성균관 대학교 대학원, 석사학위논문, 2000, 10.
- Li, C. and Reinhorn, A. M., "Experimental and Analytical Investigation of Seismic Retrofit of Structures with Supplemental Damping: Part II-Friction Devices," State University of New York at Buffalo, *Technical Report NCEER-95-0009*, 1995. 7.
- 김진구, 방성혁, "직접 변위설계법을 이용한 구조물의 내진성능평가", 한국지진공학회 논문집, Vol. 6, No. 2, 2002.
- Chopra, A. K. and Goel, R. K., "A modal push over analysis procedure for estimating seismic demands for buildings," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 31, 2001, pp. 561-582.
- 안지희, 최원호, 이동근, "유사동적해석법을 이용한 건축 구조물의 비선형 지진응답평가", 대한건축학회 학술발표논문집, Vol. 20, No. 2, 2000.
- Pall, A. S., Marsh, C., and Fazio, P., "Friction Joints for Seismic Control of Large Panel Structures," *Journal of Prestressed Concrete Institution*, Vol. 25, 1980, pp. 38-61.
- Roik, K., Dorka, U., and Dechent, P., "Vibration Control of Structures Under Earthquake Loading by Three-Stage Friction-Grip Elements," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 16, 1988, pp. 501-521.
- Mualla, I. H. and Belev, B., "Performance of Steel Frames with a new Friction Damper Device Under Earthquake Excitation," *Engineering Structures*, Vol. 24, 2002, pp. 365-371.
- UBC-97, *Uniform Building Code*, 1997, Structural Engineering Design Provisions.
- 홍두표, 한상환, 이리형, "수정된 CSM을 이용한 보통모멘트골조의 내진성능평가 비교", 대한건축학회 학술발표대회논문집, Vol. 20, No. 2, 2000.
- 안지희, 최원호, 이동근, "고차모드효과를 고려한 비정형 구조물의 능력스펙트럼 평가", 대한건축학회 학술발표대회 논문집, Vol. 20, No. 1, 2000.
- SIMQKE, Simulation of Earthquake ground Motion, E.

H. Vanmarcke, C. A. Cornell, D. A. Gasparini, and S.
N. Hou, Department of Civil Engineering, Massa

chusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts
1976.