

# 건축구조물의 층전단력 분포에 기초한 마찰감쇠기의 최적설계

## Optimal Design of Friction Dampers based on the Story Shear Force Distribution of a Building Structure

이 상 현\*      민 경 원\*\*      박 지 훈\*\*\*      이 루 지\*\*\*\*  
Lee, Sang-Hyun      Min, Kyung-Won      Park, Ji-Hun      Lee, Roo-Jee

### 국문요약

본 연구에서는 지진하중을 받는 탄성구조물을 대상으로 층전단력 분포에 기초한 마찰감쇠기의 설계방법을 제시하였다. 먼저 마찰감쇠기의 슬립하중(slip-load)을 정규화하는 방법 별로 단자유도 시스템의 수치해석을 수행하고 비교하였다. 이를 통해 슬립하중과 가새 강성의 영향을 파악하였으며, 설치용 가새와 원구조물의 최적강성비를 찾았다. 다음으로는 다양한 고유주기와 층수를 갖는 구조물을 대상으로 수치해석을 통해 마찰감쇠기의 설치 층수와 위치의 결정방법 및 슬립하중의 분배 방법을 도출하였다. 이 과정에서 설치 층수가 포함된 성능지수를 사용하여 슬립하중의 총합으로부터 최적의 설치 층수를 도출하는 경험식을 제시하였다. 마지막으로 실제 지진하중을 사용한 수치해석을 통해 기존의 최적설계 방법과 비교하여 제안된 방법의 우수성을 입증하였다.

**주요어** : 마찰감쇠기, 층전단력 분포, 가새강성, 최적설계, 경험식

### ABSTRACT

In this study, a seismic design methodology for friction dampers based on the story shear force distribution of an elastic building structure is proposed. First, using two normalization methods for the slip-load of a friction damper, numerical analyses of various single-degree-of-freedom systems are performed. From those analyses, the effect of the slip-load and the brace stiffness was investigated and the optimal stiffness ratio of the brace versus original structure was found. Second, from the numerical analysis for five multi-story building structures with different natural frequency and the number of story, reasonable decision method for the total number of installation floor, location of installation and distribution of the slip-loads are drawn. In addition, an empirical equation on the optimal number of installation floor is proposed. Finally, the superiority of the proposed method compared to the existing design method is verified from the numerical analysis using real earthquake data.

**Key words** : friction dampers, story shear force distribution, slip load, brace stiffness, optimal design, empirical equation

## 1. 서 론

마찰현상은 많은 양의 에너지 소산을 유발시키기 때문에 이를 구현할 수 있는 장치를 사용하여 대형 토목 및 건축 구조물의 지진응답을 줄이기 위한 많은 연구가 수행되어 왔다. Pall은 X형 가새의 교차부에 마찰감쇠기가 설치된 시스템을 제안하였으며<sup>(1)</sup>, Teckton社, Constantinou와 Reinhorn 등은 볼트의 토크를 조절함으로써 슬립하중을 조절할 수 있는 마찰패드에 움직일 수 있는 강봉(steel rod)을 끼운 형태의 마찰감쇠기를 개발하였다.<sup>(2)</sup> Li 와 Reinhorn은 마찰감쇠기가 설치된 구조물의 내진성능을 해석적, 실험적 연구를 통해 검증하였다.<sup>(3)</sup> Grigorian와 Popov는 slotted 볼트 접합부의 에너지 소산효과를 검증하였으며<sup>(4)</sup>, Mualla 등과 Damptech 회사는 최대 회전 모멘트의 크기를 조절할 수 있는 회전형 마찰감쇠기를 제안하였다.<sup>(5)</sup> Cho와 Kwon은 철근 콘크리트 구조물의 내진성능을 향상시키기 위해 벽식 마찰감쇠기에 대한 모델링과 수치해석

을 수행하였다.<sup>(6)</sup> 그리고, 최근 들어 대용량의 감쇠력을 구현할 수 있고 그 크기를 전기신호에 의해 제어할 수 있기 때문에 대형 구조물의 준능동 제어장치로 많이 사용되고 있는 자기유변유체감쇠기(magnetorheological damper) 또한 마찰감쇠의 특성을 가지고 있다.<sup>(7)</sup>

건축구조물의 지진응답제어를 위해 마찰감쇠기를 설계하는 경우에 가장 중요한 것은 감쇠기의 개수와 개별 감쇠기의 슬립하중 및 설치용 가새의 강성을 체계적으로 결정하는 것이다. Filatrault와 Cherry는 구조물의 고유주기, 지진의 진동수 성분 및 마찰감쇠기의 슬립하중에 대한 변수연구를 수행하여 변위와 소산에너지의 합을 최소화하는 등분포된 마찰감쇠기의 설계절차를 제시하였다.<sup>(8)</sup> Fu와 Cherry는 횡력수정계수(force normalization coefficient)를 이용하여 마찰감쇠기를 설계하는 절차를 제안하였다.<sup>(9)</sup> 최현훈과 김진구는 이력에너지 스펙트럼을 이용하여 비좌굴 가새골조의 항복하중을 산정하였다.<sup>(10)</sup> 이들 연구는 건물의 모든 층에 동일한 감쇠기를 설치하는 것으로 가정하고 있으나 보다 효과적인 제진을 위해서는 층 별로 적절한 크기의 슬립하중을 갖는 감쇠기를 설치하는 것이 효과적일 수 있다. Moreshchi와 Singh은 변화율(gradient)에 기초한 최적화는 마찰감쇠기와 같은 비선형 감쇠기에 적용하기 어려움을 밝히고, 이러한 문제점들을 해결

\* 정회원·단국대학교 건축대학 건축공학과 전임강사  
(대표전자: lshyun00@dankook.ac.kr)

\*\* 정회원·단국대학교 건축대학 건축공학과 부교수

\*\*\* 단국대학교 건축대학 건축공학과 연구전임강사

\*\*\*\* 단국대학교 건축대학 건축공학과 석사과정

본 논문에 대한 토의를 2006년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.  
(논문접수일 : 2005. 7. 15 / 심사종료일 : 2005. 11. 9)

할 수 있는 대안으로 유전자 알고리즘을 이용하여 마찰감쇠기의 슬립하중과 설치용 가새 강성을 결정하였다.<sup>(11)</sup> Garcia와 Soong은 층간변위 혹은 층간속도를 가제어지수로 정의하고 이 가제어지수가 제일 큰 위치에 단위크기의 점성감쇠기를 설치하는 과정을 반복적으로 수행함으로써 점성의 층별 최적분포를 구하는 방법(simplified sequential search algorithm, SSSA)을 제안하였다.<sup>(12)</sup> 또한 Shulka와 Data는 동 설계방법을 점탄성감쇠기의 설계에 적용하였다.<sup>(13)</sup> 그러나 유전자알고리즘과 SSSA는 반복적으로 비선형 시간이력해석을 수행해야 하는 단점이 있으며 감쇠기의 최적 파라미터와 위치를 찾는 데 있어서 설치층의 감소에 의한 경제적 이익을 고려하지 않고 있다.

본 연구의 목적은 탄성 건축구조물의 층전단력에 기초하여 마찰감쇠기의 개수, 슬립하중의 층별 분포 및 설치용 가새의 강성을 체계적으로 결정하는 방법을 제안하는 것이다. 우선, 감쇠기의 슬립하중을 정규화하는 방법 별로 단자유도 시스템에 대한 수치해석을 수행하여 가새 강성과 슬립하중에 따른 변위, 층전단력, 및 소산에너지의 변화를 조사하고 이를 통해 구조물의 주기별로 최적의 가새강성을 제시한다. 또한, 고유주기와 층수가 다른 단자유도 구조물에 대한 수치해석을 통해 마찰감쇠기의 개수, 슬립하중의 총합 및 층별 분포에 따른 성능의 변화를 조사하였으며, 이를 바탕으로 슬립하중의 총합에 따라 최적의 감쇠기 개수를 결정하는 설계식을 제시한다. 최종적으로 제안된 설계방법을 기존의 설계방법인 SSSA와 비교한다.

## 2. 구조물-가새-마찰감쇠기 시스템

일반적으로 감쇠기를 건축구조물의 층간에 설치하기 위해서는 부가적인 설치 시스템을 요한다. 이 중 많이 이용되고 있는 가새를 이용한 시스템의 경우에 그림 1과 같이 가새와 감쇠기가 직렬 연결된 가새-마찰감쇠기 시스템과 구조물 강성의 병렬연결 시스템으로 표현할 수 있다. 그림 1에서  $k_f$ ,  $k_b$ ,  $f_s$ ,  $x$  및  $f$ 는 각각 구조물 강성, 가새 강성, 마찰감쇠기의 슬립하중, 구조물의 변위 및 외부하중을 나타낸다. 본 연구에서는 구조물과 가새가 탄성인 것으로 가정한다. 따라서, 구조물-가새-마찰감쇠기 시스템의 힘-변위 관계는 그림 2와 같은 이선형 시스템으로 모델링할 수 있고, 이 시스템의 등가 항복강도  $f_y$ 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_y = f_s \left( 1 + \frac{1}{SR} \right) \quad (1)$$

여기서,

$$SR = \frac{k_b}{k_f}$$

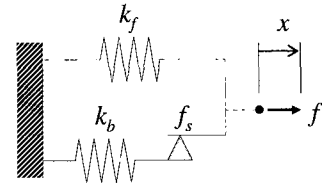


그림 1 구조물-가새-마찰감쇠기 시스템

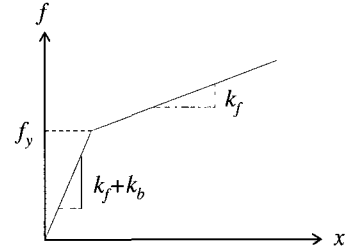


그림 2 구조물-가새-마찰감쇠기 시스템의 힘-변위 관계

## 3. 단자유도 시스템의 마찰감쇠기 설계

마찰감쇠기는 강한 비선형성으로 인해 그 성능이 하중의 크기 및 주파수 특성에 따라 크게 달라진다. 특히 마찰감쇠기를 설치하기 위해 구조물에 가새가 부가되면 전체 구조물의 고유주기가 바뀌기 때문에 구조물의 고유주기에 따라 큰 차이를 보이는 지진응답을 제어하기 위해서는 가새의 영향도 설계에 고려해야 한다. 따라서 본 절에서는 마찰감쇠기의 슬립하중과 가새 강성에 따른 제진 성능의 변화를 살펴본다.

대상 구조물은 질량 정규화되고 5%의 감쇠비를 가지는 단자유도 시스템으로서 수치해석을 통해 가새 강성과 미끄러짐 하중의 영향을 분석하였다. 지반가속도는 인공지진 생성 소프트웨어인 EQmaker를 이용하여 생성하였으며, UBC 97에 따른 지진응답 스펙트럼을 사용하였다.<sup>(14)</sup> 설계지진계수는  $C_a=0.09$ ,  $C_v=0.09$ 이며, 그림 3은 그에 따른 스펙트럼 형상을 보여준다. 그림 3에서 스펙트럼을 구획하는 주기는  $T_s=C_v/(2.5C_a)$ ,  $T_0=0.2T_s$ 이다. 강성비 SR은 1, 2, 5, 10 및 50을 적용하여 해석을 수행하였다. 평가를 위한 성능지수는 다음과 같다.

$$R_d = \frac{|x(t)|_{\max}}{|x_o(t)|_{\max}}, \quad R_f = \frac{|F(t)_s|_{\max}}{|F_{so}(t)|_{\max}}, \quad R_c = 1 - \frac{E_h}{E_I} \quad (2)$$

여기서,  $x$ ,  $x_o$ ,  $F_s$ ,  $F_{so}$ ,  $E_h$ ,  $E_I$ 는 각각 제진 변위, 비제진 변위, 제진 층전단력, 비제진 층전단력, 마찰감쇠기에 의한 소산에너지 및 지진입력에너지 나타낸다.  $R_d$ 와  $R_f$ 는 비제진 응답에 대한 제진 응답의 비를 나타내고,  $R_c$ 는 입력지진에너지 대 구조물이 분담하는 에너지의 비를 나타낸다. 감쇠가 작은 단자유도 시스템의 경우에는 가속도와 층전단력의 경향이 거의 동일하기 때문에 후자에 대해서만 성능지수를 산출하였다.<sup>(15)</sup>

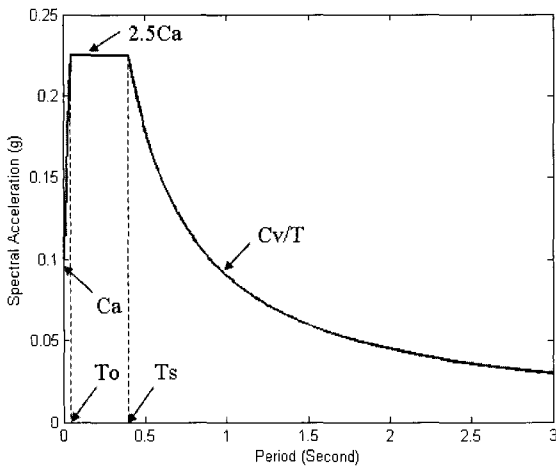


그림 3 인공지진의 의사가속도 스펙트럼

### 3.1 슬립하중의 정규화 방법

마찰감쇠기의 슬립하중을 결정함에 있어서 중요한 것은 슬립하중의 절대적인 크기가 아니라 하중에 대한 상대적 크기이다. 따라서 지진하중을 대상으로 마찰감쇠기의 설계 방법을 개발함에 있어서 하중의 크기를 기준으로 감쇠기의 슬립하중을 정규화할 필요가 있다. 대상 구조물을 단자유도 시스템으로 가정하면, 마찰감쇠기에 슬립이 발생하지 않는 경우에 설치용 가새가 분담하는 총전단력을 기준으로 정규화하는 방법과 가새-마찰감쇠기 시스템이 설치되기 전의 원 구조물의 총전단력을 기준으로 정규화하는 두 가지 방법을 생각할 수 있다. 본 연구에서는 이들 두 가지 정규화 방법을 사용해서 마찰감쇠기를 설계하고 각각의 장단점을 비교한다.

#### 방법 A

마찰감쇠기의 슬립하중이 매우 커서 슬립이 발생하지 않는 것으로 가정하면 구조물-가새-마찰감쇠기 시스템은 감쇠기 없이 가새만 설치된 구조물과 같아지고 운동방정식은 다음과 같다.

$$m\ddot{x} + cx + (k_f + k_b)x = -m\ddot{x}_g \quad (3)$$

여기서,  $m$ 은 구조물의 질량,  $c$ 는 점성,  $x$ 는 변위,  $\ddot{x}_g$ 는 지반가속도를 나타낸다. 위 운동방정식의 수치해석을 통해 얻어진 가새가 분담하는 최대 총전단력을 기준으로 슬립하중을 정규화 하면 다음과 같다.

$$\eta = \frac{f_s}{f_b} \quad (4)$$

$$f_b = k_b |x|_{\max}$$

여기서  $\eta$ 는 정규화된 슬립하중이며,  $|x|_{\max}$ 는 운동방정식 (3)의 수치해석을 통해 얻어진 최대 변위이다.  $\eta$ 가 1.0이

면 가새-마찰감쇠기 시스템은 대상 하중에 대하여 마찰감쇠기에 슬립이 발생하지 않고, 단순히 가새만 설치된 시스템과 같음을 의미한다. 따라서 실질적으로  $\eta$ 는 항상 1.0 이하가 되도록 설계된다.

#### 방법 B

가새가 설치되기 전의 단자유도 시스템은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m\ddot{x} + cx + k_f x = -m\ddot{x}_g \quad (5)$$

위 운동방정식의 수치해석을 통해 얻어진 최대 총전단력을 기준으로 슬립하중을 정규화하면 다음과 같다.

$$\rho = \frac{f_s}{f_f} \quad (6)$$

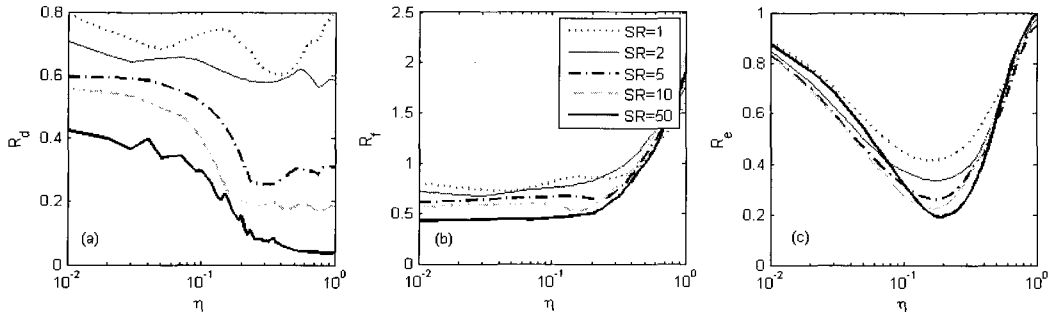
$$f_f = k_f \max(|x|)$$

여기서,  $\rho$ 는 정규화된 슬립하중이며,  $|x|_{\max}$ 는 운동방정식 (5)의 해석을 통해 얻어진 최대 변위이다. 정규화된 슬립하중으로  $\eta$ 를 사용하면 가새강성이 변경되는 경우에 슬립하중의 크기도 변경되나,  $\rho$ 를 사용하면 하나의 대상 구조물에 대해서 가새강성의 크기에 관계없이 동일한 슬립하중이 결정된다는 장점이 있다.

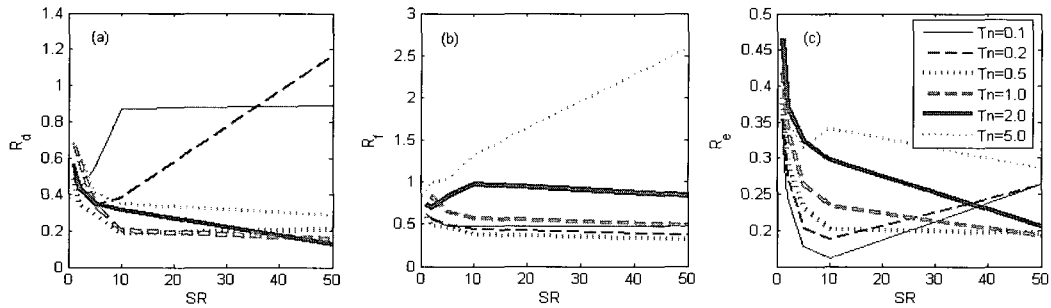
### 3.2 방법 A에 기초한 설계

방법 A를 사용하여 마찰감쇠기의 슬립하중을 산정하고 해석한 결과는 그림 4-6과 같다. 먼저 그림 4는 고유주기가 1.0초인 구조물의  $\eta$ 에 따른 성능지수의 변화를 보여준다. 그림 4(a)에서  $\eta$ 가 0.3보다 작은 구간에서는  $\eta$ 가 증가함에 따라 전체적으로  $R_d$ 의 크기가 감소하는 경향을 가지나  $\eta$ 가 0.3보다 증가하는 경우에는 감소폭이 작거나 오히려  $R_d$ 가 증가한다. SR의 크기가 증가할수록 모든  $\eta$ 에 대해서  $R_d$ 의 값은 감소하며, 이로부터 고유주기가 1.0초인 구조물은 가새 강성이 증가할수록 변위 성능제어효과가 우수해 짐을 알 수 있다. 그림 4(b)에서  $R_f$ 는  $\eta$ 가 0.3보다 작은 구간에서는  $\eta$ 에 따른 변화는 거의 없고 SR이 증가할수록 감소한다. 그러나  $\eta$ 가 0.3보다 큰 구간에서는  $\eta$ 가 증가함에 따라  $R_f$ 가 급격히 증가하는 경향을 보인다. 이는 마찰감쇠기의 슬립 현상 감소가 구조물의 고유주기 감소와 그에 따른 총전단력의 증가를 유발하기 때문이다. 그림 4(c)는  $0.1 \leq \eta \leq 0.3$  구간에서  $R_e$ 가 최소값을 가짐을 보여준다. 여기서  $\eta=1$ 인 경우에  $R_e$ 가 1.0으로 수렴하는 것은 가새-마찰감쇠기가 단순히 가새로서 작용하여 감쇠기에 의한 지진에너지의 소산이 전혀 없었음을 의미한다.

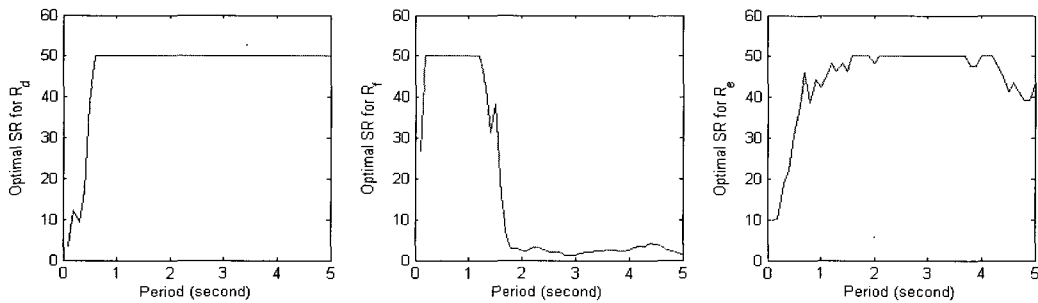
그림 5는  $\eta=0.2$ 인 경우에 SR에 따른 성능지수의 변화



(a) 변위 성능지수  $R_d$  (b) 충전단력 성능지수  $R_f$  (c) 에너지 성능지수  $R_e$   
 그림 4  $\eta$ 에 따른 성능지수의 변화 (고유주기=1.0초)



(a) 변위 성능지수  $R_d$  (b) 충전단력 성능지수  $R_f$  (c) 에너지 성능지수  $R_e$   
 그림 5 SR에 따른 성능지수의 변화 ( $\eta=0.2$ )



(a) 변위 성능지수  $R_d$  (b) 충전단력 성능지수  $R_f$  (c) 에너지 성능지수  $R_e$   
 그림 6 성능지수 별 최적 SR

를 고유주기  $T_n$  별로 보여주며, 그림 6은  $0.1 < \eta < 0.3$ 에 대해 각 성능지수를 최소화 하는 최적 SR값의 평균치를 나타낸다. 선정된  $\eta$ 의 범위는  $\eta$ 가 이 범위를 벗어나면 세 가지 성능지수가 악화되거나 큰 개선이 없음을 고려하여 결정하였다. 그림 5(a)는 고유주기가 0.1초, 0.2초인 단주기 구조물의 경우에는 SR이 10보다 작을 때  $R_d$ 가 최소값을 가지나 고유주기가 0.5초 이상인 구조물은 SR이 증가할수록  $R_d$ 가 감소하는 경향을 가진다.  $R_d$ 를 최소화하는 최적 SR을 보여주는 그림 6(a)에서 고유주기가 0.5초 이하인 구간에서는 고유주기에 따라 최적의 SR이 1에서 50까지 거의 선형으로 증가하며, 고유주기가 0.5초 이상인 구간에서는 모두 SR=50으로 가새 강성이 클수록 작은  $R_d$ 값을 보임을 확인할 수 있다. 그림 5(b)에서 고유주기가 1초 이하인 구조물은 비록 SR이 10이상인 구간에서는 감소폭이 크지는 않으나 대체적으로 SR이 클수록  $R_f$ 가 작아지는 경향을 나타내고, 고유주기가 2.0초 5.0초인 장

주기 구조물의 경우에는 SR $\approx$ 1일 때 최소값을 가지며, 이는 그림 6(b)로부터 확인할 수 있다. 그림 5(c)에서 고유주기가 0.1, 0.2초인 단주기 구조물은 SR=10일 때  $R_e$ 가 최소가 되고, 고유주기가 0.5, 1.0, 2.0초인 구조물의 경우에는 SR이 증가할수록  $R_e$ 를 줄일 수 있으며, 이 경향은 고유주기가 증가할수록 뚜렷해진다. 그림 6(c)는 고유주기가 약 1초 이하인 구조물의 경우  $R_e$ 를 최소화 하는 SR이 10에서 40까지 선형으로 변화하고, 고유주기가 1초 이상인 구조물의 경우에는 최적의 SR이 40이상임을 보여준다.

방법 A에 의한 결과를 정리하면 다음과 같다. 그림 4로부터 마찰감쇠기는 정규화된 슬립하중이  $0.1 \leq \eta \leq 0.3$ 일 때 변위, 충전단력 및 비소산에너지의 저감에 효율적임을 알 수 있다. 그림 5와 6으로부터, 각 성능지수를 최소화 하는 최적의 SR값은 성능지수와 구조물의 고유주기에 따라 다를 수 있다. 이것은 방법 A에 의해 마찰감쇠

기를 설계하는 경우 목표로 하는 성능지수의 종류와 구조물의 고유주기에 따라 가새의 강성을 적절히 선정해야 함을 의미한다. 특히 방법 A는 동일한 구조물과  $\eta$ 에 대해서도 SR에 따라 다른 슬립하중을 산정하기 때문에, 구조물의 고유주기, 가새 강성 및  $\eta$ 가 동시에 고려되어야 하는 문제점을 가지고 있다.

### 3.3 방법 B에 기초한 설계

방법 B를 사용하여 마찰감쇠기의 슬립하중을 산정하고 해석한 결과는 그림 7-10과 같다. 먼저 그림 7은 고유주기 1초인 구조물의  $\rho$ 에 따른 성능지수의 변화를 보여주며 그림 4에 나타난  $\eta$ 에 따른 성능지수의 변화와 유사한 경향을 가짐을 알 수 있다. 즉 고유주기가 1초인 구조물의 경우에는 두 가지 정규화 방법에 의한 설계결과가 유사한 경향을 가진다.  $\rho$ 의 값을 0.3이상으로 증가 시킴에 따라

$R_f$ 과  $R_e$ 가 크게 증가하며,  $R_d$ 도 SR=50인 경우를 제외하면 변화가 거의 없거나 증가하는 경향을 보이기 때문에  $\rho$ 는 0.3이하로 설계하는 것이 합리적이다. 이것은 마찰감쇠기의 슬립하중이 가새-마찰감쇠기가 설치되기 전의 원 구조물의 층전단력의 30% 이하로 설계되어야 함을 의미한다.

그림 8은  $\rho=0.2$ 인 경우에 SR에 따른 성능지수의 변화를 고유주기  $T_n$  별로 보여주며, 변위와 층전단력은 단주기 구조물을 제외하면 대체로 SR이 증가할수록 감소하는 경향이 있다. 그림 9는  $\rho < 0.3$ 에 대해 각 성능지수를 최소화 하는 최적 SR값의 평균치를 나타내며, 이 가운데  $R_e$ 에 대해서는 범례에 나타난 대로  $\rho$ 의 범위를 세분하여 평균치를 구하였다. 그림 9에서 선정된  $\rho$ 의 범위는 그림 7에서  $\rho$ 가 0.3 이상으로 증가하면 세 가지 성능지수가 더 이상 개선되지 않고, 특히  $R_e$ 는  $\rho$ 의 세분화된 구간 별로 SR에 대한 변화양상이 달라짐을 고려하여 결정하였다. 그

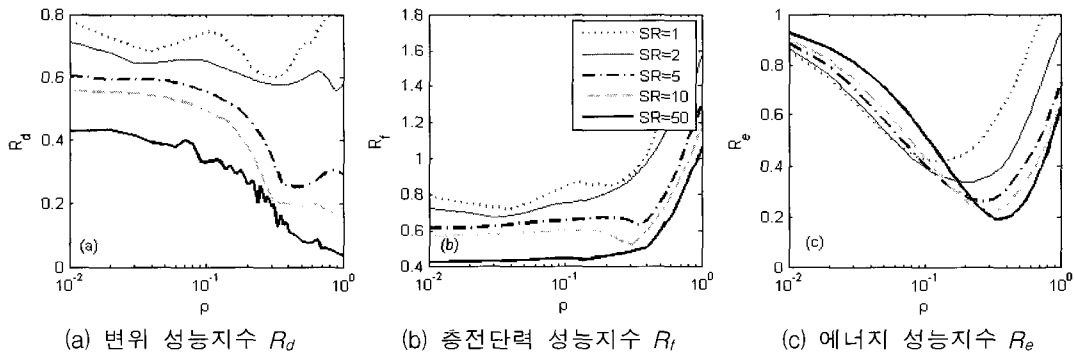


그림 7  $\rho$ 에 따른 성능지수의 변화 (고유주기=1.0초)

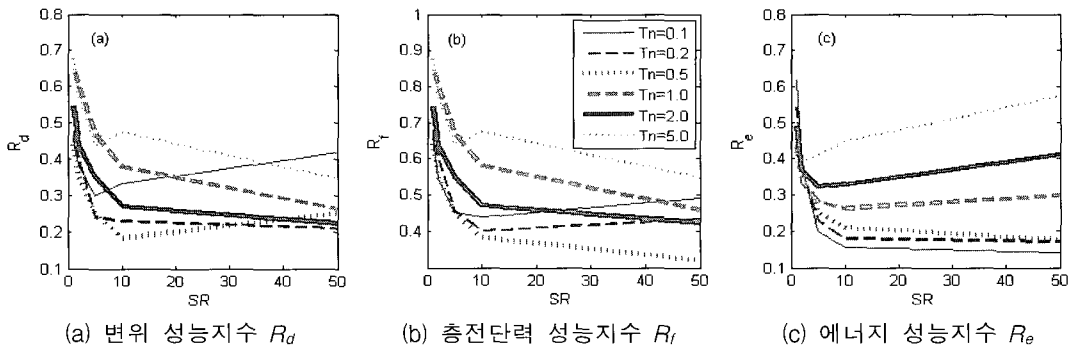


그림 8 SR에 따른 성능지수의 변화 ( $\rho=0.2$ )

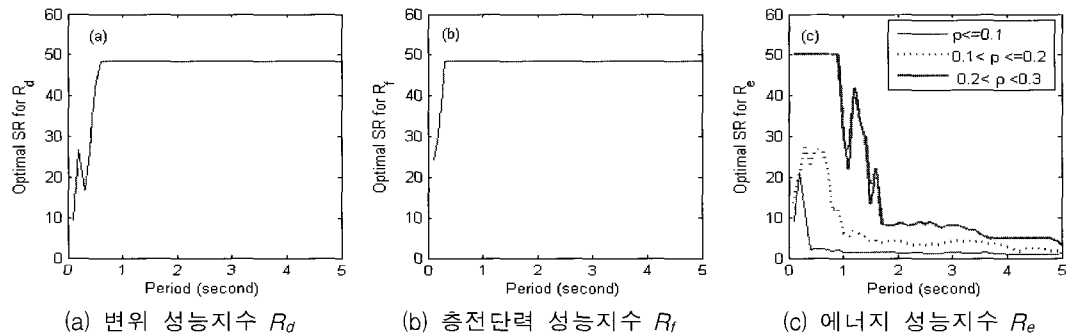


그림 9 성능지수 별 최적 SR

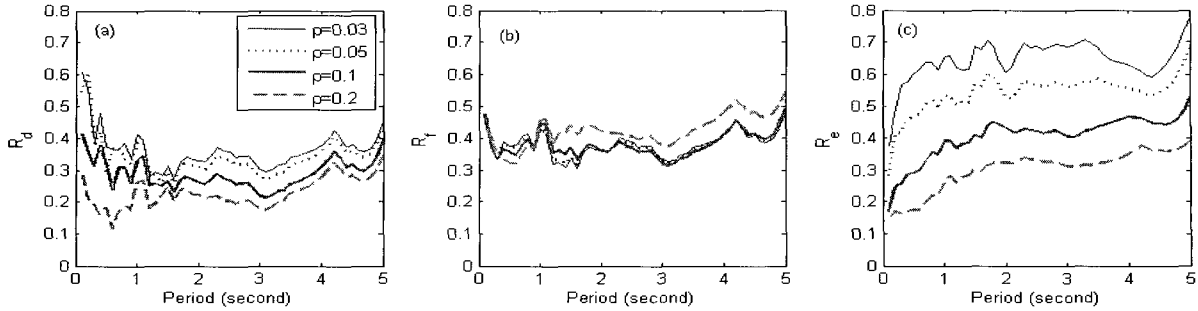


그림 10 고유주기와  $\rho$ 에 따른 성능지수의 변화

림 9(a), (b)로부터  $R_d$ 와  $R_f$ 를 최소화 하는 SR값의 고유주기에 따른 경향이 매우 유사함을 알 수 있다. 즉 고유주기가 0.5초 이상인 구조물에 대해서는 해석에 사용한 SR값 중 가장 큰 50이 성능지수를 최소화하고 0.5초 이하인 구조물은 약 10에서 50까지의 값을 가진다. 이는 그림 6에서 방법 A가  $R_d$ 와  $R_f$ 를 최소화하는 SR값을 단주기 구조물과 장주기 구조물에 대하여 각기 다르게 산정하는 것과 달리 동일한 SR을 사용하더라도  $R_d$ 와  $R_f$ 를 동시에 최소화 할 수 있음을 의미한다. 그림 9(c)의  $R_o$ 를 최소화 하는 SR값은 비록  $R_d$ 와  $R_f$ 의 경우와 다른 경향을 보이지만 비소산에너지 자체는 제진설계의 목적이 되는 물리량은 아니므로 가새 강성 결정의 주요 인자에서 제외할 수 있다. 따라서 방법 B는 동일한 SR을 사용하여 주요 성능지수를 최소화하는 것이 가능하다. 특히 방법 B는 가새의 강성과 관계없이 하나의  $\rho$  값에 대해서 하나의 슬립하중만을 산정하기 때문에 가새 강성을 고려하지 않고  $\rho$ 를 독립된 설계변수로 생각하여 설계절차를 진행할 수 있는 장점을 가지고 있다. 따라서 이후로 논의될 다자유도 구조물의 제진설계에서는 방법 B를 채택한다.

그림 10은 각각의 성능지수를 최소화하는 최적의 SR로 가새 강성이 주어지는 경우에  $\rho$ 와 고유주기에 따른 성능지수의 변화를 보여준다. 특정한  $\rho$ 값은 모든 고유주기구간에 걸쳐 일정한 범위의 성능수준을 확보할 수 있음을 알 수 있다. 예를 들어  $\rho=0.1$ 은  $0.2 < R_d < 0.4$ ,  $0.3 < R_f < 0.5$ , 그리고  $0.2 < R_o < 0.5$ 의 분포를 가진다. 이 그림을 이용하여 목표성능이 주어지는 경우  $\rho$ 값을 결정할 수 있고 그에 상응하는 마찰감쇠기의 슬립하중을 산정할 수 있다.

#### 4. 다자유도 구조물의 마찰감쇠기 설계

본 절에서는 다층 건축구조물의 지진응답 저감을 위해 마찰감쇠기의 설치위치 및 슬립하중의 분배를 결정하는 방법을 제안하고 슬립하중의 총합과 설치 층수와 상관관계를 알아본다. 먼저 지진하중은 앞서 단자유도 시스템에 적용했던 인공지진과 동일하다. 대상 구조물은 Garcia와 Soong이 SSSA를 적용한 25개 구조물 가운데 선택하였다<sup>(12)</sup>. 이들 25개의 구조물은 층수가 4, 8, 12, 16 및 20인 5개의 그룹으로 나뉘며, 개개의 그룹은 0.4, 0.8, 1.2,

1.6, 및 2.0 초의 고유주기를 갖는 5개의 구조물로 구성된다. 이들 구조물에 대해 앞서 언급한 지진하중을 대상으로 시간이력해석을 수행한 결과 층수가 같은 그룹 내에서는 최대층간변위와 최대층전단력의 상대적분포가 거의 차이가 없음을 확인할 수 있었다. 따라서 각 그룹별로 대표적인 고유주기를 갖는 구조물을 하나씩 선정하였으며 4, 8, 12, 16 및 20층 구조물에 대해 선택된 주기는 각각 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 및 2.0초이다. 구조물들의 모드 감쇠비는 5%로 동일하다.

마찰감쇠기는 변위의존적인 감쇠기로 변위의 크기가 클수록 효과적이다. 따라서 설치위치는 RMS 층간변위가 큰 순으로 설치개수만큼의 층을 선택한다. 가새의 강성의 증가는 그림 8에서와 같이 고유주기가 아주 짧은 구조물을 제외하면 변위와 층전단력을 감소시키는데 효과적이기 때문에 본 절에서 가새는 강체인 것으로 가정한다. 제진성능을 평가하기 위한 성능지수는 다음과 같으며, 단자유도 시스템과는 달리 절대가속도와 층전단력이 유사한 경향을 갖지 않을 수 있으므로 양자의 변화경향을 모두 조사하였다.

$$R_d = \frac{\max_{i=1, \dots, N} \{ |x_i(t)|_{\max} \}}{\max_{i=1, \dots, N} \{ |x_{o,i}(t)|_{\max} \}}, \quad R_a = \frac{\max_{i=1, \dots, N} \{ |\ddot{x}_{a,i}(t)|_{\max} \}}{\max_{i=1, \dots, N} \{ |\ddot{x}_{oa,i}(t)|_{\max} \}},$$

$$R_f = \frac{\max_{i=1, \dots, N} \{ |F_{s,i}(t)|_{\max} \}}{\max_{i=1, \dots, N} \{ |F_{os,i}(t)|_{\max} \}} \quad (7)$$

여기서  $x_i$ ,  $x_{o,i}$ ,  $\ddot{x}_{a,i}$ ,  $\ddot{x}_{oa,i}$ ,  $F_{s,i}$  및  $F_{os,i}$ 는 각각  $i$ 번째 층의 제진층간변위, 비제진층간변위, 제진절대가속도, 비제진절대가속도, 제진층전단력 및 비제진층전단력이고,  $N$ 은 구조물의 층수이다.

##### 4.1 슬립하중의 분배방식

마찰감쇠기의 슬립하중의 총합은 방법 B에 기초하여 모든 층의 최대 층전단력의 합을 기준으로 정규화한다. 따라서 슬립하중의 총합은 다음 식에 의해 계산된다.

$$F_{total} = \sum_j f_{sj} = \rho \sum_i k_f S_{di} \quad (8)$$

여기서,  $f_{sj}$ 는  $j$ 번째 마찰감쇠기의 슬립하중을,  $k_{fi}$ 와  $S_{di}$ 는 각각  $i$ 번째 층의 층강성과 최대층간변위를 나타낸다. 또한  $N$ 와  $N_f$ 는 각각 건물의 전체 층수와 감쇠기가 설치된 층수를 나타낸다. 식 (8)으로 주어지는  $F_{total}$ 을 각 감쇠기에 분배할 때,  $f_{sj}$ 는 등분포 또는 설치되는 층의 층전단력에 비례하도록 산정할 수 있다.

$$f_{sj} = F_{total} / N_f \tag{9}$$

$$f_{sj} = F_{total} \frac{k_{fj} S_{dj}}{\sum_j k_{fj} S_{dj}} \tag{10}$$

슬립하중의 층별분배 방법의 유효성을 검토하기 위하여, (10)식에 의해 분배한 경우의 층간변위 성능지수  $R_{d1}$ 과 (9)에 의해 분배한 경우의 층간변위 성능지수  $R_{d2}$ 를 비교하였으며, 그림 11에 나타내었다.  $R_{d1}/R_{d2}$ 가 대부분의 경우 1보다 작다는 사실로부터 층전단력에 비례하여 슬립하중을 분배하는 것이 층간변위 저감에 효율적임을 알 수 있다.

#### 4.2 설치 층수 별 성능변화

그림 12-14는 각각 4층( $T_n=0.4$ 초), 12층( $T_n=1.2$ 초), 20층( $T_n=2.0$ 초) 건물을 대상으로 마찰 감쇠기 설치 개수  $N_f$

에 따른  $R_{d1}$ ,  $R_{d2}$ , 그리고  $R_f$ 의 변화를 보여준다. 특정한  $\rho$ 에 대해서 슬립하중의 총합은 일정하고 층별분포는 식 (10)을 이용하여 산정하였다. 그림 12(a)로부터  $\rho$ 가 일정할 때,  $N_f$ 를 특정 값 이상으로 증가시키는 것은 더 이상의 성능지수를 감소시키지 않으며 오히려 증가시키는 현상도 발생함을 알 수 있다.  $\rho=0.01$ 이면  $N_f=1$ 일 때 가장 작은  $R_{d1}$ 를 제공하며, 이것은  $\rho=0.01$ 인 경우에는 하나의 층에 집중되는 것이 여러 층에 분포시키는 것보다 효율적임을 의미한다. 같은 방식으로  $\rho=0.1$ 인 경우에는  $N_f=2$ 일 때  $R_{d1}$ 값이 가장 작다.  $\rho$ 가 증가함에 따라  $R_{d1}$ 를 최소화하는  $N_f$ 값이 증가한다는 사실은 슬립하중의 총합이 작다면 특정 층에 집중시키는 것이 효율적이고, 크다면 여러 층에 분포시키는 것이 효율적임을 의미한다. 그리고  $N_f=1$ 일 때  $\rho$ 를 0.05이상으로 증가시키는 것은 더 이상의  $R_{d1}$ 의 감소를 가져오지 못하는 사실로부터, 특정 층에 설치되는 마찰 감쇠기가 효율성을 갖는 슬립하중에는 상한치가 있음을 알 수 있다.  $R_{d1}$ 과  $R_{d2}$ 를 보여주는 그림 12(b)와 (c)에서도  $R_{d1}$ 과 유사한 경향을 확인 할 수 있고,  $N_f$ 가 작아 특정층에 감쇠기가 집중되어 있을 때  $\rho$ 를 특정한 값 이상으로 증가시키면 오히려  $R_{d1}$ 과  $R_{d2}$ 가 증가됨을 알 수 있다. 그림 13과 14에서도 그림 12에서와 같이 동일한  $\rho$ 에 대하여  $N_f$ 를 증가시키거나 동일한  $N_f$ 에 대하여  $\rho$ 를 증가시키는 것은 성능지수의 감소를 가져오지 못하거나 오히려 증가 시킴을 알 수 있다. 이것은 최적의 성능을 발휘하는  $\rho$ 와  $N_f$ 가 특정한 함수관계를 가지고 있음을 의미한다.

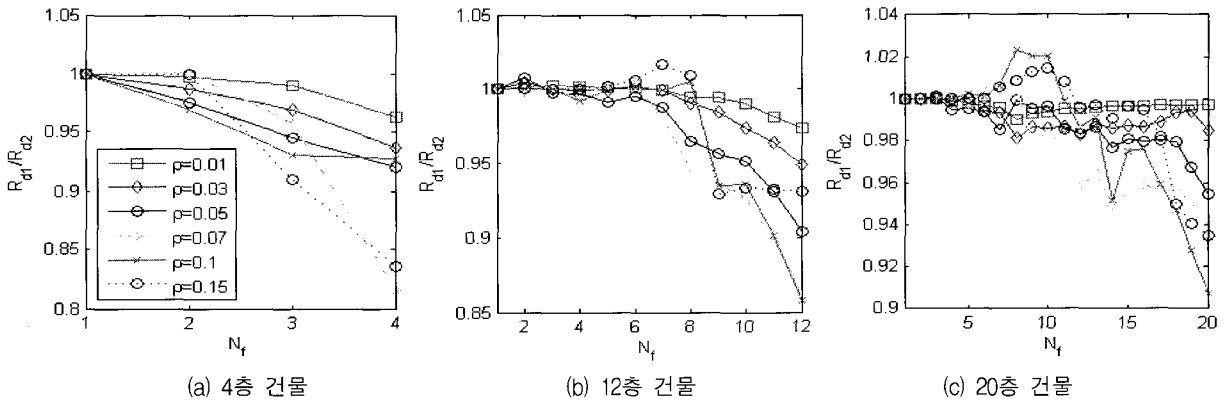


그림 11 슬립하중의 분배방법 비교

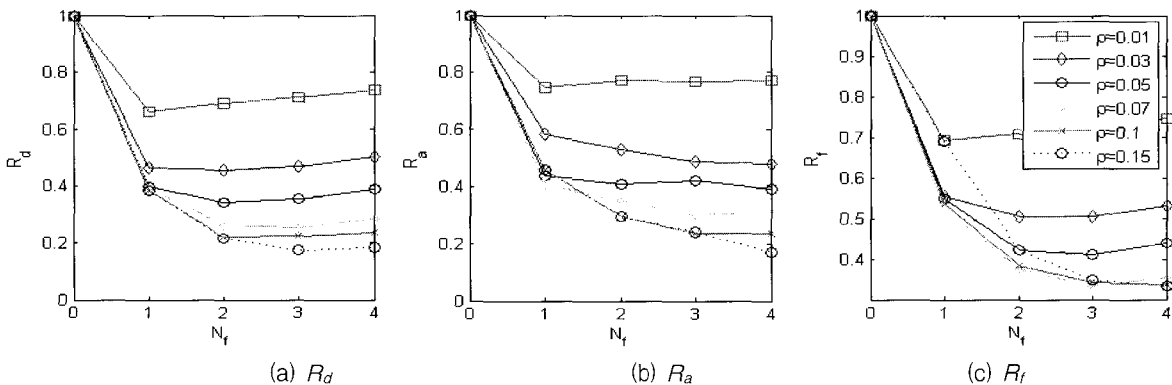


그림 12 감쇠기 개수 별 성능지수 ( $N_f=4, T_n=0.4$  s)

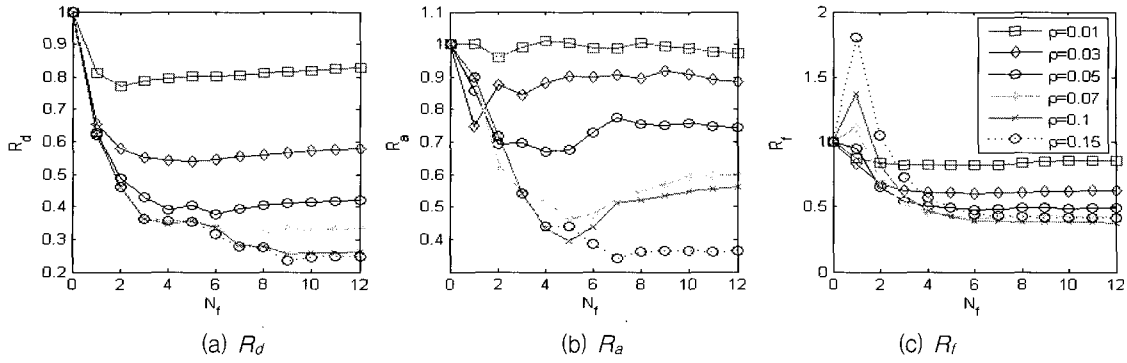


그림 13 감쇠기 개수 별 성능지수  $R_s(N=12, T_n=1.2 \text{ s})$

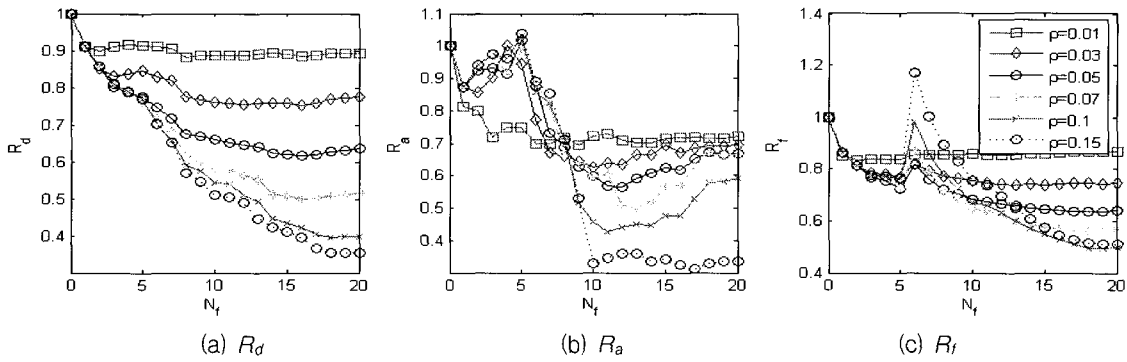


그림 14 감쇠기 개수 별 성능지수  $R_f(N=20, T_n=2.0 \text{ s})$

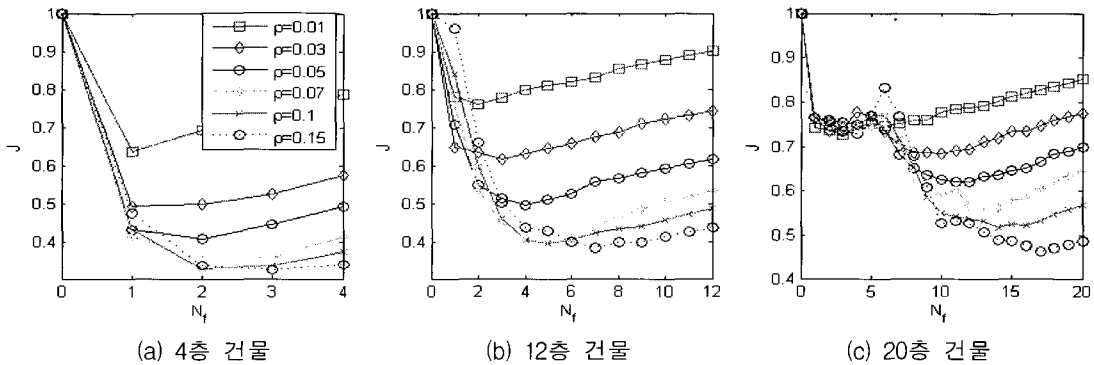


그림 15 성능지수  $J$

### 4.3 설치 층수의 결정

감쇠기의 설치 층수 결정은 공사비용과 관련된 중요한 문제로서 기존연구에서 소홀이 다루어져 온 부분이다. 제진 효과가 크게 손상되지 않는다면 경제적 측면에서 설치 층수를 축소하는 것이 유리하기 때문이다. 이와 같은 측면을 고려하기 위해 다음 식과 같이 응답에 관련된 성능지수  $R_d, R_a, R_f$ 와 함께 전체 구조물 층수에 대하여 정규화된 감쇠기 설치 층수를 포함하는 성능지수를 정의한다.

$$J = w_1 R_d + w_2 R_a + w_3 R_f + w_4 \frac{N_f}{N} \quad (11)$$

여기서,  $w_1, w_2, w_3$  및  $w_4$ 는 각각  $R_d, R_a, R_f$  및  $N_f/N$ 에 대한 가중치를 나타낸다. 이 성능지수는 선형이차제어

기(linear quadratic regulator, LQR)의 설계에서 구조물의 응답과 제어력의 trade-off를 통해 최적의 제어를 설계하는 것과 동일한 설계개념을 가진다.<sup>(16)</sup>

그림 15는  $w_1=w_2=w_3=2/7$ , 그리고  $w_4=1/7$ 로 설정한 경우의  $J$ 의  $N_f$ 에 따른 변화를 보여준다. 설치층수  $N_f$ 가 특정치 이상으로 증가하면 응답과 관련된  $R_d, R_a, R_f$ 의 감소가 크지 않기 때문에  $J$ 를 최소화 하는 최적의  $N_f$ 가 각각의  $\rho$ 에 대하여 존재하는 것을 확인할 수 있다. 이에 착안하여 4, 8, 12, 16 및 20층 구조물을 대상으로 주어진  $\rho$ 에 대해서  $J$ 를 최소화 하는  $N_f$ 를 구한 후 이를 전체 구조물의 층수  $N$ 으로 정규화하였으며 평균치와 함께 그림 16에 나타내었다. 그림 16에서 알 수 있듯이  $\rho$ 가 증가함에 따라 최적  $N_f/N$ 는 증가한다. 또한,  $N_f/N$ 의 평균값을 최소제곱법에 의해 곡선 맞춤하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있고, 그림 16에 함께 나타냈다.



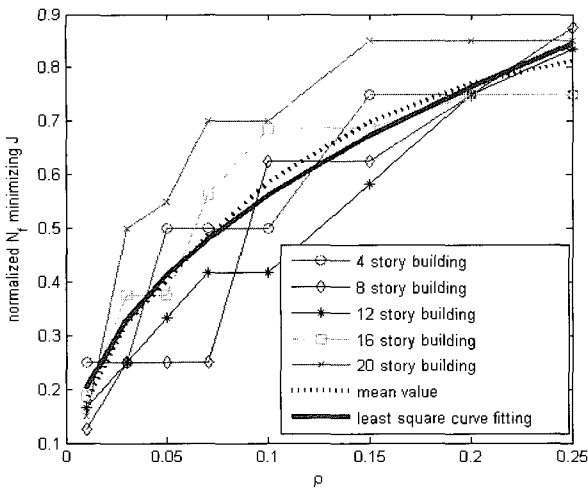


그림 16 J를 최소화하는 정규화된  $N_f$

$$\frac{N_f}{N} = 1.5652\rho^{0.4451} \quad (12)$$

위 식을 사용하면 임의의 슬립하중 총합을 분배시킬 최적의 설치층수를 쉽게 산정할 수 있게 된다.

5. 기존 최적설계법(SSSA)과의 비교

본 절에서는 동일한 슬립하중의 총합을 가지는 마찰감쇠기를 Garcia와 Soong이 제안한 SSSA 및 본 연구에서 제안된 방법에 따라 설계하고 성능지수를 비교한다. 우선 제안된 방법은 전 층의 절반에만 마찰감쇠기를 설치하는 경우로 제한하였으며, 식 (12)에서  $N_f / N = 0.5$  일 때,  $\rho$  는 약 0.08이다. 따라서, SSSA와 제안된 방법 모두 슬립하중의 총합은 식 (8)에서  $\rho = 0.08$ 을 적용하여 결정하였다.

표 1 SSSA와 제안된 방법에 의한 성능지수 비교

Earthquake	Structure	Method	$R_d$	$R_a$	$R_f$	$N_f$	J
Northridge	N=4, T=0.4s	SSSA	0.514	0.610	0.708	2	0.595
		Proposed	0.505	0.622	0.631	2	0.574
	N=8, T=0.8s	SSSA	0.627	0.951	0.721	6	0.764
		Proposed	0.651	0.876	0.674	4	0.700
	N=12, T=1.2s	SSSA	0.609	0.795	0.875	4	0.699
		Proposed	0.629	0.820	0.756	6	0.701
N=16, T=1.6s	SSSA	0.576	0.795	0.705	8	0.665	
	Proposed	0.592	0.838	0.695	8	0.679	
N=20, T=2.0s	SSSA	0.617	0.843	0.767	10	0.708	
	Proposed	0.611	0.754	0.770	10	0.682	
Kobe	N=4, T=0.4s	SSSA	0.309	0.476	0.443	2	0.422
		Proposed	0.289	0.437	0.410	2	0.396
	N=8, T=0.8s	SSSA	0.470	0.706	0.626	5	0.604
		Proposed	0.503	0.637	0.628	4	0.577
	N=12, T=1.2s	SSSA	0.548	0.898	0.645	8	0.693
		Proposed	0.581	0.876	0.644	6	0.672
	N=16, T=1.6s	SSSA	0.443	0.672	0.570	11	0.580
		Proposed	0.440	0.646	0.601	8	0.553
	N=20, T=2.0s	SSSA	0.465	0.660	0.556	13	0.573
		Proposed	0.522	0.686	0.591	10	0.586

제안된 방법은 원 구조물에서 최대층간변위가 상위 50%에 해당되는 층에 설치하였고, 층별 분포는 식 (10)을 사용하여 결정하였다. SSSA방법은  $\rho = 0.005$ 에 해당되는 슬립하중을 갖는 마찰감쇠기를 모두 16회에 걸쳐 순차적으로 설치하였으며 설치 위치는 매번 시간이력해석을 수행하여 결정하였다. 대상 지반가속도는 Northridge 및 Kobe 지진을 사용하였고 가새는 4장에서와 마찬가지로 강제인 것으로 가정하였다.

표 1은 SSSA와 제안된 방법에 의한 성능지수를 나타낸다. SSSA와 제안된 방법에 의한 응답은 거의 동등한 것으로 나타났다. 그러나 SSSA는 17번의 시간이력해석을 수행한 반면, 제안된 방법은 단 두 번의 수치해석만을 수행한다. 특히 제안된 방법은 Northridge 지진으로 가진된 12층 구조물의 경우를 제외하면 모든 경우에 있어 SSSA보다 감쇠기가 설치된 층수  $N_f$ 가 작거나 같다. 제안된 방법이 SSSA보다 설치 층수가 적음에도 불구하고 동일한 동등한 응답제어효과를 보이는 것은 전자의 경우에 설치층수와 구조물의 응답을 모두 고려한 성능지수 J를 최소화 하도록  $N_f$ 를 결정하였기 때문이다. 이는 표 1에서 10가지 중 7가지 경우에 대해서 제안된 방법이 SSSA보다 작은 J값을 산출하는 것으로부터 확인할 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 건축구조물을 대상으로 층전단력에 기초한 마찰감쇠기의 제진설계방법을 제시하였다. 먼저 설치용 가새 강성의 영향을 파악하기 위해 단자유도 시스템의 고유주기 별로 설치용 가새와 원구조물의 최적강성비를 찾았다. 이 과정에서 가새가 설치되기 전의 최대 층전단력을 기준으로 슬립하중을 정규화하면 변위와 변위응답에 대한

최적강성비와 층전단력에 대한 최적강성비가 유사한 경향을 가지게 되어 하나의 강성비가 두 가지 응답의 저감에 모두 효과적이 되는 장점이 있다. 슬립하중의 분배에 있어서는 그 총합이 작은 경우에는 특정 층에 집중적으로 설치하는 것이 유리하고, 총합이 큰 경우에는 여러 층에 나누어 설치하는 것이 유리하다. 설계의 편의를 위해 다양한 고유주기를 갖는 구조물을 대상으로 회귀분석을 통해 최적의 설치 층수와 정규화된 슬립하중의 총합 사이의 관계식을 제시하였다. 최종적으로, 제안된 설계절차는 기존의 최적설계기법(SSSA)에 비해 응답저감효과는 유사한 반면에 요구되는 수치해석의 회수가 훨씬 적고 설치 층수가 감소하여 경제적임을 다양한 구조물에 대한 설계예제를 통해 확인하였다.

### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2003-000-11584-0)지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다

### 참고 문헌

1. Pall, A.S. and Marsh, C., "Response of friction damped braced frames," *Journal of Structural Engineering*, Vol.108, No.9, 1982, pp.1313-1323.
2. Constantinou, M.C., Mokha, A. and Reinhorn A. M., "Teflon bearings in base isolation. II: Modeling," *Journal of Structural Engineering*, Vol.116, No.2, 1990, pp.455-474.
3. Li, C. and Reinhorn, A.M., "Experimental and Analytical Investigation of Seismic Retrofit of Structures with Supplemental Damping: Part II - Friction Devices," *Technical Report NCEER-95-0009*, State University of New York at Buffalo, Buffalo, NY, 1995.
4. Grigorian, C.E., Yang, T.S. and Popov E.P., "Slotted bolted connection energy dissipators," Report of *National Science Foundation*, University of California, Berkeley, 1992.
5. Mualla, I., Nielsen, L.O., Chouw, N., Belev, B., Liao, W.I., Loh, C.H. and Agrawal, A., "Enhanced response through supplementary friction damper devices," *Balkema, Wave propagation, moving load and vibration reduction; Proceedings of the interna-*

- tional workshop WAVE 2002*, pp.121-128.
6. Cho, C.G. and Kwon, M., "Development and modeling of a frictional wall damper and its applications in reinforced concrete frame structures," *Earthquake Engineering Structures Dynamics*, Vol. 33, 2004, No.821-838
7. Dyke, S.J., Spencer Jr., B.F., Sain, M.K. and Carlson, J.D., "Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction," *Smart Materials and Structures*, Vol.5, 1996, pp.565-575.
8. Filiatrault, A. and Cherry, S., "Seismic design spectra for friction-damped structures," *Journal of Structural Engineering*, Vol.116, 1990, pp.1334-1355.
9. Cherry, S. and Filiatrault, A., "Seismic response control of buildings using friction dampers," *Earthquake Spectra*, Vol.9, 1993, pp.447-466.
10. Kim, J. and Choi, H., "Response modification factors of chevron-braced frames," *Engineering Structures*, Vol.27, No.2, 2005, pp.285-300.
11. Moreschi, L.M. and Singh, M.P., "Design of yielding metallic and friction dampers for optimal seismic performance," *Earthquake Engineering Structures Dynamics*, Vol.32, 2003, pp.1291-1311.
12. Garcia, D.L. and Soong, T.T., "Efficiency of a simple approach to damper allocation in MDOF structures," *Journal of Structures Control*, Vol.9, No.1, 2002, pp.19-30.
13. Shukla, A.K. and Datta, T.K., "Optimal use of viscoelastic dampers in building frames for seismic force," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 125, No.4, 1999, pp.401-409.
14. *Uniform Building Code*, International Conference of Building Officials, Whittier, California, 1997.
15. Chopra, A.K., *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prentice-Hall: Upper Saddle River, NJ, USA, 1995.
16. Soong, T.T. and Chen, W.F., *Active Structural Control: Theory and Practice*, Longman Scientific & Technical, 1990.