

마찰형 감쇠기가 설치된 다자유도 비선형 건물의 응답특성

Response Characteristics of a Nonlinear MDOF Structure with Friction Dampers

이성경* · 박지훈** · 문병욱*** · 민경원† · 이상현****

Sung-Kyung Lee, Ji-Hun Park, Byoung-Wook Moon, Kyung-Won Min and Sang-Hyun Lee

Key Words : friction damper, seismic retrofit, Nonlinear Structure.

ABSTRACT

This paper deals with the numerical model of a bracing-friction damper system and its deployment using the optimal slip load distribution for the seismic retrofitting of a damaged building. The Slotted Bolted Connection (SBC) type friction damper system was tested to investigate its energy dissipation characteristic. Test results coincided with the numerical ones using the conventional model of a bracing-friction damper system. The placement of this device was numerically explored to apply it to the assumed damaged-building and to evaluate its efficiency. It was found by distributing the slip load that minimizes the given performance indices based on structural response. Numerical results for the damaged building retrofitted with this slip load distribution showed that the seismic design of the bracing-friction damper system under consideration is effective for the structural response reduction.

1. 서 론

점탄성 감쇠기, 금속형 소성감쇠기, 마찰감쇠기와 같은 수동형 감쇠기는 지진하중에 대한 구조물의 동적응답을 저감시키는데 널리 사용되고 있다. 이력거동에 의한 에너지 소산을 통해 구조물의 진동에너지를 흡수하여 구조물 피해를 최소화 하는 감쇠장치는 건축 구조물의 내진 설계에 효과적이다¹⁾. 이러한 감쇠장치 중 마찰감쇠기는 반복 하중에 대한 안정적 이력거동을 나타낸다. 또한 마찰감쇠기의 중요한 설계 변수인 마찰력의 슬립하중은 마찰면과 수직항력에 의해 쉽게 계산 할 수 있다. 그리고 마찰감쇠기는 에너지 소산 메커니즘이 단순 하고 제작이 용이하며 쉽게 설치 할 수 있다는 장점이 있다²⁾⁻⁶⁾.

이러한 마찰감쇠기를 건축구조물의 내진설계에 적용하기 위해서는 브레이스에 설치되는 마찰감쇠기의

초기강성 그리고 슬립하중과 같은 설계 변수를 결정해야 한다. Filatrault와 Cherry는 구조물의 고유주기, 가진 하중의 진동수 성분, 슬립하중과 같은 변수를 고려한 해석을 통하여 변위 응답과 에너지소산량이 최소화 되는 마찰감쇠기의 설계방법을 제시하였다⁷⁾. Fu와 Cherry는 부재력에 의해 정규화된 계수를 이용하여 마찰감쇠기를 설계하였다⁸⁾. Garcia와 Soong은 층간변위 혹은 층간속도를 이용한 제어지수를 산정하고 최대 값의 제어지수를 갖는 층에 감쇠장치를 설치하도록 하였다⁹⁾. Moreschi와 Singh는 최적화 기법을 이용하여 마찰감쇠기 설계에 필요한 최적 슬립하중과 브레이스 강성을 제안하였다.

그러나, 이러한 연구들의 대부분은 지진위험도의 증가에 대비하기 위해 개정된 내진규준의 강화를 만족시키기 위한 목적으로, 앞에서 언급한 수동형 제진장치를 이용한 신축건물 또는 기존건물의 내진보강에 초점을 두고 있다.

이러한 연구들과 달리, 본 연구에서는 노후화되거나 손상 받은 건물의 내진보강이라는 차원에서 구조물의 제어응답에 기반한 성능지수를 이용한 마찰감쇠기의 내진설계에 관해서 논의된다. 본 연구에서는 먼저, 강판 브레이스와 황동판으로 구성된 슬롯-볼트 연결형

† 단국대학교 건축공학과 교수
E-mail : kwmin@dankook.ac.kr
Tel : (02)709-2731, Fax : (08) 749-8653

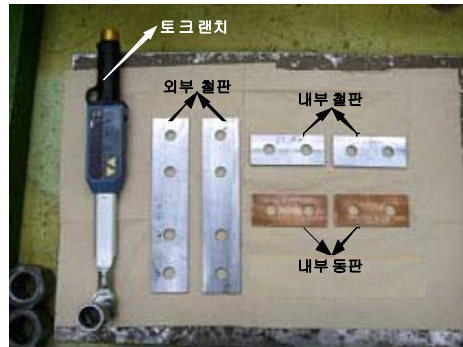
* 단국대학교 건축공학과 연구전임강사
** 인천대학교 건축공학과 전임강사
*** 단국대학교 건축공학과 박사과정
**** 단국대학교 건축공학과 전임강사

마찰감쇠기 시스템에 대해서 단조증가 일방향 가력하중과 반복하중에 대해서 실험을 수행하여 제작된 마찰감쇠기 시스템의 에너지 소산특성을 조사한다. 이러한 실험결과들을 전통적인 가새-마찰감쇠기 모델에 대한 수치해석결과와 비교하여 내진보강에 대한 적용성을 평가한다. 다음으로, 이러한 감쇠장치를 가정된 손상 구조물에 적용하여 그 효과를 평가하기 위해서 감쇠기의 수직적 배치문제를 수치적으로 검토한다. 마지막으로, 가속도 및 층간변위와 같은 구조물의 응답을 기초로 한 주어진 성능지수를 최소화시키는 최적의 슬립하중을 결정하여 본 연구에서 고려하는 슬롯-볼트 연결형 마찰감쇠기 시스템의 효능을 평가한다.

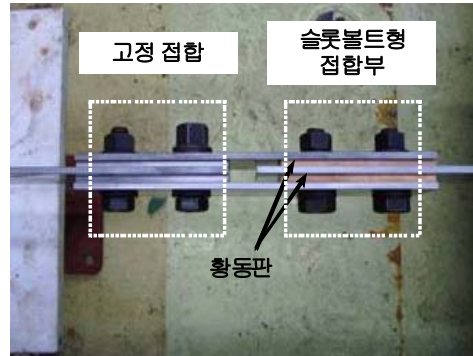
2. 브레이스형 마찰감쇠기 시스템의 성능실험

2.1 실험체 구성

황동판은 부식에 강하고 반복하중에 대한 안정적인 슬립하중을 유지하여 슬롯볼트형 마찰감쇠기에서 마찰재로 많이 사용되어진다¹¹⁾. 본 연구에서는 황동판과 철판을 이용하여 마찰력이 발생하도록 슬롯볼트형 마찰감쇠기를 구성하여 실험을 수행하였다. 그림 1의 (a)는 실험에 사용된 볼트의 조임력을 조절 할 수 있는 토크렌치, 마찰력이 작용되는 동판과 철판을 보여 주고 있다. 그림 1의 (b)와 같이 슬롯볼트형 접합부는 슬롯형 홈 가공이 된 1개의 내부 철판 양면을 2개의 황동판과 2개의 외부 철판으로 접합하여 내부철판과 황동판 사이에서 마찰력에 의한 에너지 소산이 일어나도록 구성 되었다. 각각의 판재는 안정적인 슬립이 발생하도록 면을 정밀하게 가공하고 판재의 가상자리를 가공하였다. 그림 1의 (c),(d)는 성능실험 전경 사진과 도면을 나타낸다. 2개의 지그에는 가새를 형상화한 2개의 내측 철판이 각각 용접되었다. No.1 지그는 액츄에이터와 볼트로 접합하고, No.2 지그는 실험실 바닥의 베이스 플레이트와 볼트로 접합하였다. 또한 액츄에이터를 지지하는 지그 상부에 테프론 판을 설치하여 수평방향으로 움직이는 액츄에이터와 지그 사이에 마찰력이 최소로 일어나도록 하였다. 액츄에이터에 의한 일축가력하중은 내부 철판에 의해 슬롯볼트형 감쇠기에 전달되고, 이때 슬롯볼트형 감쇠기는 외부 하중과 정적평형을 이루며 마찰력이 발생한다.



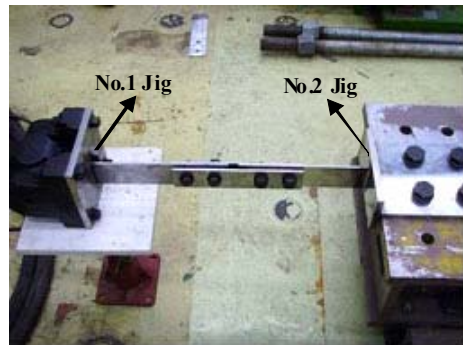
(a) 감쇠기 구성 부품과 토크렌치



(b) 마찰감쇠기 시스템



(c) 실험 전경 1



(d) 실험 전경 2

그림 1. 슬롯볼트형 마찰감쇠기와 실험 전경

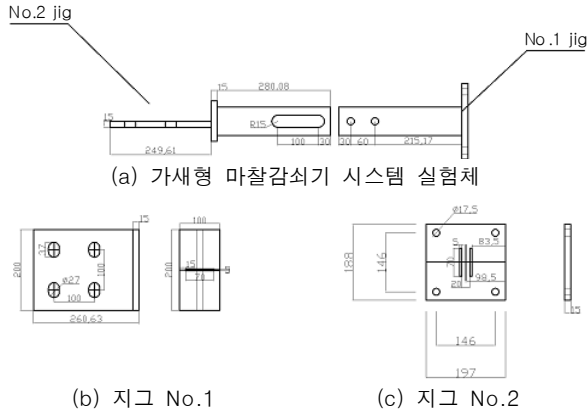


그림 2. 실험체 및 지그 도면

2.2 일방향 가력 시험

앞에서 언급한 실험체 구성 방법을 이용하여 슬롯형 감쇠기의 볼트의 조임력인 토크와 슬립하중 관계를 살펴보기 위하여 일방향 가력 시험을 수행하였다.

그림 3은 1 mm/sec 속도의 변위 제어 형식으로 액츄에이터를 가력하기 위한 입력 신호이다. 그림 4는 토크와 슬립하중에 그림 3과 같은 일방향 가력에 따른 하중-변위 곡선을 나타낸다. 그림 4에서 슬립하중은 토크의 크기에 비례하며 증가한다. 반면에 토크가 60 N·m 일 때 두 번의 슬립이 발생하였고, 토크 80 N·m 일 때는 슬립이 분명하게 나타나지 않았다. 이것은 가새 부재가 압축력을 받아 좌굴하였기 때문으로 사료된다. 반복가력 시험을 수행 할 때는 가새 부재를 형상화한 내측 철판의 길이를 짧게 하여 좌굴을 방지하였다.

그림 5는 일방향 실험 결과를 이용하여 슬립하중과 토크의 관계를 회기분석을 통해 1차 식으로 추정한 결과이다. 슬립하중과 토크의 직선 관계식을 통해 슬롯볼트형 감쇠기를 고려한 연구에서 슬립하중을 예측할 수 있다.

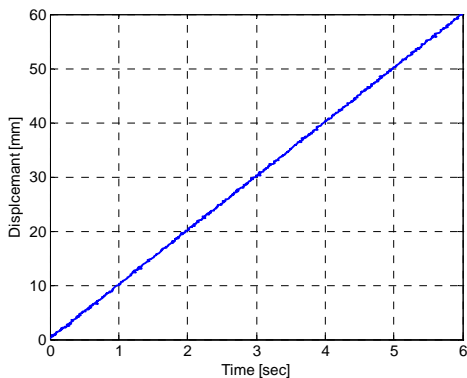


그림 5. 토크와 슬립하중 관계

2.3 반복 가력 시험

슬롯볼트형 마찰감쇠기의 수치해석 이력모델을 구성하기 위하여 반복가력 하중을 통한 이력특성을 파악하였다. 반복하중 실험은 일방향 가력 시험과 같이 변위 제어형식으로 가진하였으며 최대 진폭이 1, 2, 3mm가 되도록 각각 3회를 반복하는 하중을 그림 6과 같이 생성하였다. 그림 7은 토크의 크기에 따른 슬롯볼트형 마찰감쇠기의 이력곡선을 나타낸다. 그림 7에서 일방향 가력 시험 결과와 동일하게 토크가 커짐에 따라 슬립하중이 증가하고 이력곡선의 크기도 커지는 것을 확인 할 수 있다. 또한 반복가력이 작용할 때 슬립하중이 일정하게 유지되는 것도 확인 할 수 있다. 이것은 정밀하게 표면처리가 된 황동판과 철판이 안정적인 이력거동을 보인다는 것을 나타낸다.

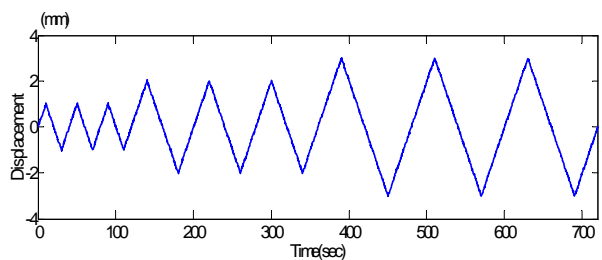


그림 6. 반복 가력 하중의 시간이력

그림 3. 일방향 가력 하중의 시간이력

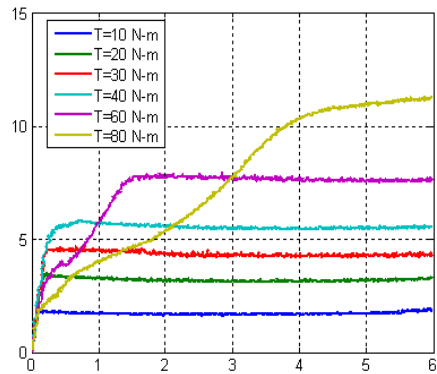
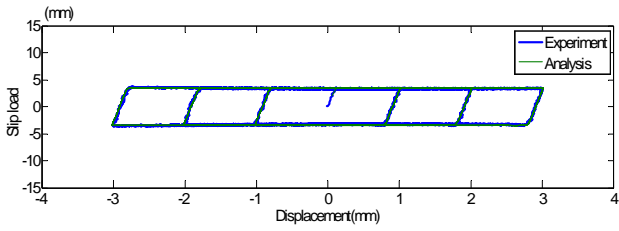
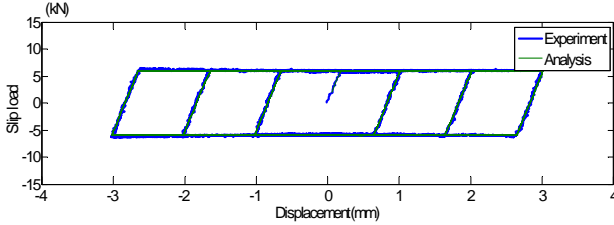


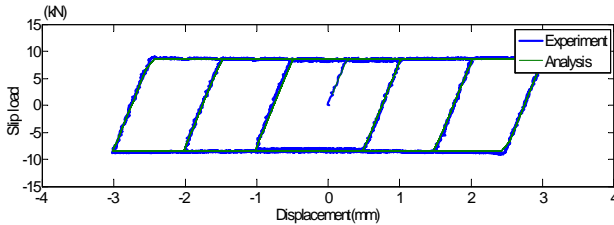
Figure 4. 일방향 하중에 의한 변위-하중 관계



(a) T = 20 N·m



(b) T = 40 N·m



(a) T = 60 N·m

그림 7. 반복 가력 하중-변위 곡선

3. 마찰감쇠기의 해석 모델

일반적으로 에너지 소산장치의 대부분은 건물의 층간에 단독으로 직접 설치되는 것이 아니라 주 구조부재에 연결하기 위한 추가적인 지지시스템이 필요하다. 가새는 슬롯볼트형 마찰감쇠기의 지지시스템으로 가장 많이 사용된다. 가새의 끝 부분은 하부층 프레임 구조에 고정접합 되고 다른 끝 부분은 슬롯볼트형 마찰감쇠기와 접합된다. 그리고 슬롯볼트형 마찰감쇠기는 상부 프레임 구조에 고정접합 된다. 이러한 형식의 설치 시스템에서 가새와 슬롯볼트형 마찰감쇠기는 그림 8과 같이 강성이 고려되어야 한다. 여기서 k_b , δ , f_d 그리고 f_s 는 각각 가새 강성, 층간 변위, 마찰감쇠기의 마찰력, 가새형 마찰감쇠기 시스템에 작용하는 힘을 나타낸다.

그림 8과 같은 모델을 통해 가새형 마찰감쇠기 시스템에 작용하는 힘과 마찰감쇠기의 마찰력, 가새 강성, 가새의 변형과의 관계를 다음과 같은 평형관계로 표현 할 수 있다.

$$f_s = f_d = k_b \delta_b \quad (1)$$

가새형 마찰감쇠기 시스템의 전체 변위는 다음과 같다.

$$\delta = \delta_b + \delta_d \quad (2)$$

여기서 δ_b 와 δ_d 는 각각 가새와 마찰감쇠기에서 발생하는 변위이다.

쿨롱 마찰(Coulomb friction)을 포함한 가새형 마찰감쇠기 시스템의 이력곡선을 그림 9에 나타내었다^{9),12)}. 식 (1), (2)와 같이 힘의 평형방정식과 구속조건이 그림 9의 이력곡선의 임의의 점에 대해 모두 만족하는 것으로 확인된다. 쿨롱 마찰을 포함한 가새형 마찰감쇠기 시스템의 수치모델을 이용하여 다양한 슬립 하중에 대한 수치해석을 수행하였다 (그림 7의 실선). 그림 7에서 수치해석을 통한 이력곡선과 실험에 의한 이력곡선이 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

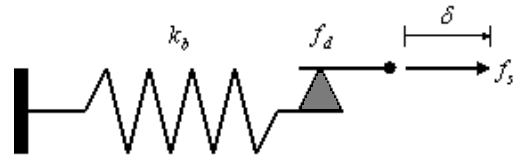


그림 8. 가새형 마찰감쇠기 시스템

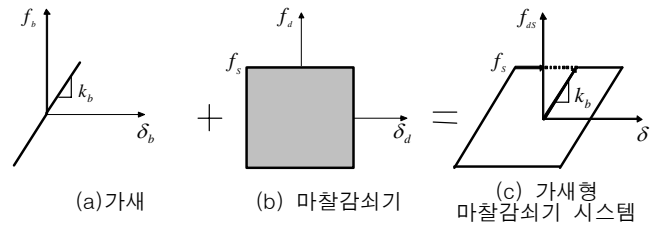


그림 9. 가새형 마찰감쇠기 시스템의 이력 곡선

4. 수치해석 예제

4.1 해석 대상 구조물

손상된 건축 구조물에 가새형 마찰감쇠기 시스템이 설치된 경우와 설치되지 않은 경우에 대하여 10층 규모의 전단형 모델을 이용하여 내진성능을 수치해석적으로 평가하였다.

손상을 입은 구조물은 층전단력과 층간변위에 대하여 이선형(bi-linear) 강성을 갖는 모델을 이용하였다.

항복후 강성은 초기강성의 5%로 가정하였다. 구조물 10층 전체가 $5 \times 10^5 kg$ 의 동일한 질량을 갖고, 초기 층강성은 아래층부터 9.0, 8.9, 8.6, 8.1, 7.4, 6.6, 5.6, 4.4, 3.1, 1.6 $kN/m \times 10^4$, 그리고 층별 항복하중은 1.96, 1.86, 1.73, 1.65, 1.55, 1.42, 1.25, 1.03, 0.76, 0.43 $kN/m \times 10^2$ 으로 가정하였다. 위와 같은 구조물은 다음과 같은 운동방정식으로 표현 될 수 있다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{K}_f(t)\mathbf{y}(t) = -\mathbf{M}\mathbf{1}\ddot{Y}_g(t) \quad (3)$$

여기서 $\mathbf{y}(t)$ 와 $\ddot{Y}_g(t)$ 는 상대 변위 벡터와 지반가속도를 나타내고, \mathbf{M} 과 \mathbf{C} 는 구조물의 질량 행렬과 감쇠 행렬, $\mathbf{K}_f(t)$ 는 이선형 모델을 이용한 구조물의 강성 행렬, $\mathbf{1}$ 는 단위 열벡터이다.

식 (3)은 뉴마크 베타법을 이용하여 계산하였으며 가진 하중은 데이터 간격이 0.001초이고 최대가속도 340 gal인 El Centro 지진을 사용하였다. 그림 10은 해석을 통한 구조물의 전단력-층간변위 이력곡선을 나타낸다.

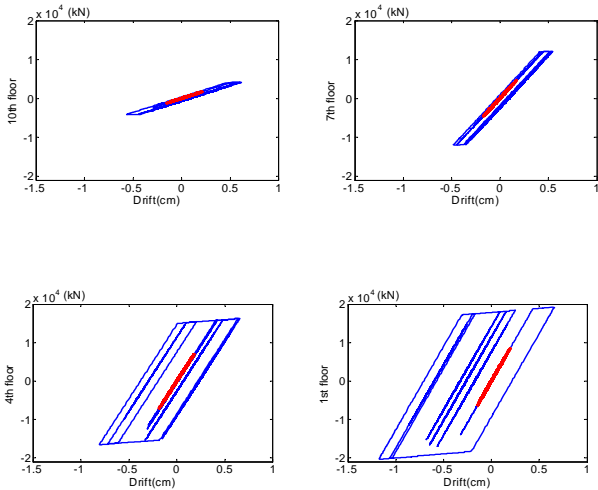


그림 10. 전단력-변위 특성

4.2 가새형 마찰감쇠기 시스템으로 보강된 구조물

손상된 구조물을 가새형 마찰감쇠기 시스템으로 보강하였을 때의 운동 방정식은 다음과 같다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{y}}_s(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{y}}_s(t) + \mathbf{K}_f(t)\mathbf{y}_s(t) + \mathbf{F}_s(t) = -\mathbf{M}\mathbf{1}\ddot{Y}_g(t) \quad (4)$$

여기서 $\mathbf{y}_s(t)$ 는 마찰감쇠기의 상대변위, $\mathbf{F}_s(t)$ 는 가새형 마찰감쇠기 시스템의 제어력이다.

본 논문에서는 각 층에 설치되는 가새강성을 모든 층강성에 2배로 가정하였다. 또한 각층에 설치된 마찰감쇠기의 슬립하중은 최대 전단력으로 정규화 하였다. 다음과 같은 2가지 방법으로 층별 슬립하중을 산정하였다.

방법 1:

ρ_1 =슬립하중/손상되지 않은 구조물의 최대전단력

방법 2:

ρ_2 =슬립하중/손상되지 않은 구조물의 층간 최대전단력

방법 1에서는 모든 층이 동일한 슬립하중을 갖는다. 반면에 방법 2는 모든 층의 최대전단력이 다르기 때문에 층별로 다른 슬립하중을 갖게된다.

보강된 구조물의 내진성능을 평가하기 위하여 다음과 같은 2가지의 평가지수를 산정하였다.

$$R_d = \frac{\max_{i=1, \dots, n} \{ \delta_s(t) |_{\max} \}}{\max_{i=1, \dots, n} \{ \delta(t) |_{\max} \}} \quad R_a = \frac{\max_{i=1, \dots, n} \{ \ddot{Y}_s(t) |_{\max} \}}{\max_{i=1, \dots, n} \{ \ddot{Y}(t) |_{\max} \}} \quad (5)$$

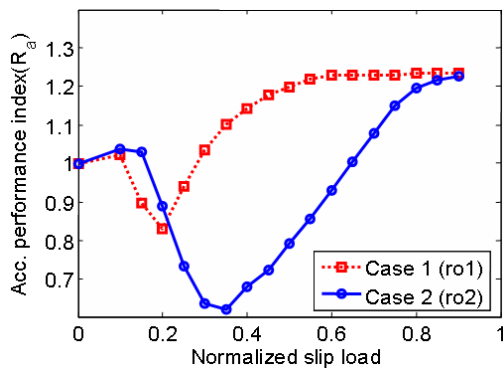
여기서 R_d 과 R_a 제어시 응답과 비제어시 응답 비율을 의미한다. $\delta_s(t)$ 와 $\delta(t)$ 는 제어시 층간변위와 비제어시 층간변위를 나타내고, $\ddot{Y}_s(t)$ 와 $\ddot{Y}(t)$ 는 제어시 가속도 응답과 비제어시 가속도 응답이다.

4.1절에서 사용한 동일한 지진하중을 이용하여 식 (4)의 운동방정식을 반복하여 해석을 수행하였다. 그림 11은 식 (5)에 의해 계산된 성능지수에 따른 정규화된 슬립하중 ρ_1 과 ρ_2 의 분포를 나타낸다. 방법 2에 의한 슬립하중을 층별로 분배한 경우가 방법 1에 의한 것보다 가속도 응답과 변위 응답 성능지수가 더 좋은 경향을 나타낸다. 최적의 정규화 된 슬립 하중은 가속도 응답의 경우 $\rho_2=0.35$ 일 때, 층간변위 응답의 경우 $\rho_2=0.55$ 로 나타났다. 또한 정규화된 슬립 하중이 최적값 이상으로 증가 하는 경우에 오히려 가속도 응답과 층간변위 응답이 증가하여 성능지수가 커진다. 이러한 경향은 방법 1에서 더욱 확연히 나타난다.

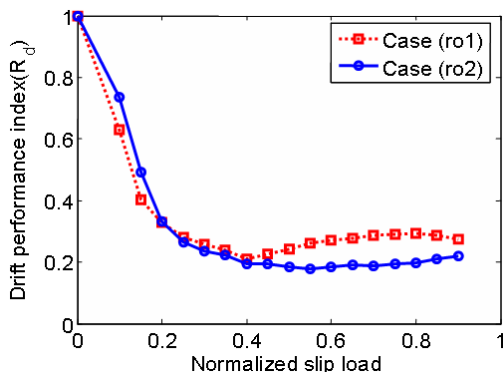
그림 12는 방법 2로 계산된 정규화된 슬립 하중이 $\rho_2=0.35$ 와 $\rho_2=0.55$ 일 때 층별 가속도 응답과 층간

변위 응답을 비교하여 나타내었다. 가새형 마찰감쇠기 시스템이 구조물의 가속도 응답과 층간변위 응답을 상당히 감소시키는 것을 확인 할 수 있다. 하지만 $\rho_2=0.55$ 일 때 상부층의 최대가속도 응답은 가새형 마찰감쇠기가 설치되지 않을 경우를 초과하고 있다. 이것은 가새형 마찰감쇠기 시스템의 경우 구조물의 강성 증가 효과가 있기 때문에 가속도 응답을 오히려 증폭 시킬수 있다는 것을 의미한다. 따라서, 가새형 마찰감쇠기 시스템을 설계할 때는 강성 추가에 의한 가속도 증폭을 고려 하여야 한다.

그림 13은 $\rho_2=0.55$ 일 때 가새가 분담하는 전단력의 이력, 마찰감쇠기 자체에 발휘되는 에너지 소산에 의한 이력 그리고 전체 가새형 마찰감쇠기 시스템의 이력곡선을 층별로 나타내었다. 전 층에 걸쳐서 가새형 마찰감쇠기 시스템의 이력거동이 나타나고 있으며, 이러한 결과에 의해 그림 10에서 실선으로 표현된 바와 같이 원래의 이선형을 갖는 비선형 구조물의 하중-변위 이력거동이 탄성영역으로 복귀되었음을 알 수 있다.



(a) 가속도 응답 성능지수 (R_a)



(b) 층간변위 응답 성능지수 (R_d)

그림 11. 방법 1과 2에 의해 정규화된 슬립하중과 성능지수의 변화

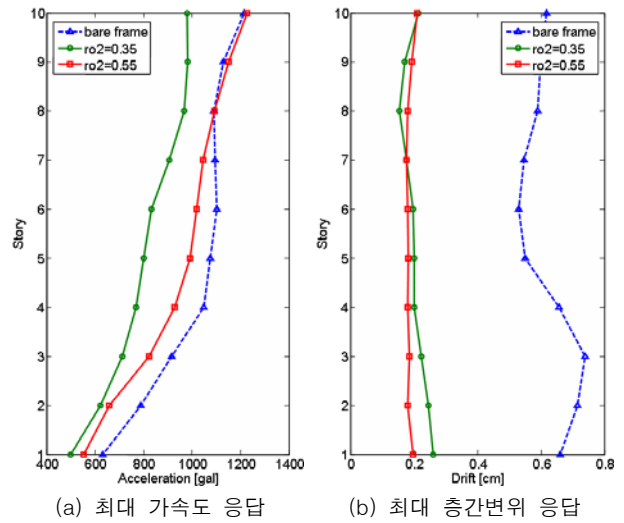


그림 12. 방법 2에 의한 층별 최대 응답 비교

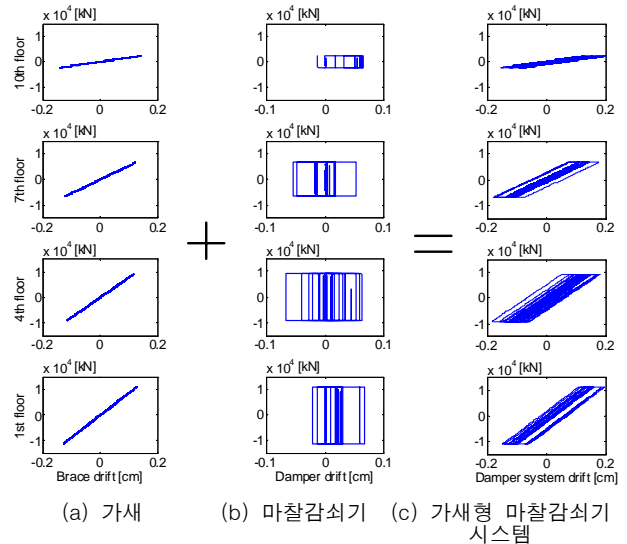


그림 13. 슬립하중 $\rho_2=0.55$ 일 때 이력 거동 형상

6. 결론

본 논문에서는 노후화 되었거나 손상을 입은 구조물의 내진 보강을 위한 가새형 마찰감쇠기 시스템을 가속도 응답과 층간변위 응답을 이용한 성능지수를 이용하여 내진성능을 평가하였다. 먼저, 황동판과 철관으로 이루어진 마찰감쇠기를 제작하여 일방향 실험과, 반복가력 실험을 통하여 이력거동 특성을 파악하였다. 실험결과를 이용하여 가새형 마찰감쇠기 시스템의 손상된 구조물의 내진보강 적용성을 평가하기 위하여 간단한 수치해석 모델을 구성하였다. 손상된 구조물의 강성을 이선형 모델로 가정하고 이 구조물에

가새형 마찰감쇠기 시스템을 설치하여 수치해석을 수행하였다. 그 결과 가속도와 층간변위 응답을 이용한 성능지수의 최소값을 갖는 최적의 마찰감쇠기의 슬립 하중을 구하였다. 손상된 구조물에 가새형 마찰감쇠기 시스템을 이용한 내진 보강방법은 지진하중에 대하여 효과적인 성능을 나타내며 특히 층간변위 응답의 경우 상당한 효과가 있는 것으로 나타났다.

후 기

이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 건설핵심기술연구개발사업 과제번호 (C103A2000010-05A0200-00510)와 과학기술부/한국과학재단 우수연구센터육성사업(R11-2002-101-03004-0)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Soong T. T. and Dargush G. F. (1997), *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*, John Wiley & Sons.
- (2) Pall A. S. and Marsh C. (1982), Response of friction damped braced frames, *Journal of Structural Engineering*, Vol.108, No.9, pp.1313-1323
- (3) Constantinou M. C., Mokha A. and Reinhorn A. M. (1990), Teflon bearings in base isolation. II: Modeling, *Journal of Structural Engineering*, Vol.116, No.2, pp.455-474
- (4) Grigorian C. E., Yang T. S. and Popov E. P. (1992), Slotted bolted connection energy dissipators, Report of National Science Foundation, University of California, Berkeley
- (5) Li C. and Reinhorn A.M. (1995), 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
- (6) Mualla I.H. and Belev B. (2002), Performance of steel frames with a new friction damper device under earthquake excitation, *Engineering Structures*, Vol.24, pp.365-371
- (7) Filiatrault A. and Cherry S. (1990), Seismic Design spectra for Friction-damped structures, *Journal of Structural Engineering*, Vol.116, pp.1334-1355
- (8) Fu Y. and Cherry S. (2000), Design of friction damped structures using lateral force procedure, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.29, pp.989-1010
- (9) Garcia D.L. and Soong T.T. (2002), Efficiency of a simple approach to damper allocation in MDOF structures, *Journal of Structures Control*, Vol.9, No.1, pp.19-30
- (10) Moreschi L.M. and Singh M.P. (2003), Design of yielding metallic and friction dampers for optimal seismic performance, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.32, pp.1291-1311
- (11) Grigorian C. E., Yang T. and Popov E. P. (1993), Slotted bolted connection energy dissipators, *Earthquake Spectra*, 9(3), 491-504
- (12) Chopra A. K. (1995), *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prentice Hall