

마찰형 감쇠장치가 설치된 실물크기 3층 철골프레임의 진동대 실험

Shaking Table Test of a Full Scale 3 Story Steel Frame with Friction Dampers

배 춘 희† · 김 연 환* · 이 상 현** · 박 영 필***

Chun-Hee Bae, Yeon-Whan Kim, Sang-Hyun Lee and Young-Pil Park

(2007년 6월 25일 접수 ; 2007년 8월 13일 심사완료)

Key Words : Seismic Design(내진설계), Full Scale(실물크기), 3 Story Building Structure(3층 건물), Shaking Table(진동대), Friction Damper(마찰형 감쇠기), Frequency(진동수), Damping Ratio(감쇠비), System Identification(시스템식별)

ABSTRACT

Energy dissipation devices can be considered as an alternative for the seismic performance enhancement of existing structures based on the strengthened seismic design code. In this study, seismic response mitigation effects of friction dampers are investigated through the shaking table test of a full scale 3 story building structure. First, the bilinear force-displacement relationship of a structure-brace-friction damper system and the effect of brace-friction damper on the increase of frequency and damping ratio are identified. Second, frequency, displacement, and torque dependent characteristics of the friction damper are investigated by using harmonic load excitation tests. Finally, the shaking table tests are performed for a full scale 3 story steel frame. System identification results using random signal excitation indicated that brace-friction damper increased structural damping ratio and frequency, and El Centro earthquake test showed that brace-friction damper reduced the peak displacement and acceleration significantly. In particular, it was observed that the damping effect due to friction damper became obvious when the structure was excited by more intensive load causing frequent slippage of the friction dampers.

1. 서 론

최근의 미국, 일본, 대만 등에 발생한 지진에 의한 큰 경제적 손실로 인해 내진 설계법의 개선 요구가 대두되었다. ATC-40, FEMA-273 등 성능에 기초한 내진설계를 바탕으로 한 보고서에서는 기존 건물의 내진성능을 향상시키는 방법으로 건물의 강도와

강성을 증가시키는 방법, 건물의 변형능력을 향상시키는 방법, 면진장치나 에너지 소산장치를 설치하는 방법 등을 제시하고 있다^(1,2). 이 중에서 에너지 소산장치에 의한 방법은 구조물의 감쇠비를 증가시킴으로써 지진에 의한 진동에너지를 열에너지로 소산시켜 구조물에 발생하는 동적 응답을 효과적으로 저감하며, 비교적 장치의 설치가 간편하고 상대적 소요 비용이 적어 신축 건물 뿐 아니라 기존 건물의 내진 성능 향상을 위해서 많이 적용되고 있다⁽³⁻⁵⁾.

국가기반시설물인 발전소, 송전철탑, 그리고 제반 관리시설물의 경우, 지진과 바람과 같은 자연하중 뿐 아니라 기계, 발파, 차량, 그리고 인간에 의한 진동 등 다양한 진동 원인에 의해 발생하는 모든 진동

† 교신저자: 정회원, 한전 전력연구원
E-mail : chbae@kepri.re.kr
Tel : (042) 865-5421, Fax : (042) 865-5444

* 정회원, 한전 전력연구원

** 정회원, 단국대학교 건축공학과

*** 정회원, 연세대학교 기계공학과

에 대하여 일정한 한계치 이하로 제한되어야 한다. 특히, 발전소의 경우 지진 후 피해복구가 지연되면 이에 따른 간접적인 사회자본의 손실이 매우 크기 때문에 지진하중에 따른 구조물의 피해가 최소화되어야 한다.

이 연구는 발전소를 포함하는 기존 구조물 및 신축 구조물의 진동저감 성능 향상을 위해 에너지 소산형 감쇠기의 하나인 마찰형 감쇠기의 효율적인 해석방법을 개발하고 실험을 통해 마찰형 감쇠기의 진동저감 성능을 검증하는 것을 목표로 연구를 수행하였다. 이를 위해 마찰형 감쇠장치가 설치된 단자유도 구조물의 감쇠증가 효과를 살펴보았다. 또한 이 연구를 통해 개발된 새로운 형태의 마찰형 감쇠기를 실물크기 3층 구조물에 설치한 후 진동대 실험을 수행하여 마찰 감쇠기의 진동저감 성능을 확인하였으며, 시스템식별기법을 적용하여 마찰감쇠기에 의한 감쇠비 증가효과를 정량적으로 평가하였다.

2. 구조물-가새-마찰감쇠기 시스템

2.1 등가선형 시스템

Fig. 1은 구조물, 마찰감쇠기-가새, 그리고 구조물-마찰감쇠기-가새 통합시스템의 힘-변위 관계를 보여준다.

Fig. 1(a)에서와 같이 구조물은 탄성거동을 하는 것으로 가정하였으며, 마찰감쇠기-가새 시스템이 구조물에 전달하는 힘은 Fig. 1(b)에서 확인할 수 있듯이 마찰감쇠기에 미끄러짐이 발생하기 전에는 가새에 의한 탄성 복원력만 전달되고, 미끄러짐이 발생한 이후에는 일정한 크기의 힘이 구조물에 작용하게 되어, 전체 구조물-마찰감쇠기-가새 시스템은 Fig. 1(c)

와 같은 이선형 거동을 보인다^(6,7).

Fig. 1에서 k_f , k_b , k_{slip} 은 각각 구조물 강성, 가새 강성, 그리고 마찰감쇠기의 슬립하중을 나타낸다. 가새-마찰 감쇠기를 사용함으로써 전체 시스템의 초기 강성이 증가했으며, 이력거동을 보이지 않는 원 구조물과 달리 통합된 시스템은 일정한 크기의 힘 보다 큰 하중이 오는 경우에는 이력거동을 보임으로써 입력 에너지를 소산시킬 수 있다. 즉 가새-마찰감쇠기의 설치는 구조물의 초기강성의 증가에 따른 주기 감소(진동수 증가)와 에너지 소산에 따른 감쇠비 증가를 가져온다.

통합 시스템의 등가 항복강도 f_y 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} f_y &= f_{slip} + k_f d_y = f_{slip} + k_f \frac{f_{slip}}{k_b} \\ &= f_{slip} + \frac{f_{slip}}{SR} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, SR 은 구조물 강성에 대한 가새강성의 비를 나타낸다.

식 (1)에서 가새강성이 증가함에 따라 통합시스템의 항복하중은 마찰감쇠기의 미끄러짐 하중 값에 가까워지며, 항복변위는 작아짐을 알 수 있다. 즉 가새강성이 증가함에 따라 마찰감쇠기에 미끄러짐이 발생하기 쉬우며, 마찰감쇠기가 이력거동을 보이는 구간의 크기가 증가한다.

2.2 등가선형 시스템

능력 스펙트럼법에서는 이선형 이력거동을 보이는 시스템을 등가주기와 등가감쇠비를 가지는 선형 시스템을 치환하여 최대변위를 예측한다. Fig. 2(a)는 이

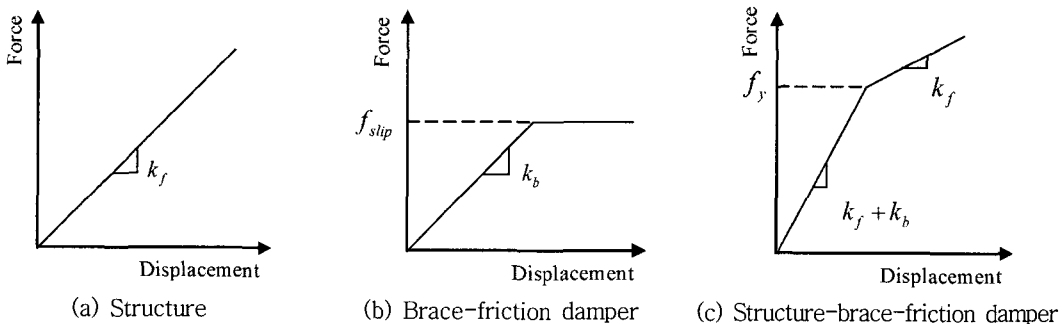
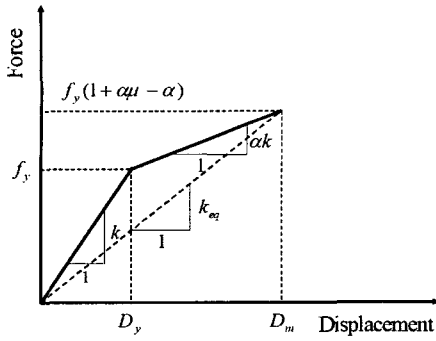
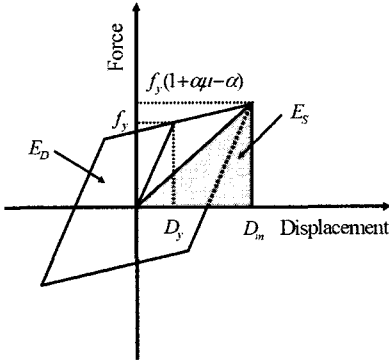


Fig. 1 Force-displacement relationship



(a) Bilinear system



(b) Effective damping by hysteresis

Fig. 2 Inelastic behavior of single-degree-of-freedom system

선형 시스템의 힘-변위 관계를 Fig. 2(b)는 이력에너지(E_D)와 탄성에너지(E_S)의 관계를 보여준다. ATC-40에서는 구조물의 연성도($\mu = D_n/D_y$)와 항복 후 강성비(α)를 이용하여 등가주기(T_{eq})와 등가감쇠비(ξ_{eq})를 산정하였다⁽¹⁾.

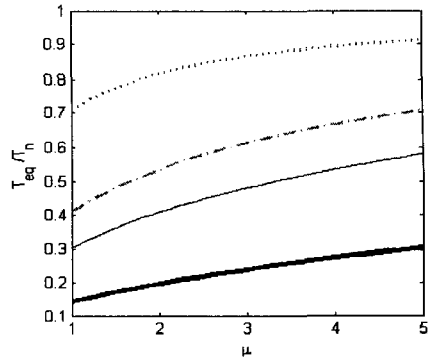
$$T_{eq} = T_i \sqrt{\frac{\mu}{1 + \alpha\mu - \alpha}} \quad (2)$$

$$\xi_{eq} = \frac{E_D}{4\pi E_S} = \frac{2(\mu - 1)(1 - \alpha)}{\pi \mu(1 + \alpha\mu - \alpha)} \quad (3)$$

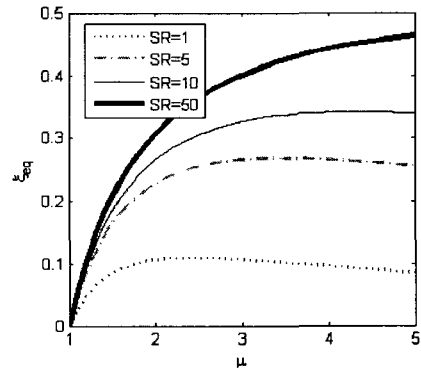
여기서, T_i 는 건물-가새-마찰감쇠기 시스템에서 마찰감쇠기에 미끄러짐이 발생하기 전의 초기 강성에 따른 고유주기이다. α 는 항복 전후 강성비로 SR 과는 다음 관계를 가진다.

$$\alpha = \frac{k_f}{k_f + k_b} = \frac{1}{1 + k_b/k_f} = \frac{1}{1 + SR} \quad (4)$$

식 (2)~(3)을 구조물의 주기 T_n 과, SR 에 대한 식



(a) Equivalent period



(b) Equivalent damping ratio

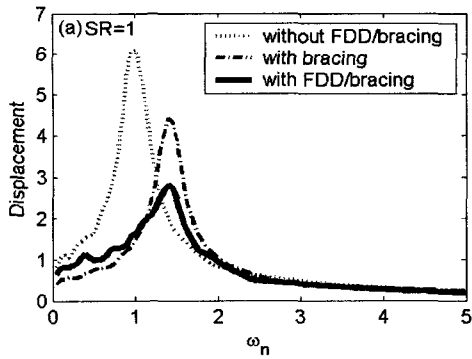
Fig. 3 Equivalent linear system

으로 다시 쓰면 다음과 같다.

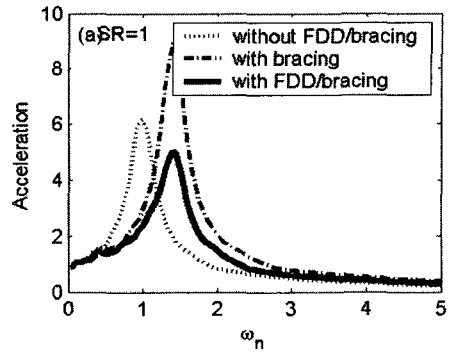
$$T_{eq} = T_n \sqrt{\frac{\mu}{\mu + SR}} \quad (5)$$

$$\xi_{eq} = \frac{2(\mu - 1)SR}{\pi \mu(\mu + SR)} \quad (6)$$

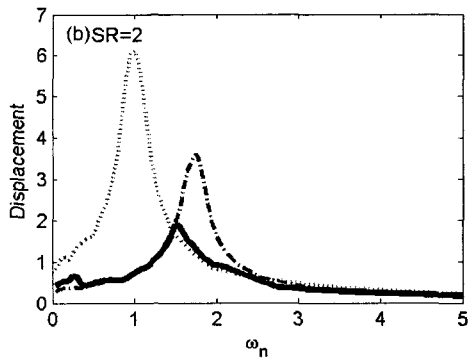
Fig. 3(a), (b)는 각각 식 (5)와 식 (6)에 의해 계산된 등가시스템의 원구조물에 대한 주기비 및 등가감쇠비를 보여준다. Fig. 3(a)에서 주기비는 μ 가 증가함에 따라 증가하고, SR 이 증가함에 따라 감소함을 알 수 있으며, 이는 구조물의 소성변형이 증가함에 따라 전체시스템의 유효강성이 감소하였고, 가새강성이 증가함에 따라 전체시스템의 유효 강성이 증가하여 주기에 변화가 발생하였음을 의미한다. Fig. 3(b)는 등가감쇠비가 최대가 되는 μ 가 특정 SR 에 대하여 존재함을 보여준다. SR 이 증가함에 따라 최대 등가감쇠비를 산정하는 μ 의 값은 점차적으로 증가함을 알 수 있으며, 동일한 μ 에 대하여서는 SR 이 증가함에 따라 등가감쇠비가 증가한다. 이는 가새강성이 증가



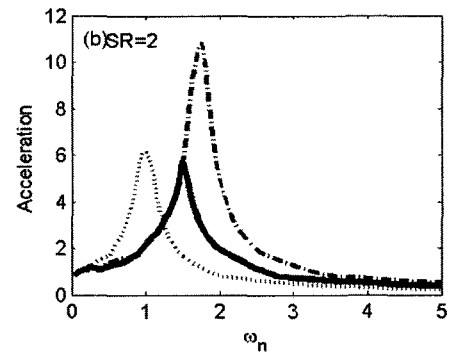
(a) $SR=1$



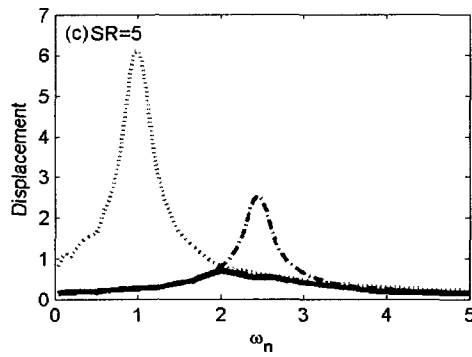
(a) $SR=1$



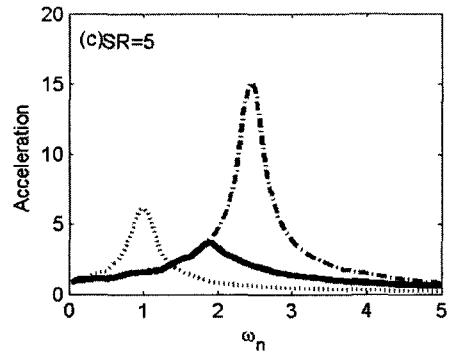
(b) $SR=2$



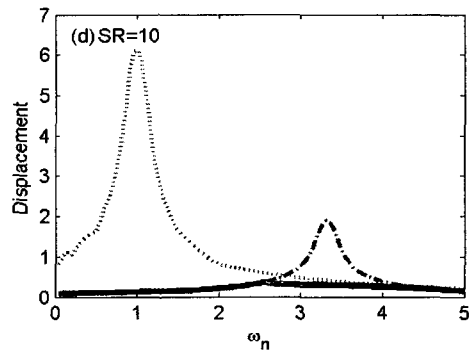
(b) $SR=2$



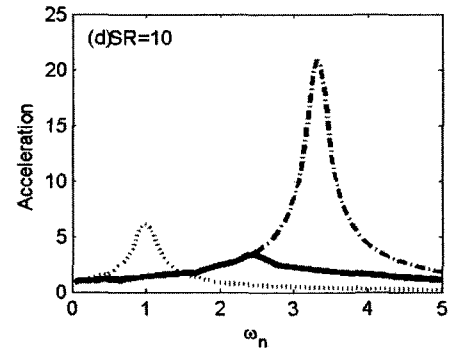
(c) $SR=5$



(c) $SR=5$



(d) $SR=10$



(d) $SR=10$

Fig. 4 Peak displacement under harmonic excitation

Fig. 5 Peak acceleration under harmonic excitation

하면 가새-마찰감쇠기 시스템에 힘이 집중되고 이 힘에 의해 마찰감쇠기에서 미끄러짐이 쉽게 발생하기 때문이다. 또한 SR 이 작은 경우 최적의 감쇠비를 가지는 연성도가 존재함을 확인할 수 있다.

2.3 조화하중 해석

Fig. 4와 5는 각각 질량 정규화 되었고 1초의 주기와 5%의 감쇠비를 가지는 단자유도 시스템을 크기가 1인 조화하중으로 가진한 경우의 가진 진동수에 따른 최대변위응답과 최대가속도응답을 보여준다. 마찰감쇠기의 최대 마찰력은 주어진 하중에 대하여 미끄러짐을 발생시키지 않는 크기의 50%로 설정하였다.

Fig. 4에서 가새에 의해 증가된 강성의 영향으로 구조물의 고유진동수가 증가했음을 알 수 있다. 가새강성의 구조물 강성에 대한 상대적인 크기를 의미하는 SR 이 증가할수록 고유진동수가 증가한다. 일반적인 가새시스템이 공진 시 최대변위 값의 크기는 줄어들게 하나 감쇠를 증가시키지 않기 때문에 특정 진동수에서 공진하는 경향은 줄이지 못한 반면, 마찰형 감쇠기가 설치된 경우에는 공최대변위의 크기와 함께 공진하는 경향을 줄임을 확인할 수 있다. $SR=10$ 인 경우에는 특정 진동수 성분이 강한 경향이 거의 사라진다.

Fig. 5 또한 Fig. 3에서와 같이 SR 이 증가함에 따라 고유진동수가 증가함을 보여준다. 가속도 응답의 경우에는 감쇠를 증가시키지 못하는 가새시스템이 아무런 제어효과를 보여주지 못하며 오히려 증가된 고유진동수로 인하여 공진 시 최대응답을 증폭시키는 결과를 가져온다.

그러나, 마찰형 감쇠기가 설치된 경우에는 에너지 소산이 발생함으로써 공진 시 최대 가속도응답의 크기뿐 아니라 거의 대부분의 가진진동수 대역에서 가속도 응답을 줄임을 확인할 수 있다.

3. 소형 마찰감쇠기 성능실험

Fig. 6과 같은 가진장치를 사용하여 회전형 마찰감쇠기의 성능실험을 수행하였다. 회전형 마찰감쇠기는 Mualla 등과 Damtech 회사에서 개발된 것으로 최대 회전 모멘트의 크기를 토크를 통해 조절할 수 있다⁽⁶⁾. Fig. 6은 가진기, 가진기에 부착된 강제

봉, 강제봉의 끝단에 부착된 가속도계, 그리고 가속도 증폭기의 모습을 보여준다. 가진기는 필요한 진동 신호의 발생과 이를 제어할 수 있는 제어기와 신호에 의해 전력을 증폭시키는 전력 증폭기, 그리고 실제 진동을 발생시키는 부분으로 구성된다. 가진기의 성능은 사인 하중 310N, 최대가속도 93g이다. 가진기의 바닥판에 강제봉을 연결하여 특정 부분에 힘을 전달할 수 있도록 하였으며, 강제봉의 끝단에 가속도계를 설치하였다. 측정된 가속도는 필터가 내장된 가속도 앰프를 변위신호로 바뀌어 컴퓨터에 저장된다. 또한 소형 토크렌치를 사용하여 회전 마찰감쇠기의 토크를 측정하였다. 회전 마찰감쇠기의 토크는 볼트에 수직력으로 전달되어 마찰면에 작용하는 수직력의 크기를 결정하기 때문에 이 토크에 따라 마찰감쇠기의 최대마찰력이 결정된다 할 수 있다.

Fig. 7은 회전 마찰감쇠기 실험 전경을 보여준다. 일반적으로 보 부재와 연결되는 회전 마찰감쇠기의

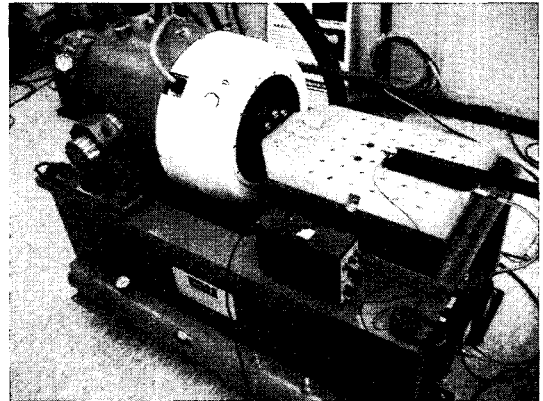


Fig. 6 Exciter

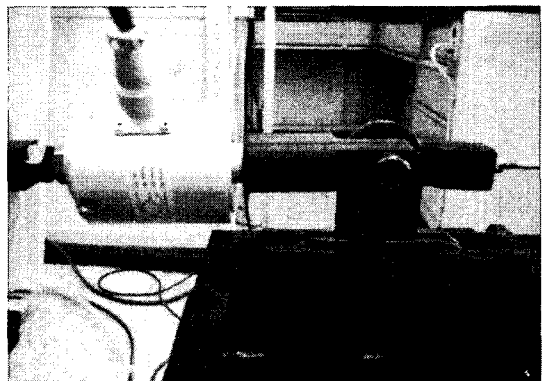


Fig. 7 Load cell and friction damper

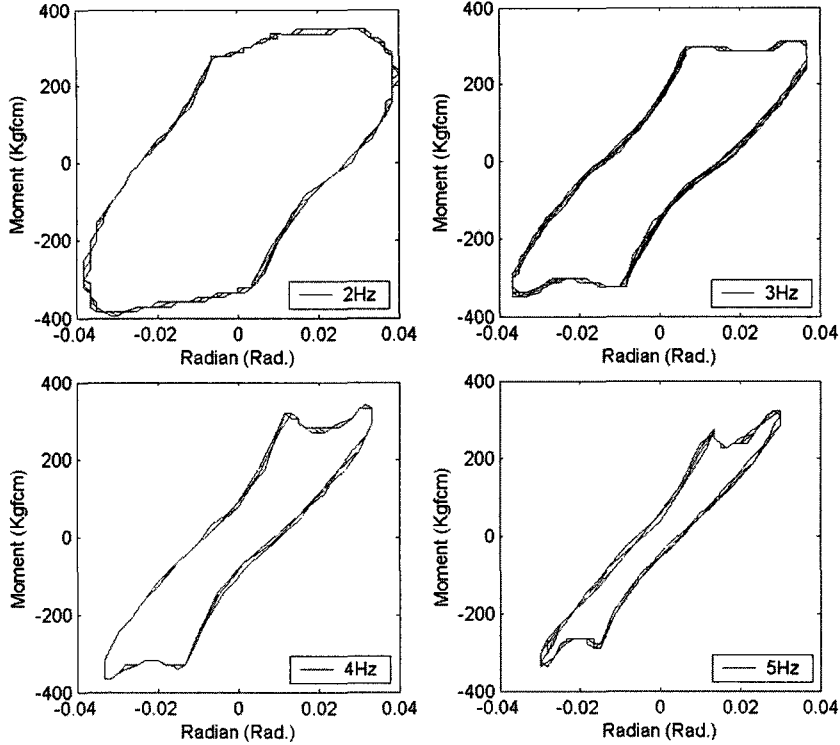


Fig. 8 Frequency dependence test

한쪽 단과 핀 접합된 강철부재와 가진기의 바닥판에 연결된 강철봉 사이에 로드셀을 설치하여 마찰감쇠기의 한쪽 단에 걸리는 하중을 측정하였다. 또한, 일반적으로 가새 부재와 연결되는 감쇠기의 하단 부의 양쪽 부재는 바닥판에 강 접합된 받침대와 연결된 지그와 핀 접합 후 볼트를 이용하여 인장력을 가함으로써 마찰감쇠기의 패드에 추가적인 수직력의 증가 없이 수평방향의 이동을 방지하였다. 감쇠기에 모멘트를 발생시키는 힘의 방향과 로드셀의 하중방향이 일치하지 않게 된다. 따라서, 측정한 하중을 다음 식을 사용하여 보정하여 마찰감쇠기에 걸리는 모멘트를 구하였다.

이 실험의 경우 로드셀의 하중 측정 방향이 항상 회전의 중심과 수직을 이루지 못한다. 수직축에서 벗어나는 경우

마찰감쇠기에 걸리는 모멘트는 다음과 같다.

$$M_f = F \times h_a \quad (7)$$

여기서, h_a 는 마찰감쇠기 회전 마찰면의 중심과 가력하는 강철막대사이의 수직거리이고, F 는 마찰감쇠

기에 회전을 일으키는 방향의 힘으로 로드셀에 측정되는 힘 (F_L)과 다음 관계를 가지고 있다.

$$F_L = F \cos \theta \quad (8)$$

여기서, θ 는 로드셀 방향의 변위 x 와 h_a 로부터 얻어진다.

$$\theta = \tan^{-1}(x/h_a) \quad (9)$$

따라서, 식 (7)~(9)를 이용하여 로드셀에 측정된 힘으로부터 회전 마찰감쇠기에 걸리는 모멘트를 구할 수 있다.

$$M_f = \frac{F}{\cos(\tan^{-1}(x/h_a))} h_a \quad (10)$$

3.1 주파수 의존성 실험

Fig. 8은 가진 주파수에 따른 마찰감쇠기의 모멘트-회전각의 관계를 보여준다. Fig. 8에서 주파수가 바뀌어도 최대 항복 마찰 모멘트의 크기는 변하지 않음을 알 수 있다. 이는 회전형 마찰감쇠기가 주파

수에 관계없이 일정한 크기의 모멘트에서 항복한다는 사실을 의미한다. 특히, 가진주파수가 증가함에 따라 이력곡선의 면적이 작아져 변형이 작은 구간에서는 강성체로 마찰감쇠기가 작용함을 알 수 있다.

3.2 토크 의존성 실험

마찰감쇠기의 최대마찰력은 수직력에 비례하고 이 수직력은 회전 마찰감쇠기의 토크에 선형 비례하는 형태를 가진다. 따라서, 일정한 팔길이를 곱하여 얻어지는 모멘트도 토크에 비례하여 증가해야 한다. Fig. 9는 동일한 신호로 가진하는 경우에 토크의 변화에 따른 모멘트-회전각 곡선의 변화를 보여준다. Fig. 8로부터 토크가 증가함에 따라 최대 회전 마찰 모멘트도 증가함을 알 수 있다. 그러나, 이력곡선의 형태는 거의 변하지 않으면서 단순히 최대 모멘트의 크기만 바뀌는 것을 알 수 있다. 이러한 사실은 동일한 마찰 패드를 사용하면서도 단순히 토크를 조절

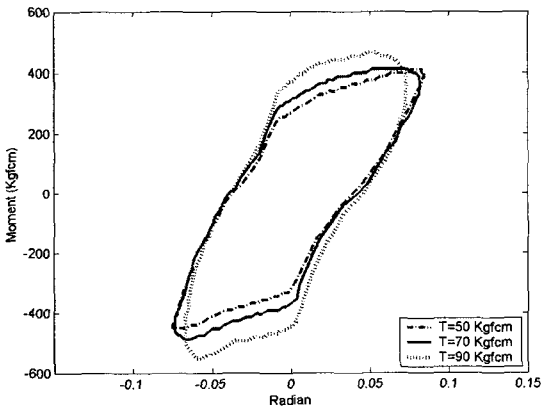


Fig. 9 Torque dependence test

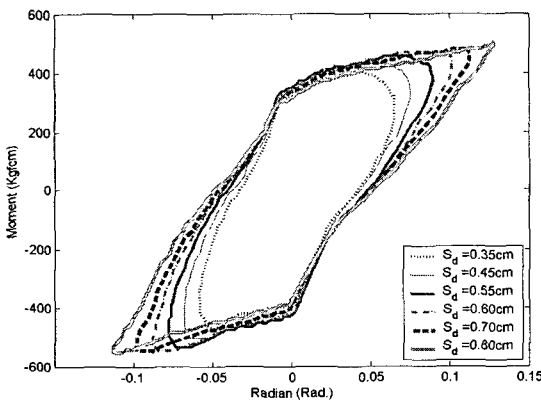


Fig. 10 Displacement dependence test

하여 쉽게 설계 회전 마찰력을 조절할 수 있음을 의미한다.

3.3 변위 의존성 실험

Fig. 10은 가진 변위의 크기에 따른 마찰감쇠기의 모멘트-회전각의 관계를 보여준다. Fig. 10으로부터, 변위의 크기에 관계없이 일정한 모멘트에서 마찰감쇠기가 미끄러지는 것을 알 수 있다. 이는 회전형 마찰감쇠기가 일정한 크기의 모멘트와 회전각에서 항복한다는 사실을 의미한다. 그리고, 변위의 크기가 증가함에 따라 이력곡선의 면적이 증가함을 알 수 있다.

3.4 단자유도 구조물 제어 성능 실험

회전형 마찰감쇠기의 구조물 제어 성능을 알아보기 위해, 단자유도 구조물에 조화하중을 가진한 후 감쇠기 설치 전후의 변위응답을 측정하였다. Fig. 11은 조화하중 실험전경을 보여준다. 1경간 1층 프레임구조물은 보의 강성이 기둥의 강성에 비하여 매우 크기 때문에 횡 방향 자유도 하나만을 가지는 단자유도 구조물이다. 하중을 보에 직접 가하기 위해서 가진기의 바닥판에 x-bracing 보강된 프레임구조물을 설치한 후 이 프레임에 가진력을 전달하기 위한 강체 봉을 설치하였다.

Fig. 12(a), (b), (c), (d)는 각각 조화하중의 가진주파수가 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz 그리고 4 Hz인 경우의 변위응답을 보여준다. 회전 마찰감쇠기를 설치함으로써 변위응답이 줄어드는 것을 알 수 있다.

Fig. 13(a)와 (b)는 각각 가진주파수에 따른 최대변위응답과 변위응답의 표준편차를 보여준다. 이 그림

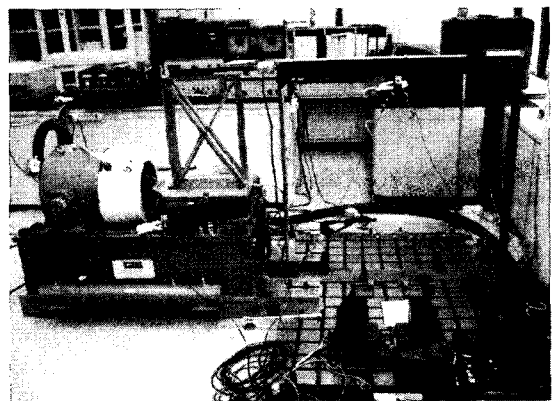
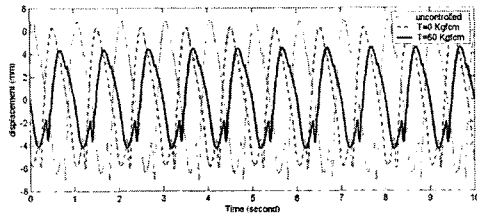
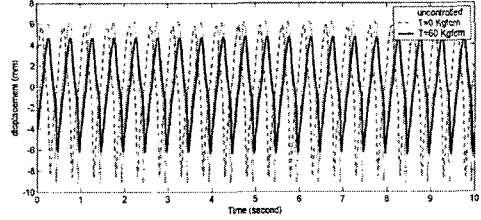


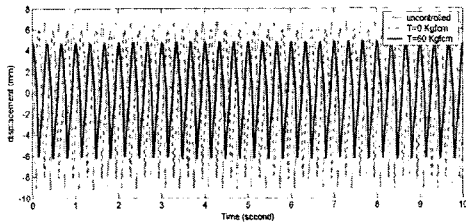
Fig. 11 Single-story frame excitation test



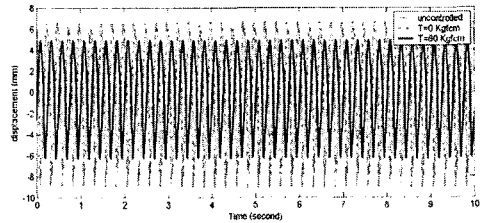
(a) 1 Hz excitation



(b) 2 Hz excitation

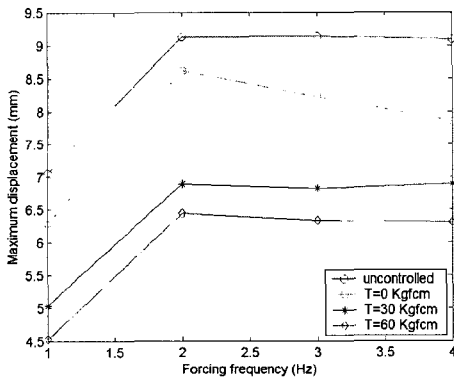


(c) 3 Hz excitation

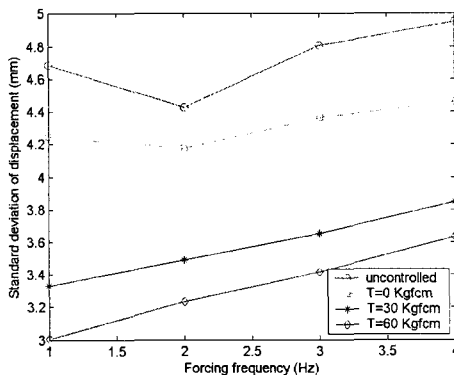


(d) 4 Hz excitation

Fig. 12 Time history of displacement response



(a) Peak value



(b) Standard deviation

Fig. 13 Displacement response

들에서도 마찰감쇠기가 구조물의 변위응답제어에 효율적임을 확인할 수 있다.

4. 실물 3층 구조물 진동대 실험

실물 크기 구조물에 마찰감쇠기를 설치하고 진동대 실험을 수행하여 마찰감쇠기의 지진응답저감 효과 및 감쇠비 증가효과를 조사하였다.

4.1 실험체 및 계측시스템

시험모델은 Fig. 14에서 보는 바와 같이 3층 철골 구조물이며, 각 층마다 약 1 ton의 콘크리트 질량을 6개씩 탑재하였다. 시험모델의 하부는 한국기계연구원의 대형 6자유도 진동대에 M32 bolt를 이용하여 고정하였다. 각 층 사이의 기둥은 길이 2 m인 150×150의 i-beam이며, 단면 특성은 단면적 40.14 cm², 단면관성모멘트 1640 cm⁴(강축) 및 563 cm⁴(약축)과 같다. 약축방향 랜덤하중 가진을 통해 파악된 구조물의 약축방향 1차 고유진동수와 감쇠비는 각각 1.418 Hz, 1.15%이다. 시험모델의 가속도 응답과 변위 응답을 측정하기 위하여 각 층마다 양쪽 기둥의 상단에 가속도계 1개씩을 부착하였으며, 각 층의 중앙부에 변위계를 설치하였다. 변위계는 진동대의 외부 바닥에 고정된 보조기둥과의 변위차를 측정하므로 시험모델의 변위응답은 진동대의 변위와 변위계에서 측정된 변위의 차로써 평가 한다. 한편, 시험시 기둥에 발생하는 응력의 최대값을 측정하고, 시험모델의 가진 수준을 안전한 범위에서 결정하기 위하여 1층 기둥의 좌우측 최하부에 스트레인게이지를

1개씩 부착하였다. 또한 진동대의 가속도 신호와 속도 및 변위 신호를 동시에 측정하였다. Fig. 15는 시험모델에 부착한 계측기들의 위치를 도식화한 것이며, 여기서 A는 가속도계, L은 변위계, S는 스트레인 게이지를 의미한다.

4.2 마찰감쇠기 설치형상

시험모델은 감쇠기 2종을 각각 설치한 경우와 설치하지 않은 경우로 분류되며, Fig. 16(a)는 x형 브레이스에 연결된 감쇠기-1형과, Fig. 16(b)는 k형 가새에 회전형 마찰감쇠기가 설치된 감쇠기-2형의 설치형상을 보여준다.

4.3 랜덤(Random)파 가진 실험

0.5~20 Hz 대역의 주파수성분을 가지는 랜덤파를 이용한 진동대 실험을 수행하여 가새-마찰감쇠기가 설치된 구조물의 주파수와 감쇠비를 식별하였다. 시스템 식별은 Matlab 5.3의 진동수 영역 시스템 식별 (frequency domain identification) 내장함수를 이용

하여 수행되었다.

Fig. 17은 랜덤파의 시간이력과 파워스펙트럼을 보여준다. Fig. 17로부터 0.5~20 Hz 미만의 주파수 성분이 균등하게 구현되었음을 알 수 있다. Fig. 18은 Fig. 17의 랜덤파에 상수배를 하여 최대가속도가 0.03 g가 되도록 크기 조정된 랜덤파로 가진하고, 토크 400 kgf-cm의 감쇠기-1형을 설치한 경우의 바닥 판 가속도에 대한 2층 가속도에 대한 전달함수를 보여준다. 2층 가속도는 양 기둥에서 측정된 결과를 평균한 값을 사용하였다. Fig. 18로부터 식별된 결과와 실험결과가 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있으며, 식별된 1-3차 고유진동수는 각각 2.364 Hz, 6.653 Hz, 그리고 9.54 Hz 이고, 1-3차 감쇠비는 각각 6.41%, 2.6%, 그리고 1.69%이다. 구조물의 전체 응답을 결정하는 1차 고유진동수와 감쇠비가 각각 1.67배, 5.57배 증가했음을 알 수 있다. 이는 식 (5)와 식 (6)에서 구조물-가새-마찰감쇠기의 주기는 원 구조물에 비해 짧아지고, 감쇠비는 증가하는 사실과 일치한다.

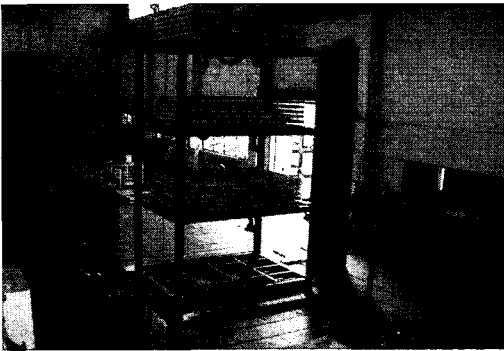


Fig. 14 Structure test model

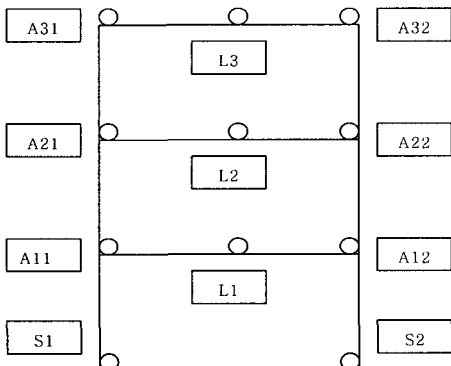
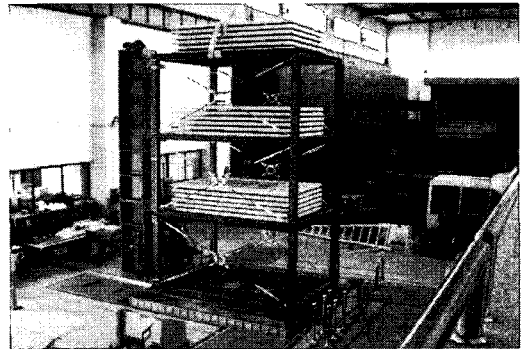
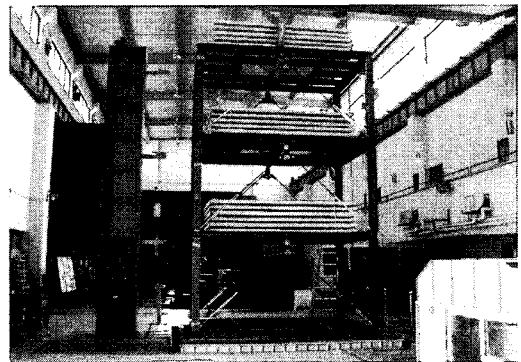


Fig. 15 Sensor installation



(a) Model with damper-1



(b) Model with damper-2

Fig. 16 Structure-damper test models

Fig. 19는 감쇠기의 토크가 400 kgf·cm인 경우의 지반가속도의 크기와 감쇠기의 설치형상에 따른 모드별 고유주기 및 감쇠비의 변화를 보여준다. 감쇠기-2형과 비교할 때 감쇠기-1형이 고유주기와 감쇠

비 모두 크다는 것을 확인 할 수 있다. 이는 동일한 토크로 조이는 경우 감쇠비-1형에서 동일한 하중에 대하여 감쇠기의 미끄러짐 현상이 쉽게 발생한다는 것을 의미하며 에너지 소산을 보이는 구간의 크기가 크기 때문에 감쇠비가 크게 증가한다. 감쇠기-2형의 경우 현재의 가진 신호의 크기는 미끄러짐 현상을 보이기에 작아서 단순히 구조물의 강성을 증가시키는 역할을 주로 수행했음을 알 수 있다. 가진신호의 크기에 따른 변화경향을 살펴보면 가진신호의 크기가 증가함에 따라 고유주기와 감쇠비 모두 증가함을 알 수 있다. 즉, 가진 하중의 크기가 증가하여 마찰 감쇠기에 미끄러짐이 발생하는 변위에 대한 최대변위의 비가 클 때 감쇠기의 미끄러짐이 발생하는 구간의 크기가 증가하여 감쇠비가 증가하였다.

Fig. 20은 최대가속도의 크기가 0.02g로 스케일 조정된 랜덤하중을 가진한 경우의 해석결과와 실험 결과를 비교한 그림이다. 구조물의 강성은 바닥판의 거동이 강제인 전단건물로 가정하여 구성하였으며, 질량은 각 층 바닥판에 집중된 것으로 가정하였다. 1층 기둥 하부의 변형도는 각 층에 작용하는 지진력에

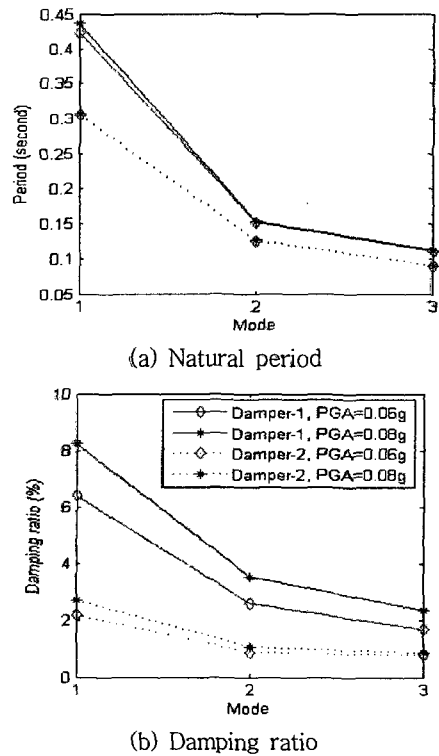
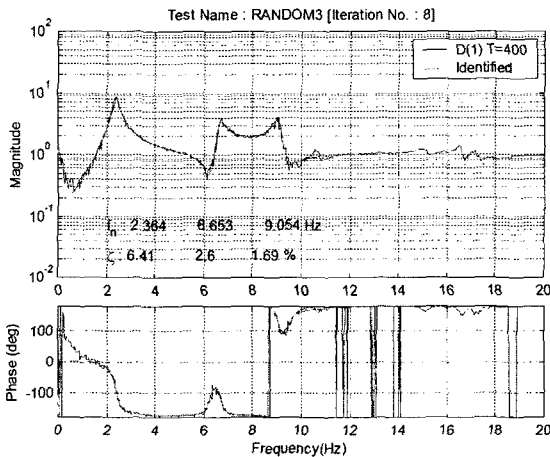
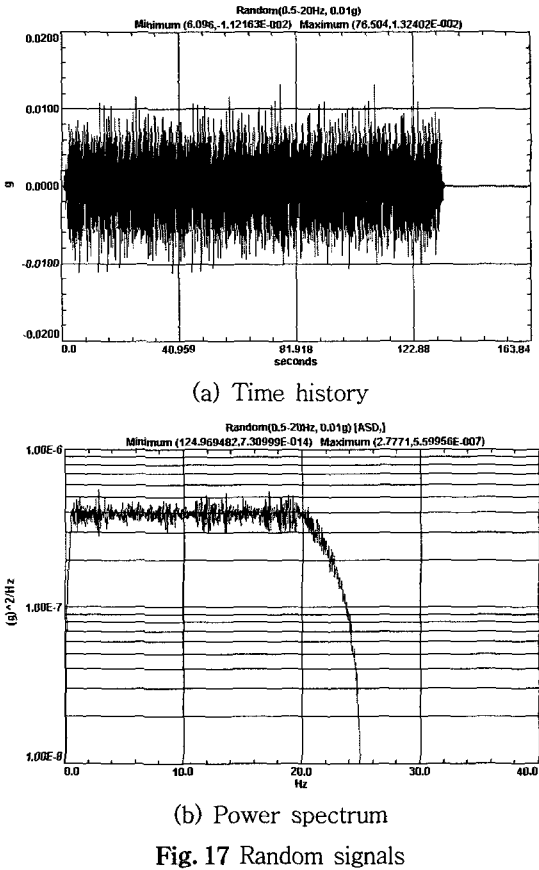


Fig. 18 Transfer function(damper-1, torque=400 kgf·cm)

Fig. 19 Variation of modal characteristics

Table 1 El-Centro earthquake excitation test results

PGA	Torque (kgf-cm)	Acceleration (g)				Displacement (mm)				Strain ($\mu\epsilon$)
		Base	1st floor	2nd floor	3rd floor	Base	1st floor	2nd floor	3rd floor	
0.105 g	100	0.080	0.080	0.086	0.093	5.81	5.20	9.27	10.5	72.3
	200	0.076	0.082	0.082	0.087	5.77	5.28	9.10	10.5	72.4
	300	0.066	0.066	0.085	0.098	5.63	5.22	9.53	10.5	75.6
	400	0.066	0.073	0.084	0.092	5.68	4.94	8.80	10.1	70.0
	500	0.066	0.075	0.080	0.094	5.69	5.00	8.98	9.94	70.9
0.14 g	Non-control	0.067	0.132	0.145	0.223	5.79	10.8	20.7	28.5	153.
	300	0.109	0.097	0.122	0.160	7.42	8.01	15.2	18.2	115.
	400	0.104	0.089	0.116	0.153	7.43	6.93	13.4	16.6	97.9
	500	0.104	0.095	0.114	0.142	7.40	6.90	12.9	15.8	97.5
	Non-control	0.090	0.176	0.194	0.297	7.72	14.4	27.6	38.0	205.

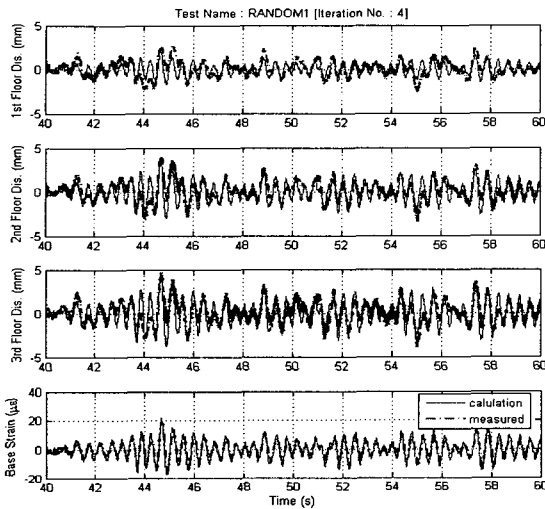


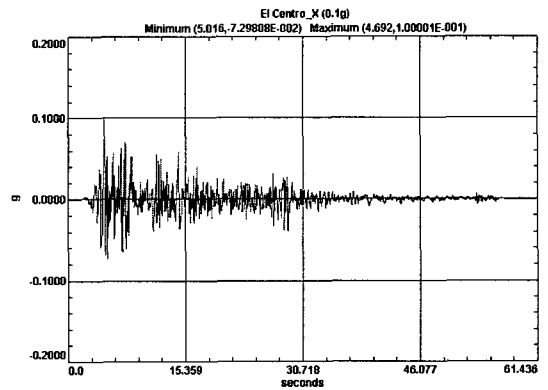
Fig. 20 Comparison between analytical and experimental results

의해 발생하는 전도모멘트에 의해 발생하는 최대 휨 변형도를 계산하였다. 해석 및 실험결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있으며, 특히 변형도의 경우 해석 및 실험결과의 차이가 매우 작다.

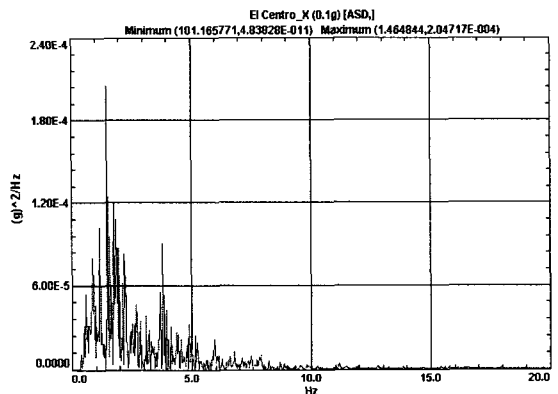
4.4 El Centro 가진 실험

실제 지진하중인 El Centro 지반가속도로 가진하여 마찰감쇠기의 최대응답 감소성능을 알아보았다. 감쇠기의 경우 랜덤 가진을 통해 감쇠기-1형이 감쇠기-2형과 비교하여 실험실의 안전성을 고려한 현재의 가진 조건에서 구조물의 감쇠를 더욱 크게 증가시키기 때문에 감쇠기-1형의 결과만을 조사하였다. Fig. 21은 El Centro 지진(1940, NS성분)하중을 구현하기 위해 구동된 진동대의 바닥판 가속도의 시간 이력과 파워스펙트럼을 보여준다.

Table 1은 각각 최대지반가속도(peak ground



(a) Time history



(b) Power spectrum

Fig. 21 El-Centro earthquake base acceleration

acceleration, PGA)가 0.105 g, 0.14 g로 스케일 조정된 지진으로 가진한 경우의 바닥판 및 각 층 변위와 가속도의 최대값을 보여준다. PGA 0.105 g인 지진응답 분석 결과 비제어 시 보다 가속도는 60% 수준으로 저감되었고, 변위와 스트레인도 50% 이하의 수준으로 저감되어, 마찰감쇠기가 구조물의 최대지진 응답을 크게 줄임을 확인할 수 있다. PGA 0.14 g인

경우 비제어된 경우에 대한 응답감소효과는 더욱 명확해졌으며, 이로 부터 마찰감쇠기는 미끄러짐 현상이 충분히 발생하도록 지진응답이 큰 경우에 보다 효과적임을 확인할 수 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 에너지 소산형 감쇠장치의 하나인 마찰형 감쇠장치의 지진응답제어 성능을 수치해석 및 3층 크기의 실물 구조물에 대한 진동대 실험을 통해 검증하였다.

가새-마찰형 감쇠장치가 설치된 구조물은 이선형 거동을 보이는 구조물로 모델링될 수 있으며, 구조물 강성에 대한 가새강서의 비가 증가함에 따라 등가 주기비는 감소하고 등가감쇠비는 증가한다. 이는 가새 강성이 증가하면 가새-마찰감쇠기 시스템에 힘이 집중되고 이 힘에 의해 마찰감쇠기에서 미끄러짐이 쉽게 발생하기 때문이다. 또한 SR 이 작은 경우 최적의 감쇠비를 가지는 연성도가 존재함을 확인할 수 있었다. 또한, 소형 마찰형 감쇠기에 대한 성능실험을 통해 마찰형 감쇠장치의 주파수, 변위, 그리고 토크의 존재성을 파악하였다. 두 가지 형태의 마찰감쇠기가 설치된 실물크기 3층 구조물에 대한 랜덤하중 진동대 실험을 수행하여 가새-마찰감쇠기가 구조물에 미치는 감쇠비 및 진동수 증가 효과를 정량적으로 평가하였다. 감쇠기-2형과 비교할 때 감쇠기-1형이 고유주기와 감쇠비 모두의 증가효과가 크다는 것을 확인할 수 있다. 이는 동일한 토크로 조이는 경우 감쇠비-1형에서 동일한 하중에 대하여 감쇠기의 미끄러짐 현상이 쉽게 발생했다는 것을 의미하며 에너지 소산을 보이는 구간의 크기가 크기 때문에 감쇠비가 크게 증가한 것이다. 감쇠기-2형의 경우 현재의 가진 신호의 크기는 미끄러짐 현상을 보이기에 작아서 단순히 구조물의 강성을 증가시키는 역할을 주로 수행하였다. 가진 신호의 크기가 증가함에 따라 고유주기와 감쇠비 모두 증가하였으며, 이는 이선형 모델을 통해 예측한 바와 같이 가진 하중의 크기가 증가하여 마찰감쇠기에 미끄러짐이 발생하는 변위에 대한 최대변위의 비가 클 때 감쇠기의 미끄러짐이 발생하는 구간의 크기가 증가하여 감쇠비가 증가한 것이다. PGA 0.105 g인 El Centro 지진응답 분석 결과 비제어 시 보다 가속도는 60 % 수준으로 저감되었고, 변위와 스트레

인은 50 % 이하의 수준으로 저감되어, 마찰감쇠기가 구조물의 최대지진응답을 크게 줄임을 확인할 수 있었다. PGA 0.14 g인 El Centro 지진으로 가진한 경우 비제어된 경우에 대한 응답감소효과는 더욱 명확해졌으며, 이로 부터 마찰감쇠기는 미끄러짐 현상이 충분히 발생하도록 지진응답이 큰 경우에 보다 효과적임을 확인할 수 있다.

참 고 문 헌

- (1) Applied Technology Council, 1996, "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings", ATC-40, Applied Technology Council, Redwood City, California.
- (2) Federal Emergency Management Agency, 1997, "NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings", FEMA 273, Federal Emergency Management Agency.
- (3) Li, C., 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.
- (4) Grigorian, C. E., Yang, T. S., Popov, E. P., 1992, "Slotted Bolted Connection Energy Dissipators", Report of National Science Foundation, University of California, Berkeley.
- (5) Cherry, S., Filiatrault, A., "Seismic Response Control of Buildings Using Friction Dampers", Earthquake Spectra 1993, Vol. 9, pp. 447~466.
- (6) Moreschi, L. M., Singh, M. P., 2003, "Design of Yielding Metallic and Friction Dampers for Optimal Seismic Performance", Earthquake Engineering Structures Dynamics, Vol. 32, pp. 1291~1311.
- (7) Mualla, I., Nielsen, L. O., Chouw, N., Belev, B., Liao, W. I., Loh, C. H., Agrawal, A., 2002, "Enhanced Response through Supplementary Friction Damper Devices", Balkema, Wave Propagation, Moving Load and Vibration Reduction: Proceedings of the International Workshop WAVE 2002, pp. 121~128.