

# 보단부 회전형감쇠기를 이용한 대형구조물의 진동제어

## Vibration Control of Large Scale Structure with Beam-End Rotation Type Friction Damper

이 상 현†·우 성 식\*·정 란\*\*·조 승 호\*\*\*

Lee Sang-Hyun, Woo Sung-Sik, Chung Lan, Cho Seung-Ho

Key Words : 리모델링(Remodeling), 수직증축구조모듈(VERTICAL extension structural module, VESM), 회전형 감쇠장치 (Rotational damper)

### ABSTRACT

The vertical extension of a building in general remodeling process increases both gravity and seismic loads by simply adding masses to the building. In this study, a vertical extension structural module (VESM) is proposed for enhancing seismic performance of the existing buildings by utilizing the story-increased parts. The proposed VESM is composed of steel column, steel beam, and beam-end rotational damper. The steel columns are connected to the shear walls and transfer the wall rotation in out-of plane to the steel beam, and then the beam-end rotational damper dissipates the earthquake-induced energy. Numerical analysis result from a cantilever beam of which end-rotation is restricted by rotational damper indicates that the displacement, base shear, and base overturning moment of the existing structures showing cantilever behavior can be significantly reduced by using the proposed method. Also, it is observed that friction-type rotational damper is effective than viscous one.

### 1. 서 론

우리나라만의 독특한 주거구조방식인 철근콘크리트 벽식 구조 중 1988년 이전에 건설된 아파트는 시공의 용이성을 위하여 대부분 터널폼으로 시공되어 장변 방향으로 내력벽이 배치되어 있지 않아 내진성능이 크게 떨어진다 (그림 1). 단변방향으로 주축을 가지는 세대간벽의 경우 단변방향으로 슬래브가 벽체의 휨을 구속하는 성능을 거의 가지고 있지 못하여 벽체들이 일체화 되어 거동하지 못하고 독립적으로 거동하며, 벽체 자체의 장변방향 강성 및 휨강도 역시 매우 작기 때문에 장변방향의 강성 및 강도는 매우 작다 [1].

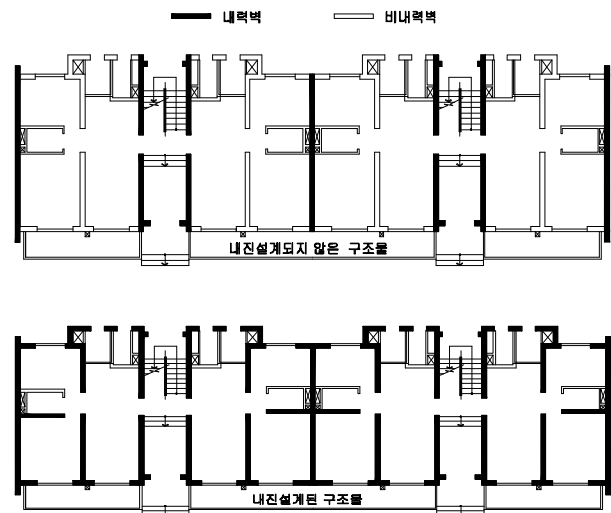


Fig. 1. Plan of Apartment structures: (a) without seismic design (b) with seismic design

† 교신저자; 단국대학교 건축공학과, 조교수

E-mail : lshyun00@dankook.ac.kr

Tel : (031) 8005-3735, Fax : (031) 8005-3735

\* 단국대학교 대학원 건축공학과, 박사과정

\*\* 단국대학교 건축공학과, 교수

\*\*\* 단국대학교 리모델링연구소, 연구원임강사

철근콘크리트 구조물의 내진성능을 보강하는 방법으로는 전단벽, 가새골조, 버트레스 등을 설치하여 건물의 강도와 강성을 증가시키는 방법, 비연성 콘크리트 벽체 혹은 기둥

을 강판이나 탄소섬유시트로 구속함으로써 변형능력을 증가시키는 방법, 그리고 면진장치나 에너지소산형 감쇠기를 설치하여 요구곡선의 크기를 줄이는 방법 등이 있다 [2].

철근콘크리트 전단벽을 추가하는 방안은 비용을 고려할 때 강도와 강성을 동시에 증가시키는데 있어 가장 효율적이고 전통적인 내진보강방안으로 현재도 가장 많이 이용되고 있는 방안이다. 그러나 많은 양의 전단벽을 설치하는 것은 질량이 증가함을 의미하고 이는 지진하중의 증가로 이어져 요구강도 및 기초에 전달되는 전도모멘트가 증가하여 기초 보강량이 과도해지는 문제점을 가지고 있으며, 과도한 기초보강은 전체공사비를 크게 증가시킬 수 있음을 고려해야 한다. 가새골조를 추가하는 것은 전단벽보강과 같이 강도와 강성을 증가시키면서도 질량을 증가시키지 않는 장점을 가지고 있으나 그러나 기존 구조물과 철골부재를 접합하는데 있어 일반적으로 앵커접합을 사용하기 때문에 앵커의 강도 및 개수가 충분하지 않다면 요구된 성능을 확보하기가 어렵다 [3]. 또한 가새골조를 사용한 공법은 건식공법으로 습식공법에 비해 공사시간이 짧으나 장변방향의 기존구조체의 성능을 활용하지 않기 때문에 내진보강을 위해 요구되는 철골량이 많아지며, 강재는 콘크리트에 비해 고가이므로 내진공사비용이 크게 증가된다. 건축물의 외부에 전단벽 혹은 가새골조의 버트레스를 추가하는 것은 별도의 기초시스템을 설치해야 하나 내부공사를 요구하지 않기 때문에 공사비를 절감하는데 있어 유리하다. 변형능력을 증가시키는 방법은 몇몇 부재에 대한 보강으로 변형능력을 확보할 수 있을 때 유효하며, 본 연구의 대상인 벽식구조물과 같이 보강해야 하는 부재의 수가 많은 구조물에는 적합하지 않다. 면진장치를 사용하는 것은 독립기초를 가지는 구조물에는 유효하나 벽식구조물에는 적합하지 않으며, 에너지 소산형 장치를 사용하는 방안도 설치를 위한 별도의 가새시스템을 필요로 하는 단점을 가지고 있으며, 실내에 설치하는 경우 가새골조와 마찬가지로 평면계획에 있어 제약을 가지고 있다.

리모델링공사 시에는 평면확장과 함께 수직증축도 이루어지는 것이 일반적이다. 새로 개정된 주택법에서도 1층을 주차장으로 용도변경하거나 공용면적으로 활용하는 경우 1개 층의 증축을 허용하고 있다. 리모델링 시 수행되는 일반적인 수직증축은 단순히 기존 구조물과 동일한 평면을 가지는 층을 증가시킴으로써 수직 및 수평하중을 증가시키는 불리한 작용을 한다. Hong-Nan Li 등은 수직증축 구조물을 이용하여 기존 구조물의 내진성능을 보강하는 기법을 제안하였다 [4-5]. 이 방법은 그림 2에서와 같이 별도의 기둥을 새로이 설치하고 이 기둥을 이용하여 수직증축 구조물을 지지함으로써 두 개의 신·구 구조체가 독립된 구조체로 거동하게 한 후, 구 구조체의 최상부면과 신 구조체의 최하부면 즉 두 구조체가 수직으로 접합하는 부분에는 마찰층을 설치하고, 수직증축을 위해 설치된 별도의 기

둥과 구 구조체의 슬래브에 수평으로 에너지소산형 감쇠장치를 설치한다. 이 때 두 구조체의 개별적인 거동에 따른 경계면에서 발생한 변위 차에 의해 마찰층과 감쇠장치에 에너지소산이 발생하고, 이를 이용하여 신·구 구조체의 내진응답을 줄이는 방법이다 [4]. 그러나 Hong-Nan Li 등에 의한 방법은 신설 구조체를 지지하기 위한 별도의 수직하중 저항 시스템을 설치해야 하므로 기존구조물이 고층인 경우 적용하기가 어렵다. 또한 기존 구조물과 새롭게 설치되는 구조체가 동일한 주기로 움직이는 경우 내진성능 보강의 효과가 거의 없어지게 되며, 구조물 변위량을 감소시키는 힘의 크기 즉, 내진성능을 시공 이후 조절하기 어렵다는 문제점이 있다.

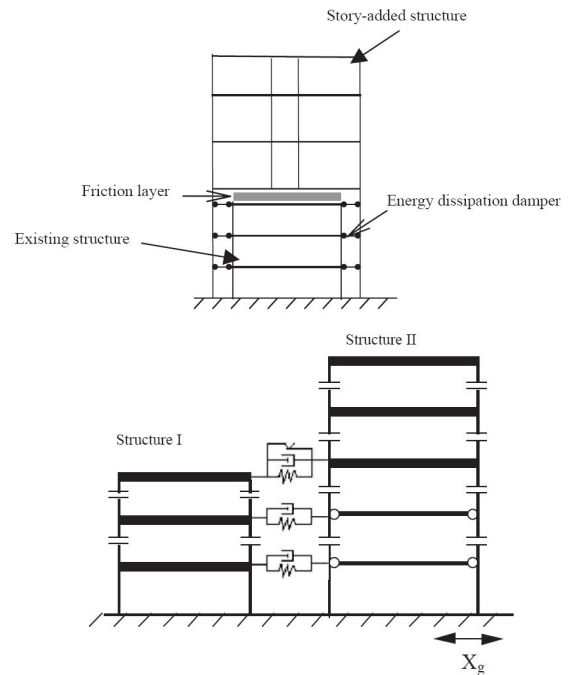


Fig. 2. Story-increased buildings with friction layer and energy-dissipated devices [4]

본 연구에서는 상기와 같은 문제점을 해결하기 위하여 세대간벽의 최상부의 회전을 보단부에 회전형감쇠기가 설치된 수직증축모듈을 이용하여 구속함으로써 진동을 제어하는 방법을 제안하였다. 본 방법은 별도의 기초시스템을 요구하지 않고 상부증축모듈을 직접 세대간벽을 이용하여 지지하기 때문에 고층 구조물에도 용이하게 적용시킬 수 있고, 보 단부의 회전형감쇠기를 교체함으로써 시공이 완료된 이후에도 내진성능을 용이하게 조절할 수 있으며, 구조물의 변위주기에 관계없이 내진성능을 효과적으로 보강할 수 있다. 본 연구에서는 먼저 Hong-Nan Li 등에 의해 제안된 기존 방법에서 마찰력의 크기 및 신·구 구조체의 주기에 따른 변위 및 가속도 제어성능을 조사하였다. 그리고 단부에 회전형 감쇠기가 설치된 캔틸레버 구조물의 운

동방정식을 유도하였으며, 실제 아파트 구조물에 설치될 수 있는 상부중축모듈의 형상을 제안하였다. 최종적으로 지진하중을 받는 구조물에 대한 수치해석을 통해 제안된 방법의 타당성을 검증하였다.

## 2. 선행연구 분석

Hong-Nan Li 등에 의한 선행연구는 수직중축층을 포함한 외부구조체의 주기가 기존 구조체의 주기보다 클수록, 두 구조체의 경계면에 존재하는 마찰패드 혹은 에너지 소산형 감쇠기의 효과가 증가한다고 보고하고 있다. 본 절에서는 두 구조체의 주기 및 경계면에 존재하는 마찰력의 크기 변화에 따른 가속도 및 변위응답제어효과를 분석하였다. 그림 3은 별도의 수직하중저항시스템과 수평경계면에 마찰층을 가지는 두 개의 단자유도 시스템을 보여준다.

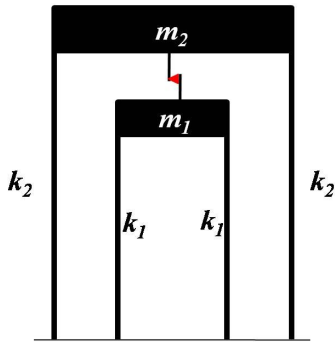


Fig. 3. Conceptual sketch of two single degree of freedom system with friction layer

경계면의 마찰력의 크기는 대상지진하중에 대한 기존구조체의 최대밀면전단력에 대한 비  $\rho$ 로 정규화하였으며, 기존구조체의 강성  $k_1$ 에 대한 외부구조체의 강성  $k_2$ 의 비  $SR = k_2/k_1$ 를 변화시켰다. 그림 4는 기존구조체의 비제어시 변위응답에 대한 제어시 변위응답 비  $J_d$ 를 보여주고, 그림 5는 기존구조체의 비제어시 가속도응답에 대한 제어시 가속도응답 비  $J_a$ 를 보여준다. 기존구조체의 주기는 0.2초, 0.5초, 1초, 그리고 2초인 경우를 고려하였다. 기존구조체와 외부구조체는 각각5% 감쇠비를 가지는 것으로 가정하였으며, 그림의 결과는 암반지역에서 측정한 20개의 지진하중에 대한 해석결과를 평균하여 구하였다.

그림 4와 5로부터  $\rho$ 가 0.1인 경우가 대체적으로 가장 우수한 응답제어효과를 보이고,  $\rho$ 가 0.1일 때 SR이 1에 가까울수록 제어효과가 감소됨을 알 수 있다. 특히 변위응답제어에 있어서는 기존의 연구결과와 다르게 SR이 증가할수록 즉 외부구조체의 주기가 기존구조체보다 짧을수록 변위응답제어효과가 우수해지며, 이러한 경향은 기존구조체의 주기가 짧을수록 분명해 진다. 특히 기존구조체의 주기

가 0.2초로 단주기인 경우에는 SR이 작은 경우에는 오히려  $J_d$ 가 1보다 커져 제어효과가 없으며 오히려 응답을 증가시키는 경향을 보인다. 그림 5에 보여지는 가속도 응답의 경우 기존구조체의 주기가 짧은 경우에는 SR이 1보다 큰 부분이 1보다 작은 부분보다 응답지수의 크기가 대체적으로 작으로 기존구조체의 주기가 증가함에 따라 이러한 경향은 역전되어 SR이 작을수록 응답제어효과가 우수해진다.

기존의 연구결과에 대한 분석에서 마찰력의 크기  $\rho$ 가 0.1보다 증가할수록 응답제어효과가 감소한다는 사실은, 마찰력의 크기가 동일한 경우에도 지진하중의 크기가 작아 기존구조체의 밀면전단력의 크기가 작아지면  $\rho$ 가 증가하여 응답감소효과가 크게 감소됨을 의미한다. 즉 마찰력이 가해진 지진하중의 크기에 비하여 커서 경계면에서 마찰이 빈번히 이루어지지 않고 두 구조체가 서로 구속되어 거동하는 경우에는 지진응답이 오히려 크게 증가할 수 있다는 문제점을 가지고 있다. 더욱이 전술한대로 기존구조체와 외부구조체의 주기를 크게 다르게 설계해야 하며, 외부구조체를 별도의 중력저항 시스템으로 지지해야 한다는 문제점을 가지고 있기 때문에 새로운 개념의 수직중축구조체를 이용한 진동제어방법이 필요하다.

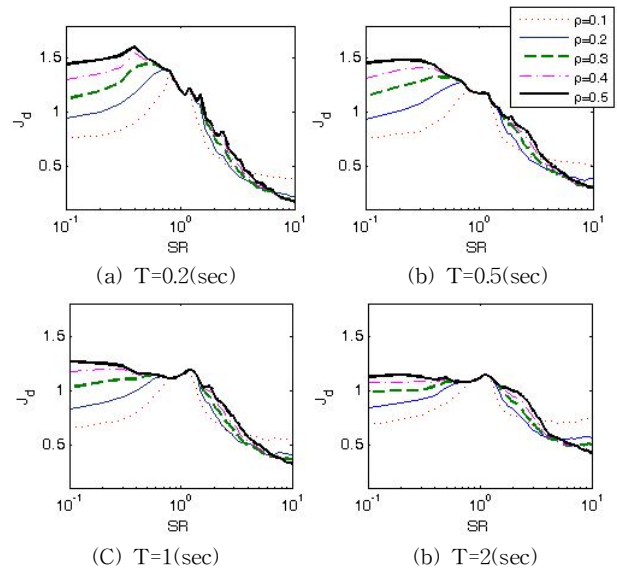
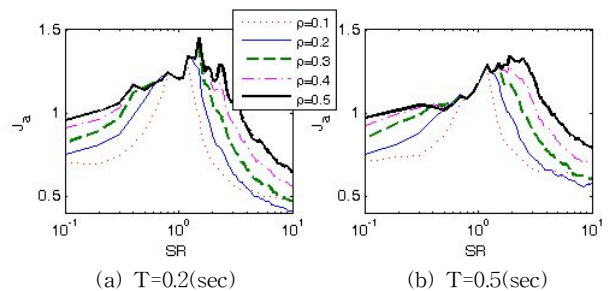


Fig. 4. Peak displacement response of story-increased buildings with friction layer



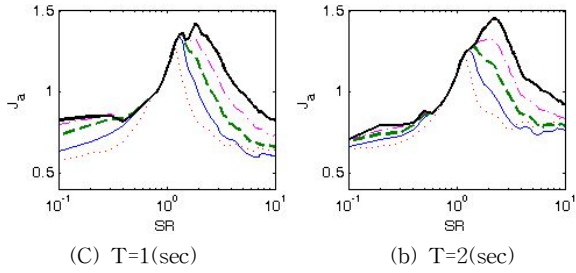


Fig. 5. Peak acceleration response of story-increased buildings with friction layer

### 3. 회전구속을 가지는 캔틸레버 보의 운동방정식

아파트의 세대간 벽은 전술한 바와 같이 장변방향으로 슬래브가 휨에 대한 구속을 거의 하지 못하기 때문에 하부가 고정된 캔틸레버거동을 하며, 이는 동일한 휨강성을 가지는 캔틸레버 보로 모델링 될 수 있다. 이러한 캔틸레버거동은 보이는 벽체의 단부에 회전형 감쇠기를 설치하여 회전 방향의 자유도에 휨모멘트를 가력할 수 있는 경우(그림 6)의 운동방정식은 다음과 같다.

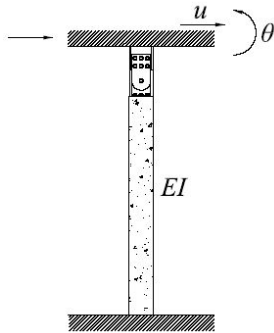


Fig. 6. Cantilever with beam-end rotational-damper

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + 12EIh^{-3}u + 6EIh^{-2}\theta = -m\ddot{x}_g \quad (1)$$

$$6EIh^{-2}u + 4EIh^{-1}\theta = T \quad (2)$$

여기서,  $m$ ,  $c$ ,  $E$ ,  $I$ ,  $h$ 는 각각 구조물의 질량, 감쇠, 탄성 계수, 단면이차모멘트, 그리고 높이를 나타낸다.  $u$ ,  $\theta$ 는 각각 캔틸레버 단부의 수평변위 및 회전을 나타내며,  $\ddot{x}_g$ 는 지반가속도를 그리고  $T$ 는 회전형감쇠기에 의해 단부에 전달되는 휨모멘트를 나타낸다.

(2)식에서  $\theta$ 를 구하면 다음과 같다.

$$\theta = \frac{h}{4EI}(T - 6EIh^{-2}u) \quad (3)$$

(3)식에서  $\theta = 0$ 이기 위해서는  $T = 6EIh^{-2}u$ , 즉 고정단과 같이 단부에서 회전이 발생하지 않게 하기 위해서

는 감쇠기에 의한 모멘트가 수평변위에 비례하여 증가해야 함을 알 수 있다.  $\theta = 0$ 인 경우의 (1)식은 강성이 양단고정인 보의 휨강성과 동일해 짐을 알 수 있다. (3)식을 (1)식에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + 3EIh^{-3}u + 1.5h^{-1}T = -m\ddot{x}_g \quad (4)$$

(4)식은 일단고정 일단자유인 캔틸레버 보의 단부에 휨 모멘트에 의한 등가수평력  $1.5h^{-1}T$ 이 작용하는 형태이다.

#### 3.1 감쇠기가 점성감쇠를 가지는 경우

회전형 감쇠기가 회전속도에 비례하는 힘을 발생시키는 점성감쇠의 형태를 가진다고 가정하면  $T$ 는 다음 (5)식과 같으며,  $u$ 는  $\theta$ 에 대한 식으로 표현할 수 있다.

$$T = v\dot{\theta} \quad (5)$$

$$u = h^2(6EI)^{-1}(v\dot{\theta} - 4EIh^{-1}\theta) \quad (6)$$

(6)식을 (1)식에 대입하고 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{mh^2v}{6EI}\ddot{\theta} + \left(\frac{ch^2v}{6EI} - \frac{2mh}{3}\right)\dot{\theta} + \left(\frac{2v}{h} - \frac{2}{3}ch\right)\theta - \frac{2EI}{h^2}\theta = -m\ddot{x}_g \quad (7)$$

(7)식의 운동방정식을 풀어서  $\theta$ 와  $\dot{\theta}$ 를 구하면 (5)식과 (6)식으로부터 감쇠기에 의해 발생하는 모멘트와 구조물의 수평변위를 구할 수 있다.

#### 3.2 감쇠기가 마찰형감쇠를 가지는 경우

감쇠기가 일정한 크기의 회전모멘트  $T_{slip}$ 에서 미끄러짐 현상이 발생하는 마찰형 감쇠를 가지는 경우의 감쇠기에 의해 발생하는 회전모멘트는  $T = T_{slip}sgn(\dot{\theta})$ 으로 생각하여 운동방정식을 구성할 수 있다. 그러나 이 경우는 미끄러짐 현상이 발생하기 이전 상태, 즉 회전형감쇠기가 단부의 회전을 완전히 구속하는 묶임 상태(lock-up stat)를 정확하게 묘사할 수 없다는 단점을 가지고 있다.

이러한 단점은 회전형 마찰감쇠기가 설치된 구조물의 강성을 이선형 시스템으로 치환함으로써 해결될 수 있다. 회전형감쇠기가 설치된 구조물의 운동방정식은 (4)식과 같이 일단고정 일단자유인 캔틸레버 보에 감쇠기에 의한 등가수평력  $F(=1.5h^{-1}T)$ 가 작용하는 형태를 가진다. 묶임상태

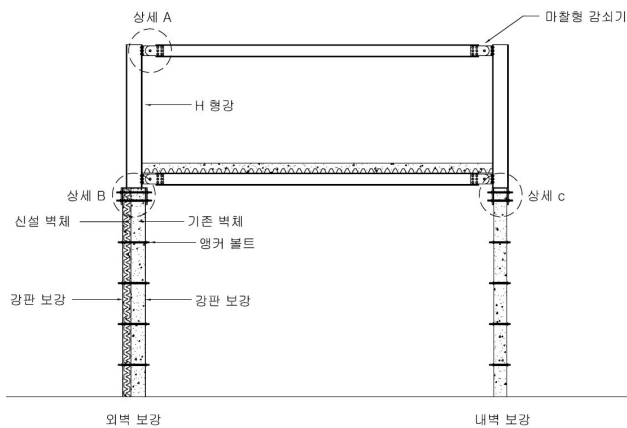


Fig. 8. Story-increased module with beam-end rotational damper

에서는  $T=6EIh^{-2}u$ 이므로 등가수평력  $F=9EIh^{-3}u$ 이 작용하고, 미끄러짐 상태에서는 일정한 크기의 휨모멘트  $T_{slip}$ 에 의한  $F_{slip}=1.5h^{-1}T_{slip}$ 을 이 작용하는 시스템이다. 따라서 회전형 마찰감쇠가 설치된 캔틸레버 구조물은 그림 7(a)의 캔틸레버 구조물과 그림 7(b)의 회전형감쇠에 의한 등가수평력 시스템이 결합되어 그림 7(c)와 같은 이선형 시스템으로 고려될 수 있다.

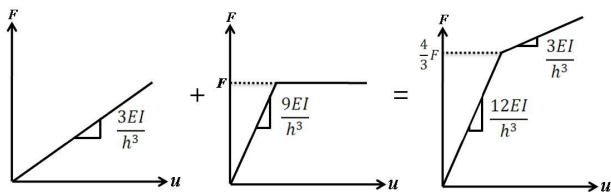


Fig. 7. Force-displacement relationship of cantilever with beam-end rotational-friction damping

#### 4. 상부증축 모듈

그림 1에 표현된 내진설계되지 않은 두 벽체간의 상부를 수직증축모듈을 사용함으로써 벽체 상호간의 구속효과를 발휘하여 3절에 기술된 것과 같은 휨모멘트를 캔틸레버 벽체의 단부에 추가할 수 있다. 이를 위해 본 연구를 통해 제안되는 상부증축모듈의 형상은 그림 8과 같다.

본 연구에 의한 수직증축모듈은 하나의 그림 8에서 같이 구조물에 포함되는 둘 이상의 벽체 중 서로 다른 벽체의 상단에 하단이 결합되어 상기 벽체의 길이방향으로 연장되는 둘 이상의 기둥과 서로 다른 두 기둥에 양측이 각각 회동 가능하게 결합되는 상부보 및 상기 기둥과 상부보 간의 각도가 변경될 때 미끄러짐이 발생하는 두 개의 면 사이에 장착되는 마찰패드를 포함하여 (그림 9), 상기 벽체와 상부보 간의 각도를 변경시키는 힘을 감쇠시키는 감쇠수단을 포함하여 구성된다.

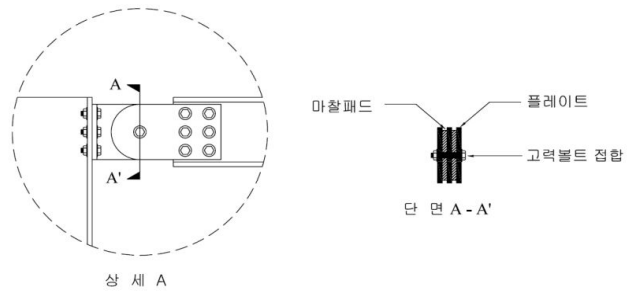


Fig. 9. Beam-end rotational damper

이때 벽체의 회전을 완전히 구속하기 위해 수직증축모듈의 보 및 기둥에 발생하는 휨모멘트는 벽체의 밀면모멘트와 동일한 크기가 발생하므로 철골보로 하는 경우에는 매우 큰 강성이 요구되어 철골보의 증가해야 한다. 그러나 단부에 회전형 마찰감쇠기를 설치하여 일정크기의 휨모멘트에서 미끄러짐이 발생하도록 함으로써 보에 전달되는 휨모멘트의 크기를 크게 감소시킬 수 있으며, 이 경우에도 만일 철골보에 요구되는 모멘트의 크기가 과도하면 철골보를 프리캐스트 바닥판으로 대체함으로써 이를 해결할 수 있다. 또한 기존에 세대간벽이 상부에서 구속됨으로써 기존에 효과가 무시되었던 면외 장변방향의 힘을 기존 벽체가 일정 크기 부담해야 하므로 기존벽체를 그림 10과 같이 면외방향의 힘에 대하여 보강해야 한다.

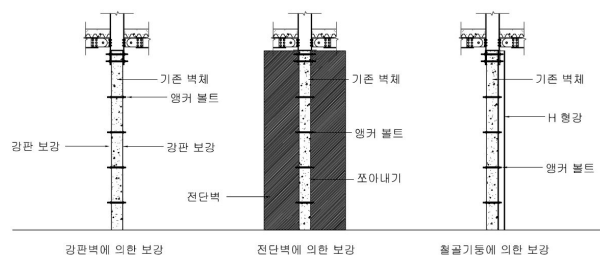


Fig. 10. Reinforcement of the existing walls

#### 5. 수치해석 예제

본 연구에서 제안한 방법의 타당성을 검증하기 위하여 그림 6의 구조물에 대한 수치해석을 수행하였다.  $m=1000$  ton,  $EI=8.0 \times 10^{10} N \cdot m^2$ ,  $h=20$  m로 가정하였으며, 5%의 감쇠비를 가지도록 감쇠를 설정하였다. 해석에 사용한 지진 하중은 최대가속도가 0.348g인 El Centro 지반가속도이고, 캔틸레버 끝단이 자유단인 경우, 고정단인 경우, 그리고 회전형감쇠기가 선형 점성감쇠인 경우와 마찰형 감쇠인



경우를 고려하였다. 선형점성계수는  $v = 8.0 \times 10^9 N \cdot s \cdot m$  를,  $T_{slip}$ 은 고정단이기 위해 단부에 요구되는 모멘트의 최대값의 10%가 되도록 설정하였다.

그림 11-13은 각각 변위, 밀면전단력, 그리고 밀면전도 모멘트의 시간이력을 보여준다. 보 단부가 자유단, 고정단 인경우와 비교할 때 단부에 회전형감쇠기를 설치하는 경우가 변위, 전단력, 모멘트를 줄이는데 있어 훨씬 효과적임을 알 수 있다. 특히, 고정단인 경우 자유단인 경우와 비교할 때 변위응답은 크게 줄어드나 밀면전단력은 오히려 증가하고, 밀면모멘트는 조금 작음을 알 수 있다. 이는 벽체상부를 강체로 연결하는 경우 단부의 회전을 완전히 구속함으로써 강성증가효과는 가져올 수 있으나 에너지 소산효과는 가져올 수 없음을 의미한다. 감쇠기를 사용하는 경우에는 마찰감쇠를 사용하는 것이 점성감쇠를 사용하는 것보다 우수한 제어효과를 보임을 확인 할 수 있다.

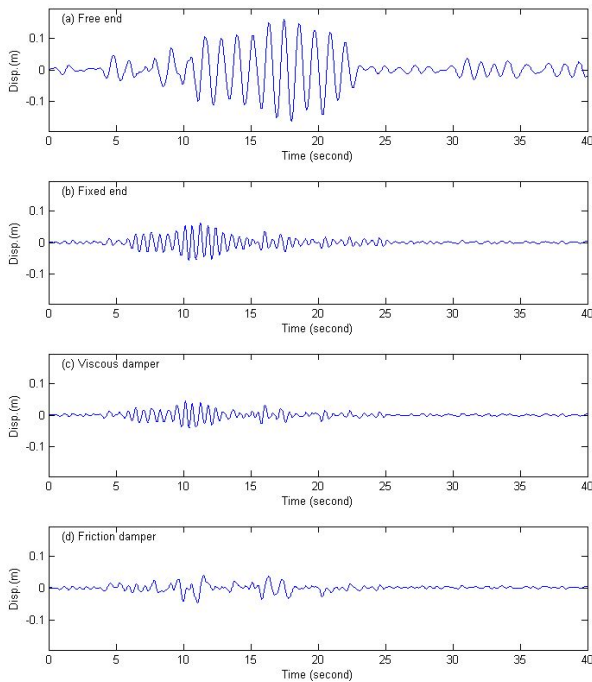


Fig. 11. Time history of displacement response

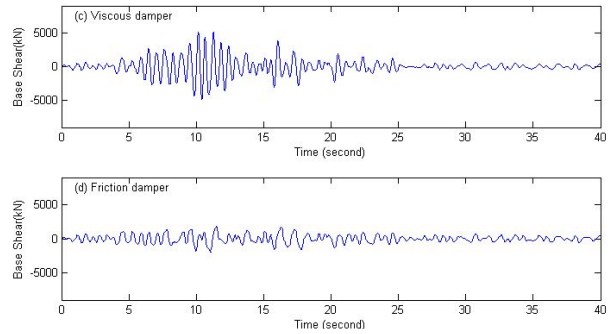
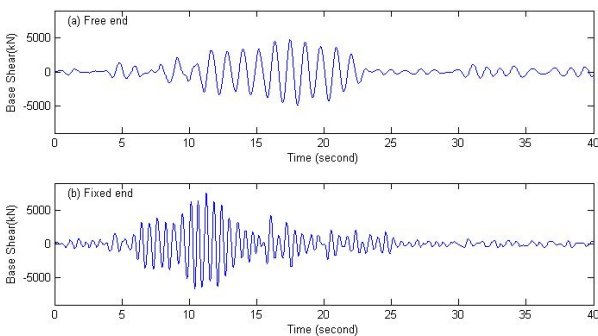


Fig. 12. Time history of base shear

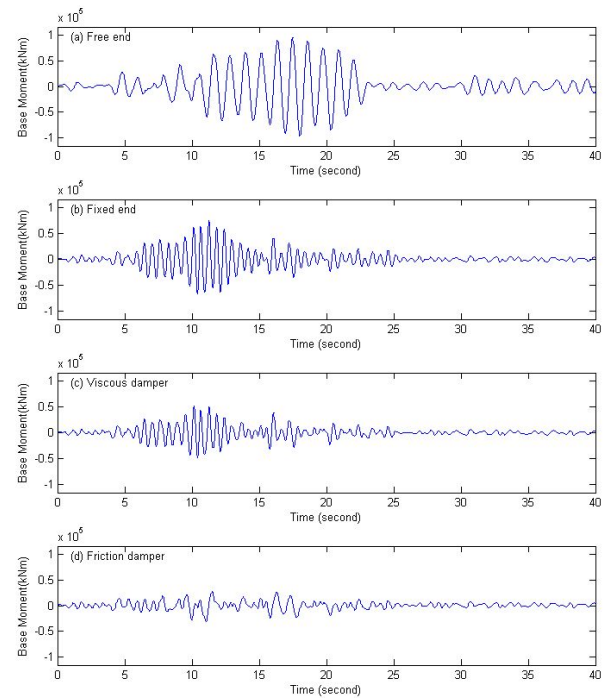


Fig. 13. Time history of base overturning moment

## 6. 결 론

본 연구에서는 단순한 하중증가만을 가져오는 기존의 수직 증축방법을 개선하여 수직 증축된 구조물자체를 내진성능 저항 시스템으로 활용하기 위한 수직증축모듈을 제안하였다. 기존 공동주택의 슬래브는 벽체의 회전응답을 구속하지 못하기 때문에 장변방향으로 가진되는 경우의 세대간벽은 독립적인 일단고정 일단자유의 캔틸레버 거동을 하여 상부에서 매우 큰 변위가 발생하나, 수치해석을 통해 제안된 수직증축모듈을 사용하여 상부의 회전을 구속함으로써 변위, 밀면전단력, 그리고 밀면전도모멘트를 크게 줄일 수 있음을 확인하였다.

본 연구에 의한 수직증축모듈을 이용하면, 구조물의 최대 힘 변위량을 감소시킴으로써 구조물의 내진성능을 효과적으로 보강시킬 수 있고, 크기가 작고 구조가 간단하여 고층

구조물에도 용이하게 적용시킬 수 있으며, 마찰패드와 마찰력을 조절함으로써 구조물의 시공이 완료된 이후 내진성능을 용이하게 변경시킬 수 있고, 구조물의 변위주기에 관계없이 내진성능을 효과적으로 보강할 수 있다는 장점이 있다. 특히 마찰력의 크기에 따라 증축부에 의한 강성증가효과와 감쇠증가효과를 조절하여 설계할 수 있다.

### 후 기

이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원이 위탁시행한 건설핵심기술연구개발사업 (과제번호 : 05-건설핵심-D06)과 과학기술부가 출연하고 한국과학재단에서 위탁시행한 특정기초연구(과제번호 : R01-2007-000-10872-0)에 의한 결과의 일부임.

### 참 고 문 헌

- (1) 단국대학교 부설 리모델링연구소, 2007, "리모델링을 위한 노후공동주택의 내진성능 등급화 및 차세대 보강기술 개발", 과학기술부 국가지정연구실 최종보고서.
- (2) Federal Emergency Management Agency, 1997, "NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings," Reports FEMA-273 (Guidelines) and 274(Commentary), Federal Emergency Management Agency, Washington, D. C.
- (3) Applied Technology Council, 1996, "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings," Report ATC-40, Applied Technology Council, Redwood City, California.
- (4) Hong-Nan Li, Yong-Wei Yin and Su-Yan Wang, 2003, "Studies on seismic reduction of story-increased buildings with friction layer and energy-dissipated devices", Earthquake Engineering Structural Dynamics, Vol.32,pp.143-160.
- (5) Hong-Nan Li, Su-Yan Wang, Gangbing Song, Guanglei Liu, 2004, "Reduction of seismic forces on existing buildings with newly constructed additional stories including friction layer and dampers", Journal of Sound and Vibration, Vol.269, pp.653-667.