

# 좌굴방지 가새가 설치된 건물의 지진응답

## Seismic Response of Structures with Buckling-Restrained Braces

김진구\*      최현훈\*

Kim, Jinkoo      Choi, Hyunhoon

(논문접수일 : 2000년 12월 4일 ; 심사종료일 : 2001년 12월 17일)

### 요 지

본 연구에서는 좌굴이 방지된 비부착 가새가 설치된 철골조 건물의 에너지 소산능력과 지진응답에 대하여 연구하였다. 먼저 조화하중을 받는 단자유도계 구조물을 대상으로 변수분석을 수행하고 가새의 최적항복강도를 구하였다. 다자유도계 골조구조물의 비선형 시간이력 해석을 통하여 다양한 크기와 강도를 가진 가새가 설치된 구조물의 지진응답을 분석하고, 가새의 적당한 층별 분배방법을 찾기 위하여 여러 가지 분배방법을 적용하였다. 해석결과에 따르면 일반적으로 가새의 강성이 증가함에 따라 구조물의 최대변위는 감소하였다. 그러나 구조물의 고유주기 및 하중에 따라 가새의 강성이 커짐에 따라 구조물의 최대 변위와 누적된 손상이 증가하는 것으로 나타났다.

**핵심용어** : 에너지 소산, 소성감쇠기, 등가감쇠비, 비선형 동적해석, 소성힌지

### Abstract

Energy dissipation capacity and earthquake responses of steel structures installed with unbonded braces(UB) were investigated. Parametric studies were performed for a single-degree-of-freedom structure under harmonic loads, and optimum yield strength of unbonded braces were derived. Nonlinear dynamic time history analyses were carried out to investigate the seismic response of multi-story model structures with UB having various size and strength. Various techniques were applied to determine proper story-wise distribution of UB in multi-story structures. The analysis results show that the maximum displacements of structures generally decrease as the stiffness of UB increases. However for some natural frequencies and seismic loads the maximum displacement and accumulated damage increases as the stiffness of UB increases.

**Keywords** : Energy dissipation, Unbonded brace, Equivalent damping, Nonlinear dynamic analysis, Plastic hinge

### 1. 서 론

가새가 설치된 건물의 비탄성거동은 가새의 불안정한 이력거동으로 인하여 강성과 강도가 저하되고 에너지 소산량이 작다. 철골조의 에너지 소산과 손상방지 능력은 그림 1과 같은 좌굴이 방지된 가새(buckling-

restrained unbonded brace, 이하 UB)를 설치함으로써 크게 향상시킬 수 있다. UB는 큰 지진하중을 받을 때 중심 철골부재가 전체 혹은 국부적인 좌굴이 발생하지 않고 큰 비탄성 변형이 발생하도록 중심부의 철골부재 주위를 강관과 콘크리트로 보강한 것으로, 이전의 연구에 의하면<sup>1),2)</sup> 매우 안정적으로 많은 에너지를

\* 책임저자, 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 조교수

전화: 031-290-7563; Fax: 031-290-7570

E-mail: jinkoo@yurim.skku.ac.kr

\* 성균관대학교 건축공학과 박사과정

· 이 논문에 대한 토론을 2002년 9월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2002년 9월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

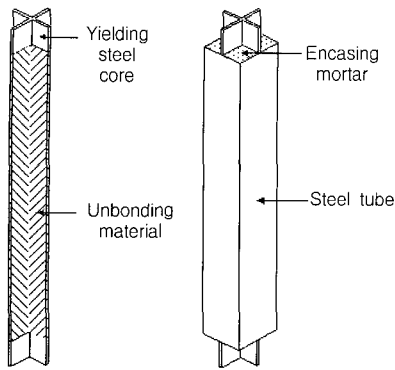


그림 1 좌굴이 방지된 소성감쇠기

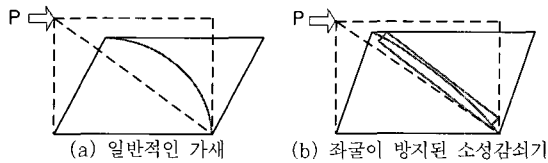


그림 2 횡력이 작용할 때 가새가 설치된 구조물의 거동

소산시킴을 알 수 있다. 그림 2는 일반적인 가새와 UB가 설치된 구조물의 개략적인 거동을 보여주고 있다. 일반적인 가새는 압축력을 받을 때 좌굴이 발생하기 때문에 횡방향 변위가 증가하게 되지만 UB가 설치된 구조물은 좌굴이 방지되었기 때문에 압축을 받을 때도 안정적으로 거동한다. 가새가 설치된 구조물의 에너지 소산은 가새의 이력거동에 따라 크게 달라지기 때문에 이력거동이 안정적인 UB를 설치함으로써 전체 시스템의 에너지 소산능력을 증가시키고 골조의 비탄성 변형은 줄어들게 된다. 또한 지진이 발생한 후 손상된 UB부재는 쉽게 교체할 수 있는 장점이 있다.

Inoue와 Kuwahara<sup>3)</sup>는 단자유도계에서 구조물의 등가 점성감쇠비를 최대화 하는 이력감쇠기(hysteretic damper)의 최적 강도를 구하였다. 이들의 연구결과에 의하면 최적강도비 근처에서 감쇠기에 의하여 소산된 에너지는 최대가 되고 구조물의 손상은 가장 작음을 보여주었다. 그러나 그들의 연구에서는 이력감쇠기의 강성과 강도는 서로 독립적이라고 가정하였다. 이것은 ADAS<sup>4)</sup>와 같이 판으로 이루어진 이력감쇠기에서는 쉽게 적용할 수 있다. 그러나 UB에서는 단면적이 증가하면 강성과 강도도 함께 증가한다. 만약 UB의 항복강도가 변하고 크기가 일정하다면 두 변수는 서로 독립적으로 변하게 된다. 그러나 구조재료용 철판의

항복강도는 매우 제한적이므로 구조기술자가 쉽게 선택할 수 있는 사항은 UB의 단면적을 변화시키는 것이다. 이 경우에 UB의 강성과 강도는 서로 비례하게 된다.

본 논문에서는 구조물의 응답과 손상을 최소화하기 위해 적당한 UB의 설계방법에 대하여 연구하였다. 조화하중을 받는 단자유도계 구조물에 대하여 변수분석을 수행하였고 UB의 최적항복강도를 구하였다. 또한 다자유도계 구조물에서 UB의 각 층별 분배방법에 대하여 여러 가지 분배방법을 적용하여 검토하였다. 비선형 정적해석법(pushover analysis)과 동적 시간이력해석을 통하여 UB의 설계변수를 찾기 위하여 각 응답들을 비교하였다.

## 2. 좌굴방지 가새가 설치된 구조물의 등가감쇠비와 최적 강도

그림 3은 UB가 설치된 구조물의 힘-변위 관계를 보여주고 있다. UB가 설치된 시스템의 항복하중  $F_{y1}$  과  $F_{y2}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{y1} = F_{by} + K_s u_{by} \tag{1}$$

$$F_{y2} = F_{by} \left( 1 + \beta \frac{u_{sy}}{u_{by}} - \beta \right) + F_{sy} \tag{2}$$

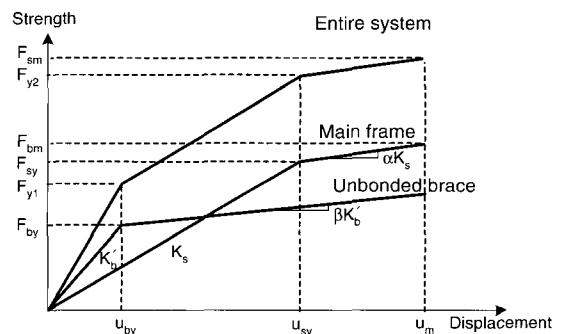


그림 3 UB가 설치된 구조물의 힘-변위 관계

여기서  $F_{sy}$ ,  $u_{sy}$  그리고  $K_s$ 는 각각 구조물의 항복강도, 항복변위 그리고 횡강성을 나타낸다. 그리고  $F_{by}$ 와  $u_{by}$ 는 UB의 항복 강도와 항복변위를 나타낸다. 강성비( $S_r$ )는 다음과 같이 정의하기로 한다.

$$S_r = K'_b / K_s \quad (3)$$

식(3)에서  $K'_b$ 는 UB의 횡방향 강성을 나타내고 다음 식을 이용하여 산정할 수 있다.

$$K'_b = K_b \cos^2 \theta = \frac{A_b E_b}{L_b} \cos^2 \theta \quad (4)$$

여기서  $K_b$ 는 UB의 축방향 강성이고  $A_b$ 와  $E_b$ 는 UB의 단면적과 탄성계수를 나타낸다. 또한  $L_b$ 는 UB의 좌굴이 구속된 부분의 길이를,  $\theta$ 는 설치된 UB와 구조물의 보부재 사이의 각을 나타낸다. 따라서 주어진 구조물의 층강성과 강성비를 이용하면 필요한 UB의 단면적을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$A_b = \frac{K_b L_b}{E_b} = \frac{K'_b L_b}{E_b \cos^2 \theta} = \frac{(S_r K_s) L_b}{E_b \cos^2 \theta} \quad (5)$$

또한 UB의 항복강도( $F_{by}$ )와 항복변위( $u_{by}$ )는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{by} = \frac{(S_r K_s) L_b}{E_b \cos \theta} \sigma_{by} \quad (6)$$

$$u_{by} = \frac{F_{by}}{K_b} = \frac{L_b}{E_b} \sigma_{by} \quad (7)$$

전체 시스템과 UB의 항복강도비( $\gamma$ )는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma = \frac{F_{by}}{F_{y2}} = \frac{F_{by}}{F_{sy} + F_{by} \left(1 + \beta \frac{u_{sy}}{u_{by}} - \beta\right)} \quad (8)$$

구조적 특성이 일정할 때, 항복강도비는 UB의 항복후

강성비, 크기와 항복응력에 의하여 결정된다. UB의 항복강도( $F_{by}$ )와 구조물의 항복강도( $F_{sy}$ ), 그리고 최대변위에서 UB의 최대강도( $F_{bm}$ )와 구조물의 최대강도( $F_{sm}$ )는 강도비를 이용하여 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{by} &= \gamma F_{y2} \\ F_{sy} &= \left\{1 - \gamma \left(1 + \beta \frac{u_{sy}}{u_{by}} - \beta\right)\right\} F_{y2} \\ F_{bm} &= F_{by} (1 + \beta \mu_b - \beta) = \gamma (1 + \beta \mu_b - \beta) F_{y2} \\ F_{sm} &= F_{sy} (1 + \alpha \mu_s - \alpha) \\ &= \left\{1 - \gamma \left(1 + \beta \frac{u_{sy}}{u_{by}} - \beta\right)\right\} (1 + \alpha \mu_s - \alpha) F_{y2} \end{aligned} \quad (9)$$

지진하중으로 인하여 구조부재의 손상을 최소화하기 위하여 일반적으로 골조가 항복하기 전에 UB가 항복하여야 한다. 이것은 UB의 항복변위가 골조의 항복변위보다 작아야함을 의미한다.

조화하중을 받을 때 시스템의 등가점성감쇠비는 식(10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\zeta_{eq} = \frac{E_p}{4\pi E_e} \quad (10)$$

여기서  $E_p$ 는 한 번의 이력거동을 할 때 전체 구조물의 소산된 에너지이고  $E_e$ 는 저장된 변형에너지다. 각각의 에너지에 구조물과 감쇠기에 의한 성분으로 나누어 나타내면 다음과 같다.

$$4\pi \zeta_{eq} = \frac{E_{pb} + E_{ps}}{E_{eb} + E_{es}} \quad (11)$$

식(11)은 해당하는 변수를 이용하여 식(12)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 각각 구조물과 UB의 초기강성에 대한 항복 후 강성비를 나타낸다. 각 변

$$\zeta_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{4\{F_{sy} u_m - u_{sy} F_{sy} (1 + \alpha \mu_s - \alpha)\} + 4\{F_{by} u_m - u_{by} F_{by} (1 + \beta \mu_b - \beta)\}}{\frac{1}{2} u_m \{F_{by} (1 + \beta \mu_b - \beta) + F_{sy} (1 + \alpha \mu_s - \alpha)\}} \quad (12)$$

$$\frac{\pi}{2} \zeta_{eq} = 1 + \frac{\beta \{\gamma (S_r + 1) - S_r\}}{1 + S_r \beta} - \frac{1 + \alpha \mu_s - \alpha}{\mu_s} \left( \frac{1 - \gamma + \beta \gamma}{1 + S_r \beta} \right) + \frac{\gamma^2 (1 + S_r \beta)}{S_r \mu_s (1 - \gamma + \gamma \beta)} (\beta - 1) - \beta \gamma \quad (13)$$

수들은 그림 3에 나타나 있다. 식(12)를 강성비 ( $S_r$ )와 강도비 ( $\gamma$ )를 이용하여 나타내면 식(13)과 같다. 만약 UB의 크기가 일정하고 항복응력만 변한다면  $\gamma$ 는  $S_r$ 과 독립적으로 변하게 된다. 이러한 경우 등가감쇠비를 최대화하는 최적항복강도비 ( $\gamma_{opt}$ )는 식(13)의  $\gamma$ 에 대한 미분값이 0이 되는 식(14)로부터 구할 수 있고 그 결과는 식(15)와 같다.

$$\frac{\partial \left( \frac{\pi}{2} \zeta_{eq} \right)}{\partial \gamma} = 0 \quad (14)$$

$$\gamma_{opt} = \frac{1}{1-\beta} \left\{ 1 - \frac{1+S_r\beta}{\sqrt{(1+S_r\beta)^2 - S_r(\beta\mu_s S_r + 1 + \alpha\mu_s - \alpha)(\beta-1)}} \right\} \quad (15)$$

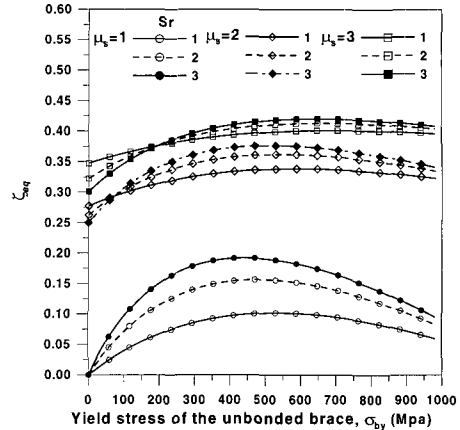
이 식을 UB의 최적항복응력 ( $\sigma_{by,opt}$ )에 대하여 나타내면 다음 식과 같다.

$$\sigma_{by,opt} = \frac{\gamma_{opt} F_{sy}(1+S_r\beta)}{A_b(1-\gamma_{opt} + \gamma_{opt}\beta)} \quad (16)$$

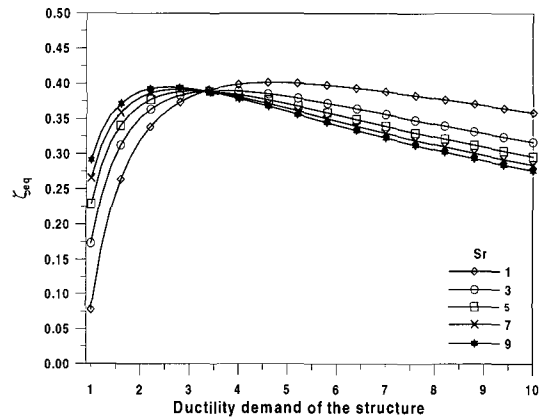
위 식은 시스템의 등가감쇠비를 최대화하는 UB의 최적항복응력을 나타낸다. 그러나 구조강재의 선택이 제한적이기 때문에 최적항복응력은 UB의 설계에 있어 유용한 변수가 되지 못한다.

### 3. 단자유도계 시스템의 변수분석

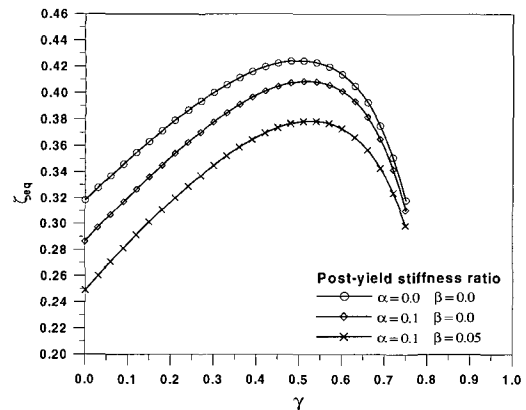
식(13)에 나타난 등가감쇠비를 강도비, 강성비, UB의 항복응력, 항복 후 강성비와 연성비에 대하여 그림 4에 나타내었다. 예제 구조물의 항복강도와 초기강성은 233.3kN 및 43.6kN/m이다. 그림 4(a)에서 볼 수 있듯이 실제 항복응력의 실용적인 범위인 100~330MPa에서는 항복응력이 증가함에 따라 등가감쇠비를 증가하게 된다. 이 영역에서 강성비와 연성요구량이 증가함에 따라 등가감쇠비도 증가하게 된다. 연성요구량 ( $\mu_s$ )이 3까지 작은 경우에는 강성비가 증가함에 따라 등가감쇠비가 증가하지만, 그림 4(b)에 따르면 연성요구량이 큰 경우에는 강성비가 증가하면, 등가 감쇠비는 줄어들게 된다. 그림 4(b)는 또한 강성비가 증가함에



(a) UB의 항복응력에 따른 등가감쇠비 ( $\alpha=0.1, \beta=0.05$ )



(b) 연성요구에 따른 등가감쇠비 ( $\alpha=0.1, \beta=0.05$ )



(c) 항복 후 강성비와 강도비의 변화에 따른 등가감쇠비 ( $\mu_s=2, S_r=3$ )

그림 4 UB가 설치된 단자유도계 구조물의 등가감쇠비

따라 등가감쇠비는 점진적으로 증가함을 보이고 있는데, 이것은 큰 단면을 가진 UB를 설치한 경우 등가감

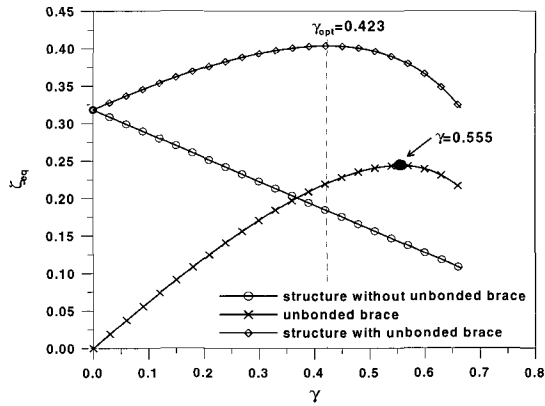


그림 5 등가감쇠비에 대한 UB와 구조물의 감쇠비( $\mu_s=2, S_r=2$ )

쇠비가 커진다는 것을 의미한다. 그러나 UB의 단면적이 커짐에 따라 등가감쇠비는 증가하지만 구조물의 탄성주기가 줄어들므로 인하여 입력되는 지진하중의 크기는 증가할 수 있다. 또한  $\mu_s=3$ 보다 큰 연성도에서는 강성비가 작은 경우의 등가감쇠비가 커진다는 것을 알 수 있다. 그림 4(c)는 다양한 항복후 강성비에 대하여 강도비의 변화에 따른 등가감쇠비를 나타내었다. 구조물의 항복 후 강성비( $\alpha$ )가 0.1이고 UB의 항복 후 강성비( $\beta$ )가 0.05인 경우 등가감쇠비가 10~20% 정도 작음을 알 수 있다.

그림 5는 예제 구조물에서 전체 시스템의 등가감쇠비에 대한 구조물과 UB의 등가감쇠비를 보여주고 있다. 구조물에 의한 등가감쇠비는 강도비에 따라 감소한다. 그러나 전체 시스템의 등가감쇠비가 최대가 될 때 시스템의 강도비( $\gamma_{opt}$ )와 UB의 등가감쇠비가 최대 일 때의 강도비( $\gamma$ )는 서로 다르다. 그림 6은 강성비의 변화에 따른 최적강도비와 UB의 최적 항복응력을 보여주고 있다. 강성비가 증가함에 따라 최적항복응력( $\sigma_{by, opt}$ )은 감소하고 최적강도비( $\gamma_{opt}$ )는 증가한다.

이것은 단면적이 큰 UB를 사용할 경우 항복응력이 낮은 철골부재를 사용함으로써 등가감쇠비를 최대화할 수 있다는 것을 의미한다.

#### 4. 일반적인 가새와 소성감쇠기가 설치된 구조물의 거동비교

일반적인 가새와 UB가 설치된 구조물의 거동을 비교하기 위하여 층고가 4m이고 경간의 길이가 6m인 3

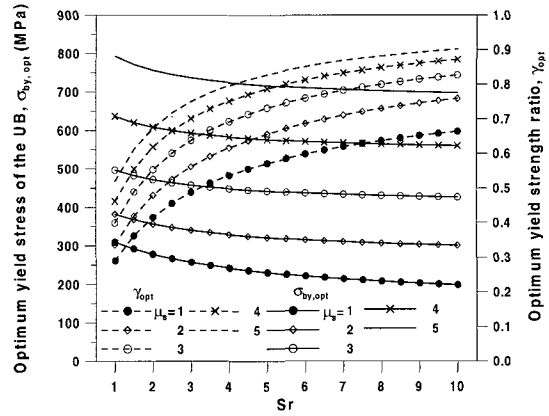


그림 6 최적강도비와 UB의 최적항복응력

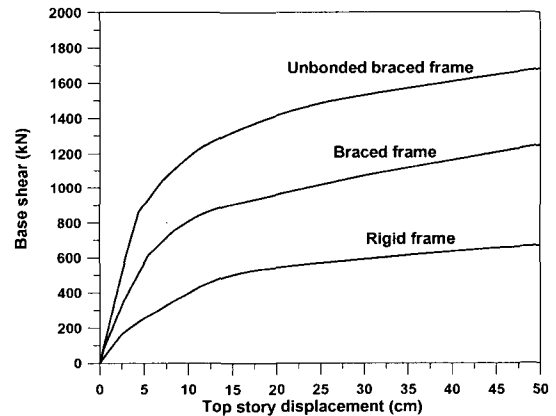


그림 7 밀면전단력-최상층 변위의 관계

경간 5층 건물에 같은 단면적을 가진 가새와 UB를 설치하였다. 가새가 설치되지 않은 골조의 주기는 0.91초이고 가새가 설치된 구조물의 주기는 0.51초이다. 사용한 UB의 항복응력은 240MPa이고 구조물의 1차 모드에 비례하게 층지진하중을 가하고 pushover 해석을 수행하여 구한 예제 구조물의 밀면전단력과 최상층 변위의 관계는 그림 7과 같다. 여기서 UB가 설치된 구조물의 강도가 일반적인 가새를 설치한 구조물 보다 크다는 것을 알 수 있다.

이것은 일반적인 가새가 설치된 구조물은 인장력을 받는 두 개(2, 4층)의 가새만이 횡하중에 안정적으로 저항하기 때문이다. 그림 8에는 El Centro(1940, NS) 지진에 대한 각 예제구조물의 최대 층변위를 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 UB를 설치한 구조물은 가새가 설치된 구조물과 설치되지 않은 구조물보다 변위

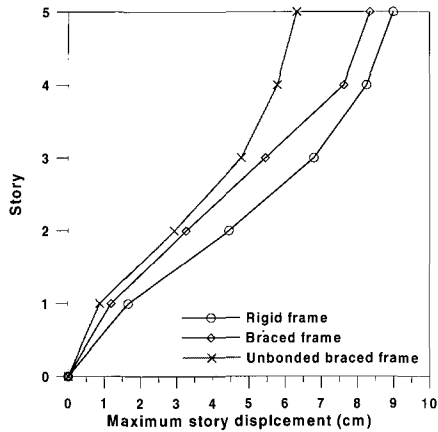


그림 8 최대 층변위

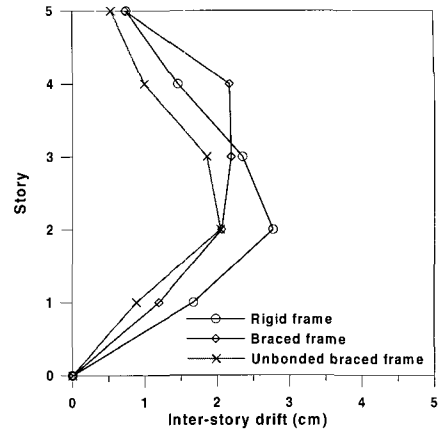
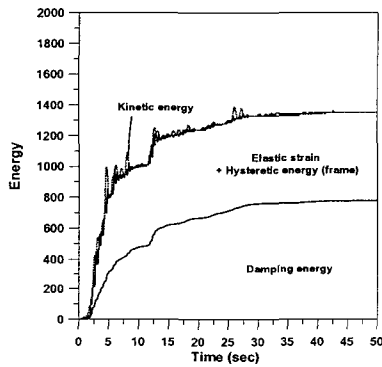
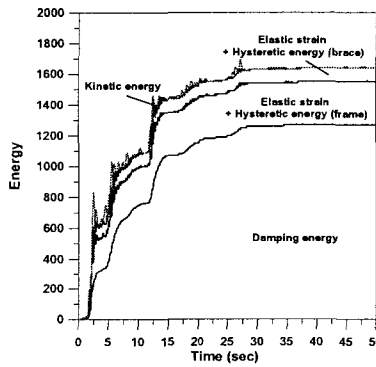


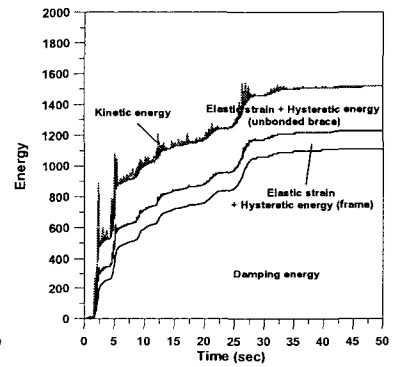
그림 9 최대 층간변위



(a) 가새가 설치되지 않은 구조물

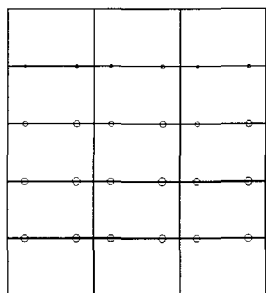


(b) 일반적인 가새가 설치된 구조물

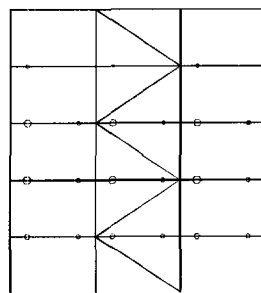


(c) UB가 설치된 구조물

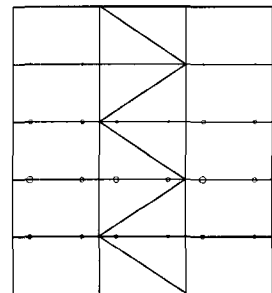
그림 10 예제 구조물의 에너지 시간이력



(a) 가새가 설치되지 않은 구조물



(b) 일반적인 가새가 설치된 구조물



(c) UB가 설치된 구조물

그림 11 소성힌지의 발생 위치와 크기

가 많이 감소한 것을 알 수 있다. 주목할만한 것은 일반적인 가새를 설치한 경우 4층에서의 층간변위(그림 9)가 가새가 설치되지 않은 구조물보다 크게 발생하였는데, 이것은 단순히 강성만 증가시키면 추가적인 강성으로 인하여 보다 많은 지진하중이 구조물에 입력되기 때문이다. 이러한 결과는 그림 10의 에너지 시간이력을

보면 일반적인 가새가 설치된 구조물에 입력된 에너지가 가새가 설치되지 않은 구조물보다 큰 것을 알 수 있다. 좌굴이 방지된 UB가 설치된 경우 다른 경우보다 구조물의 변형에너지는 줄어들었고, UB의 소성변형에 의하여 많은 에너지가 소산되었다. 소성힌지의 발생 위치와 크기를 나타낸 그림 11을 살펴보면 구조부재에

발생하는 소성힌지를 줄이는데 일반적인 가새는 그다지 효과적이지 않음을 알 수 있다. 그러나 UB를 설치한 구조물의 경우는 소성힌지의 수도 줄어들었을 뿐만 아니라 변형의 크기도 현저하게 줄어들었음을 알 수 있다.

## 5. 소성감쇠기가 설치된 구조물의 비탄성 거동

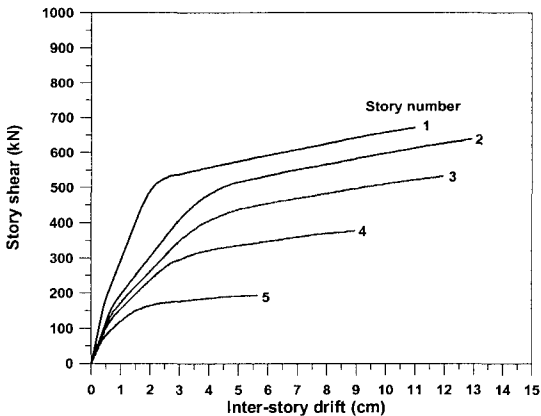
### 5.1 예제 구조물과 지진하중

층고가 4m이고 경간이 6m인 3경간의 5층과 10층 2차원 골조구조물에 UB를 설치하고 지진하중에 대한 거동을 살펴보았다. 5층 건물의 기본진동주기는 0.91초이고 10층 건물은 1.41초이다. 두 건물의 기둥 및

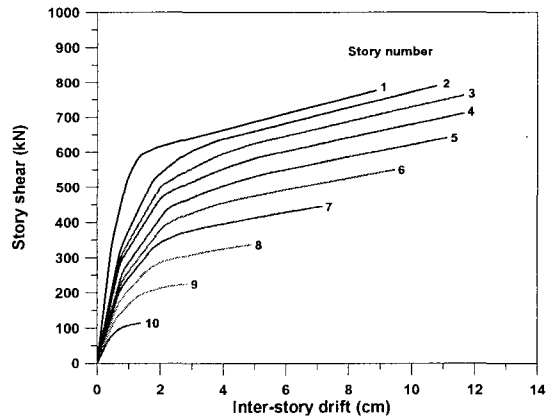
보에 사용된 철골부재의 항복응력은 각각 330MPa 및 240MPa 이며, 지진하중은 El Centro 지진의 유효최대가속도(effective peak acceleration 이하 EPA)를 0.2g와 0.4g로 조정하여 비선형 시간이력 해석을 수행하였다. 각 층별 층강성을 산정하기 위해 DRAIN 2D+<sup>6)</sup>를 이용하여 pushover 해석을 수행하여 얻은 각 층별 층전단력과 층간변위의 관계는 그림 12와 같다. pushover 곡선을 이선형곡선(bilinear curve)으로 이상화하여 산정한 층강성은 표 1에 나타나 있다.

### 5.2 소성감쇠기의 층별 분배

강성비를 1에서 10까지 증가시키면서 식(5)를 이용하여 UB의 단면적을 산정하였다. 해석에는 항복응력



(a) 5층 모델의 pushover curve



(b) 10층 모델의 pushover curve

그림 12 예제 건물의 pushover 곡선

표 1 예제 구조물의 층강성, 층간변위비와 층 전단력비

층	5층 구조물			10층 구조물		
	층강성(kN/cm)	층간변위비	층 전단력비	층강성(kN/cm)	층간변위비	층 전단력비
1	276.7	0.849	1.000	578.3	0.809	1.000
2	145.4	1.000	0.947	328.1	0.946	0.988
3	125.9	0.924	0.810	277.4	1.000	0.957
4	122.1	0.691	0.593	250.1	0.992	0.905
5	114.6	0.434	0.314	213.8	0.941	0.833
6	-	-	-	205.2	0.805	0.738
7	-	-	-	202.8	0.602	0.622
8	-	-	-	197.0	0.416	0.488
9	-	-	-	174.7	0.224	0.337
10	-	-	-	158.5	0.116	0.172

이 100 MPa과 240 MPa인 두 가지의 UB를 이용하였으며, 다음과 같은 방법에 따라 UB를 층별로 분배하였다.

- Case 1: 층강성에 비례하게 UB를 설치
- Case 2: 모든 층에 같은 크기의 UB를 설치
- Case 3: pushover 해석에서 얻은 층간변위에 비례하게 UB를 설치
- Case 4: 층 전단력에 비례하게 UB를 설치

각 분배방법의 효용성을 비교하기 위하여 Case 1에서 얻은 전체 UB의 양을 기준으로 각 분배방법에 따라 각 층에 분배하였다.

### 5.3 예제 건물의 최상층 변위

그림 13과 14는 두 단계의 지진하중이 작용할 때 UB의 항복응력과 크기에 따른 구조물 최상층의 최대 변위를 보여주고 있다. EPA=0.2g의 지진하중에 대하여 5층과 10층 구조물에 항복응력이 240MPa인 UB를 설치한 경우 강성비가 3까지 변위가 증가하다가 이후에는 감소하였다. 이 경우를 제외하고 UB의 강성이 증가할수록 구조물의 최대변위는 감소하였다. 그리고 각 분배방법별로도 커다란 차이는 보이지 않았다. 10층 건물에 항복응력이 100MPa인 UB를 설치한 경우는 대략 강성비가 5까지는 변위가 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보였는데 이것은 강성비가 증가하면 전체

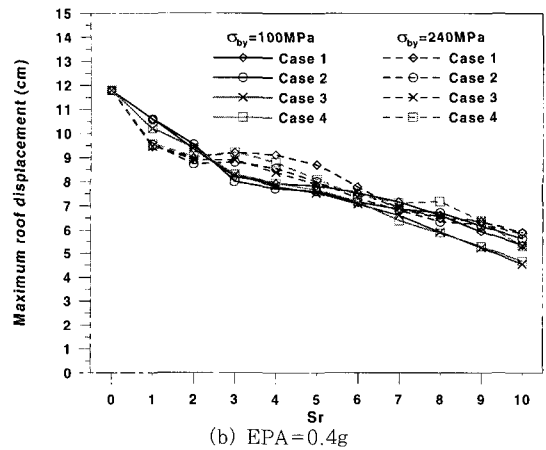
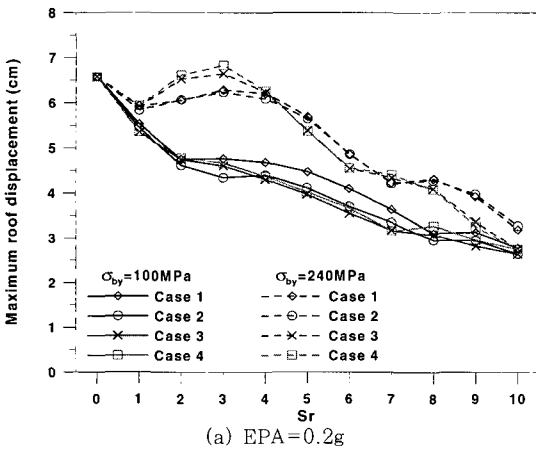


그림 13 5층 구조물의 최상층의 최대변위

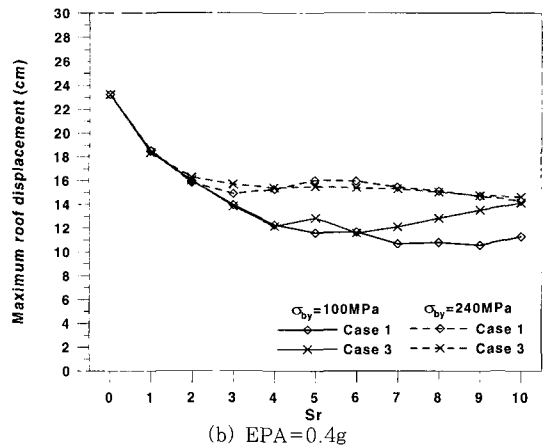
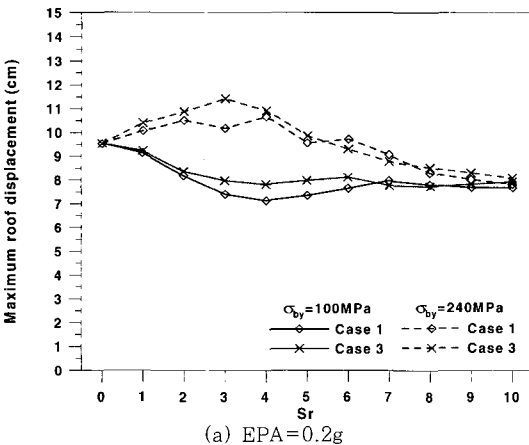


그림 14 10층 구조물의 최상층의 최대변위



시스템의 주기는 짧아지고 입력되는 지진하중은 커지기 때문인 것으로 사료된다.

#### 5.4 소성힌지와 누적된 소성변형

구조물에 발생한 소성힌지의 수는 UB의 항복응력에 관계없이 강성비가 증가함에 따라 감소하였다. 그러나 10층 건물의 경우 강성비가 증가함에 따라 기둥에서 발생한 소성힌지의 수가 증가하였는데 이것은 그림 14와 같이 최상층의 변위가 증가하는 현상과 관계있는 것으로 생각된다. UB의 항복응력과 분배방법에 따른 소성힌지의 분포를 나타낸 그림 15와 16을 보면 보와 기둥의 소성힌지는 분배방법에 관계없이 거의 비슷한 경향을 보이고 있다. 그러나 UB에서 소성변형의 발생 여부는 항복응력에 따라 다르다.  $\sigma_{by}=100\text{MPa}$ 의 UB를 사용한 경우(그림 15)는 거의 모든 층의 UB가 인

장력과 압축력을 받을 때 항복하여 소성거동을 하였는데 그림 16에서 볼 수 있듯이 240MPa의 항복응력을 가진 UB를 사용한 경우는 일부 층의 UB는 항복하지 않았다. 이것은 UB의 항복응력이 낮을수록 보다 빨리 항복하게 되고, 지진하중에 의한 진동에너지를 UB의 소성변형에 의하여 소산시키기 때문에 구조부재의 손상과 최대변위를 줄일 수 있음을 보여준다. 또한 Case 3과 4에 따라 분배한 경우 모든 층에서 UB의 항복이 일정하게 발생하였지만 Case 1의 경우는 중간층에 Case 2의 경우는 하부층의 UB에서 소성변형이 발생할 수 있다.

소산된 에너지 양을 나타내는 다른 중요한 변수가 누적된 소성변형량이다. 5층 건물의 결과를 나타낸 그림 17을 보면 강성비가 증가할수록 보와 기둥에서 발생한 누적된 소성회전량이 감소하였는데, 즉 이것은 강성비가 커짐에 따라 구조물의 손상이 줄어들음을 의미

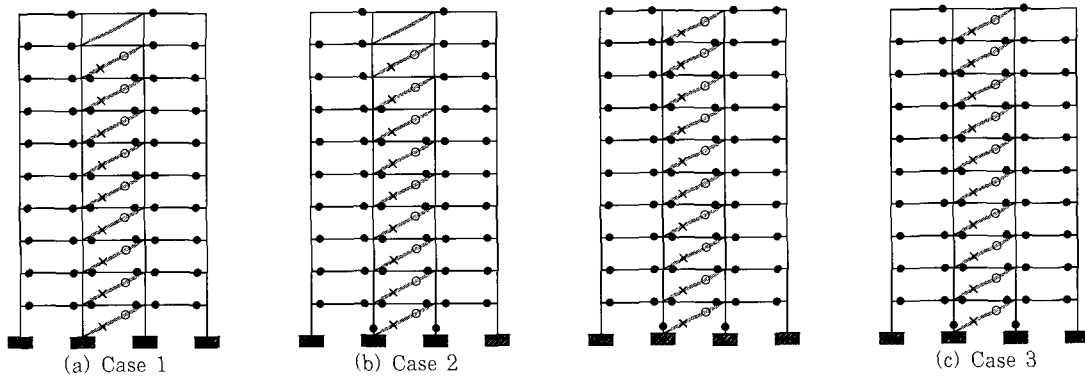


그림 15 소성힌지의 위치 ( $\sigma_{by}=100\text{MPa}$ ,  $EPA=0.4g$ ,  $S_r=4$ )

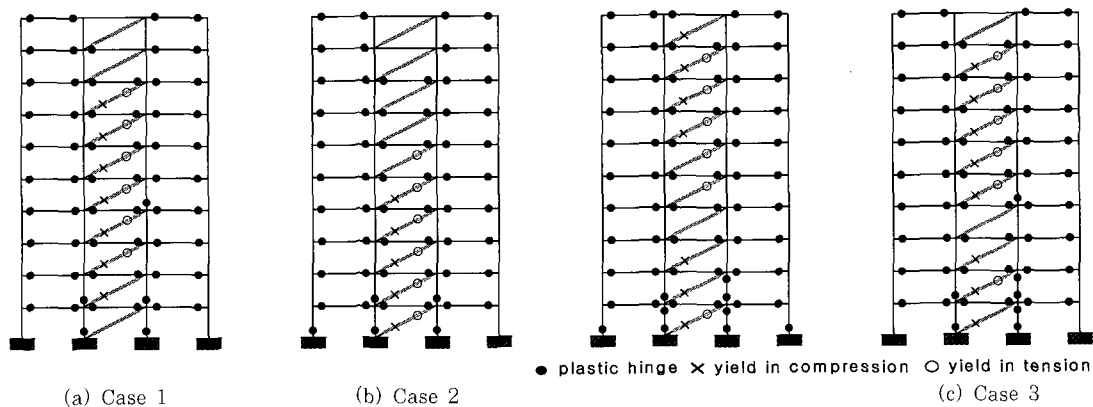


그림 16 소성힌지의 위치 ( $\sigma_{by}=240\text{MPa}$ ,  $EPA=0.4g$ ,  $S_r=4$ )

한다. 또한 Case 3과 4에 따라 분배한 경우의 누적된 소성회전량이 다른 경우보다 작았다. 또한  $\sigma_{by}=100\text{MPa}$ 를 사용한 경우 구조물의 손상이 더욱 작았다. 10층 구조물에 있어서 (그림 18) UB의 항복응력이 240MPa인 경우 강성비가 증가함에 따라 구조물의 손상이 커지는 경향이 더욱 두드러짐을 알 수 있다.

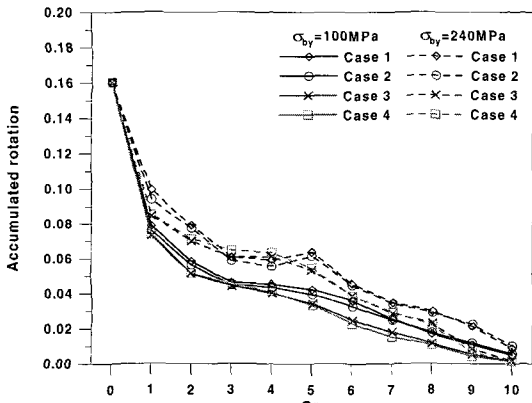
유효최대가속도가 0.4g인 지진하중에 대하여 UB에서 발생한 누적된 소성변형량을 나타낸 그림 19에 따르면 그림 17과 18에 나타난 구조부재의 손상과 반대로 UB의 항복응력이 낮은 경우 보다 많은 소성변형이 발생하여 UB의 누적된 소성변형량이 크게 나타났다. 여기서  $\sigma_{by}=240\text{MPa}$ 를 사용한 경우는 일부층에서 UB가 항복하지 않고 탄성거동을 하였기 때문에 전체적인 소성변형량이 작았다. 즉 UB가 탄성거동을 하였기 때

문에 입력된 지진에너지가 UB의 소성거동에 의하여 소산된 것이 아니라 구조부재로 전달되어 구조물의 손상을 초래하였다.

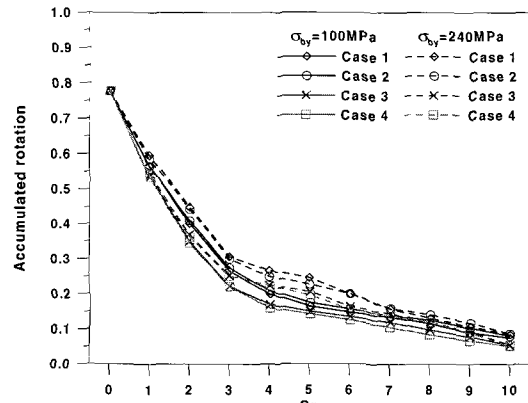
### 6. 결 론

본 연구에서는 소성감쇠기가 설치된 구조물의 성능에 영향을 주는 변수에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. UB가 설치된 단자유도계 구조물의 등가감쇠비는 UB의 강성이 증가함에 따라 증가하였다. 등가감쇠비를 최대로 하는 UB의 최적항복응력은 UB의 강성이 증가할수록 연성요구량이 감소할수록 작아졌다.

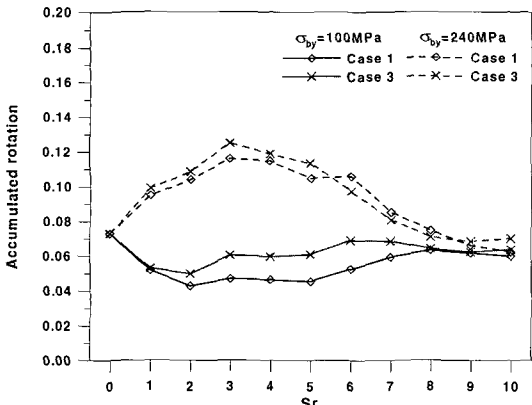


(a) EPA=0.2g

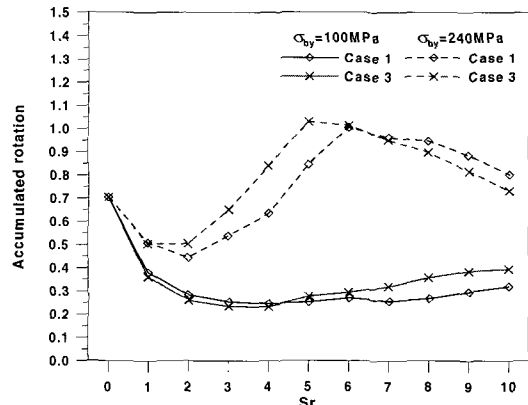


(b) EPA=0.4g

그림 17 5층 구조물의 구조부재에서 발생한 누적된 소성회전량



(a) EPA=0.2g



(b) EPA=0.4g

그림 18 10층 구조물의 구조부재에서 발생한 누적된 소성회전량

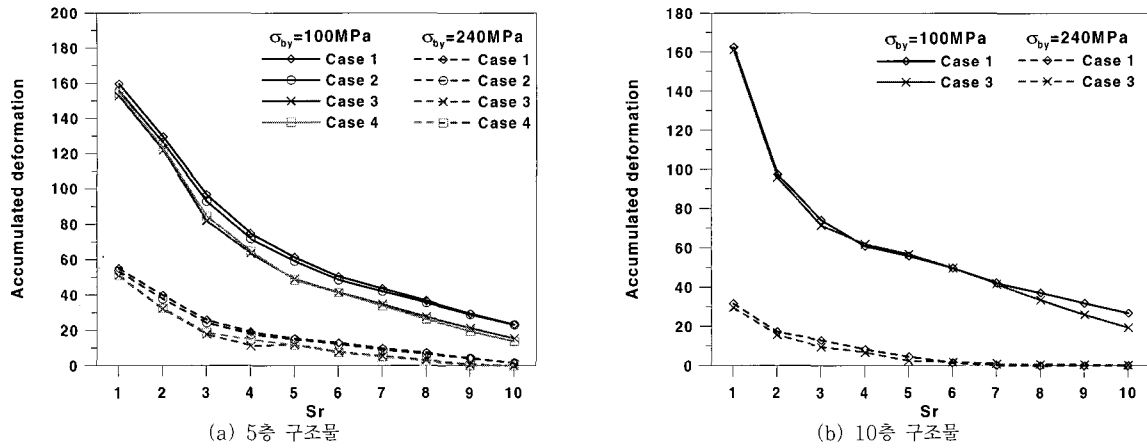


그림 19 소성감쇠기의 누적된 소성변형량 (EPA=0.4g)

- UB의 강성이 증가할수록 구조물의 최대변위는 감소하였다. 그러나 어떤 경우에는 UB의 강성이 증가할수록 최대변위와 누적된 소성변형량이 증가하였다.
- UB의 항복응력이 작을수록 큰 소성변형이 발생하고 보다 많은 에너지를 소산하기 때문에 구조부재의 손상을 줄이는데 보다 효과적이다.
- 강접합된 구조물에서 층간변위와 층전단력에 비례하도록 각 층에 UB를 설치하였을 때 구조물의 응답을 개선하는데 효과적이었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구 과제(과제번호 : R01-1999-00298)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- Clark, P. W., Aiken, I. D., Kasai, K., Ko, E., and Kimura, I., Design procedures for buildings incorporating hysteretic damping devices, *Proceedings 68th annual convention*, Santa

- Barbara, SEAOC, 1999
- Tremblay, R., Degrange, D., and Blouin, J., Seismic rehabilitation of a four-story building with a stiffened bracing system, *Proceeding of the 8th Canadian Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, 1999
- Inoue, K., and Kuwahara, S., "Optimum strength ratio of hysteretic damper," *Earthquake engineering and structural dynamics*, No. 27, 1998, pp.577~588
- Xia, C., and Hanson, R. D., "Influence of ADAS element parameter on building seismic response," *J. Structural Engineering*, ASCE, Vol. 118, 7, 1992, pp.1903~1918
- 김진구, 김유경, 최현훈, "성능수준 만족을 위한 가새형 소성 감쇠기의 설계," 한국지진공학회 논문집, 5권 6호, 2001, pp.47~54
- Tsai, K. C., and Li, J. W., "DRAIN2D+, A general purpose computer program for static and dynamic analyses of inelastic 2D structures supplemented with a graphic processor," Report No.CEER/R86-07, National Taiwan University, Taiwan