

# 철근콘크리트 골조와 강재댐퍼의 강성비 및 내력비에 따른 내진보강 성능

## Performance of Seismic Retrofit According to the Stiffness and Strength Ratios of Steel Damper to Reinforced Concrete Frame

백은림<sup>1)\*</sup> · 오상훈<sup>1)</sup> · 이상호<sup>1)</sup>

Baek, Eun Lim<sup>1)\*</sup> · Oh, Sang Hoon<sup>1)</sup> · Lee, Sang Ho<sup>1)</sup>

1)부산대학교 건축공학과

1)Department of Architectural Engineering, Pusan National University

### / A B S T R A C T /

The purpose of this study is to evaluate the effectiveness of the seismic retrofit performance for a reinforced concrete structure with steel damper. The nonlinear static analysis of the RC frame specimens with and without retrofit using the steel damper was conducted and the reliability of the analysis was verified by comparing the analysis and test results. Using this analysis model and method, additional nonlinear analysis was conducted considering varying stiffness and strength ratios between RC frame and steel damper and the failure mode of RC frame. As the result of the study, the total absorbed energy increased and the damage of RC frame was reduced as stiffness and strength ratios increased. The seismic retrofit performance, evaluated by means of the yield strength, increasing ratio of the absorbed energy and damage of the frame, increased linear proportionally with the increase of the strength ratio. In addition, the seismic retrofit performance was stable for stiffness ratios larger than 4~5. The energy absorption capacity of the frame governed by shear failure was better than that of the frame governed by flexure failure.

**Key words:** Reinforced Concrete Frame, Steel Damper, Seismic Retrofit Performance, Nonlinear Analysis

## 1. 서론

최근 전 세계적으로 대규모 지진이 발생하여 많은 인명피해 및 재산피해가 발생하였으며, 이들 피해의 원인은 대부분 내진성능이 부족한 건축물의 붕괴인 것으로 조사되었다[1,2]. 특히, 2008년 중국 쓰촨성 지진에서는 약 7,000여 동의 학교 건축물이 붕괴되어 많은 학생 및 교사들의 인명피해가 발생하였으며, 재난민의 수용시설 부족 및 교육의 지속 불가 등 많은 2차적 문제를 야기시켰다[2]. 쓰촨성 지진에서 붕괴된 학교 건축물은 비보강 조적 벽체 및 허리벽으로 기둥의 하부가 구속된 RC 단주 등의 구조적 특징을 가지고 있으며, 이러한 특징은 지진에 매우 취약함이 여러 연구[3-5]를 통해 밝혀졌다. 하지만 이러한 구조적 특징은 국내를 비롯하여 전 세계의 학교 건축물에 공통적으로 적용되어 있어, 이에 대한 정확한 내진성능의 평가와 내진보강이 필요한 실정이며 최근 관련 연구가 많이 진행되고 있다. 학교 건축

물에 적용 가능한 내진보강방법은 콘크리트 벽체를 후타설하여 강도를 보강하거나, 기둥 및 보에 섬유시트를 부착하여 연성을 확보하는 등의 방법이 기존에 주로 사용되었으나[6], 공사중 학교 시설물의 사용에 제한이 있는 등의 단점이 있다. 일본에서는 개구부에 철골브레이스를 설치하는 방법이 주로 사용되고 있으나, 국내에서는 채광 및 미관상의 문제로 적용하기 어려운 단점이 있다.

이러한 단점을 보완하기 위하여 선행연구[7]에서는 지진에 의해 입력되는 에너지를 흡수하여 진동을 제어하는 제진장치의 일종인 강재댐퍼시스템을 제안하고 이에 대한 구조적 성능평가 실험 및 강재댐퍼시스템의 적용 유무에 따른 철근콘크리트(이하 RC) 골조의 정적 및 동적실험을 수행하여 적용성 및 내진보강효과를 검증하였다. 이러한 강재댐퍼시스템을 실제 학교 건축물의 RC 골조에 적용하기 위해서는 기존 비보강 골조 및 보강후 골조의 지진거동 및 내진성능을 보다 정확히 평가하여야 하며, 이를 위하여 부재의 비선형 거동을 고려한 비선형 지진응답해석을 수행할 필요가 있다.

한편, 강재댐퍼를 이용한 내진보강공법은 많은 연구를 통해 적용성 및 내진보강 효과가 검증되었으나[8,9], 제진구조설계지침에서는 주 구조체

\*Corresponding author: Lee, Sang Ho

E-mail: sangho@pusan.ac.kr

(Received 17 December 2012; Accepted 13 May 2013)

가 소성변형 성능을 가지고 있으며, 취성파단이 발생하지 않는 것을 전제로 하고 있어 주로 철골구조에 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 이를 RC 골조에 적용하기 위해서는 내진보강효과에 영향을 미치는 여러 가지 변수에 대하여 실험 및 해석적 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 선행연구[7]에서 제안된 강재댐퍼시스템 및 이의 적용 유무에 따른 RC 골조의 비선형 해석을 수행하여 해석결과와 실험결과와의 비교·분석을 통한 해석의 신뢰성을 검증한 다음, 이를 바탕으로 실제 학교 건축물의 보강 골조를 가정하여 RC 골조와 댐퍼의 강성비 및 내력비에 따른 이력거동과 항복강도, 에너지흡수능력 및 골조의 손상비율 등의 경향을 파악하는 것을 주된 목적으로 한다.

## 2. 해석의 신뢰성 검증

### 2.1 해석 대상 및 모델

해석 대상 실험체는 Fig. 1과 같이 선행연구[7]에서 제안된 슬릿형 강재 댐퍼시스템 및 이의 적용 유무에 따른 허리벽이 있는 RC 부분골조이며, 실

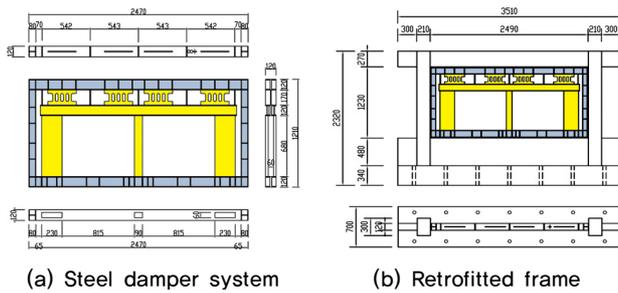


Fig. 1. Specimens(unit:mm)

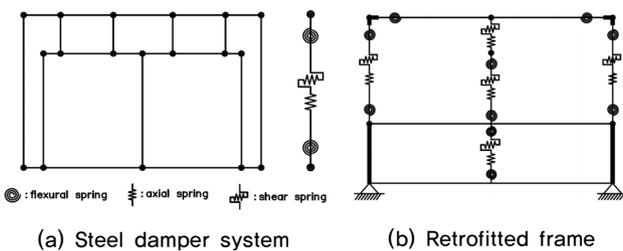


Fig. 2. Analysis models of specimens

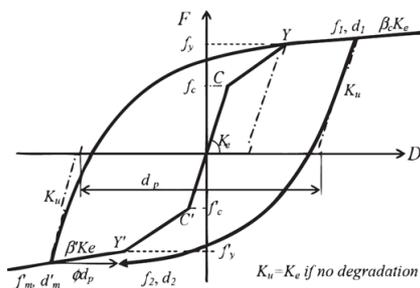


Fig. 3. Hysteresis model of steel damper system

험여건을 고려하여 실험크기의 60% 스케일로 제작되었다. 이에 대한 해석 모델은 실험체의 각 부재를 Fig. 2와 같이 비선형 이력거동[10]을 나타내는 스프링을 가지는 선형부재로 모델화하였다.

강재댐퍼시스템은 각각의 철골 부재가 휨, 전단, 축 스프링을 가지도록 하며, 스프링의 이력거동은 Fig. 3과 같이 철골부재의 항복강도 및 인장강도에 의한 전소성모멘트를 특성점으로 하는 Tri-linear형의 골격곡선을 가지며, 반복 가력시 변형경화에 의해 하중이 증가하는 특성을 잘 반영할 수 있는 Ramberg-Osgood curve를 나타내는 이력모형을 적용하였다. 슬릿 댐퍼의 경우, 전체 구조체에 대하여 전단력에 저항하는 장치이므로 식 (1)~식 (3)에 의하여 휨항복에 의한 전단력과 항복변형, 초기강성의 특성점 (Table 1 참조)을 가지는 전단 스프링만 가지는 것으로 가정하였으며, 강성 저감 및 이력률에 관한 특성값은 Fig. 4에 나타난 강재댐퍼시스템의 정적가력실험에 의한 슬릿댐퍼의 하중-변위 관계 및 Fig. 5에 나타난 골격곡선에서 결정하였다.

$$bQ_y = \frac{\sigma_y t B^2}{2 H'} \tag{1}$$

$$\Delta_y = \frac{1.5 Q_y H_T}{n E t B} \left\{ \left( \frac{H'}{B} \right)^2 + 2.6 \right\} \tag{2}$$

$$K = \frac{bQ_y}{\Delta_y} \tag{3}$$

- 여기서,  
 $bQ_y$ : 슬릿댐퍼의 항복강도       $\Delta_y$ : 슬릿댐퍼의 항복변위  
 $K$ : 슬릿댐퍼의 초기강성       $\sigma_y$ : 강재의 항복강도  
 $t$ : 스트럿 두께       $H'$ : 스트럿의 유효길이  
 $n$ : 스트럿의 개수       $E$ : 강재의 탄성계수  
 $B$ : 스트럿 폭       $H_T$ : 스트럿의 총 길이

Table 1. Properties of skeleton curve for steel damper system

Yield strength(kN)	Yield displacement(mm)	Tensile strength(kN)
201	0.468	270
Initial stiffness (kN·mm)	1st Stiffness degradation ratio( $\alpha$ )	2nd Stiffness degradation ratio( $\beta$ )
3.86×104	0.08	0.019

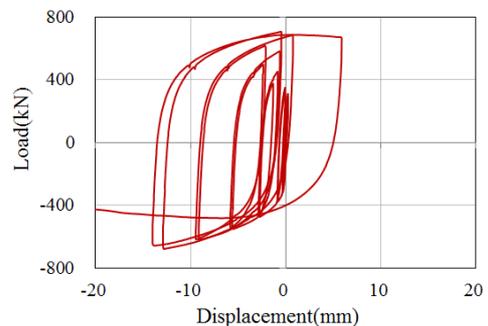


Fig. 4. Load-displacement relationship of the damper

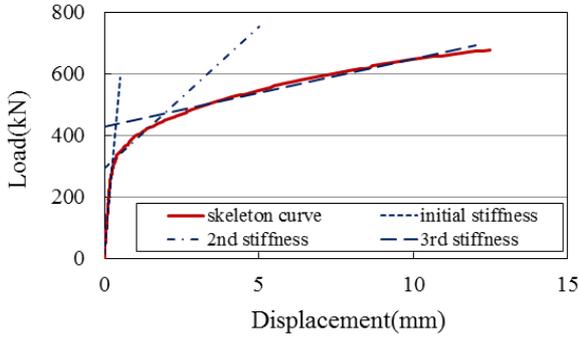


Fig. 5. Skeleton curve of the damper and stiffness degradation

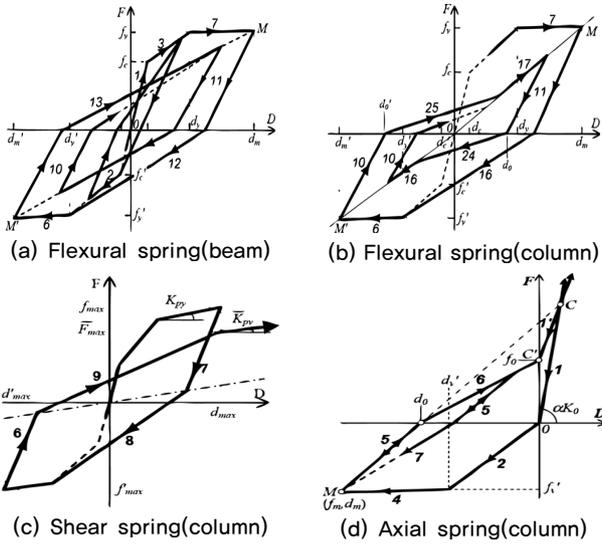


Fig. 6. Hysteresis models

골격곡선의 특성은 부방향 가력시의 이력곡선을 기준으로 결정하였으며, Fig. 5에 강재댐퍼시스템 슬릿댐퍼의 부방향 골격곡선 및 강성저하선을 나타낸다. 골격곡선에서 1차 강성저하는 초기 강성에 비하여 강성이 90% 이상 저하된 시점, 2차 강성저하는 20% 이상 저하된 시점을 기준으로 하여 Table 1과 같이 강성저하 계수를 결정하였다. 참고로 결정된 강성저하율은 기존 연구[11]에서 제시된 슬릿댐퍼 골격곡선의 값보다 약 2배 가량 큰 값으로, 이는 실험여건상 변위가 증가함에 따라 슬릿댐퍼에 축력이 작용하였고, 이 축강성의 영향으로 인해 2차 및 3차 강성이 증가된 것으로 판단된다.

RC 골조의 보는 축력을 고려하지 않았으며, 전단은 탄성거동하는 것으로 가정하였다. 휨 이력거동은 Fig. 6의 (a)와 같이 건축구조기준(KBC-2009)[12]에 의하여 계산된 균열강도와 항복강도를 특성점으로 한 Tri-linear형의 골격곡선을 따르며, 반복 가력시 이전 가력스텝의 최대 하중점을 향하는 복원력 모델을 적용하였다.

기둥의 휨 이력거동은 Fig. 6의 (b)와 같이 보와 동일한 골격곡선과 이력률을 가지면서 균열발생 이후 항복에 따른 편칭거동을 반영하였고, 전단거동은 기둥의 휨거동에 적용한 것과 동일한 이력률에 Fig. 6의 (c)와 같이 최대강도에 도달한 이후 내력이 저하되어 취성파괴되는 특징을 함께 고려하

Table 2. Comparisons between analysis and test result

Specimen	$K_i$ (kN/mm)	$P_y$ (kN)	$P_m$ (kN)	
Steel damper system	test	96	247	487
	analysis	175(1.82)	294(1.19)	671(1.38)
Non-retrofit frame	test	10	106	142
	analysis	34(3.40)	125(1.18)	132(0.93)
Retrofit frame	test	148	380	494
	analysis	187(1.26)	366(0.96)	566(1.15)

\* The value within mark ( ) is the ratio of analysis to test.

\*  $K_i$  : initial stiffness,  $P_y$  : Yield strength,  $P_m$  : maximum strength

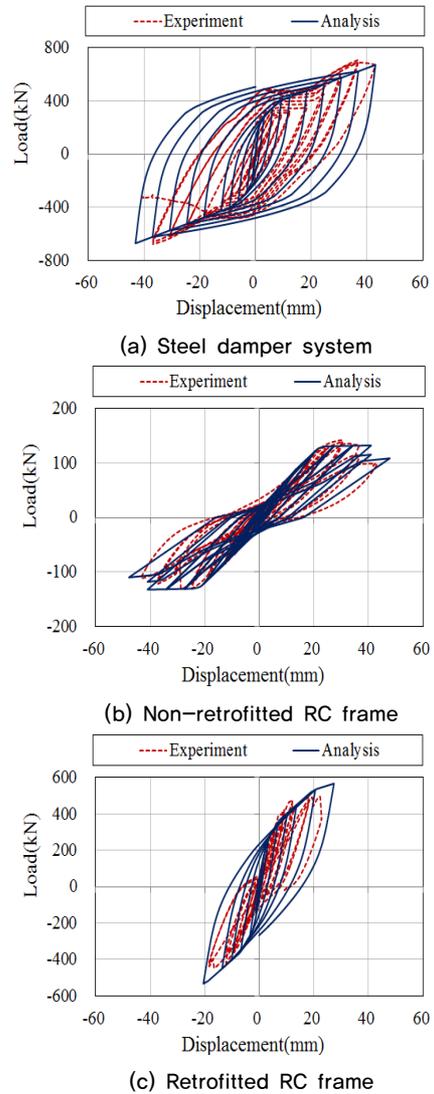


Fig. 7. Load-displacement relationship

였다. 기둥의 축 거동은 인장항복 이후 인장축에는 강성저하가 발생하지만 압축축에는 강성저하가 발생하지 않으며 반복가력에 의한 이력률은 적용하지 않았다(Fig. 6의 (d) 참조). 또한 기둥-보 접합부는 균열이 발생한 실험 결과를 고려하여 부재의 위험단면 위치에서 1/4D(D: 부재의 깊이)만큼 제외 강역(Rigid Zone)으로 설정하였다. 허리벽의 경우, 양측 기둥 하부의

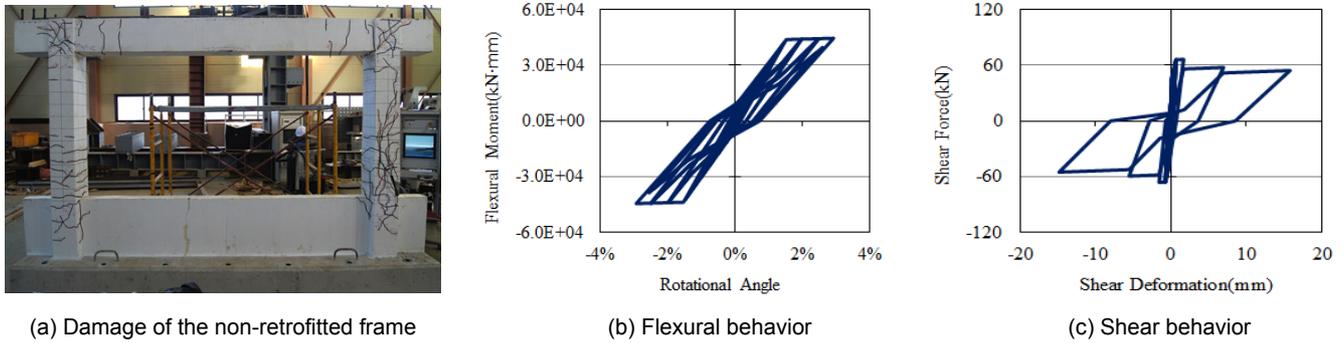


Fig. 8. Damage of the non-retrofitted frame and hysteresis behavior of the column model

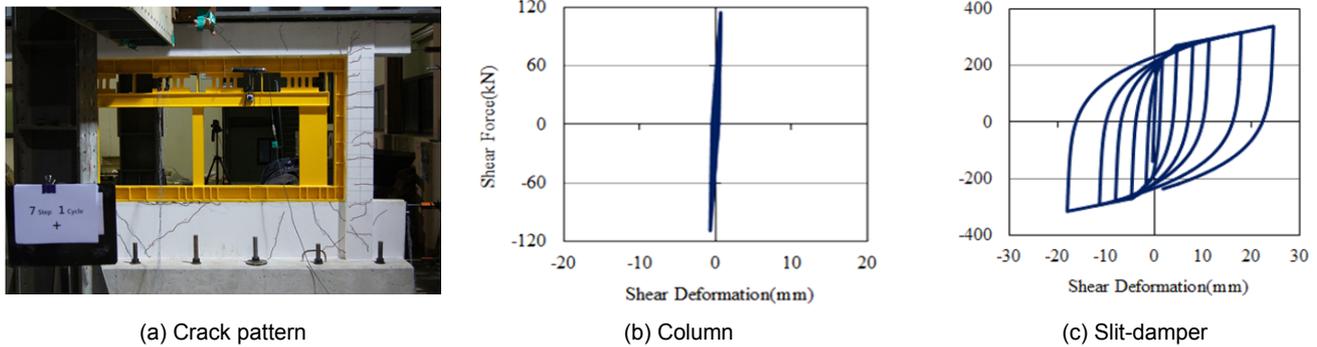


Fig. 9. Crack pattern and shear behavior of the members for retrofitted frame

변형을 구속하지만 하중 저항능력은 없는 것으로 가정하여 기둥 하부에 강역으로 설정하였다[13].

보강 RC 골조의 경우, 강재댐퍼시스템의 외곽프레임이 RC 골조에 중첩되어 강성 및 내력이 증가되는 것으로 가정하였으며, 하부 지지기둥 및 슬릿댐퍼는 각각 하나의 선형부재로 단순화하여 골조의 중앙에 배치하였다.

## 2.2 해석 방법

본 연구에서는 3차원 해석 프로그램인 CANNY[10]를 사용하여 비선형 정적 및 동적해석을 실시하였다. 정적해석은 각 해석모델의 최상단부에서 변위제어로 RC 기둥의 유효길이(H=1230 mm)에 대한 부재각을 증가시키며 실험과 동일하게 반복 가력하는 방법으로 해석하였다.

## 2.3 해석 결과

정적실험 및 해석에 의한 각 실험체별 주요 결과값을 Table 2에, 하중-변위 관계 비교를 Fig. 7에, 실험에 의한 균열 및 손상 형상과 해석에 의한 RC 기둥 및 슬릿 댐퍼의 거동을 Fig. 8과 Fig. 9에 나타낸다.

강재댐퍼시스템의 비선형 정적해석 결과(Fig. 7의 (a) 참조), 슬릿댐퍼가 전단항복한 후 소성변형을 통해 많은 에너지를 흡수하며 실험결과와 유사한 거동을 나타내었다. 또한 Ramberg-Osgood curve를 고려한 복원력 모델을 적용함에 따라 반복 가력시 변형경화에 의하여 하중이 증가하는 경향을 비교적 잘 묘사하고 있다. 반면 실험결과에 비하여 초기강성이 다소

게 평가되었는데, 실험에서 가력시 면외방향 횡변위가 발생하여 강성값이 다소 작게 측정된 것으로 판단된다. 이에 따라 강재댐퍼시스템의 반복 가력시에 강성이 거의 저하되지 않는 특성이 반영되어 해석결과에 에너지 흡수면적이 실험결과에 비하여 다소 크게 평가되었다.

강재댐퍼시스템의 보강 유무에 따른 RC 골조의 비선형 정적해석결과, 전체적인 하중-변위 이력 거동이 유사한 형태를 나타내었다. 비보강 골조의 해석결과(Fig. 7의 (b), Table 2의 비보강 골조 참조), 항복하중이 실험값에 비하여 약 18% 가량 크게 발생하였는데, 이는 실험값은 기둥의 주근이 최초로 항복에 도달한 시점을 기준으로 측정된 것임에 반해, 해석 모델에서 휨 스프링은 모든 철근이 항복한 것을 가정하여 항복하중을 산정하였기 때문으로 판단된다. 또한 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 실험에서 기둥이 전단파괴된 후 내력이 저하 되는 거동을 비교적 잘 묘사하고 있다. 해석결과에 의한 초기강성이 실험값보다 약 3.4배 크게 평가되었는데, 이는 실험에서 본 가력전 역추에이터의 오작동으로 인해 실험체에 약 20mm 변위 정도의 순간적인 충격력이 가해져 초기강성이 크게 저하되었기 때문으로 판단된다. 초기강성을 제외한 균열강도 이후의 2차 강성 및 제하시 강성 등은 실험과 거의 유사하게 평가되어, 적용된 해석모델에 의하여 비보강 RC 골조의 비선형 거동과 구조적 성능이 비교적 정확하게 평가되는 것으로 판단된다.

보강 골조의 경우(Fig. 7의 (c), Table 2의 보강골조 참조), 초기강성 및 항복강도 해석값은 실험값과 비교적 유사한 결과를 나타내었다. Fig. 9에 나타낸 바와 같이 가력실험 도중에 강재댐퍼시스템과 RC 골조를 부착한 에폭시면에서 부착파괴가 발생하여 강재댐퍼시스템으로 하중전달이 효율적으로 이루어지지 않았으며, 가력도중 가력보를 연결한 RC 골조 보 중앙

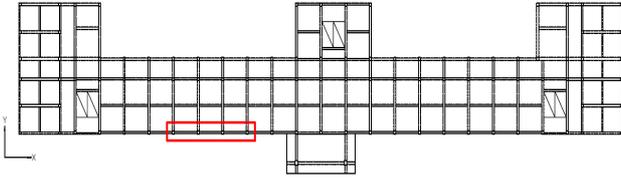


Fig. 10. Structural plan of prototype and the frame to study

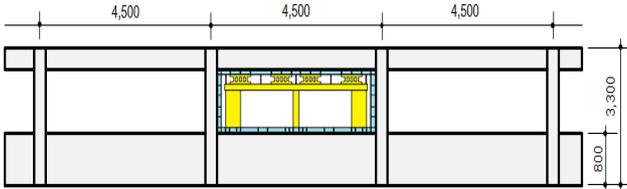


Fig. 11. Frame with retrofit(unit:mm)

(\* The frame governed by flexure is the same frame except spandrel walls.)

Table 3. Details of section of RC frame

Member	Column	Beam	
		End	Center
Size	350×450	300×450	300×450
Longitudinal	12-HD19 2-HD16	Top HD19-3EA Bot. HD19-2EA	Top HD19-2EA Bot. HD19-3EA
Hoop	Top/Bot. HD10 @300 Center HD10 @900	2-HD10@200	2-HD10@300
Detail			

부에서 전단균열이 발생함에 따라 하중저하가 발생한 반면, 해석에서는 부차파괴는 고려되지 않아 강재댐퍼시스템의 거동이 지배적으로 나타났다.

이와 같은 해석결과에 따라, 적용된 비선형 해석모델 및 방법은 강재댐퍼시스템 및 이를 적용한 RC 골조의 거동을 비교적 잘 모사할 수 있는 것으로 판단되며, 이를 이용하여 강재댐퍼와 골조의 강성비 및 내력비에 따른 실제 RC조 보강골조의 거동을 파악하고자 한다.

### 3. 강성비 및 내력비에 따른 내진보강 성능

강재댐퍼를 이용한 내진보강 공법은 댐퍼가 주골조에 비하여 조기에 항복한 후 소성변형 및 이력거동을 통해 많은 에너지를 흡수하여 주골조는 탄성에 머물게 하는 원리를 바탕으로 성립된다. 또한 동일한 수평변위가 발생할 때 수평강성이 큰 부재에 더 큰 하중이 집중되고, 이에 따라 수평 부재간의 강성 차이에 따라 부재에서 소산시킬 수 있는 에너지의 양이 결정되기 때문에 주골조의 강성에 대한 댐퍼의 강성비는 내진보강성능을 결정하는 중요한 요인 중 하나라 할 수 있다.

한편, 내진보강용 댐퍼가 부담하여야 할 보강 내력은 기본적으로 지진발생시 구조물이 필요한 요구내력에서 보유내력을 제외한 필요내력 이내에서 결정할 수 있으나, 골조에 대한 댐퍼의 내력비에 따른 내진보강 성능 및

Table 4. Analysis variable 1 – Failure type

Failure type	Spandrel wall(height)
Frame governed by shear	O (800mm)
Frame governed by flexure	X

Table 5. Properties of RC frames

Type	hs (mm)	$rP_y$ (kN)	$sP_y$ (kN)	$sP_y / rP_y$
Shear	1425	658	673	1.02
Flexure	1025	473	594	1.26

\* hs : length of shear span=effective column length/2

$rP_y$  : flexural yield strength,  $sP_y$  : shear yield strength

Table 6. Analysis variable 2 – Stiffness ratio(Damper/Frame)

Initial stiffness of non-retrofit frame (kN/mm)	Frame governed by shear					Frame governed by flexure				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	181.79					70.07				
Stiffness ratio of retrofitted frame (Damper/Frame)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Table 7. Analysis variable 3 – Strength ratio(Damper/Frame)

Yield strength of non-retrofit frame(kN)	Frame governed by shear					Frame governed by flexure				
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
	658					473				
Strength ratio of retrofitted frame (Damper/Frame)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0

제안치에 관한 연구는 부족한 실정이다. 또한 댐퍼에 의한 보강내력이 결정되었더라도, 보강내력을 집중시킬 것인지, 분산시킬 것인지에 따라 편심 또는 내력 불균형 등이 발생하여 에너지 흡수효율에 영향을 미칠 수 있으며, 이러한 점을 고려하여 댐퍼의 배치를 구성하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 강재댐퍼를 이용한 내진보강 공법을 RC 골조에 효율적으로 적용하기 위하여 RC 골조와 댐퍼 간 강성비 및 내력비를 변수로 설정하고 비선형 정적해석을 수행하여 에너지 흡수효율을 비교하였다.

#### 3.1 해석 대상 및 모델

Fig. 10과 같이 비내진으로 설계된 실제 학교 건축물을 대상으로 장변방향 1층의 3연속 골조(Fig. 10의 박스부분, Table 3 참조)를 연구대상으로 설정하였으며, 내진보강 공법으로 선행연구에서 제안된 강재댐퍼시스템을 가운데 골조에 적용한 보강 골조를 가정하여 해석 대상으로 설정하였다. 연구 대상의 기준 골조는 Fig. 11과 같이 800 mm 높이의 허리벽이 설치되어 있으며, 허리벽이 기둥의 하부를 구속함에 따라 전단스팬이 짧아져 전단강도에 비하여 상대적으로 휨강도가 커지게 되어 휨항복과 전단항복이 거의 동시에 발생하는 전단지배형 골조로 평가된다. 강재댐퍼를 이용한 내진보강 공법은 골조가 충분한 변형능력이 있는 경우 더욱 유리한 것으로 알려

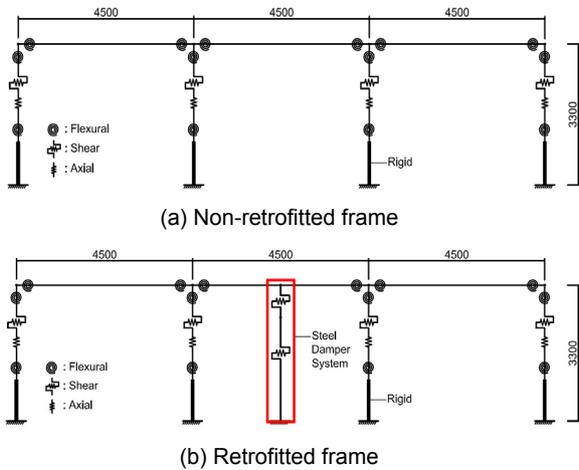


Fig. 12. Analysis models of frame governed by shear(unit:mm)  
 (\* The frame governed by flexure is the same frame except rigid zone.)

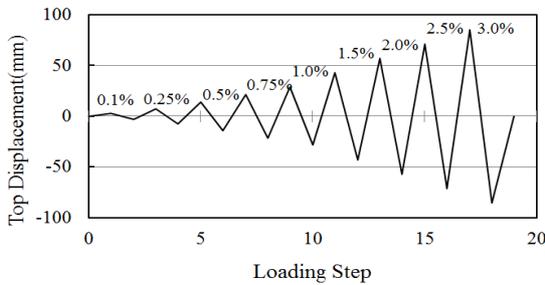


Fig. 13. Cyclic loading pattern

져 있어, 본 연구에서는 전단형 기준 골조에서 허리벽을 제외한 휨지배형 골조를 가정하여 골조의 파괴유형에 따른 내진성능의 영향을 검토하고자 하였다. 따라서 해석의 변수는 Table 4 ~ Table 7에 나타낸 바와 같이 골조의 파괴유형과 3 구간 골조에 대한 댐퍼의 강성비 및 내력비로 설정하였다. 참고로, 건축물에 강제댐퍼를 이용하여 내진보강하는 경우 모든 골조에 보강 댐퍼를 설치하는 경우는 거의 없으며, 추후 댐퍼의 배치에 따른 내진성능 분석을 위한 기초 연구로서 3연속 골조를 연구 대상으로 설정하였다.

해석 모델은 Fig. 12와 같이 비선형 거동을 나타내는 스프링을 가지는 선형부재로 모델링하였으며 각 부재의 휨, 전단 및 축 거동의 복원력 모델은 2.1 절에서 전술한 모델과 동일하며, 휨강도 및 전단강도[14]는 식 (4) 및 식 (5)로 산정하였다. 보강 골조에서 강제댐퍼시스템의 경우, 횡하중에 의한 전단력에만 저항하도록 설계하므로 전단 스프링으로 모델화하였으며, 슬릿댐퍼 지지기둥의 강성은 강제댐퍼시스템의 전체 강성에 영향을 미치지 않도록 충분히 강성을 확보하여 Rigid한 것으로 가정하였다.

정적가력패턴은 휨형 골조의 기둥 유효높이(H = 2850 mm)에 대하여 부재각을 증가시키면서, Fig. 13과 같이 변위제어로 반복 가력하였다.

$$M_y = 0.8 a_t \sigma_y D + 0.5 ND \left( 1 - \frac{N}{bDF_c} \right) \quad (4)$$

여기서,

- $M_y$ : 휨 항복모멘트
- $D$ : 기둥의 춤
- $\sigma_y$ : 철근 항복강도
- $F_c$ : 콘크리트 압축강도
- $a_t$ : 인장철근 단면적
- $N$ : 축력
- $b$ : 기둥의 폭

$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.053 p_t^{0.23} (18 + F_c)}{M/Qd + 0.12} + 2.7 \sqrt{p_w s \sigma_{wy}} + 0.1 \sigma_0 \right\} b j \quad (5)$$

여기서,

- $Q_{su}$ : 전단 종국강도
- $s \sigma_{wy}$ : 전단보강근 항복강도
- $p_w$ : 전단보강근비
- $j$ : 응력중심간 거리(0.8D)
- $p_t$ : 인장철근비(%)
- $d$ : 기둥유효춤(D-50)
- $\sigma_0$ : 기둥 축응력도

### 3.2 해석 결과 및 고찰

#### 3.2.1 하중-변위 관계

Fig. 14 및 Fig. 15에 파괴유형별 골조에 따라 주요 내력비 및 강성비의 하중-변위 관계를 나타낸다. 휨지배형 및 전단지배형 골조 모두 전반적으로 내력비 및 강성비가 증가할수록 댐퍼의 거동이 지배적으로 나타나 댐퍼의 소성변형에 의한 에너지흡수면적이 증가하는 경향을 나타내었으며, 제하시 및 재재하시에 강성이 확보되어 편칭현상이 발생하는 비보강 골조에 비하여 에너지 흡수에 유리한 것으로 판단된다. 휨지배형 골조에서는 복원력 모델에서 골조의 내력저하가 반영되지 않아, RC 골조의 내력과 댐퍼 내력이 중첩되어 전체 내력이 계속 증가하였다. 반면 전단지배형 골조의 경우 골조가 전단 항복하여 하중이 저하되는 시점에서 전체 보강골조의 내력도 저하되는 현상이 발생하였지만 강성비가 커질수록 댐퍼의 거동에 지배되어 내력저하가 두드러지지는 않았다. 하지만 댐퍼의 하중 지지 및 에너지 흡수 능력은 골조가 항복하여 휨 또는 전단으로 파괴되기 직전까지 유효하다고 할 수 있다.

Fig. 16에 휨지배형 비보강 골조에 대한 보강 골조의 항복하중비를 나타낸다. 여기서 retrofit  $P_y$ 는 보강 골조, non-retrofit  $P_y$ 는 비보강 골조의 항복하중을 의미한다. Fig. 16의 (a)와 같이 보강 골조의 내력은 댐퍼의 보강내력 만큼 일정하게 증가한다. 한편, Fig. 16의 (b)와 같이 보강골조의 내력은 댐퍼의 강성비와도 무관하지 않는 결과를 나타내었다. 이는 댐퍼의 초기강성이 증가할수록 Tri-Linear형 골격곡선에서 2차 및 3차 강성이 함께 증가하게 되는데, 이때 보강골조의 항복강도 및 내력은 RC 골조의 항복 내력과 동일한 시점에서 댐퍼의 2차 및 3차 강성선 상의 어느 하중점과 중첩되어 결정되므로, 댐퍼의 강성비가 증가할수록 보강 골조의 항복강도가 증가하는 것으로 판단된다.

Fig. 17에 댐퍼의 강성 및 내력에 따라 결정되는 항복변위를 RC 골조의 항복변위에 대한 비율로 나타낸다. 여기서  $d \delta_y$ 는 댐퍼,  $r \delta_y$ 는 골조의 항복변위를 의미한다. Fig. 17의 (a)에 나타낸 바와 같이, 동일한 강성비에서 댐퍼의 내력이 증가할수록 항복변위비는 내력비에 비례하여 증가하지만, 강성비가 클수록 그 증가비는 감소하였다. 반면, 동일한 내력비의 경우 댐퍼의

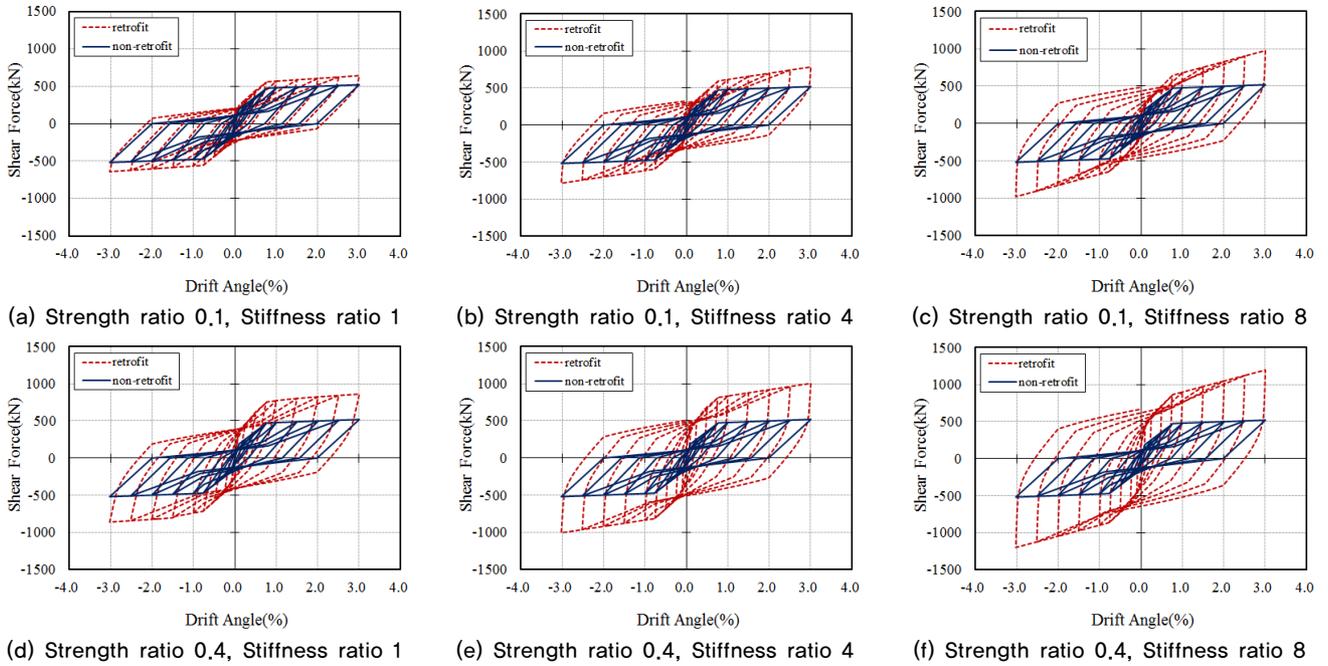


Fig. 14. Load-displacement relationships of the frame governed by flexure

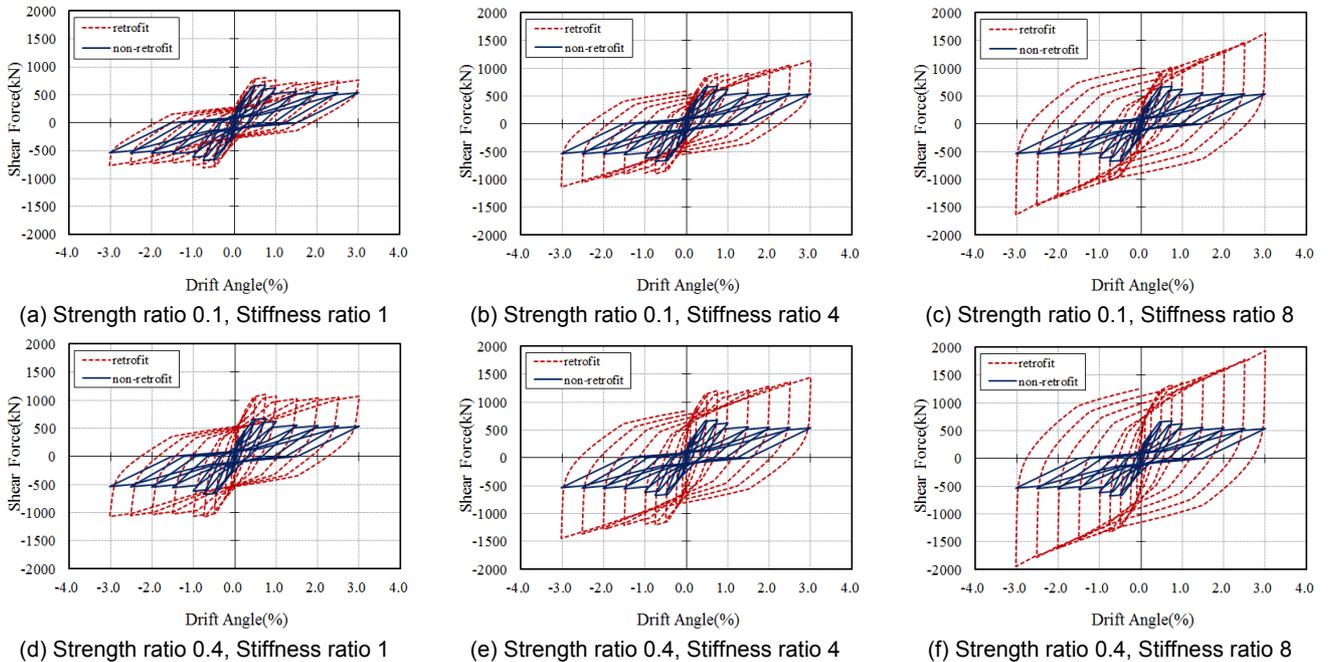


Fig. 15. Load-displacement relationships of the frame governed by shear  
(\* Drift angle is based on the frame governed by flexure.)

강성비가 증가할수록 항복변위비는 강성비의 역수에 비례하므로, Fig. 17의(b)와 같이 강성비가 증가할수록 골조에 대한 댐퍼의 항복변위비는 비선형적으로 감소하는 경향을 나타내었다.

참고로, 그림에 해석결과를 나타내지는 않았지만, 전단지배형 골조의 경우, 강성비 및 내력비에 따른 항복강도 증가와 항복변위비 경향이 힘지배형 골조와 유사하게 나타났으며, 그 차이도 크게 발생하지 않았다.

### 3.2.2 에너지 흡수비율

에너지 흡수량은 보강 댐퍼의 에너지 흡수능력이 유효하다고 판단되는 시점까지 하중-변위 이력곡선의 면적으로 계산하였으며, 휨형 골조의 경우 식(6)~식(8)[15]에 의하여 산정된 휨 중국변형시, 전단형 골조의 경우 전단 중국강도 도달시 까지를 그 시점으로 하였다.

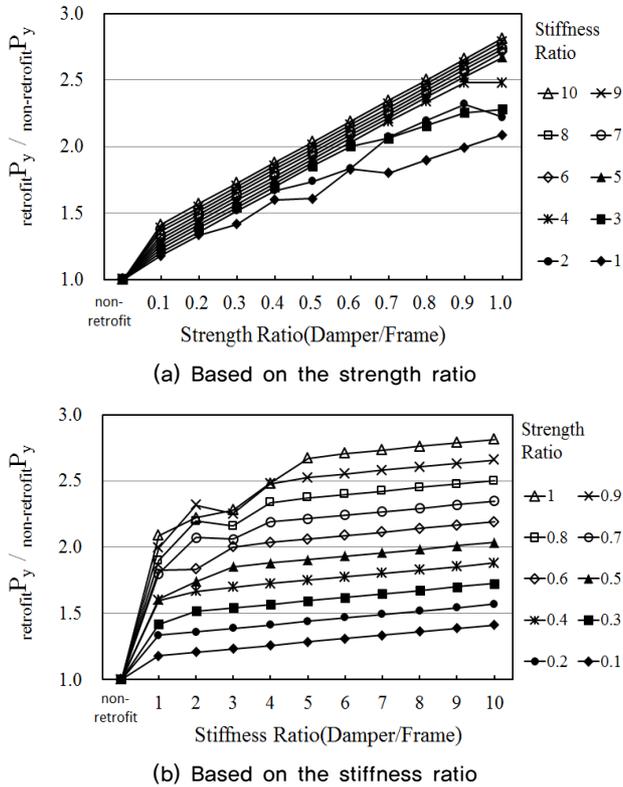


Fig. 16. Yield strength ratios of the retrofitted frame to the non-retrofitted frame

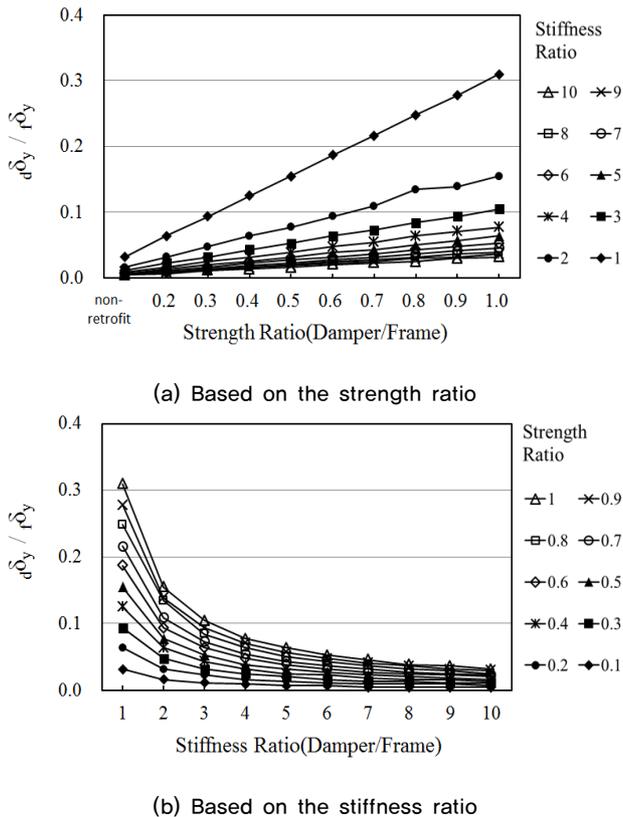


Fig. 17. Yield displacement ratios of the damper to columns of the non-retrofitted frame

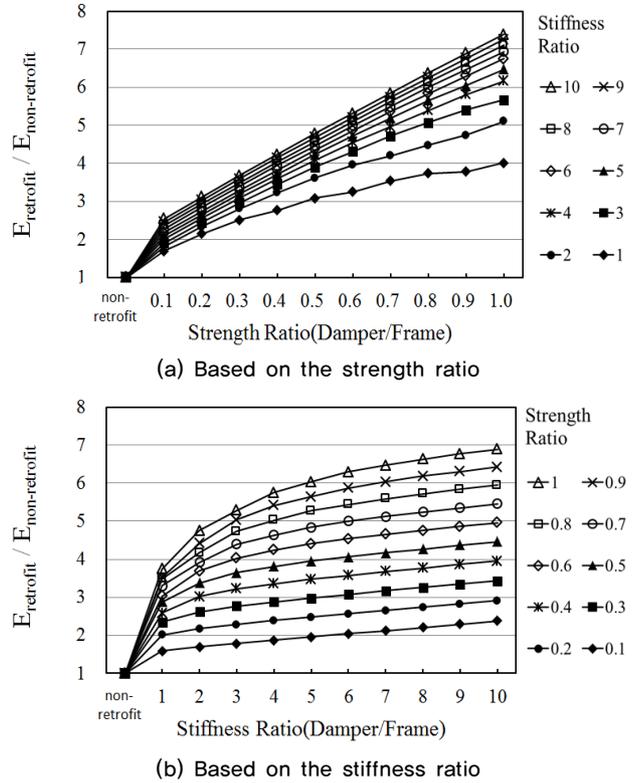


Fig. 18. Increasing ratios for the absorbed energy of the retrofitted frame to the non-retrofitted frame

$$R_{mu} = \frac{h_0}{H_0} (cR_{my} + cR_{mp}) \leq cR_{30} \tag{6}$$

$$cR_{my} = Q_{mu} / (\alpha_y \cdot K_c \cdot h_0) \tag{7}$$

$$cR_{mp} = 10 (cQ_{su} / Q_{mu} - q) \cdot cR_{my} \geq 0 \tag{8}$$

$$\begin{cases} q = 1.0 & (s \leq 100mm) \\ q = 1.1 & (s > 100mm) \end{cases}$$

여기서,

- $h_0$ : 기둥순길이
- $H_0$ : 층고
- $cR_{my}$ : 기둥의 항복변형각
- $cR_{\mu}$ : 기둥의 중극변형각
- $cR_{mp}$ : 기둥의 소성변형각
- $cR_{30}$ : 기준 변형각, 1/30
- $cQ_{su}$ : 기둥의 전단중극강도
- $R_{mu}$ : 기둥의 휨중극시 전단력
- $\alpha_y$ : 항복점접선강성저하율
- $K_c$ : 초기 강성
- $s$ : 띠근 간격

Fig. 18에 휨배형 비보강골조에 대한 보강골조의 흡수에너지비를 나타낸다. 여기서  $E_{retrofit}$ 은 보강골조,  $E_{non-retrofit}$ 은 비보강골조의 전체 에너지 흡수량을 의미한다. Fig. 18의 (a)와 같이 동일한 강성비에서 댐퍼의 내력 비가 증가함에 따라 흡수에너지비가 선형 비례적으로 증가함을 나타내었다. 반면, 동일한 내력비에서 댐퍼의 강성비를 증가시킨 경우(Fig. 18의 (b))

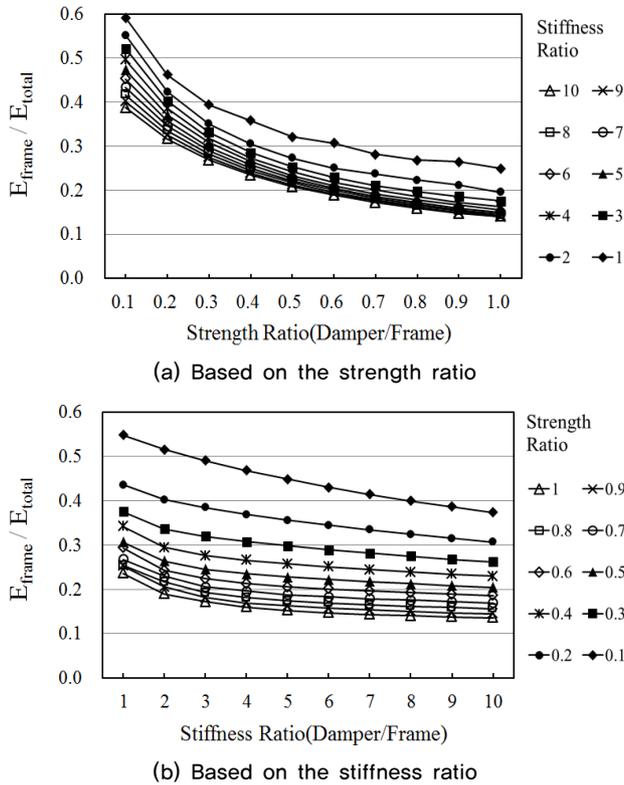


Fig. 19. Absorbed energy ratios of the RC frame to the total retrofitted frame

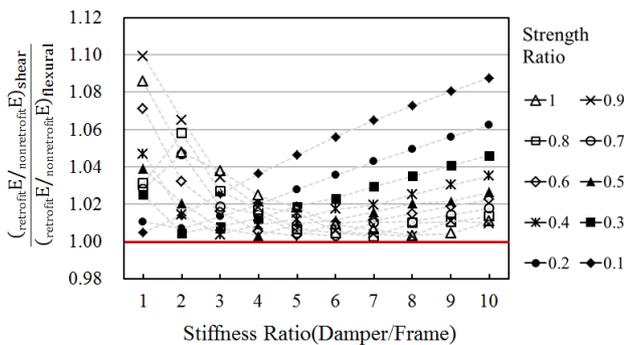


Fig. 20. Absorbed energy ratios according to the failure type of the frame

참조) 흡수에너지비가 증가하였지만, 내력비를 증가시킨 경우에 비하여 흡수에너지비의 증가율이 다소 적게 발생하였다. 특히 내력비가 0.3 이하로 작을 시에는 강성비를 증가시킬수록 흡수에너지비가 거의 선형적으로 증가한 반면, 내력비가 증가할수록 강성비 증가에 따른 흡수에너지비 증가율은 작아지지만 비교적 안정적으로 수렴하는 경향을 나타내었다.

한편, 부재의 거동에 따른 이력곡선의 면적으로 평가한 흡수에너지는 변형에너지로서, 그 부재의 손상 정도를 나타낸다고 할 수 있다. 보강 골조에서 댐퍼의 강성비 및 내력비에 따른 RC 골조의 손상 정도를 평가하기 위해, 전체 보강골조의 흡수에너지에 대한 RC 골조의 흡수에너지비를 Fig. 19에 나타낸다. 여기서  $E_{total}$ 은 댐퍼와 골조 전체,  $E_{frame}$ 은 RC 골조 부분의 흡수

에너지를 의미한다. Fig. 19의 (a)에 나타난 바와 같이 동일한 강성비에서 댐퍼의 내력비가 증가할수록 골조의 손상비가 감소하는 경향을 나타내었으며, 내력의 증가비가 클수록 기둥의 손상율도 크게 감소하였다. Fig. 19의 (b)와 같이 동일한 내력비의 경우에도 댐퍼의 강성비가 증가할수록 기둥의 손상비율이 감소하였으며, 강성비가 4~5 이상인 경우 골조의 손상비율이 거의 일정한 값을 나타내는 경향을 나타내었다.

이는 본 연구에서 적용된 강재댐퍼의 에너지흡수능력 및 골조의 손상 제어 등 내진보강 성능은 댐퍼의 내력비 증가에 따라 비례적으로 증가함을 의미한다. 반면 댐퍼의 강성을 증가시킬수록 에너지흡수 증가 효율은 다소 감소하지만, 골조에 대한 댐퍼의 강성비를 4~5 이상 확보할 경우, 비교적 안정적인 내진보강 성능을 발휘할 수 있는 것으로 판단된다.

한편, 그림에 해석결과를 나타내지는 않았지만, 전단지배형 골조의 강성비 및 내력비에 따른 흡수에너지비 및 골조의 손상을 결과는 휨지배형 골조와 유사한 경향과 비율을 나타내었다. 전단지배형에 대한 휨지배형 골조의 흡수에너지 증가비를 비교하여 Fig. 20에 나타낸다. 에너지흡수량은 전술한 바와 같이, 휨지배형은 휨중국 변형시, 전단지배형은 전단중국 강도시까지의 에너지 흡수면적으로 평가하였다. 비보강 골조에 대한 보강 골조의 흡수에너지 증가비는 전체 변수에서 전단지배형 골조가 휨지배형 골조보다 최대 10% 이하로 크게 발생하였다. 이는 전단지배형 골조가 휨지배형 골조에 비하여 골조 자체의 에너지 흡수능력이 다소 작아 댐퍼에 의하여 흡수되는 에너지양이 비교적 많기 때문으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 RC 부분골조에 강재댐퍼를 이용한 내진보강공법을 효율적으로 적용하기 위하여 비선형 해석 모델 및 방법을 제시하고, 댐퍼의 강성비 및 내력비에 따른 변수별 비선형 정적해석을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) RC 골조의 내진보강을 위해 선행연구에서 제안된 강재댐퍼시스템 및 RC 골조 실험체에 대하여 비선형 정적해석을 수행한 결과, 정적해석에서 이력거동 및 손상 정도가 실험결과와 비슷한 경향을 나타내어 해석에 적용된 복원력 모델 및 방법이 비교적 적합한 것으로 판단된다.
- (2) 실제 학교 건축물을 대상으로 강재댐퍼 보강 부분골조를 가정한 비선형 정적해석 결과, RC 골조에 대한 댐퍼의 강성비 및 내력비의 증가에 따라 항복강도 및 흡수에너지양이 증가하였으며, 골조의 손상정도는 감소하였다.
- (3) 댐퍼의 내력비에 따른 내진보강 성능은 비례적으로 증가하였으며, 이는 내진보강 설계시 요구되는 보강내력에 따라 댐퍼의 내력을 결정하는 것에 큰 무리가 없을 것으로 판단된다. 또한 댐퍼의 강성비에 따른 내진보강 성능은 강성비가 4 이하로 작은 경우, 강성비에 따른 내진보강효과가 크게 증가하였으며, 강성비가 4~5 이상 확보될 경우 비교적 안정적인 내진보강 성능을 발휘하는 것으로 판단된다.
- (4) 비보강 골조에 대한 보강 골조의 흡수에너지 증가비는 전단지배형 골조가 휨지배형 골조에 비하여 다소 큰 결과를 나타내어, 본 연구에 적용된 강재댐퍼를 이용한 내진보강은 전단지배형 골조에서도 충분한 내진보강효과를 발휘할 수 있는 것으로 판단된다.

/ 감사의 글 /

본 연구는 소방방재청의 백두산화산대응기술개발사업인 ‘화산재해 피해예측 기술개발’ [NEMA-백두산-2012-1-4]과제의 지원으로 이루어 졌 습니다. 이에 감사드립니다.

/ REFERENCES /

1. Miyamoto, L'aquila Italy Earthquake Field Investigation Report, Global Risk Miyamoto, c2009.
2. Miyamoto, Sichuan China Earthquake Field Investigation Report, Global Risk Miyamoto, c2008.
3. Stavridis A, Koutromanos I, Shing PB. Shaked-table tests of a three-story reinforced concrete frame with masonry infill walls, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2012 May;41(6): 1089-1108.
4. Alqatamin A, Talposi A. The action of short columns at reinforced concrete building constructions, Bulletin of th Transilvania University of Brasov, 2009;2:357-360.
5. Vahidi EK, Malekabadi MM. Conceptual Investigation of short-columns and masonry infill frames effect in the earthquakes, World Academy of Science Engineering and Technology, 2009 Nov;59: 119-124.
6. National Emergency Management Agency. Development of technologies for improvement of seismic performance on the existing low-rise buildings, National Emergency Management Agency, c2011.

7. Lee SH, Oh SH, Baek EL. The proposal of steel damper system to improve the seismic performance of reinforced concrete frame, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure and Construction, 2011 Sep;27(9):21-28.
8. Oh SH, Kim YJ. Hysteretic behavior of beam-to-column connections with slit plate dampers, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure and Construction, 2005 Dec;21(12):101-108.
9. Oh SH, Rhu HS, Moon TS. Study for fabricable and adhesive seismic retrofit method using the steel members, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure and Construction, 2005 Nov; 21(11): 51-58.
10. Kang Ninig Li, CANNY manual, c2009.
11. Oh SH, Seismic design of energy dissipating multi-story frame with flexible-stiff mixed type connection, Ph.D. thesis, Tokyo University, 1998.
12. Architectural Institute of Korea, Korean Building Code and Commentary, Architectural Institute of Korea, c2009.
13. Arima Momoko, Shioya Shinichi. Evaluation for the displacement of R/C columns in bending failure with spandrel wall, Proceedings of the Japan Concrete Institute, 2008;30(3):205-210.
14. Architectural Institute of Japan, AIJ standard for structural calculation of reinforced concrete structures, Architectural Institute of Japan, c2010.
15. The Japan Building Disaster Prevention Association. Seismic Retrofit Applications of Existing Reinforced Concrete Buildings and many others, c2001.