

# 복합 슬릿-마찰 감쇠장치가 적용된 철근 콘크리트 특수 모멘트 저항골조의 내진성능 평가

## Seismic Performance Evaluation of Special Reinforced Concrete Moment Resisting Frames With Hybrid Slit-Friction Damper

이 준 호\*  
Lee, Joon-Ho

김 기 철\*\*  
Kim, Gee-Cheol

김 진 구\*\*\*  
Kim, Jin-Koo

### Abstract

This study develops a new hybrid passive energy dissipation device for seismic rehabilitation of an existing structure. The device is composed of a friction damper combined with a steel plate with vertical slits as a hysteretic damper. Analytical model is developed for the device, and the capacity of the hybrid device to satisfy a given target performance is determined based on the ASCE/SEI 7-10 process. The effect of the device is verified by nonlinear dynamic analyses using seven earthquake records. The analysis results show that the dissipated inelastic energy is concentrated on the hybrid damper and the maximum interstory drift of the SMRF with damping system satisfies the requirement of the current code.

*Keywords : Hybrid damper, Slit damper, Friction damper, Reinforced concrete special moment resisting frame, Seismic performance evaluation*

## 1. 서론

노후화된 국내 건축물의 내진보강에 주로 적용되는 제진장치 제작 및 설치, 시공의 용이성과 경제성을 고려하여 강재를 사용하는 탄소성 이력장치 및 마찰 감쇠장치가 주를 이루고 있다<sup>1)</sup>. 이러한 감쇠장치는 구조물에 유입되는 지진에너지를 감소시켜 내진성능을 보존하게 하며, 주 구조체의 소성변형을 방지하거나 최소화하고, 감쇠장치에 변형이 집중되므로 보수 및 보강이 용이한 장점이 있다. 감쇠장치는 진동원의 종류에 따라 제진장치를 별도로 설치하는 것이 일반적이며 이에 따른 비용의 증가와 건축 계획상의 설치 위치 등이 문제점으로 지적되었

다. 이러한 문제점을 개선하기 위해 하나의 제진장치로 풍하중과 지진하중에 의한 진동 에너지를 소산할 수 있는 복합형 감쇠장치가 국내외에서 개발되고 있다. 김도현 등은 비좌굴가새에 점탄성 댐퍼를 결합한 하이브리드 비좌굴가새와 건축계획상 문제를 개선한 고감쇠 고무와 강재판을 사용한 인방보형 복합 감쇠장치를 개발하였다<sup>2),3)</sup>. Smith 등은 아웃리거에 점성 감쇠장치를 적용하여 초고층 구조물을 설계하는 방법을 제시하였다<sup>4)</sup>. 이러한 복합 감쇠장치의 개발 흐름에 맞추어 강재 항복형 슬릿과 마찰 감쇠장치를 하나의 장치로 구성하여 풍하중과 지진하중에 의한 진동을 저감하면서, 노후화된 소규모 주거 및 상업시설에도 적용할 수 있도록 간막이 벽 사이에 설치할 수 있는 복합 슬릿-마찰 감쇠장치를 개발하였다.

본 연구에서는 복합 슬릿-마찰 감쇠장치의 설계 방법과 수치해석을 위한 비선형 모델을 제시하였고, ASCE/SEI 7-10<sup>5)</sup>의 방법론에 따라 설계된 감쇠장치를 철근 콘크리트 특수 모멘트 골조에 적용하여 비선형 동적해석을 통해 내진성능을 평가하였다.

\* 정회원, 메트로티엔씨(주) 내진기술연구소 소장, 공학박사  
Metro Total Construction  
\*\* 정회원, 서울대학교 건축공학과 교수, 공학박사  
Dept. of Architecture Engineering, Seoul University  
\*\*\* 교신저자, 정회원, 성균관대학교 건설환경공학부 교수,  
공학박사  
Architectural and Civil Engineering Department,  
Sungkyunkwan University  
Tel: 031-290-7563 Fax: 031-290-7570  
E-mail: jkim12@skku.edu

## 2. 복합 슬릿-마찰 감쇠장치

### 2.1 금속 항복형 슬릿 마찰 감쇠장치

변위 의존형 제진장치인 금속 항복형 댐퍼는 항복 이후의 비탄성 거동을 통해 에너지를 소산하며, 설치 및 제작이 쉽다. 또한 주요 설계변수인 강성 및 강도는 부재의 치수 및 재료의 특성에 따라 손쉽게 산정할 수 있다. 복합 슬릿-마찰댐퍼에 사용된 금속 항복형 슬릿댐퍼는 <Fig. 1>과 같이 총 9개의 스트립(Strips)으로 구성되어 있으며 단면 2차 모멘트는  $tb^3/12$ 과 같고, 단위변위에 대한 슬릿댐퍼의 강성은 다음 식과 같이 표현할 수 있다<sup>6)</sup>.

$$k_d = n \frac{12EI}{l_0^3} = n \frac{Etb^3}{l_0^3} \quad (1)$$

여기서  $n$ 은 슬릿댐퍼의 스트립 개수,  $t$ 는 스트립의 두께,  $b$ 는 스트립의 폭,  $l_0$ 는 슬릿의 길이이다. 슬릿댐퍼가 횡력에 대해 항복변위보다 큰 변형이 발생하여, 스트립 양 끝단이 항복하고 전단면이 항복할 경우 다음 식과 같은 소성 모멘트( $M_p$ )가 발생한다.

$$M_p = \sigma_y \frac{tb^2}{4} \quad (2)$$

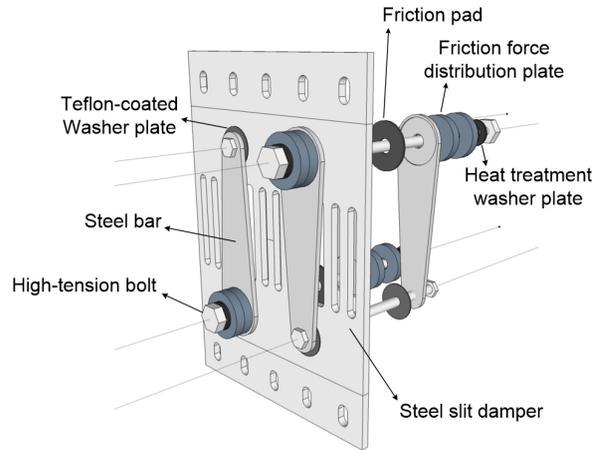
여기서  $\sigma_y$ 는 강재의 항복강도이며 횡력( $P$ )과 변위( $\delta$ )를 완전 탄소성으로 가정하면 에너지 보존법칙에 의해 다음 관계식 (3)이 성립하고, 미소변형에 대해 소성 변위량( $\delta_p$ )은  $l_0\theta_p$ 로 가정할 수 있으므로 슬릿댐퍼의 용량은 식 (4)와 같다. 또한 식 (1)과 (4)의 관계에서 슬릿댐퍼의 항복변형( $\delta_y$ )은 다음 식 (5)와 같이 산정할 수 있다.

$$\frac{1}{2} P_y \delta_p = n M_p \theta_p \quad (3)$$

$$P_y = \frac{2nM_p}{l_0} = \frac{n\sigma_y tb^2}{2l_0} \quad (4)$$

$$\delta_y = 0.5\epsilon_y l_0^2 / b \quad (5)$$

여기서  $\theta_p$ 는 소성 회전각,  $\epsilon_y$ 는 항복 변형률이다.



<Fig. 1> Hybrid slit-friction damping device

### 2.2 마찰 감쇠장치

회전형 마찰 감쇠장치는 마찰패드의 마찰계수에 의한 슬립하중으로 지진에너지를 소산시키며 수치 해석상  $10^5 kN \cdot cm$ 의 강성을 가지고 있으므로 마찰패드에 작용하는 하중이 슬립하중에 도달하기 전까지 회전하지 않는다. 회전형 마찰패드를 이용한 감쇠는 하중 크기나 진동수 및 주기에 큰 영향을 받지 않는 장점이 있다. 회전형 마찰 감쇠장치는 횡력에 의해 마찰댐퍼에 작용하는 힘( $F$ )과 마찰패드의 회전 모멘트( $M$ )가 평형을 이루며 식 (6)과 같은 상관관계가 있고, 마찰패드에 의한 순수 모멘트는 식 (7)과 같다<sup>7)</sup>.

$$M = FL \quad (6)$$

$$M = \mu N Q R_m = \mu N Q [0.5 \times (R_1^2 + R_2^2)]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

여기서,  $\mu$ 는 마찰계수,  $N$ 은 마찰면수,  $Q$ 는 볼트의 장력,  $R_m$ 은 마찰면의 유효면적이다. 마찰면의 유효면적은 단면 2차 반지름 방정식을 적용하였으며,  $R_1$ 은 마찰재의 내경반지름,  $R_2$ 는 마찰재의 외경반지름,  $L$ 은 모멘트를 발생시키는 하중의 팔길이이다. 위 관계식을 정리하면 다음과 같이 마찰댐퍼의 항복강도를 결정할 수 있다.

$$F = \mu N Q \frac{R_m}{L} \quad (8)$$

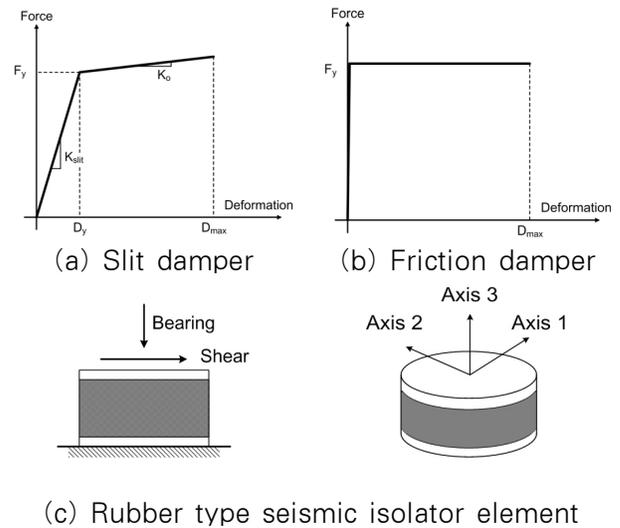
브레이크 라이닝 실험(Brake lining test)에 적용되는 마찰계수( $\mu$ )는 통상 0.4를 사용하며, 수치해석 시 0.3~0.4를 적용하므로 본 연구에 사용된 마찰패드의 마찰계수( $\mu$ )는 0.35로 가정하였다. 마찰면수( $N$ )는 일반적으로 마찰패드 1개를 사용할 경우 2개 면이 적용된다. 고장력 볼트의 장력( $Q$ , Clamping force)은 감쇠장치의 용량에 따라 조절하는 수치이며, 일반적으로 50~150kN 범위 내에서 조절한다.

### 2.3 복합 슬릿-마찰 감쇠장치의 비선형 모델

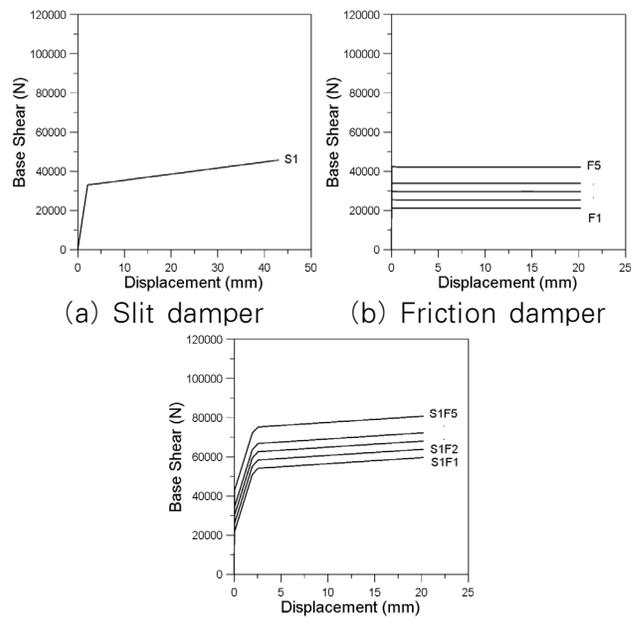
복합 슬릿-마찰 감쇠장치의 비선형 해석을 위해 Perform 3D<sup>®</sup>의 Rubber type seismic isolator element를 이용하여 <Fig. 2>와 같이 모델링 하였다. 해당 요소는 3개의 축으로 구성되며 Axis 1과 2의 Shear를 통해 슬릿댐퍼와 마찰댐퍼를 구현하였다. 슬릿댐퍼의 항복 후 강성비는 2%로 가정하였고, 마찰댐퍼의 최대 항복변위는 DAMPTECH가 제공하는 마찰감쇠 형상 및 용량별 제원에 따라 20.0mm로 하였다<sup>9)</sup>. <Fig. 3>의 (a)와 (b)는 슬릿댐퍼와 마찰댐퍼의 비선형 정적해석 결과이며, 이론식에 의해 산정한 예제 모델별 항복강도와 일치한다. 또한 <Fig. 3 (c)>는 슬릿댐퍼 S1 해석 모델에 마찰댐퍼 모델을 병렬 연결하여 해석한 결과이며, 초기 횡하중 작용 시 큰 강성의 마찰댐퍼가 먼저 항복하며 이어 슬릿댐퍼가 효과적으로 작동함을 알 수 있다.

### 3. RC 특수 모멘트 골조 설계

복합 슬릿-마찰 감쇠장치가 적용된 구조물의 내진성능을 평가하기 위해 철근 콘크리트 특수 모멘트 골조를 설계하였다. 예제 구조물은 기존 연구에 제시된 LA 지역 중심가에 위치한 3층과 5층 건물을 선택하였고, 평면과 단면도는 <Fig. 4>와 같다<sup>10)</sup>. 구조물 외부에 표시된 부분의 횡력 저항 시스템은 특수 모멘트 저항골조로 설계하였고, 구조물 내부는 중력하중에만 저항하도록 설계하였다.



<Fig. 2> Nonlinear force-deformation relationship



(c) Hybrid slit-friction damper

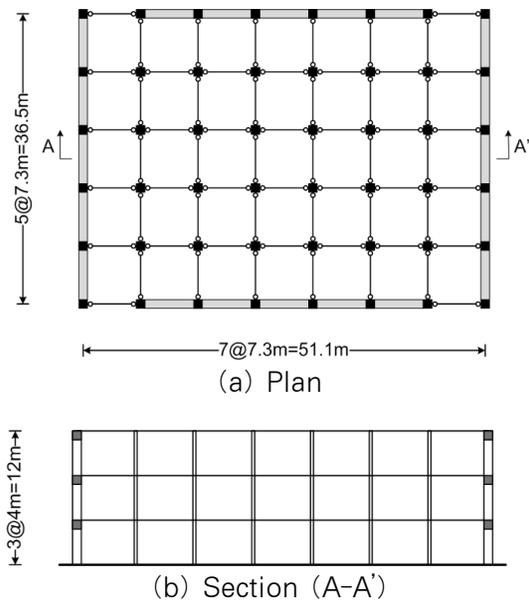
<Fig. 3> Nonlinear-static analysis results

설계하중은 ASCE/SEI 7-10을 적용하였으며 고정하중은  $7.0 \text{ kN/m}^2$ , 활하중은 Residential의  $1.9 \text{ kN/m}^2$ 를 적용하였다. 지진하중을 산정하기 위한 계수는 <Table 1>에 나타내었다. 주 횡저항 시스템은 철근 콘크리트 특수 모멘트 골조로 분류되며 ASCE/SEI 7-10에 따라 반응수정계수는 8, 시스템 초과강도계수는 3, 변위증폭계수는 5.5이다.

설계에 사용된 콘크리트의 강도는 27MPa이며 철근은 SD400을 사용하였고, 철근 콘크리트 특수 모멘트 골조의 부재는 ACI 318-11<sup>11)</sup>의 'Chaper 21'에 따라 설계하였다. 초기 설계 단계에서 가정한 부재의 크기와 철근 배근에 따른 강도비는 설계 기준을 만족하였지만, 변위증폭계수가 고려된 구조물의 층간변위가 허용 층간변위 2%를 초과하였다. 따라서 허용 층간변위를 만족시키기 위해 부재의 강성과 배근을 조절하였다<Fig. 5>. 특수 및 내부 보통 모멘트 골조 모두 충분한 연성을 확보하도록 설계하였고, 부재 상세는 지면관계상 생략하였다.

<Table 1> Seismic design variables for model structure

MCE	$S_s = 1.00g, S_1 = 0.60g$
Site class	Class D
Site coefficient	Stiff Soil: $F_a = 1.0, F_v = 1.5$
Design earthquake	$S_{DS} = 0.733g, S_{D1} = 0.600g$
Risk category	II
Importance factor	1.00
Seismic design category	D



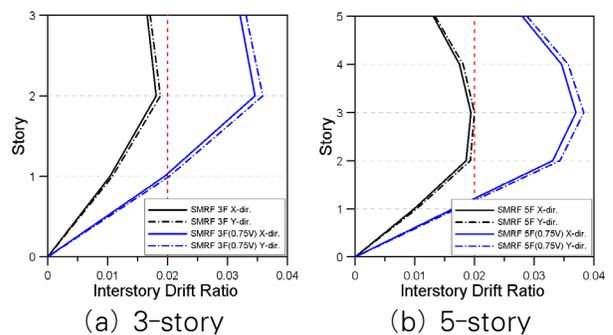
<Fig. 4> 3-story SMRF for numerical analysis

특수 모멘트 골조에 설치될 복합 슬릿-마찰댐퍼는 ASCE/SEI 7-10의 18장에 따라 설계하였고 감쇠장치가 설치된 구조물을 지진력저항시스템(Seismic Force Resisting System, SFRS)과 감쇠시스템(Damping System, DS)으로 구분하여 설계하는 방법을 제시한다. 본 연구에서는 응답스펙트럼 해석법을 이용하여 설계하였다. 응답스펙트럼 해석법에서는 몇 가지 가정을 통해 SFRS의 비선형 정적해석을 수행하지 않고 내진설계변수(반응수정계수, 초과강도계수, 변위증폭계수)를 이용하여 SFRS의 비선형 거동을 이선형(Bilinear)으로 가정한다. SFRS의 항복강도는 다음 식 (9)와 같이 내진성능계수와 등가 정적해석법에 의한 밀면전단력을 통해 산정할 수 있으며, 제진장치를 사용할 경우 ASCE/SEI 7-10에 따라 밀면전단력은 식 (10)과 같이 25% 감소된 값을 사용할 수 있다. 3층과 5층 철근콘크리트 특수 모멘트 골조의  $V_{yf}$ 는 각각 7196kN, 10509kN 이다.

$$V_{yf} = \frac{C_d \Omega_o}{R} V \tag{9}$$

$$V_{min} = \max \left\{ \frac{V}{B_{V+I}}, 0.75 V \right\} \tag{10}$$

감소된 밀면전단력을 이용하여 특수 모멘트 골조를 재설계하였고, 각 층전단력 분포의 25%를 복합 슬릿-마찰 감쇠장치의 용량으로 결정하였고 슬릿 감쇠장치와 마찰 감쇠장치의 용량은 각각 60%, 40%의 비율로 나누어 앞서 언급한 이론식에 기초한 방법에 따라 설계하였다. 복합 감쇠장치는 x, y방향 특수 모멘트 골조의 중앙 베이에 설치하였다.



<Fig. 5> Interstory-drift of SMRF models

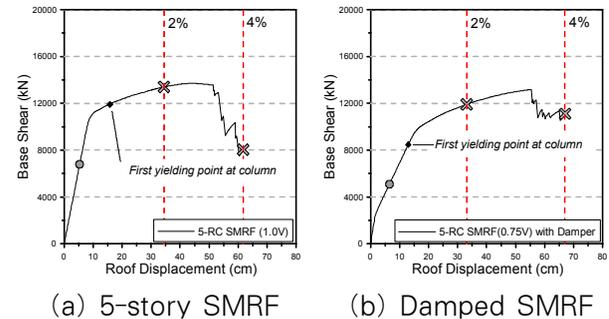
## 4. 비선형 해석에 의한 내진성능평가

### 4.1 비선형 정적해석

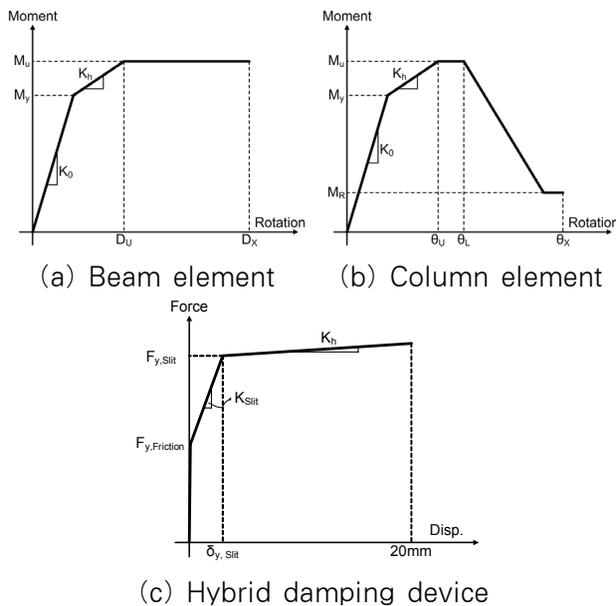
철근 콘크리트 특수 모멘트 골조와 감쇠장치를 적용하여 재설계된 예제 모델의 비선형 정적해석 결과를 비교하기 위해 Perform 3D를 이용하여 x방향 1차모드 형상에 비례하여 각 층의 횡하중을 산정하고 해석을 수행하였다. 비선형 해석에 사용된 기둥의 이력모델은 ASCE/SEI 41-06<sup>13)</sup>에 제시되어 있는 Cord-rotation 방식에 따라 정의하였고, 보 요소는 양단에 Moment hinge(Rotation type)를 배치하였다<Fig. 6>. 콘크리트의 인장강도는 무시하였고, 재료의 초과강도를 고려하여 콘크리트의 압축강도와 철근의 항복강도는 1.25배를 적용하였다. 감쇠비는 모든 모드에 대해 5%로 가정하였고, 이력거동에 의한 편칭효과는 고려하지 않았다.

<Fig. 7>은 5층 예제 구조물의 비선형 정적해석 결과이며 힘-변위 관계를 바탕으로 구조물의 설계 밀면전단력, 최대 보유 강도와 층간변위가 각각 2%, 4%에 도달하는 지점을 표시하였다.

ASCE/SEI 7-10에 따라 설계된 5층 철근 콘크리트 특수 모멘트 골조의 설계 밀면전단력은 6793kN이며, 복합 슬릿-마찰 감쇠장치가 설치됨에 따라 75%로 저감된 예제 모델의 설계 밀면전단력은 5095kN이지만, 두 예제 구조물의 최대 보유 강도는 13715kN, 13185kN로 유사하다. 감쇠장치를 설치하여 재설계한 예제 구조물은 복합 슬릿-마찰 감쇠장치를 구성하는 마찰패드의 슬립과 슬릿 감쇠장치가 항복함에 따라 초기 강성이 감소하며, 보와 기둥에 소성힌지가 먼저 발생하지만 층간변위 2%와 4%에 도달하는 지점은 유사하고 안정적인 이력거동을 보인다.



<Fig. 7> Pushover analysis results

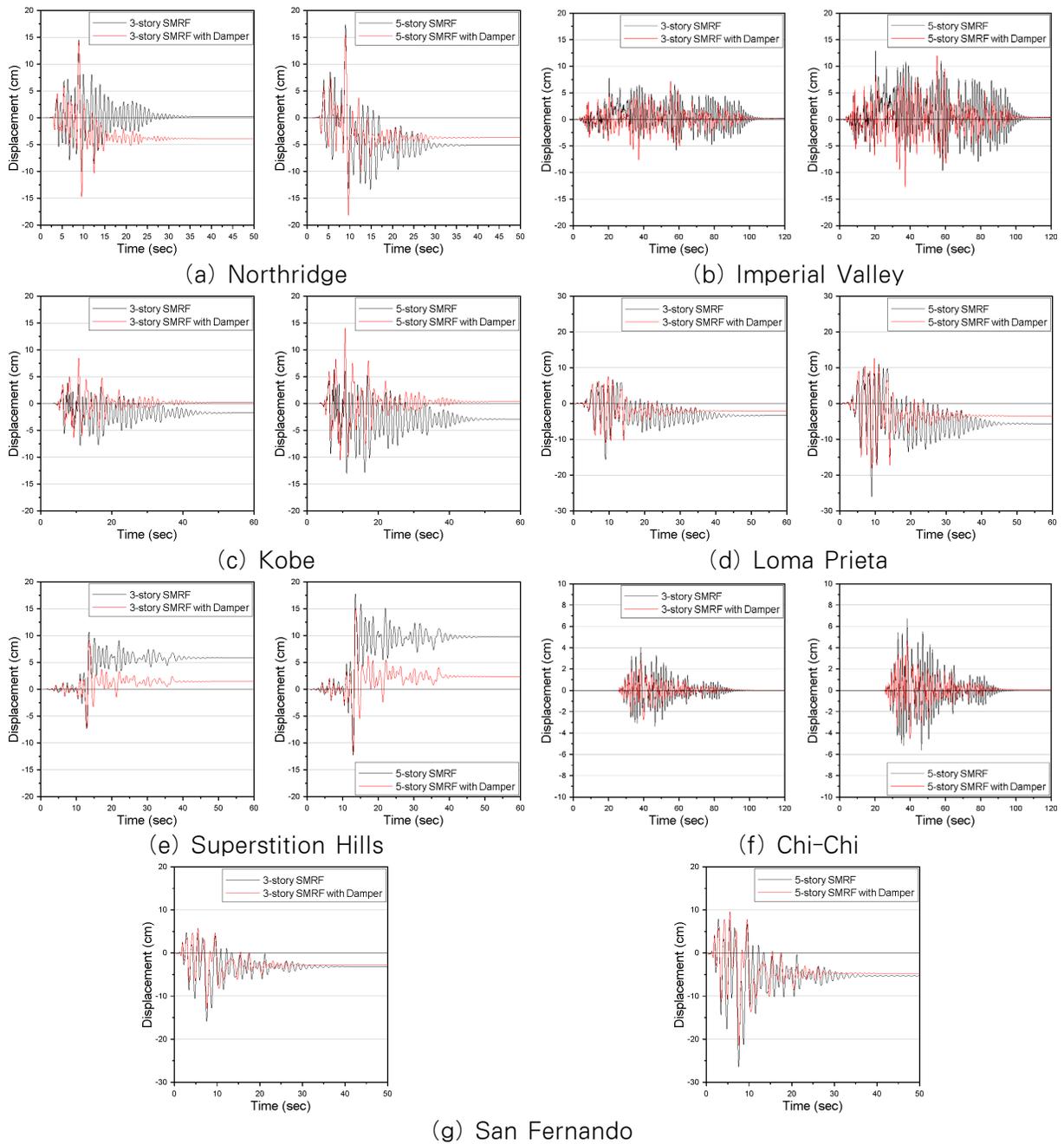


<Fig. 6> Interstory-drift of SMRF models

### 4.2 비선형 동적해석

ASCE/SEI 7-10에 의해 설계된 감쇠시스템이 설치된 철근콘크리트 특수 모멘트 골조의 내진성능과 복합 슬릿-마찰 감쇠장치의 이력거동을 분석하기 위해 비선형 동적해석을 수행하였다. 해석에 사용된 지진기록은 PEER NGA Database<sup>12)</sup>에서 제공된 기록 중 7개의 역사 지진파를 선택하였다<Table 2>.

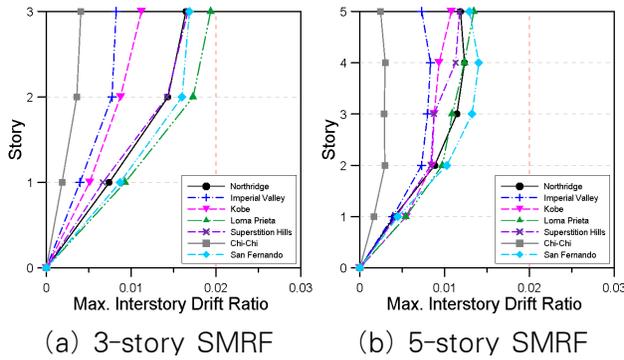
<Fig. 8>은 3층, 5층 예제 구조물의 비선형 동적해석 결과이며 복합 슬릿-마찰 감쇠장치를 설치하여 재설계한 모델의 해석 결과는 빨간 실선으로 표시하였다. Northridge, Imperial Valley, Kobe 지진 기록은 최대 지붕층 변위가 약간 증가하였지만, 모든 지진기록에서 전체 응답은 감소하였다. 또한 감쇠기가 설치된 모든 예제구조물의 비선형 동적해석에 의한 최대 층간변위는 허용 층간변위 2%를 초과하지 않았다<Fig. 9>.



〈Fig. 8〉 Nonlinear dynamic analysis result

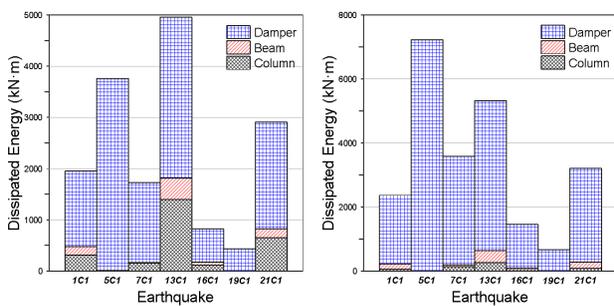
〈Table 2〉 Earthquake records(PEER-NGA Database)

ID	Name	Component	PGA Max. (g)
1C1	Northridge	NORTHR/MUL009	0.52
5C1	Imperial Valley	IMPVALL/H-DLT262	0.35
7C1	Kobe	KOBE/MIS000	0.51
13C1	Loma Prieta	LOMAP/CAP000	0.53
16C1	Superstition Hills	SUPERST/B-ICC000	0.36
19C1	Chi-Chi	CHICHI/CHY101-E	0.44
21C1	San Fernando	SFERN/PEL090	0.21



(a) 3-story SMRF (b) 5-story SMRF  
 <Fig. 9> Maximum interstory drift of damped SMRF model

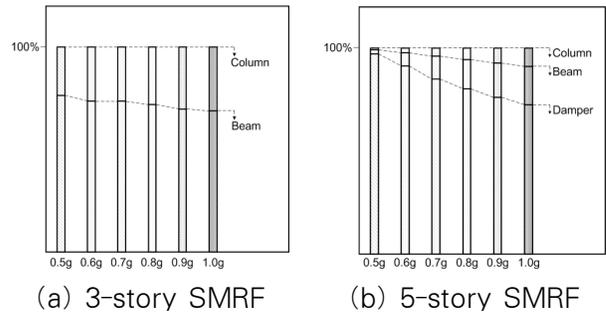
구조물에 유입된 지진하중은 운동에너지, 감쇠에너지, 회복 가능한 변형에너지, 회복되지 않는 이력에너지로 소산된다. 감쇠장치가 설치된 3층 SMRF의 회복되지 않는 이력에너지 소산량은 전체 에너지 소산량의 61%이며 5층 SMRF는 57%이다. 이러한 이력에너지 소산량을 복합 슬릿-마찰 감쇠장치와 구조 부재별 소산된 에너지를 <Fig. 10>에 나타내었다. 해석 결과에 따르면 감쇠장치가 설치된 경우 7개의 지진에 의해 소산된 대부분의 에너지는 복합 슬릿-마찰 감쇠장치에 집중되어 있으며, 주 구조 부재의 손상을 감소시켜 지진에 의한 피해를 최소화할 수 있는 것으로 나타났다.



(a) 3-story SMRF (b) 5-story SMRF  
 <Fig. 10> Dissipated inelastic energy

Northridge 지진기록을 예제구조물의 주기에 해당하는 스펙트럼 가속도를 0.5g에서 1.0g까지 증분 동적해석을 수행하여 각 부재별 비탄성 에너지 비율을 <Fig. 11>에 나타내었다. 두 예제 구조물의 기

동과 보에서 소산된 에너지량은 지진하중의 가속도가 증가할수록 기둥의 분담비율이 증가하지만 복합 감쇠장치가 설치되어 재설계된 예제구조물은 대부분 에너지가 감쇠시스템에서 소산됨을 알 수 있다.



(a) 3-story SMRF (b) 5-story SMRF  
 <Fig. 11> Distribution ratio of dissipated inelastic energy

## 5. 결론

본 연구에서는 복합 슬릿-마찰댐퍼의 수치해석을 위한 비선형 모델을 제시하였고, ASCE/SEI 7-10에 따라 설계된 댐퍼를 75%의 밀면전단력으로 설계된 3층, 5층 철근 콘크리트 모멘트 골조에 적용하여 비선형 동적해석을 통해 내진성능을 평가하였다. 비선형 동적해석 결과에 따르면 댐퍼가 설치된 모델의 지붕층 응답은 100%의 밀면전단력으로 설계된 모델에 비하여 일부 지진에 대해서는 증가하지만, 최대 층간변위는 허용 층간변위 2%를 초과하지 않는 것으로 나타났다. 또한 지진하중에 의한 에너지를 복합 슬릿-마찰댐퍼에 집중시켜 주 구조 부재의 손상을 대폭 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 본 논문에서는 복합 슬릿-마찰 감쇠장치의 이론적 분석과 수치해석에 의한 결과를 도출하였고, 차후 실험에 의한 검증이 필요할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 논문은 2017년도 서일대학교 학술연구비에 의해 연구되었음.

## References

1. Cheon YS, Park JY, Choi KR. Development of Apartment Building with Damping Systems to Increase the Seismic Performance (1). Land & Housing Institute. 2012 Dec.
2. Kim DH, Ju YK, Kim MH, Sung WG, Kim SD. Experimental study on the vibration control capacity of hybrid buckling-restrained braces. Journal of KSSC. 2009 Feb;21(1): 83-91.
3. Kim DH, Kim JY, Kim DY, Ha IH, Ann TS, Kim HG, Kim SD. Experimental study on hybrid damper using a high-damping rubber and a steel pin. Proceeding of Annual Conference of the AIK. 2010 Sep. 9-10
4. Smith R. J., Willford, M. R. The damped outrigger concept for tall buildings. The Structural Design of Tall and Special Buildings. 2007 Dec;16(4):501-17.
5. American Society of Civil Engineers. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures(ASCE/SEI 7-10): Reston; c2010.
6. Ricky W.K., Chan, Faris. A. Experimental study of slit damper for passive energy dissipation. Engineering Structures. 2008 Apr;30(4):1058-66.
7. Suresh G., Andy R. Planar sliding with dry friction Part 2. Dynamics of motion. WEAR. 1991 Mar;20(2):331-52.
8. Computer and Structures, Inc. PERFORM User Guide ver 4, CSI: Berkeley, CA. ; 2006.
9. Damptech Friction Dampers-Capacities and Dimensions[Internet]. Denmark Available from: <http://www.damptech.com/downloads.html>.
10. Kim TW, Kim JK. Seismic Performance Evaluation of a RC Special Moment Frame. Structural Engineering and Mechanics. 2007; 27(6):674-82.
11. ACI Committee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318-11): American Concrete Institute; c2011.
12. ASCE/SEI 41-06 Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, Reston Virginia: American Society of Civil Engineers; c2007.
13. PEER Strong Motion Database[Internet]. 2005; Berkeley, California Available from: <http://peer.berkeley.edu/NGA>.

- Received : August 28, 2017
- Revised : October 23, 2017
- Accepted : October 23, 2017