

## 단주기 응답스펙트럼을 이용한 마찰댐퍼로 보강된 철근콘크리트 골조의 진동대 실험

신혜민<sup>1</sup> · 이희두<sup>2</sup> · 이수웅<sup>3</sup> · 신경재<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>박사과정, 경북대학교, 건설환경에너지공학부, <sup>2</sup>전임연구원, 경북대학교, 건설안전기술연구소,

<sup>3</sup>석사과정, 경북대학교, 건축학부, <sup>4</sup>교수, 경북대학교, 건설환경에너지공학부

## Shaking Table Test of Reinforced Concrete Frame with Friction Damper Using Short-Cycle Response

Shin, Hye-Min<sup>1</sup>, Lee, Hee-Du<sup>2</sup>, Lee, Su-Woong<sup>3</sup>, Shin, Kyung-Jae<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Ph.D Course Student, Dept. of Architectural Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Korea

<sup>2</sup>Research Fellow, Dept. of Architectural Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Korea

<sup>3</sup>Master Course Student, Dept. of Architectural Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Korea

<sup>4</sup>Professor, Dept. of Architectural Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Korea

**Abstract** - The friction damper is a passive energy dissipation device that is effective in reducing the response of short-term structures, and is easy to manufacture and construct, and enables economical design. In this study, by designing the joint part of the steel brace as a friction damper, the buckling problem of the brace was solved and the initial introduction tension of the friction damper was adjusted and installed. In addition, an artificial seismic wave reflecting the short-cycle response characteristics of the Korean seismic wave was used to perform a shaking table test and to analyze the dynamic response and fracture pattern of a reinforced concrete frame.

**Keywords** - Friction damper, Shaking table test, Steel brace damper, Seismic retrofit, Reinforced concrete frame

### 1. 서론

최근 국내에 발생한 지진들은 저층 구조물에 영향을 미치는 단주기 특성과 최대 PGA는 크지만 강진지속시간이 짧은 충격파와 유사한 특성을 가지는 것으로 분석된다. 마찰댐퍼는 미끄럼강도에 의한 재료의 슬립발생을 이용하여 지진에 의한 진동에너지를 열에너지로 소산시켜 구조물에 발생하는 동적 응답을 효과적으로 저감시키며 장치의 설치가 간편하고 강재 댐퍼 대비 안정적인 거동으로 기존건물의

내진 성능 향상을 위해 많이 적용되고 있다<sup>[1]</sup>. Roh *et al.*<sup>[2]</sup>의 연구에서는 경주지진파의 응답특성을 이용하여 감쇠장치의 비선형 해석을 수행하였으며 마찰감쇠가 주기 0.2초 이하의 단주기 구조물의 응답감소에 효과적으로 나타났다. 또한 강구조는 뛰어난 소성변형 능력과 효율적이고 경제적인 설계가 가능하기 때문에 지진과 같은 횡력의 작용에 대해 강재브레이스가 많이 사용되고 있지만 좌굴하중에 의해 구조 안정성에 문제가 발생한다<sup>[3]</sup>. Pall and Marsh<sup>[4]</sup>는 건축물 최초로 X-브레이스 교차부에 마찰감쇠기 설치를 제안하여 강재브레이스의 교차부를 마찰댐퍼로 설계함으로써 강재브레이스의 압축에 의한 좌굴발생 문제를 해결하였다. 또한 강재 브레이스형 마찰댐퍼는 볼트의 도입장력을 조절하여 댐퍼의 내력을 필요에 따라 자유롭게 조절할 수 있다<sup>[5]</sup>. 따라서 본 연구에서는 비내진 설계된 철근콘크리트를 대각 가새형, K브레이스형 강재 브레이스 마찰댐퍼로 보강하여 국내 지진파 특징과 유사한 단주기 응답특성을 갖는

Note.-Discussion open until December 31, 2020. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on March 22, 2020; revised May 17, 2020; approved on May 18, 2020.

Copyright © 2020 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

Tel. +82-53-950-5591 Fax. +82-53-950-6590

E-mail. shin@knu.ac.kr

인공지진파에 대한 진동대 실험을 수행하고 동적응답특성 및 마찰댐퍼의 형태, 도입장력에 따른 내진보강 성능을 분석하였다.

## 2. 실험개요

### 2.1 실험체 계획

마찰댐퍼로 보강된 철근콘크리트 골조의 내진성능 평가를 위하여 KBC 2016의 비내진 상세로 설계된 1층 1경간 문형골조형태의 기본 철근콘크리트 골조 실험체(NS)를 제작하였으며<sup>[6]</sup> Table 1에서 실험체의 주요 부재 상세 및 재료특성을 나타내었다. 콘크리트는  $f_{ck} = 21$  MPa로 설계하였으며 철근은 SD400( $F_y = 400$  MPa)를 이용하여 제작하였다. Fig. 1은 기본 골조의 배근 상세로 기둥 순 높이는 2,750 mm, T형 보의 순 스팬은 2,900 mm이며 하부 골조에 D30 전산볼트를 체결하여 진동대와 일체화하기 위하여 양측으로 400 mm 연장하였다. Table 2는 보강 실험체의 일람표이다. 대각가새 형태로 마찰댐퍼를 골조 하단부에 설치한 브레이스형 마찰댐퍼 실험체(NS-BF), K브레이스 형태로 골조 양쪽 하단부에 마찰댐퍼를 설치한 K형 마찰댐퍼 실험체(NS-KF)이다.

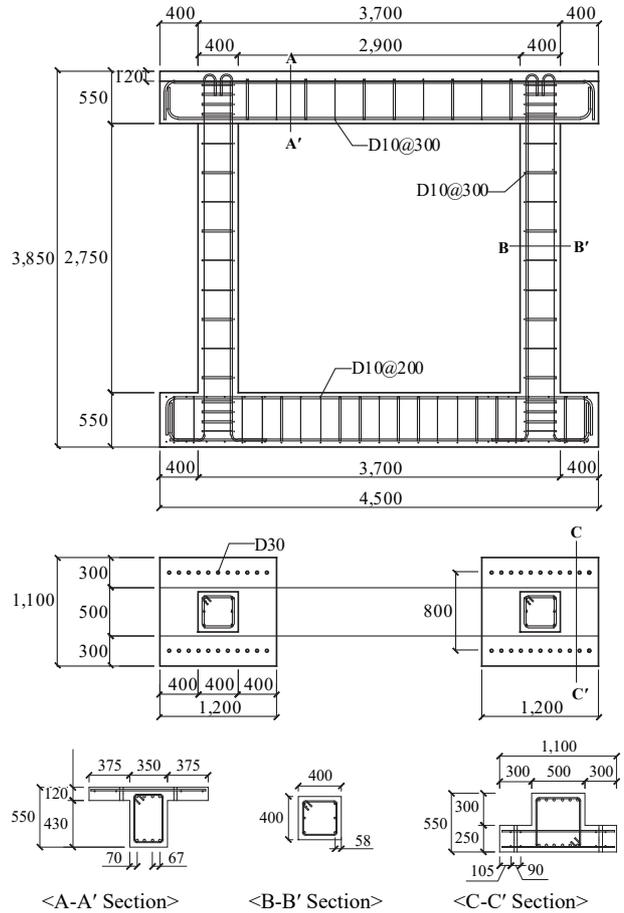


Fig. 1. Details of reinforced concrete frame (NS)

Table 1. Details of main members

NS specimen		Column	Beam	Footing beam
Section (mm)		400×400	350×550	500×550
Main bar	Top	3-D16	4-D22	6-D22
	Bottom	3-D16	4-D22	6-D22
Stirrup		D10@300	D10@300	D10@200
Steel		SD400		
$F_y$ (MPa)		400		
$f_{ck}$ (MPa)		21		

Table 2. List of specimens

Specimen	Arrangement of reinforcement	Strengthening method	Friction material	Size of bolts	Number of bolts	Initial tension	
NS	Non-seismic design	-	-	-	-	-	
NS-BF		Bracing friction damper	SS275	M20	8	40 kN	25 %
NS-KF		K-bracing friction damper				16	30 kN

### 2.2 마찰댐퍼 보강 상세

대부분 댐퍼 보강의 경우 골조 상부에 댐퍼부가 위치하여 지진하중에 의해 발생하는 층간 변위를 흡수하는 개념으로 설계되지만 본 연구에서 설계한 마찰댐퍼 보강상세는 골조 하단부에 댐퍼부를 위치시켜 브레이스에 의해 전달되는 층간 변위를 흡수하고, 지진발생 후 마찰면의 교체 및 볼트 장력의 유지관리가 용이하다. 강재 브레이스의 상단 접합부는 충분한 토크를 도입하였고 골조 하단 접합부의 도입장력을 조절하여 마찰을 발생시킴으로써 변위를 흡수하도록 하였

다. 설치된 마찰댐퍼는 SS275강재로 제작되었으며 H형강(200×200×8×12)의 플랜지와 두께 10 mm 강재 플레이트에 고장력볼트 M20(F10T)를 이용하여 마찰접합하였다.

Fig. 2는 브레이스형 마찰댐퍼 실험체(이하 NS-BF)로 상부 모서리 접합부는 M20 고장력볼트의 설계볼트장력인 165 kN을 100 %로 도입하였고 하부 마찰 댐퍼부는 설계볼트장력의 25 %인 40 kN을 초기장력으로 도입하여 마찰이 하단 접합부에서 집중하여 발생하도록 설계하였다.

Fig. 3는 K브레이스형 마찰댐퍼 실험체(이하 NS-KF)로

ㄷ형강(200×90×8×13.5)을 M16 앵커로 골조 철근 배근 간격을 고려하여 매입한 후 H형강(200×200×8×12)과 용접하였으며 골조 양쪽 하부에 마찰댐퍼를 2개소 설치하여 각각 인장과 압축에 거동하도록 하였으며 마찰댐퍼에 사용된 H형강은 압축 좌굴이 발생하지 않도록 설계하였다. 볼트구멍은 Fig. 4와 같이 M20 볼트 구멍 중 장슬롯(22×50)으로 설계하여 지진하중으로 인해 ±15 mm까지의 변위 발생에도 볼트에 지압이 발생하지 않고 마찰거동을 할 수 있도록 하였다.

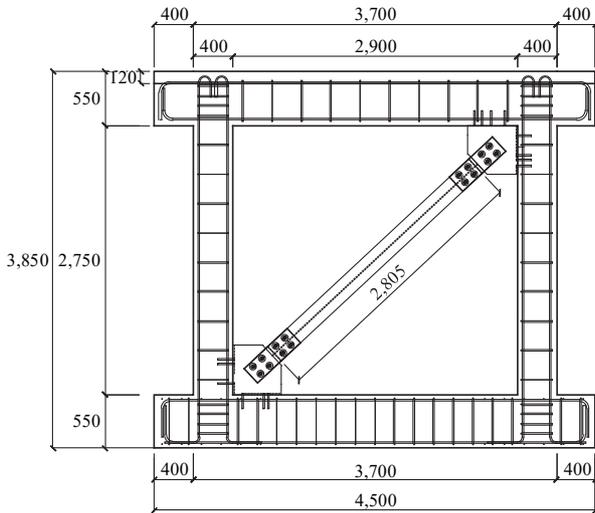


Fig. 2. Details of brace friction damper (NS-BF)

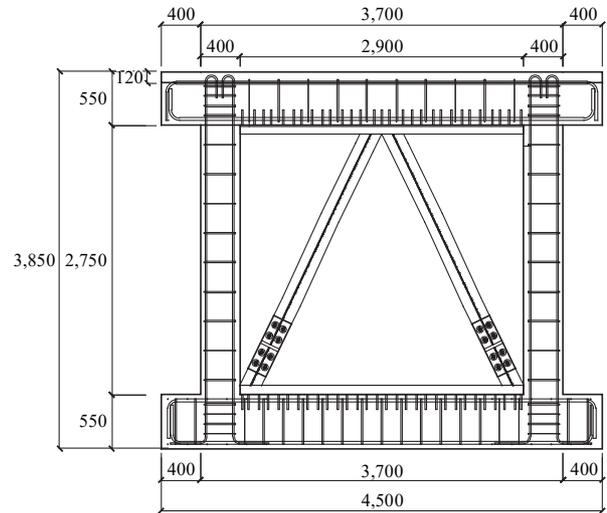


Fig. 3. Details of K-brace friction damper (NS-KF)

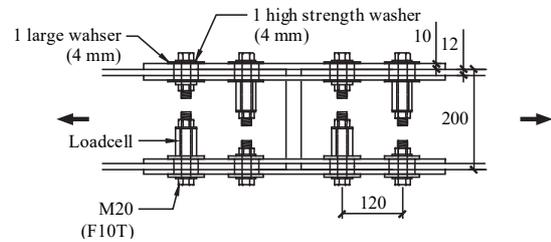
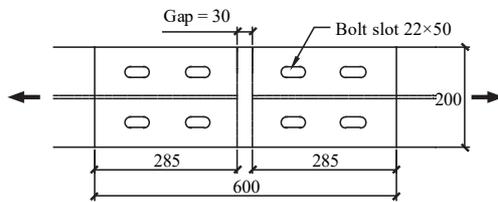


Fig. 4. Details of friction damper part



(a) NS specimen



(b) NS-BF specimen



(c) NS-KF specimen

Fig. 5. Test set-up

### 2.3 재료시험 결과

철근콘크리트 골조의 타설과 동시에 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험방법)의 기준에 따라 지름 100 mm, 높이 200 mm의 원형 공시체를 6개 제작하여 실험체와 동일한 조건에서 양생하였다. 진동대 실험 후 300 kN 용량의 UTM (universal testing machine)을 사용하여 시험을 수행하였으며 실험체의 설계 압축강도( $f_{ck}$ )는 21 MPa이나, 압축강도 시험결과 평균 16.9 MPa로 나타났다. Table 3은 콘크리트 공시체의 압축강도 시험결과를 나타낸다.

이형철근 D10, D16, D22(SD400)와 마찰댐퍼에 사용된 H형강, 강재 플레이트(SS275)에 대해 인장시험을 수행하였

**Table 3.** Result of compressive test

Cylinders	Compressive strength (MPa)
A	16.8
B	16.4
C	16.9
D	17.3
E	16.7
F	17.0
Average	16.9

**Table 4.** Result of tensile test

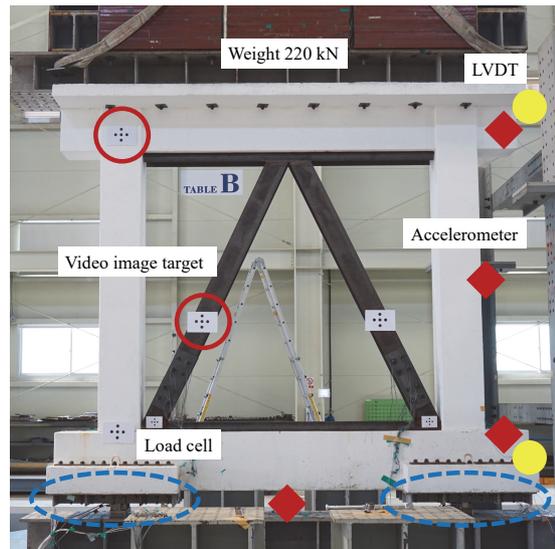
Coupon	Yield strength (MPa)		Tensile strength (MPa)	
	Measured	Average	Measured	Average
D10	410.5	403.4	516.5	514.5
	408.9		514.9	
	390.9		512.1	
D16	518.7	521.2	649.6	650.5
	523.2		650.5	
	521.7		651.5	
D22	503.0	503.3	639.8	638.1
	492.2		628.7	
	514.8		645.8	
H-steel (12 t)	282.4	282.2	427.4	428.0
	282.2		428.6	
	282.1		428.1	
Steel plate (10 t)	275.3	274.6	443.5	441.5
	280.6		445.3	
	268.0		435.8	

다. H형강과 강재 플레이트는 KS B 0801(금속재료인장시험편)의 기준에 따라 판형 1A호, 5호 시험편으로 UTM 용량에 맞게 제작하였다. 통상적으로 SD400 강재는 항복강도  $F_y = 400$  MPa, 인장강도  $F_u = 560$  MPa이고 SS275 강재는 항복강도  $F_y = 275$  MPa, 인장강도  $F_u = 410$  MPa이다. Table 4는 실험체의 철근 및 강재의 인장시험 결과를 나타낸다.

### 2.4 진동대 실험 계획

#### 2.4.1 실험체 설치 및 계측장비

비내진 상세를 가지는 철근콘크리트 골조와 마찰댐퍼로 보강된 골조의 동적 응답특성을 파악하기 위하여 국제공인 기관 KOLAS, KEPIC 인증으로 신뢰성이 확보된 지진방재 연구센터에서 동적실험을 수행하였다. Fig. 6는 동적실험에 사용된 계측장비 및 지그이다. 실험체 상부에 220 kN 하중 블록을 적재하였으며 하부 바닥 4개소에 로드셀을 설치하여 하중을 측정하였다. 실험체 우측 상·하단에 LVDT를 설치하여 골조의 변위를 측정하였고 영상분석을 통한 절대변위 측정을 위해 골조와 댐퍼에 패턴을 부착하였다. 또한 4개의 가속도계를 설치하여 진동대 바닥, 실험체 상·중·하단에서의 가속도를 측정하였다. Fig. 7은 마찰댐퍼로 보강된 실험체(NS-BF, NS-KF)에서 볼트장력측정을 위해 제작한 로드셀이다. 로드셀은 도입장력을 고려하여 SM45C급 기계용 강재를 원통형으로 가공하여 스트레인게이지로 변형률을 측정하는 원리<sup>7)</sup>이다. 볼트용 로드셀은 H형강 플랜지 한쪽에 4개씩 총 8개를 사용하여 볼트 위치별 장력변화를 측정하였다.



**Fig. 6.** Installation of measuring devices

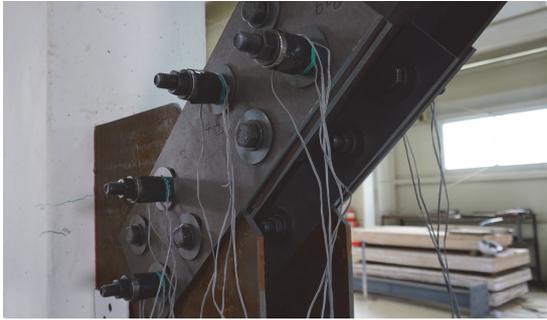


Fig. 7. Load cell for bolt tension

### 2.4.2 인공지진파 생성

2016년 9월 발생한 경주지진(M=5.8)과 2017년 11월 발생한 포항지진(M=5.4)에서 기록된 지진파는 강진 구간이 1-2초 내외로 짧았기 때문에 실험체에 미치는 손상이나 변형이 크지 않을 것으로 판단된다<sup>[8]</sup>. 따라서 국내 지진파 응답특성에 대한 실험체의 동적 거동을 파악하기 위하여 국토교통부 KDS 17 10 00 건축물 내진설계기준에서 제시하는 S4지반, 내진등급 1등급 기준, 감쇠비 5%에 대한 응답스펙트럼과 유사한 동특성을 가지는 인공지진파를 생성하였다. Fig. 8은 생성된 인공지진파의 시간-가속도 그래프로 최대 PGA는 0.236 g, 강진지속시간은 약 20초이다. Fig. 9은 S4 지반의 응답가속도스펙트럼( $\xi = 0.5$ )과 비교한 인공지진파의 응답스펙트럼이다. 진동대 실험은 지진가속도 50%부터 350%까지 단계별로 진행하였으며 본 논문에서는 100% 이상의 가진 결과를 정리하였다.

## 3. 동적실험 결과 및 분석

### 3.1 밀면전단력-최상층변위 관계

Fig. 10은 각 실험체의 최대 밀면전단력 - 최상층 변위이다. 무보강 NS 실험체는 150% 가진 시 1.5% 이상의 변위가 발생하였고 기둥 하단부 파괴가 나타남에 따라 가진 단계를 조정하였으며 190% 가진 중 실험을 중단하였다. 마찰댐퍼로 보강된 NS-BF, NS-KF 실험체 모두 NS 실험체 대비 3.79배의 초기강성 보강 효과가 나타났으며, 최종 가진 시 밀면 전단력은 NS 실험체 181.6 kN, NS-BF 실험체 233 kN, NS-KF 실험체 397.2 kN으로 약 1.28배, 2.19배의 최대 강도 증가 효과가 있었다.

Figs. 11-12는 100% 가진, 200% 가진 시 최대 밀면전단력과 최상층 응답 변위이다. 100% 가진에서는 세 실험체 모

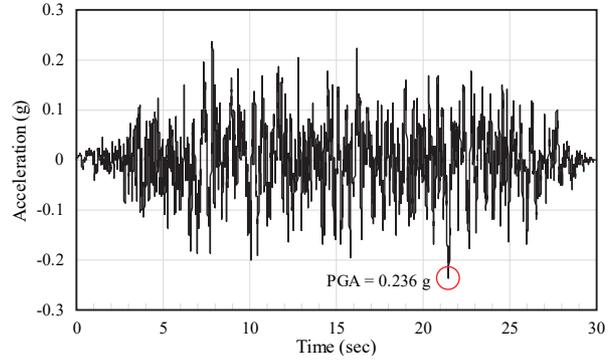


Fig. 8. Acceleration of artificial wave

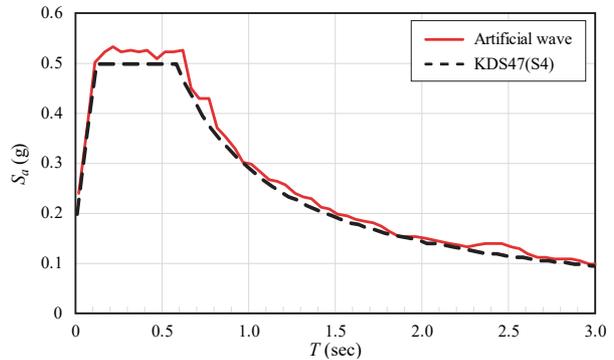


Fig. 9. Response spectrum of artificial wave ( $\xi = 0.5$ )

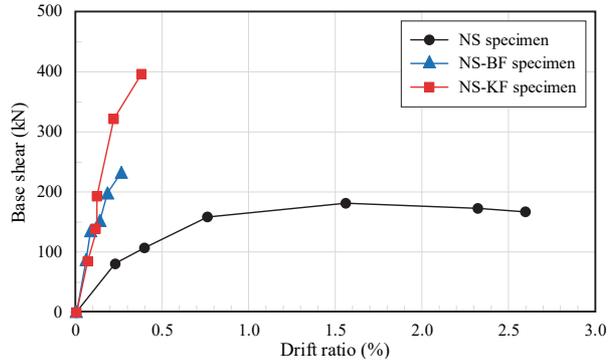


Fig. 10. Base shear force - drift ratio

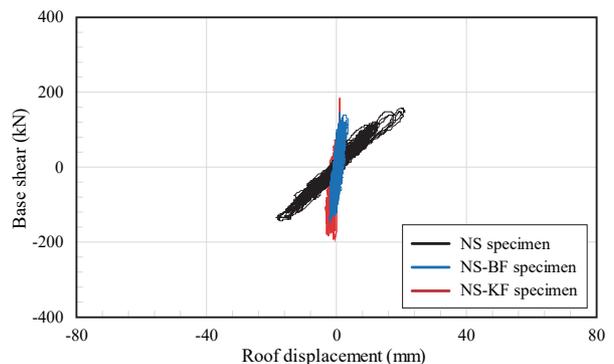


Fig. 11. Base shear - roof displacement during 100% artificial wave

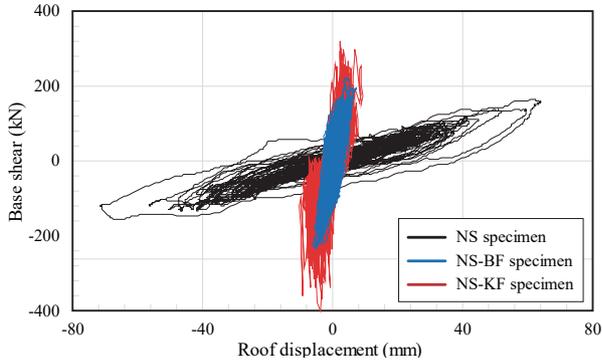


Fig. 12. Base shear - roof displacement during 200 % artificial wave

두 탄성범위 내의 거동을 하는 것으로 판단되며 200% 가진 시 NS 실험체는 비선형 거동을 하지만 NS-BF, NS-KF 실험체는 탄성범위 내에서 거동하고 있다. 이는 마찰댐퍼에서 마찰이 발생하면서 에너지를 흡수하여 골조로의 하중전달이 지연되어 비선형 거동으로 도달하지 않은 것으로 판단된다. NS-BF 실험체는 350%까지 가진하였으나 NS-KF 실험체의 250% 가진 시 철근콘크리트 골조와 연결된 마찰댐퍼 H형강 양쪽 하단부에 크랙이 발생하며 마찰댐퍼가 변위를 흡수하지 못한다고 판단되어 실험을 종료하였다.

### 3.2 마찰댐퍼의 거동 분석

강재 브레이스형 마찰댐퍼로 보강한 NS-BF, NS-KF 실험체는 골조에 작용하는 횡력에 의해 브레이스에 작용하는 축방향력이 마찰강도 이상이 될 때 골조 하단부의 마찰댐퍼가 거동한다. Fig. 13과 같이 골조에 발생하는 횡력  $F$ 는 브레이스에 축방향력  $P$ 로 작용하게 되며, NS-BF 실험체에서의 축방향력  $P$ 는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다<sup>[2]</sup>.

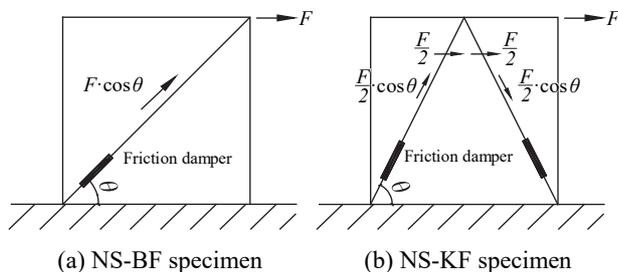


Fig. 13. Axial force distribution

$$P = F \times \cos \theta \tag{1}$$

여기서,  $P$ : 브레이스 축방향력

$F$ : 골조의 횡력

$\theta$ : 하부보와 브레이스가 이루는 각도

가진 단계별 마찰댐퍼의 거동유무를 판단하기 위해 Table 5에 브레이스로 전달되는 축방향력과 최대 변위를 정리하였으며 식 (2)에 따라 골조에 설치된 마찰댐퍼의 미끄럼강도를 계산하였다. 도입볼트장력( $T$ )는 Table 2에서 각 실험체별 도입된 초기장력과 볼트 개수를 고려하여 산정하였다. 미끄럼계수( $\mu$ )는 흑피상태로 KS 강구조 설계기준에서 제시하는 0.4를 적용하였다<sup>[9]</sup>. NS-BF 실험체의 설계 미끄럼강도는 약 179.2 kN, NS-KF 실험체의 설계 미끄럼강도는 약 134.4 kN로 산정되었다.

Table 5. Axial force depending on base shear

Scale	NS-BF specimen		NS-KF specimen	
	Axial force (kN)	Displacement (mm)	Axial force (kN)	Displacement (mm)
100 %	109.5	3.7	45.0	3.3
150 %	144.1	5.1	74.9	6.0
200 %	169.2	7.1	92.6	10.3
250 %	191.4	10.3	-	-
300 %	184.4	16.7	-	-
350 %	269.2	29.8	-	-

$$R_n = \mu h_f T N_s \tag{2}$$

여기서,  $R_n$ : 설계 미끄럼강도(kN)

$\mu$ : 미끄럼계수

$h_f$ : 필러계수

$T$ : 도입볼트장력(kN)

$N_s$ : 전단면의 수

따라서 NS-BF 실험체는 브레이스로 191.4 kN의 축력이 전달되는 250%부터 마찰거동이 시작되었을 것으로 예상할 수 있으며, 실험 시 댐퍼부를 촬영한 영상 분석 결과 250% 가진부터 마찰댐퍼가 거동하는 것을 확인하였다. 또한 마찰댐퍼의 거동이 시작된 250% 가진과 300% 가진에서는 최대하중의 증가 없이 약 6 mm의 변위가 증가하였고 350% 가진 시 급격한 하중, 변위 증가현상이 나타났다. 이는 철근콘크리트 골조의 손상에 인한 것으로 판단되며 3.3절에서 고유주기를 분석하였다.

NS-KF 실험체는 골조에 작용하는 횡력이 두 개의 브레이스로 분담되고 하부보와 브레이스가 이루는 각도가 커져 하나의 마찰댐퍼로 전달되는 축방향력이 저감된다. 댐퍼와 철근콘크리트 골조 접합부의 크랙발생으로 실험이 종료된 200% 가진 시 최대 축방향력이 92.6 kN로 미끄럼거동이 시작되는 134.4 kN에 도달하지 않아 브레이스의 강성, 강도 보강효과만 있었다고 판단된다.

### 3.3 가진 단계별 고유주기 변화

실험체의 고유진동수 및 고유주기를 분석하기 위하여 지진과 가진 전 백색잡음(white noise)을 가진하여 FFT(fast Fourier transform)를 수행하였다. Fig. 14은 NS 실험체의 주파수 스펙트럼으로 가진 전 탄성 상태의 실험체 초기 고유진동수는 약 4.23 Hz로 나타났으며 100% 가진 시까지 초기 고유진동수가 거의 유지되었고 실험체의 균열도 발생하지 않았다. 가진 단계가 증가함에 따라 기둥 접합부에 깊은 균열이 발생하였고 실험체의 손상으로 인하여 200% 가진 후 약 1.81 Hz로 감소하였다. Fig. 15의 NS-BF 실험체는 초기

고유진동수 7.57 Hz로 NS 실험체 대비 약 1.79배 증가하였으며 상부 보의 휨균열이 발생한 200% 가진 후에도 고유진동수에 큰 변화가 없어 실험체의 구조적 손상이 크지 않은 것으로 판단된다. 250% 가진 이후 마찰댐퍼의 거동이 시작되면서 댐퍼와 골조 연결부에 크랙이 발생하였으나 고유진동수의 변화는 없었다. 350% 가진 시 급격한 하중, 변위 증가가 나타났으며 고유진동수가 4.86 Hz로 감소하여 실험체의 구조적 손상이 발생한 것으로 판단된다. Fig. 16의 NS-KF 실험체는 초기 고유진동수 약 7.14 Hz로 NS 실험체 대비 약 1.68배 증가하였으며 150% 가진 시 균열이 일부 발생하였으나 실험체의 손상은 없었으며 고유진동수의 변화도 나타나지 않았다. 200% 가진 시 댐퍼가 연결된 콘크리트에 균열이 깊게 발생하며 실험체에 손상이 발생하였고 고유진동수는 약 4.48 Hz로 감소하였다.

### 3.4 에너지소산능력

Fig. 17은 각 실험체의 에너지소산능력을 나타낸 것으로 변형에너지는 밀면전단력-변위 이력곡선의 면적으로 계산

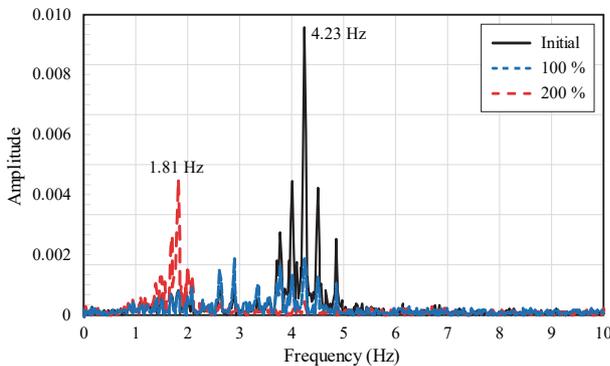


Fig. 14. FFT spectrum of NS specimen using white noise

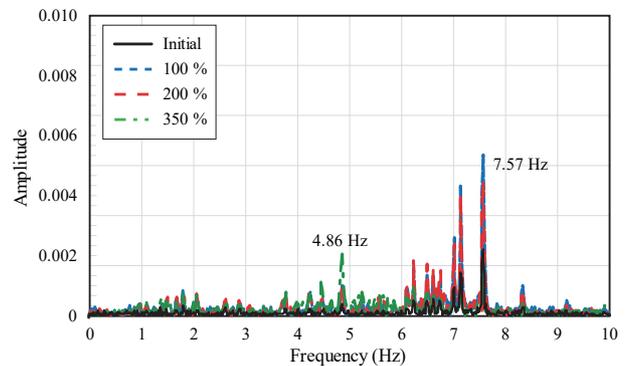


Fig. 15. FFT spectrum of NS-BF specimen using white noise

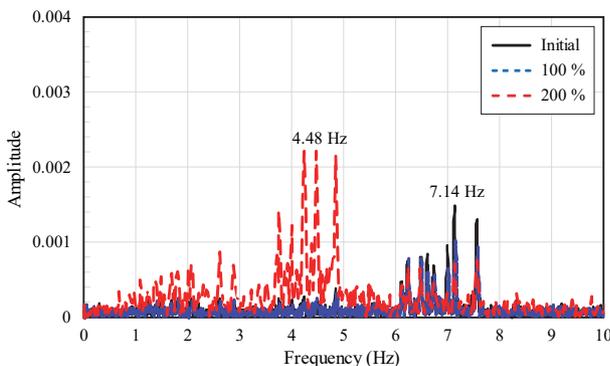


Fig. 16. FFT spectrum of NS-KF specimen using white noise

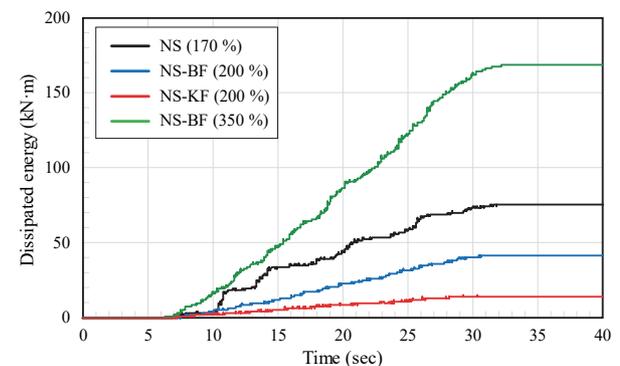


Fig. 17. Absorbed energy

하였다. 무보강 NS 실험체는 170 % 가진 단계에서 실험이 종료되어 최종 가진 시의 에너지 소산능력으로 비교하였으며 200 % 가진 시의 NS-BF, NS-KF 실험체보다 약 2배 - 4 배 많은 에너지를 흡수하였다. Fig. 12에서 NS 실험체는 비선형 거동을 보이면서 구조부재의 손상에 의해 변형에너지가 소산된 것으로 분석할 수 있다. Fig. 12의 NS-BF, NS-KF 실험체는 탄성거동을 하는 것으로 나타났으며 지진파에 의해 각 실험체에 입력된 에너지의 양이 비슷한 점을 고려하면 마찰댐퍼로 보강된 두 실험체는 댐퍼의 거동으로 입력된 지진에너지의 대부분을 흡수함에 따라 무보강 NS 실험체에 비하여 구조부재에 입력되는 에너지의 양이 저감된 것으로 판단된다<sup>10)</sup>. 또한 K브레이스형 마찰댐퍼가 대각 가새형보다 약 2배의 에너지를 흡수하는 것으로 나타났다. NS-BF 실험체는 350 % 가진 시 NS 실험체 대비 약 2.25배의 누적에너지를 흡수함으로써 브레이스형 마찰댐퍼를 적용함에 따

라 전체 구조물이 보다 큰 규모의 지진파에 견딜 수 있는 것으로 판단된다.

### 3.5 균열 및 파괴양상

실험체 균열을 인공지진파 100 % 가진 이후부터 표시하였으며 Fig. 18은 실험 종료 후 전체 균열분포도이다. NS 실험체는 150 % 가진 시 Fig. 19와 같이 기둥 하부와 상부 보-기둥 접합부에서 콘크리트가 탈락하고 균열이 발생하기 시작하였으며 이후 기둥 하부에 균열이 집중되어 균열폭이 크게 증가하고 전체 골조의 고유주기가 약 2배 증가함에 따라 170 %에서 실험이 중단되었다. NS-BF 실험체는 150 % 가진 시 브레이스의 강도보강에 의한 균열로 Fig. 20와 같이 상부 보의 휨 균열이 주로 발생하였고 250 % 가진부터 마찰댐퍼의 거동이 시작되면서 우측상단 댐퍼가 연결되어

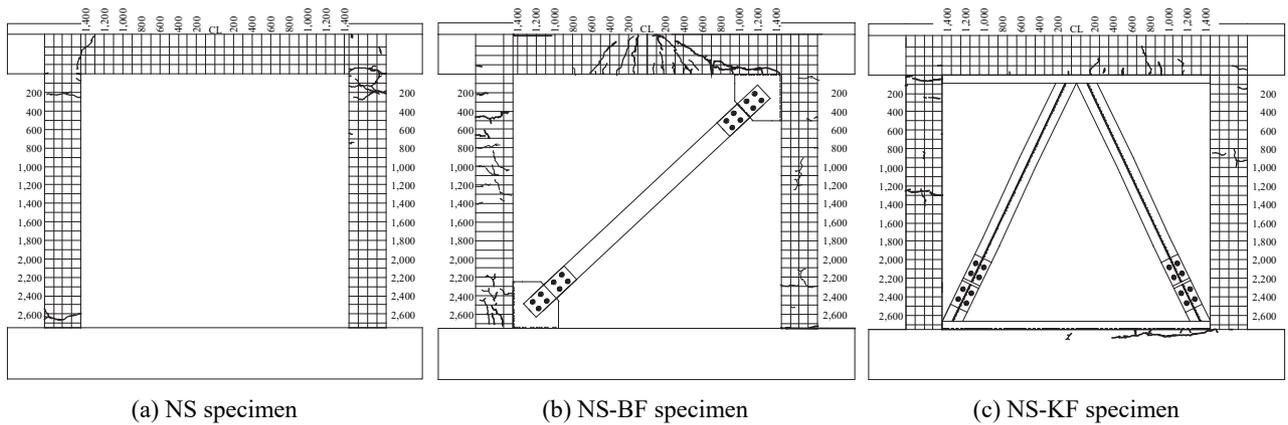


Fig. 18. Crack pattern

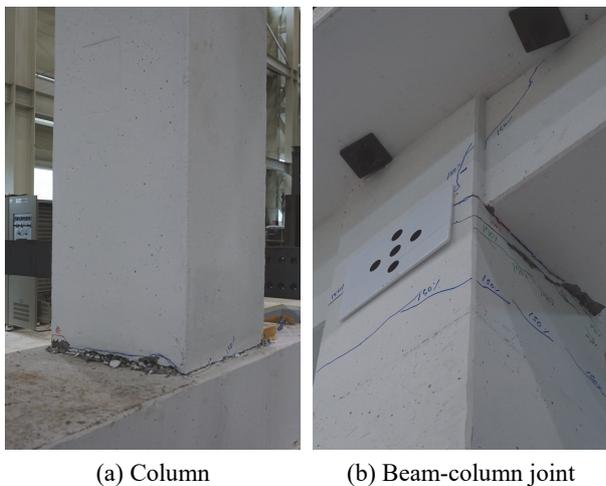


Fig. 19. Damage of NS specimen



Fig. 20. Damage of NS-BF specimen



Fig. 21. Damage of NS-KF specimen

있는 콘크리트면에 균열이 발생하였다. 350 % 가진 시 마찰댐퍼 연결부의 실리콘이 탈락하였으나 앵커의 뿔힘은 발생하지 않았다. NS-KF 실험체도 150 % 가진 이후 강도보강으로 인한 상부 보의 휨 균열이 일부 발생하였으며 250 % 가진 중 Fig. 21과 같이 마찰댐퍼가 접합된 콘크리트에 균열이 발생하면서 균열부로 하중이 집중되었고 더 이상 댐퍼가 거동하지 않는다고 판단하여 실험을 종료하였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 1층 1경간 철근콘크리트 골조를 대상으로 국내 지진파 응답특성인 단주기 성분의 인공지진파에 대한 동적응답특성을 분석하기 위하여 진동대 실험을 수행하였다. 또한 설계볼트장력의 약 30 % - 40 %로 초기장력을 도입한 마찰댐퍼를 적용한 보강 실험체에 대한 진동대 실험을 수행하고 비보강 및 보강 실험체의 성능을 비교한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 100 % 가진 시 모든 실험체는 탄성범위 내에서 거동하였으며 NS-BF, NS-KF 실험체는 NS 실험체 대비 약 3.79배의 초기강성 보강 효과가 나타났으며, 최종 가진 후 NS-BF 실험체는 약 1.28배, NS-KF 실험체는 약 2.19배의 최대 미면전단력 증가 효과가 있었다.
- (2) 최종가진 시 NS 실험체는 drift ratio 약 2.6 %의 변위가 발생하였으나 NS-BF 실험체는 약 0.3 %, NS-KF 실험체는 약 0.4 %의 변위가 발생하였다. 이는 마찰댐퍼부로의 하중전달 및 변위발생으로 실험체의 변위를 흡수하여 보강효과가 나타난 것으로 판단된다.

- (3) NS 실험체의 초기 고유진동수는 약 4.23 Hz로 나타났으며 NS-BF, NS-KF 실험체의 초기 고유진동수는 약 7 Hz로 보강 후 골조의 고유진동수가 증가하였다. 200 % 가진 후 NS 실험체와 NS-KF 실험체는 고유진동수가 감소하면서 실험체의 손상이 나타났으나 NS-BF 실험체는 큰 변화가 나타나지 않았다.
- (4) 200 % 가진 후 에너지 소산능력을 분석한 결과, NS 실험체는 구조부재에 손상에 의해 변형에너지가 모두 소산되었으며 NS-BF, NS-KF 실험체는 댐퍼의 거동으로 입력된 지진에너지의 대부분을 흡수함에 따라 구조부재에 전달되는 에너지의 양이 약 2배 - 4배 저감되었다.
- (5) 마찰댐퍼의 설치 형태에 따라 대각 가새로 설치된 실험체(NS-BF) 대비 K브레이스 형태의 실험체(NS-KF)는 약 2배의 강재 물량이 필요하며 브레이스로 전달되는 축력이 저감됨에 따라 도입된 마찰댐퍼의 거동이 원활하게 이루어지지 않았다. 따라서 설치하는 마찰댐퍼의 형태에 따라 볼트 크기 및 초기 도입장력의 적절한 설계가 필요하다.

#### 감사의 글

본 연구는 교육부의 BK플러스사업(21A20132000001)의 지원을 받아 작성된 논문이다.

이 성과는 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2017 R1A2B3009984).

#### 참고문헌(References)

- [1] Bae, C.-H., Kim, Y.-W., Lee, S.-H., and Park, Y.-P. (2007) Shaking Table Test of a Full Scale 3 Story Steel Frame with Friction Damper, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, KSNVE, Vol.17, No.9, pp.862-873 (in Korean).
- [2] Roh, J.E., Lee, S.H., and Seo, J.W. (2016) Seismic Retrofit Using Damping Devices for Short-Period Structures Excited by Ground Accelerations Similar to Gyeong-ju Earthquakes, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, EESK, Vol.20, No.7, pp.503-508 (in Korean).

- [3] Oh, S.H., Ryu, H.S., and Moon, T.S. (2005) Experimental Study on the Behavior of Brace with Elasto-Plastic Hysteretic Damper, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.17, No.5, pp.617-625 (in Korean).
- [4] Pall A.S., and Marsh, C. (1982) Seismic Response of Friction Damped Braced Frames, *Journal of the Structural Division*, American Society of Civil Engineers, Vol.108, No.6, pp.1313-1323.
- [5] Park, E.-S., and Choi, J.-H. (2012) An Experimental Study on Effect of Installed Tension for Shear Type Friction Damper with Disk Spring Washer, *Journal of the Architectural Institute of Korea - Structure & Construction*, AIK, Vol.28, No.8, pp.21-32 (in Korean).
- [6] Shin, K.J., Lee, S.-H., Lee, H.-D., and Kwon, H.-S. (2016) Seismic-Strengthening Effect of Steel Shear Wall with Circular Opening Through Shaking Table Test on Reinforced Concrete Frame, *Journal of the Architectural Institute of Korea - Structure & Construction*, AIK, Vol.18, No.2, pp.107-114 (in Korean).
- [7] Shin, H.M., Lee, H.D., and Shin, K.J. (2019) Measurement of Bolt Tension of Friction Damper Using Manufactured Load Cell, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.31, No.3, pp.171-178 (in Korean).
- [8] Lee, C.H., Park, J.-H., Kim, T., Kim, S.-Y., and Kim, D.-K. (2016) Damage Potential Analysis and Earthquake Engineering-Related Implication of Sep.12, 2016 M5.8 Gyeongju Earthquake, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, EESK, Vol.20, No.7, pp.527-536 (in Korean).
- [9] KSSC (2018) *Design of Steel Structures (for New KS Standard)*, Goomibook, Korea (in Korean).
- [10] Baek, E.L., Oh, S.H., and Lee, S.H. (2014) Seismic Performance of an Existing Low-Rise Reinforced Concrete Piloti Building Retrofitted by Steel Rod Damper, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, EESK, Vol.18, No.5, pp.241-251 (in Korean).

---

**요 약**: 마찰감쇠형 댐퍼는 수동형 에너지 소산장치로 단주기 구조물의 응답감소에 효과적이며 제작 및 시공이 용이하고 경제적인 설계가 가능하다. 본 연구에서는 강제 브레이스의 이음부를 마찰댐퍼로 설계함으로써 브레이스의 좌굴 문제를 해결하고 마찰댐퍼의 초기 도입장력을 조절하여 설치하도록 제작하였다. 또한 국내 지진파의 단주기 응답특성을 반영한 인공지진파를 생성하여 진동대 실험을 수행하고 철근콘크리트 골조의 동적 응답 및 파괴형태를 분석하였다.

**핵심용어**: 마찰댐퍼, 진동대 실험, 강제브레이스 댐퍼, 내진보강, 철근콘크리트 골조

---