건축방재

혼합형 마찰댐퍼 구성요소의 성능평가 I: 1절점 회전형 마찰요소 Evaluation on Structural Performance of Hybrid Friction Damper Components I: One-nodal Rotary Frictional Component

김도현*

Kim, Do-Hyun*

Abstract

As tall buildings have increased in Korea, various dampers have been applied. In order to minimize the space, cost and construction process, the new hybrid friction damper which can be installed at a coupled beam was developed. This damper, which is composed of two one-nodal rotary frictional components and a slotted bolted frictional component, is able to operate at various displacements of building. In this study, dependency tests were carried out to evaluate on the structural performance of one-nodal rotary frictional component. Test results show that one-nodal rotary frictional component does not depend on a displacement, a frequency and a long term loading. However friction coefficient is reducing as a clamping force is increasing.

Key words : Coupled Beam, Hybrid Friction Damper, Rotary Frictional Component, Dependency Test

요 지

국내 고층건물이 증가함에 따라 다양한 형상의 제진댐퍼가 적용되고 있다. 설치공간, 비용 및 시공과정을 최소화하기 위해서 연결보에 설치가능한 새로운 혼합형 마찰댐퍼를 개발하였다. 혼합형 마찰댐퍼는 두 개의 1절점 회전형 마찰요소와 슬롯형 마찰요소로 구성되어, 다양한 건물변위에서 작동할 수 있다. 본 연구에서는 혼합형 마찰댐퍼를 구성하는 1절점 회전형 마찰요소의 구조성능을 평가하기 위하여 의존성 실험을 수행하였다. 실험결과 진폭, 주파수, 장기반복가력에 대해서 의존성을 나타내지 않았으나, 축력이 증가할수록 마찰 계수는 감소하는 경향을 나타내었다.

핵심용어 : 연결보, 혼합형 마찰댐퍼, 회전형 마찰요소, 의존성 실험

1. 서 론

국내 고층건물이 증가하고 있고, 건물에 대한 태풍이나 지진의 영향이 증가함에 따라 제진장치에 관심이 고조되고 있다. 최근 들어 제진장치는 진동원의 종류에 따른 중복 설치와 건축 계획상 설치 적절성이 문제로 지적되고 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 하나의 제진장치로 바람이나 지진에 의한 진동 에너지를 소산할 수 있는 복합댐퍼가 국내외에서 개발되고 있다.

국내의 경우 내진성능이 우수한 비좌굴가새에 점탄성 댐퍼를 결합한 하이브리드 비좌굴가새(Kim *et al.*, 2013)와 건축 계획상 문제를 개선한 고감쇠 고무와 강재판을 사용한 연결보형 복합댐퍼가 있다(Kim *et al.*, 2012). 해외에는 아웃리거

와 외부기둥 연결부에 점성댐퍼를 사용한 아웃리거 댐퍼가 있다(Rob *et al.*, 2007). 이러한 문제점을 개선하기 위하여 다단계 슬립 메커니즘을 이용하여 다양한 변위영역에 대응하면서 에너지를 소산하고, Fig. 1과 같이 건축계획상 공간제한을 받지 않는 연결보에 설치가능한 경제적인 혼합형 마찰댐퍼를 개발하였다. 혼합형 마찰댐퍼는 1개의 슬롯형 마찰요소와 2개의 1절점 회전형 마찰요소로 구성된다.

마찰댐퍼는 기구학적으로 볼트슬립형 마찰댐퍼와 회전형 마찰댐퍼로 구분할 수 있다. 본 논문에서 성능을 평가한 1절점 회전형 마찰요소는 회전형 마찰기구를 이용한다.

회전형 마찰댐퍼는 Mualla and Belev(2002)는 T형 회전 마찰댐퍼를 와이어를 이용하여 철골조의 내진성능을 향상시키는 연구를 수행하였다. 국내에서는 Oh *et al.*(2010)은 인방보

*교신저자. 정회원. 경기과학기술대학교 건축인테리어과 조교수(Tel: +82-31-496-4711, Fax: +82-31-496-4543, E-mail: dhkim14@gtec.ac.kr)
Corresponding Author. Member. Assistant Professor, Dept. of Architecture and Interior Design, Gyeonggi College of Science and Technology

Fig. 1. Schematic Concept of the Hybrid Friction Damper.

양단에서 회전변형을 이용하는 마찰댐퍼를 철근콘크리트 코어와 함께 제작된 시스템 수준의 실험체에 대하여 지진응답 실험을 수행하여 지진특성을 실험적으로 규명하였다. Lee *et al.*(2011)은 기존 철근콘크리트 건축물 내진보강을 위하여 외부 부착형 회전형 마찰댐퍼 골조를 개발하였고, 성능을 평가하였다.

새롭게 개발된 혼합형 마찰댐퍼의 구조성능을 평가하기 위하여 두 가지 구성요소에 대한 변위, 주파수, 장기반복가력 및 도입 축력에 대한 의존성실험을 수행하였고, 본 논문에서는 1절점 회전형 마찰요소의 작동메커니즘과 구조성능을 검증하였다. 또한 연속되는 논문에서 또 다른 구성요소인 슬롯형 마찰요소에 대한 다단계 작동메커니즘과 의존성을 실험적으로 분석하였다.

2. 혼합형 마찰댐퍼

2.1 혼합형 마찰댐퍼 구성

Fig. 1과 같이 슬롯형 마찰요소 단부에 형성된 슬롯홀 구간에서는 1절점 회전형 마찰요소만 작동하고, 슬롯홀 구간을 넘어서는 순간 슬롯형 마찰요소가 함께 작동하는 다단계 슬립이 발생한다.

2.2. 1절점 회전형 마찰요소 메커니즘

2개의 1절점 회전형 마찰요소가 사각형을 구성하고, 벽체 변형에 의한 댐퍼의 마름모꼴 변형으로 마찰재가 설치된 절점에서만 회전마찰력이 형성된다(Fig. 2). Fig. 2와 같이 1절점 회전형 마찰요소의 마찰력은 단단계 슬립하중 중 가장 작지만 혼합형 마찰댐퍼 변위영역전체에서 작동하기 때문에 가장 중요한 구성요소이다.

2.3 내력산정식

1절점 회전형 마찰요소에는 쿨롱감쇠(Coulomb Damping)

Fig. 2. Rotary Friction Component Mechanism.

가 적용된다. 회전형 마찰요소의 내력(T)은 마찰계수(μ), 도입 축력(N), 유효반경(R_c)을 이용하여 Eq. (1)과 같이 표현된다.

$$T = \mu \times N \times R_e \quad (1)$$

3. 실험계획

3.1 실험체 설계 및 계측계획

1절점 회전형 마찰요소는 혼합형 복합담퍼의 슬롯형 마찰 요소 축방향으로 전달되는 하중을 회전모멘트로 변화하여 에너지를 소산시킨다. 실험체는 Fig. 3과 같이 두께 5 mm의 마찰재를 외경 120 mm, 내경 30 mm로 제작하여 2장을 삽입하였고, 회전 절점부에 축력을 도입하였다. 축력의존성을 분석하기 위하여 Table 1과 같이 축력을 변수로 총 3개의 동일한 실험체에 대하여 실험을 수행하였다.

Fig. 3. Details of One-nodal Rotary Friction Component.

Table 1. Summary of Test specimens

No	Name	Clamping force(kN)	Frictional Pad Specification
1	1R-60	60	diameter=120mm(outer), 30mm(inner), 2EA, frictional coefficient=0.4
2	1R-120	120	
3	1R-165	165

Fig. 4. Measurement Setting.

회전형 마찰요소의 대각방향 변형량을 측정하기 위하여 마찰재가 없는 두 절점을 연결하는 직선과 평행하도록 변위계를 설치하여 Fig. 4와 같이 상대변형량을 측정하였다. 또한 절점에 도입된 축력을 도입단계부터 실험 종료시까지 계속하기 위한 로드셀도 설치하였다.

3.2 실험체 세팅 및 가력계획

실제 혼합형 마찰댐퍼에서 대각방향 직선운동이 1절점 회전형 마찰요소에서 회전운동으로 변화되기 때문에, 액추에이터와 실험체를 45° 각도로 경사지게 놓고 가력하였다(Fig. 4). 실험체의 직선운동을 구현하기 위하여 500 kN용량의 동적액추에이터(dynamic actuator)를 Fig. 5와 같이 길이 1.2 m인 1

축 운동 변환용 피스톤을 이용하여 실험체에 연결하였다.

실험체의 진폭의존성, 주파수의존성, 장기가력의존성 평가를 위해 Table 2의 주어진 가력조건에 따라 정현파로 반복가력하였다.

3.3 마찰재

실험에 사용된 마찰재는 마찰재질 분류상 비석면계인 케브라 섬유재질 복합체로 한국산업규격 KS L 5212에 따른 정속 마찰계수는 0.4이다.

4. 실험결과 분석

실험결과평가는 일본면진구조협회(JSSI, 2005)에서 발간한 매뉴얼에 따라 Fig. 6과 같이 평균마찰력($F_{d,ave}$), 에너지 소산량(E)을 정하였다. 특히 평균마찰력은 Eq. (2)을 이용하였고, 마찰계수는 Eq. (3)에 따라 산정하였다.

$$F_{d,ave} = E / \sum \delta \quad (2)$$

$$\mu = F_{d,ave} / N \quad (3)$$

4.1 전체거동

실험결과 1절점 회전형 마찰요소는 도입축력에 따른 마찰력의 차이를 제외하고, 진폭, 주파수에 큰 의존성을 보이지 않았고, 장기가력시에도 안정적인 거동을 보였다. 실험 종료이

Fig. 5. Experimental Setup of One-nodal Rotary Frictional Component.

Table 2. Loading Protocol

Step	Loading name	Displacement(mm)	Forcing speed or frequency	Cycle
1	displacement dependency	$\pm 3, \pm 4.5, \pm 6, \pm 10, \pm 15, \pm 20, \pm 25, \pm 30$	2mm/sec	10
2	frequency dependency	± 4.5	0.167Hz, 0.25Hz, 0.5Hz, 1Hz, 2Hz	10
3	short-term loading	± 6	6mm/sec (0.25hz)	2,000
4	long-term loading	± 15	30mm/sec (0.5hz)	400

Fig. 6. Evaluation on Test Results of a Friction Damper.

후 1절점 회전형 마찰요소의 마찰재는 파손되지 않았고, 마찰재의 고른 마모형상으로 축력이 마찰요소 전체에 걸쳐 고르게 분포되었음을 확인할 수 있었다.

4.2 진폭의존성

4.2.1 1R-60실험체

가력진폭 3 mm, 4.5 mm의 경우 첫 슬립에 의한 정지마찰력은 가력진폭 6 mm이후 평균마찰력보다 큰 값을 보인다. 가력변위별 평균마찰력은 평균의 -7%~8% 오차범위 내에서 발생하기 때문에 진폭의존성이 크지 않다고 판단된다(Table 3). 댐퍼적정성 판단시 오차값이 평균의 15%이내가 되도록 하는

ASCE 7(2010)를 의존성 판단근거로 사용하였다. 또한 마찰계수는 평균마찰력과 유사한 경향을 보이며, 평균마찰계수는 0.399로 나타났다. 회귀분석결과 에너지소산량은 가력변위에 선형으로 증가함을 보였다. 도입축력은 초기 도입력 59.7 kN에서 최종가력까지 2.2 kN이 손실되었으나, 에너지소산량이나 평균마찰력에 큰 영향을 주지 않았다(Fig. 7(a)). 평균마찰력, 마찰계수, 소산에너지 및 도입축력을 토대로 살펴본 결과 1R-60실험체는 진폭의존성이 없다고 판단되었다.

4.2.2 1R-120실험체

Table 4의 가력변위별 평가항목에 대한 오차가 15%이내에 있기 때문에 진폭의존성이 크지 않다고 판단된다. 마찰계수는 평균마찰력과 유사한 경향을 보이며, 평균마찰계수는 0.300으로 나타났다. 실험종료시 도입축력은 초기 도입력 120 kN에서 약 10 kN이 손실되었으나, 안정화 이후 에너지소산량이나 평균마찰력에 큰 영향을 주지 않았다(Fig. 7(b)).

4.2.3 1R-165실험체

가력변위 3 mm에서는 세팅장치 유격 때문에 안정적인 거동이 발생하지 않아서 평균산정에서 제외하였다. 마찰력 발생이 가력변위별 평균마찰력은 평균의 -7%~4% 오차범위 내에서 발생하기 때문에 진폭의존성이 크지 않다고 판단된다(Table 5). 또한 마찰계수는 평균마찰력과 유사한 경향을 보이며, 평균마찰계수는 0.270으로 나타났다. 도입축력은 초기 도

Table 3. Summary on Displacement Amplitude Dependency Test of 1R-60 Specimen

	Average Friction Force(kN)		Friction Coeffint(μ)		Clamping Force(kN)		Dissipated Energy(kN·mm)
	value	deviation	value	deviation	value	deviation	
3mm	7.4	0.08	0.424	0.06	59.7	0.02	78
4.5mm	7.2	0.06	0.417	0.05	58.9	0.01	122
6mm	7.2	0.05	0.414	0.04	58.6	0.01	164
10mm	6.8	-0.01	0.396	-0.01	58.2	0.00	267
15mm	6.4	-0.07	0.376	-0.06	58.0	-0.01	382
20mm	6.4	-0.07	0.374	-0.06	57.7	-0.01	507
25mm	6.6	-0.04	0.386	-0.03	57.7	-0.01	655
30mm	6.8	0.00	0.402	0.01	57.5	-0.01	817
average	6.9		0.399		58.3

(a) 1R-60 specimen

(b) 1R-120 specimen

(c) 1R-165 specimen

Fig. 7. Effect of Displacement Amplitude.

Table 4. Summary on Displacement Amplitude Dependency Test of 1R-120 Specimen

	Average Friction Force(kN)		Friction Coeffint(μ)		Clamping Force(kN)		Dissipated Energy(kN·mm)
	value	deviation	value	deviation	value	deviation	
3mm	9.1	-0.06	0.278	-0.08	111.1	0.02	56
4.5mm	9.7	0.01	0.298	-0.01	110.4	0.01	121
6mm	10.0	0.03	0.307	0.02	109.8	0.01	186
10mm	9.8	0.01	0.303	0.01	109.2	0.00	346
15mm	9.3	-0.04	0.290	-0.03	108.8	0.00	523
20mm	9.4	-0.03	0.293	-0.02	108.5	-0.01	722
25mm	9.8	0.01	0.307	0.02	108.3	-0.01	948
30mm	10.4	0.08	0.326	0.09	108.1	-0.01	1205
average	9.7		0.300		109.3		

Table 5. Summary on Displacement Amplitude Dependency Test of 1R-165 Specimen

	Average Friction Force(kN)		Friction Coeffint(μ)		Clamping Force(kN)		Dissipated Energy(kN·mm)
	value	deviation	value	deviation	value	deviation	
4.5mm	11.2	-0.07	0.246	-0.09	152.8	0.01	93
6mm	12.1	0.01	0.268	-0.01	151.8	0.00	175
10mm	12.2	0.01	0.274	0.01	151.1	0.00	371
15mm	12.1	0.00	0.271	0.00	150.7	0.00	605
20mm	12.0	0.00	0.271	0.01	150.4	-0.01	843
25mm	12.2	0.02	0.276	0.02	150.0	-0.01	1098
30mm	12.5	0.04	0.283	0.05	149.3	-0.01	1367
average	12.0		0.270		151.4		

Table 6. Summary on Forcing Frequency Dependency Test of 1R-60 Specimen

	Average Friction Force(kN)		Friction Coeffint(μ)		Clamping Force(kN)		Dissipated Energy(kN·mm)	
	value	deviation	value	deviation	value	deviation	value	deviation
0.167hz	6.8	-0.10	0.395	-0.10	57.3	0.00	117	-0.06
0.250hz	7.2	-0.03	0.424	-0.03	57.4	0.00	121	-0.02
0.500hz	7.5	0.01	0.442	0.01	57.4	0.00	124	0.00
1.000hz	7.8	0.05	0.459	0.05	57.4	0.00	127	0.02
2.000hz	8.0	0.08	0.473	0.08	57.5	0.00	131	0.06
average	7.5		0.438		57.4		124	

입력 165 kN에서 약 15 kN이 손실되었으나, 안정화 이후 에너지소산량이나 평균마찰력에 큰 영향을 주지 않았다(Fig. 7(c)).

4.3 주파수의존성

주파수 의존성은 진폭의존성과 동일한 평가항목인 평균마찰력, 마찰계수, 도입축력, 소산에너지 측면에서 평가하였다. 가력진폭 4.5 mm에 대하여 0.167 hz에서 2.0 hz까지 정현파로 10회 반복가력하였다.

4.3.1 1R-60실험체

가력주파수가 커짐에 따라 평균마찰력이 약간 증가하지만

오차범위가 평균의 -10%~8%이기 때문에 주파수의존성이 크지 않다고 판단되며, 평균마찰계수는 0.438로 나타났다(Table 6, Fig. 8(a)). 동일 진폭으로 가력하였기 때문에 도입축력은 동일하며, 에너지소산량 또한 평균에서 최대 6% 차이가 발생하였다. 이상의 마찰댐퍼의 성능분석을 토대로 1R-60실험체는 주파수 의존성이 없다고 판단된다.

4.3.2 1R-120실험체

가력주파수가 커짐에 따라 평균마찰력이 약간 감소하지만 오차범위가 평균의 -2%~8%이기 때문에 주파수의존성은 크지 않다고 판단된다(Table 7, Fig. 8(b)). 또한 마찰계수는 평

Table 7. Summary on Forcing Frequency Dependency Test of 1R-120 Specimen

	Average Friction Force(kN)		Friction Coeffint(μ)		Clamping Force(kN)		Dissipated Energy(kN-mm)	
	value	deviation	value	deviation	value	deviation	value	deviation
0.167hz	11.1	0.08	0.377	0.08	100.1	0.00	123	0.03
0.250hz	10.8	0.05	0.361	0.04	99.9	0.00	120	0.01
0.500hz	10.0	-0.02	0.341	-0.02	99.6	0.00	113	-0.05
1.000hz	9.5	-0.08	0.324	-0.07	99.5	0.00	117	-0.02
2.000hz	10.1	-0.02	0.341	-0.02	99.4	0.00	123	0.03
average	10.3		0.349		99.7		119	

Table 8. Summary on Forcing Frequency Dependency Test of 1R-165 Specimen

	Average Friction Force(kN)		Friction Coeffint(μ)		Clamping Force(kN)		Dissipated Energy(kN-mm)	
	value	deviation	value	deviation	value	deviation	value	deviation
0.167hz	11.6	-0.02	0.266	-0.01	148.3	0.00	91	0.00
0.250hz	12.0	0.02	0.276	0.03	148.4	0.00	92	0.01
0.500hz	12.1	0.02	0.273	0.01	148.5	0.00	91	0.00
1.000hz	11.6	-0.02	0.262	-0.03	148.3	0.00	90	-0.01
average	11.8		0.269		148.4		91

(a) 1R-60 specimen

(b) 1R-120 specimen

(c) 1R-165 specimen

Fig. 8. Effect of Forcing Frequency.

균마찰력과 유사한 경향을 보이며, 평균마찰계수는 0.349로 나타났다. 동일 진폭으로 가력하였기 때문에 도입축력은 동일하며, 에너지소산량 또한 최대 5% 차이가 발생하였다.

4.3.3 1R-165실험체

2 hz가력시 데이터로거에 수집된 데이터 수가 적어서 완전한 이력곡선을 작성할 수 없었기 때문에 데이터 평균시 포함시키지 않았다. 평균마찰력은 오차범위가 평균의 -2%~2%로 나타났기 때문에 주파수의존성이 크지 않다고 판단된다 (Table 8, Fig. 8(c)). 또한 마찰계수는 평균마찰력과 유사한 경향을 보이며, 평균마찰계수는 0.269로 나타났다. 동일 진폭으로 가력하였기 때문에 도입축력은 차이는 없으며, 에너지소산량 또한 오차범위가 최대 1%로 나타나 거의 동일한 성능을 보였다.

4.4 축력의존성

축력의존성은 실험체별 진폭의존성 실험결과 중 4.5 mm부터 30 mm에 대한 값에 대하여 분석하였다. 분석결과 축력이

Fig. 9. Effect of Clamping Force.

증가하면 마찰계수는 감소하는 경향을 보인다(Fig 9). 회귀분석결과와 도입축력(N)과 마찰계수(μ) 관계는 Eq. (4)와 같이 2차식으로 표현된다.

$$\mu = 1 \times 10^{-5} N^2 - 0.0039N + 0.5801 \quad (4)$$

4.5 장기가력실험

1절점 회전형 마찰요소에 대한 장기가력실험 결과는 1R-60

실험체에 대하여 분석하였다.

4.5.1 소변형 저속반복가력

가력진폭 ± 6 mm, 가력진동수 0.25 Hz로 2,000회 가력하였다. 2,000회 가력 동안 마찰요소의 건전성을 평가하기 위하여 500회 간격으로 10회씩 이력을 추출하여 Table 9와 같이 분석하였다. 분석결과 도입축력은 평균 53.8 kN에 대하여 최대 2%의 편차를 보이며 일정하게 유지되고 있다(Fig 10). 또한 평균마찰력과 마찰계수도 최대 0.6%의 편차를 보였고, 이때 마찰계수는 0.554였다.

4.5.2 대변형 고속반복가력

지진시 거동을 모사하기 위하여, 가력진폭 ± 15 mm, 가력속도 30 mm/sec로, 400회 가력하였다(Table 10, Fig. 11). 이 때 실험의 처음과 끝 10회이력을 추출하여 분석하였다.

분석결과 평균도입축력 57.6 kN에 대하여 모든 값이 1% 미

만의 편차를 보이며 일정하게 유지되고 있음을 확인하였다(Fig. 12). 또한 평균마찰력과 마찰계수도 최대 0.6%의 범위 내에서 안정된 값을 보였고, 이때 평균마찰계수는 0.450였다.

Fig. 11. Effect of Long-term Cyclic Loading(400cycle).

Fig. 10. Effect of Long-term Cyclic Loading(2,000cycle).

Fig. 12. Effect of Long-term Cyclic Loading(400cycle).

Table 9. Long Term Cyclic Loading Tests Results of 1R-60 Specimen(loading velocity=6mm/sec)

	Average Friction Force(kN)		Friction Coeffint(μ)		Clamping Force(kN)		Dissipated Energy(kN·mm)	
	value	deviation	value	deviation	value	deviation	value	deviation
1~10	8.8	-0.003	0.554	-0.001	53.4	-0.008	193	0.003
501~510	8.9	0.006	0.553	-0.003	54.4	0.012	191	-0.011
1001~1010	8.9	0.002	0.553	-0.001	54.0	0.004	193	0.000
1501~1510	8.9	0.001	0.557	0.005	53.7	-0.002	193	0.004
1991~2000	8.8	-0.006	0.554	0.000	53.5	-0.007	193	0.004
average	8.8		0.554		53.8		193	

Table 10. Long Term Cyclic Loading Tests Results of 1R-60 Specimen(loading velocity=30mm/sec)

	Average Friction Force(kN)		Friction Coeffint(μ)		Clamping Force(kN)		Dissipated Energy(kN·mm)	
	value	deviation	value	deviation	value	deviation	value	deviation
1~10	7.7	-0.006	0.450	-0.002	57.5	0.003	456	0.004
391~400	7.7	0.006	0.450	0.002	57.8	0.003	452	0.004
average	7.7		0.450		57.6		454	

5. 결 론

본 논문에서는 혼합형 마찰댐퍼의 구성요소 중 하나인 1절점 회전형 마찰요소에 대한 구조성능평가를 위하여 의존성 실험을 수행하였고, 구조성능을 검증하였다.

- 1) 변위의존성 실험결과 1절점 회전형 마찰요소의 평균마찰계수는 실험체별로 각각 0.438(1R-60), 0.349(1R-120), 0.269(1R-165)를 나타내고 있으며, 동일한 축력이 도입된 실험체에 대한 변위의존성은 나타나지 않았다.
- 2) 변위의존성 실험결과를 보면 1절점 회전형 마찰요소의 마찰계수는 회전마찰절점에 도입되는 축력이 증가할수록 Eq. (4)와 같이 2차식으로 감소하는 경향을 보인다.
- 3) 가력주파수를 0.167 Hz에서 2 Hz까지 변화시켜 실험한 결과 모든 실험체에서 평균마찰력, 마찰계수, 도입축력 및 소산에너지는 평균대비 최대 10%이내의 오차를 보이고 있기 때문에 1절점 회전형 마찰요소는 주파수 의존성이 없다고 판단된다.
- 4) 풍하중을 고려한 소변위 저속가력(6 mm/sec, 2,000회)과 지진하중을 고려한 대변위 고속가력(30 mm/sec, 400회)으로 구분하여 장기가력에 대한 구조성능을 1R-60 실험체에서 평가하였다. 저속반복가력시 모든 평가항목 오차가 평균 대비 최대 1.2%를 나타내었다. 또한 고속반복가력시에도 실험종료까지 파손없이 모든 평가항목의 오차가 평균대비 0.6% 이내로 거동하였다. 이를 통하여 장기 거동에 대한 1절점 회전형 마찰요소의 안정적인 거동을 확인하였다.

References

- ASCE (2010) Minimum Design Loads for Buildings And Other Structures(ASCE/SEI 7-10), American Society of Civil Engineers.
- JSSI (2005) Passive Damper Design and Manual, Japan Society of Seismic Isolation.
- KATS (2008) Brake linings for Industrial Machine(KS L 5212), Korean Agency for Technology and Standard.
- Kim, D.H., Kim, J.Y., Ha, I.H., and Kim, D.Y. (2012) Evaluation on Structureal Response of Hybrid Damper, 2nd International Conference on Computational Design in Engineering, 93.
- Kim, M.H., Kim, D.H., Ju, Y.K., and Kim, S.D. (2013) Evaluation on the Serviceability of Tall Building using Hybrid Buckling-Restrained Braces, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 13, No. 4, pp. 31-38.
- Mualla, I.H. and Belev, B. (2002) Performance of steel frames with a new friction damper device under earthquake excitation, *Engineering Structures*, Vol. 24, No. 3, pp. 365-371.
- Oh S.H., Choi K.Y., Kim H.J. and Kim H.G. (2010) Earthquake Response Tests on The Core System with Friction Damper-Coupling Beam, *Proceedings of EESK conference*.
- Park, E.S. and Shoi, 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*, Vol. 28, No. 8, pp. 21-32.
- Rob J.S. and Michael R.W. (2007) The Damped Outrigger Concept for Tall Buildings, Rob J. Smith, *The structural Design of Tall and Special Buildings*, 16, pp. 501-517.
- Roh J.E. and Lee S.H. (2011) Performance Tests of Rotary Friction Damper for Seismic Retrofitting of Building Structures, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol. 27, No. 12, pp. 11-20.

Received	January 27, 2014
Revised	February 17, 2014
Accepted	March 10, 2014