

혼합형 마찰댐퍼 구조성능에 대한 실험적 연구

Experimental Study on the Structural Performance of Hybrid Friction Damper

김도현*
Kim, Do-Hyun

김지영**
Kim, Ji-Young

Abstract

Various hybrid dampers have been developed as increasing tall buildings in Korea. To minimize the installment space and cost, the new hybrid friction damper was developed using friction components. It is composed of two one-nodal rotary frictional components and a slotted bolted frictional connection. Because of these components, hybrid friction damper can be activated by building movements due to lateral forces such as a wind and earthquake. In this paper, displacement amplitude dependency tests were carried out to evaluate on the structural performance and the multi-slip mechanism of the hybrid damper. Test results show that the multi-slip mechanism is verified and friction coefficients are increasing as displacement amplitudes are increasing.

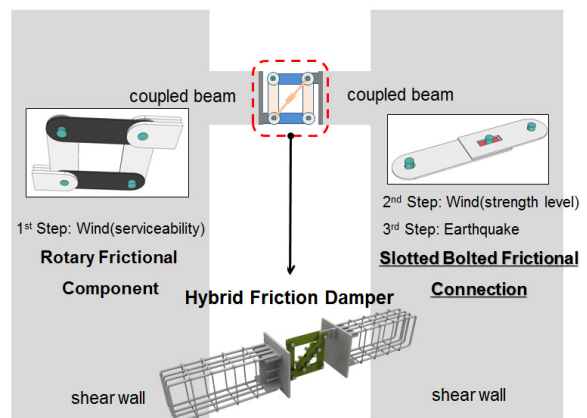
Keywords: Coupled beam, Friction damper, Cyclic loading test, Displacement amplitude dependency test

1. 서론

고층 건축물은 진동에 의하여 큰 영향을 받기 때문에 바람이나 지진 등 진동을 제어할 수 있는 제진 장치에 대한 관심이 국내에서도 증가되고 있다. 최근 제진장치 설치 수량 및 위치에 대한 최적화가 요구되어 하나의 제진장치로 바람이나 지진 발생시 모두 대응할 수 있는 다양한 형태의 복합댐퍼가 국내외에서 개발되고 있다.

내진성능이 우수한 비좌굴가새에 점탄성 댐퍼를 결합한 하이브리드 비좌굴가새¹⁾ 및 고층건물 아웃리거 트러스와 연결되는 외부기둥에 대응량의 점성댐퍼를 사용한 아웃리거 댐퍼가 있다.²⁾ 또한 건축계획상 간섭문제를 개선한 고감쇠 고무와 강재판을 사용한 연결보형 복합댐퍼도 있

다.³⁾ 앞서 제기된 문제점을 개선하고 경제성을 높이기 위하여 다단계 슬립 메커니즘을 이용하여 다양한 변위영역에 대응하면서 에너지를 소산할 수 있는 새로운 형태의 혼합형 마찰댐퍼 (Hybrid friction damper)를 개발하였다. 혼합형 마찰댐퍼는 <Fig. 1>과 같이 건축계획상 공간제한을 받지 않는 연결보 내에 설치하여 건축계획과의 간섭을 최소화 하였다.



<Fig. 1> Concept of hybrid friction damper

* 정회원, 경기과학기술대학교 조교수, 공학박사
Dept. of Architecture & Interior Design
Gyeonggi College of Science and Technology

** 교신저자, (주)대우건설 기술연구원 수석연구원, 공학박사
Technology Development Team, Daewoo Institute of Construction Technology, Daewoo E&C
Tel: 031-250-1163, Fax: 031-250-1132
E-mail: jjiyoung.kim@daewoenc.com

마찰댐퍼는 작동방법에 따라 볼트 슬립형 마찰댐퍼와 회전형 마찰댐퍼로 크게 구분할 수 있다. 볼트 슬립형 마찰댐퍼에 대한 연구로 Pall(1982)⁴⁾은 볼트 슬립을 이용한 직선형 마찰댐퍼를 철골조에 적용하는 연구를 수행하였다. 회전형 마찰댐퍼에 대하여 Mualla(2002)⁵⁾는 T형의 회전형 마찰댐퍼를 와이어를 이용하여 철골조의 내진성능을 향상시키는 연구를 수행하였다.

혼합형 마찰댐퍼의 1점 회전형 마찰요소에 대한 변위, 주파수, 축력, 장기하중 의존성을 실험적으로 평가하였다.⁶⁾ 또한 혼합형 마찰댐퍼의 슬롯형 마찰요소에 대하여도 의존성 실험을 수행하였다.⁷⁾ 실험결과 두 마찰요소는 변위가 증가할수록 마찰계수가 커지는 경향을 보이지만 변위의존성은 크지 않다고 판단되었다. 또한 주파수, 장기하중에 대해서는 의존성을 보이지 않았으나 축력이 증가할수록 마찰력은 2차식으로 저감함을 확인하였다.^{6),7)}

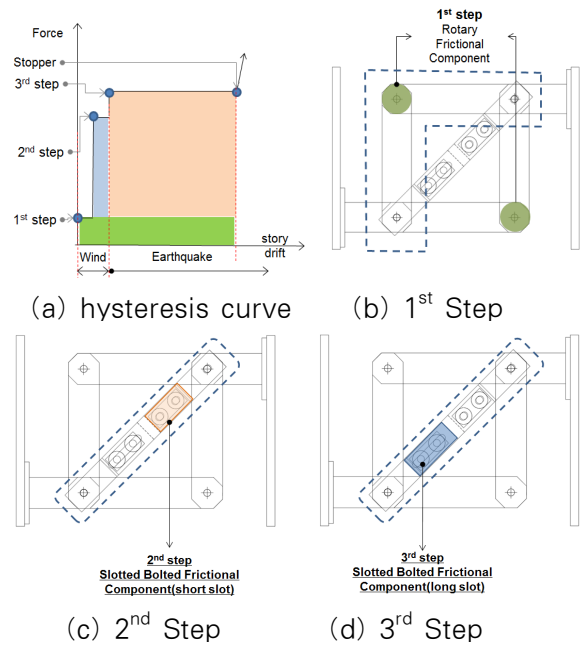
본 논문에서는 혼합형 마찰댐퍼를 구성하는 1점 회전형 마찰요소와 슬롯형 마찰요소에 대한 연구결과를 토대로, 혼합형 마찰댐퍼의 다단계 슬립 메커니즘과 구조성능을 평가하기 위하여 마찰요소들을 결합한 장치수준에서 변위 의존성실험을 수행하였다.

2. 혼합형 마찰댐퍼

2.1 다단계 슬립 메커니즘

혼합형 마찰댐퍼는 1절점 회전마찰요소 2개와 슬롯형 마찰요소 1개로 구성된다. 혼합형 마찰댐퍼의 다단계 슬립 메커니즘은 핀-락(Pin-Lock) 시스템을 이용한다. 슬롯형 마찰요소 단부 힌지 지점에 형성된 슬롯홀 구간에서는 1절점 회전마찰요소만 작동하고, 슬롯홀 구간에 도달하는 순간 슬롯형 마찰요소가 함께 누적되어 작동하는 다단계 슬립이 발생한다. 이 메커니즘을 구현하기 위해서 회전형 마찰요소의 경우 슬롯형 댐퍼와 접합하는 부분은 마찰재가 없는 핀절점이며, 회전 절점부에만 마찰재가 설치되어 슬롯형과

관계없이 초기단계부터 작동한다. 또한 슬롯형 마찰요소의 경우 단슬롯과 장슬롯의 축력 편차를 이용하여 슬롯형 마찰요소 내에서 다단계 슬립이 가능하다. 따라서 혼합형 마찰댐퍼는 <Fig. 2>와 같이 1단계 회전마찰요소, 2단계 슬롯형 댐퍼 내 단슬롯 요소 그리고 3단계 슬롯형 댐퍼 내 장슬롯 요소가 누적되어 거동한다.



<Fig. 2> Hybrid friction damper mechanism

2.2 내력산정식

혼합형 마찰댐퍼는 쿨롱감쇠(Columb damping)에 따라 볼트슬립형 마찰요소의 내력(F_s)은 마찰계수(μ), 도입축력(N)으로 Eq(1)과 같이 표현된다. 반면 회전형 마찰요소의 내력(F_r)은 마찰계수(μ), 도입축력(N), 유효반경(R_c)을 이용하여 Eq(2)와 같이 표현된다.

$$F_s = \mu \times N \tag{1}$$

$$F_r = \mu \times N \times R_c \tag{2}$$

혼합형 마찰댐퍼의 전체내력(V)은 1절점 회전마찰요소의 내력을 혼합형 마찰댐퍼 양단에 작용하는 전단력으로 환산한 후, 슬롯형 마찰요소

의 내력의 수직성분의 합으로 Eq(3)과 같이 산정한다. 이 때 1절점 회전마찰요소 간 수평거리(L)와 슬롯형 마찰요소의 기울기(θ)를 이용한다.

$$V = F_s \sin\theta + 2F_r / L \quad (3)$$

3. 실험계획

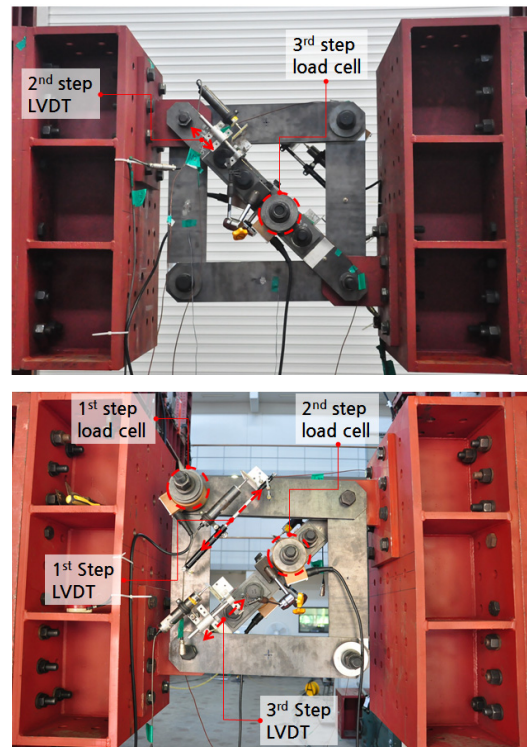
3.1 실험체 설계 및 계측계획

혼합형 마찰댐퍼의 1절점 회전형 마찰요소는 댐퍼에 작용하는 하중을 회전마찰력으로 에너지를 소산하고, 슬롯형 마찰요소는 연결보 대각방향으로 전달되는 하중을 슬롯의 마찰력으로 에너지를 소산시키는 개념이다. 혼합형 마찰댐퍼 구성요소의 변위의존성 실험을 통하여 검증된 구성요소를 조합하여 3단계 슬립이 가능한 혼합형 마찰댐퍼의 장치실험체를 설계하였다. 실험체는 <Fig. 3 (a)>와 같이 구성요소실험과 동일한 규격 및 재료를 이용하여 제작하였다.

회전형 마찰요소는 혼합형 복합댐퍼의 슬롯형 마찰요소 축방향으로 전달되는 하중을 회전모멘트로 변화하여 에너지를 소산시킨다. <Fig. 3 (b)>와 같이 두께 5mm의 마찰재를 외경 120mm, 내경 30mm로 제작하여 2장을 삽입하였고, 회전절점부에 110kN의 축력을 도입하였다.

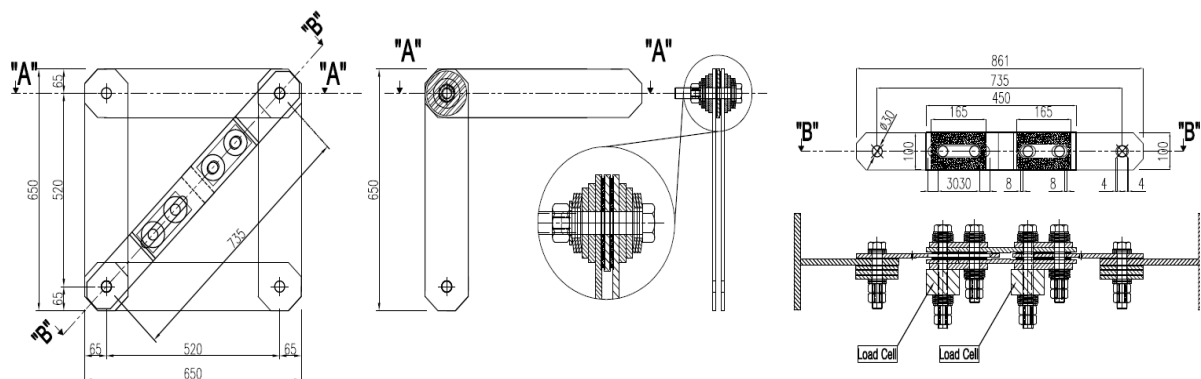
슬롯형 마찰요소는 장슬롯과 단슬롯의 축력차로 다단계 슬립 메커니즘을 형성하기 때문에 장슬롯과 단슬롯에 각각 60kN, 120kN을 도입하였

다. <Fig. 3 (c)>와 같이 두께 5mm의 마찰재를 직사각형으로 단슬롯패드(165mm×100mm)와 장슬롯패드(165mm×130mm)로 제작하였다. 마찰패드와 결합되는 강재는 SS400을 사용하였고, 1절점 회전형 마찰요소와 연결되는 슬롯형 마찰요소의 한쪽 단부에 8mm 슬롯을 제작하였다. 단부 슬롯은 1절점 회전요소가 1단계 슬립영역에서 단독으로 작동하기 위한 필요한 기구이다.



<Fig. 4> Measurement setting

혼합형 마찰댐퍼의 다단계 슬립 메커니즘을



(a) hybrid friction damper (b) rotary frictional component (c) slotted bolted friction component
<Fig. 3> Details of hybrid friction damper

검증하기 위하여 각 단계별 변형량을 측정하였다. 변형량 측정을 위하여 실험체 표면에 지점을 설치하고, 다양한 용량의 변위계(Linear Variable Differential Transformer, LVDT)로 <Fig. 4>와 같이 혼합형 마찰댐퍼 구성요소의 상대변위를 각각 계측하였다.

1단계 슬립은 강체로 거동하는 회전형 마찰요소의 플레이트 중간에서 <Fig. 4>와 같이 대각방향 변형량을 계측하였다. 또한 2, 3단계 슬립은 슬롯형 마찰요소 작동방향으로 변형량을 직접 측정하였다. 또한 다단계 슬립 메커니즘에서 도입 축력의 변화를 모니터링하기 위하여 각 단계별 구성요소마다 1개의 로드셀(Load cell)을 설치하였다.

3.2 실험체 세팅과 가력계획

혼합형 마찰댐퍼는 <Fig. 1>과 같이 연결보 중앙에 설치되어, 연결보 재축에 직각으로 작용하는 하중을 회전형 마찰요소와 슬롯형 마찰요소를 이용하여 에너지를 소산한다. 혼합형 마찰댐퍼의 작동메커니즘을 검증하기 위하여 실제 건축물과 동일한 거동조건을 구현하기 위하여 <Fig. 5>와 같이 세팅하였다. 혼합형 마찰댐퍼의 진폭의존성 실험은 1,000kN 정적액츄에이터와 <Table 1>의 가력프로그램을 이용하여 정현파로 가력하였다.

<Table 1> Loading Protocol

Displacement(mm)	Forcing speed	Cycle
±3,±4.5,±6,±10,±15, ±20,±25,±30,±35	2mm/sec	10

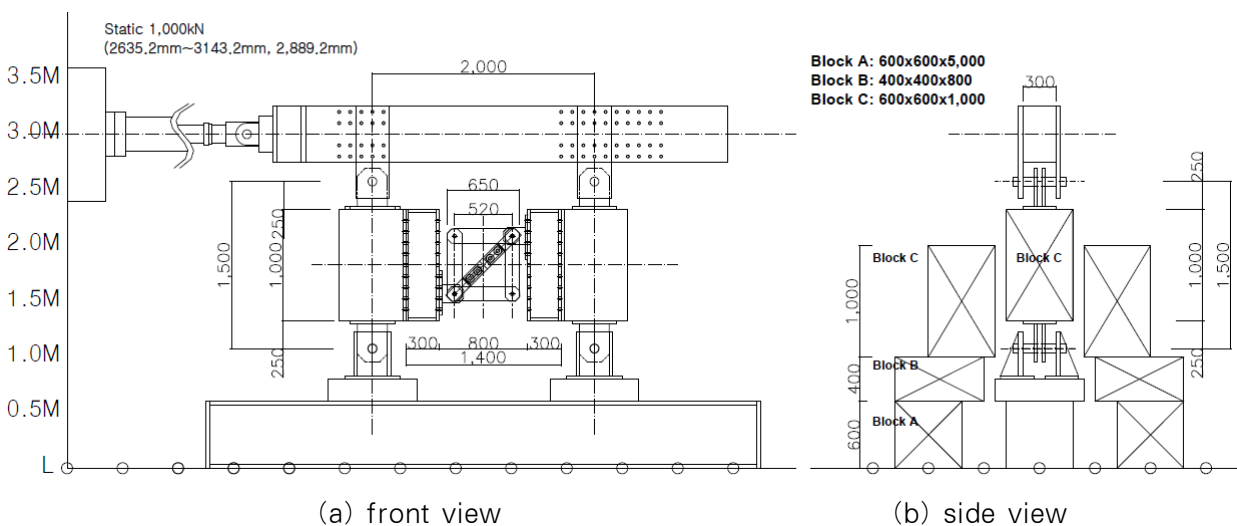
3.3 마찰재

실험에 사용된 마찰재는 마찰재질 분류상 비석면계인 케브라 섬유재질 복합체이며, 한국산업규격 KS L 5212⁸⁾에 따른 정속마찰계수는 0.4이다.

4. 실험결과 및 분석

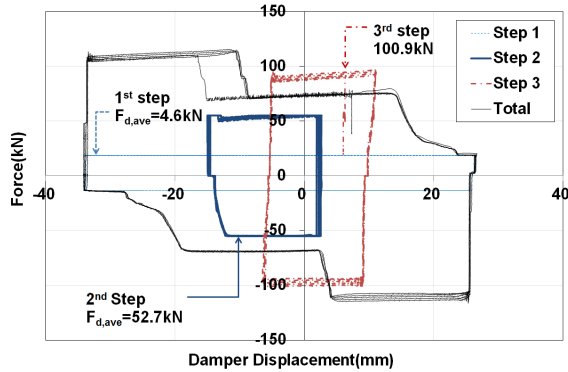
4.1 전체거동

장치실험의 목적은 단계별 혼합형 마찰댐퍼의 거동 확보를 통한 메커니즘 검증이다. <Fig. 6>의 혼합형 마찰댐퍼 이력곡선을 보면 각 단계별로 특정하중에서 슬립이 발생함을 확인할 수 있다. 1단계 회전마찰요소가 4.6kN에서 작동한 후 슬롯형 요소 한쪽 단부가 단부 슬롯홀에 닿으면 2단계 슬립이 시작되며, 이 때 발생하는 전체 마찰력은 2단계 마찰력 52.7kN과 1단계 마찰력의 합으로 발생한다. 2단계 작동이 발생한 후 미끄러짐이 발생하다가 구속철판(±8mm)에 닿아 2단계 슬립이 멈추면 3단계 슬립기구가 작동되며,

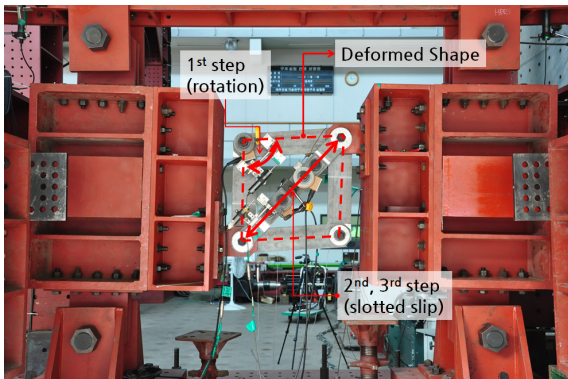


<Fig. 5> Experimental Setup

이 때 3단계 마찰력은 100.9kN이다. 이러한 혼합형 마찰댐퍼의 3단계 거동은 댐퍼 변형형상에서도 확인할 수 있다. 혼합형 마찰댐퍼는 초기에 정사각형 형상을 갖지만 슬립이 발생하면 <Fig. 7>과 같은 마름모 형상으로 변형된다.



<Fig. 6> Hysteresis loop of hybrid friction damper components at 35mm



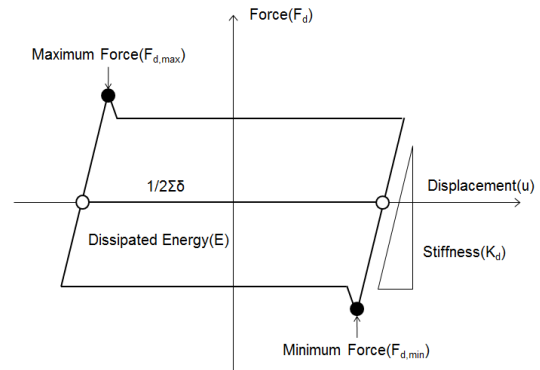
<Fig. 7> Hybrid damper behaviour at 35mm

4.2 진폭의존성

실험결과는 일본면진구조협회에서 발간한 제진구조매뉴얼⁹⁾에 따라 <Fig. 8>과 같이 평균마찰하중($F_{d,ave}$), 에너지흡수량(E)를 산정하여 평가하였다. 평균마찰하중은 Eq(4)를, 마찰계수는 Eq(5)에 따라 <Table 2>, <Table 3>과 같이 산정하였다. 가력진폭에 따른 각 단계별 이력곡선은 <Fig. 9>와 같다.

$$F_{d,ave} = E / \sum \delta \quad (4)$$

$$\mu = F_{d,ave} / N \quad (5)$$



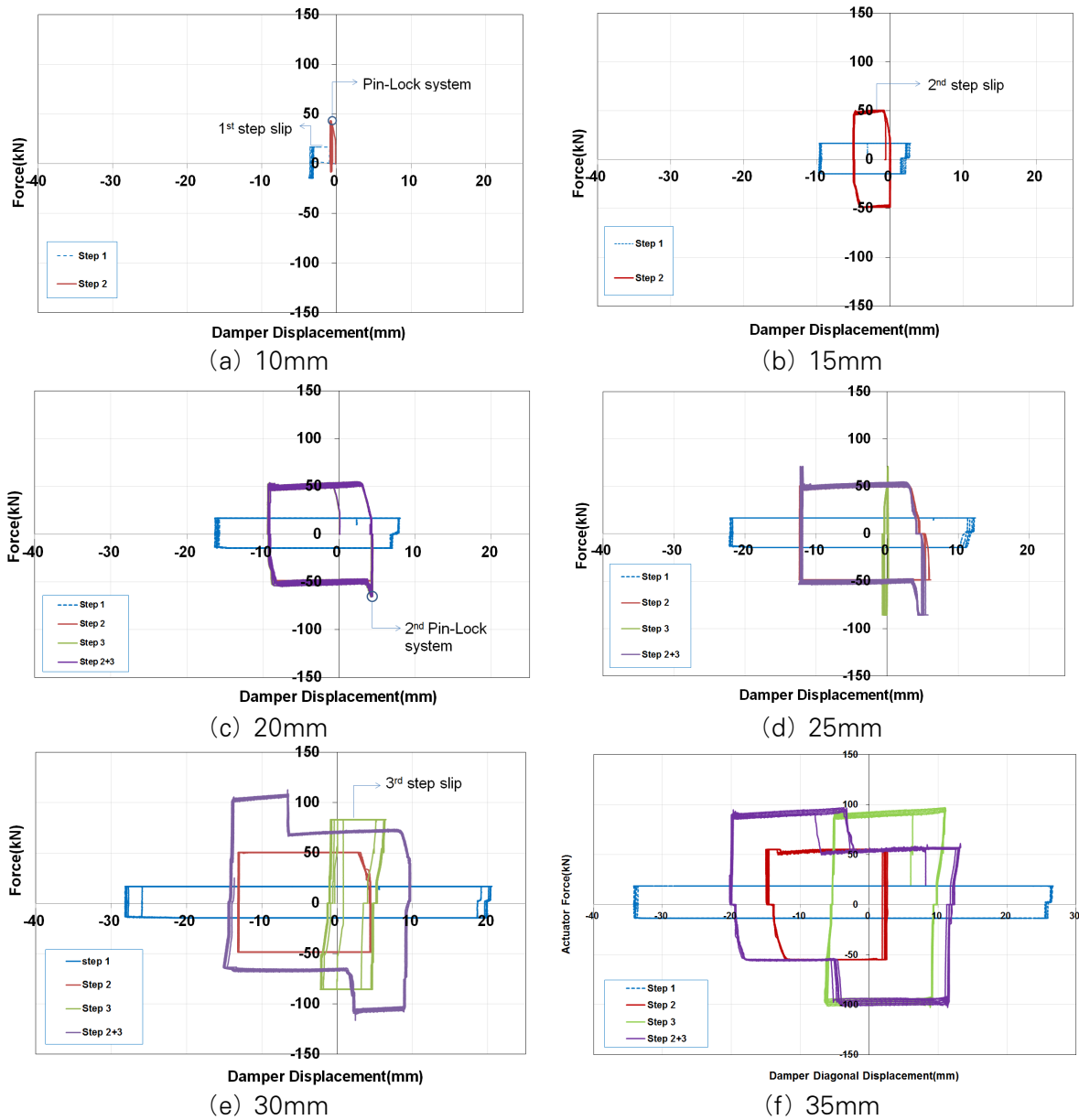
<Fig. 8> Evaluation method

4.2.1 1단계 슬립(회전형 마찰요소)

혼합형 마찰댐퍼의 1단계 슬립은 <Fig. 9 (a)>와 같이 가력진폭 10mm부터 발생한다. 실험결과는 안정적인 슬립이 발생하는 15mm부터 분석하였다.

회전형 마찰요소 실험결과에 따르면 도입축력이 120kN인 경우 마찰계수는 평균값 대비 -8%~9%의 편차를 보이며, 평균마찰계수는 0.3으로 나타났다.⁶⁾ 반면 혼합형 마찰댐퍼 내 회전형 마찰요소의 마찰계수는 <Table 2>와 같이 전체 평균값 대비 -24%~17%의 편차가 발생하였고, 가력진폭과 비례하여 평균마찰력 및 마찰계수가 증가하는 변위의존성을 보이고 있다.

마찰계수는 평균마찰력과 유사한 경향을 보이며, 평균마찰계수는 0.239이며, 기존 요소실험의 평균 마찰계수 0.30의 80%에 해당된다. 에너지 소산량은 회귀분석결과 가력변위에 선형 증가함을 보인다. 도입축력은 초기 도입력 117.0kN에서 최종가력까지 5.1kN이 손실되었으나, 에너지 소산량이나 평균마찰력에 큰 영향을 주지 않는다.



〈Fig. 9〉 Hysteresis loop of components according to displacement amplitude

〈Table 2〉 Test results for 1st step friction component

	Average friction force		Friction coefficient(μ)		Clamping force		Dissipated energy(kN-m)
	value(kN)	deviation	value	deviation	value(kN)	deviation	
3mm							
4.5mm							
6mm							
10mm	0.3	-0.93	0.010	-0.96	117.0	0.02	0.04
15mm	3.6	-0.20	0.181	-0.24	117.0	0.02	0.70
20mm	4.4	-0.02	0.227	-0.05	114.8	0.00	1.99
25mm	4.6	0.01	0.244	0.03	113.4	-0.01	2.66
30mm	4.8	0.05	0.258	0.08	112.5	-0.02	3.64
35mm	5.2	0.16	0.279	0.17	111.9	-0.02	4.94
average	4.5		0.239		114.4		

〈Table 3〉 Test results for 2nd and 3rd step friction component

	2 nd Step(short slot)					3 rd Step(long slot)				
	Average friction force(kN)	Friction coefficient(μ)		Clamping force (kN)	Dissipated energy (kN-m)	Average friction force(kN)	Friction coefficient(μ)		Clamping force (kN)	Dissipated energy (kN-m)
		value	deviation				value	deviation		
3mm										
4.5mm										
6mm										
10mm	16.3	0.071		57.6	6					
15mm	49.6	0.216	-0.111	57.5	498					
20mm	51.3	0.223	-0.082	57.4	1,412					
25mm	47.1	0.237	-0.025	49.6	1,659					
30mm	48.6	0.256	0.053	47.4	1,710	119.1	0.259	0.083	114.8	1,110
35mm	52.7	0.283	0.165	46.6	1,811	100.9	0.240	-0.083	114.7	2,879
average	49.9	0.243		52.7		110.0	0.250		114.8	

4.2.2 2단계 슬립(슬롯형 마찰요소-단슬롯)

혼합형 마찰댐퍼의 2단계 슬립은 슬롯형 마찰 요소의 단슬롯에서 발생한다. 가력진폭 10mm에서 마찰댐퍼 단부 슬롯홀에 핀-락이 작용하며 마찰력이 증가하기 시작한다<Fig. 9 (a)>. 2단계 슬립은 15mm부터 안정적으로 작동한다<Fig. 9 (b)>.

슬롯형 마찰요소 실험결과에 따르면 단슬롯 도입축력이 60kN인 경우 단슬롯 마찰계수는 평균값 대비 -7.2%~10.3%의 편차를 보이며, 평균 마찰계수는 0.29로 나타났다.⁷⁾ 혼합형 마찰댐퍼의 단슬롯 마찰계수 평균값은 0.243이며, 기존 요소실험의 평균 마찰계수 0.290의 84%에 해당된다. 마찰계수는 <Table 3>과 같이 평균값 대비 -11.1%~16.4%의 편차가 발생하였고, 진폭과 비례하여 마찰계수가 증가하는 변위의존성을 보이고 있다.

4.2.3 3단계 슬립(슬롯형 마찰요소-장슬롯)

혼합형 마찰댐퍼의 3단계 슬립은 슬롯형 마찰 요소의 장슬롯에서 발생한다. <Fig. 9 (c)>와 같이 가력진폭 20mm에서 단슬롯에 핀-락 시스템이 작용하며 마찰력이 증가하기 시작하여, <Fig. 9 (e)>와 같이 30mm부터 안정적으로 작동한다. 혼합형 마찰댐퍼의 장슬롯 마찰계수 평균값은 0.250이며, <Table 3>과 같이 평균값 대비 -8.3%~8.3% 오차범위 내에서 마찰계수를 갖는다.

5. 결론

본 논문에서는 혼합형 마찰댐퍼의 다단계 슬립 메커니즘 검증과 변위의존성을 평가하기 위하여 실험을 수행하였고, 실험결과를 통하여 다음 결론을 도출하였다. 향후 혼합형 마찰댐퍼에 대한 보다 상세한 거동평가를 위한 해석연구에 본 논문의 실험결과를 활용할 계획이다.

(1) 혼합형 마찰댐퍼의 다단계 슬립 메커니즘은 세 단계로 구성되며, 각 단계별 슬립은 특정 마찰력(1단계=4.5kN, 2단계=49.9kN, 3단계=110 kN)에서 순차적으로 발생함을 확인할 수 있다. 또한 기존 요소실험으로 검증된 슬롯형 마찰 요소의 다단계 슬립 메커니즘은 1절점 회전형 마찰요소와 핀-락(Pin-Lock) 시스템으로 결합되어 혼합형 마찰댐퍼에서 안정적으로 작동하였다.

(2) 혼합형 마찰댐퍼의 1단계 슬립이 발생하는 회전형 마찰요소는 가력진폭 10mm부터 작동하며, 변위가 커짐에 따라 평균마찰력 및 마찰계수가 증가하는 변위의존성을 보였다. 평균 마찰계수는 0.239이며, 기존 회전형 마찰요소실험 대비 20% 감소하였다. 또한 변위가 커짐에 따라 평균 마찰력 및 마찰계수가 증가하는 변위의존성을 보였다.

(3) 혼합형 마찰댐퍼의 슬롯형 마찰요소는 단슬롯(15mm)과 장슬롯(30mm)에서 순차적으로 작동하며 다단계 슬립이 형성되었다. 슬롯형 마찰요소의 평균마찰계수로 단슬롯(0.243)과 장슬롯(0.250)이 유사하며, 단슬롯 평균마찰계수는 기존 요소실험 대비 16% 감소하였다. 회전형 마찰요소와 유사한 변위의존성이 나타났다.

References

1. D.H. Kim and Y.S. Kim, "Analytical Estimation on the Seismic Performance of Hybrid Buckling-Restrained Braces", Journal of the Korean Association for Spatial Structures, Vol. 14, No.3, pp.57~64, 2014.
 2. Rob J. S. and Michael R. W., "The Damped Outrigger Concept for Tall Buildings", Struct. Design Tall Spec. Build. , Vol. 16, pp.501-517, 2007.
 3. D.H. Kim, J.Y. Kim, I.H. Ha and D.Y. Kim, "Evaluation on Structural Response of Hybrid Damper", 2nd International Conference on Computational Design in Engineering, p. 93, 2012.
 4. A.S. Pall and C. Marsh, "Response of friction damped braced frames", Journal of Structural Divison, ASCE, Vol 108, No 6, pp.1313-1323, 1982.
 5. I.H. Mualla and B. Belev, "Performance of steel frames with a new friction damper device under earthquake excitation", Engineering Structures, Vol.24, No.3, pp. 365~371, 2002.
 6. D.H. Kim, "Evaluation on Structural Performance of Hybrid Friction Damper Components I: One-nodal Rotary Frictional Component, Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, Vol.14, No.2, pp. 43-50, 2014.
 7. D.H. Kim, J.Y. Kim, K.H. Lee, S.H. Hwnag and K.H. Baek, "Evaluation on Structural Performance of Hybrid Friction Damper Components II: a Slotted Bolted Frictional Connection", Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, Vol.14, No.5, pp.1~8, 2014.
 8. KATS, Brake linings for Industrial Machine(KS L 5212), Korean Agency for Technology and Standard, 2008.
 9. JSSI, Passive Damper Design and Manual, Japan Society of Seismic Isolation, 2005.
- Received : August 28, 2015
 - Revised : September 08, 2015
 - Accepted : September 08, 2015