

# 마찰 저항형 면진장치의 이력 및 복원특성에 관한 실험적 연구

오상훈<sup>1</sup> · 한석민<sup>2\*</sup><sup>1</sup>교수, 부산대학교, 건축공학과, <sup>2</sup>석사과정, 부산대학교, 건축공학과

## Experimental Study on the Hysteretic and Restoring Force Characteristics of Friction Resistance Type Isolation Devices

Oh, Sang Hoon<sup>1</sup>, Han, Seok Min<sup>2\*</sup><sup>1</sup>Professor, Dept. of Architecture Engineering, Pusan University, Busan, 46241, Korea<sup>2</sup>Graduate student, Dept. of Architecture Engineering, Pusan University, Busan, 46241, Korea

**Abstract** - This study experimentally investigated the hysteresis characteristics and restoring force properties of inclined seismic isolation devices. The analysis was conducted on both cone-type and sloped linear isolation devices, depending on the contact method, categorized as line contact and surface contact. For the cone-type isolation device, line contact behavior caused stress concentration along the generatrix, leading to unstable hysteresis characteristics. In contrast, the sloped linear isolation device demonstrated stable hysteresis behavior and was capable of bearing compressive loads 5 to 10 times greater than those of the conical type. Additionally, specimens with inclination angles exceeding 5 degrees exhibited self-centering restoring force properties in the inclined surface isolation device.

**Keywords** - Slope, Restoring force properties, Coefficient of friction, Self-centering

### 1. 서론

내진설계는 지진에 대응하여 구조물을 견뎌낼 수 있도록 설계하여 인명피해나 재산 피해를 최소화 시킬 수 있다. 내진설계의 원리에는 내진, 제진, 면진 구조가 있으며 내진 구조는 지진에 의해 발생하는 관성력에 대하여 건축물 자체의 내력으로 저항하는 강(剛)하게 설계하는 원리이다. 부재의 강성을 높이거나 단면이 크게 하여 지진에 대응함으로써 경제적이지만 주요 부재 손상 발생 시 교체가 불가피하여 장기적으로는 경제적이지 않을 수 있다<sup>[1]</sup>. 제진 구조는 건축물의 진동을 감쇠시키는 원리로써 특수한 댐퍼의 설치를 통해 에너지를 흡수 및 소산시켜 진동을 제어한다. 댐퍼의 교체만으

로 주요 부재를 재사용 할 수 있다. 면진 구조는 지진 발생 시 면진층에서 에너지를 흡수하고 상부 구조물과 분리하여 상부 구조물에 지진에너지의 전달을 줄여 장주기화 시킨다. 상부 구조물은 기본적으로 탄성 거동을 하며 앞선 두 원리보다 초기 비용은 높지만 장기적으로 경제적이다<sup>[2]</sup>. 에너지 입력 및 흡수 과정이 가장 단순한 구조이며 응답 예측에 관련되는 불확정성이 적다. 상부 구조물의 비구조요소의 손상 또한 막을 수 있다는 점에서 향후 중요도가 높은 공공 건축물, 병원, 산업 시설등에 대대적으로 도입될 수 있는 가능성을 지닌다<sup>[3]</sup>.

면진 구조의 면진장치의 종류로 고무 계열의 면진장치와 금속 계열의 마찰 저항형으로 구분할 수 있다<sup>[4],[5]</sup>. 마찰 저항형 면진장치는 면진층에 흡수되는 에너지를 금속재와 낮은 마찰계수의 마찰재가 맞닿고 있는 장치의 수평 변위로 인해 발생하는 마찰력을 통해 에너지를 소산 시킨다. 설계 변위를 조절 가능하고 목표 수평 변위에 따라 설계가 가능하며, 복원 특성이 기하학적 형상에 따라 상이하게 나타난다. 선행연구<sup>[6],[7]</sup>에서는 기존의 마찰 저항형 면진장치인 마찰 진자형 면진장치(FPS)의 특정한 곡률로 발생하는 고유주기, 복원 특성

Note.-Discussion open until August 31, 2025. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on December 23, 2024; revised on February 3, 2025; approved on February 3, 2025.

Copyright © 2025 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

Tel. +82-51-510-7608 Fax. +82-51-514-2230

E-mail. [tjrals1324@naver.com](mailto:tjrals1324@naver.com)

에 따른 잔류변형의 한계를 지적하며, 원뿔면,경사면을 마찰면으로 가지는 장치를 제안하였고, 성능검증을 하였다. 본 연구에서는 그 형상을 참고하여 경사형 면진장치인 원뿔형(Cone-type Friction Isolator), 경사면형(XY-Sloped Linear Isolator)을 제안하고, 성능 실험을 통해 원뿔형과 경사면형 면진장치의 마찰재, 경사각, 접합 방식에 따른 이력특성 및 복원 특성을 비교하고자 한다.

## 2. 마찰 저항형 면진장치

### 2.1 기존의 마찰 저항형 면진장치

마찰 진자형 면진장치(Friction Pendulum System, FPS)는 일정한 곡률 반경을 가지는 마찰면에 슬라이더의 진자 운동을 인해 에너지를 소산시키는 장치이다<sup>[8]</sup>. 곡률이 다른 두 개의 마찰판과 마찰면 사이를 연결하는 슬라이더로 구성되며, 장치의 하부 마찰면이 수평 변위를 수용하며, 상부의 마찰면은 수평 변위 발생 시 상부 판의 기울어짐 및 회전에 대한 자유도를 부여한다.

Fig. 1은 곡률의 마찰면을 가진 FPS의 2차원 단면을 나타냈으며, 장치의 수평 변위 발생 시 경사각( $\theta$ )와 수평, 수직 방향에 대한 힘의 평형을 고려하여 생기는 수평력을 식 (1)로 근사화 할 수 있다<sup>[9]</sup>. 수평력은 복원력, 마찰력으로 구성되며, 복원력은 곡률 반경과 압축하중에 의해 발생하고, 마찰계수가 마찰력을 결정한다.

FPS의 고유주기를 식 (2)로 나타낼 수 있다. 곡률 반경에 따라 고유주기가 결정되며<sup>[10]</sup> 상부 구조물의 질량과는 관련이 없기 때문에 비교적 간단한 식을 통해 설계 변위 및 수직하중 지지 능력을 계산할 수 있어 현재 교량 받침 및 흔히 사용되고 있는 장치이다. 하지만 특정한 고유주기로 인해 동일한 주기의 지진동 발생의 경

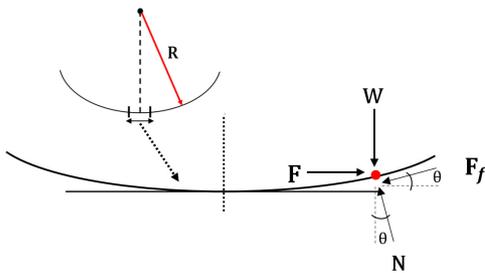


Fig. 1. FPS free body diagram

우 공진현상이 발생할 우려가 있고, 이로 인해 과도한 변위를 유발할 수 있다. 그에 따라 장치의 크기가 커질 수 있고 제조 비용과 설치의 복잡성을 증가시킨다. 또한  $\theta$ 가 작고, 작은 변위 발생 시 복원력은 거의 없고 마찰력에만 의존하는 장치의 복원력 특성에서의 한계를 지닌다<sup>[11]</sup>. 이에 따라 장치의 잔류변형이 남게 되며, 추가적인 보수비용이 발생하게 된다.

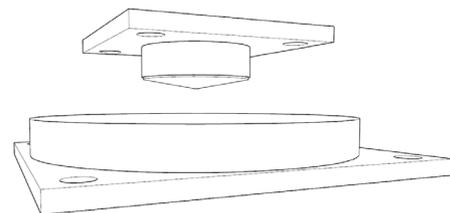
$$F = F_r + F_f \approx \frac{W}{R}u + \mu W \text{sgn}(\dot{u}) \quad (1)$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} \quad (2)$$

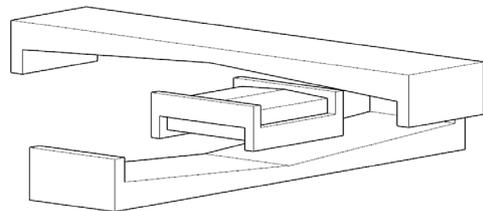
여기서,  $F$  (kN) = 수평력  
 $F_r$  (kN) = 복원력  
 $F_f$  (kN) = 마찰력  
 $W$  (kN) = 압축하중  
 $R$  = 곡률반경  
 $T$  (sec) = 고유주기

### 2.2 경사형 면진장치

기존의 마찰 저항형 면진장치의 문제점들을 보완하기 위해 두 가지 형상의 경사형 면진 장치를 제안하였다. Fig. 2에서 원뿔형, 경사면형 면진장치의 기하학적 형상을 나타냈다. 두 장치의 경우 2차원 단면은 경사형으로 동일하며, Fig. 3에 나타내었다. 경사형 면진장치의 수평력은 식 (3)로 나타낼 수 있다<sup>[12]</sup>. 복원력은 경사각에 의



(a) CFI (Cone-type-friction isolator)



(b) XY-SLI (XY-Sloped Linear Isolator)

Fig. 2. Sloped isolation system

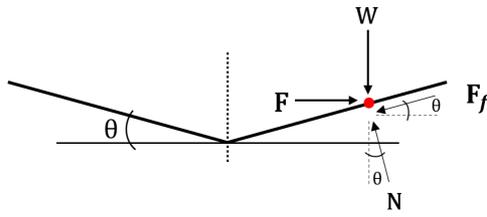
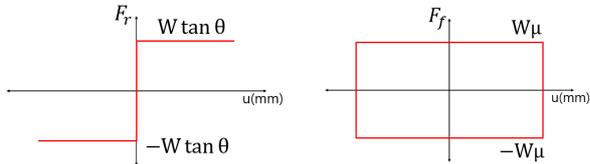
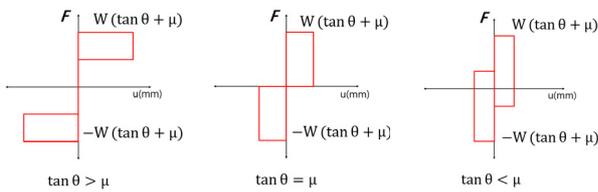


Fig. 3. Free body diagram



(a) Restoration force and friction force



(b) Restoration characteristics

Fig. 4. Hysteresis properties

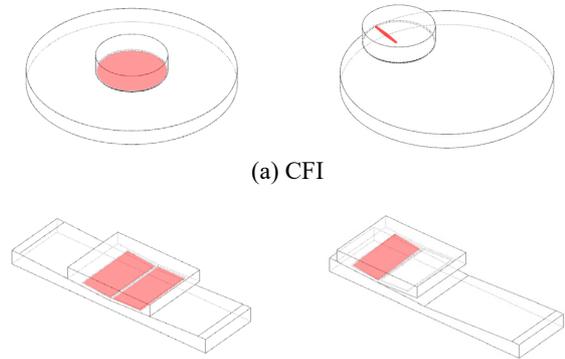
해 결정되며 마찰력은 마찰계수에 의해 결정된다.

Fig. 4(a)에서 복원력은 비선형적인 특성을 가지며, 이는

$$F = F_r + F_f \approx W \tan \theta + \mu W \operatorname{sgn}(\dot{u}) \quad (3)$$

여기서,  $F$  (kN) = 수평력  
 $F_r$  (kN) = 복원력  
 $F_f$  (kN) = 마찰력  
 $W$  (kN) = 압축하중  
 $\mu$  = 마찰계수  
 $\theta$  = 경사각

FPS의 일정한 곡률 반경으로 인해 선형적으로 복원하며 생기는 특정한 고유주기를 가지는 문제와 달리 원점을 중심으로 꺾이는 비선형 구간이 발생하기 때문에 일정한 고유주기를 산정하지 못한다<sup>[13]</sup>. 마찰력의 경우 FPS와 동일하게 마찰계수와 압축하중에 의해 이력이 나타난다. Fig. 4(b)는 경사각과 마찰계수의 관계에 따라 상이한 복원력 특성을 나타내었다. 경사각이 마찰계수보다 작거나 같을 때는 스스로 회귀하는 능력이 상실하게 되며, 잔류변형이 남게 될 가능성이 생기지만 경



(a) CFI

(b) XY-SLI

Fig. 5. Contact types

사각이 마찰계수보다 클 경우에는 셀프-센터링 능력을 보유하게 된다. 그에 따라 잔류변형의 문제점을 보완할 수 있다. 즉, 경사각과 마찰계수의 조정을 통해 원하는 이력을 결정할 수 있게 된다.

원뿔형, 경사면형 면진장치의 이론적인 장치의 거동 방식은 동일하지만 수평 변위 발생 시 상부의 마찰재와 하부의 마찰판의 접합하는 방식이 다르다. Fig. 5에는 두 장치의 접합 방식을 나타냈다. 원뿔형의 경우 장치가 원점에 있을 때 마찰재와 마찰판의 전체의 면이 서로 접합하고 있지만 수평 변위 발생 시 원뿔의 모선으로 접합하며 거동하게 된다. 경사면형의 경우, 수평 변위 발생 시 양쪽의 면 중 한쪽의 면이 접합하며 거동하게 된다. 이에 따라 선 접합, 면 접합으로 구분할 수 있다.

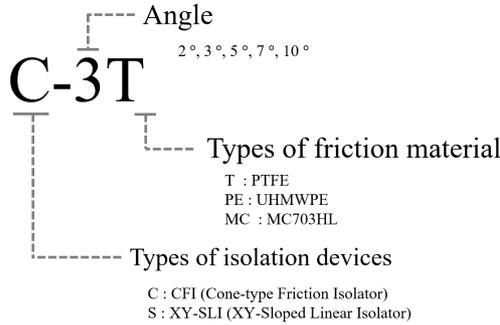
### 3. 성능실험

#### 3.1 실험체

실험체 정보를 Table 1에 나타내었고, 실험체명을 Fig. 6에 나타내었다. 원뿔형 면진장치(CFI)는 2°, 3°, 5°, 7°의 각도로 변수를 두고 마찰재는 PTFE(Polytetrafluoroethylene)를 사용하였고, 3°의 경우 UHMWPE(Ultra high molecular weightpolyethylene) 마찰재를 추가하여 재료에 대한 변수를 두어 총 5개의 실험체로 구성된다. 경사면형 면진장치(XY-SLI)는 3°, 5°, 7°, 10°의 각도로 구성하며, 3°의 경우 PA(Polyamide) 계열의 MC703HL, 5°, 7°, 10°은 PTFE 마찰재를 사용하여 4개의 실험체로 구성된다. 하부 마찰판을 부식방지 및 낮은 표면 조도를 위해 STS304를 사용하였다. XY-SLI의 기존 형상은 하부 마

**Table 1.** Experimental specimen information

Test subject	Angle, $\theta$	Friction material	
CFI	C-2T	2°	PTFE
	C-3T	3°	PTFE
	C-5T	5°	PTFE
	C-7T	7°	PTFE
	C-3PE	3°	UHMWPE
XY-SLI	S-3MC	3°	MC703HL
	S-5T	5°	PTFE
	S-7T	7°	PTFE
	S-10T	10°	PTFE

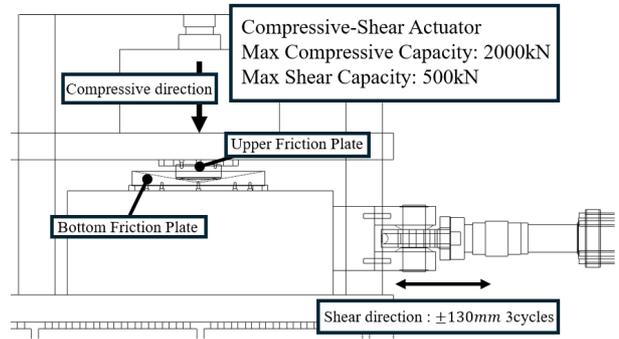


**Fig. 6.** Specimen ID

찰판과 중간 슬라이더의 양면의 마찰재, 상부 마찰판으로 직교형태로 겹쳐짐에 따라 X, Y 방향으로 2축 거동이 가능하도록 설계되었지만, 본 실험에서는 1축 형상만 구성하여 실험을 수행하였다.

### 3.2 실험세팅 및 실험계획

원뿔형, 경사면형 면진장치의 이력 및 복원 특성을 검증하기 위한 실험 세팅도를 Fig. 7에 나타내었다. 압축-전단 2축 방향으로의 동시 가력이 가능한 시험기를 통해 장치의 성능실험을 수행하였으며, 시험기의 용량은 최대 수직하중 2000 kN, 최대 수평하중 500 kN이다. 장치별로 설정된 압축하중을 가력 후, 정현파 형태로 ±130 mm 전단 방향으로 3cycles 가력하였다. 낮은 압축하중부터 높은 압축하중까지 점진적으로 하중을 증가시켜 마찰재의 변형 및 탈락을 시점으로 실험 종료 를 계획했다. CFI의 경우 수평 변위 발생 시 선 접촉을 고려해 초기하중을 30 kN으로 설정하고, XY-SLI의 경우 면 접촉에 따라 더 큰 수직 하중에 견딜 것을 고려하여 초기하중을 100 kN으로 설정하였다.

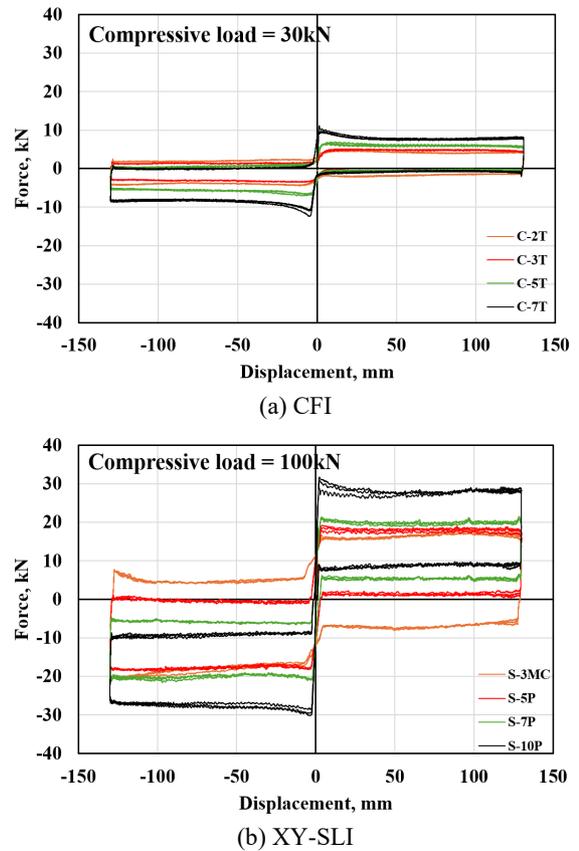


**Fig. 7.** Test setup

## 4. 실험결과

### 4.1 경사각에 따른 이력특성

Fig. 8은 원뿔형, 경사면형 면진장치의 경사각에 따른 이력특성을 나타내었다. 경사각에 따른 비교만을 위하여 동일한 마찰계수를 가진 마찰재의 마모전인 CFI, XY-SLI의 초기하중 30 kN, 100 kN에서의 이력을 나타냈다. 임계수평력  $F_s = |W(\tan\theta + \mu)|$ 은 경사각이 클수



**Fig. 8.** Hysteresis properties by inclination angle

록 커지며, 두 형상 모두 이를 만족하였다.

이력의 면적은 에너지 소산량을 의미하며, 마찰력에 의존한다. 동일한 마찰계수의 마찰재를 사용했음을 고려하면, 경사각과 관계없이 이력의 면적이 동일해야 하지만, CFI 실험체에서는 경사각에 따라 다소 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 이는 경사각이 증가함에 따라 마찰재에 가해지는 전단력이 증가하고, 수평 변위 발생 이후 접합 방식의 변화에 따라 불안정한 이력을 보여, 면적이 달라진 것으로 추정할 수 있다. 반면, XY-SLI은 면 접촉 거동으로 인해 면 전체가 압축 하중을 부담하여 비교적 일정한 면적을 가진다. CFI의 C-7T와 XY-SLI의 5° 이상의 실험체에서는  $\tan\theta > \mu$ 를 만족하며, 셀프-센터링 복원특성을 가짐을 확인하였다.

4.2 접합 방식에 따른 이력특성

수평 변위 발생 시 선 접합 거동을 하는 CFI와 면 접합 거동을 하는 XY-SLI의 접합 방식에 따른 이력특성만을 비교하기 위하여 동일한 마찰재, 동일한 각도를 가진 C-5T, S-5T 이력을 Fig. 9에 나타내었다. 초기 압축하중이 다름을 고려하여 이력의 Y축은 수평력에서 압축하중을 나누어  $\tan\theta + \mu \operatorname{sgn}(\dot{u})$ 으로 나타내었다. CFI의 이력에서 원점에서 수평 변위가 발생하는 시점에 힘이 증폭하는 현상이 발견되었다. 이는 수평 변위 이후 순간적인 접합방식 변화에 따라 과도한 응력이 모선을 중심으로 집중하여 원점 부근에서 하중이 증가한 것으로 판단된다. 또한 일정 변위 이후 일정한 임계수평력으로 수렴하게 된다. 반면, 경사면형 면진장치는 면 접합 거동에 따라 안정적인 이력을 나타냈다. 경사각과 마찰재가 동일한 두 실험체이지만 XY-SLI는

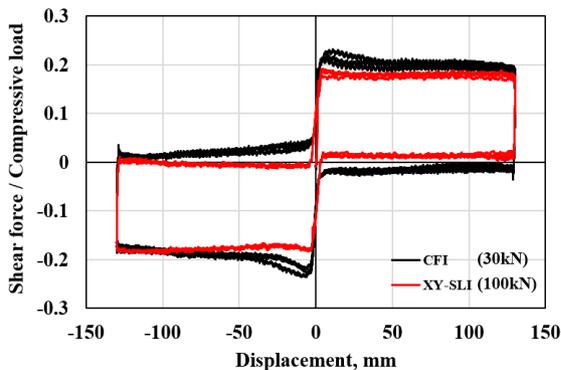
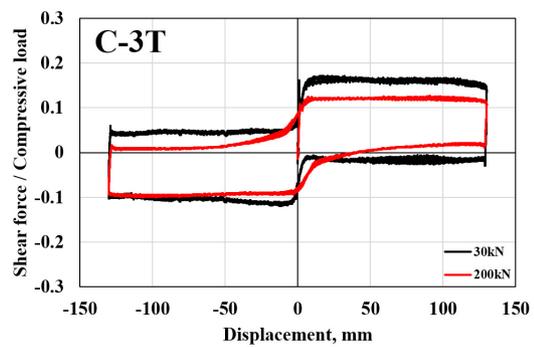


Fig. 9. Hysteresis properties by contact types

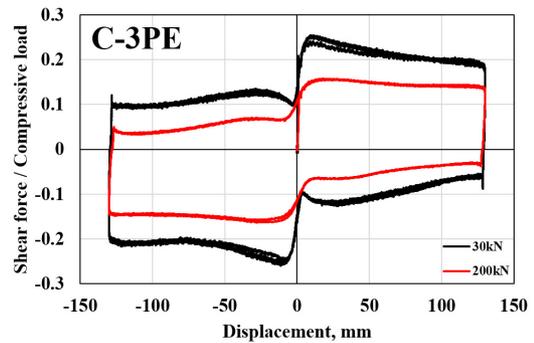
$\tan\theta > \mu$  관계에 따라 셀프-센터링 복원특성이 나타났으며, CFI는  $\tan\theta < \mu$ 의 복원특성이 나타났습니다.

Table 2. Friction material Characteristics

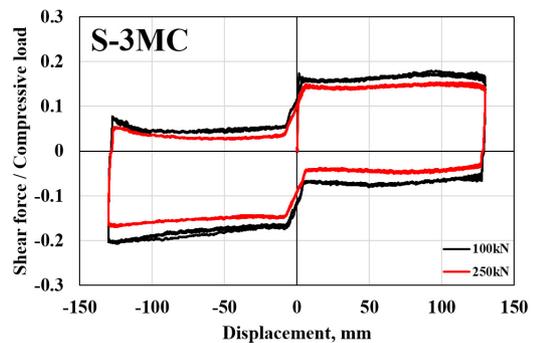
Friction Material	Compressive Strength (Mpa)	Tensile Strength (Mpa)	Elongation at Break (%)
PTFE	5~15	13~25	200
UHMWPE	20	49	400
MC703HL	75	66	19



(a) C-3T



(b) C-3PE



(c) S-3MC

Fig. 10. Hysteresis properties by friction material

### 4.3 마찰재에 따른 이력 특성

마찰재에 따른 재료적 특성을 Table 2에 나타내었으며, 세 마찰재 모두 접착성, 마찰계수가 낮고 내마모성이 뛰어나다는 특징이 있어 마찰재로 사용되는 재료이다. PTFE, UHMWPE, MC703HL을 사용한 실험체는 재료적 특성에 따라 각각 압축하중 200 kN, 400 kN, 1750 kN에서 실험이 종료되었다. UHMWPE가 PTFE보다 2배의 압축하중을 부담할 수 있음을 확인하였다. MC703HL의 경우 1750 kN에서 마찰재의 변형 및 마모가 크게 없었으며, 더 높은 압축하중을 견딜 것으로 사료되지만, 시험기의 용량을 고려해 실험을 종료하였다. MC703HL이 가장 높은 압축하중을 부담할 수 있으며, 내마모성이 우수함을 입증하였다. 마찰재의 재료적 특성에 따라 압축하중 증가 시의 이력의 변화를 비교하기 위해 C-3T, C-3PE, S-3MC의 이력을 Fig. 10에 나타내었다. 세 실험체 모두 압축하중 증가에 따라 마찰계

수 감소로 큰 하중 폭에서 이력 곡선의 폭이 감소하였다. 압축하중 증가에 따라 마찰계수의 변화로 하중이 감소한 것으로 판단된다.

### 4.4 압축하중에 따른 변화 분석

#### 4.4.1 마찰재 종국상태

Fig. 11에는 CFI, XY-SLI의 최대 압축하중에서의 마찰재 손상상태를 나타내었다. Fig. 11(a)는 C-2T, C-3T의 최대 압축하중에서의 나타난 현상으로 마찰재의 마모로 인해 마찰재가 구김 및 갈린 상태를 나타내었다. CFI의 거동 특성 상 수평 변위 발생 시 선 접합이 예상되었지만 압축하중 증가에 따라 접합면이 선을 중심으로 점차 커지며 마모가 발생하였다. UHMWPE를 사용한 C-3PE의 경우 PTFE를 사용한 실험체보다 마모와 압축하중에 강한 능력을 보였으며, 실험 종료 후 CFI 실험체 중 가장 높은 압축하중 400 kN에서 마찰재가

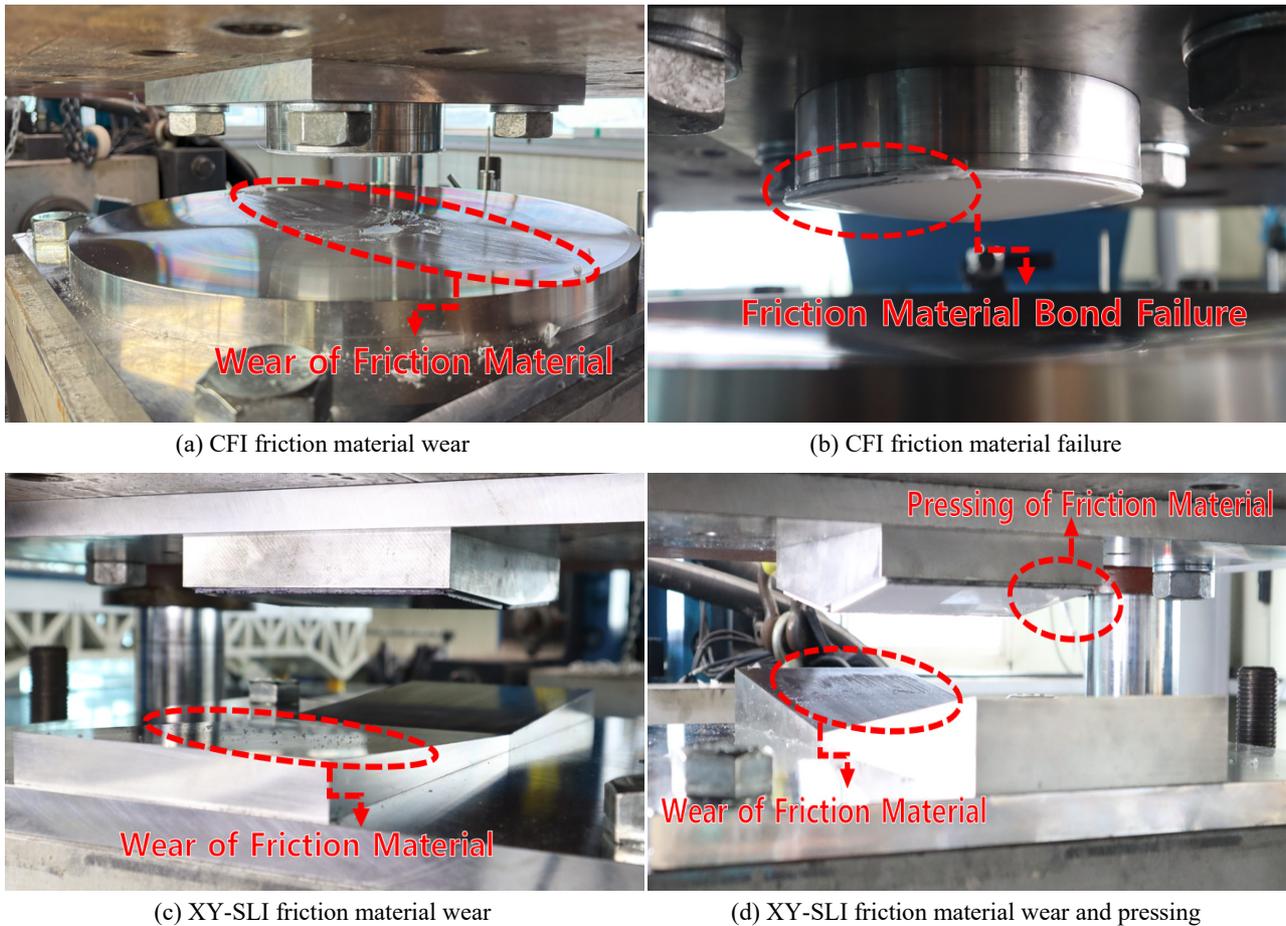


Fig. 11. Failure mode of friction material

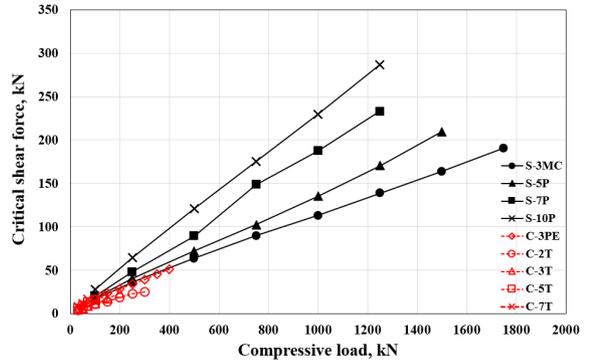
**Table 3.** Initial & maximum compressed load

Test subject		Maximum compressive load	Failure mode
CFI	C-2T	300 kN	Wear&Tear
	C-3T	200 kN	Wear&Tear
	C-5T	130 kN	Bond failure
	C-7T	70 kN	Bond failure
	C-3PE	400 kN	Shear deformation
XY-SLI	S-3MC	1750 kN	Wear
	S-5T	1500 kN	Wear& Compressive damage
	S-7T	1250 kN	Wear& Compressive damage
	S-10T	1250 kN	Wear& Compressive damage

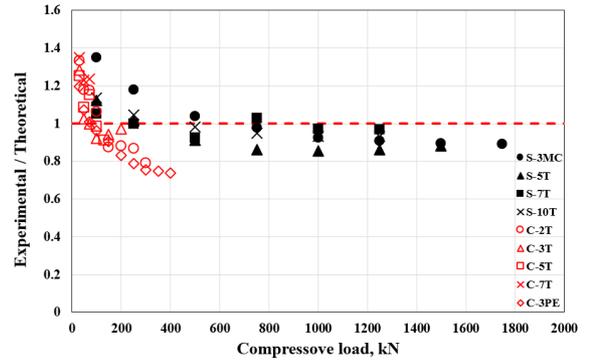
전단 가력 방향으로 늘어나 실험을 종료하였다. Fig. 11(b)는 C-5T, C-7T에 나타난 현상으로 비교적 큰 각도에 따라 큰 전단력의 영향을 받아 마찰재의 접착이 탈락하였다. Fig. 11(c)는 S-3MC 최대 압축하중에서의 마찰재 손상상태를 나타내었다. 1750 kN에서 실험이 종료되었으며, 마찰재의 마모 이외에 별다른 손상이 없었다. Fig. 11(d)는 PTFE를 사용한 S-5T, S-7T, S-10T의 최대 압축하중에서 나타난 현상으로 마찰재의 마모 및 눌림 현상이 발생하였으며, CFI 실험체와 달리 경사각이 커짐에 따라 마찰재의 탈락 현상이 발생하지 않았다. 이는 수평 변위 발생 시 선 접합 거동을 하는 CFI와 달리 면 접합 거동을 함에 따라 마찰재에 발생하는 전단력을 분산시켜 탈락이 발생하지 않았다고 판단하였다. 각 실험체의 압축하중 및 종국상태는 Table 3에 정리하였다.

4.4.2 임계수평력

압축 하중이 증가함에 따라 마찰재의 마모로 인한 임계수평력 변화를 양의 변위 구간에서의 임계수평력을 기준으로 3cycles의 평균값을 구해 Fig. 12에 나타내었다. 또한 이론상 예측한 값과 실험값과의 오차를 확인하기 위해 그 차이의 비율을 Fig. 13에 나타냈다. CFI와 XY-SLI 실험체에서 이론상 예측한 임계 수평력은 마찰재의 변형 및 마모를 고려하지 않았으므로, PTFE, UHMWPE, MC703HL의 마찰계수를 0.07, 0.12, 0.07으로 설정하여 식 (3)을 통해 도출하였다. Y축에서 1은 이론상 예측한 값과 실험값이 동일할때를 나타낸다. 모



**Fig. 12.** Critical shear force



**Fig. 13.** Experimental/Theory ratio

든 실험체에서 초기의 설정된 마찰계수와 차이로 인한 오차를 확인할 수 있으며, 압축하중 증가에 따른 비율의 감소를 확인할 수 있다. 임계수평력 CFI에서는 XY-SLI에 비해 낮은 압축하중에서 실험이 종료되었지만 비율의 변화는 크게 나타났다. 이는 접합 방식에 대한 영향으로 마찰재의 마모가 비교적 빨리 진행되었다고 판단된다. 또한 CFI 실험체에서 UHMWPE를 사용한 C-3PE와 XY-SLI 형상의 MC703HL을 사용한 S-3MC에서는 PTFE를 사용한 실험체에 비해 높은 연직하중 능력을 볼 수 있었으며, 앞선 마찰재의 종국상태를 통해 PTFE에 비해 손상에 강한 것을 확인하였다.

4.4.3 마찰계수 및 복원력 특성

마찰재의 마모 상태는 마찰계수의 변화에 영향을 준다고 할 수 있다. 앞서 구한 임계수평력  $F_s = |W(\tan\theta + \mu)|$ 에 따라 마찰재의 마찰계수를 역으로 계산 가능하며, Fig. 14에는 역으로 계산한 마찰계수를 압축 하중에 따라 나타내었다. 모든 실험체에서 압축하중이 증가할수록 마찰재의 마모로 인해 마찰계수의 감소를 볼 수 있다. 반면, S-7P에서 마찰계수가 750 kN에서 증가하는

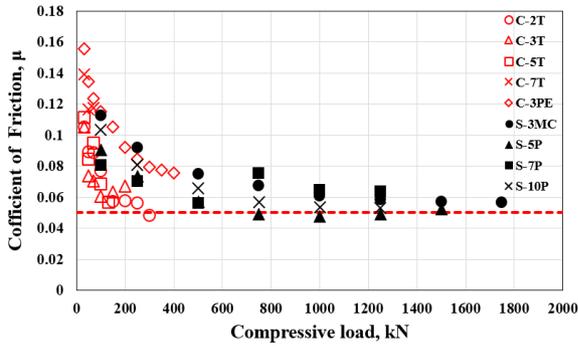


Fig. 14. Coefficient of friction

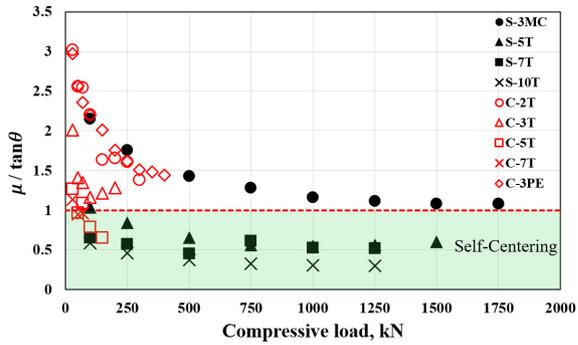


Fig. 15. Self-centering

것을 볼 수 있는데, 이는 마찰재가 전단가력 방향으로 눌림으로서 마찰재가 변형하여 증가된 것으로 사료된다. 실험체의 종국상태에서의 마찰계수는 대부분 0.05에 수렴하였다. 낮은 압축하중에서 실험이 종료된 CFI의 경우 마찰계수의 변동성이 XY-SLI에 비해 크게 나타났는데, 이는 선 접합의 영향이 마찰계수의 변화에도 크게 작용함을 나타낸다.

Fig. 15에는 셀프-센터링 여부를 나타내었다. Y축에서 1은  $\tan\theta = \mu$ 인 지점이며, 1 이하의 경우  $\tan\theta > \mu$ 를 따르며 셀프-센터링 능력을 보유함을 의미한다. CFI 실험체에서는 대부분 복원 특성이  $\tan\theta < \mu$ 의 관계를 따르며, XY-SLI 실험체 중 S-3MC의 실험체에서  $\tan\theta < \mu$ 의 관계를 따라 셀프-센터링이 불가능한 특성을 가진다. S-5P는 100 kN를 제외한 압축하중에서 마찰재의 마모에 따라 마찰계수가 감소하여  $\tan\theta > \mu$  관계를 나타내며, S-7P, S-10P는 모든 압축하중에서  $\tan\theta > \mu$ 의 관계에 따라 셀프-센터링 복원 특성을 갖추는 것으로 나타난다.

## 5. 결론

본 연구에서는 기존의 마찰 저항형 면진장치의 복원 특성 및 고유주기의 문제점을 보완하기 위하여 두 가지 형상의 면진 장치를 제안하였고, 장치의 경사각과 마찰 계수의 관계에 따른 이력특성 및 복원 특성을 파악하기 위해 경사각, 접합방식, 마찰재에 따라 구분하여 성능 실험을 진행해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) CFI의 실험체의 경우 기하학적 형상에 따라 수평 변위 발생 시 선 접합 거동을 예상하였지만, 모션의 과도한 응력이 집중되어 선을 중심으로 확장되어 접합함에 따라 마찰재의 마모 및 손상이 발생하였으며, 불안정한 이력을 나타냈다.
- (2) XY-SLI 실험체는 면 접합 거동을 하며 면 전체가 압축하중을 부담함에 따라 안정적인 이력을 나타냈으며, CFI 대비 5~10배의 큰 압축하중을 견뎠다. 또한 5° 이상의 실험체에서 셀프-센터링 복원 특성을 나타냄을 확인하였다.
- (3) 두 형상의 실험체에서 마모에 따른 마찰계수 감소가 발생하였으며 0.05에서 수렴하는 것을 확인하였다. MC703HL를 사용한 S-3MC가 가장 높은 연직하중을 부담할 수 있으며, 마모에 우수한 성능을 지닌 것을 확인하였다.
- (4) CFI의 선 접합 거동에 따른 낮은 연직하중 부담 능력과 불안정한 거동에 따라 면 접합을 하는 XY-SLI의 형상이 면진 장치에 더 적합하다고 판단되며, 마찰재로써는 마모와 높은 연직하중을 갖춘 MC703HL이 적합할 것으로 보인다. 또한 셀프-센터링 복원특성을 지니기 위한 경사각은 5° 이상이 되어야 할 것으로 판단된다. 면진 장치로서의 적합성을 위한 추가적인 실험 및 연구가 필요할 것으로 보인다.

## 감사의 글

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌(References)

- [1] Quan, C.R., Oh, S.H., and Lee, S.H. (2010) An Analytical Study on the Shape Development of U-shaped Steel Damper for Seismic Isolation System, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.22, No.1, pp.43-53 (in Korean).
- [2] Chun, Y.-S., Yoon, Y.-H., Whang, K.-T., and Chang, K.-K. (2007) Seismic Response of Apartment Building with Base Isolation System Consisting of Sliding-type Bearing and Lend Rubber Bearing, *Journal of the Korea Concrete Institute*, KCI, Vol.19, No.4, pp.507-514 (in Korean).
- [3] Akiyama, H. (2002) *Earthquake-resistant Design Method for Buildings based on Energy Balance*, Gumiseogwan Press (in Korean).
- [4] American Association of State Highway and Transportation Officials (2010) *Guide Specifications for Seismic Isolation Design* (3rd Ed.), AASHTO, USA.
- [5] British Standards Institution (2000) *Structural Bearings - Part 1: General Design Rules*, BS EN 1337-1:2000, BSI, UK.
- [6] Xiong, W., Zhang, S.-J., Jiang, L.-Z., and Li, Y.-Z. (2017) Introduction of the Convex Friction System (CFS) for Seismic Isolation, *Structural Control and Health Monitoring*, Wiley, Vol.24, No.1, e1861.
- [7] Yang, C.-Y., Wang, S.-J., Lin, C.-K., Chung, L.-L., and Liou, M.-C. (2021) Analytical and Experimental Study on Sloped Sliding-type Bearings, *Structural Control and Health Monitoring*, Wiley, Vol.28, No.11, e2828.
- [8] Kim, W.B., and Lee, K.J. (2005) A Study on the Application of Friction Pendulum System in Main Control Room of Nuclear Power Plant, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.17, No.4, pp.407-417 (in Korean).
- [9] Symans, M.D. (2009) Seismic Protective Systems: Seismic Isolation, [http://www.ce.memphis.edu/7119/PDFs/FEAM\\_Notes/Topic15-7-SeismicIsolation.pdf](http://www.ce.memphis.edu/7119/PDFs/FEAM_Notes/Topic15-7-SeismicIsolation.pdf).
- [10] Zayas, V.A., Low, S.A., and Mahin, S.A. (1987) *The FPS Earthquake Resisting System Experimental Report*, Report No. UCB/EERC-87/01, Earthquake Engineering Research Center, USA.
- [11] Pranesh, M., and Sinha, R. (2000) VFPI: An Isolation Device for Aseismic Design, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Wiley, Vol.29, No.5, pp.603-627.
- [12] Wang, S.-J., Hwang, J.-S., Chang, K.-C., Shiau, C.-Y., Lin, W.-C., Tsai, M.-S., Hong, J.-X., and Yang, Y.-H. (2014) Sloped Multi-roller Isolation Devices for Seismic Protection of Equipment and Facilities, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Wiley, Vol.43, No.10, pp.1443-1461.
- [13] Kim, J.-C., and Oh, S.-H. (2024) Energy-based Seismic Design Method for Seismically Isolated Structures with Friction Pendulum Systems, *Journal of Building Engineering*, Elsevier, Vol.92, 109794.

---

**요약**: 본 연구에서는 경사형 면진장치의 이력특성 및 복원력 특성에 대한 실험적 연구를 진행하였다. 접합 방식에 따라 각각 선 접합, 면접합의 원뿔형, 경사면형 면진장치에 대해 수행되었다. 원뿔형 면진장치의 경우 선 접합 거동에 따라 모선에 응력이 집중되어 불안정한 이력 특성을 나타냈다. 반면 경사면형 면진장치는 안정적인 이력특성을 보였고, 원뿔형 대비 5-10배의 압축하중을 부담 할 수 있음을 확인하였다. 경사면형의 5° 이상의 실험체에서는 셀프-센터링 복원특성을 확인하였다.

**핵심용어**: 경사형, 복원력특성, 마찰계수, 셀프-센터링

---