

## 2방향 경사형 마찰 면진장치의 이력특성평가를 위한 연구

오상훈<sup>1</sup> · 장세웅<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>교수, 부산대학교, 건축공학과, <sup>2</sup>석사과정, 부산대학교, 건축공학과

### A Study on the Evaluation of Hysteretic Characteristics of Two-Way Slope-Type Friction Isolator Device

Oh, Sang Hoon<sup>1</sup>, Jang, Se Ung<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Professor, Dept. of Architectural Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

<sup>2</sup>Graduate Student (Master Course), Dept. of Architectural Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

**Abstract** - In this study, a 'Two-Way Slope-Type Friction Isolator Device' was proposed to improve the economic feasibility and constructability of metal-based seismic isolation devices. To evaluate the hysteretic characteristics of the proposed isolation device, static experiments were conducted using a compression-shear testing machine, and the results were compared with theoretical values calculated through equations. All specimens exhibited hysteretic characteristics resembling 'Twin-Flag' shapes, and as the inclination angle (an experimental variable) increased, the magnitude of the limit shear force also increased. Regarding the experimental variable of friction materials, PA material was determined to have better performance than PTFE material in terms of durability and compressive load capacity. Additionally, considering dynamic characteristics, an optimal inclination angle of 3–5° is proposed.

**Keywords** - Self-centering, Twin-flag, Two-way slope-type, Friction, Isolator device

#### 1. 서론

유라시아 판 내부에 위치한 우리나라는 지진의 직접적인 영향권에 있지 않아 지진의 안전지대로 인식되어 왔다. 하지만, 지난 2016년 경주 지진과 2017년 포항지진을 토대로 판의 경계뿐만 아니라, 내부에서도 지진이 발생할 수 있는 가능성을 충분히 보여주었다. 비록, 구조체의 내진성능수준을 만족할지라도, 비구조 요소에서 내진성능수준을 만족하지 못하는 경우가 상당하였다. 국민안전처의 조사에 따르면, 2016년 경주지진에서 발생한 비구조요소의 피해는 인명피해 6건, 재산피해 103건으로 피해유형은 건물의 유리파손, 수도배관

파열, 천장재 탈락, 건물균열 및 낙하물의 피해가 주를 이루었다. 또한, 2017년 포항지진에서도 진앙 주변의 저층주택, 노후화 건물, 필로티 건물, 학교건물에서 발생한 건물 벽체의 균열이나 외벽 마감재 및 천장재의 탈락, 비내력 조적벽의 탈락 및 낙하에 의한 차량파손 등의 2차 피해가 상당 수 발생하였다<sup>[1]</sup>. 이러한 피해가 발생한 구조물은 공통적으로 기본적인 내진설계를 통해 지진에 대한 저항력을 갖추고 있지만, 제진시스템 혹은 면진시스템과 같은 추가적인 보호 시스템이 설치되지 않았다. 이처럼 내진구조에 대한 한계점이 대두되는 실정에서 면진구조에 대한 관심이 증가하고, 다양한 연구가 이루어지고 있다. 하지만, 현재 개발된 고무계열 혹은 금속계열의 면진장치들은 경제성 및 제작성에 대한 어려움이 지적되고 있다. 고무계열 면진장치의 경우, 단위면적 당 지압응력의 크기(설계면압)를 일정 이하로 설계할 수 없다는 낮은 하한치 규정을 두고 있어, 경제성이 떨어진다<sup>[2]</sup>. 또한, 금속계열 면진장치 중 마찰진사형 면진장치의 경우, 작은 면적으로 높은 수직하중을 견디기 위해 하부판은 큰 곡률을 가짐에 따라 면진

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. myl607@pusan.ac.kr

장치의 크기가 과도하게 커지게 되어 경제성이 떨어지고, 일정한 곡률을 가공함에 있어 제작에 어려움이 따른다.

본 연구에서는 금속계열 면진장치를 중점적으로 일정한 곡률 대신 일정한 경사 각도를 갖도록 하여 경제성과 제작성을 향상시킬 수 있는 ‘2방향 경사형 마찰 면진장치’를 제안하고자 한다. 또한, 실험체의 경사각도 및 삽입되는 마찰재를 실험변수로 하여 최적설계조건을 제안하고, 셀프센터링과 같은 복원력 특성을 정립하기 위해 정적실험을 수행하여 이력특성평가를 진행하였다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 종래의 면진장치

#### 2.1.1 고무계열 면진장치

고무계열의 대표적인 면진장치로 납면진장치(Lead Rubber Bearing)가 존재하고, 이를 Fig. 1(a)에 나타내었다<sup>[3]</sup>. 이는 상부구조물의 고유주기를 인위적으로 길게 하여 상부 구조에 유발되는 지진력의 크기를 감소시키고 동시에 에너지 흡수 기구로서, 면진장치의 내부에 코어 형태의 납을 삽입하여 고유주기의 장주기화와 감쇠기능을 겸비한 것이 특징이다. 현재 일본을 중심으로 가장 보편적으로 사용하고 있으나, 고무의 내구성문제와 고무와 보강철판 사이의 접착방법인 열 가압 접착에 의해 대량생산에 불리하고, 경제성이 떨어진다는 한계점이 존재한다.

#### 2.1.2 금속계열 면진장치

금속계열의 대표적인 면진장치로는 마찰진자형 면진장치(Friction Pendulum System)가 존재하며, 이를 Fig. 1(b)에 나타내었다. 이는 기하학적으로 형상을 조절하여 복원력을 부여할 수 있고, 마찰재의 적절한 선택으로 에너지 소산 매커니즘을 가질 수 있다. 지진력이 발생했을 때, 면진장치의 일정한 곡률에 의해 이론적으로 셀프센터링 능력을 갖지만, 실질적으로 원점으로 복귀하지 못하고 잔류변형이 발생한다. 이는 하부 마찰판과 마찰재 사이의 접촉면적이 줄어들어 해당 부

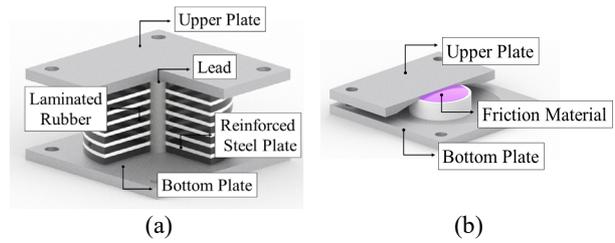


Fig. 1. Lead rubber bearing, friction pendulum system

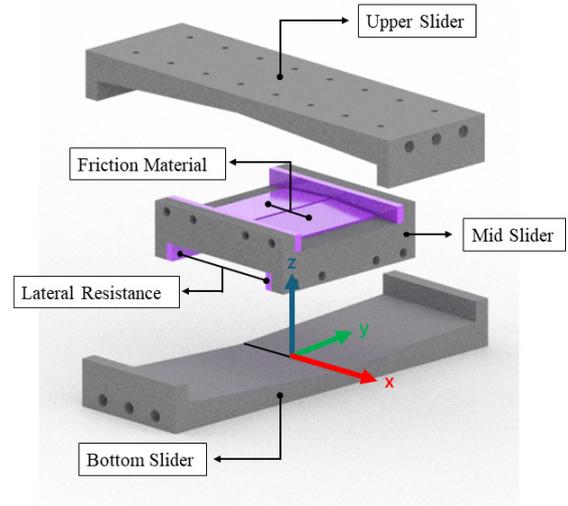


Fig. 2. Two-way slope-type friction isolator device

분에서 과도한 지압응력이 발생하기 때문이다. 이에 마찰재가 탈락하거나 소성변형을 일으키는 등 성능이 저하되어 면진장치의 성능을 발휘하기가 어려워진다. 또한, 더블 타입 혹은 트리플 타입 팬들럼처럼 형상이 복잡해질수록 구조가 복잡해지고 제작 혹은 시공절차에서 어려움을 겪을 수밖에 없다<sup>[4]</sup>.

### 2.2 면진장치의 제안

#### 2.2.1 2방향 경사형 마찰 면진장치

이러한 고무계열면진장치와 금속계열면진장치의 단점을 보완한 면진장치인 ‘2방향 경사형 마찰 면진장치’를 Fig. 2와 같이 제안하였다. 기본적으로 고무를 사용하지 않는 금속계열 면진장치로, 수평변위가 발생했을 때, 접촉면적이 크게 줄어들지 않아 지압응력으로부터 안정성을 도모할 수 있다. 상부와 하부 마찰판 사이에 마찰재를 삽입한 중앙 슬라이더가 에너지 소산능력을 갖게 되고, 하부 마찰판에서 지진력의 x축 방향을, 상부 마찰판에서 지진력의 y축 방향을 수용하여 2방향 거동

이 가능하도록 설계하였다. 또한, 중앙슬라이더와 상, 하부 마찰판의 옆면 사이의 마찰을 최소화하고 회전자유도를 구속하기 위해 마찰계수가 낮은 마찰재를 추가로 부착하였다.

### 3. 정적실험

#### 3.1 실험개요

##### 3.1.1 실험체 설계

‘2방향 경사형 마찰 면진장치’의 수평력 F를 구하기 위해 경사면에 놓여진 질점의 2차원 자유물체도를 Fig. 3에 나타내었으며, 수평력 F는 식 (1)<sup>[5]</sup>과 같이 나타낼 수 있다.

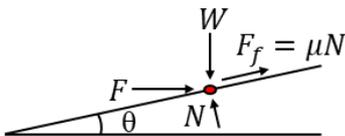


Fig. 3. Free body diagram of system

$$F = F_r + F_f \approx W \tan \theta + W \mu = W(\tan \theta + \mu) \quad (1)$$

여기서,

- $F_r$  = 면진장치의 복원력 (kN)
- $F_f$  = 면진장치의 마찰력 (kN)
- $W$  = 상부구조물의 중량 (kN)
- $\mu$  = 마찰재의 운동마찰계수
- $\theta$  = 경사각도(°)

면진장치의 수평력은 지진력과 같은 외력의 고유적인 특성과는 관계없이 W,  $\theta$ ,  $\mu$  총 세 가지의 설계변수에 의해 결정된다. 또한 이러한 매커니즘은  $\theta$ 와  $\mu$ 의 크기에 따라 세 가지 경우로 분류되는데, 이를 Fig. 4에 나타내었다. 일정한 경사각도를 가지는 면진장치는 비선형적인 복원력 특성에 의해 ‘Twin Flag’ 이력을 나타낸다. 복원력의 값이 마찰력의 값에 상회하지 못할 때 즉,  $\mu$ 가  $\tan \theta$ 보다 크거나 같을 때, 면진장치는

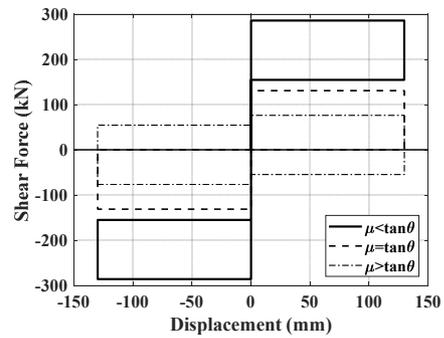


Fig. 4. Shear force-displacement relationship

Table 1. Summary of test subject

Specimen	Angle [Degree]	Friction material
PA-3	3	MC703HL (PA)
PT-5	5	TEFLON (PTFE)
PT-7	7	TEFLON (PTFE)
PT-10	10	TEFLON (PTFE)

변형이 발생 후 초기상태로 복원되는 상태로 복원되는 ‘Self-Centering’기능을 발휘하지 못하고 잔류변형이 발생할 수 있다. 결국, 면진장치는 낮은 마찰계수를 가짐과 동시에 충분한 복원력을 갖춰야만 한다. 마찰재로 주로 사용되는 테프론 시트(PTFE)와 PA(Polyamide) 계열의 MC703HL 두 가지를 실험변수로 선정하였으며, 경사각도는 3°, 5°, 7°, 10°를 실험변수로 선정하였고 그에 따른 실험체 정보를 Table 1에 나타내었다.

##### 3.1.2 실험 방법 및 세팅

2방향 경사형 마찰 면진장치는 1축과 그에 직교하는 방향으로의 변형 혹은 하중을 수용할 수 있는 면진장치이나, 특성실험에서의 가력은 1축에 대해서만 가능하다. 이에, 최대 수직하중 용량이 2000 kN, 최대 수평하중 용량이 500 kN의 압축-전단 시험기를 사용하였다. 수직하중과 수평하중은 시험장비의 유압가력기(Actuator)를 통해 측정하였고, 시험체 별로 수직하중을 250 kN부터 250 kN 간격으로 점진적으로 증가시키며 정현파 형상으로  $\pm 130$  mm의 전단변위를 3회 왕복하여 가력하였다. 이때, 가력조건은 AASHTO 2010에서 제시하는 마찰면진장치의 프로토콜 절차를 따랐다<sup>[6]</sup>. 마찰재의 탈락, 마찰재의 소성변형 중 한 가지 이상의 조건을 만족

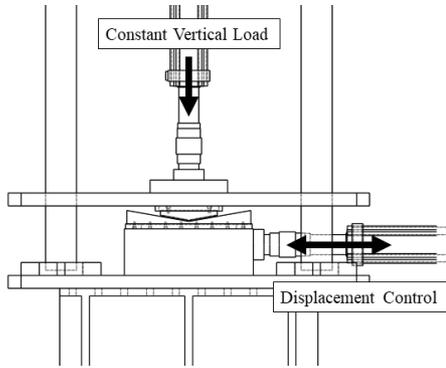


Fig. 5. Test set-up

시킬 때, 실험체의 종국상태로 판단하여 실험을 종료하였다. 실험체의 설치전경을 Fig. 5에 나타내었다.

### 3.2 실험결과

#### 3.2.1 전단력-변위 이력곡선 및 종국상태

실험체별로 동일한 수직하중(1,250 kN)을 받았을 때의 전단력-변위 이력곡선과 식 (1)을 통해 계산된 이론값의 이력곡선을 Fig. 6에 함께 나타내었다. 이때, 식 (1)에서의 마찰계수는 두 마찰재 모두 0.05로 가정하여 계

산되었다. 실험체의 1차 강성은 경사각도에 비례하여 증가하는 형태를 나타냈다. 전단력이 더 이상 증가하지 않고 변형만이 증가하는 구간이 존재하는데, 이를 ‘한계전단력’으로 정의한다. 동일한 수직하중에서의 한계전단력 또한 경사각도에 비례하여 증가하였다. PA-3 실험체의 경우 복원력이 0에 수렴되는 반면 나머지 세 실험체들은 모두 일정한 복원력을 가진 상태로 원점으로 복귀하는 셀프센터링 이력을 나타내었다. 실험체의 기하학적 특성상 경사가 급격히 바뀌는 꼭짓점에서 불연속적 거동을 보이게 되어 충격력에 의한 ‘Pounding Effect’를 고려한다면, PT-7, PT-10 실험체와 같은 큰 각도로 설계하기 어렵고, 3°-5°사이가 최적의 경사각도로 판단된다<sup>[7]</sup>.

실험체별로 종국상태를 Fig. 7에 나타내었다. 마찰재로 TEFLON을 사용한 PT-5, PT-7, PT-10 세 실험체는 1,250 kN-1,500 kN의 압축하중에 이르면서 마찰재가 소성변형 혹은 탈락이 발생하였고, 마찰재로 MC703HL을 사용한 PA-3 실험체는 압축 시험기의 허용 압축하중(1,750 kN)에 도달한 후 실험을 종료하였다. 이는, 실험체의 주요변수인 경사각도가 커질수록 마찰재의 부

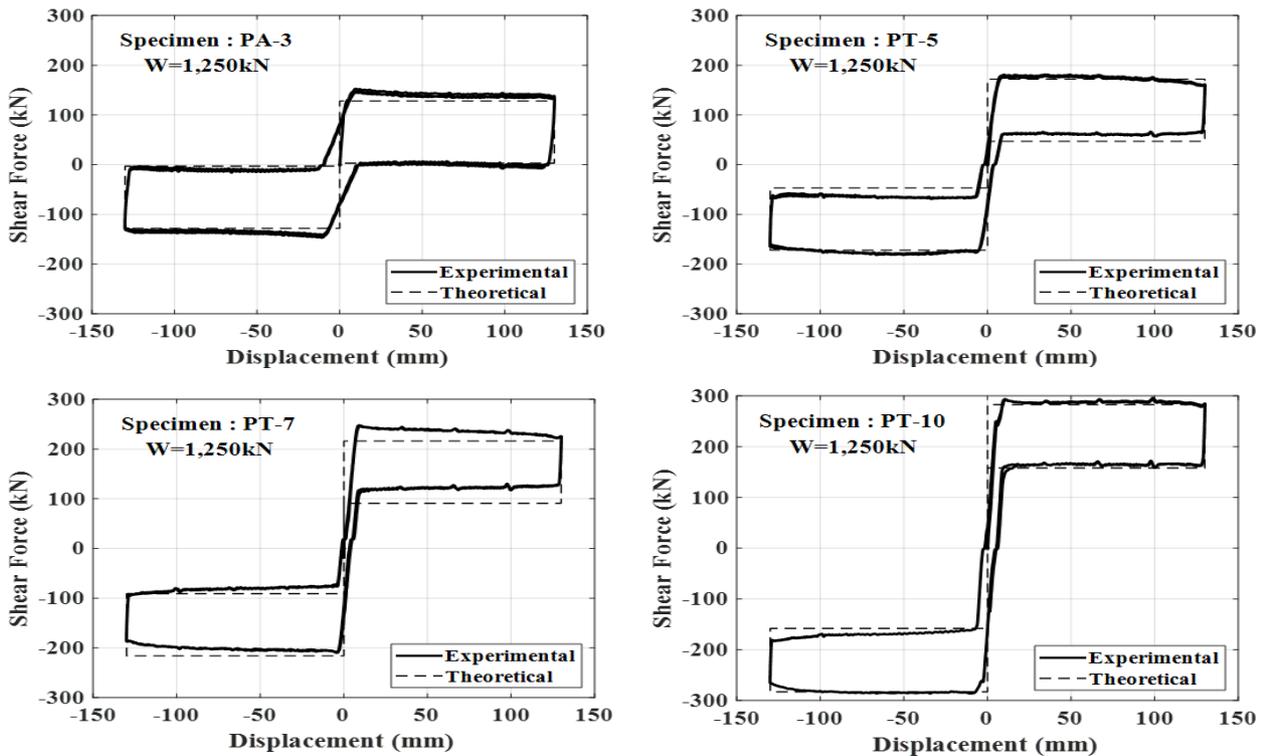


Fig. 6. Shear force-displacement relationship of specimens

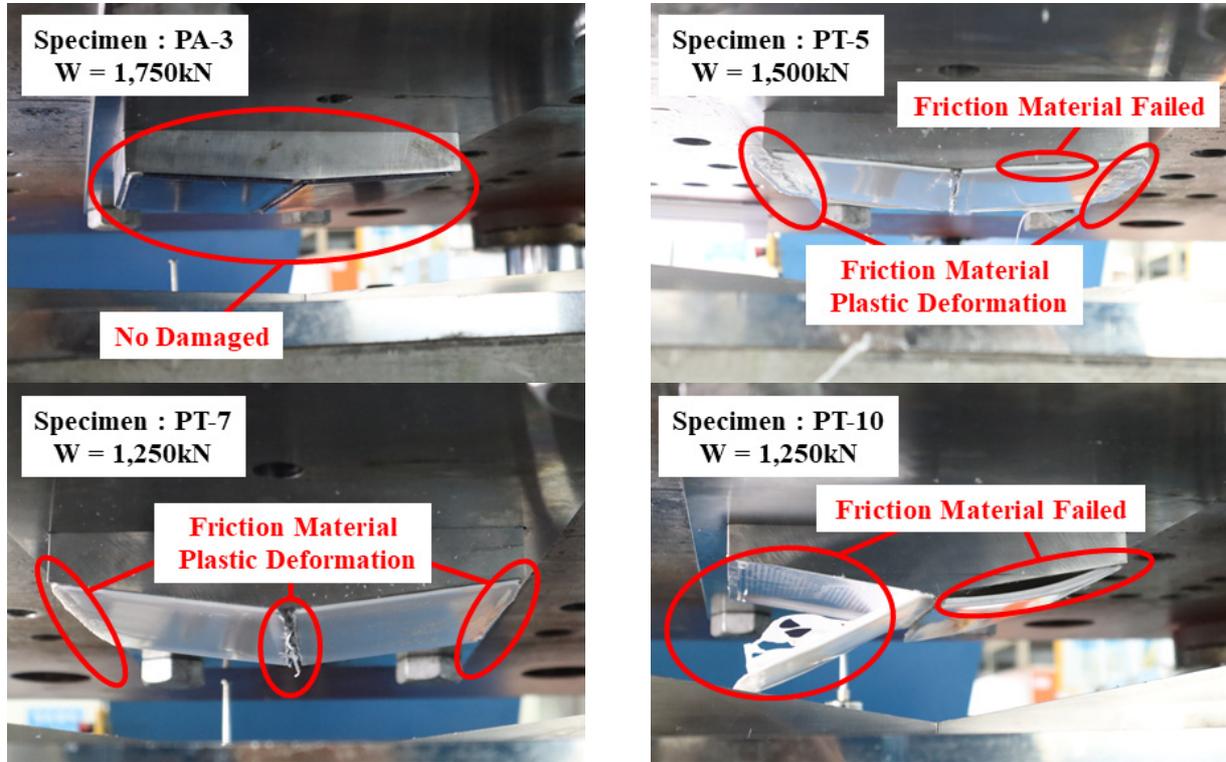


Fig. 7. Ultimate states of specimens

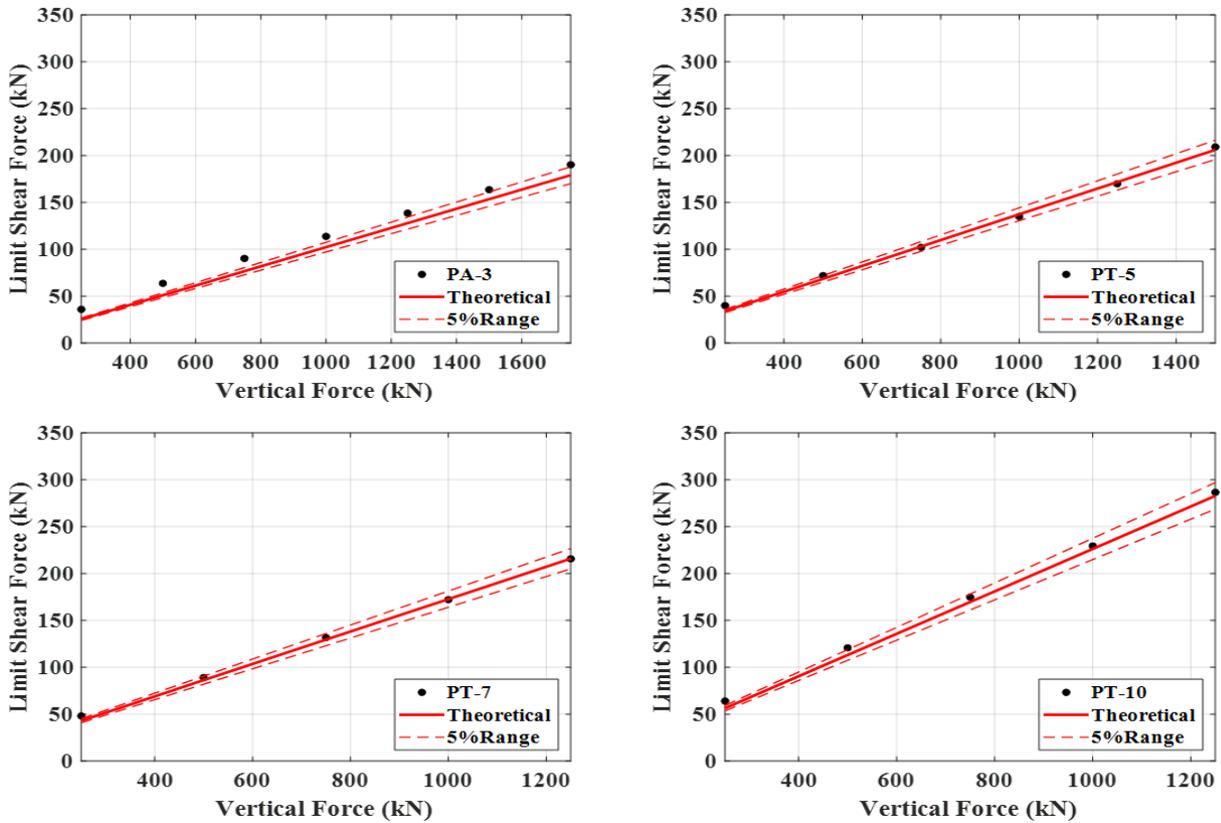


Fig. 8. Limit shear force of specimens

좌방향과 수평가력방향이 이루는 각도가 작아져 부착력이 떨어짐과 동시에 마찰재의 선정에 있어 TEFLON이 부적합하다고 사료된다.

### 3.2.2 한계전단력 분석

수직하중의 크기에 따른 한계전단력의 크기를 Fig. 8에 도시하였으며, 앞서 식 (1)의 이론값과 이론값의 5% 범위를 함께 나타내었다. 한계전단력은 경사각도에 비례하여 선형적으로 증가하는 형태를 나타냈다. 대부분 실험체의 한계전단력이 이론값의 5% 내에 존재하여 특성실험의 타당성을 확보할 수 있었다. 하지만, PA-3 실험체의 경우, 마찰력 전체가 이론값의 5% 범위를 넘은 것을 확인할 수 있었는데, 이는 이론값의 마찰계수를 0.05로 가정한 것에 비롯되어 실제 PA계열의 MC703HL소재의 마찰계수가 0.05 이상의 마찰계수를 나타내기 때문으로 사료된다.

### 3.2.3 마찰계수 분석

x축에는 수직하중을, y축에는 마찰계수를 나타내어 Fig. 9에 도시하였다. 이때, 마찰계수는 식 (1)을 사용하여 실험값을 통한 역 계산 과정을 거쳐 계산되었다. 마찰계수는 수직하중의 크기가 커짐에 따라 비선형적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 이는, 낮은 수직하중에서 높은 수직하중으로 커질수록 마찰재와 하부판 사이가 완전접촉 하게 되고, 접촉되는 면적이 커짐에 따라 마찰력이 분산되어 마찰계수가 낮아진 것으로 사료된다.

PA소재는 PTFE소재에 비해 마찰계수가 약 0.006~

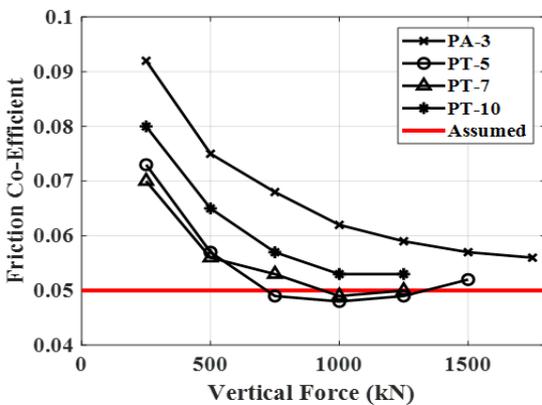


Fig. 9. Friction co-efficient of specimens

0.01만큼 소폭 커짐을 확인할 수 있었다. 또한, PTFE를 적용한 세 실험체를 보면, 실험변수인 경사각도가 커질수록 마찰계수 또한 커짐을 확인할 수 있었다. 최종적으로, PA소재의 MC703HL 마찰재의 경우 약 0.06의 마찰계수를, PTFE소재의 TEFLON 마찰재의 경우 약 0.05의 마찰계수를 가지게 된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 ‘2방향 경사형 마찰 면진장치’의 이력특성을 파악하기 위해 압축-전단 시험기를 이용한 반복가력 실험을 실시하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 한계전단력은 수직하중의 증가에 따라 선형적으로 증가하였으며, 실험변수인 경사각도가 클수록 증가폭이 커짐을 확인하였다.
- (2) PA소재의 마찰계수는 약 0.06, PTFE소재의 마찰계수는 약 0.05로 수렴하였으며, 초기 가정한 마찰계수(0.05)와 PA소재의 마찰계수와의 차이를 확인하였다.
- (3) 마찰재의 손상을 고려했을 때, PTFE소재에 비해 PA소재가 마찰재 적용에 있어 적합한 것으로 판단된다.
- (4) 경사각도가 커질수록 원점을 지날 때 가속도가 증폭되는 ‘Pounding Effect’를 고려한다면, 3°~5° 사이의 경사각도가 최적의 설계형상으로 판단된다.
- (5) 이론식을 통해 이력특성평가의 타당성을 확보하였으며, 추후에 면진장치를 적용한 진동대 실험을 통해 동적특성평가에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 보인다.

## 감사의 글

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2022R1A2C2007001).

## 참고문헌(References)

- [1] Oh, S.H., Park, H.Y., and Choi, K.K. (2018) Current Status and Characteristics of Earthquake Damage in Non-Structural Elements, *Journal of KSNVE*, The Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol.28, No.3, pp.12-19 (in Korean).
- [2] American Association of State Highway and Transportation Officials (2007) *LRFD Bridge Design Specifications* (4th Ed.), AASHTO, USA.
- [3] Unison HKR (2024) Seismic-Products-Seismic Isolation, <https://www.unisonhkr.co.kr:40012/ko/content/build/build> (in Korean).
- [4] Fenz, D.M., and Constantinou, M.C. (2008) *Mechanical Behavior of Multi-spherical Sliding Bearings*, Technical Report MCEER-08-0007, The Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, USA.
- [5] 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.
- [6] American Association of State Highway and Transportation Officials (2010) *Guide Specifications for Seismic Isolation Design* (3rd Ed.), AASHTO, USA.
- [7] Harvey, P.S., Jr. (2016) Vertical Accelerations in Rolling Isolation Systems: Experiments and Simulations, *Journal of Engineering Mechanics*, American Society of Civil Engineers, Vol.142, No.3, 04015091.

---

**요약**: 본 연구에서는 금속계열 면진장치의 경제성과 시공성을 개선하기 위한 ‘2방향 경사형 마찰 면진장치’를 제안하였다. 제안된 면진장치의 이력특성을 평가하기 위해 압축-전단 시험기를 이용하여 정적실험을 수행하였으며, 이를 수식을 통해 계산된 이론값과 비교하였다. 모든 실험체는 이론값과 유사하게 쌍둥이 깃발형의 이력특성을 나타냈으며, 실험변수인 경사각도가 증가함에 따라 한계 전단력의 크기가 증가하였다. 실험변수인 마찰재는 내구성 및 압축하중 수용능력이 있어 PA소재가 PTFE소재에 비해 더 나은 성능을 지닌 것으로 판단된다. 또한, 동적특성을 고려했을 때, 최적의 경사각도는 3°-5° 사이로 제안된다.

**핵심용어**: 셸프센터링, 쌍둥이 깃발형, 2방향 경사형, 마찰, 면진장치

---