

# 자력을 이용한 마찰진자 베어링의 면진성능

## Base Isolation Performance of Friction Pendulum System using Magnetic Force

황인호<sup>1)</sup> · 신호재<sup>2)</sup> · 이종세<sup>3)</sup>

Hwang, In-Ho · Shin, Ho-Jae · Lee, Jong-Seh

**국문 요약** >> 면진장치 중에서 최근 많은 연구가 이루어지고 있는 마찰진자 베어링은 적절한 마찰력을 얻기 위해 PTFE(Polytetrafluoroethylene) 마찰재가 이용되고 있다. 본 연구에서는 자력의 반발력을 이용해 재료의 성질을 대체하여 면진성능을 향상시킬 수 있는 자력을 이용한 마찰진자 베어링을 제안하였다. 제안된 시스템은 자력에 의한 반발력이 수직력을 줄여줌으로써 재료에 의한 마찰계수의 영향을 줄일 수 있음을 가정하였다. 또한 자력의 영향을 가정하기 위해서 간단한 실험을 구성해 보았으며, 자력이 작용을 할 때 마찰계수( $\mu$ )를 약 20%정도 줄여줄 수 있었다. 실험 결과를 적용한 수치해석을 통해 다양한 지진에 대해서 기존의 마찰진자 베어링보다 향상된 성능을 보여주었고, 특히 지진으로 인해 구조물의 파괴에 작용하는 주된 요소인 최상층의 가속도와 구조물의 상대변위를 비교함으로써 제안된 시스템이 면진 장치로서의 기능을 가지고 있음을 확인하였다. 자력을 이용하여 기존의 PTFE 마찰재를 대체할 수 있는 자력을 이용한 마찰진자 베어링의 구조적 설계를 할 수 있다면 마찰진자 베어링의 문제점을 보완한 기초격리장치로서 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

**주요어** 기초격리장치, 마찰진자 베어링, 자력, 마찰계수

**ABSTRACT** >> One of the most recent base-isolation systems to improve the earthquake resistance of structures is the Friction Pendulum System (FPS). Simple in design but with versatile properties, the FPS has been used in some of the world's largest seismically isolated buildings, bridges and chemical tanks. FPS using PTFE (Polytetrafluoroethylene) based material has been developed to provide a simple and effective way for structures to achieve earthquake resistance. PTFE materials are soft, and are apt to become deformed easily after a few working cycles. In this study, magnetic force is used rather than the usual PTFE materials to improve the material shortcomings. A MF-FPS (Magnetic force-Friction Pendulum System) is proposed, and is shown to effectively protect structures against earthquakes. To demonstrate the advantages of this new system, the MF-FPS is compared with FPS as an attempt to prove its performance. A six-degree-of-freedom model is considered as a numerical example. The ground acceleration data of El Centro, Mexico and Gebze earthquakes are used as seismic excitations. The results showed that MF-FPS improved performance compared with FPS.

**Key words** base Isolation System, FPS, magnetic force, coefficient of friction

## 1. 서론

최근 전 세계적으로 대규모의 지진이 연이어 발생하여 엄청난 인명과 경제적 손실을 가져왔다. 이러한 지진의 피해로 인하여 우리나라를 비롯한 많은 나라에서 주요 사회기반

구조물과 주거지역의 아파트 및 고층빌딩에 대한 내진설계에 대한 관심이 높아져왔다. 내진설계는 크게 강도증가와 연성증가의 두 가지 방법으로 분류되는데 이 가운데 강도증가에 의한 내진설계의 경우 지나치게 큰 부재가 설계되어 비경제적이며, 구조물의 갑작스런 취성파괴 양상에 의해 큰 인명피해를 유발할 수 있다. 연성증가에 의한 내진설계는 구조부재의 소성변형에 의해 지진에너지를 흡수함으로써 지진하중의 크기를 효과적으로 줄일 수 있도록 하는 방법이지만 지진발생 후 보수보강이 어렵고 비용이 많이 드는 단점이 있다.

이러한 내진설계의 한계를 극복하기 위해 구조물에 유입

<sup>1)</sup> 정회원·한양대학교 토목공학과 박사후연구원

(대표저자: hysam07@hanyang.ac.kr)

<sup>2)</sup> 풍림산업 사원

<sup>3)</sup> 정회원·한양대학교 토목공학과 교수

본 논문에 대한 토의를 2008년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2008. 3. 5 / 수정일 1차 : 2008. 7. 18, 2차 : 8. 19, 3차 : 8. 21 / 게재확정일 : 2008. 8. 21)

되는 진동에너지를 부가적인 장치를 이용하여 흡수 또는 차단함으로써 구조물을 보호하고자 하는 면진시스템이 관심을 가지게 되었다. 대표적인 면진시스템인 기초격리장치에 대한 연구는 Kelly(1986)<sup>(4)</sup>, Su et al.(1989)<sup>(8)</sup> 등에 의해 시작되어, Elastomer Bearing, Lead Rubber Bearing, Sliding Bearing 등 다양한 개념의 기초격리 장치들이 개발되었으며 미국, 일본, 뉴질랜드 등의 국가들을 중심으로 기초격리 시스템을 이용한 교량, 건축물의 내진설계 규정을 제시하고 있다.

면진장치 중에서 최근 많은 연구가 이루어지고 있는 마찰진자 베어링(FPS: Friction Pendulum System)은 Zayas et al.(1987)<sup>(9)</sup>, Mokha et al.(1990)<sup>(6)</sup> 등에 의해 제안된 장치이다. 마찰진자 베어링은 진자의 성질을 이용하여 지진격리된 구조물의 고유진동수를 결정할 수 있는 면진장치로서 마찰판의 곡률반경을 설계하여 재하하중에 관계없이 구조물의 고유진동수를 가능한 한 낮게 결정할 수 있고, 에너지 감쇠능력을 고려하여 지진동에 의한 구조물의 응답을 감소시키는 장치이다. 마찰진자 베어링의 마찰재료로서는 Teflon 계열의 합성수지로서 마찰계수가 작고 내열성 및 내식성, 내화학성이 우수한 PTFE (Polytetrafluoroethylene)를 기본 소재로 탄소, 유리섬유, 구리 등 여러 성분을 혼합한 복합 재료가 개발되어 응용되고 있다. FPS에서 1989년 Mokha et al.에 의하면 마찰진자 베어링의 특성은 마찰판의 마찰계수에 크게 영향을 받으며 마찰력은 마찰면의 조도와 베어링의 압력, 마찰면의 표면 상태에 좌우되는 것으로 보고되고 있다. 그러나 국내 한국 기계연구원을 중심으로 마찰진자 베어링의 특성 및 이를 강재모형에 적용한 결과 적절한 마찰력을 얻기 위해 마찰재료로서 PTFE를 사용하는 경우 마찰재의 수직응력 한도 내에서 응력을 변화시킬 경우 PTFE재료의 마모가 커서 장시간의 활용이 어려운 단점이 있다.

본 연구에서는 기존의 FPS에서 적절한 마찰력을 얻기 위해 마찰재료로서 사용되는 PTFE의 재료적인 접근에서 벗어나 자력(Magnetic Force)을 이용해 재료의 성질을 대체하여 성능을 향상시킬 수 있는 새로운 시스템을 제안하였다. 이를 위해 자력이 작용을 할 때 마찰계수에 미치는 영향을 실험을 통해 알아보고, 예측 불가능한 자연재해에 대해 일반적인 면진성능을 갖는 기초격리장치로서의 기능을 충실히 수행할 수 있는지를 확인하기 위해서 Kelly et al.(1987)<sup>(5)</sup>에서 제안한 기초격리 장치를 갖는 6자유도 건물에 대하여 외부 입력으로 El Centro, Mexico, Gebze 지진의 지반가속도를 사용하여 해석적인 방법을 통해 FPS와 본 논문에서 제안한 자력을 이용한 마찰진자 베어링(MF-FPS)의 기초격리 장치로서의 면진성능을 비교하여 보았다.

## 2. Magnetic Force를 이용한 FPS(MF-FPS)

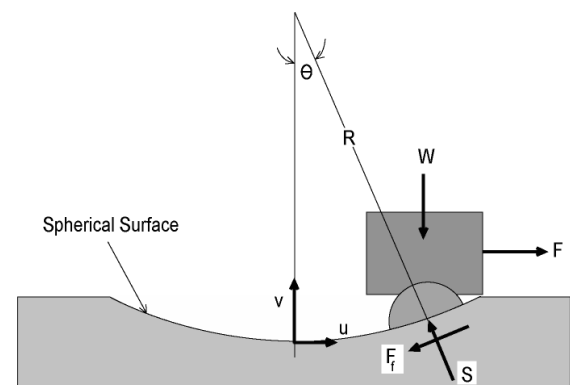
FPS는 재질이 스테인레스강인 Concave Spherical Surface를 Articulated Slider가 이동하게 되어 있고, Slider의 또 다른 면은 마찰계수가 낮은 PTFE 합성물질을 입힌 베어링과 접하게 되어 있다. 베어링은 지진력이 정적 마찰력보다 큰 경우에만 작동하기 시작하므로 퓨즈의 역할을 한다고 볼 수 있다. 일단 베어링이 작동하기 시작하면 Slider는 Concave Spherical Surface를 따라 움직이므로 베어링에 의해 지지된 구조물은 상향으로 들어 올리지게 되는데 이는 천정에 매달린 진자의 운동과 같다고 할 수 있다. 그림 1은 마찰진자 베어링의 기본원리를 나타낸 것으로, 마찰진자 베어링 상부의 구조물은 반지름 R인 진자처럼 거동하게 된다. 여기서 수평면위  $u$ 에서 수평 방향력  $F$ 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$F = \frac{W}{R}u + \mu Wsgm(\dot{u}) \quad (1)$$

여기서,  $W$ 는 상부구조물에 의한 수직재하하중,  $\mu$ 는 곡면 마찰계수,  $\dot{u}$ 는 곡면에서의 속도를 나타내며, 마찰진자 베어링이 설치된 구조물의 고유주기는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

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

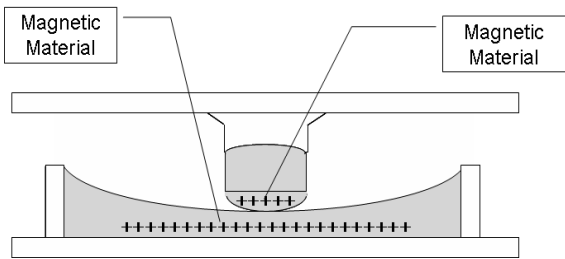
식 (2)로부터 마찰진자 베어링의 고유주기는 상부구조물의 질량과는 관련이 없고, 면진장치의 기하학적 형상 즉, 곡률반지름과 관련이 있음을 알 수 있다. 식 (1)로부터 마찰진자 베어링의 수평방향력은 수직재하하중과 비례하고, 그림 1에서 수평방향 복원력  $F$ 는 상부구조물의 질량방향으로 발생하게 된다. FPS에서 Mokha et al.(1989)<sup>(7)</sup> 등에 의하면 마찰진자 베어링의 특성은 마찰판의 계수에 크게 영향을 받



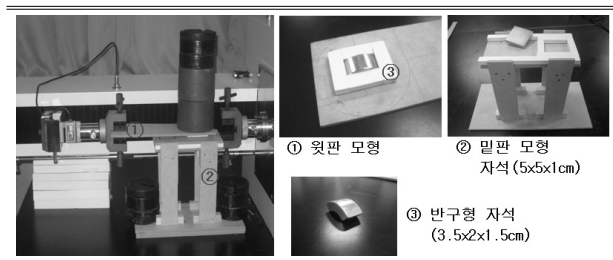
〈그림 1〉 FPS의 기본원리

으며 마찰력은 마찰면의 조도와 베어링의 압력, 마찰면의 표면 상태에 좌우되는 것으로 보고되고 있는데, 이를 마찰 판 마찰재의 재료적인 접근에서 벗어나 영구자석을 사용하여 자력의 반발력을 이용해 재료의 성질을 대체한다. 자력에 의한 반발력이 상부구조물을 들어 올리는 힘으로 작용하여 이를 통해 마찰력에 영향을 주는 수직력을 줄여줌으로써 재료에 의한 마찰력의 영향을 줄일 수 있음을 가정하였다. 이를 위해 다음과 같이 MF-FPS를 설계(그림 2)하였고 자력의 영향을 가정하기 위해 개념적인 정적실험을 구성해 보았다(그림 3).

실험은 마찰면의 표면조도와 표면상태가 동일한 하판 모형(②)을 자석을 넣은 것과 넣지 않은 것의 두 형태로 비교 모형을 제작하였다. 하중이 올라가는 상판(①) 모형은 반구형 영구자석을 넣어 제작 하였으며 재원은 표 1과 같다. 두 개의 조건으로 제작한 하판 모형(②)을 이용해 같은 조건으로 하중을 증가시키며 하중에 따른 마찰력을 측정하여 자력



〈그림 2〉 제안한 MF-FPS의 형상



〈그림 3〉 실험 구성

〈표 1〉 NEO-MAG(Nd-Fe-B) 자석의 물성치

밀도(g/cm <sup>3</sup> )	7.4
탄성계수(N/m <sup>2</sup> )	1.6 × 10 <sup>11</sup>
표면자속밀도(G)	1874

〈표 2〉 자력(반발력)의 영향에 의한 마찰계수 감소 효과

하중(kg)	일반 하중시 마찰력(N)	자력 효과시 마찰력(N)
10	12.4	9.6
15	26.2	20.2
20	36.6	29.2
25	45.3	35.1
$\mu$	0.18	0.14

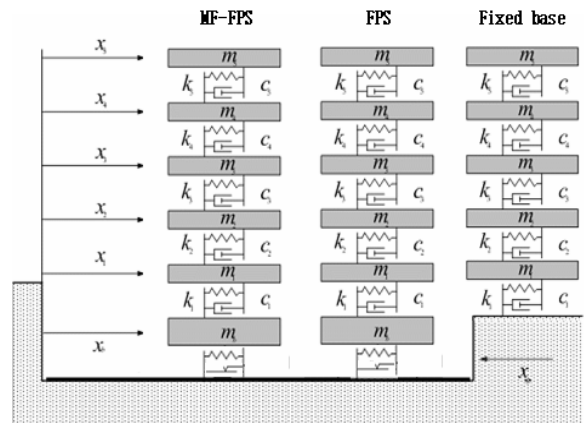
의 반발력에 의한 영향을 알아 본 결과 표 2와 같았다. 두 결과를 보면 자력이 반발 작용을 할 경우 마찰계수( $\mu$ )를 약 20% 정도 줄여 주었다. 이 실험 결과를 통해 자력의 영향으로 마찰계수( $\mu$ )를 20% 감소시킬 수 있음을 가정하고 기존 FPS에 적용하여 수치해석을 실시하였다.

이상은 MF-FPS를 제안하기 위한 실험으로 자력의 영향이 PTFE를 대체할 수 있는 가능성을 확인하기 위해 실시하였다. 이를 바탕으로 상사법칙을 적용한 MF-FPS의 축소모형을 제작·시험 할 수 있다면 면진장치로서 MF-FPS에 대한 시간이력해석이 기대된다. MF-FPS의 실용화 측면에서 보면 본 실험에서 사용된 영구자석은 부적합 할 것으로 예상된다. 하지만 전자석과 초전도체를 이용하는 자기부상열차를 고려해 볼 때 면진받침으로서의 가능성이 있을 것으로 생각된다.

### 3. 수치해석

#### 3.1 대상구조물

본 연구에서는 기초격리 시스템으로서의 면진성능을 검증하기 위해 제안한 MF-FPS를 Kelly et al.(1987)<sup>(5)</sup>에서 제안한 6자유도를 가진 5층 건물(그림 4)에 적용하여 수치해석을 수행하였다. 대상구조물의 질량과 강성, 감쇠 등은 표 3



〈그림 4〉 수치해석 대상 구조물

〈표 3〉 구조물 물성(Kelley et al, 1987)

위치	층별 질량(kg)	층별 강성(kN/m)	층별 감쇠(kN·s/m)
Base	$m_b = 6800$	$k_b = 231.5$	$c_b = 3.74$
1층	$m_1 = 5897$	$k_1 = 33732$	$c_1 = 67$
2층	$m_2 = 5897$	$k_2 = 29093$	$c_2 = 58$
3층	$m_3 = 5897$	$k_3 = 28621$	$c_3 = 57$
4층	$m_4 = 5897$	$k_4 = 24954$	$c_4 = 50$
5층	$m_5 = 5897$	$k_5 = 19059$	$c_5 = 38$

과 같다. 기초 지지된 구조물은 첫 번째 모드에서 2%의 감쇠와 0.3초의 고유주기를 가진다. 구조물의 동적 비선형을 무시하였지만 과도한 구조적 움직임을 충분히 고려하였다. 제안된 기초격리시스템의 면진성능 비교를 위한 FPS는 고유주기 T=3s 로 정하고 식 (2)로부터 곡률반경 R=155cm로 설계하였다.

### 3.2 해석방법 및 절차

본 연구에서는 5층 대상 구조물에 대해서 입력지진동으로 각기 다른 특성을 지닌 El Centro, Mexico, Gebze 지진을 작용시켰으며, 기초지지상태와 FPS, MF-FPS의 Base변위와 구조물의 상대변위, 최상층 가속도에 대해서 비교하였다.

해석은 구조물의 운동방정식을 상태공간방정식으로 변환하여 시간영역 해석을 수행하였다.

구조물의 운동방정식은 다음 식과 같다.

$$M_s \ddot{x} + C_s \dot{x} + K_s x = Af - M_s \ddot{x}_g \tag{3}$$

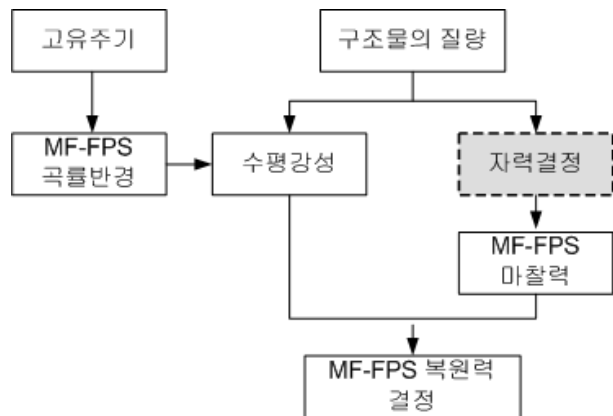
여기서,  $A = [10]^T$ 로서 기초격리장치의 위치벡터를 나타내고,  $f$ 는 기초격리장치에 의한 감쇠력을 나타낸다. 위의 식을 상태공간방정식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{z} = Az + Bf + E\ddot{x}_g \tag{4}$$

여기서,  $A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M_s^{-1}K_s & -M_s^{-1}C_s \end{bmatrix}$ ,  $B = \begin{bmatrix} 0 \\ -M_s^{-1}A \end{bmatrix}$ ,  $E = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}$ 으로 각각 시스템 행렬, 제어행렬, 외란행렬을 나타낸다.

### 3.3 자력을 이용한 Friction Pendulum System의 설계

MR-FPS의 저항력을 결정하는데 가장 중요한 설계요소는 기존 FPS와 같이 구조물의 질량과 관련된 수평강성과



〈그림 5〉 MF-FPS의 설계절차

영구자석의 자력이 고려된 마찰력 그리고 주기와 관련된 곡률반경으로 설계절차는 그림 5와 같다. 여기서 식 (1)의 첫째항은 질량의 상승에 따른 복원력 (수평강성 :  $K_H = \frac{W}{R}$ ), 둘째 항은 슬라이더(Slider)와 오목면(Concave Surface) 사이의 마찰력으로 구성되어 있으며 마찰계수  $\mu$ 는 수직력과 미끄럼 속도의 함수이다. 또한 FPS는 본질적으로 단일매개변수 시스템이고 이 매개변수는 오목면의 반경에 의해 제어된다. 반경은 주기에 관한 식 (2)에 의해서 정해될 수 있으며, 이렇게 정해진 설계요소를 조합하여 수치해석을 위한 MR-FPS를 설계하였다.

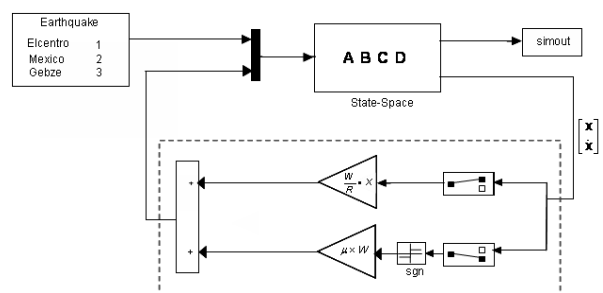
본 연구에서는 MF-FPS(Magnetic Force-Friction Pendulum System)를 이상화된 구조물에 적용하여 해석하였다. MF-FPS는 자력에 의해 마찰계수를 줄여주는데, 앞서의 실험을 통해 자력이 마찰계수  $\mu$ 값을 약 20% 감소시켜줌을 확인하였다. 또한 AASHTO 규격에 따르면 마찰계수를 0.04~0.12로 규정하고 있다. 따라서 기본적인 설계는 FPS를 따르고 단지 마찰계수  $\mu$ 값만 20% 감소시켜 설계하였다(표 4). MF-FPS의 해석 시스템 구성은 구조물에 발생하는 지진하중에 대해 MATLAB Control System Toolbox Package에서 State-space Block을 사용하여 수평 방향력  $F$ 를 결정하는데 필요한 응답  $[u, \dot{u}]$ 으로 수평 방향력  $F$ 를 산출하고 Feedback하여 감쇠하는 방식으로 그림 6과 같다.

### 4. 지진 하중에 따른 기초격리 시스템의 해석 결과

El Centro, Mexico, Gebze 지진에 대한 특성은 표 5에 나타내었고 그림 7과 그림 8은 각각의 가속도 그래프와 주파

〈표 4〉 MF-FPS의 설계변수

설계변수	값
설계주기(T)	3s
반경(R)	2.23m
마찰계수( $\mu$ )	0.08



〈그림 6〉 MF-FPS의 해석 시스템구성

수 특성을 나타내었다. 그 결과는 최대지반가속도의 강도에 의해 나타나는 기초격리장치의 성능을 Base변위와 구조물의 상대변위, 최상층 가속도 순으로 표 6과 같이 비교하였다.

### 4.1 El centro 지진에 대한 해석 결과

표 7에서는 El Centro 지진에 대한 구조물의 상대변위, 최상층 가속도에 대해 나타나 있다. 우선 구조물의 상대 변위에 있어서 MF-FPS는 0.1810mm, FPS는 0.2091mm, 최

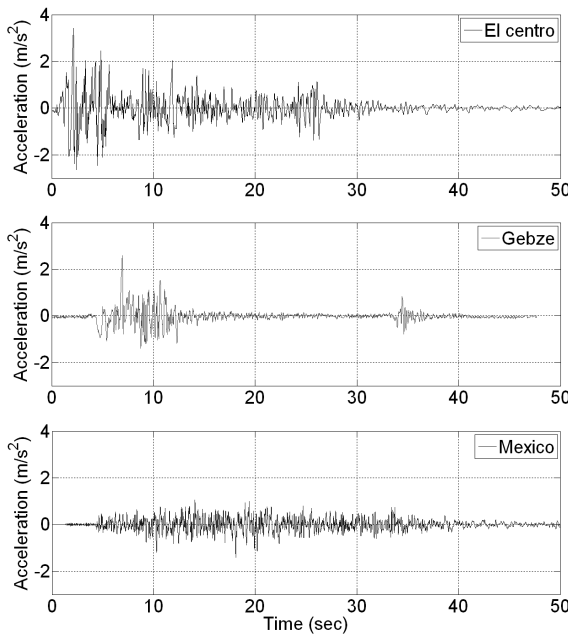
상층 가속도에서는 MF-FPS는 0.7906g, FPS는 0.9277g로서 제안한 MF-FPS는 기존의 FPS에 비해 구조물의 상대 변위, 최상층의 가속도가 각각 15%, 17%의 향상된 결과를 보여주고 있다. 그림 9와 그림 10은 MF-FPS의 기초격리장치로서의 성능을 FPS와 비교하여 보여주고 있다.

### 4.2 Mexico 지진에 대한 해석 결과

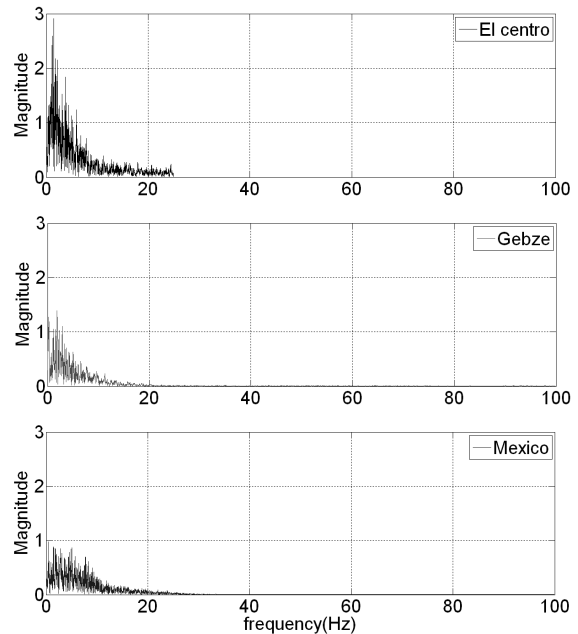
표 8에서는 Mexico 지진에 대한 구조물의 상대변위, 최상층 가속도에 대해 나타나 있다. 우선 구조물의 상대변위에 있어서 MF-FPS는 0.1731mm, FPS는 0.2092mm, 최상층 가속도에서는 MF-FPS는 0.8117g, FPS는 0.8486g로서 제안한 MF-FPS는 기존의 FPS에 비해 구조물의 상대 변위, 최상층의 가속도가 각각 21%, 5%의 향상된 결과를 보여주고 있다. 그림 11과 그림 12는 MF-FPS의 기초격리장치로서의 성능을 FPS와 비교하여 보여주고 있다.

〈표 5〉 적용지진의 특성

지진	발생연도 (년)	기록시간 (sec)	규모	PGA (g)
El Centro	1940	50.02	7.1	0.34
Gebze	1999	47.63	7.6	0.3~0.4
Mexico	1985	50.68	8.1	0.17



〈그림 7〉 각 지진에 대한 가속도 그림



〈그림 8〉 각 지진에 대한 FFT분석

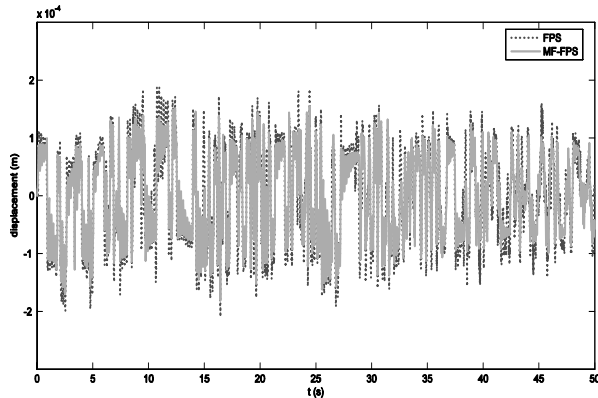
〈표 6〉 지진하중에 따른 기초 격리 시스템의 해석결과

	System	El Centro	Mexico	Gebze
최대 기초 변위(mm)	MF-FPS	177.8065	63.8696	703.4508
	FPS	174.6820	53.8644	661.7745
구조물의 상대 변위(mm)	MF-FPS	0.1810	0.1731	0.3453
	FPS	0.2091	0.2092	0.3478
	Fixed	8.1684	2.3240	4.2796
최상위층의 최대 가속도(g)	MF-FPS	0.7906	0.8117	0.4696
	FPS	0.9277	0.8486	0.5541
	Fixed	13.4801	4.5296	7.4510

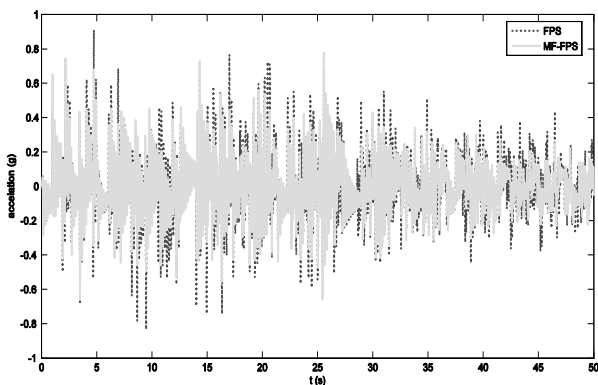
\*MF-FPS( $\mu=0.08$ ), FPS( $\mu=0.1$ )

〈표 7〉 El Centro 지진에 대한 해석 결과

	Drift(mm)		Acceleration(g)	
	Base	Structural	Base	Structural
MF-FPS	177.8065	0.1810	0.9789	0.7906
FPS	174.6820	0.2091	1.2590	0.9277
Fixed	-	8.1684	-	13.4800



〈그림 9〉 El Centro 지진에 대한 구조물의 상대 변위 비교



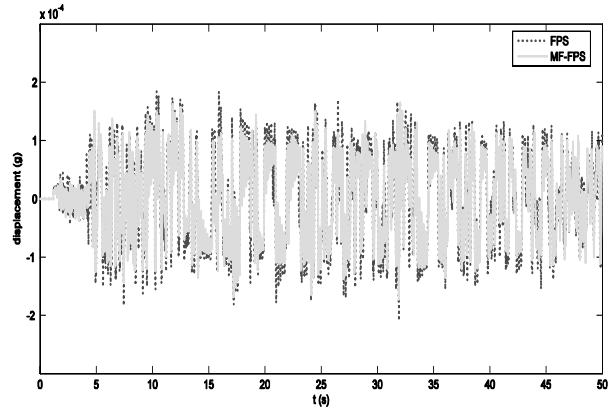
〈그림 10〉 El Centro 지진에 대한 최상층 가속도 비교

〈표 8〉 Mexico 지진에 대한 해석 결과

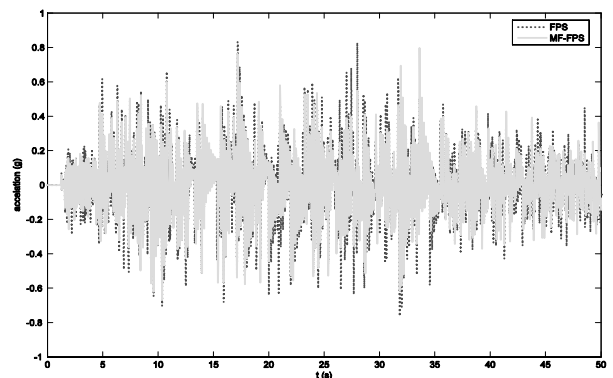
	Drift(mm)		Acceleration(g)	
	Base	Structural	Base	Structural
MF-FPS	63.8696	0.1731	1.0676	0.8117
FPS	53.8644	0.2092	1.4098	0.8486
Fixed	-	2.3240	-	4.5296

### 4.3 Gebze 지진에 대한 해석 결과

표 9에서는 Gebze 지진에 대한 구조물의 상대변위, 최상층 가속도에 대해 나타나 있다. 우선 구조물의 상대변위에 있어서 MF-FPS는 0.3453mm, FPS는 0.3478mm, 최상층 가속도에서는 MF-FPS는 0.4696g, FPS는 0.5541g로서 제안한 MF-FPS는 기존의 FPS에 비해 구조물의 상대 변위, 최상층의 가속도가 각각 1%, 18%의 향상된 결과를 보여주



〈그림 11〉 Mexico 지진에 대한 구조물의 상대 변위 비교



〈그림 12〉 Mexico 지진에 대한 최상층 가속도 비교

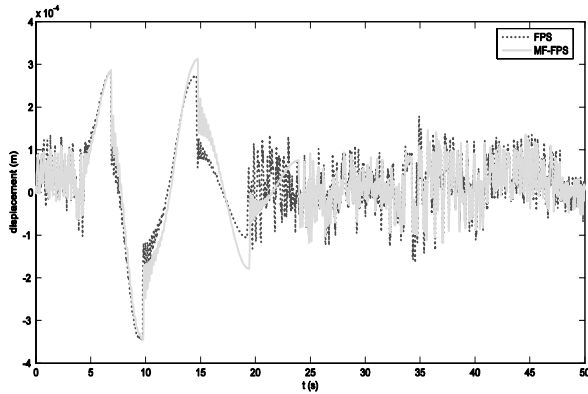
〈표 9〉 Gebze 지진에 대한 해석 결과

	Drift(mm)		Acceleration(g)	
	Base	Structural	Base	Structural
MF-FPS	703.4508	0.3453	0.9592	0.4696
FPS	661.7745	0.3478	1.2085	0.5541
Fixed	-	4.2796	-	7.4510

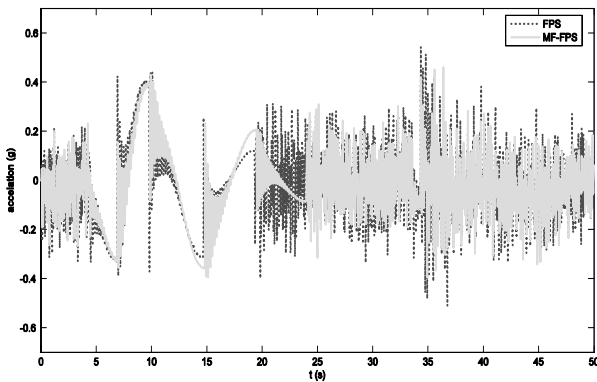
고 있다. 그림 13과 그림 14는 MF-FPS의 기초격리장치로서의 성능을 FPS와 비교하여 보여주고 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 자력의 반발력을 이용해 PTFE의 재료적 성질을 대체 할 수 있는 MF-FPS(Magnetic Force-Friction Pendulum System)을 제안하였다. 제안된 시스템은 자력에 의한 반발력이 수직력을 줄여줌으로써 재료에 의한 마찰계수의 영향을 줄일 수 있음을 가정하였으며, 이를 위해 영구자석을 사용하여 개념적인 실험을 수행하였고 각기 다른 특성을 지닌 El Centro, Mexico, Gebze 지진데이터를 5층 대상 구조물에 입력지진동으로 사용하여 제안한 MF-FPS가 기초격리장치로서의 면진성능을 발휘함을 확인하였다.



〈그림 13〉 Gebze 지진에 대한 구조물의 상대 변위 비교



〈그림 14〉 Gebze 지진에 대한 최상층 가속도 비교

- 실험을 통해 마찰면에 자력이 작용 할 때 마찰계수( $\mu$ )를 약 20%정도 감소시킬 수 있음을 확인 하였다.
- 수치해석을 통해 가정한 마찰계수( $\mu$ )를 적용한 MF-FPS가 다양한 입력지진에 대해서 지진격리장치로서의 성능을 입증할 수 있었다.

이상의 결과로부터 자력을 이용하여 기존의 PTFE 마찰재를 대체 할 수 있는 MF-FPS의 구조적 설계를 할 수 있다면 기존 FPS의 재료적인 측면을 보완 할 수 있는 지진격리장치로서 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

그러나 본 연구에서는 지진격리장치로 MF-FPS라는 새로운 시스템을 제안하기 위한 개념적인 실험과 이를 가정하여 적용한 수치해석만이 시도되었다. 향후 MF-FPS의 구체

적인 설계를 통하여 실구조물에서의 하중지지능력, 감쇠능력, 내구성, 등의 각종 특성에 대한 검증이 필요할 것으로 예상된다. 또한, 본 연구에서 사용한 영구자석을 전자석으로 대체하여 하중지지 능력에 대한 한계성을 극복하고 나아가 반 능동제어로 연구범위를 확대할 수 있을 것으로 사료된다.

### 참고 문헌

1. 심현해, 권오관, “PTFE-폴리아미드 복합 재료의 마찰과 마모 특성”, 한국운할학회지, 제11권, 제4호, 1995, pp. 28-34.
2. American Assoc. of State Highway and Trnsp. Officials (AASHTO), *Standard Specification for Highway Bridges*, 13th Ed., Washington, D.C., 1983.
3. Constantinou, M. C., Mokha, A. S., and Reinhorn, A. M., “Teflon Bearings in Base Isolation II : Modeling,” *J. Struct. Eng.*, Vol 116, No 2, 1990, pp. 455-474.
4. Kelly, J. M., “A Seismic Base Isolation: Review and Bibliography,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 5, 1986, pp. 202-216.
5. Kelly, J. M., Leitmann, G., and Soldatos, A. G., “Robust Control of Base-isolated Structures under Earthquake Excitation,” *Journal of Optimization Theory and Applications*, Vol. 53, No. 2, 1987, pp. 159-180.
6. Mokha, A., Constantinou, M. C. and Reinhorn A. M., “Experimental Study and Analytical Prediction of Earthquake Response of a Sliding Isolation System with a Spherical Surface,” *Nat. ctr. for Earthquake Engrg. Res.*, Report No. NECER-90-0020, State Univ. of New York, Buffalo, NY., 1990.
7. Mokha, A., Constantinou, M. C., and Reinhorn, A. M., “Sliding Isolated Structures: Experiments and Mathematical Modeling,” *ASME PVP Conference*, Hawaii, July 1989, Vol. 181, pp. 101-106.
8. Su, L. and Ahmadi, G., “A Comparative Study of Performances of Various Base Isolation Systems, Part 1: Shear Beam Structures,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 18, 1989, pp. 11-32.
9. Zayas V., Low, S. S., and Mahin, S. A., “The FPS Earthquake Resisting System, Experimental Report,” *Earthquake Engineering Research Center*, Report No. UCB/EERC-87/01, University of California. Berkeley, 1987, 98pp.