

# MR Elastomer를 이용한 구조물의 스마트 면진 시스템 연구개발 동향

## R&D Trend of Smart Base Isolation Systems of Structures Using MR Elastomers



정형조\*



임승현\*\*



구정회\*\*\*

\* 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수  
 \*\* 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사후연구원  
 \*\*\* 미국 Miami University 기계 및 생산공학과 교수

### 1. 머리말

지난 수 십 년 동안 스마트 재료(압전재료(piezoelectric materials), 형상 기억 합금(shape memory alloy), 제어가능한 유체(electro-rheological (ER) 또는 magneto-rheological (MR) fluid) 등)의 우수한 특성을 활용하여 구조물의 성능을 향상시키려는 노력이 여러 공학 분야에서 다양한 방식으로 진행되어 왔다. 특히, 건설 구조공학 분야에서는 지진이나 태풍과 같은 과도한 동적 하중을 받는 대형 구조물의 내진 및 내풍 성능을 향상시키기 위해 스마트 재료 기반의 진동 제어 기술을 적용하려는 연구가 1990년대 후반부터 학계를 중심으로 활발히 수행되었다. 하지만, 현재까지 장대 교량이나 고층 건물과 같은 대형 구조물의 내진 및 내풍 성능 향상을 위해 실제 적용 사례가 있는 스마트 재료는 MR 유체가 거의 유일한 실정이다. 여기서, MR 유체(또는 자기유변 유체)란 물이나 실리콘 오일과 같은 유체 내에 크기가 매우 작고 자성을 띤 입자들을 분산시킨 유체로써, 평소에는 보통의 점성 유체처럼 자유롭게 유동하는 특성을 보이다가 자기장이 가해지면 매우 짧은 시간 안에 미세한 입자들이 정렬해서 유체의 유동을 제한하고 결과적으로 항복 강도(yield strength)를 발생시키는 성질을 가진 특수한 유체

를 의미한다. 이러한 MR 유체를 이용하여 감쇠력을 적절히 조절할 수 있도록 만들어진 유체 댐퍼를 MR 댐퍼라고 하며, MR 유체의 건설 구조공학 분야 응용사례는 MR 댐퍼 형태로 실제 구조물에 적용된 경우가 대부분이다. MR 댐퍼는 기계적인 에너지를 직접 구조물에 가하지 못하기 때문에, MR 댐퍼를 제어 가력기(control actuator)로 도입하여 진동제어 시스템을 구성하게 되면 보통의 능동 제어(active control) 시스템과는 달리 전체 구조 시스템의 안정성을 깨뜨리지 않는 장점이 있다. 또한, MR 댐퍼는 기계적 단순함, 우수한 동적 특성, 적은 전력 요구량, 외부 환경에 대한 강인성 등 제진 장치가 보유해야 할 훌륭한 특성들을 다수 보유하고 있기 때문에 매우 유망한 구조물 제진 장치로 인정받고 있다.

지진하중을 받는 구조물의 내진 성능을 향상시키기 위해 가장 널리 사용되는 제진 방법은 보호해야 할 주요 구조물과 지반을 격리하고 그 사이에 면진장치를 설치하는 방법이다. 이러한 면진 시스템을 구조물에 도입하게 되면, 구조물에 비해 횡방향 강성이 매우 작은 유연한 면진장치의 거동으로 인해 전체 구조 시스템의 기본 고유주기가 길어지게 되고, 결과적으로 지반에서 전달되는 파괴적인 지반운동으로부터 구조물을 보호할 수 있다. 이러한 면진 시스템

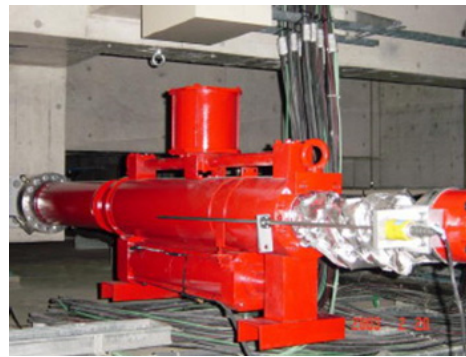


그림 1 MR 댐퍼를 이용한 스마트 면진시스템의 실 구조물 적용 사례<sup>1)</sup>

의 우수한 내진 성능은 미국, 일본 등지에서 실제 발생한 역사 지진을 통해서 입증된 바 있으며, 최근에는 기존 주요 적용 대상 구조물이었던 건물, 교량 등은 물론이고 원자력 발전소 구조물에도 적용하려는 연구가 진행되고 있다. 하지만, 현재까지 대부분의 면진 시스템은 수동형(passive-type)인데, 이러한 수동형 면진 장치는 설계 시에 고려된 지진 하중에는 매우 효과적이지만 다른 특성을 가진 지진이 발생하거나 대상 구조물의 특성이 설계 시와 달라지는 경우에는 면진 성능이 크게 저하될 수 있다는 커다란 약점을 가지고 있다. 위와 같은 문제를 해결하기 위해 다양한 방법이 꽤 오랫동안 연구되어 왔다. 특히, 2000년대 초반 일본과 미국에서는 적층형 고무받침(Laminated Rubber Bearing) 또는 납면진받침(Lead Rubber Bearing)과 같은 기존의 수동형 면진 장치에 MR 댐퍼를 결합한 스마트 면진 시스템을 소개 하였으며 그 유효성을 수치해석 및 실험을 통하여 검증한 바 있다. 그림 1은 이러한 스마트 면진 시스템을 실제 건물에 적용한 사례를 보여주고 있다.<sup>1)</sup> 하지만, 이 경우에는 수동형 면진 장치와 MR 댐퍼 두 장치를 함께 고려해야 하기 때문에 설치 및 유지관리가 용이치 않고, 경제적인 측면에서도 부담이 되는 방식이다. 또한, 장기적인 측면에서 보면 MR 댐퍼는 MR 유체 내의 입자 잔류물에 의한 성능 저하 및 MR 유체 유출에 의한 환경오염 문제 등 다양한 어려움이 존재한다. 더욱이, 성능 측면에서 보면 MR 댐퍼를 이용한 스마트 면진 시스템은 면진 장치를 포함한 전체 구조 시스템의 기본 고유주기는 바꿀 수 없고 단지 감쇠 효과 향상을 통해 구조물의 응답을 감소시키는 방식이기 때문에 설계 시에 예상하지 못했던 주파수에 에너지가 집중된 지진이 발생할 경우 우수한 내진 성능을 기대할 수 없다는 한계를 가지고 있다.<sup>2)</sup>

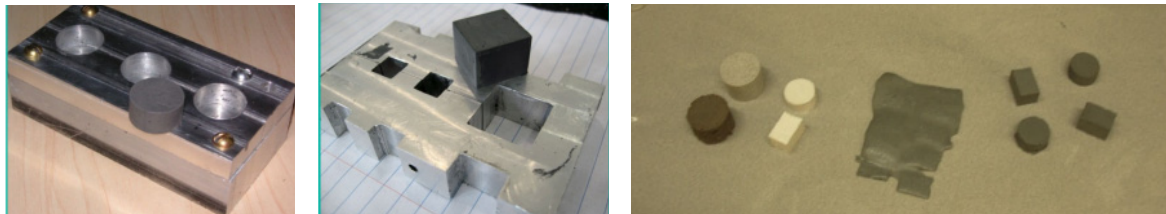
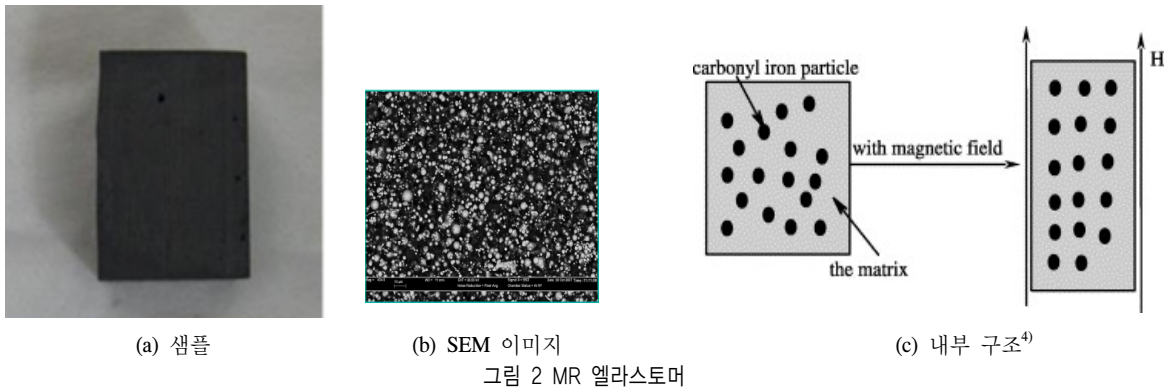
위와 같은 MR 유체를 기반으로 하는 스마트 면진 시스템의 한계를 극복하기 위해, MR 유체와 특성이 유사하지만 고체 형태의 스마트 재료인 MR 엘라스토머(Elastomer)

를 사용하여 스마트 면진 시스템을 구축하려는 시도가 최근 들어 국내·외에서 학계 중심으로 시도되고 있다. MR 엘라스토머는 그 자체로 구조물의 수직하중을 받는 면진 장치의 주재료로 쓰일 수 있기 때문에 면진 시스템을 훨씬 단순하게 구성할 수 있는 커다란 장점을 가진다. 또한, 유체가 아닌 고체 형태이기 때문에 유체 유출 등의 환경적인 염려가 줄어들 수 있다. 하지만, 아직 초기 연구 단계이기 때문에 MR 엘라스토머 기반 스마트 면진 시스템이 구조물의 내진 성능 향상 방법 중 하나로 인정받기 위해서는 아직 해결해야 할 이슈들이 많이 남아 있다.

본 기사에서는 MR 엘라스토머를 이용한 구조물 면진 기술에 대한 최근의 주요 연구개발 동향을 정리하였다. 먼저 MR 엘라스토머에 대해 간략하게 소개한 후에, MR 엘라스토머 기반 스마트 면진 시스템에 대한 연구개발 내용을 다루었다. 마지막으로 이 기술이 실제 구조물에 적용되기 위해서 반드시 해결해야 할 주요 이슈들을 간략히 정리하였다. 본 기사는 관련 분야의 여러 연구들을 일일이 나열하고 설명하는 리뷰 논문이 아니며, 관련 분야의 연구개발 동향을 개략적으로 소개하기 위해 특정한 주요연구 사례를 중심으로 내용을 기술하였음을 밝혀두는 바이다.

## 2. MR 엘라스토머 소개

MR 엘라스토머는 외부 자기장에 의해 강성을 변화시킬 수 있는 스마트 재료이다. MR 엘라스토머는 실리콘 재료나 천연고무와 같은 폴리머 재료 안에 체인 형태로 극성화가 가능한 자성입자를 내포하고 있다(그림 2(b) 참조). MR 엘라스토머에 자기장이 가해 질 경우 내포되어 있는 자성입자의 배열이 달라지며, 자성입자의 배열 변화로 인하여 MR 엘라스토머의 강성이 변하게 되는 것이다(그림 2(c) 참조). MR 엘라스토머는 20세기 중반에 MR 유체 등과 함께 개발되었고, 이후 기계공학 분야에서 활용하기 위해 주로



연구가 이루어 졌다. Ford 연구소에서 천연고무와 합성고무를 이용하여 MR 엘라스토머를 직접 제작하였으며,<sup>3)</sup> 소음 흡수장치, 완충장치 등으로 사용되어져 왔다. MR 유체와는 달리 MR 엘라스토머는 아직 상업용으로 판매가 되지 않기 때문에 MR 엘라스토머의 R&D를 위해서는 적용 대상에 따라 사용자가 MR 엘라스토머를 직접 제작(custom made)해야 한다. 그리고 제작된 재료의 기계적 특성시험을 수행해서 성능을 파악한 후 특성시험 결과를 바탕으로 MR 엘라스토머의 거동을 표현할 수 있는 수학적 모델을 구성해서 대상 구조물에 적용 수치해석과 제어를 개발하는 것이 일반적인 순서이다.

MR 엘라스토머 제작을 위해서는 실리콘 고무, 이형제, 경화제, 자성입자(일반적으로 철입자 사용) 등이 주재료가 된다. 실리콘 고무는 MR 엘라스토머가 탄성을 갖도록 하고 자성입자는 외부에서 가해주는 자기장에 따라 배열을 달리 해 MR 엘라스토머의 탄성 특성이 변화하도록 한다. 자성입자들은 임의적으로 적절히 분포시켜 MR 엘라스토머 샘플이 등방성(isotropic)을 갖도록 하거나 일정하게 분포시켜 이방성(anisotropic)을 갖도록 할 수 있다. 등방성을 갖는 MR 엘라스토머와 이방성을 갖는 MR 엘라스토머는 자기장을 가했을 때 서로 다른 기계적 성질이나 MR 효과를 보이는데 통상적으로는 자기장 내에서 MR 엘라스토머 재료를 경화시켜 이방성을 갖도록 하는 것이 MR effect를 높이는 데 더 효과적인 것으로 알려져 있다. 저자의 연구팀

에서는 10 $\mu$ m의 자성입자와 엘라스토머(실리콘 고무) 수지를 다양한 비율로 배합하고 경화시켜 MR 엘라스토머 샘플을 제작한 바 있다. 샘플은 원통 형태와 직육면체 형태의 두 종류로 제작하였으며, 각 dimension이 2cm가 넘지 않는 매우 작은 크기였고, 사용된 자성입자는 구형이었다. 면진 장치로 활용하려면 모든 방향으로 동일한 성질을 가지고 있는 것이 유리하므로 등방성 MR 엘라스토머 샘플을 제작하였다. 그림 2(a)와 2(b)에 제작된 샘플과 SEM 이미지를 각각 나타내었다. SEM 이미지에서 볼 수 있듯이 자성입자들이 균일하게 분포되어 있다. MR 엘라스토머는 그림 3에서 보는 바와 같이, 다양한 형태와 크기로 제작이 가능한 큰 장점이 있다.

MR 엘라스토머의 특성시험은 하중의 방향에 따라 압축 및 전단 시험으로 구분되고 자기장의 세기를 변화시켜 주면서 힘-변위 특성을 측정해야 하기 때문에 보통 추가적인 시험 장치를 구성해야 한다. 여기서는 저자의 연구팀에서 MR 엘라스토머 소형 샘플을 직접 제작하고 이에 대해 수행한 특성 시험의 내용 및 결과에 대해서 간략히 소개하고자 한다. 이에 대한 보다 자세한 내용은 참고문헌 [5-6]에서 찾아볼 수 있다. 먼저, MR 엘라스토머의 압축특성 실험을 수행하기 위해 그림 4(a)와 같이 실험장치를 구성하였다. 압축특성을 확인하기 위하여 영구자석을 MR 엘라스토머 샘플의 압축방향을 따라 배치하여 자기장을 가해주도록 하였으며 자기장의 세기는 자석의 위치를 위, 아래로 움직임



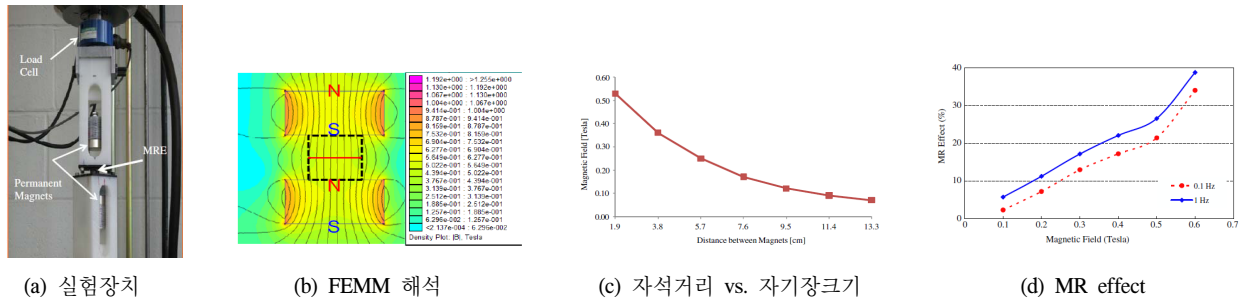


그림 4 MR 엘라스토머에 대한 압축실험<sup>5)</sup>

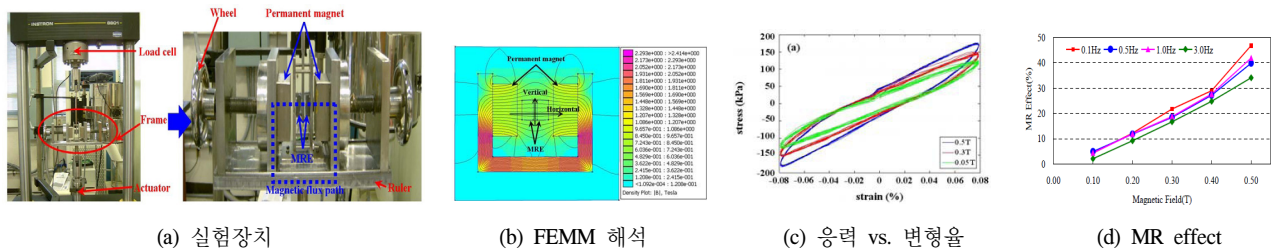


그림 5 MR 엘라스토머에 대한 전단실험<sup>6)</sup>

으로써 조절하였다. 이를 UTM에 설치하여 반복적인 압축을 가해주면서 변위와 압축력을 계측하였다. 실험조건에 맞는 영구자석을 선택하기 위하여 Finite Element Method Magnetics (FEMM) 프로그램을 이용하여 자기장의 세기를 조사하였다(그림 4(b) 참조). FEMM 해석 결과를 바탕으로 영구자석의 크기와 종류를 선택하였다. 그림 4(c)는 두 개의 영구자석 사이의 거리에 따른 자기장의 크기를 나타낸다. 자기장의 크기는 영구자석 사이 거리에 따라 지수형태를 보임을 확인할 수 있다. 실험은 주파수를 0.1Hz와 1Hz로, 자기장의 세기를 0T ~ 0.6T로 조절하면서 수행하였다. MR 엘라스토머샘플의 압축특성에서의 자기장의 영향을 정량적으로 규명하기 위하여 MR effect를 계산하였다(그림 4(d)). 여기서, MR effect는 자기장이 없을 때의 최대 응력 대비 자기장이 가해졌을 때의 최대 응력 증가 비율, 즉 재료의 응력 증가율로 정의하였다. 그림에서 알 수 있듯이, 가진 주파수가 커질수록 MR effect는 증가하였으며, 또한 자기장의 크기가 커질수록 마찬가지로 증가하였다. 제작된 샘플의 강성변화가 40%가까이 가능함을 의미한다.

MR 엘라스토머의 전단특성 실험 수행을 위해 그림 5(a)와 같이 실험장치를 구성하였다. 압축실험과는 달리 MR 엘라스토머 샘플을 위아래로 움직이는 bar에 양쪽으로 설치하고 다른 면은 움직이지 않는 하부에 설치하여 전단을 발생시켰다. 영구자석을 샘플의 양쪽에 배치하여 자기장을 가해주도록 하였으며 자기장의 세기는 자석의 위치를 양쪽 끝단의 휠을 이용하여 좌우로 움직임으로써 조절하였다.

자석과 MRE 샘플이 설치된 프레임은 프레임을 통해 자기장이 폐회로를 구성하며 작용할 수 있도록 강재로 제작하였다. 일반적으로 폐회로를 구성하는 것이 개회로인 경우에 비해 자기장의 손실이 적어 입력전력 대비 자기장의 세기를 높이는 데 보다 효율적이기 때문이다. 이 프레임을 UTM에 설치하여 반복적인 변위를 발생시키면서 변위와 힘을 계측하였다. 실험 전에 MR 엘라스토머 샘플에 등분포의 자기장이 가해지는지 확인하고 적절한 자석의 자기장 세기와 크기를 결정하기 위하여 FEMM을 이용한 해석을 수행하였다(그림 5(b) 참조). 실험은 주파수를 0.1Hz, 0.5Hz, 1Hz, 2Hz, 3Hz로, 자기장의 세기를 0.05T, 0.1T, 0.2T, 0.3T, 0.4T, 0.5T로, 전단변형 크기를 1mm, 2mm, 3mm로 조절하면서 수행하였다. 그림 5(c)는 자기장 크기에 따른 변형률-응력 이력곡선을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, 가해지는 자기장의 크기가 커질수록 응력이 커진다. 그림 5(d)는 계산된 MR effect 값을 나타내어, 자기장의 크기가 커짐에 따라 MR effect 또한 증가함을 볼 수 있다. 최대 MR effect의 경우 거의 50%에 달하고, 이는 MR 엘라스토머 샘플의 강성변화 또한 50%가까이 됨을 의미한다.

앞에서 얻어진 전단특성 실험 결과를 수학적 모델링을 통해 모사하기 위하여, 그림 6(a)와 같이 Bouc-Wen 모델과 스프링 및 감쇠기 요소를 사용하여 동적 모델을 구성하였다.<sup>7)</sup> 이러한 동적 모델은 이후 MR 엘라스토머 기반 면진 시스템에 대한 수치해석을 수행하는데 활용될 수 있다. 여기서, Bouc-Wen 모델은 시스템의 비선형 이력 특성을 모사

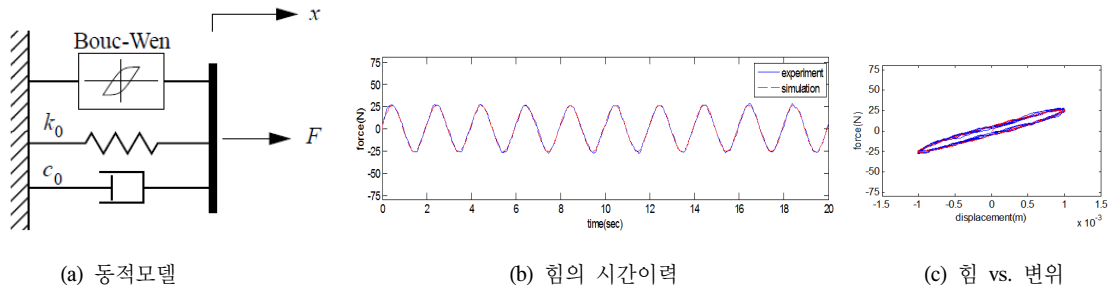


그림 6 Bouc-Wen 모델 기반의 동적 모델<sup>7)</sup>

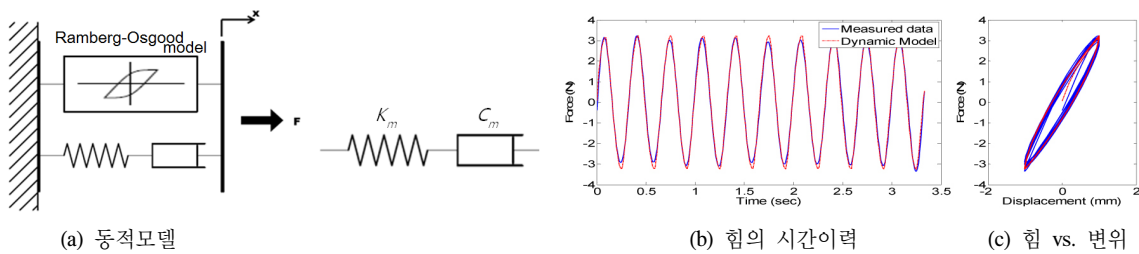


그림 7 개선된 동적 모델<sup>8)</sup>

하기 위해 사용되었는데, 이 모델은 변위와 힘의 이력특성을 잘 표현하며 가상변위를 나타내는 상태변수를 도입하여 비선형 이력 특성을 잘 표현한다. 구성된 MR 엘라스토머의 동적 모델에 대한 파라미터들은 최적화 기법을 이용하여 구해졌다. 마지막으로, 동적 모델로부터 얻어진 예측값과 실제 실험 결과값을 비교하여 동적 모델의 효용성을 검증하였다. 그림 6(b)와 6(c)는 각각 힘의 시간이력 및 힘-변위 이력 곡선을 보여주고 있다. 그림에서 나타난 바와 같이 수학적으로 모델링 된 MR 엘라스토머의 동적 모델이 실제 샘플의 전단 거동 특성을 잘 모사하고 있다. MR 엘라스토머의 복잡한 비선형 이력 거동 및 힘-변위 관계를 좀 더 정확하고 간단하게 모사할 뿐만 아니라 MR 엘라스토머의 점탄성 특성까지도 고려할 수 있도록 Ramberg-Osgood 모델과 Maxwell 모델이 조합된 동적 모델도 최근 제안되었다.<sup>8)</sup>

### 3. MR 엘라스토머 기반 구조물 면진 시스템 연구

MR 엘라스토머는 건설 구조공학 분야에서 구조물의 내진 성능을 향상시키기 위한 면진 장치로 활용하기 위하여 2006년 황인호 등<sup>9)</sup>에 의해서 기본 개념이 제안된 바 있으며, 이어서 Koo 등(2008)<sup>10)</sup>도 유사한 연구 성과를 발표한 바 있다. 그림 8은 MR 엘라스토머 기반 스마트 면진 시스템의 개념도이다. 그림에서 볼 수 있듯이, MR 엘라스토머 기반의 면진 장치는 상부 구조물의 수직하중을 지지할 뿐

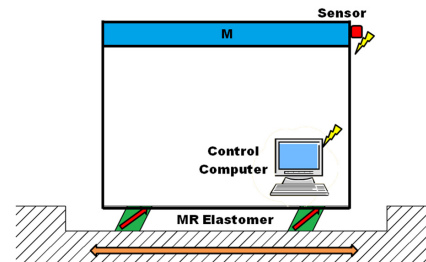
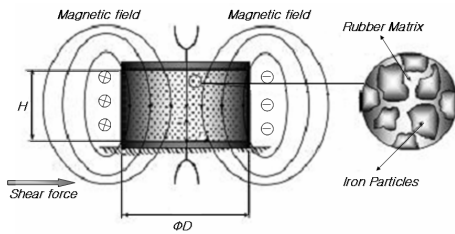


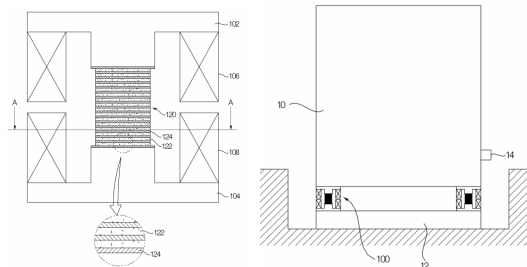
그림 8 MR 엘라스토머 기반 스마트 면진 시스템 개념도<sup>7)</sup>

만 아니라, 수평 방향의 지진하중을 상부 구조물에 전달되지 않도록 함으로써 구조물을 보호하는 역할을 한다. 또한, MR 엘라스토머는 가해진 자기장의 크기에 따라 특성이 바뀌는 스마트 재료이므로 센서, 컴퓨터와 함께 스마트 면진 시스템을 구성하여 대상 구조물을 지진으로부터 보다 ‘스마트’하게 보호할 수 있다. 본 절에서는 MR 엘라스토머를 구조물의 면진 시스템에 적용하고자 하는 연구들의 최근 동향과 해결해야 할 문제를 기술하고자 한다.

MR 엘라스토머 기반 스마트 면진 시스템과 관련하여 처음 제안된 시스템은 면진장치의 고무 부분을 MR 엘라스토머로 대체하고 여기에 자기장을 가함으로써 강성을 변화시키고 최종적으로는 면진 구조물의 기본 고유주기를 바꾸어서 상부의 구조물을 지진하중으로부터 보호하겠다는 개념이다(그림 9(a) 참조).<sup>9)</sup> 그림 9(b)는 이러한 기본 개념을 실제로 구현하기 위해 고려해야 할 점들을 감안하여 기본 개념을 보다 구체화시킨 사례이다.<sup>11)</sup>

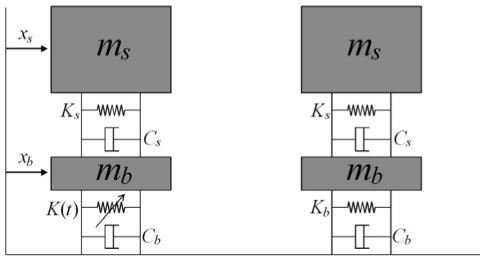


(a) 황인호 등<sup>9)</sup>이 제안한 기본 개념

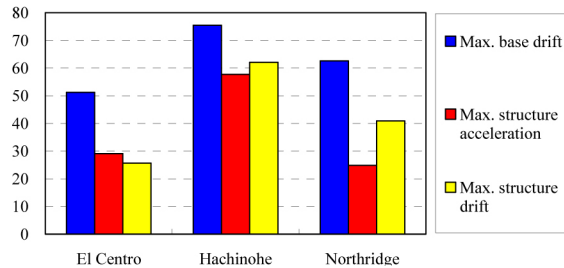


(b) 정형조 등<sup>11)</sup>이 구체화한 스마트 면진 시스템

그림 9 MR 엘라스토머 기반 스마트 면진 시스템에 대한 기본 개념



(a) 2자유도 모델



(b) 해석 결과

그림 10 MR엘라스토머 기반 스마트 면진 시스템에 대한 초기 수치해석 결과<sup>12)</sup>

초기에는 위와 같은 개념 제안 연구와 함께 MR 엘라스토머 기반 스마트 면진 시스템이 이상적으로 작동한다고 가정하고 이러한 시스템을 실제 구조물에 적용하였을 경우에 내진 성능이 향상됨을 수치해석을 통해 검증하는 연구가 수행되었다. 즉, 면진 시스템을 단순히 강성 변화 장치(variable stiffness device)로 고려해서(즉, 장치의 동역학을 고려하지 않고 이상화시킴), 지진의 에너지가 집중되어 있는 주진동수 대역을 회피하는 방식으로 내진 성능을 향상시키는 방법을 말한다. 그림 10은 이러한 초기 수치해석 연구의 한 사례를 보여준다.<sup>12)</sup> 그림 10(a)에서와 같이, 면진 시스템을 2자유도로 단순하게 고려하고, 수동형 면진 장치는 스프링 요소와 감쇠 요소로 고려한 반면에 MR 엘라스토머 기반 면진 장치는 강성이 변하는 스프링 요소로 이상화하였다. 이러한 모델을 이용한 수치해석 결과는 그림 10(b)와 같다. 이 그래프에서 수직축의 값은 스마트 면진 시스템의 결과를 수동형 면진 시스템의 결과로 나눈 값을 백분율로 나타낸 것이다. 3개의 역사지진 하중과 3가지의 구조물 응답에 대해서 모두 스마트 면진 시스템이 우수한 성능을 보이고 있다(최대 75%, 최소 25%의 성능향상).

MR 엘라스토머 자체에 대한 특성 실험 및 특성 연구는 건설 분야가 아닌 기계나 재료 분야에서 먼저 연구가 수행되어 왔으며 이는 이전 절에서 간략히 소개한 바 있다. 하지만, 구조물의 면진 장치를 MR 엘라스토머를 활용하기 위해서는 적층형 고무 받침(Laminated Rubber Bearing)처럼

이 재료도 적층형태로 구성해야만 한다. 왜냐하면, 일반적으로 고무만을 이용한 탄성고무받침(Rubber Bearing)의 경우 연직방향으로 큰 하중을 작용시키면 연직방향으로의 변화도 클 뿐만 아니라, 횡방향으로 부풀어 오르게 되어(즉, Bulging Effect가 발생하여) 구조물을 안정하게 지지할 수 없다. 그에 반해 고무 사이사이에 강판을 넣은 적층형 고무 받침(Laminated Rubber Bearing)은 연직방향 및 횡방향의 변형이 크게 억제되어 탄성고무받침의 단점을 보완할 수 있다. 또한 수평방향으로의 전단변형의 크기 또한 별 차이가 없다. MR 엘라스토머도 고무 재료와 비슷하게 유연성이 높아서(즉, 강성이 크지 않아서) 크기가 커질수록 구조물의 수직 하중을 안정적으로 지지할 수가 없는 문제가 있다. 이러한 문제는 원칙적으로 적층형 MR 엘라스토머를 개발함으로써 해결할 수 있다.<sup>13),14)</sup> 즉, 얇은 판 형태의 MR 엘라스토머를 다수 준비한 후 그 사이사이에 얇은 강판(또는 알루미늄판)을 넣어줌으로써 적층형 MR 엘라스토머를 제작할 수 있다. 최근 호주의 Sydney 공대와 Wollongong 대학 공동연구팀은 그림 12와 같이 MR 엘라스토머 기반 적층형 면진장치를 제작한 후에 다양한 특성 실험을 통해 제작된 장치가 매우 우수한 강성 변화 능력을 보이고 있음을 보고한 바 있다.<sup>2)</sup>

앞에서 수행된 MR 엘라스토머의 특성실험을 바탕으로 얻어진 동적모델을 고려해서 면진 구조물에 대한 지진해석을 수행한 수치적인 연구도 진행되었다.<sup>7)</sup> 그림 13은 이와

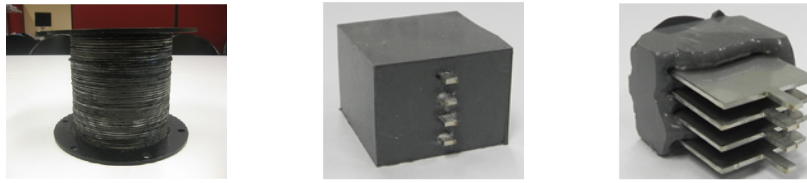
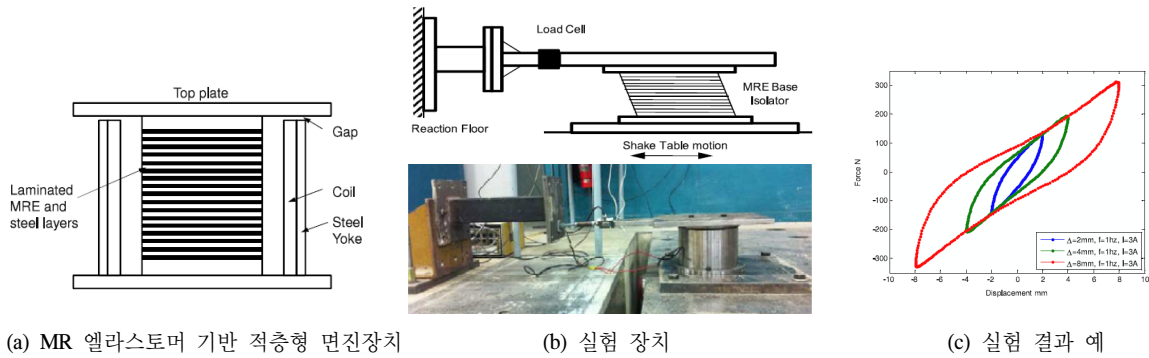
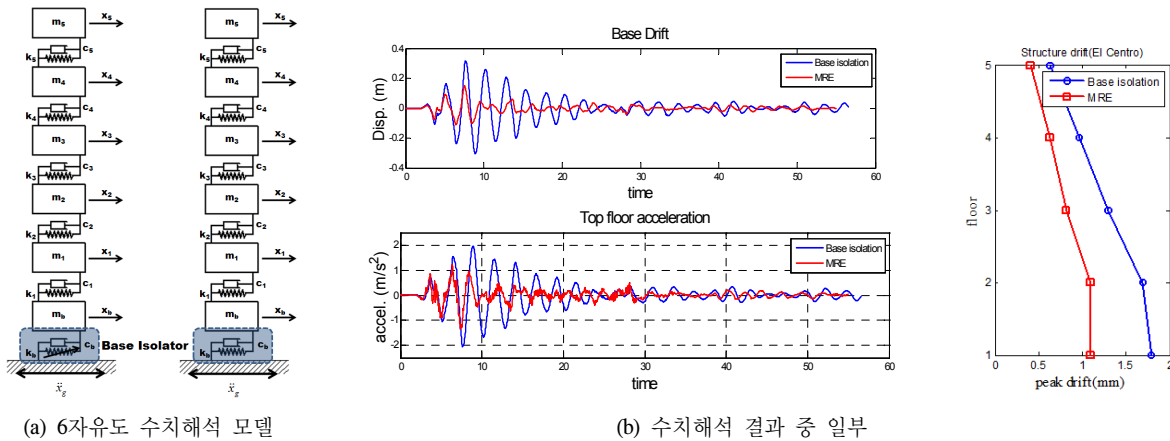


그림 11 MR 엘라스토머를 이용한 적층형 면진받침 샘플<sup>13),14)</sup>



(a) MR 엘라스토머 기반 적층형 면진장치 (b) 실험 장치 (c) 실험 결과 예

그림 12 MR 엘라스토머 기반 적층형 면진장치에 대한 특성실험 연구<sup>2)</sup>



(a) 6자유도 수치해석 모델 (b) 수치해석 결과 중 일부

그림 13 MR 엘라스토머의 동역학을 고려한 면진 구조물 수치해석<sup>7)</sup>

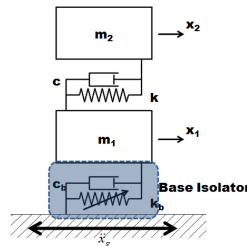
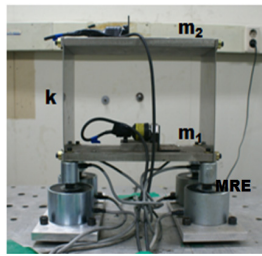
관련하여 수행된 연구 중 일부이다. 그림에서 볼 수 있듯이, MR 엘라스토머 기반 스마트 면진 시스템이 기존 수동형 면진 시스템에 비해 매우 우수한 구조물 응답 저감 성능을 보이고 있다.

비록 소형이긴 하지만, 실제 제작된 MR 엘라스토머 기반 면진장치를 이용한 스마트 면진 시스템을 구성하고 이 시스템의 성능을 실험을 통해 검증한 연구도 수행되었다.<sup>7)</sup> 그림 14(a)는 관련 실험장치를 보여주고 있다. 대상 구조물은 1층 프레임 구조이고 면진 시스템을 도입해서 전체 면진 구조 시스템은 2자유도로 고려할 수 있다. 진동대 실험을 통해 얻어진 실제 구조물의 거동과 수치해석을 통해 계산된 결과와 비교하여 두 경우가 잘 일치함을 확인하였고

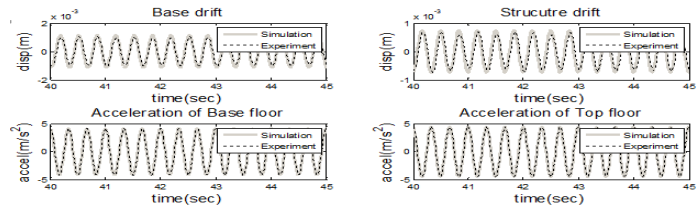
(그림 14(b)), 이를 바탕으로 퍼지 제어를 도입한 스마트 면진 시스템의 성능을 수치해석으로 검증하였다(그림 14(c)).

앞 절에서 MR 엘라스토머의 거동을 모사할 수 있는 동적 모델을 개발하기 위한 연구에 대하여 소개한 바 있으나, 매우 복잡한 MR 엘라스토머의 비선형 동적 거동을 항상 제대로 모사하는 모델을 확보하는 것은 매우 어려운 일이다. 또한, 건설 분야에서 대상으로 하는 대형 구조물을 직접 실험체로 고려하는 것도 쉬운 일이 아니다. 이렇듯, 수치해석을 통해 연구를 수행하는 경우의 어려움과 실험을 통해 연구를 수행하는 경우의 어려움을 한꺼번에 해결하기 위해 고려되고 있는 연구 전략이 하이브리드 시뮬레이션 방법이다. 하이브리드 시뮬레이션이란 수치해석과 실험을

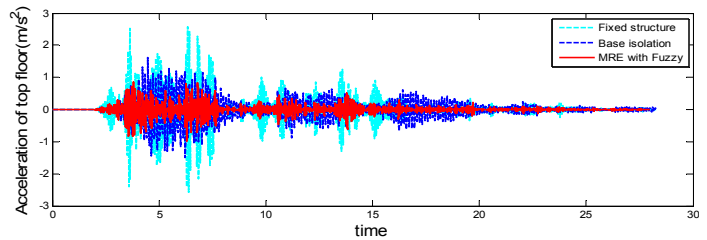




(a) 실험장치

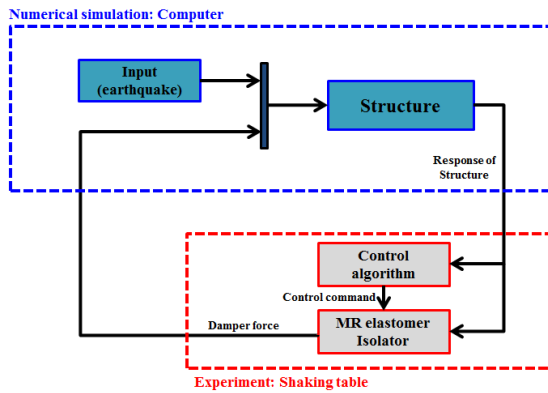


(b) 실험결과와 수치해석 결과와의 비교

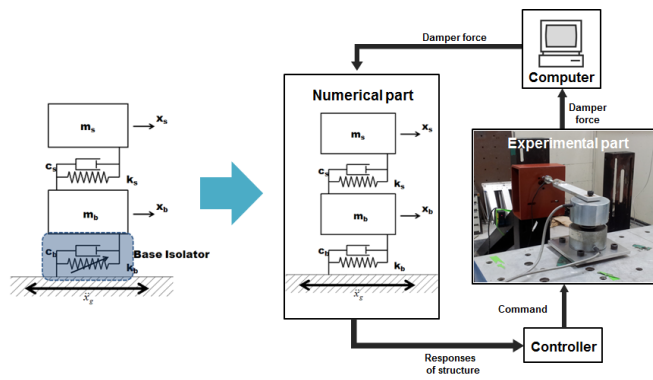


(c) 퍼지제어를 고려한 스마트 면진 시스템의 성능 검증

그림 14 MR 엘라스토머 기반 스마트 면진 시스템의 성능 검증을 위한 실험적 연구<sup>7)</sup>



(a) 블록 다이어그램



(b) 개념도

그림 15 스마트 면진 시스템을 위한 하이브리드 시뮬레이션<sup>14)</sup>

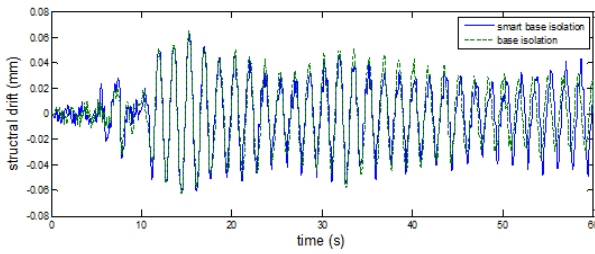
결합하여 동시에 수행하는 것을 말한다. 본 연구주제에서 하이브리드 시뮬레이션은 수치적으로 MR 엘라스토머의 동적거동을 표현하는 어려움과 대상 구조물 크기로 인한 실험 수행의 어려움을 동시에 해소할 수 있어, 매우 효율적인 연구 방법이라고 할 수 있다.

MR 엘라스토머 기반 스마트 면진시스템의 내진 성능을 확인하기 위한 하이브리드 시뮬레이션의 개요도를 그림 14에 나타내었다. 그림 15(a)와 15(b)에서 보이는 것처럼 수치해석에서 지진에 의한 MR 엘라스토머 면진장치의 변형이 계산되고, 이 값이 진동대에 전달이 되어 MR 엘라스토머 면진 장치의 변형을 실제로 일으킨다. 그리고 센서를 통해 계측된 면진 장치에 발생하는 하중을 수치해석 부분의 입력으로 고려하여 수치해석을 수행한다. 그림 16은 하이브리드 시뮬레이션의 결과 중 일부를 보여주고 있다. 그림

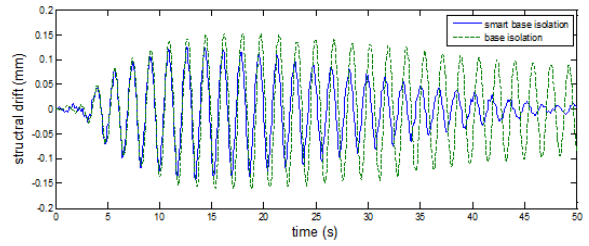
16(a)는 최대하중의 크기가 조정된 El Centro 지진이 입력 하중으로 고려된 경우의 결과인데, 이때에는 기존 면진 시스템과 스마트 면진 시스템의 결과에 큰 차이가 없다. 하지만 다른 입력 하중의 경우에는 스마트 면진 시스템의 내진 성능이 기존 면진 시스템 보다 훨씬 우수함을 알 수 있다(그림 16(b)). 즉, 스마트 면진 시스템은 입력 하중의 특성이 달라지더라도 우수한 내진 성능을 계속 보유하는 반면에, 기존 면진 시스템은 설계 시에 고려된 하중의 경우에는 우수한 성능을 보이지만, 설계 하중과 특성이 많이 다른 하중이 작용하는 경우에는 성능이 현저히 저하됨을 알 수 있다.

이상에서 살펴보았듯이, 지난 수년 동안 MR 엘라스토머를 활용하여 보다 우수한 성능을 갖는 구조물 면진 시스템을 개발하기 위한 연구가 국내외 학계를 중심으로 수행되었다. 특성 실험, 수치해석, 축소모형 실험, 하이브리드 시





(a) 입력하중이 크기 조정된 El Centro 지진인 경우



(b) 입력하중이 인공지진인 경우

그림 16 하이브리드 시뮬레이션 결과<sup>14)</sup>

물레이션 등 다양한 방식으로 수행된 연구를 통해 MR 엘라스토머 기반 스마트 면진 시스템의 효용성 및 적용가능성이 일정 부분 확인되었으나, 이 시스템이 건설 분야의 대형 구조물에 실제로 적용되기 위해서는 여러 가지 이슈들이 먼저 해결되어야만 한다. 첫 번째로, MR 엘라스토머를 대형화시키기가 쉽지 않다는 점이다. 실 구조물에 적용되는 면진장치는 지름이 작게는 수십 cm에서 크게는 1m가 넘는데 반해 현재 제작되고 있는 MR 엘라스토머의 크기는 대부분 수 cm에 머무르고 있으며, 최근에서야 14cm 지름의 적층형 MR 엘라스토머 샘플 제작이 보고되었다.<sup>13)</sup> 하지만 MR 엘라스토머의 크기가 1m 내외까지 대형화되려면 관련 제작 기술이 더욱 고도화되어야만 한다. MR 엘라스토머의 대형화보다 더욱 어려운 이슈는 짧은 시간 내에 대형 MR 엘라스토머의 강성을 변화시킬 수 있는 Electromagnet System을 구축하는 것이다. 이러한 시스템은 제작하기도 용이하지 않을 뿐만 아니라, 제작한다고 하더라도 이 시스템을 작동하기 위해서는 매우 큰 용량의 전력이 필요하다는 문제점이 여전히 존재한다. 따라서 MR 엘라스토머 기반 스마트 면진 시스템을 대형 구조물에 효과적으로 적용하기 위해서는 위와 같은 문제점들을 근본적으로 해결할 수 있는 획기적인 아이디어가 필요하다.

#### 4. 맺음말


본 기사에서는 구조물의 내진 성능 향상을 위한 첨단 기법으로 최근 관심이 높아지고 있는 MR 엘라스토머 기반 스마트 면진 시스템에 대한 최근 연구개발 동향을 주요 연구 사례를 중심으로 정리해 보았다. 먼저, MR 엘라스토머의 정의, 제작 방법, 특성 실험 및 이를 통해 얻어진 동적 모델 등을 간략하게 소개한 후, 건설 구조공학 분야에서 수행된 MR 엘라스토머를 이용한 구조물 면진 시스템에 대한 주요 연구사례를 조사·정리하였다. 대형 구조물의 면진 시스템으로 활용하기 위한 전략으로 적층형 MR 엘라스토머

가 개발되었고, 보다 효과적으로 스마트 면진 시스템의 성능을 검증하기 위하여 수치해석, 축소모형 실험뿐만 아니라 하이브리드 시뮬레이션 방법도 활용되고 있었으며, 이러한 연구들을 통해 MR 엘라스토머 기반 스마트 면진 시스템이 대형 구조물의 효과적인 내진 성능향상 방안이 될 수 있음을 일정 부분 확인하였다. 마지막으로 이 시스템이 실제 대형 구조물에 적용되기 위해서 해결되어야 하는 여러 가지 문제점에 대해서도 간단히 기술하였다.

결론적으로 MR 엘라스토머를 이용한 스마트 면진 기술은 다양한 지진 하중을 받는 대형 구조물의 과도한 동적 거동을 저감하기 위한 대책으로 효과적으로 사용될 가능성이 높으며, 관련 연구가 아직 초기단계이므로 국내에서도 이에 대한 보다 활발한 연구개발을 수행하여 독자적인 기술력을 확보한다면 향후 건설 구조공학 분야에서 파급효과가 매우 클 것으로 사료된다.

#### 참 고 문 헌

1. Spencer, B.F., Jr. and Nagarajaiah, S. 2003. "State of the Art of Structural Control," *Journal of Structural Engineering*, 129(7), 845-856.
2. Li, Y., Li, J, Tian, T. and Li, W. 2013. "A Highly Adjustable Magnetorheological Elastomer Base Isolator for Applications of Real-time Adaptive Control", *Smart Materials and Structures*, 22, 095020.
3. Ginder, J.M., Nicholas, M.E., Elie, L.D. and Clark, S.M. 2000. "Controllable-Stiffness Components Based on Magnetorheological Elastomers", *Proceedings of SPIE*, 3985, 418-425.
4. Wang, Y.L., Hu, Y., Gong, X.L., Jiang, W.Q., Zhang, P.Q. and Ghen, Z. 2006. "Preparation and Properties of Magnetorheological Elastomers Based on Silicon Rubber/Polystyrene Blend Matrix, *Journal of Applied Polymer*

- Science*, 103: 3143-3140.
5. Koo, J.H., Khan, F., Jang, D.D. and Jung, H.J. 2010. "Dynamic Characterization and Modeling of Magneto-Rheological Elastomers under Compressive Loadings," *Smart Materials and Structures*, 19, 117002.
  6. Jung, H.J., Lee, S.J., Jang, D.D., Kim, I.H., Koo, J.H. and Khan, F. 2009. "Dynamic Characterization of Magneto-rheological Elastomers in Shear Mode," *IEEE Transactions on Magnetics*, 40(15), 3930-3933.
  7. H.J. Jung, S.H. Eem, D.D. Jang, J.H. Koo, "Seismic Performance Analysis of a Smart Base-Isolation System Considering Dynamics of MR Elastomers," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 22(13), 1439-1450.
  8. S.H. Eem, H.J. Jung, J.H. Koo, "Modeling of Magneto-rheological Elastomers for Harmonic Shear Deformation," *IEEE Transactions on Magnetics*, 48(11), 3080-3083, Nov. 2012
  9. 황인호, 임종혁, 이종세 2006. "A Study on Base Isolation Performance of Magneto-Sensitive Rubbers", 한국지진공학회 논문집, 10, 77-84.
  10. Koo, J.H., Sung, S.H., Lee, H.J. and Jung, H.J. 2008. "Seismic Protection of Structures Using Smart Base Isolation Systems based on MR Elastomers," *The Fourth International Conference on Advances in Structural Engineering and Mechanics*, Jeju, Korea.
  11. 정형조, 임승현, 장동두 2014. "반능동 면진받침장치," 국내 발명특허 (등록번호: 10-1369897).
  12. Koo, J.H., Jang, D.D., Usman, M. and Jung, H.J. 2009. "A Feasibility Study on Smart Base Isolation Systems Using Magneto-Rheological Elastomers," *Structural Engineering and Mechanics*, 32(6), 755-770.
  13. Li, Y., Li, J., Lee, W. and Samali, B. 2013. "Development and Characterization of a Magnetorheological Elastomer Based Adaptive Seismic Isolator", *Smart Materials and Structures*, 22, 035005.
  14. Eem, S.H., Jung, H.J. and Koo, J.H. 2013. "Seismic Performance Evaluation of an MR Elastomer-based Smart Base Isolation System Using Real-time Hybrid Simulation", *Smart Materials and Structures*, 22, 055003. 

[담당 : 정형조 편집위원]