 <p>특 집</p> <p>스마트 재료 시스템 기술</p>	<h2 style="text-align: center;">MR 유체의 특성과 진동 분야에 관한 응용연구 사례 및 연구동향</h2> <p style="text-align: center;">최승복*, 홍성룡**, Morman M. Wereley** (*인하대학교 기계공학과, **매릴랜드대학 항공공학과)</p>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

1. 머리말

기계, 항공, 건축, 토목 등 각종 분야의 구조물 및 시스템에서 발생하는 소음/진동을 효과적으로 차단 시키기 위한 연구가 끊임없이 진행되어 왔다. 이러한 기술의 일환으로 구조물에 스프링, 유체댐퍼, 고무 등을 부착하여 외부의 진동을 차단하는 방법이 보편적으로 널리 적용되어 왔다. 탄성을 기본 특성으로 하는 스프링은 하중을 지지함과 동시에 비공진주파수 대역에서의 진동을 절연시키는 역할을 한다. 스프링이 적용된 시스템은 공진주파수 성분의 외란입력에 대하여 진동이 증폭되는 특성을 보이며, 이를 감소시키기 위하여 주로 댐퍼와 함께 병렬로 구성된다. 유체댐퍼는 충격감소와 공진주파수 대역에서의 진동감소를 위하여 큰 댐핑을 발생시키도록 설계되어 진동에너지가 소산시키는 역할을 한다. 이러한 유체댐퍼의 댐핑상수는 일정한 값을 갖도록 설계되므로, 비공진주파수 대역에서는 진동레벨이 증가하는 단점을 피할 수 없다. 고무는 탄성과 점성을 한 몸체에 지니고 있으며, 분포형 또는 이산형 작동기로 구조물에 적용될 수 있다. 고무가 분포형 작동기로 적용되는 경우는 구조물 사이에 고무를 삽입 또는 접합하여 샌드위치

형태의 구조물을 구성하는 방법이 있다. 이 방법은 점탄성 물질의 히스테리시스에 의한 구조물의 에너지 분산을 얻어 낸다. 고무재료가 이산형 작동기로 적용되는 경우는 엔진, 모터와 같은 진동원과 지지구조물 사이에 마운트 형태로 설치되는 것으로서, 고주파수 대역에서 작은 댐핑력으로 기계류의 진동을 지지구조물과 절연시키며 결국 구조전달소음의 절연에 우수한 성능을 보인다. 하지만, 댐핑이 작으므로 큰 가진진폭의 저주파수 대역에서의 진동증폭의 저하를 피할 수 없다. 유체댐퍼나 고무와 같이 댐핑이 조절되지 못하는 특성을 지닌 수동형(passive) 작동기는 특정 주파수 영역에서 효과적인 진동감소를 얻을 수 있도록 설계된다.

수동형 작동기의 성능한계를 극복하고 폭넓은 가진조건에서 우수한 진동 감소효과를 발휘하기 위하여 할 수 있는 능동형(active) 및 반능동형(semi-active) 작동기의 개발이 요구되었다. 능동형 작동기는 시스템에 힘을 가하여 진동을 감소시키며, 반능동형 작동기는 시스템의 댐핑효과를 극대화 하여 진동에너지를 효과적으로 발산시킨다⁽¹⁾. 특히, 반능동형 작동기가 적용된 시스템은 스펠오버(spill-over)문제가 발생되지 않으므로 안정성(stability)이 항상 보장되는 장점을 지

* 편집이사, E-mail : seungbok@inha.ac.kr, Tel : 032)760-7310

니고 있다. 부하되는 전기장과 자기장에 의하여 점도가 조절되는 ER유체(electro-rheological fluid) 및 MR유체(Magneto-rheological fluid)와 같은 지능유체(smart fluid)를 이용하여 댐핑을 제어하는 반능동형 작동기에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다^(2,3). ER 및 MR응용장치는 단순한 설계, 구성부품의 무소음 및 무진동, 연속제어성능, 낮은 전력소모량 등의 장점을 갖고 있다. 그리고, MR유체를 이용한 진동 제어용 응용장치에 대한 연구는 90년대 중반 이후 활발히 진행되었으며, 기술 개발 및 상용화 사례도 증가하고 있는 추세이다. 따라서, 본 글에서는 MR유체의 특성과 MR유체를 이용한 진동제어용 응용장치에 대한 연구 사례 및 연구동향을 소개한다.

2. MR 유체의 특성

MR유체는 부하 되는 자기장에 반응하여 항복 전단응력이 변화되는 유체로서 투자율이 낮은 용매에 높은 투자율을 지닌 입자를 분산시킨 것이다⁽⁴⁾. MR유체는 자기장 무부하시에는 용매에 분산된 입자가 자유로이 운동하는 뉴토니안(Newtonian)유체의 거동을 나타내며 등방향(isotropic)의 역학적 성질을 나타낸다. 그리고, 자기장이 부하되면 입자는 자기장 방향으로 체인 구조를 형성한다. 이 체인구조는 입자들의 결합력에 의하여 유체의 전단에 대해 저항하며 항복응력을 갖는 빙햄(Bingham)유체의 거동을 갖게 되며 이방향(anisotropic)의 역학적 성질을 나타낸다.

MR유체의 전단응력은 기본점도에 의한 뉴토니안응력과 자기장 부하시 발생하는 항복응력의 합으로 표현될 수 있다. 높은 항복응력과 낮은 기본점도를 지닌 MR유체를 이용하여 MR응용장치를 설계 시 MR응용장치의 사이즈를 줄일 수 있으며, 제어가능한 댐핑력의 범위도 높아지게 된다. MR유체의 기본점도와 항복응력은 MR

유체의 조성 시 고체입자의 종류 및 사이즈, 오일의 종류 및 점도, MR유체에 대한 고체입자가 차지하는 입자중량비 등에 의하여 영향을 받는다^(4,5). 대부분 상용 및 연구용 MR유체는 대부분 철(iron) 구형입자를 사용하고 있으며, 입자사이즈는 주로 1~50 μm 의 마이크론 범위로 조성되고 있다. 최근 10~100 nm의 나노사이즈로 조성된 철입자를 이용하여 조성된 MR유체의 특성이 연구되고 있으며⁽⁶⁾, 기존의 마이크론 사이즈 입자로 조성된 MR유체와 비교 시 항복응력은 낮지만, 침전특성이 개선되는 것으로 나타난다. 또한, 자기포화(magnetic saturation) 한계가 철입자 보다 높은 코발트 입자나 코발트합금 입자를 이용한 MR유체의 특성 연구도 진행되고 있다⁽⁷⁾. 용매로는 하이드로카본(hydrocarbon) 오일, 실리콘(silicone) 오일, 물(water) 등이 사용되고 있으며, MR유체와 접촉되는 부품재질과의 적합성이 함께 고려되어야 한다⁽⁸⁾. MR유체의 입자중량비는 최대 항복응력, 자기장 무부하시 기본점도, 유동성 등을 고려하여 고려하여 대체로 10~50%의 범위로 제한된다. 현재 MR유체 개발에 활발한 연구를 수행중인 미국 Lord사에서 제공하고 있는 MR유체는 종류별로 45~70 kPa의 최대항복응력, 0.07~13.6 Pas의 기본점도를 나타내고 있다⁽⁹⁾.

MR유체는 네 가지의 작동모드로 여러 응용장치의 설계에 활용되고 있다. 첫 번째 모드는 평행한 두개의 자극(magnetic pole) 중 한쪽의 자극은 고정되어 있고, 다른 한쪽은 회전이나 평행이동하는 형태로서 전단모드(shear mode) 혹은 회전전단모드(rotational shear mode)라 하며, 자극에 가해지는 힘을 MR유체의 점성으로 저항하는 구조로서, 클러치/브레이크, 자동차 조향장치, 센터베어링 등에 설계에 응용될 수 있다⁽⁸⁻¹⁰⁾. 두 번째 모드는 평판 또는 실린더 형상의 두 자극이 고정되어 있고, 평판 사이로 MR유체가 흐르는 형태로 유동모드(flow mode)라 하며, 일반적으로 유체가 흐르는 관내에서 압력변화와 유량변화가 동시

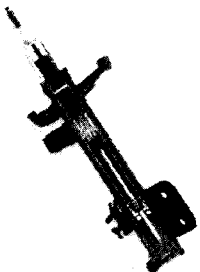
에 일어나는 경우로서, 이 모드는 밸브, 댐퍼 등의 설계에 응용된다^(8,11,12). 간극 내에서의 전단응력분포는 간극의 중심에서 응력값이 영(0)이며 자극 방향으로 선형적으로 증가하게 된다. 전단응력이 항복응력보다 작은 중심부는 반고체상태의 플러그(plug)가 형성되어 유동을 하게 되며, 전단응력이 항복응력보다 높은 외곽부에서는 뉴토니안 유동을 하게 된다. 따라서, 항복응력이 높을 수록 플러그의 두께가 커지므로 간극 내에서의 유체의 유동저항이 커지게 된다. 세 번째 모드는 평행한 두 자극의 간극이 작아지면 자극 사이에서 MR유체가 유출되며, 간극이 커지면 MR유체가 유입되는 형태로서, 자극의 상대운동 방향과 MR유체의 유동방향이 수직인 경우이며 압착 모드(squeeze-flow mode)라 한다. 이 모드는 주로 댐퍼, 스퀴즈 필름 댐퍼 등의 설계에 응용된다⁽¹³⁾. 네 번째는 복합 모드(mixed mode)로서 전단모드와 유동 모드가 동시에 작용하는 형태이다^(8,14). MR유체를 이용하여 댐퍼를 설계하는 경우 동일한 사이즈의 자극면적 조건에서 유동 모드의 경우가 전단 모드보다 큰 댐핑력을 발생시킬 수 있으므로, 진동 제어를 위한 대부분의 MR댐퍼는 유동 모드 또는 복합 모드로 작동하도록 설계되고 있다. 한편, 압착 모드로 작동하는 MR댐퍼는 주로 진동변위가 작은 시스템에 효과적으로 적용될 수 있다.

3. MR 유체 응용연구

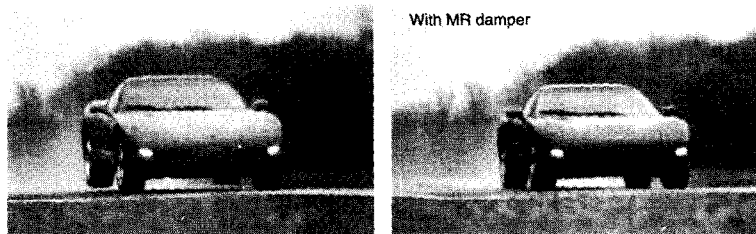
3.1 차량 서스펜션 제어

스프링과 댐퍼로 구성되는 서스펜션은 차량을 지지하고, 불균일한 노면에 의한 차체의 진동을 감소시키고, 타이어의 노면접지력을 유지하고, 코너링 시의 차량의 움직임 줄이는 역할을 한다. 서스펜션의 성능은 댐퍼의 댐핑 특성에 의하여 좌우되며, 운전조건에 따라 하드(hard) 댐핑 또는 소프트(soft) 댐핑의 상반된 특성이 요구된다. MR서스펜션 댐퍼가 적용된 차량은 운전조건에 따라 하드 또는 소프트 댐핑을 선택적으로 조절하거나 진동제어 알고리즘에 따른 요구 댐핑력을 발생시킬 수 있으므로, 차량의 승차감과 조정안정성을 기존 수동형 서스펜션보다 향상시킬 수 있다^(12,15).

그림 1(a)은 미국 Delphi사에서 개발한 차량 서스펜션(suspension)용 MR댐퍼를 나타내며⁽¹⁶⁾, 피스톤의 오리피스를 유동하는 MR유체에 자기장이 부하되면 MR댐퍼의 댐핑력이 증가되는 구조이다. Delphi사에서 개발한 이러한 형태의 MR댐퍼는 GM Cadillac과 Corverette에 장착되어 시판되고 있다⁽¹⁷⁾. 그림 1(b)는 GM Corverette의 주행시험 사진으로서, MR서스펜션 댐퍼를 장착한 차량의 진동차단 효과가 확연히 나타나는 것을 알 수 있다.



(a) MR 서스펜션 댐퍼



(b) 주행시험

그림 1 MR 서스펜션 댐퍼 및 주행시험^(16,17)



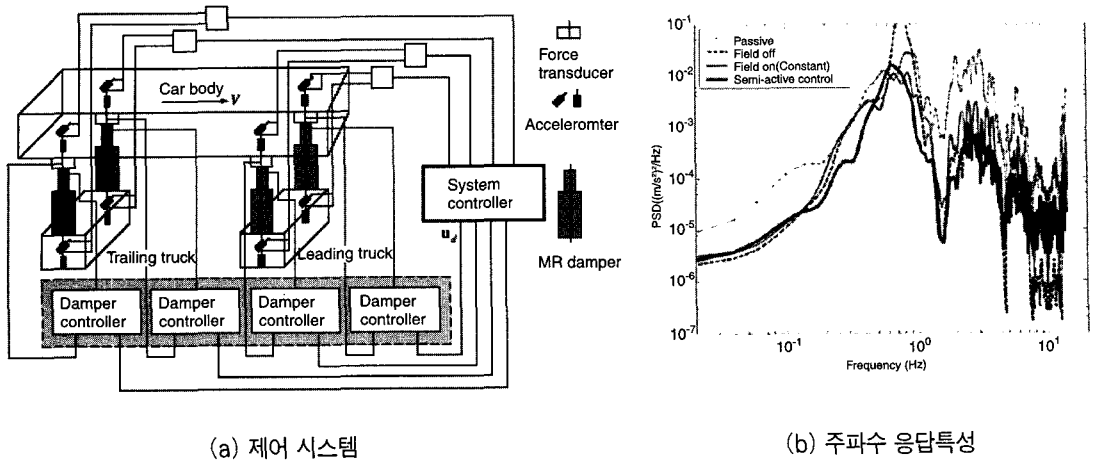


그림 2 MR 서스펜션 댐퍼가 고려된 열차 구조물 및 응답특성⁽²⁰⁾

차량용 MR서스펜션 댐퍼에 대한 연구는 시장성이 고려되어 가장 활발히 연구되고 있는 분야로서, MR서스펜션 댐퍼의 성능향상을 위하여 MR댐퍼의 설계, 모델링, 진동제어 알고리즘 개발에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다^(12,15,18). 또한, 군사작전을 위한 HMMWV(high mobility multipurpose wheeled vehicle)에 적용할 MR서스펜션 댐퍼에 대한 연구도 진행되고 있다⁽¹⁹⁾.

3.2 열차 서스펜션 제어

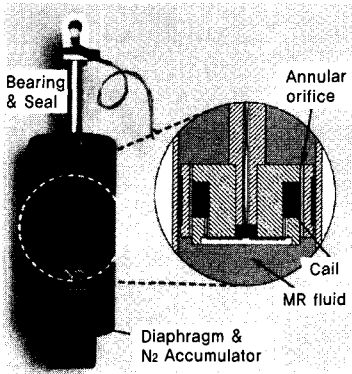
홍콩의 Chinese 대학에서는 열차에 적용할 MR 서스펜션 댐퍼에 대한 연구를 수행 중에 있다⁽²⁰⁾. 그림 2(a)는 MR서스펜션 댐퍼의 제어 시스템을 나타낸 것으로서, 차량속도, 가속도센서 등의 열차의 거동에 대한 정보는 LQG(linear quadratic) 제어알고리즘에 기반한 시스템 제어기에 입력되어 MR댐퍼의 요구 댐핑력이 결정된다. 또한, 4개의 MR댐퍼의 댐핑력은 힘센서로 측정되어 Signum함수에 기반한 댐퍼 제어기에 Feedback되어 MR댐퍼의 댐핑력이 요구댐핑력을 추종하게 된다. 그림 2(b)는 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 MR댐퍼의 진동제어 성능을 해석한 결과로서, MR댐퍼로 반능동 제어를 수행한 경우 가속도

응답이 수동형 댐퍼의 경우보다 현저히 낮게 나타남을 알 수 있다.

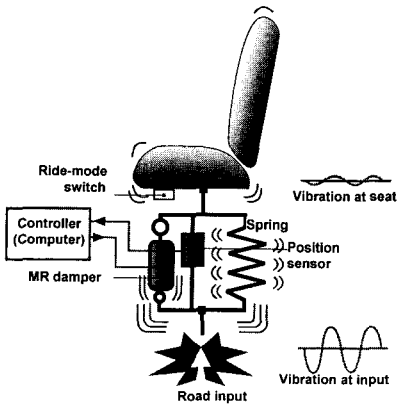
3.3 차량 시트 진동 제어

MR시트댐퍼는 차체를 통하여 운전석 시트로 입력되는 진동레벨을 효과적으로 감소시키기 위한 것으로서, 시트댐퍼가 요구하는 댐핑력을 능동적으로 조절함으로써 운전자의 승차감을 향상시킬 수 있다^(8,21,22).

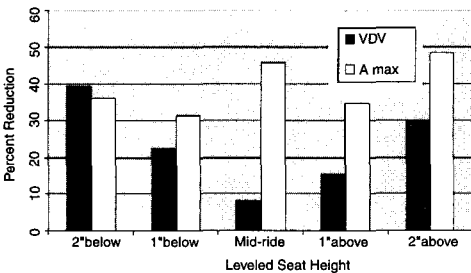
그림 3(a)는 미국 Lord사에서 개발하여 상용화한 대형 트럭의 시트용 MR댐퍼의 구조를 나타낸 것으로서, 약 5천대의 트럭에 장착되어 운행되고 있다⁽⁸⁾. 피스톤이 상하 운동을 하게 되면 MR유체가 환형 오리피스(annular orifice)로 유동하게 된다. 코일(coil)에 전류를 흘려주면 오리피스의 MR유체에 자기장이 부하되며, MR유체의 항복응력이 증가하여, MR댐퍼의 댐핑력도 증가하게 된다. 결국, MR시트댐퍼는 코일에 흐르는 전류의 세기를 조절하여 댐퍼가 요구하는 댐핑력을 발생시킬 수 있으며, 차체를 통하여 시트로 입력되는 진동레벨을 기존 댐퍼보다 효과적으로 감소시키므로 운전자의 승차감을 향상시킬 수 있다. 그림 3(b)는 MR시트 댐퍼의 반능동 제어시스템



(a) MR 시트 댐퍼



(b) 제어 시스템



(c) VDV 및 가속도 응답

그림 3 MR 시트 댐퍼 시스템 및 응답 특성⁽⁸⁾

전류를 계산한 후, 파워앰프를 통하여 댐퍼에 부하한다. 그림 3(c)는 MR시트 댐퍼가 장착된 시트의 VDV(vibration dose value)와 최대가속도를 기존 수동형 댐퍼가 장착된 시트의 진동레벨에 대한 백분율로 도시한 것으로서 50%이상의 진동레벨 감소가 얻어지는 것으로 나타났다.

3.4 건축구조물 진동제어

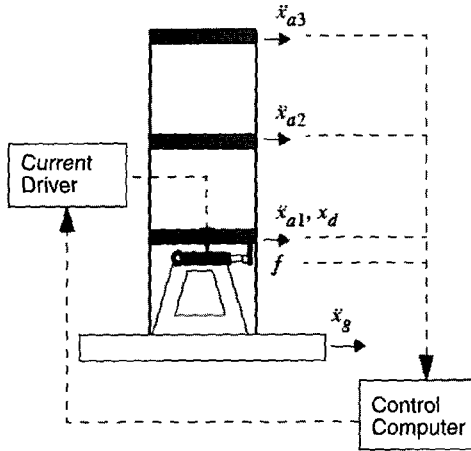
빌딩과 같은 건축구조물에 능동 및 반능동 작동기를 적용하는 연구도 활발히 진행되어 왔으며, 주로 지진에 의한 건축구조물의 과도한 움직임과 파손을 방지하기 위한 것이다. 대형 건축구조물의 진동제어에 MR댐퍼를 이용하면 적은 파워로 능동작동기의 경우와 유사한 진동제어 효과를 얻을 수 있다^(1,23,24,25).

미국 Illinois대학(당시 Notre Dame 대학) 연구팀은 MR댐퍼를 이용한 축소건물의 진동제어에 대한 이론적, 실험적 연구를 수행하면서, 제어시스템의 시스템 식별, 제어 알고리즘 설계 등에 대한 연구를 수행하였다^(24,25). 그림 4(a)는 소용량 MR댐퍼가 적용된 축소 건물 모형으로서, 지진 입력에 대한 MR댐퍼의 제어효과를 실험적으로 타진하기 위한 것이다⁽²⁴⁾. 구조물의 응답은 가속도 신호를 이용하여 측정되며, 이 신호는 요구댐핑력 계산을 위한 최적제어알고리즘에 이용하였다. MR댐퍼의 제어전압은 요구 댐핑력과 실제 댐핑력을 비교하여 요구 댐핑력이 실제 댐핑력보다 크고 두 댐핑력의 부호가 같은 경우에만 최대전압을 가하는 Clipped(또는 On/off) 제어방식이 적용되었다. 그림 4(b)에 나타난 바와 같이 MR댐퍼를 제어하는 경우의 구조물의 진동레벨이 확연히 낮게 나타난다. 따라서, 실제 건축물에 대용량 MR댐퍼를 적용하는 경우에도 우수한 진동제어 성능을 기대할 수 있다.

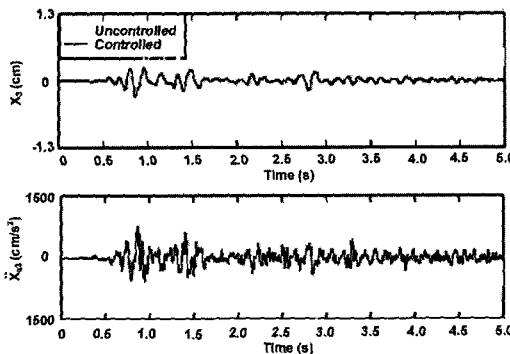
Illinois대학 연구팀은 Lord사에서 제작한 복합 모드형 200 kN급 실제 건축물용 지진(seismic)댐퍼의 모델링 및 동특성에 대한 연구를 수행하였

구성도를 나타내며, 센서, MR시트 댐퍼, 파워앰프, 제어기로 구성된다. 차체와 시트의 상대변위를 센서로 측정하며, 제어기는 센서신호를 이용하여 MR시트 댐퍼의 요구 댐핑력을 발생시키는

진동



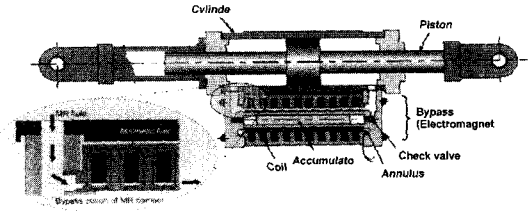
(a) 시험구조물



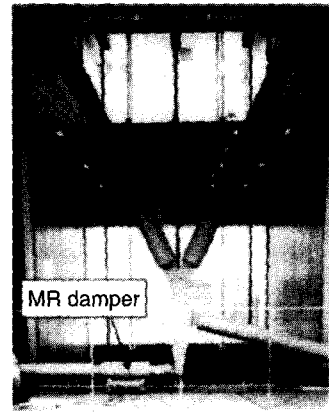
(b) 지진파형 가진 응답특성

그림 4 MR 댐퍼가 설치된 빌딩 형태 구조물 및 응답특성⁽²⁴⁾

으며⁽¹⁴⁾, 이러한 데이터는 200 kN급 지진 댐퍼가 적용될 건축물의 동특성 해석 시뮬레이션이나 진동제어 알고리즘 설계에 효과적으로 이용될 수 있다. 그림 5(a)는 일본 Sanwa Tekki사에서 개발한 300 kN급 지진댐퍼의 구조이다⁽²⁶⁾. 이 MR댐퍼는 댐퍼 외부에 MR밸브를 설계한 바이패스(bypass) 타입 댐퍼로서, 피스톤의 운동에 의하여 MR유체가 바이패스되어 자기장이 부하되는 환형 오리피스를 통과하면서 압력을 발생시킨다. 이러한 바이패스 타입 MR댐퍼는 전자석 및 자극을 포함한 자기회로 설계에 유연성



(a) 300 kV급 MR 지진 댐퍼



(b) MR 지진 댐퍼가 설치된 구조물

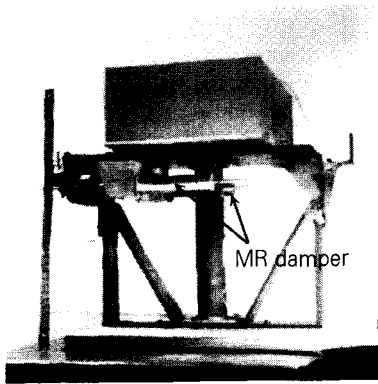
그림 5 대용량 MR 지진 댐퍼⁽²⁶⁾

(flexibility)이 높으며 유지보수가 용이한 장점을 갖고 있다. 그림 5(b)는 일본 National Museum of Engineering Science and Innovation 빌딩 내부에 설치된 지진 댐퍼를 나타낸다.

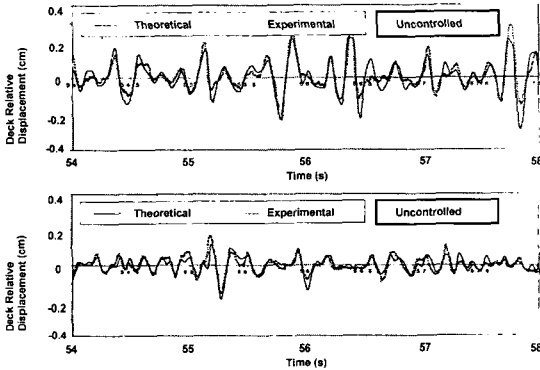
3.5 토목구조물 진동제어

지진, 강풍 등의 자연재해, 교통량 증가에 따른 부하 증가, 부식 등에 의한 강도 저하에 의하여 안전성 문제에 노출되어 있는 교량과 같은 토목 구조물에 MR댐퍼를 적용하는 연구도 진행되고 있다.^(1,23,27)

미국 Nevada대학 연구팀은 1/12로 축소된 2-스팬 교량에 MR댐퍼를 적용하여 진동제어를 수행하였으며⁽²⁷⁾, 2개의 MR댐퍼가 데크(deck)와 칼럼(column) 사이에 설치된 축소교량을 그림 6(a)에 나타내었다. 데크(deck)와 교량하부의 상대변위

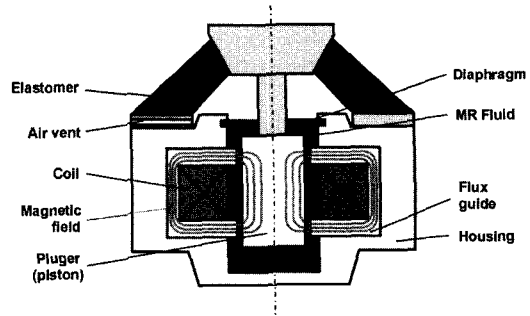


(a) 시험구조물

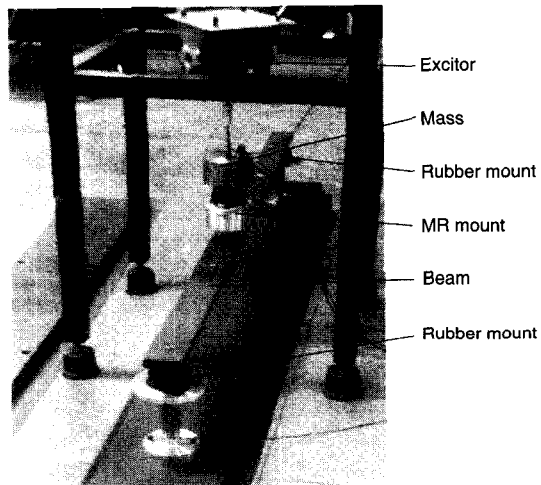


(b) 랜덤가진 응답특성

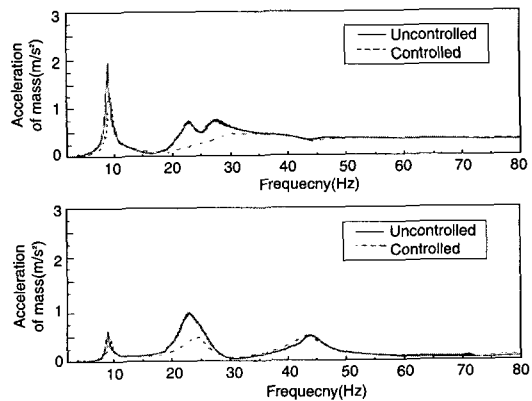
그림 6 MR 댐퍼가 설치된 축소 교량 구조물 및 응답특성⁽²⁷⁾



(a) MR 마운트



(b) 시험구조물

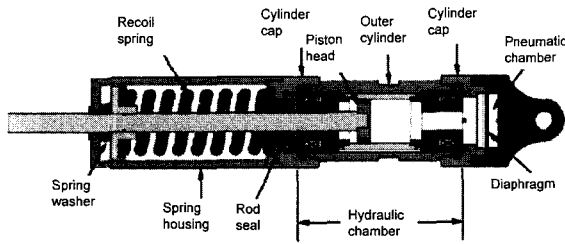


(c) 주파수응답특성

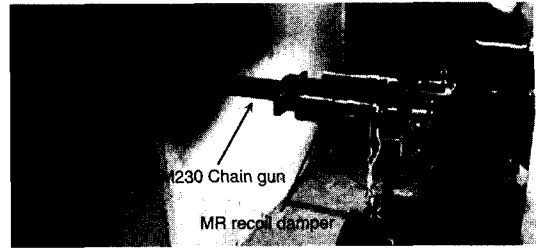
그림 7 MR 마운트가 설치된 기계구조물 및 응답특성⁽²⁸⁾

를 감소시키기 위하여, Lyapunov 안정성 이론에 기반하여 On/off제어 알고리즘을 설계하였다. 축소교량 하단을 랜덤가진하면서 진동제어를 수행한 결과를 그림 6(b)에 나타내었으며, MR댐퍼를 제어하는 경우 상대변위의 감소를 얻어졌다. 여기서, 상대변위의 감소는 교량을 구성하는 부재에 가해지는 부하(load)가 감소되어, 부재의 내구성 저하를 완화시킴을 의미한다.

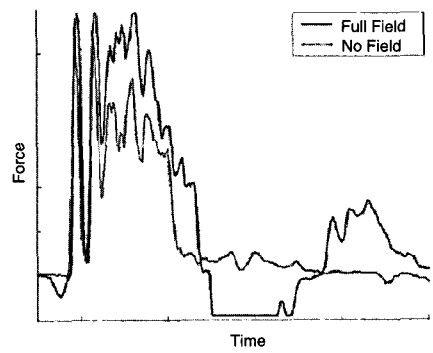
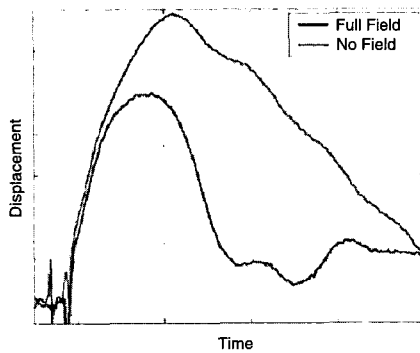
Illinois대학 연구팀은 중국 Central South대학, 홍콩 Polytechnic대학과 함께 중국 Dongting Lake 교량의 케이블 진동을 줄이기 위한 연구를 수행하였으며, MR댐퍼가 설치된 Dongting Lake교량은 현재 가동중에 있다⁽²³⁾.



(a) MR 리코일 댐퍼



(b) M230 체인건에 장착된 MR 리코일 댐퍼



(c) 리코일 스트로크와 코일로드

그림 8 MR 리코일 댐퍼 시스템 및 응답특성^(29,30)

3.6 기계구조물 진동제어

마운트는 엔진, 모터 등의 가진원과 하부구조물 사이에 설치되어, 가진원의 진동이 하부구조물로 전달되는 것을 감소시키는 역할을 한다. 그림 7(a)는 인하대에서 연구한 복합모드로 작동하는 MR마운트를 나타낸 것으로서 정하중을 지지하는 고무요소와 복합모드형 MR댐퍼요소가 병렬로 구성된 구조를 갖고 있다⁽²⁸⁾. 외부 가진력에 의하여 플런저(plunger) 또는 피스톤이 상하 운동을 하게 되면 MR유체는 플런저와 외측실린더 사이의 간극사이로 유동하게 되어 댐핑력이 얻어진다. 유동모드형 MR댐퍼와 달리 플런저외면과 외측실린더 내면이 상대 운동을 알 수 있다. 그림 7(b)에 MR마운트를 이용한 유연 구조물 시스템의 진동제어를 위한 실험장치를 나타낸다. MR마운트가 전자력가진기에

연결된 강체블록과 빔구조물 사이에 설치되어 있으며, 빔구조물은 고무 마운트에 의하여 지지된다. 강체블록과 빔구조물에 부착된 가속도계는 구조물의 응답측정과 LQG(linear quadratic Gaussian)제어기에 기반한 제어입력 계산에 이용되었다. 그림 7(c)은 구조물의 응답특성을 도시한 것으로서, MR마운트 제어 시 시스템의 공진주파수 대역에서 우수한 진동감소 성능을 보이고 있다.

3.7 리코일 시스템 충격제어

전투기, 전투헬기 등에는 중구경 화기가 장착되어 있으며, 탄환 발사 시 발생하는 충격에너지를 발산시키기 위하여 유체댐퍼 형태의 수동형 리코일(recoil) 댐퍼를 이용하여 에너지를 발산시키고 있다. 수동형 리코일 댐퍼는 댐핑특성이 변

특집

화되지 못하므로 유체댐핑으로 발산되는 에너지량, 화기를 지지하는 구조물에 가해지는 하중, 리코일 스트로크, 리코일 댐퍼의 사이즈 및 화기 중량 등이 서로 상호보전(trade-off)적인 특성을 갖고 있다.

수동형 리코일 댐퍼의 성능한계를 극복하기 위하여, 미국 Maryland대학이 주도하여 SPA(System Planning and Analysis)사, Technoscience사, Lord사와 함께 MR유체를 이용한 반능동형 리코일 댐퍼를 개발하였으며⁽⁹⁾, 그림 8(a)에 구조를 나타내었다. 리코일 스프링과 하이드로릭 챔버(hydraulic chamber)로 구성되어 있으며, 피스톤헤드의 운동에 따라 MR유체는 자기장이 부하되는 하이드로릭 챔버 상단과 하단의 환형 오리피스를 유동하게 된다. 그림 8(b)는 MR리코일 댐퍼가 설치된 터릿(turret)을 나타내며⁽¹⁰⁾, 그림 8(c)는 탄환발사 시험을 통하여 측정된 리코일 매스의 스트로크와 리코일 로드를 나타낸다. MR리코일댐퍼에 자기장을 부하한 경우와 부하하지 않은 경우의 특성 변화가 확연히 나타나므로, MR리코일 댐퍼의 적응성(adaptability or tunability)를 확인할 수 있다. 그림 8(c)의 시험결과에서는 MR리코일 댐퍼에 자기장을 부하한 경우, 리코일 로드는 초반부에 다소 증가하는 경향을 보였지만, 리코일 매스의 최대 스트로크와 원위치로의 수렴 시간이 감소되었다. 결국, MR리코일 댐퍼가 적용된 리코일 시스템은 충격에너지를 효과적으로 빠른 시간에 발산시킬 수 있으며, 연속사격 발사성능이 향상될 수 있음을 의미한다.

4. 맺음말

이 글에서는 자기장에 의하여 변화하는 MR유체의 유변학적 특성을 응용하여 다양한 시스템의 진동 감소를 수행한 응용연구 사례와 동향에 대하여 살펴 보았다. MR응용장치의 핵심기술

에는 MR유체 조성기술, MR유체응용장치 설계 기술, MR유체 응용장치 모델링 기술, MR유체 응용시스템의 제어 로직 설계기술, 시스템 인터페이스기술 등이 있다. MR응용 장치의 실용화에 성공한 미국과 일본은 MR유체 응용 장치 기술 개발에 대한 연구를 꾸준히 수행하여 왔으며, MR유체 응용 장치의 핵심기술 들을 전반적으로 보유하고 있으며, 최근의 연구는 주로 MR유체와 MR응용 장치의 성능향상 및 응용분야 확대에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. MR유체의 경우, 입자의 재질 및 사이즈를 고려하여 낮은 기본점도와 높은 항복응력을 갖고 침전 및 마모 문제를 최소화하는 연구를 중점적으로 진행되고 있다. MR응용 장치의 설계를 위해서는 신뢰도가 높은 무차원 설계모델, 정교한 동적모델, 유동성과 작동모드를 고려한 효율적인 자기회로 설계, 전자기 소프트웨어를 이용한 정확한 자기회로 해석 등이 연구되고 있다. 또한, MR응용 장치가 적용된 시스템의 성능은 제어 알고리즘에 의해서도 크게 좌우된다. 따라서, MR응용 장치 시스템의 특성을 고려하여 간단하고 효과적인 스카이훅 제어기 부터 외란 및 불확실성을 고려할 수 있는 강건제어기 까지 다양한 형태의 제어 알고리즘이 시험되고 있다. 그리고, 센서, 마이크로 프로세서, 앰프 등의 MR응용 장치 시스템에 요구되는 장치들도 저가, 소형화, 저전력 소모 등을 향한 성능개선이 요구된다. 이러한 MR응용 장치 기술은 기계, 전기, 전자, 고분자 공학 등의 통합기술 성격을 갖고 있으며, 그 응용범위가 다양하고 광범위하다. 전절에서 설명한 MR응용 장치 외에도 항공기 랜딩기어, 의족, 재활장치, 엔진마운트, 서보시스템, 고정밀도 연마시스템 등에 대한 연구가 진행되어 왔다. 따라서, 차량용 서스펜션, 시트 댐퍼, 지진대비용 대용량댐퍼 등과 더불어 실용화될 MR응용 장치는 앞으로 더욱더 증가될 것으로 보인다. ■



참고문헌

- (1) Soong, T. T., and Spencer Jr, B. F., 2002, "Supplemental Energy Dissipation: State-of-the Art and State-of-the-Practice," *Engineering Structures*, Vol. 24, pp.243~259.
- (2) Stanway, R., Sproston, J. L., and El-Wahed, A. K., 1996, "Application of Electrorheological Fluids in Vibration Control: A survey," *Smart Materials and Structures*, Vol. 5, pp.464~482.
- (3) Carlson, J. D., Cantanzarite, D. M., and St. Clair, K. A., 1996, "Commercial Magneto-Rheological Fluid Devices," 5th International Conference on ER Fluids, MR Suspensions and Associated Technology, pp.20~28.
- (4) Bossis, G., Lacis, S., Meunier, A., and Volkova, O., 2002, "Magneto-rheological Fluids," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 252, pp.224~228.
- (5) Genc, S., and Phule, P. P., 2002, "Rheological Properties of Magneto-rheological Fluids," *Smart Materials and Structures*, Vol. 11, pp.140~146.
- (6) Rosenfeld, N., Wereley, N. M., Radhakrishnan, R., and Sudarshan A. S., 2002, "Behavior of Magneto-rheological Fluids Utilizing Nanopower Iron," *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 16, pp.2392~2398.
- (7) Chaudhuri, A., Wereley, N. M., and Radhakrishnan, R. 2004, "Magneto-rheological Parameter Identification from Viscometric Flow Curves Using Genetic Algorithms," *ASME International Mechanical Engineering Congress and RD&D Expo, IMECE2004-62380*.
- (8) <http://www.lord.com/mr>
- (9) Agrawal, A., Ciocanel, C., Martinez, T., Vieira, S. L., Naganathan, N. G., Robb, S., and Duggan, J., 2002, "A Bearing Application Using Magneto-rheological Fluids," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 13, pp.667~673.
- (10) Park, Y., and Jung, B., 2003, "Development of Damper for New Electronically Controlled Power Steering System by Magneto-Rheological Fluid: MRSTEER," *International Journal of Vehicle Design*, Vol. 33(1/2/3), pp.103~114.
- (11) Yoo, J. H., and Wereley, N. M., 2002, "Design of High-Efficiency Magneto-rheological Valve," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 13, pp. 679~685.
- (12) Lee, H. S., and Choi, S. B., 2000, "Control and Response Characteristics of a Magneto-Rheological Fluid Damper for Passenger Vehicles," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 11, pp.80~87.
- (13) Sims, N. D., Stanway, R., Johnson, A. R., and Mellor, P., 2001, "Design, Testing, and Model Validation of an MR Squeeze-Flow Vibration Damper," *Proceedings of SPIE*, Vol. 4331, pp.111-120.
- (14) Yang, G., Spencer Jr, B. F., Carlson, J. D., and Sain, M. K., 2002, "Large-Scale MR Fluid Dampers: Modeling and Dynamic Performance Considerations," *Engineering Structures*, Vol. 24(3), pp.309~323.
- (15) Lam, A. H., and Liao, W. H., 2003, "Semi-Active Control of Automotive Suspension Systems with Magneto-Rheological Dampers," *International Journal of Vehicle Design*, Vol. 33(1/2/3), pp.50~55.
- (16) <http://www.delphi.com/pdf/e/magneride.pdf>
- (17) <http://corvetteactioncenter.com/specs/2003/msrc2.html>

- (18) Sims, N. D., Holmes, N. J., and Stanway, R., 2004, "A Unified Modelling and Model Updating Procedure for Electrorheological and Magnetorheological Vibration Dampers," *Smart Materials and Structures*, Vol. 13, pp.100~121.
- (19) Karakas, E. S., Gordaninejad, F., Evrensel, C. A., Yeo, M. S., Liu, Y., and Sahin, H., 2004, "Control of a Quarter HMMWV Suspension System Using a Magnetorheological Fluid Damper," *Proceedings of SPIE*, Vol. 5386, pp.204~213.
- (20) Liao, W. H., and Wang, D. H., 2003, "Semiactive Vibration Control of Train Suspension Systems via Magnetorheological Dampers," *Journal of Intelligent Material Structures and Systems*, Vol. 14, pp.161~172.
- (21) Lee, Y., and Jeon, D., 2002, "A Study on the Vibration Attenuation of a Drive Seat Using an MR Fluid Damper," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 13, pp.437~441.
- (22) Choi, S. B., and Han, Y. M., 2003, "MR Seat Suspension for Vibration Control of a Commercial Vehicle," *International Journal of Vehicle Design*, Vol. 31(2), pp.202~215.
- (23) Spencer, B. F., and Nagarajaiah, S., 2003, "State of the Art of Structural Control," *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 129(7), pp.845~856.
- (24) Dyke, S. J., Spencer Jr., B. F., Sain, M. K., and Carlson, J. D., 1998, "An Experimental Study of MR Dampers for Seismic Protection," *Smart Materials and Structures*, Vol. 7, pp.693~703.
- (25) Yi, F., Dyke, S. J., Caicedo, J. M., and Carlson, J. D., 2001, "Experimental Verification of Multiinput Seismic Control Strategies for Smart Dampers," *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 127, pp.1152~1164.
- (26) Sodeyama, H., Suzuki, K., and Sunakoda, K., 2004, "Development of Large Capacity Semi-Active Seismic Damper Using Magneto-Rheological Fluid," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 126, pp.105~109.
- (27) Wang, X., and Gordaninejad, F., 2002, "Lyapunov-Based Control of a Bridge Using Magneto-Rheological Fluid Dampers," *Journal of Intelligent Material Structures and Systems*, Vol. 13, pp.415~419.
- (28) Hong, S. R., and Choi, S. B., 2003, "Vibration Control of a Structural System Using Magneto-Rheological Fluid Mount," *14th International Conference on Adaptive Structures and Technologies*, pp.182~191.
- (29) Facey, W., Rosenfeld, N. C., and Wereley, N. M., 2003, "Design and Characterization of a Compact Impact Damper for High Impulsive Loads," *44th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA2003-1645*.
- (30) http://www.spa.com/aedp_mr_apache.htm