

MR 유체의 특성 및 응용 사례

Basic Characteristic of MR Fluid and Its Application

박중호 · 함영복 · 윤소남 · 서우석

J. H. Park, Y. B. Ham, S. N. Yun and W. S. Seo

1. 서 론

기능성 유체(Functional Fluids)는, 외부에서 가해지는 물리량(전기장, 자기장, 온도, 등)을 제어함으로써 유체가 가지고 있는 점성 혹은 탄성과 같은 특성을 변화시켜 공학적으로 응용 가능한 기능성을 발현시키는 유체를 의미하며, 대표적인 기능성 유체로써 MR (Magneto-rheological)유체, ER(Electro-rheological)유체, ECF(Electro Conjugate Fluid), 자성유체 등을 들 수 있다.

기능성 유체를 유체제어용 액추에이터로 응용하는 이점으로써는, 단순구조의 신뢰성이 높은 기계요소의 제작이 가능하다는 점, 표면에서의 고체마찰에 대한 영향(가공도와 간극제어 등의 한계성)이 없다는 점, 단위체적/중량당 출력비가 높다는 점 등을 들 수 있다. 상기에 열거한 이러한 기능성유체의 특성을 이용해서 댐퍼에 의한 진동억제, 마이크로 액추에이터 제어, 윤활제로서의 마찰제어 등이 가능하기 때문에 댐퍼, 밸브, 클러치, 브레이크 등 폭넓은 분야에의 응용을 위한 연구, 개발이 활발히 진행되고 있다. 기능성유체를 응용함으로써, 습동부가 없는 단순한 구조적인 강점 때문에 소형이면서 강건하고 신뢰성 및 내구성이 우수하며 전기신호에 의해서 직접 유체동력을 제어할 수 있는 새로운 기계요소를 구현할 수 있다는 특징이 있다. 또한, 기존의 밸브에서 사용되는 스프링과 포핏과 같은 습동부와 접촉면 등을 필요로 하지 않기 때문에 고비용과 장시간 가공을 요하는 기계가공의 정밀도를 낮출 수 있고, 유체에 먼지와 같은 오염물질이 함유되더라도 전체적인 시스템 구동에 큰 영향을 끼치지 않는 로버스트한 시스템 구성이 가능하다.

기능성 유체 중에서 MR유체는 빠른 응답성, 넓은 영역의 압력제어성과 같은 우수한 특성 때문에 최근 산업계에의 적용을 위한 대표주자로서 활발히 연구 개발이 진행되고 있다. 따라서, 본고에서는 MR유체의 특성과 작동원리 및 대표적인 산업체 응용 사례에 대해서 언급한다.

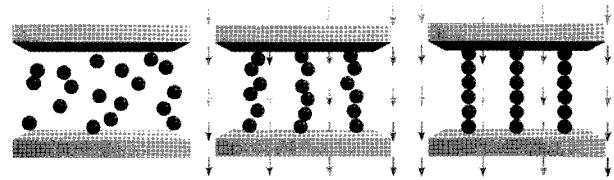


그림 1 인가자기장에 따른 MR입자의 거동

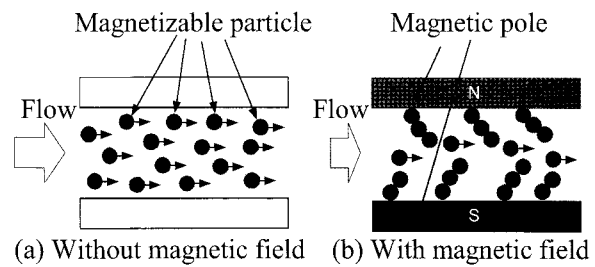
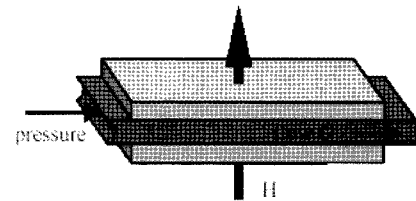
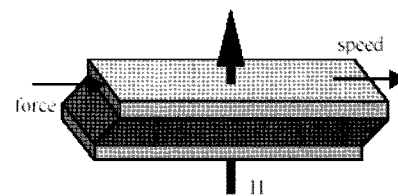


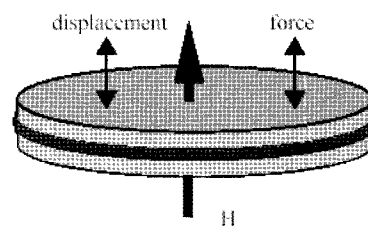
그림 2 MR유체의 점성변화 원리



(a) valve mode



(b) shear mode



(c) squeeze mode

그림 3 MR유체의 대표적 응용 모드

2. MR유체의 특성

2.1 MR유체의 개념

실리콘오일과 같은 전기절연성의 액체 중에 수 μm 크기의 강자성체 입자들을 분산시킨 MR유체는 그림 1에 나타낸 바와 같이 인가한 자기장에 반응하여 입자들이 서로 밀집되어 체인구조와 같은 클러스터를 형성하고, 그림 2에 나타낸 것처럼 밸브 모드에 있어서 유동저항의 발생에 의한 점성변화를 수 ms 단위로 가역적으로 제어가능하며 이 과정에서 발생하는 압력제어의 우수한 특성으로 인하여 간단한 밸브 및 댐퍼에서 대형 우주구조물에 이르기까지 응용 범위가 매우 광범위하다. 그림 3에 MR유체의 대표적인 응용 모드를 나타낸다. 또한, MR유체는 ER유체에 비교해서 보다 큰 항복응력의 제어영역을 가지고 입자의 분산안정성이 우수하며 ER유체에는 없는 자극에 흡인되는 독특한 특성을 갖는다. MR유체 관련해서는 차량에의 응용 등을 고려한 실용화에 가까운 연구가 많이 수행되고 있으며, 특히 차량용 반능동 현가장치를 위한 MR댐퍼에 관한 연구는 시장성이 고려되어 가장 활발히 연구되고 있는 분야이다.

MR유체는 ER유체와 더불어 이미 1947년에 Winslow에 의해 발견되었으나 1994년에 와서야 미국 Lord사의 Carlson에 의해 침전 안정성이 크게 개선되어 댐퍼로서의 우수성이 입증되었다. 댐핑력을 좌우하는 MR유체의 항복강도는 ER유체보다 10배 이상이며 적용온도 안정범위도 -40°C 에서 150°C 에 이른다. MR유체는 저전압($12\sim 24\text{V}$)에서 $1\sim 2\text{A}$ 의 전류에 의해 용이하게 제어된다. 이러한 장점으로 인해 MR유체 및 MR댐퍼에 관해 많은 연구가 이루어지고 있으며 관련 특허도 현재 미국을 중심으로 수십 종에

이른다. MR유체는 계속하여 그 응용가능성이 증가되는 추세에 있으며 자동차의 현가장치 부품으로서의 MR댐퍼의 상용화가 미국의 Delphi를 중심으로 2003년에 GM의 컨셉카에 장착된 예가 있다. 또한 MR유체의 물성은 불순물에 민감하지 않으며 여러 가지의 첨가물(계면활성제, 분산제, 마찰완화제, 내마모제 등)을 사용하면 안정성을 향상시킬 수 있다. MR유체는 국내에서는 현대자동차와 만도기계를 비롯하여, 소수의 연구소 내지는 대학에서 산학협력 연구가 이루어진 바가 있으나 Oil Seal의 내구성 등의 문제점으로 인하여 아직 상용화는 이루어지지 않고 있다.

2.2 국내외 연구개발 동향

MR유체는 선진국에서는 이미 상용화 되었으며, 이를 이용한 응용장치는 다양한 분야에서 상용화를 시작하고 있다. 특히, MR유체를 군용차량, 선박 및 항공기 등의 군용장비에 적용한 경우는 전략적인 중요성으로 인하여 선진국에는 시판 및 기술전수를 꺼리고 있는 실정이다. 따라서 선진국의 기술독점을 방지하고, 독자적 기술력을 확보하기 위해서는 MR유체 및 이를 활용한 MR디바이스의 개발이 필요하다.

국내에서 MR유체에 대한 조성 및 상용화에 대한 실적은 보고된 바 없으며, 상용화된 미국 Lord사의 MR유체를 구입하여 국내 각 연구기관 및 대학에서 자체적으로 개발한 응용장치에 이를 적용한 연구들이 주를 이루고 있다. 그러나 MR응용장치에 필수적인 MR유체의 공급이 미국 Lord사를 통해서 비교적 고가(약 $600\$/\ell$)로 공급되고 있어, MR응용장치의 원활한 연구 및 상용화를 위해서는 MR유체의 국산화 혹은 저가화가 반드시 필요한 실정이다.

현재 미국의 Lord사는 유체 및 응용장치를 포함한 MR 관련분야에서 연구 및 상용화에 가장 앞장서고 있으며, 이곳에서는 자동차, 건물 및 각종 군용장비 등에 적용이 가능한 MR댐퍼 및 MR브레이크를 상용화하고 있다. 최근에 미국을 포함한 선진국에서는 MR댐퍼 및 마운트를 군용장비(함정, 비행기, 대포, 군용차량 등)의 안정성과 관련된 분야에 적용하기 위하여 다양한 연구를 수행하고 있으나, 이에 대한 정보는 시판 및 기술전수를 꺼리고 있는 실정이다. 미국의 자동차 업체인 GM사는 최근 자사의 제품인 Cadillac에 MR댐퍼를 적용한 모델을 상용화하기 시작하였으며, 이 댐퍼는 미국 자동차 부품회사인 Delphi사와 Lord사가 공동으로 개발한 제품이다. Maryland 대학에서는 MR댐퍼를 헬리콥터 래그(lag)

표 1 MR유체의 전형적 특성

| Property: | Typical value: |
|---|--|
| Maximum yield strength, τ_y (500) | 50-100 MPa |
| Maximum field strength | $\sim 250 \text{ kAm}^{-1}$ (0.3 Tesla) |
| Plastic viscosity, η_p | 0.1-1.0 Pas |
| Operable temperature range | -40°C to $+150^{\circ}\text{C}$ (limited by a carrier fluid) |
| Contaminants | Unaffected by most impurities |
| Response time | < milliseconds |
| Density | $3-4 \text{ g/cm}^3$ |
| η_p / τ_y^2 (500, figure of merit ¹⁾) | $10^{-10}-10^{-11} \text{ s/Pa}$ |
| Maximum energy density | 0.1 J/cm^3 |
| Power supply (typical) | 2-25 V @ 1-2 A (2-50 watts) |

댐퍼, Apache 헬리콥터 체인건(chaingun) 및 비행기 랜딩기어 등에 적용하기 위한 연구를 진행하고 있으며, 소형 MR댐퍼 및 MR밸브에 대한 연구를 진행하고 있다. 톨레도대에서는 베어링부에 발생하는 진동을 제어하기 위하여 MR유체를 적용한 연구를 진행하였고, 캘리포니아 주립대에서는 MR유체를 압치료 분야에 적용하여 연구를 수행하였다.

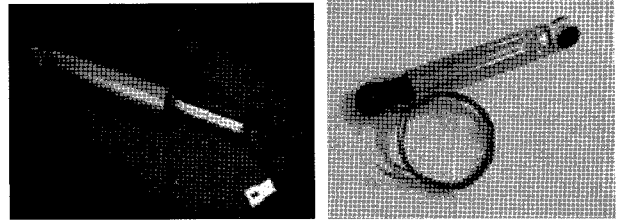
중국은 대학을 중심으로 하여 MR유체 및 응용분야에 대한 연구가 매우 활발히 진행되고 있다. 중국의 과학기술대와 Zhejiang대에서는 회전형 MR브레이크, 하얼빈공대에서는 MR브레이크, Tongji대에서는 MR공압서보, 충칭대에서는 MR밸브와 MR댐퍼 그리고 난징대에서는 MR충격댐퍼와 자동차용 MR댐퍼를 연구하고 있다. 또한 홍콩기술대에서는 MR댐퍼를 이용하여 교량의 케이블에 대한 진동제어 연구를 진행하고 있다.

일본에서는 내진용 MR댐퍼를 교량 및 건축물에 적용하여 다양한 연구를 진행하고 있으며, 국가산업안전연구소에서는 MR유체를 이용한 안전밸브에 관한 연구를 진행하고 있다.

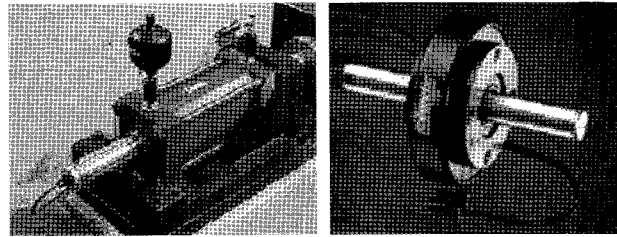
3. MR유체의 응용 사례

3.1 진동 저감 및 완충장치

미국 Lord사는 최대항복응력과 기본점도가 각기 다른 수 종류의 MR유체를 생산할 뿐만 아니라 MR유체의 응용연구를 활발히 진행하고 있다. 그림 4는 Lord사 MR댐퍼 관련 제품의 일례를 나타낸다. Delphi사는 차량 서스펜션용 MR댐퍼를 개발하였으며, GM자동차사의 Cadillac과 Corverette의 컨셉트차에 장착시키는 등 자동차의 MR유체를 이용한 현가장치에 대한 연구를 선도하는 역할을 하고 있다. 그림 5는 차량에 장착된 MR 서스펜션을 나타낸다. 또한, Virginia Tech에서는 유압댐퍼와 MR유체 기술을 접목하여 합포사격 등에서 가해지는 충격흡수용 무반동 댐퍼 및 제어이론 개발에 대한 연구를 수행하고 있다(그림 6참조). University of Nevada는 Off-Road용 모터사이클의 완충장치 개발을 위해 MR유체를 이용한 Shock Absorber에 대한 연구를 수행하였고, 실장테스트를 하였다. 그림 7은 Motorcycle 용 MR 댐퍼의 시제품을 나타낸다. 와세다 대학은 건축물의 진동을 제어하기 위하여 MR유체를 댐퍼에 적용하고, MR댐퍼의 모델화 등 그림 8에 나타낸 200kN MR댐퍼의 응용연구를 수행하고 있다.



(a) MR linear damper (b) MR friction damper



(c) MR seismic damper (d) MR brake

그림 4 Lord사 MR 관련 제품

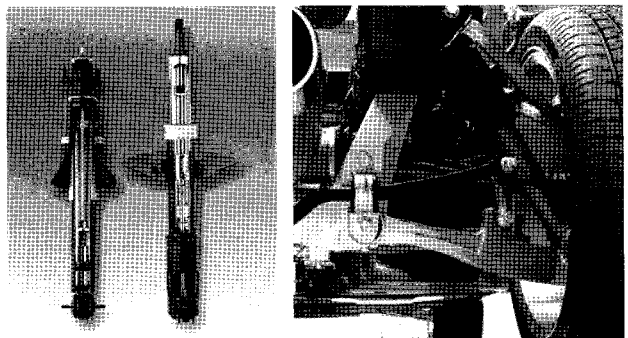


그림 5 Delphi사 MR suspension

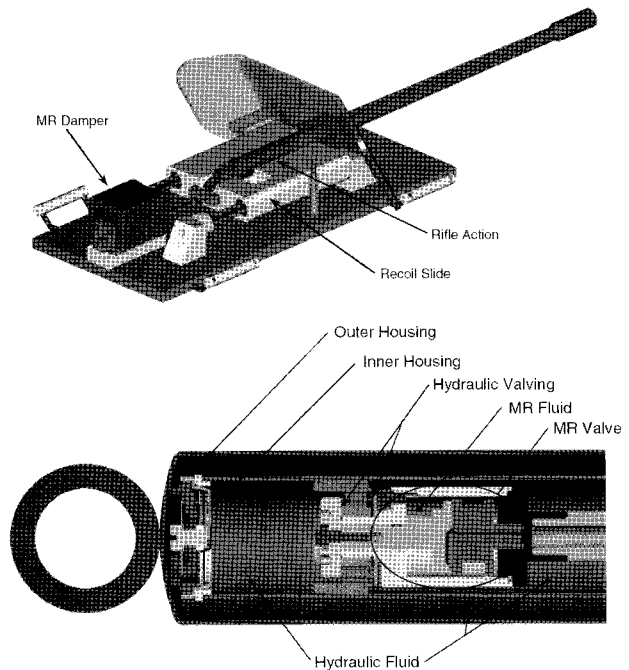


그림 6 MR recoil damper

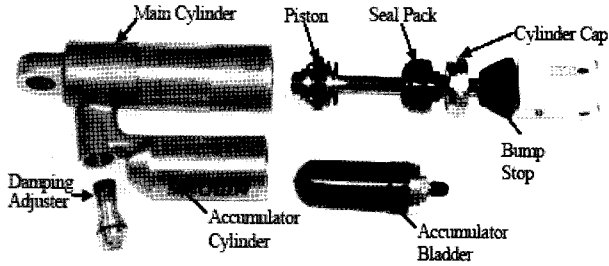


그림 7 Motorcycle용 MR댐퍼

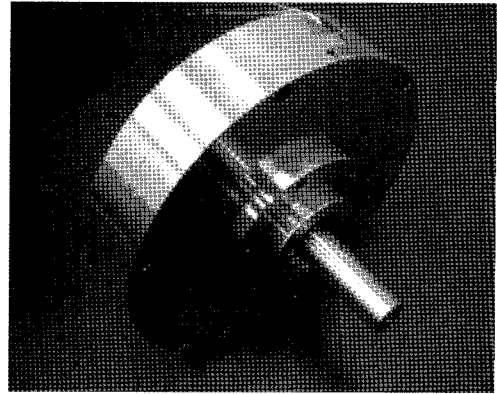


그림 11 장력제어용 MR브레이크

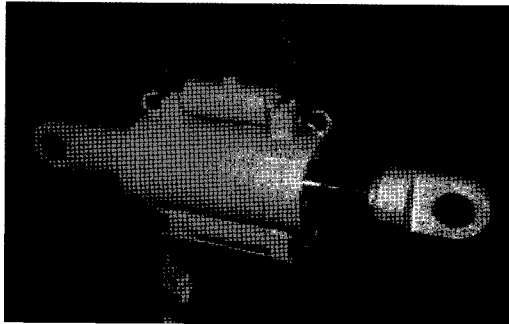


그림 8 건물제진용 200kN MR댐퍼

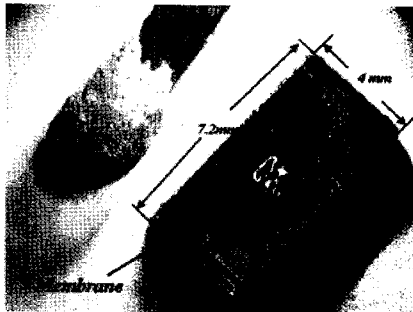


그림 9 마이크로 가변형 MR댐퍼

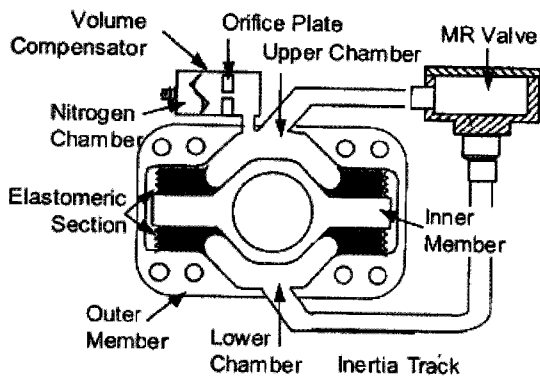


그림 10 MR유체를 이용한 마운트

한편, 국내 서강대에서는 마이크로구조물에 있어서의 충격흡수 및 진동제어 가능성을 타진해 보기 위해서 MR유체를 이용한 마이크로 가변형 댐퍼를 설계, 제작하여 실험적 특성을 고찰하였으며, 제작된 댐퍼사이즈는 7.2mm×4mm×2.1mm이며 실물을 그림

9에 나타낸다. 울산대 및 부경대에서는 종래의 수동형 유체마운트에 ER유체 및 MR유체를 이용한 스퀘즈필름댐퍼에 대한 이론적 및 실험적인 연구를 수행하고 있으며, MR유체의 점도가 너무 높은 것이 문제로서 지적되었다. 그림 10에 MR유체를 이용한 마운트의 개략도를 나타낸다. 또한, 한국기계연구원에서는 종래의 인쇄장치 웹 장력제어용으로 사용되던 파워 브레이크를 대체하기 위한 MR브레이크를 개발하여, 약 5배 정도의 출력 성능이 향상되는 것을 실험적으로 확인하고 있다. 그림 11에 회전형 MR브레이크의 실물 사진을 나타낸다.

3.2 유체제어용 MR밸브

고정된 자극유로를 흐르는 MR유체에 자기장을 인가하면 분산입자가 클러스터를 형성하고 유동저항이 증가하게 되어 빙행유체로서의 유동특성을 나타내게 되어 압력제어 밸브에 응용할 수 있다. 그림 12에는 소형화를 피하기 위해서 영구자석을 이용한 3포트 압력밸브를 나타낸다. MR밸브는 두개의 2포트 MR밸브를 직렬로 접속한 구조이고, 가운데 접속부를 부하에 연결하여 압력은 상류측과 하류측의 전자석에 인가하는 전류합이 일정한 값이 되도록 제어한다. 3 포트 MR밸브는 정의 전류를 인가하면, 상류측의 자기장 강도가 감소되고 하류측은 증가하게 된다. 따라서, 상류측의 유동저항은 줄어들게 되고 하류측은 커지게 되어 부하측의 압력이 증가한다. 역으로, 부의 전류를 인가하면 상류측 유동저항이 커지고 하류측은 감소하게 되어 부하측 압력은 줄어들게 된다. 이처럼 자기장을 세기를 조절함으로써 간단히 부하압력을 제어할 수 있는 장점이 있다. 그림 13에는 미소량의 MR유체 액주를 유체 방향제어를 위한 밸브 작동매체로 직접 사용한 예를 나타낸다. MR액주는 영구자석의 자계에 의해서 형상을 유지하게 되고 영구

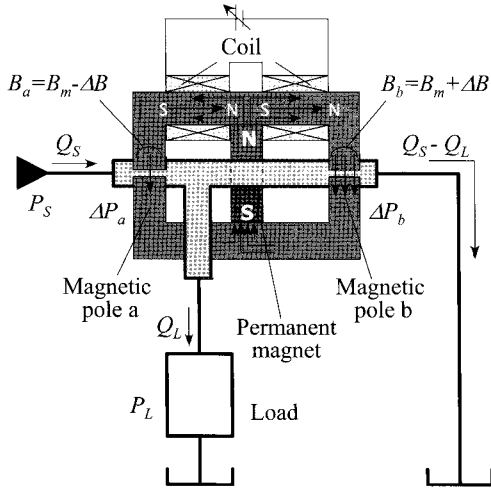


그림 12 영구자석을 이용한 MR밸브

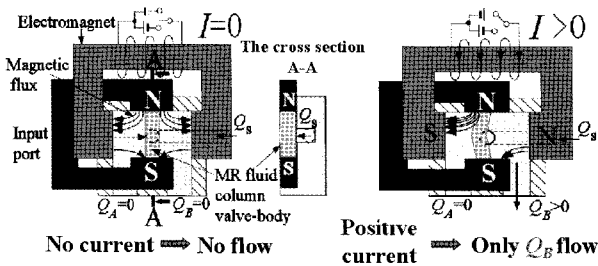


그림 13 MR유체를 이용한 방향절환밸브

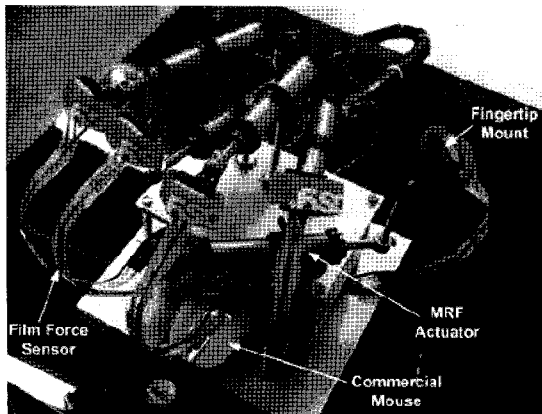


그림 14 MR유체를 이용한 5자유도 햅틱 마우스

구자석에 직교한 전자석의 자기장 세기를 조절함으로써 유체흐름의 포트를 개폐 가능한 구조로 되어 있다.

3.3 기타 사례

가상현실 또는 원격작업시스템에 있어서 양방향 정보의 흐름으로서 운영자의 움직임이나 위치정보를 작업 대상에 전달하고 가상환경이나 원격작업 대상에서 발생하는 힘이나 촉각정보 등을 운영자에게 전달해주는 매체를 햅틱 디바이스라고 하는데 성능을

높이고 자유도를 증가시키기 위해서는 많은 모터와 복잡한 링크기구 등이 요구된다. 최근에는 이러한 디바이스의 경량화, 소형화를 위해서 MR유체나 ER유체를 햅틱 디바이스에 응용하는 연구가 진행되고 있다. 그림 14에는 MR유체를 이용한 액추에이터로 구성된 5자유도 햅틱 마우스를 나타낸다.

MR유체나 ER유체는 입자와 분산매질의 비중차 때문에 장시간 사용하게 되면 입자의 침강이나 응집이 발생하게 되어 성능이 저하되는 문제점이 있다. 이를 해결하기 위해서 MR입자나 ER입자를 고무나 겔 등의 탄성재료에 분산시킨 기능성 엘라스토머에 관한 연구개발이 최근 활발히 진행되고 있다. 특히, MR 엘라스토머에 관한 연구는 핀란드, 독일, 중국을 중심으로 전개되고 있으며, 그림 15에 나타난 것처럼 진동 억제를 위한 기본 특성이 연구되어지고 있으나 아직까지는 응답성에 대한 개선이 요구된다.

4. 결 론

본고에서는 기능성 유체의 하나로써 최근 산업계에의 응용이 주목받고 있는 MR유체의 특성 및 대표적 응용 사례에 대해서 살펴보았다. 물론, 여기서 언급하지 않은 MR유체를 이용한 초정밀 렌즈 연마장치, 인공의족 등 다양한 응용 예가 있지만 지면사정상 생략한다. MR유체 및 MR디바이스 기술은 현가장치와 동력전달장치를 비롯한 기타장치에도 적용가능하며 건축 및 토목구조물의 내진장치, 컴퓨터 구동장치, 정밀기계 제어장치, 의용공학, 군사장비 등 광범위하게 응용될 수 있다. 향후, MR유체 및 MR엘라스토머의 성능향상과 함께 기술 수요는 새롭게 창출될 것이며 응용 분야는 점차 확산될 것으로 전망된다.

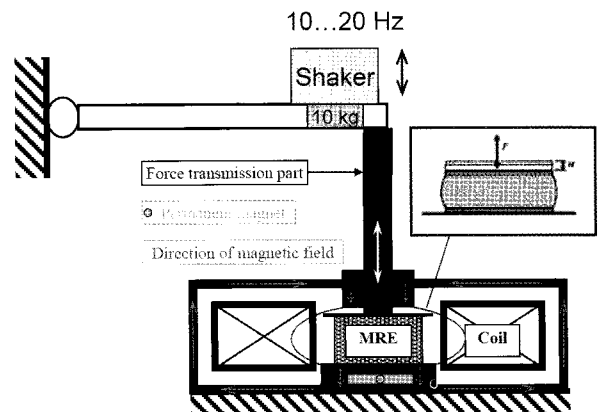


그림 15 MR 엘라스토머를 이용한 실험장치

참고 문헌

- 1) J. D. Carlson, "Electro-Rheological and Magneto-Rheological Fluids", Proc. of ACYUATOR, pp. 283~288, 2004.
- 2) M. Ahmadian, "On the Application of Magneto-Rheological Fluid Technology for Improving Rail Vehicle Dynamics", Proceedings of ASME IMECE, 2002.
- 3) E. O. Ericksen and F. Gordaninejad, "A Magneto-Rheological Fluid Shock Absorber for an Off-Road Motorcycle," International J. Vehicle Design, 2003.
- 4) W. I. Kordonski et al., "Magneto rheological Jet (MR Jet™) Finishing Technology", Transactions of the ASME, Vol. 128, pp. 20~26, 2006.
- 5) J. H. Park, S. M. Cho, D. W. Youn, S. N. Yun and K. K. Ahn, "A Pressure Control Valve Using MR(Magneto-rheological) Fluid", Proceedings of KSPSE autumn conference, pp. 170~174, 2005.
- 6) X. Zhang et al., "Analysis and fabrication of patterned magnetorheological elastomers", Smart Mater. Struct. Vol. 17, pp. 1~5, 2008.
- 7) K. H. Kim, Y. J. Nam and M. K. Park, "Smart Mouse: 5-DOF Haptic Hand Master Using Magneto-Rheological Fluid Actuators".

[저자 소개]



박중호(책임저자)

E-mail: jhpark@kimm.re.kr
Tel: 042-868-7607
1968년 6월 19일생

1999년 동경공업대학(Tokyo Institute of Technology) 정밀기계시스템 전공 박사과정 졸업, 1999년 동경공업대학 정밀공학연구소 Assistant Prof., 2004년 한국기계연구원 입사, 2008년 현재 한국기계연구원 나노기계연구본부 선임연구원, 마이크로유체제어시스템, 스마트 액추에이터 및 센서 응용연구에 종사, 한국정밀공학회, 대한기계학회 등의 회원, 공학박사

[저자 소개]



함영복

E-mail: hyb665@kimm.re.kr
Tel: 042-868-7157
1965년 10월 23일생

1987년 금오공과대학교 기계공학과 학사, 1990년 동 대학원 석사, 2003년 동 대학원 박사, 2004년 동경공업대학 정밀공학연구소, 1990년~현재 한국기계연구원 책임연구원, 관심 연구분야는 유압 피스톤 펌프 및 모터, 수압 피스톤 펌프, 압전소자 응용 펌프 및 노즐, 대한기계학회, 한국정밀공학회, 유공압시스템학회 회원, 공학박사

[저자 소개]



윤소남

E-mail: ysn688@kimm.re.kr
Tel: 042-868-7155
1963년 7월 29일생

1994년 부경대학교 기계공학부 박사 과정 졸업, 1994년 한국기계연구원 입사, 2007년 한국기계연구원 나노기계연구본부 책임연구원/스마트디바이스응용연구팀장, 압전밸브 및 스마트디바이스응용연구에 종사, 유공압시스템학회, 대한기계학회 등의 회원, 공학박사

[저자 소개]



서우석

E-mail: woosseo@kimm.re.kr
Tel: 042-868-7168
1974년 8월 25일생

2000년 울산대학교 자동차공학과 학사, 2002년 동 대학원 석사, 2006년 동경공업대학 대학원 Mechano-Micro공학 전공 박사, 2002~2003년 동경공업대학 정밀공학연구소, 2006년~현재 한국기계연구원 선임연구원, 관심 연구분야는 기능성 유체 메카트로닉스, 마이크로 액추에이터, 스마트 액추에이터, 대한기계학회, 한국정밀공학회, 일본기계학회 회원, 공학박사