

# 스마트 유체(ER and MR Fluids)의 기본 특성과 응용 기술

## Rheological Property of Smart Fluid and Application Technique

안영공 · 森下信

Y. K. Ahn and S. Morishita

### 1. 서 언

최근에, 외부로부터 부가하는 전장 혹은 자장의 강도에 의해 유체의 특성을 가역적으로 변화시킬 수 있는 기능성유체의 개발이 활발히 수행되고 있다. 이들은 지능유체(Intelligent Fluid) 혹은 스마트(Smart Fluid)로서 종종 일컬어진다. 현재로서는 전기점성유체(Electro-rheological Fluid, ER Fluid)와 자기점성유체(Magnetorheological Fluid, MR Fluid)가 대표적으로 알려져 있다. 이들 유체는 본래 「지능」은 없지만, 장래적으로는 이들 유체를 응용한 「지능기계」의 실현을 목표로 한다는 의미에서 스마트 유체라고 일컬어지고 있다. 본 해설에서는 ER유체와 MR유체 2종류의 유체를 중심으로 그 기본 특성과 응용예를 소개한다.

### 2. 스마트 유체(Smart fluid)의 개념

ER유체와 MR유체 단독으로는 단지 기능성 유체(Functional Fluid)에 지나지 않는다. 이들 유체를 이용한 액추에이터를 개발하고, 그것을 지능적인 제어계에 의해 제어함으로써 소위 「스마트 시스템」이 실현된다. 지능적 제어계의 제어 알고리즘에 관해서는 본 해설에서 다루는 범위를 벗어나므로 본 장에서는 스마트 유체의 역사와 개념에 대하여 기술한다.

전기장 아래에서 특수한 유체의 점도가 걸보기상으로 변화한다는 것은 1800년대의 말기에 Duff등<sup>1)</sup>에 의해서 보고 되었다. 이 연구를 계기로 하여 주로 화학이나 유동학 분야에서 고전압 아래에 위치한 유체의 유동학적 특성의 변화에 관한 연구가 시작되었다. 그 후에 몇몇의 성과가 발표되었지만, 1948년 미국에서 W. M. Winslow<sup>2)</sup>라는 기계기술자가 전장을 외부에서 부가하면 유동학적 특성이 변화하는 특수한 입자분산계 용액을 개발하였고, 또한 각종 응용방법에 관한 특허출원을 수행하여 많은 주목을 받았다.

거의 같은 시기에 J. Rabinow<sup>3)</sup>라는 연구자가 철의

미립자를 유체에 분산시켜 자장에 응답하는 유체를 개발하였고, 또한 응용연구까지 논문에 소개를 하고 있다. Rabinow의 논문에 Winslow의 이름이 언급되어 있으며, Winslow의 논문에도 Rabinow의 논문이 인용되어 있다.

Winslow가 연구대상으로 한 전기점성유체에 관해서는 1960년대까지 유동학의 연구자를 중심으로 다양한 연구가 진행되었고, 그 중에서 특히 Klass등<sup>4)</sup>이 미립자 분산계의 유체를 이용하여 계통적인 실험결과를 보고하였다. 그 후에 세계적으로 ER유체의 연구가 활발하게 되었다.

일본에서는 1960년 후반으로부터 1970년대에 걸쳐서 와세다 대학의 加藤一郎 등<sup>5)</sup>, 오사카 대학의 犬石嘉雄 등<sup>6)</sup>, 동경공업대학의 笹田直 등<sup>7)</sup>에 의해, 거의 동시에 전기점성유체에 관한 연구가 소개되었다. 그 후, 전장에 응답하는 유체로서 액정이 추가되었고<sup>8)</sup>, ER유체는 종래의 입자분산계 유체와 액정을 대상으로 한 균일계 유체로 분류되어 오늘에 이르고 있다.

한편, MR유체에 관해서는 Rabinow이후의 연구진개를 상세히 언급하는 것은 곤란하지만, 주로 구 소련의 연구자 등에 의해 실질적인 연구가 수행되어진 것 같다. 1990년대 중반이 되어서, 위에서 언급된 ER유체의 개발이 진전이 없고, ER유체에 관계하고 있던 많은 연구자들의 흥미가 MR유체로 이동하였다. 특히 미국의 Lord Corporation회사가 적극적으로 연구를 전개하고 있는 것은 잘 알려져 있다.

MR유체의 조성은 다음 장에서 상세하게 언급하지만, 기본적으로 기름에 미소한 철분말을 분산시킨다는 의미에서 자성유체(Magnetic Fluid)의 조성과 같다. 자성유체는 1960年代에 「발명」이 되었다고 하며 특허로 등록되었다<sup>9)</sup>. MR유체와 자성유체의 차이점은 분산되는 입자의 크기에 차이가 난다는 것뿐이지만 유체의 기본특성은 아주 다르다. 단지 자성유체의 분산입자 크기의 경우가 매우 작다는 것이 알려져 있다.

한국에서는 ER유체 및 MR유체에 관해서 몇 개의

연구기관에서 연구가 수행되고 있으며, 인하대학의 최승복 등<sup>10)</sup>, 부경대학의 안영공 등<sup>11)</sup>, KAIST의 이종원 등<sup>12)</sup>, 서강대학교의 전도영 등<sup>13)</sup>, 한국과학기술 연구원의 김창호 등<sup>14)</sup>의 연구가 그 예이다.

최근 기능성재료라고 하는 명칭이 일반적으로 사용되도록 되었지만, 그 단어가 갖는 화려함과는 정 반대로 기능성재료의 용도를 발견하는 것이 일반적으로 쉽지 않다. 이것은 과거의 연구자, 기술자의 노력에 의해, 그 용도를 기능성을 재료에서 찾지 않고 시스템으로서 기능이 만족되도록 개발이 되어져 온 결과이다. 이제 와서 취급하기 어려운 값 비싼 재료를 이용하여 종래의 제품과 같은 기능을 갖도록 하는 것은 의문이 있는 것으로 미루어 생각된다. 그러나, 특수한 기능을 가진 재료를 이용하는 경험을 제공하여 지금까지 없는 기능을 갖는 시스템의 구축을 목표로 하는 것이 이 연구개발에 아주 흥미있는 부분이기도 하다.

ER유체의 개발은 주로 기업이 중심으로 되어 있고, 일본에서는 아사히카세(旭化成) 등이 적극적이다. 구미 연구자의 흥미는 현재 자기점성유체로 이동된 것으로 생각되고, MR유체를 제작하고 있는 기업으로서 미국의 Lord Corporation, 일본의 Bando화학주식회사가 알려져 있다.

### 3. 유체의 조성

#### (1) ER유체

입자 분산계 ER유체는 반도체의 성질을 갖는 미립자를 절연성이 높은 균질의 유체에 분산시킨 것이다. 입자의 직경은 서브미크론(submicron)에서 수십 미크론(micron) 정도이지, 콜로이드(colloid)용액의 입자 직경인 수십 나노미터 만큼 작은 것은 아니다. 크기에 관해서는 여러 가지 의견이 있지만, 어떤 입자 직경의 범위에서 유체의 특성을 최대한으로 나타낼 수 있는 최적치가 존재한다고 한다. 입자 직경이 너무 크면 분산 안정성이 나쁘고, 빠른 시간 내에 침전이 생긴다. 한편, 브라운 운동을 이용해서 분산 안정성을 향상시키기 위해서는 입자 직경을 수 나노미터 정도로 할 필요가 있지만, 이 정도의 크기가 되면 자기점성효과가 작아지는 것으로 알려져 있다.

균일계 ER유체로서의 액정은, 액체이면서도 결정성을 나타내는 특수한 상을 가지는 액체로, 액상과 고체상의 중간이라는 의미로 중간상이라고도 불리어진다<sup>15)</sup>. 액정은, 어느 온도 범위에서 액정성을 나타내

는 온도의존형 액정(Thermotropic Liquid Crystal)과, 어느 농도 범위에서 액정성을 나타내는 농도의존형 액정(Lyotropic Liquid Crystal)로 분류된다. 현재 이용되고 있는 액정의 대부분은 온도의존액정이고, 또한 분자량에 따라 저분자 액정과 고분자 액정으로 분류된다. 액정의 분자는 가늘고 긴 형상을 가지고, 긴축의 양단에 전기적 특성이 다른 분자가 결합하고 있다. 이 전기적 이방성에 의해 외부전장에 반응하고, 분자의 집합체가 통계적으로 배향(配向)한다고 한다. 현재 ER유체로서의 액정은 고분자액정을 이용하는 경우가 많지만, 분자의 사슬이 길뿐, 외부 전장에 대한 응답성은 저분자 액정에 비해 떨어지는 것 같다.

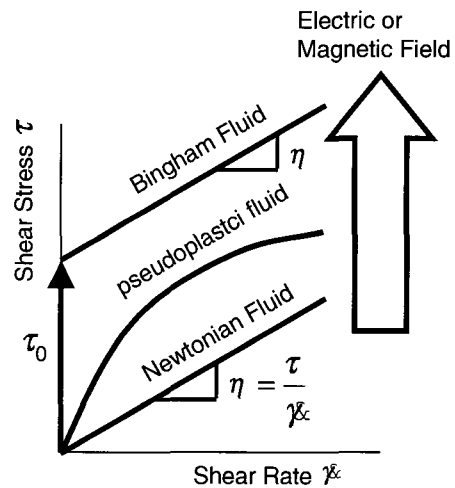


Fig. 1 Rheological Characteristics of fluid

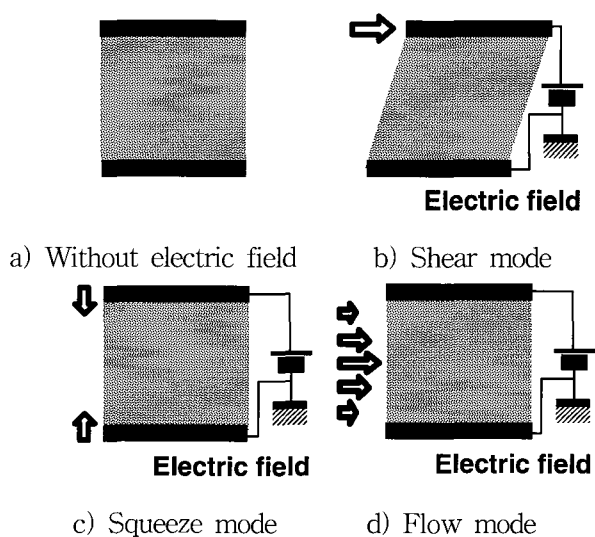


Fig. 2 Mechanism of ER effect

#### (2) MR유체

MR유체는 기본적으로는 입자 분산계의 유체이고,

입자로서는 높은 투자율을 가지는 재료가 요구된다. 높은 투자율을 가지는 반면, 잔류자장의 극력(極力)을 적게 하고 유체의 외부자장에 대한 응답성을 높게 하기 위해서, Carbonyl법에 의해 생성된 순철의 분말이 이용되어진다. 분말의 크기는 수 마이크로 정도이지만, 침전을 어떻게 억제할 것인가라는 것이 중요한 문제이다. 분산매로서는 실리콘유 또는 광유가 이용되고 있다.

#### 4. 유체의 유동학적 특성

입자 분산계 ER유체는 외부에서 전장, 또한 MR유체는 자장을 부가하는 것에 의해 유체의 항복 전단 응력이 변화하는 빙햄유체(Bingham Fluid)의 특성을 나타낸다<sup>16,21)</sup>. 그 모습을 모식적으로 나타낸 것이 Fig. 1이다. Fig. 1에 나타낸 것과 같이, 항복 전단 응력  $\tau_0$ 가 0이면서 뉴턴점도  $h$ 가 변화하면 뉴턴유체에 해당되지만, ER 및 MR유체는 외부 전장, 자장에 의해서 뉴턴점도가 변화하는 것은 아니고 항복 전단 응력  $\tau_0$ 가 변화한다.

입자 분산계 ER유체에서는 균질의 유체에 분산시킨 입자가 외부에서 부가한 전장에 의해 분극하고 입자의 클러스터(Cluster)를 형성하여 ER효과를 나타낸다고 한다. 전장 아래에서의 클러스터형성에 관한 하나의 예를 Fig. 2에 나타낸다. 클러스터 형성의 시뮬레이션으로 ER효과의 매커니즘을 규명하기 위한 연구도 많이 행해지고 있지만, 아직 명백하게 밝혀지지 않은 점도 많이 있다.

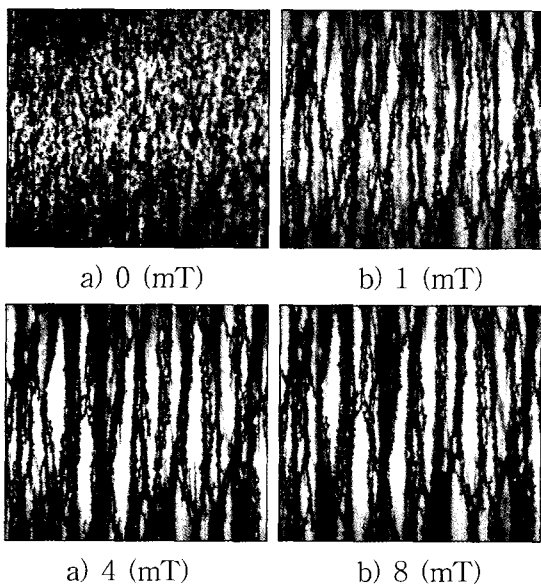


Fig. 3 Cluster formation of MR fluid

한편, 액정으로 대표되는 균일계 유체에서는 구성하는 분자 자체가 전장방향에 배향된다고 하여, 전장 아래에서는 의소성 유체(Pseudoplastci Fluid)의 특성을 나타내고, 뉴턴점도가 변화하는 것이 알려져 있다.

MR유체의 특성은, 기본적으로 입자 분산계 ER유체와 같고, 전장을 이용하는가 자장을 이용하는가라는 점 만이 다르다. 자장 아래에서 입자의 클러스터 형성의 모양을 Fig. 3에 나타내었다. 다만, 자장을 이용하면 에너지 공간밀도가 높기 때문에, 자기점성유체의 경우가 더욱 큰 힘을 끌어낼 수 있는 가능성이 있다고 한다.

#### 5. 응용연구의 소개

ER유체도 MR유체도 이용법은 유사하다<sup>20, 21)</sup>. “전장을 이용하는가? 자장을 이용하는가?” 라는 점 만으로 차이는 한정 되어진다. 전장은 유전파괴라는 문제가 있고, 또한 공간 내에 고전압을 보유할 수 없는 이유로, 유체에 대해서 큰 에너지를 공급하기 어려운 점이 있다. 전장에 비해, 자장은 높은 에너지를 보존 및 유지하는 것이 가능하기 때문에 큰 힘을 끌어낼 수가 있다. 현재까지 수행된 수많은 응용연구 가운데, 대표적인 연구에 대하여 소개 한다.

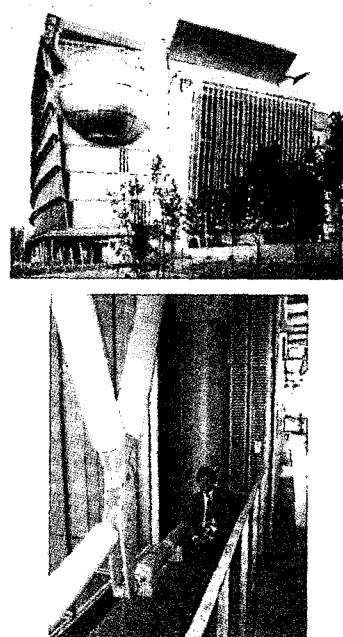


Fig. 4 Nihon-Kagaku-Miraikan, National Museum of Emerging Science and Innovation, installed with 30-t MR fluid dampers manufactured by Sawan Tekki Corporation<sup>22)</sup>

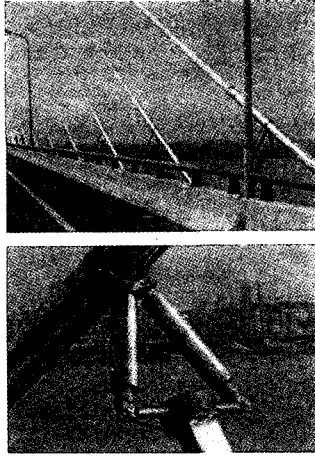


Fig. 5 MR damper installation on the Dongting Lake Bridge, Hunan, China<sup>22)</sup>

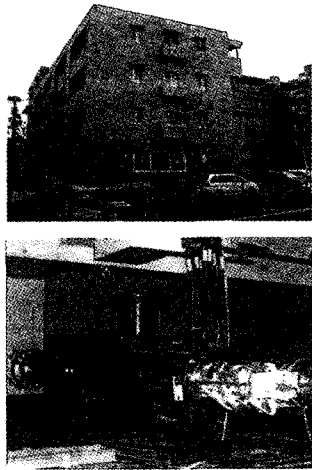
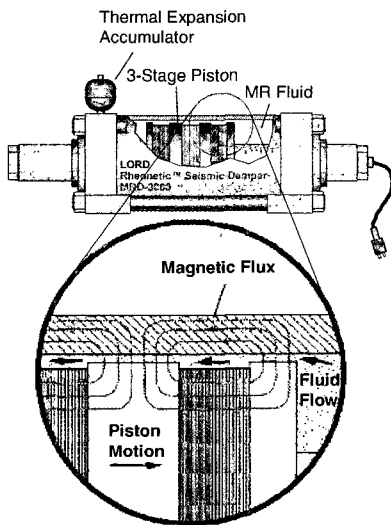
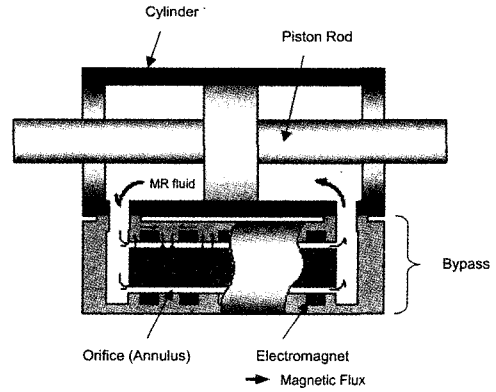


Fig. 6 Base isolated building installed with 40-t MR fluid damper manufactured by the Sanwa-Tekki Corporation<sup>22)</sup>

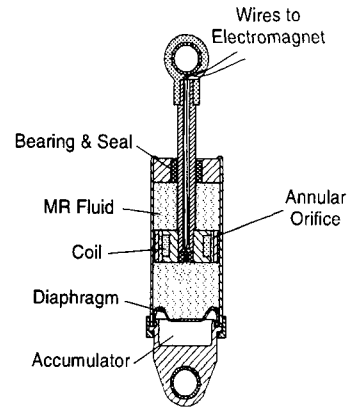


a) Schematic of MR fluid seismic damper<sup>22)</sup>

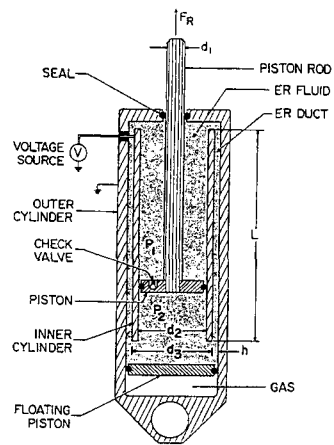


b) Structure of bypass type MR damper<sup>23)</sup>  
 Fig. 7 MR Dampers as structural control devices

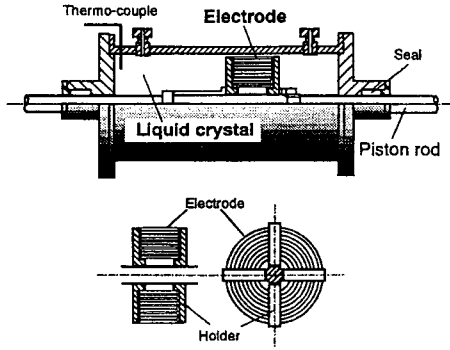
현재, MR유체를 이용한 구조물의 가변감쇠기에 관한 연구는 연구가 아주 활발하게 수행되는 분야로서 Fig. 4~Fig. 6은 실제의 구조물에 적용한 경우<sup>22)</sup>이고, Fig. 7은 대형 구조물의 진동을 제진하기 위한 전형적인 MR댐퍼의 개략도를 나타내고 있다<sup>23, 24)</sup>. Fig. 7 a)는 Fig. 2에 나타낸 유체의 전단모드, b)는 유동모드를 이용한 댐퍼이다.



a) MR suspension<sup>24, 25)</sup>



b) ER suspension<sup>26)</sup>



c) General damper using liquid crystal<sup>27)</sup>  
 Fig. 8 Typical suspension or shock absorber

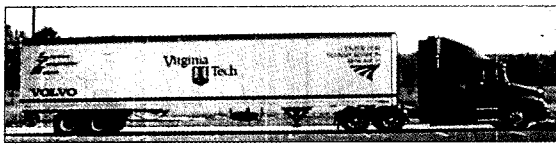


Fig. 9 Volvo heavy truck<sup>29)</sup>



Fig. 10 GM Cadillac's Imaq concept car<sup>30)</sup>



Fig. 11 Apache helicopter chain gun

Fig. 8<sup>25~27)</sup>은 Fig. 9~Fig. 15에 나타낸 차량<sup>28), 30)</sup>, 군사용 헬리콥터<sup>31)</sup>, 자전거<sup>32)</sup>, 세탁기<sup>33)</sup>, 의자<sup>24), 34)</sup>, 인공의족<sup>35)</sup> 등에 적용된 MR댐퍼의 일반적인 개략도를 나타내고 있으며, Fig. 8의 a), b), c)는 모두 유체의 유동모드를 이용한 댐퍼이다. Fig. 9는 Virginia Polytechnic Institute and State University의 연구실

에서 개발한 MR댐퍼를 대형트럭에 적용한 경우이고, Fig. 10은 General Motors가 미국 Delphi사의 MR댐퍼를 승용차에 탑재한 경우이다. MR유체는 군사연구로서도 주목을 받고 있으며, Fig. 11은 아파치 헬기 기관포의 속업소버(Shock Absorber)에 MR유체가 적용된 사례를 나타내고 있다. Fig. 12는 산악자전거(Mountain Bicycles)에 MR 댐퍼를 적용한 예를 보여주고 있다.



Fig. 12 Mountain bicycle<sup>32)</sup>

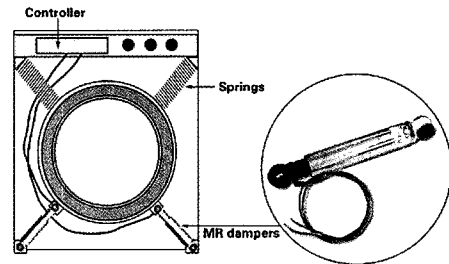


Fig. 13 Washing machine<sup>33)</sup>

Fig. 13은 Lord Corporation사가 세탁기의 댐퍼에 MR유체를 적용하였는데, MR댐퍼의 가격을 낮추기 위하여 MR 스펀지를 이용한 것이 특징이다.

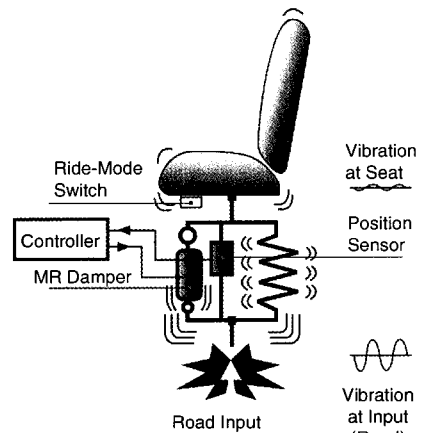


Fig. 14 Seat suspension<sup>24, 34)</sup>

Fig. 14와 Fig. 15 역시 Lord Corporation사가 적극

적으로 연구를 수행한 분야로서 MR 시트(Seat)뎀퍼에 관한 연구발표 이후에 이와 관련된 연구들<sup>36, 37)</sup>이 수행되고 있으며, 특히 MR유체를 이용한 인공의족에 관한 연구는 많은 주목을 받고 있다. Fig. 16의 a)는 ER유체를 구동유체로 하는 내경이 10 mm의 마이크로 액압시스템의 관내를 주행하는 마이크로 머신에 적용을 전제로 개발된 마이크로 밸브를 나타내고<sup>38)</sup>, Fig. 16의 b)는 MR유체를 이용한 마이크로 밸브로서 35 kPa의 공급 압력 하에서 유량제어 범위는 0~30mm<sup>3</sup>/s이다<sup>39)</sup>. 이와 같은 밸브는 유체의 유동모드, 클러치와 브레이크는 유체의 전단모드를 이용하고 있다.

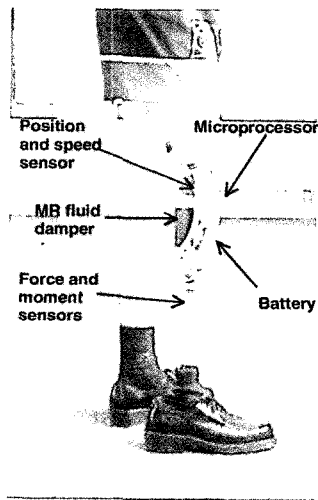
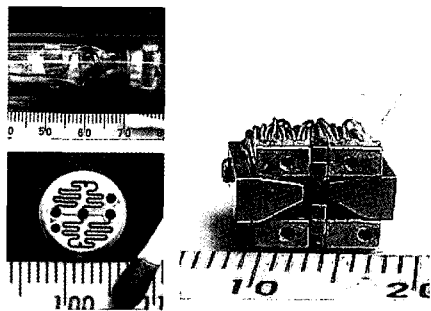


Fig. 15 Artificial knee damper<sup>35)</sup>



a) ER valve<sup>38)</sup> b) MR valve<sup>39)</sup>

Fig. 16 Valve using smart fluid

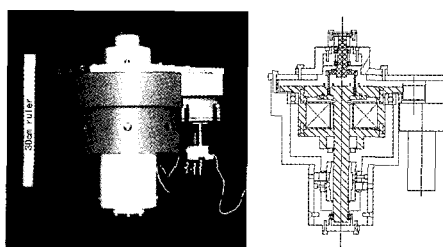


Fig. 17 MR clutch<sup>40)</sup>

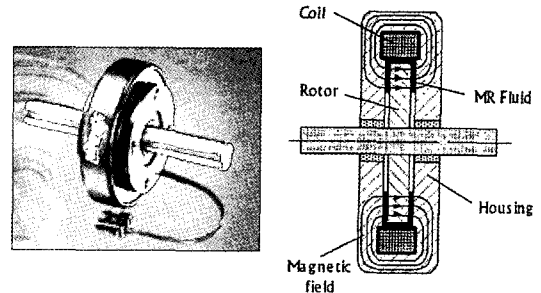


Fig. 18 MR brake<sup>42)</sup>

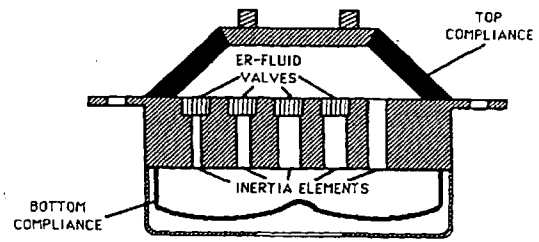


Fig. 19 Hydraulic mount ER fluid<sup>44)</sup>

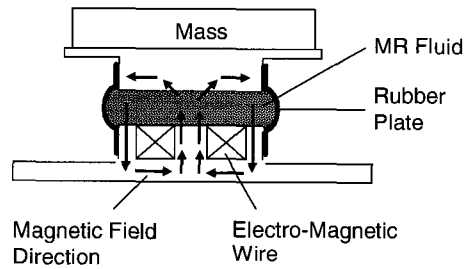


Fig. 20 Squeeze mode-type MR mount<sup>48)</sup>

ER과 MR유체를 작동유로서 이용하는 경우의 밸브전달토크를 변화시킬 수 있는 클러치<sup>3), 40~42)</sup>, 저항력을 연속적으로 변화시킬 수 있는 브레이크<sup>24), 42, 43)</sup> 등이 개발되었고, Fig. 17과 Fig. 18은 MR유체를 이용한 클러치와 브레이크의 개략도를 나타내고 있다.

한편, 정밀기기 및 차량 등에 사용되는 마운트의 제진성능을 향상시키기 위한 ER 혹은 MR마운트<sup>44~48)</sup>, 특히 스마트 유체를 이용한 차량용 유체 엔진마운트에 대해서는 많은 연구자들이 연구를 수행하고 있지만, 아직 실용화된 예는 없다. 그 이유는 엔진마운트에서 요구되는 유체에 의한 동흡진기 효과<sup>49)</sup>를 얻을 수 없기 때문으로 생각된다. 전장이나 자장을 부가하지 않은 상태에서 ER 및 MR유체의 기본점도는 엔진마운트에 사용되는 종래의 유체에 비해서 높고, 특히 MR유체가 아주 높다. 따라서 유체의 유동이 제한되어져 유체의 이동관성에 의한 동흡진기 효과를 얻는 것은 쉽지 않다. MR유체에 비해서 기본

점도가 낮은 ER유체는 유체 자체의 내구성에 관한 문제가 남아 있다. Fig. 19와 Fig. 20은 ER 및 MR유체를 이용한 마운트를 나타내고 있으며, Fig. 19는 유체의 유동모드를 이용하여 유체 마운트의 동흡진기 효과를 얻기 위해 설계되었고, Fig. 20은 유체의 스퀴즈 모드를 이용하여 공진 피크를 효과적으로 제진하기 위한 마운트이다.

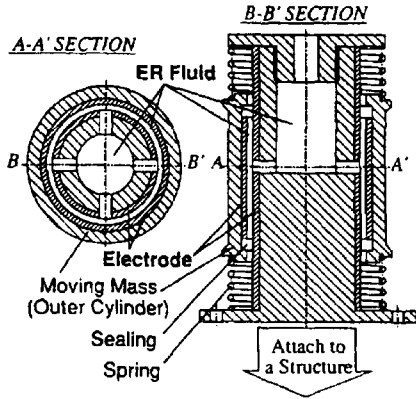


Fig. 21 Dynamic absorber using ER fluid for structure<sup>50)</sup>

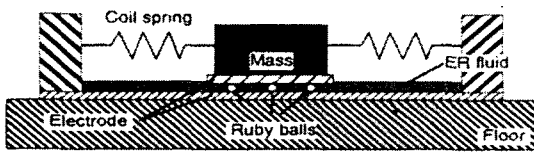


Fig. 22 Dynamic absorber using ER fluid for building<sup>51)</sup>

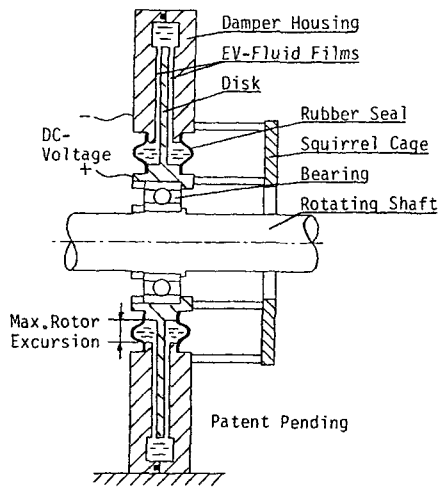


Fig. 23 ER damper for rotor system<sup>52)</sup>

또 다른 진동제진 요소로서 잘 알려진 동흡진기에 ER유체를 적용한 연구<sup>50, 51)</sup>가 수행되었으며, Fig. 21

과 Fig. 22에 동흡진기의 개략도를 나타내고 있으며, 전장을 부가함에 따라서 유체의 전단모드에 의해서 ER효과가 발생한다.

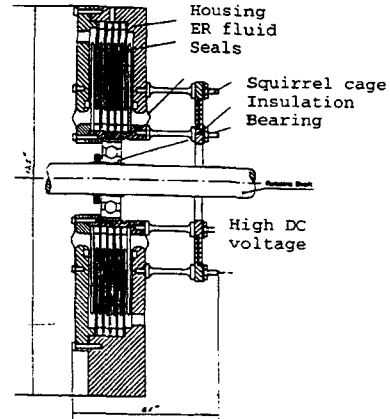


Fig. 24 ER damper for rotor system<sup>54)</sup>

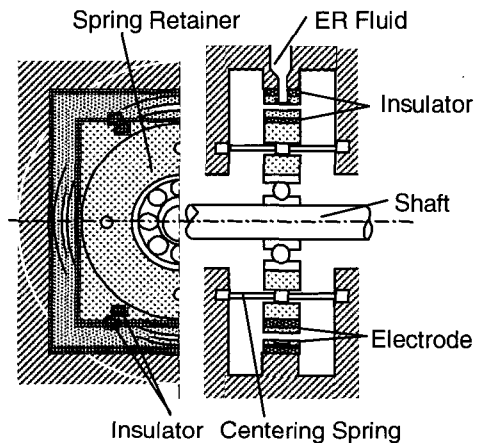


Fig. 25 Directional squeeze film damper using ER fluid<sup>55)</sup>

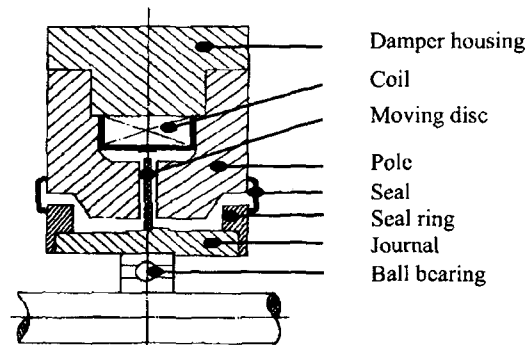


Fig. 26 Disc-type MR fluid damper for rotor system<sup>56)</sup>

회전체의 진동을 효과적으로 제어하기 위하여 ER 및 MR를 이용하는 연구 역시 많은 주목을 받고 있

는 분야이며, Fig. 23~Fig. 27에 회전체의 가변감쇠기<sup>52~57)</sup>들의 개략도를 나타내고 있다. Fig. 25는 유체의 스퀴즈 모드를 이용하는 스퀴즈 필름댐퍼이고, 감쇠특성은 수평과 수직방향에 대해서 독립적으로 제어할 수 있는 것이 특징이다. 그 외의 감쇠기는 전단 모드를 이용하고 있다.

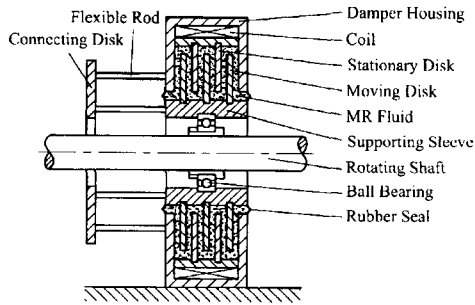


Fig. 27 Multi-disc-type MR fluid damper for rotor system<sup>57)</sup>

최근에는 신경망회로(Neural Net work) 제어이론을 병용해서 지능(Intelligent)성을 실현한 연구<sup>51)</sup>나 MR유체 내부에 분산되어 있는 입자의 클러스터 형성의 시뮬레이션<sup>58)</sup>도 수행되고 있다. MR유체는, 앞으로 더욱 더 이용 범위가 확대될 것으로 기대된다.

## 6. 결 언

이 해설에서는 ER유체와 MR유체에 대해서 기본적인 특성과 응용에 관하여 개략적으로 서술했다. 기능성재료는 앞에서 언급한 것과 같이 응용분야를 개척하는 것에 고전을 강요당하고 있다. 그 주된 이유로서는 일반적으로 가격이 높은 것, 또한 이런 종류의 기능성유체를 이용하지 않고도 같은 기능을 다른 기기로 실현될 수 있는 것이 예로 들 수 있다. 지금, 이와 같은 장애를 넘어서 사용되어질 응용방법들이 개발되면 스마트 유체를 이용한 응용연구가 더욱 활성화 될 것으로 전망된다.

## 참고문헌

- 1) A. W. Duff, Physical Review, Vol. 4, No. 1, pp. 23, 1896.
- 2) W. M. Winslow, Journal of Applied Physics, Vol. 20, pp. 1137, 1949.
- 3) J. Rabinow, AIEE Transactions, Vol. 67, pp. 1308~1315, 1948.
- 4) D. L. Klass and T. W. Matinek, Journal of Applied Physics, Vol. 38, No. 1, pp. 67, 1967.
- 5) 加藤, 宮木, 廣田, 宮地, 電氣學會東京支部大會, pp. 175, 1968.
- 6) 林, 犬石, 応用物理, Vol. 42, No. 11, pp. 1107, 1973.
- 7) 笹田, 木多, 機械の研究, Vol. 32, No. 1, pp. 63, 1980.
- 8) S. Morishita et al., Tribology International, Vol. 26, No. 6, pp. 399, 1993.
- 9) 神山, "磁性流体の入門", 産業図書, 1989.
- 10) M. V. Gandhi et al., "Electro-Rheological-Fluid-Based Articulating Robotic Systems", Proceedings of ASME Design Automation Conference, Boston, Mass, ASME Paper No. 87-DAC-55, DE-Vol.10-2, pp. 1~10, 1987.
- 11) S. Morishita and Y. K. An, "Controllable Squeeze Film Damper Using Electro-Rheological Fluid", Second International Conference on Motion and Vibration Control, Yokohama, pp. 806~810, 1994.
- 12) J. H. Kim et al., "Modeling and Control of Magneto-rheological Fluid Based Semi-active Mount", The Third International Conference on Motion and Vibration Control, Chiba, Japan, pp. 164~169, 1996.
- 13) 박찬호 등, "MR댐퍼를 이용한 반능동식 진동제어", 제어자동화시스템공학회지, Vol. 4, No. 1, 1998.
- 14) 김종립 등, "강성 회전축계를 지지한 ER-SFD의 parametric study 및 최적설계", 한국윤활학회 제29회 춘계학술대회, pp. 279~284, 1999.
- 15) 岡野光治, 小林駿介: 液晶, 培風館, 1985.
- 16) H. Block and J. Kelly, Journal of Physics, D, Vol. 21, No. 12, pp. 1661, 1988.
- 17) T. C. Jordan and M. T. Shaw, IEEE Trans. Electrical Insulation, Vol. 24, No. 5, pp. 849, 1989.
- 18) A. Inoue, Proc.2nd Int. Conf. on ER Fluid, pp. 56, 1989.
- 19) ハワード, 土井, 日本レオロジー學會誌, Vol. 20, pp. 78, 1992.
- 20) 木村, "電氣粘性流体とその応用に關する研究分科會成果報告書", 日本機械學會, 1994.



- 21) 杉本, "勞働省産業安全研究所報告", RISS-RR-27-4, 1979.
- 22) B. F. Spencer Jr., "State of the art of Structural Control", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 129, No. 7, pp. 845~856, 2003.
- 23) N. Iwata et al., "Application of MR Damper to Based-Isolated Structures", *Prod., SPIE's 9th Annual Int. Symposium on Smart Structures and Materials*, No. 4696-45, 2002.
- 24) J. D. Carlson and B. F. Spencer Jr., "Magneto-Rheological Fluid Dampers for Semi-Active Seismic Control", *Proc. 3rd Int. Conf. on Motion and Vibr. Control*, Chiba, Japan, Vol. 3 pp. 35~40, 1996.
- 25) B. F. Spencer Jr. et al., "Phenomenological Model of a Magnetorheological Damper", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 123 pp. 230~238, 1997.
- 26) N. K. Petek, SAE Technical Paper, #920275, 1992.
- 27) 森下信, *日本機械學會論文集 C*, Vol. 61, No. 581, pp. 43~48, 1995.
- 28) M. L. Oliver, "Magneto-Rheological Damping Apparatus", US Patent No. 6390253 B1, 2002.
- 29) D. E. Simon and M. Ahmadian, "Vehicle Evaluation of the Performance of Magneto Rheological Dampers for Heavy Truck Suspensions", *ASME Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 123, No. 3, pp. 365~375, M., 2001.
- 30) GM Tech link, Vol. 4, No. 1 Jan, 2002.
- 31) R. A. Snyder et al., "Characterization and Analysis of Magnetorheological Damper Behavior Under Sinusoidal Loading", *AIAA Journal*, Vol. 39, No. 7, pp. 1240~1253, 2001.
- 32) D. G. Breese and F. Gordaninejad, "Semi-Active, Fail-Safe Magneto-Rheological Fluid Dampers for Mountain Bicycles", *Int. J. of Vehicle Design*, Vol. 33, Nos. 1~3, pp. 128~138, 2003.
- 33) M. J. Chrzan and J. D. Carlson, "MR Fluid Sponge Devices and Their use in Vibration Control of Washing Machines". *Proc. SPIE* 4331, pp. 370~378, 2001.
- 34) B. A. Reichert, "Application of Magneto-rheological Dampers for Vehicle Seat Suspensions", MS Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997.
- 35) J. D. Carlson, "Magneto-rheological Fluids - Ready for Real-Time Motion Control", *Proceedings of the China-U.S. Millennium Symposium of Earthquake Engineering, Structure Control*, 2000.
- 36) 남 무호, "MR유체를 이용한 운전석 댐퍼의 성능 특성", *한국공작기계학회지*, Vol. 9, No. 5, pp. 127~134, 2000.
- 37) S. B. Choi and Y. M. Han, "MR Seat Suspension for Vibration Control of a Commercial Vehicle", *International Journal of Vehicle Design*, Vol. 31, No. 2, pp. 202~215, 2003.
- 38) K. Yoshida et al., "A Valve-Integrated Microactuator Using Homogeneous Electro-Rheological Fluid", *the Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 15, No.2, pp. 244~250, 2003.
- 39) 吉田, 鄭淵牛, 横田, *日本機械學會論文集 C*, Vol. 69, No. 682, pp. 1633~1639, 2003.
- 40) 武居, 古莊, 清田, *日本機械學會論文集 C*, Vol. 69, No. 681, pp. 1342~1349, 2003.
- 41) W. A. Bullough, "The Electrorheological Clutch: Design, Performance Characteristics and Operation", *Proc. Inst. Mech. Eng.* Vol. 207 pp. 87~95, 1993.
- 42) J. D. Carlson and T. G. Duclos, "ER Fluid Clutches and Brakes: Fluid Property and Mechanical Design Considerations", *Proc. 2nd Int. Conf. on Electrorheological Fluids (Raleigh)*, pp. 353, 1989.
- 43) J. Huang et al., "Analysis and Design of a Cylindrical Magneto-Rheological Fluid Brake, *Journal of Materials Processing Technology*", Vol. 129, No. 1~3, pp. 559~562, 2002.
- 44) T. G. Duclos, "An Experimentally Tunable Hydraulic Mount which uses Electro-Rheological Fluid", *Noise and Vibration Conference*, April 28-30, SAE Technical Paper 870963, 1987.
- 45) T. Ushijima et al., SAE paper #881787, 1988.

- 46) 森下, 三井, 榎場, 櫻田, 日本機械學會論文集 C, Vol. 58, No. 551, pp. 2045~2050, 1990.
- 47) S. B. Choi et al., "Vibration Control of a Passenger Vehicle Featuring Magneto-rheological Engine Mount", International Journal of Vehicle Design, Vol. 33, Nos. 1~3, pp. 2~16, 2002.
- 48) 안영공, "MR유체를 이용한 스퀴즈모드 형 마운트의 동특성", 한국소음진동공학회 논문집, Vol. 13, No. 6, pp. 490~495, 2003.
- 49) 안영공 등, "향상된 유전알고리즘을 이용한 유체 마운트의 최적화", 한국소음진동공학회논문집, Vol. 12, No. 12, pp. 935~942, 2002.
- 50) S. Morishita and T. Ura, "ER Fluid Applications to Vibration Control Devices and an Adaptive Beural-Net Controller", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 4, pp. 366~372, 1993.
- 51) S. Hidaka et al., Trans. ASME, J. of Vibration and Acoustics, Vol. 121, No. 2, pp. 373~378, 1999.
- 52) J. L. Nikolajsen and M. S. Hoque, "An Electroviscous Damper for Rotor Applications", Transactions of the ASME, Journal of Vibration and Acoustics, 112, No. 3, pp. 440~443, 1988.
- 53) 森下, 三井, 日本機械學會論文集 C, Vol. 56, No. 529, pp. 2367~2372, 1990.
- 54) J. M. Vance and D. Ying, "Experimental Measurements of Actively Contolled Bearing Damping with an Electrorheological Fluid", Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 122, pp. 337~344, 2000.
- 55) Y. K. Ahn et al., "Directional Controllable Squeeze Film Damper Using Electro-Rheological Fluid", ASME J. Vibration and Acoustics, 124, pp. 105~109, 2002.
- 56) C. Zhu et al., "Dynamics of Over-Hung Rotor with a Disc-Type Magneto-Rheological Fluid Damper", IFToMM Sixth International Conference on Rotor Dynamics, pp. 607~614, 2002.
- 57) J. Wang and G. Meng, "Experimental Study on Stability of an MR Fluid Damper-Rotor-Journal Bearing System", Journal of Sound and Vibration, Vol. 262, pp. 999~1007, 2003.
- 58) 白石俊彦 等, "分散粒子のクラスタ形成を考慮したMR流体の透磁率の算定", 日本機械學會論文集 C, Vol. 69, No. 680, pp. 844~849, 2003.

[저자 소개]



안영공(책임저자)

E-mail : ahn@mail1.pknu.ac.kr

Tel : 051-620-1618

1964년 3월 5일생.

1996년 일본 요코하마국립대학 박사과정 졸업. 1996년 Virginia Polytechnic Institute and State University의 Post-Doc Research Associate. 1998년 요코하

마국립대학의 Research Associate. 2000년 부경대학의 BK사업단 조교수. 한국소음진동공학회 회원. 주요 연구분야: ER 및 MR유체의 응용, 엔진마운트, 스퀴즈필름댐퍼

[저자 소개]



森下 信

E-mail : mshin@ynu.ac.jp

Tel : 81-45-339-4090

1954년 12월생.

1983년 동경대학교 박사과정 졸업, 1985년 일본의 요코하마국립대학의 조교수. 1997년 동 대학의 교수. 일본기계학회, 미국기계학회, 일본트라이볼러지학회 회원. 주요 연구 분야: ER 및 MR유체의

응용, Neural Net Work를 이용한 Intellegnet제어, Cellular Automata에 의한 사람 흐름의 시뮬레이션, 동물세포의 역학적모델 구축. 2족 보행 로봇의 개발