

스마트 ER 및 MR 유체를 이용한 유압시스템 설계 및 제어기술 Design and Control Technology for Hydraulic Systems Using Smart ER & MR Fluids

최승복 · 성민상 · 하성훈
S. B. Choi, M. S. Seong and S. H. Ha

1. 서론

유압 시스템의 메커니즘을 구성하는데 있어 밸브는 가장 기본적이며 중요한 구성 요소로서 유체의 압력과 유량을 기계적인 이동장치에 의해 조절하여 제어 대상 시스템의 전달력을 변화시킨다.

대부분의 기존 유압 시스템은 기계적 이동 장치를 조절하여 제어 대상 시스템의 전달력을 변화시키므로 시스템의 응답성 저하가 불가피하다. 이러한 문제점을 극복하기 위한 일환으로 기계적인 설계 변경이나 피드백 제어와 연계된 서보 유압 제어 시스템에 관한 많은 연구가 수행되어 오고 있다. 그러나 점차적으로 기계적 메커니즘이 고속, 고정밀성의 높은 시스템 성능을 요구함에 따라 밸브 시스템이 복잡해지고 우수한 성능과 저렴한 비용을 구현하기 어렵게 되었다. 따라서 최근 스마트(smart) 유체라 불리는 전기 유동(electrorheological: ER) 유체(이하 ER 유체) 혹은 자기 유동(magnetorheological: MR) 유체(이하 MR 유체)를 이용한 새로운 차원의 밸브 시스템 연구가 활발히 진행되고 있다.

ER 유체는 부하되는 전기장의 강도에 따라 역학적 특성이 변하는 유체를 말하며, 외면상 가장 두드러진 특징은 전기장 무부하시 액체 상태에서 전기장 부하시 고체 상태로 상변화(phase change)하는 것이다. 이를 역학적 관점에서 표현하면 전기장 무부하시 뉴토니안(Newtonian) 유체의 특성을 보이나, 전기장 부하시 항복 전단 응력을 갖는 빙햄(Bingham) 유체로 변하게 된다. 이때 발생하는 ER 유체의 항복 전단응력은 부하되는 전기장의 함수가 되며, 전기장을 조율(tuning)함으로써 밸브 시스템에서 요구되는 압력 크기를 얻을 수 있다. 또한, MR 유체는 부하되는 자기장의 강도에 따라 그 역학적 특성이 ER 유체와 유사하게 변화하는 유체를 말한다. 전기장 혹은 자기장에 대한 ER 유체와 MR 유체의 반응은 순간적으로 이루어진다. 이는 기존 기계적 장치에 의해 구현하기 어려운 매우 빠른 응답 조건을 충분히 만족시

키고, 나아가서 연속적으로 압력을 가변할 수 있는 밸브 시스템 구현을 가능하게 한다.

설계 및 제작 측면에서 볼 때, 기존 밸브 장치는 복잡하고 정밀한 부품들로 구성되어 있는 반면에 ER 유체를 이용하면 압력과 유량을 조절하기 위한 전극(electrode)만을 필요로 하고, MR 유체를 이용하면 자기장을 발생시키기 위한 코일(coil)만을 필요로 하며 밸브 내부의 기계적 이동 장치는 필요 없게 된다. 다시 말하여 작동기(actuator) 및 밸브가 하나의 단일 구조로 형성되어 있어 설계의 단순화와 이에 따른 경제적 이득을 꾀할 수 있다. 또한, 유체에 가해지는 전기장 혹은 자기장의 세기만으로 외부 제어 대상 시스템에 전달되는 유체의 압력을 실시간에 연속적으로 가변함과 동시에 기존보다 더욱 정밀한 압력변화를 통한 고속, 고정밀도의 제어성으로 경제성과 더불어 신뢰성면에서 강점을 갖게 된다. 실제 제어성 측면에서도 유체 자체의 힘을 제어함으로써 외부 시스템의 속도와 위치제어가 동시에 가능하게 된다.

ER 유체와 MR 유체는 폭 넓은 응용성으로 인해 실제 메커니즘에 대한 효율성과 우수성에 대한 심도 깊은 연구가 진행되고 있으며, 산업현장 전반에 상용화 된 응용장치가 적용되고 있다. 특히 유압 시스템 부문과 자동차 관련부품분야에서 활발한 연구가 진행되고 있는데, 시스템의 정확한 위치 제어와 빠른 응답특성을 이용하여 속업소버, 진동 절연장치, 엔진 마운트, 클러치 및 브레이크 시스템, 각종 유압시물레이터 그리고 지능 구조물 등에서 다양하게 활용되고 있다. 따라서, 본 글에서는 ER 유체와 MR 유체의 특성과 이를 적용한 유압시스템의 구성과 작동원리 및 그 응용성에 관한 연구 현황에 대하여 기술하고자 한다.

2. ER/MR 유체의 특성

2.1 ER 유체의 특성

ER 유체는 일반적으로 비전도성 용매에 전도성을

갖는 입자들을 분산시킨 콜로이드(colloid)용액으로, 전기장 무부하시에는 액체 상태를 떠나, 전기장 부하에 따라 고체상태로 상변화를 하게 된다. 이때 발생하는 ER 유체의 항복 전단 응력은 부하되는 전기장에 대하여 지수적 함수관계를 갖는다. 이러한 현상의 발견은 100여년전 독일에서 처음 보고되었으며, 1947년 미국의 Winslow가 미세한 고체 입자인 녹말가루와 광물성 기름을 혼합하여 만든 불용해성의 유체에 전기장 부하시 유체저항이 현저히 증가하는 현상을 보고하면서 그 중요성이 인식되었다¹⁾. Winslow는 부하된 전기장이 유체의 점성을 증가시킨다고 가정했고, 따라서 그 물질을 ‘electroviscous fluid’라고 이름지었다. 그러나, 유체에 대한 해석이 진행되면서 Winslow가 보고한 유체에 있어서의 가정은 정확한 것이 아니며, 용어 또한 ‘electroviscous’보다는 현재 널리 사용되고 있는 ‘electrorheological’이 더욱 적절한 표현이 되었다.

ER 유체의 특성변화의 모습은 그림. 1과 같다. 전기장 무부하시에는 ER 유체 중의 입자가 양극 또는 음극으로 자유로이 운동을 하기 때문에 ER 유체는 뉴토니안 유체 상태로 존재하게 된다. 그러나 전기장을 부하하면 유체 중에 분산된 입자가 양쪽의 전극을 향하여 체인형 구조를 형성하며, 그 결합력에 의하여 항복 응력 전까지는 유체 유동을 보이지 않다가 항복 응력과 외부에서 가해지는 전단력이 같아지면서 흐름이 시작되는 빙햄유체상태로 변화하게 된다²⁾. 전기장 무부하시의 등방향(isotropic) 성질에서 전기장 부하시의 이방향(anisotropic) 성질로의 상변화는 가역적으로 이루어지며, 그 반응 시간은 1 ~ 5ms 정도로, 매우 빠른 반응속도를 보인다. 또한 상변화를 위해 필요한 전기장의 세기는 ER 유체마다

다르나, 약 $1 \sim 2kV/mm$ 에 전류밀도가 약 $10\mu A/cm^2$ 이하이기 때문에 상변화를 위해 요구되는 전력은 매우 낮다. 이러한 우수한 특성 때문에 유압시스템을 비롯하여 여러 응용장치에 적용될 수 있다.

일반적으로 ER 유체의 거동을 나타내는 구성식은 ER 효과 메커니즘을 기초로 하여 전단(shear)의 함수로 표현된다. 전단 변형률이 클 경우에는 전기장 부하시 빙햄 거동(Bingham behavior)을 나타내며, 이는 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다³⁾.

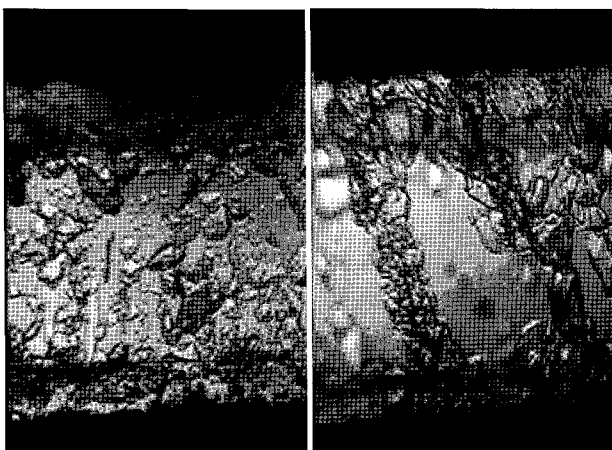
$$\tau = \tau_y(E) + \eta \dot{\gamma}, \quad \tau_y(E) = \alpha E^\beta \quad (1)$$

여기서, τ 는 ER 유체의 전단응력을 나타내고, η 는 ER 유체의 점성계수, $\dot{\gamma}$ 는 전단비를 나타낸다. 그리고 $\tau_y(E)$ 는 ER 유체의 항복 전단 응력으로 전기장 E 의 증가와 더불어 증가하며, αE^β 의 함수관계로 표현된다. ER 유체의 전단 거동식 (1)에서 비례 상수 α 와 지수 β 값은 ER 유체의 고유 특성치로 실험을 통해 구할 수 있다. 식 (1)의 관계로부터 전기장에 대한 전체 전단 응력의 증가 및 항복 전단 응력의 크기 등을 예측할 수 있다.

2.2 MR 유체의 특성

MR 유체는 자기장 부하 시 유체 흐름의 저항이 증가하는 MR 효과를 가진 유체로, Jacob Rabinow가 최초로 발견, 개발하였으며, Winslow의 ER 효과와 유사한 현상을 보인다. MR 유체는 낮은 투자율(permeability)의 용매에 상자성(paramagnetic)입자를 분산시킨 유체로, 자기장 무부하시에는 입자가 자유롭게 운동하는 뉴토니안(Newtonian) 유체와 같은 거동을 보이지만 자기장 부하시에는 입자가 대전되어 체인 구조를 형성하여 항복응력을 갖는 빙햄(Bingham)유체의 거동을 보인다. MR 유체의 자기장에 따른 항복응력의 연속적 변화는 댐퍼, 밸브, 마운트, 클러치, 브레이크 등 폭 넓은 응용장치에 적용될 수 있다⁴⁾. Fig. 2는 MR 유체의 거동에 대한 마이크로 메커니즘으로, 자기장 무부하시에는 유체에 분산된 입자가 자유운동을 하여 등방성의 성질을 보이지만 자기장을 부하하면 유체내의 입자가 유도자극을 일으켜 자극을 향하는 다수의 조직을 형성함으로써 이방성의 거동을 갖게 되어 유체의 유동이나 외부에서 가해지는 전단력에 대하여 저항을 나타낸다.

일반적으로 MR 유체의 항복응력 τ_y 는 자기장 H 에 지수적인 비례관계를 갖는 빙햄모델로 표현할 수 있다.



(a) No voltage (b) Voltage Applied
Fig. 1 Micro-photograph of the ER effect

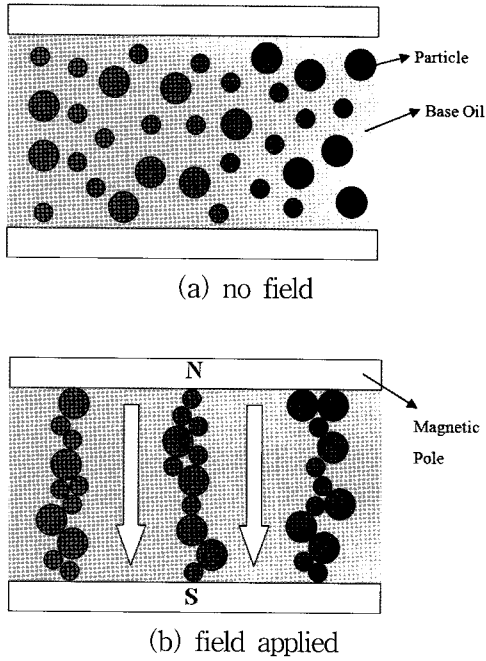


Fig. 2 Micro-mechanism of the MR effect

$$\tau = \tau_y(H) + \eta \dot{\gamma}, \quad \tau_y(H) = \alpha H^\beta \quad (2)$$

여기서 τ 는 MR 유체의 전단응력을 나타내며, η 는 MR 유체의 기본점성계수이고 $\dot{\gamma}$ 은 전단비이다. H 는 자기장이며, $\tau_y(H)$ 는 MR 유체의 항복전단응력을 표현하는 것으로, H 의 증가에 따라 증가한다. 비례 상수 α 와 지수 β 값은 MR 유체의 고유 특성치로 실험을 통해 구할 수 있다. 식 (2)의 관계로부터 자기장에 대한 전체 전단 응력의 증가 및 항복 전단 응력의 크기 등을 예측할 수 있다.

3. ER 유체를 이용한 유압시스템기술

3.1 ER 밸브

Fig. 3은 ER 밸브의 전체적 형상과 내부 구조를 나타낸다. ER 밸브는 다단 평판형으로, 평판과 평판 사이를 글라스 에폭시로 절연시키고 간극들 사이로 ER 유체를 유입시켜 유동을 발생시킨다. 이때 각각의 평판은 고전압 공급장치와 연결되어 있어 전극판으로서 작용된다. 전원 공급장치와 각 전극판과의 연결은 그림에서와 같이 (+)전원과 (-)전원을 반복적으로 연결하여 ER 유체에 전기장을 공급한다. 간극 사이로 유체가 유동될 때, 전체 전극판에 요구되는 세기의 전기장을 부하함으로써 ER 밸브는 ER 효과를 발생시키게 된다. ER 밸브에서 발생하는 전체 압력 강하는 점성과 ER 유체의 전기장에 따른 압력강하의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

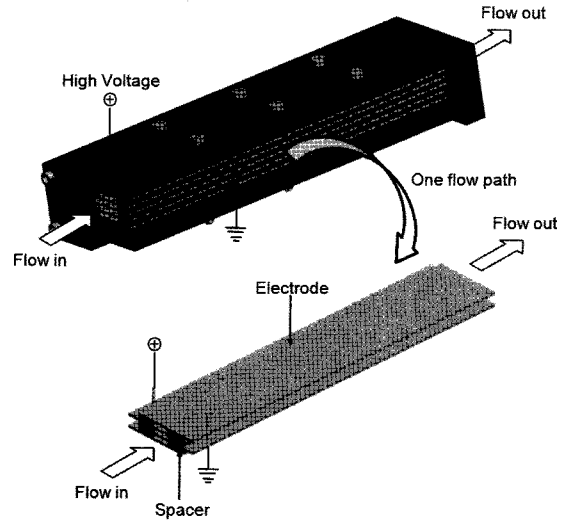


Fig. 3 Schematic diagram of the ER plate valve

$$\Delta P = \Delta P_\eta + \Delta P_{ER} = 12\eta \frac{L}{bh^3} Q + 2 \frac{L}{h} \tau_y(E) \quad (3)$$

여기서 Q 는 유량, b 는 평판의 너비, h 는 전극판 간극 그리고 L 은 전극판의 길이이다. 식 (3)을 살펴보면, 전기장을 가하지 않았을 경우에는 전기장에 의한 항복전단응력이 없어지므로 전체 압력은 밸브내의 ER 유체의 점성에 의해서만 영향을 받는다. 그러나 전기장을 가했을 때에는 공급압력이 ΔP_{ER} 을 초과하지 않을 경우에는 유체의 흐름이 나타나지 않다가, ΔP_{ER} 을 초과하는 순간부터 유체의 흐름이 다시 시작되게 되는 것이다. 이러한 특징으로, 기존 유압 시스템과는 달리 기계적인 이동 장치 없이 밸브와 액추에이터의 두가지 역할을 수행함과 동시에 전기장에 따른 ER 유체의 빠른 반응시간으로 더욱 넓은 제어 영역을 갖게 된다. 또한 식 (3)으로부터 알 수 있듯이 ER 밸브의 성능은 밸브 전극의 너비와 길이, 전극판의 간극 등과 같은 설계변수와 부하되는 전기장의 크기 그리고 ER 유체의 항복전단응력의 크기 등에 의해 영향을 받는다. 특히 전극판 간극 h 가 매우 중요한 설계 변수임을 알 수 있다.

이러한 ER 밸브의 연구는 ER 유체의 고유 특성과 연계해 볼 때 매우 적합한 응용장치로 인식되어 많은 진전이 이루어지고 있다. 1991년 영국의 Simmonds는 평판형의 ER 밸브를 제안하여 전기장에 따른 압력강하를 고찰하였고 이를 바탕으로 실용화를 위한 문제점과 방향을 제시하였다⁵⁾. 또한 일본의 Nakano 등은 평판형 밸브를 통과하는 ER 유체를 하겐-포아젤(Hagen-Poiseuille) 흐름으로 해석하고 전기장 부하시의 압력 강하에 대한 과도 응답과 ER

유체의 압축성 효과를 고찰하였다⁶⁾. 국내에서는 인하대학교 기계공학과 지능 구조물 및 시스템 연구실에서 다단 실린더형 ER 밸브를 제안하여 전기장 크기와 유량에 따른 압력 강하를 실험적으로 고찰하였으며⁷⁾, ER 밸브를 이용한 자동하역시스템의 제어에 관한 연구를 보고하였다^{8,9)}.

3.2 ER 밸브를 이용한 자동하역시스템

항만 자동 하역 시스템의 실용화를 위해서는 플랫폼의 상하 위치제어, 컨테이너의 운송, 선박의 고정 메커니즘 및 전용선박의 개발 등 여러부분에서 심도 있는 연구가 이루어져야 한다. 이 중에서 플랫폼의 상하 위치제어를 위한 이동 메커니즘은 조수간만의 차 및 파도에 대한 선박의 위치변화를 능동적으로 제어 하도록 구성해야 한다. 이러한 플랫폼에 일반적인 유압시스템이 아닌 ER 밸브를 이용한 유압 시스템을 적용하는 경우, ER 유체의 빠른 반응성 및 밸브장치의 단순화 등 많은 장점이 있다. 인하대학교 기계공학과 지능 구조물 및 시스템 연구실에서는 자동 하역 시스템에 실제 적용할 수 있는 200ton 플랫폼을 제어하기 위하여 ER 밸브 시스템의 설계, 모델링 및 성능해석을 수행하고, 플랫폼의 높이를 요구위치에 정확히 추적제어하기 위한 H_{∞} 제어를 구축하였다^{8,9)}. Fig. 4는 항만 자동 하역 시스템의 개략도를 나타낸 것으로, 실험 결과 ER 밸브를 이용한 항만 자동 하역 시스템을 적용할 경우 기존 하역 시스템에 비해 작업속도가 5~6배 이상 상승하여 매우 우수한 하역 효율을 보여주었다.

3.3 ER 밸브를 이용한 차량용 ABS 시스템

차량의 ABS (anti-lock brake system)는 타이어의

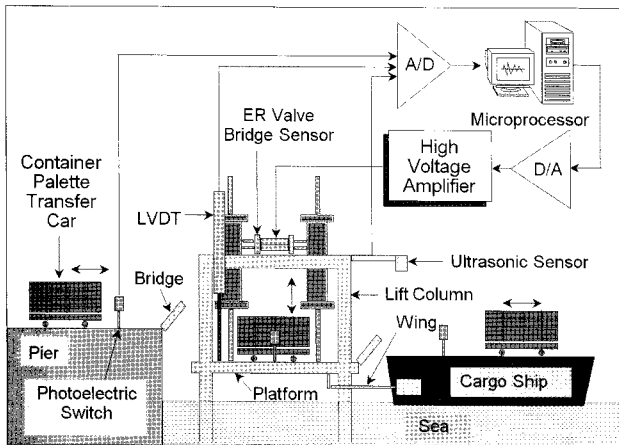


Fig. 4 Principle diagram of the cargo handling system with ER valve

고착을 방지하여 차량의 자세안정과 조향능력 확보, 그리고 다양한 노면 조건에서 제동거리를 단축함으로써 제동하는 과정에서 발생하는 위험성을 배제하기 위한 수단으로 사용된다. 대부분의 ABS는 유압 작동기로서 솔레노이드(solenoid) 혹은 비례 밸브(proportional valve)를 사용하고 있으며, 요구값의 만족을 위하여 밸브의 개/폐 신호만을 결정하여 제어한다. 이러한 경우 밸브의 응답속도가 ABS 성능에 가장 중요한 영향을 주며, 특히 개/폐 신호의 반복에 의한 떨림(chattering) 현상 등이 발생하여 브레이크 페달 감각이 나빠지는 경향이 있다. 인하대학교 기계공학과 지능 구조물 및 시스템 연구실에서는 이러한 문제점에 대한 해결책의 하나로 빠른 응답특성과 연속 제어성능을 갖고 있는 ER 유체로 작동되는 새로운 형태의 ABS를 제안하였다¹⁰⁾. 이 연구에서는 복잡하고 정밀한 부품들로 구성되어 있는 솔레노이드 밸브를 대신하여 ER 밸브를 적용하여 설계의 단순화와 이에 따른 경제적 이득을 꾀하였다. 한편, 제어성 측면에서는 ER 유체 자체의 힘인 항복응력을 제어함으로써 대상 시스템의 속도와 위치 제어가 동시에 가능하게 되며 제어 알고리즘 구성시 연속 가변성을 특징으로 하여 신뢰성과 정밀성 향상을 위한 다양한 제어 이론을 도입할 수 있는 폭 넓은 자유도가 보장된다.

Fig. 5는 ER 밸브를 이용한 ABS 시스템의 개략도이다. 이 연구에서는 실제 ER ABS 시스템을 제작하고 다양한 제어 알고리즘을 구축하여 여러 노면 조건에서 슬립률과 요 레이트(yaw rate)를 제어하였다. 제안된 ABS 시스템의 효율성과 우수성을 입증하기 위하여 비대칭 노면 시험 등 여러 제동 성능을 기존 ABS와 비교한 결과 기존 ABS에서 발생하는 떨림 현상을 제거하여 제동능력과 차량 안정성 면에서 우수한 효과를 가져왔다.

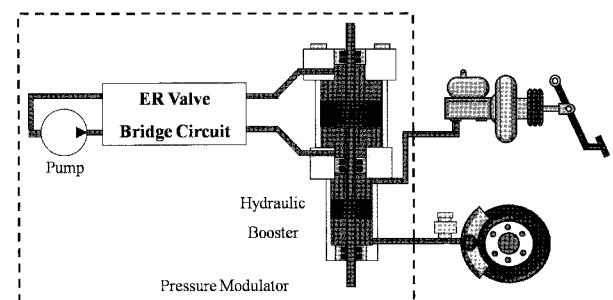


Fig. 5 Schematic configuration of ABS using ER valve pressure modulator

4. MR 유체를 이용한 유압시스템기술

4.1 MR 밸브

MR 밸브는 기존 밸브들과는 달리 기계적 작동부 없이도 큰 유체 동력을 효과적으로 제어할 수 있기 때문에 장치의 경량화 및 단순화에 매우 유리하다. 따라서 많은 연구자들에 의해 Fig. 6과 같이 MR 유체를 이용한 릴리프 밸브, 양방향 유동 밸브, 압력 및 유량제어 밸브, 디젤 엔진용 흡배기 조절 밸브 및 바이패스 댐퍼용 밸브 등에 대한 다양한 연구가 수행되어 왔다.

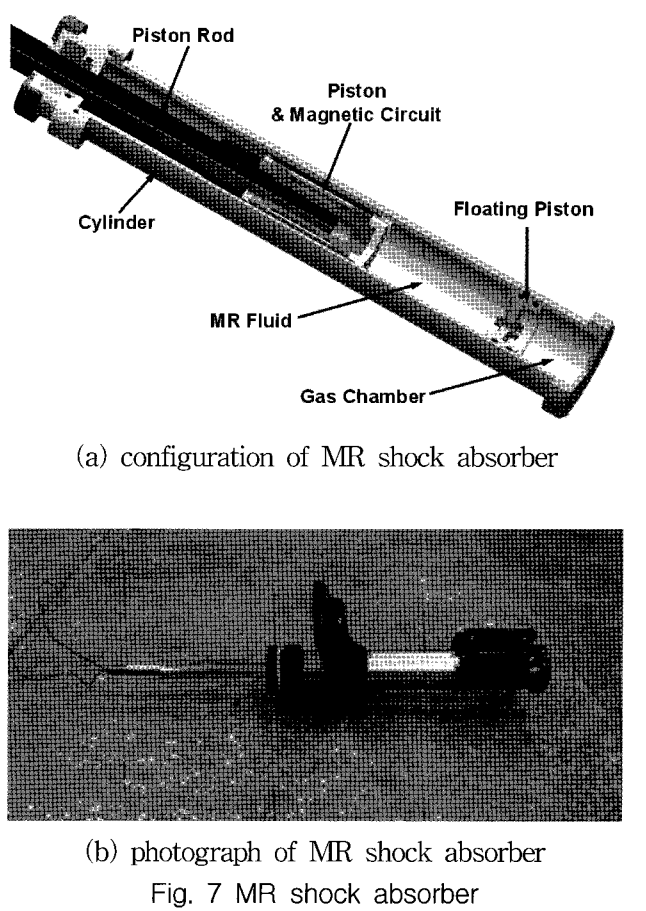
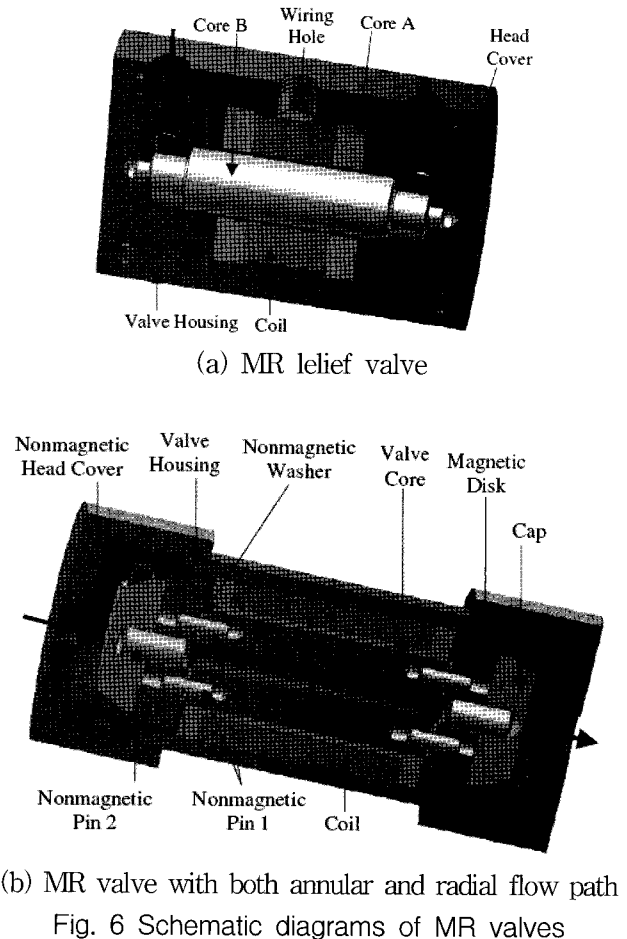
미국의 Yoo 등은 유한요소해석을 통하여 밸브의 성능은 유지하면서 밸브 크기의 최소화를 시도했다¹¹⁾. 이러한 최적설계는 제한된 밸브의 크기에 대해서 자기회로가 최대 자속밀도 분포를 갖도록 한다. 또한, 개발된 MR 밸브를 이용하여 휘스톤 브릿지 구조의 유압 시스템을 구성하고 이에 대한 성능평가를 수행하였다¹²⁾. 국내에서는 부산대학교 기계공학부의 김기환 등이 MR 밸브의 성능을 개선하기 위한 자기회로의 해석적 설계방법을 제시하였으며¹³⁾, 인하대학교 기계공학과 지능 구조물 및 시스템 연구실에서는

FEM 기법을 사용한 MR 밸브의 형상 최적화에 대한 연구를 수행하였다¹⁴⁾.

4.2 MR Shock Absorber

최근 차량에 전자제어 개념이 도입되면서 도로의 노면 상황과 차량 주행 조건에 따라 현가장치를 제어하기 위한 다양한 연구가 수행되고 있다. 그 중에서도 능동형 현가장치는 우수한 제어성능에도 불구하고 큰 동력, 복잡한 구조, 고비용 등의 문제로 인해 상용화에 어려움을 겪고 있다. 이에 반해 구조가 간단하고 저비용으로 구현할 수 있는 반능동 현가장치에 대한 관심이 최근 높아지고 있다. 특히, MR 유체를 이용한 현가장치는 큰 동력 없이 인가되는 자기장의 크기에 따라 가역적이고 연속적으로 댐핑력을 제어할 수 있어 능동형 현가장치에 가까운 성능을 발휘할 수 있다.

Fig. 7은 차량 현가장치용 MR 속 업소버이다. 그림에서 보는 바와 같이, 가진에 따른 피스톤의 상하 운동에 의해 MR 유체의 유동이 발생되어 유체가 피스톤 헤드의 유로로 흐르게 된다. 피스톤 헤드에 장치된 코일에 전류를 가해 자기장을 형성하게 되면 MR 유체는 순간적으로 뉴토니안 유체거동에서 빙햄



거동으로 변화하게 된다. 즉 자기장이 부하됨에 따라 MR 유체에 항복전단응력이 발생되어 유로 내의 유동저항이 증가하게 되고, 이는 피스톤 상하의 압력차를 증가시키게 되어 피스톤의 상하운동에 소요되는 힘을 증가시킨다. MR 유체의 항복전단응력은 자기장의 세기에 따라 변화되므로, 자기장의 강도 변화만으로도 MR 댐퍼에 연속적인 댐핑력을 발생시킬 수 있다.

미국의 Wereley 등은 ER 댐퍼와 MR 댐퍼에 발생하는 히스테리시스(hysteresis)현상에 대한 모델링을 수행하였으며¹⁵⁾, Delphi사에서는 상용 MR 댐퍼를 개발하여 GM Cadillac, Audi, Ferrari, Corvette 등에 장착되고 있다. 국내의 경우 인하대학교 지능 구조물 및 시스템 연구실에서 차량용 MR 속 업소버를 유한요소 최적설계 기법을 이용하여 제작하였으며¹⁶⁾, 이를 실제 차량에 장착해 도로 주행 성능을 평가하고 있다.

4.3 건물 및 교량용 MR 댐퍼

초고층 건물 및 교량 등 초대형 구조물은 지진과 바람에 과도한 응답을 일으켜 구조물의 안정성은 물론 거주자 또는 사용자의 사용성에 큰 영향을 미친다. 이와 같은 이유로, 국내외 많은 연구기관에서 지진과 바람 등의 동적하중에 대해서 여러 감쇠장치를 이용한 진동제어 연구가 광범위하게 수행되어오고 있다. 초대형 구조물의 진동제어 연구는 능동제어장치를 중심으로 수행되어져 왔으나, 최근 소량의 전력 공급으로 큰 제어력을 발생시키는 MR 감쇠장치가 능동제어장치를 대체할 방안으로 고려되고 있다. 외국의 경우 사장교 형식의 초대형 크기의 교량에 응용되고 있다.

국내에서도 초대형 구조물에 과도한 동적응답을 저감시킬 수 있는 대용량 MR 감쇠장치를 개발하는 연구가 한국기계연구원을 중심으로 수행되고 있다¹⁷⁾. Fig. 8은 이상현 등이 개발한 대형 MR 감쇠장치의

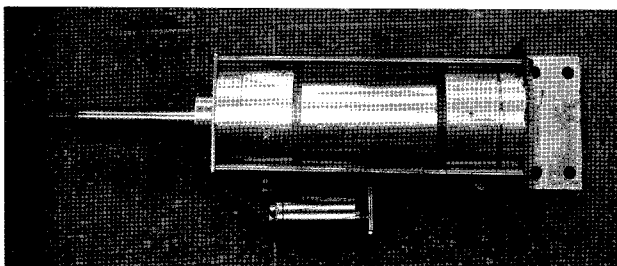


Fig. 8 Photograph of MR damper for building structure

사진이다¹⁸⁾. 이와 같은 MR 감쇠장치를 5층 규모의 철골 구조물에 설치하여 지진하중 실험을 수행한 결과, 가속도 면에서 각 층에 대해 우수한 제어성능을 보였다.

5. 맺음말

본 글에서는 ER 유체 및 MR 유체의 특성 설명과 더불어 ER 유체와 MR 유체를 적용한 유압시스템의 연구 현황에 대하여 살펴보았다. 서론에서 설명한 바와 같이 ER 유체 및 MR 유체는 새로운 차원의 재료로서 유압시스템 및 진동제어분야에 무한한 잠재력과 다양한 응용장치의 개발을 창출할 수 있는 아주 매력적인 연구 분야이다.

미국, 일본을 비롯한 많은 나라에서 ER 유체와 MR 유체 및 이를 이용한 응용장치에 대한 연구를 꾸준히 수행하고 있으며, 자동차, 항공, 국방, 건설 및 각종 제조 산업분야에서의 국가기술 경쟁력을 확보해 나가고 있다. 따라서, 국내에서도 국가 차원의 연구 개발을 계획하여 수행함으로써 차세대 성장동력 산업의 한 분야로 육성해야 할 것으로 판단된다.

참고 문헌

- 1) W. M. Winslow, "Induced Fibration Suspensions", Journal of Physics Technology, Vol. 20, No. 12, pp. 1137~1140, 1949.
- 2) P. M. Adriani and A. P. Gast, "A Microscopic Model of Electrorheology", Physics of Fluids, Vol. 31, No. 10, pp. 2757~2768, 1988.
- 3) J. M. Ginder and S. L. Ceccio, "The Effect of Electrical Transients on The Shear Stresses in Electrorheological Fluids", Journal of Rheology, Vol. 39, No. 1, pp. 211~234, 1995.
- 4) J. D. Carlson, D. M. Cantanzarite and K. A. St.Clair, "Commercial Magnetorheological Fluid Devices", Electro-Rheological Fluids, magneto-rheological suspensions and associated technology, pp. 20~28, 1996.
- 5) A. J. Simmonds, "Electro-Rheological Valves in a Hydraulic Circuit", IEEE Proceeding-D, Vol. 138, No. 4, pp. 400~404, 1991.
- 6) M. Nakano and T. Yonekawa, "Pressure Response of ER Fluid in a Piston Cylinder-ER

- Valve System", Proceedings of the Fourth International Conference on Electrorheological Fluids, pp. 477~489, 1994.
- 7) 이교정 외 4인, "전기유동유체를 이용한 실린더형 밸브의 성능 고찰", 한국정밀공학회지, 제11권, 제4호, pp. 148~157, 1994.
 - 8) 성금길, 정달도, 최승복, "ER 밸브를 이용한 자동하역시스템의 제어(I)-ER밸브의 모델링", 한국정밀공학회지, 제18권, 제9호, pp. 45~52, 2001.
 - 9) 성금길, 정달도, 최승복, "ER 밸브를 이용한 자동하역시스템의 제어(II)-하역시스템의 모델링 및 제어", 한국정밀공학회지, 제18권, 제9호, pp. 53~60, 2001.
 - 10) M. S. Cho and S. B. Choi, "Control Performance of Vehicle ABS Featuring ER Valve Pressure Modulator", International Journal of Modern Physics B, Vol. 19, No. 7,8&9, pp. 1696~1702, 2005.
 - 11) J. H. Yoo and N. M. Wereley, "Design of a High-Efficiency Magnetorheological Valve", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 13, pp. 679~685, 2002.
 - 12) J. H. Yoo and N. M. Wereley, "Performance of a Magnetorheological Hydraulic Power Actuator System", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 15, pp. 847~858, 2004.
 - 13) 김기한, 남윤주, 박명관, "MR 밸브의 전자기적 설계와 성능평가", 대한기계학회논문집 A권, 제32권, 제3호, pp.240~249, 2008.
 - 14) Q. H. Nguyen, Y. M. Han, S. B. Choi and N. M. Wereley, "Geometry Optimization of MR Valves Constrained in a Specific Volume Using The Finite Element Method", Smart Materials And Structures, Vol. 16, pp. 2242~2252, 2007.
 - 15) N. M. Wereley, L. Pang and G. M. Kamath, "Idealized Hysteresis Modeling of Electro-rheological and Magneto-rheological Dampers", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 9, pp. 642~649, 1998.
 - 16) 성금길, 최승복, "자기유변유체를 이용한 승용차량 속 업소버의 유한요소 최적설계" 한국소음진동공학회 논문집, 제18권, 제2호, pp. 169~176, 2008.
 - 17) 문석준, 허영철, 정형조, "구조물 진동제어용 밸브 모드형 자기유변 댐퍼의 최적설계 방법", 2006년도 한국지진공학회학술발표회
 - 18) S. H. Lee et al., "Bracing System for Installation of MR Dampers in a Building Structure", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 18, No. 11, pp. 1111~1120, 2007.

[저자 소개]

최승복(책임저자)



E-mail: seungbok@inha.ac.kr

Tel: 032-860-7319

1955년 1월 2일생

1990년 미시간 주립대학교 기계공학과 박사 과정 졸업, 1990년 한국기계연구원 입사, 1991년 인하대학교 기계공학과 교수, 지능 재료 및 시스템 제어의 연구에 종사, 국제 SCI 논문 210편 발표, 한국소음진동공학회 편집이사, 공학박사

[저자 소개]

성민상



E-mail: dreams2u@gmail.com

Tel: 032-872-7925

1982년 9월 2일생

2008년 인하대학교 기계공학과 석사 과정 졸업, 2008년 인하대학교 박사과정 재학 중

[저자 소개]

하성훈



E-mail: hacii79@nate.com

Tel: 032-872-7925

1979년 3월 21일생

2008년 인하대학교 기계공학과 석사 과정 졸업, 2008년 인하대학교 박사과정 재학 중