

特輯

자기흐름유체(Magnetorheological Fluid)의 응용

충남대학교 고기능성소재연구센터, *국방과학연구소
김중희, 김건우, 김철기, 유요한*

요 약

자기장하에서 액체 성질인 유동성과 고체 성질인 자성을 갖는 강자성/자기흐름 유체의 제조방법, 강자성/자기흐름 유체의 조성 및 미세구조와 유체 매트릭스의 구조에 따른 자기특성과 강자성/자기흐름 유체의 물리적, 기계적 성질을 조사하고 최근 연구개발되고 있는 전기흐름유체(electrorheological fluid)의 특성과 비교하였으며, 또한 이를 바탕으로 방탄복에 대한 적용성을 검토하였다.

력과 자기장 부하시 발생하는 항복응력의 함으로 표현될 수 있다. 높은 항복응력과 낮은 기본점도를 지닌 자기흐름유체를 이용하여 MR 응용장치를 설계할 경우에 MR 응용장치의 크기를 줄일 수 있으며, 제어가능한 댐핑력의 범위도 높아지게 된다. 자기흐름유체의 기본점도와 항복응력은 자기흐름유체의 조성 시 고체입자의 종류 및 크기, 오일의 종류 및 점도, 자기흐름유체에 대해 고체입자가 차지하는 입자중량비 등에 의하여 영향을 받는다. 자기장에 대한 자기흐름유체의 응답속도는 10^{-3} 초 수준으로 매우 빠르며, 가역적이어서, 클러치, 엔진마운트, 진동제어장치, 고충전물내진장치, 로보틱 시스템(robotic system) 등에 응용된다.

1. 자기흐름유체(Magnetorheological Fluid, MR유체) 기술

자기흐름유체는 자기장의 변화에 대응하여 가역적으로 점도의 조절이 가능해 항복전단응력이 변화되는 유체로서, 투자율이 낮은 용매에 높은 투자율을 지닌 입자를 분산시킨 것이다. 자기흐름유체는 자기장 무부하 시에는 용매에 분산된 입자가 자유로이 운동하는 뉴토니안(Newtonian)유체의 거동을 나타내며 등방향(isotropic)의 역학적 성질을 나타낸다. 그리고, 자기장이 부하되면 입자는 자기장 방향으로 섬유구조(fibril structure)를 형성한다. 이 섬유구조는 입자들의 결합력에 의하여 유체의 전단에 대해 저항하며 항복응력을 갖는 빙헴(Bingham) 유체의 거동의 갖게되며 이방향(anisotropic)의 역학적 성질을 나타내어, 빙헴 자기유체(Bingham magnetic fluid)라고도 불리는 지능재료(intelligent material)의 하나이다.

자기흐름유체는 지름이 0.1 μm 보다 큰 강자성, 상자성 입자와 오일/물 에멀전의 연속상(mobile phase)으로 이루어져 있으며, 외부의 자기장이 가해지면 입자의 내부와 표면에 분극현상(polarization)에 의해서 입자들이 배열하고 섬유구조(fibril structure)를 형성하는데, 이 섬유구조가 점도 향상과 유체의 흐름을 방해하는 역할을 한다. 이때의 항복응력(yield stress)은 자기장의 세기에 따라 증가하고, 가해진 전단응력(shear stress)이 유체의 항복응력보다 커지면 유체가 흐르게 된다.

자기흐름유체의 전단응력은 기본점도에 의한 뉴토니안응

자기흐름유체는 콜로이드 자성유체(colloidal magnetic fluid) 또는 페로유체(ferro fluid)와는 구별되는데, 자기흐름유체가 일반적으로 수~수십 μm 수준인데 반하여, 콜로이드 자성유체(페로유체)는 자성입자의 크기가 보통 5~10 nm 정도이어서 자기장이 가해졌을 때 항복응력을 나타내지 않으며, 주요 응용분야는 씰링(sealing), 자기공명시스템(magnetic resonance system) 등에 한정된다. 현재 상용 및 연구용 자기흐름유체는 대부분 철(iron) 구형입자를 사용하고 있으며, 입자크기는 주로 1~50 μm 의 범위로 조성되고 있다. 최근 10~100 nm의 나노사이즈로 조성된 철입자를 이용하여 조성된 자기흐름유체의 특성이 연구되고 있으며, 기존의 마이크로 크기의 입자로 조성된 자기흐름유체에 비하여 항복응력은 낮지만, 침전특성이 개선되는 것으로 나타난다. 또한, 자기포화(magnetic saturation) 한계가 철입자보다 높은 코발트 입자나 코발트합금 입자를 이용한 자기흐름유체의 특성 연구도 진행되고 있다. 용매로는 하이드로카본(hydrocarbon) 오일, 실리콘(silicone) 오일, 물(water) 등이 사용되고 있으며, 자기흐름유체와 접촉되는 부품재질과의 적합성이 함께 고려되어야 한다. 자기흐름유체의 입자중량비는 최대항복응력, 자기장 무부하시 기본점도, 유동성 등을 고려하여 대체로 10~50%의 범위로 제한된다. 현재 자기흐름유체 개발에 활발한 연구를 수행중인 미국 Lord사에서 제공하고 있는 자기흐름유체는 종류별로 45~70 kPa의 최대 항복응력, 0.07~13.6 Pas의 기본점도를 나타내고 있다.

현재 자기흐름유체(MR 유체)와 더불어 지능재료(intelligent

material)의 일종으로 반응동형 응용장치에 널리 사용되고 있는 각종 전기흐름유체(Electrorheological Fluid, ER유체)는 빠른 응답속도와 전기장 형성이 용이하다는 장점을 지닌 반면, 낮은 항복응력과 좁은 사용온도 범위 특히 고온에서의 급격한 성능 저하 등이 단점으로 지적되고 있다. 그러나 자기흐름유체는 전기흐름유체에 비하여 항복전단응력이 20~50배 정도 크며 넓은 사용온도 범위와 운용 중에 발생 혹은 유입되는 불순물에 대하여 상당히 둔감하다는 장점을 가지고 있다. 이러한 자기흐름유체와 전기흐름유체의 특성을 Table 1에 비교하여 나타내었다.

Table 1 Comparison of MRF with ERF

	ERF	MRF
Yield Stress	~5 kPa	~150 kPa
Max. Field	~5 kV/mm	~2.5 kA/m
Viscosity	0.2~1.0 Pas	0.07~13.6 Pas
Temp. Range	20~120 °C	-50~150 °C
Stability	Cannot tolerate impurities	No affected by most impurities
Response time	2~15 ms	100~130 ms
Density	1~2 g/cm ³	3~4 g/cm ³
Power	2~50 watts	2~50 watts

승용차, 트럭 등의 댐퍼(damper), 브레이크(brake)에 자기흐름유체를 효과적으로 이용하기 위하여는, 무엇보다도 높은 항복응력(yield stress)을 가지는 자기흐름유체의 제조가 필수적이며, 이를 위하여 자성입자의 부피분율을 높이거나 또는 강한 자기장을 부과하는 방법이 사용될 수 있으나, 자성입자의 부피분율을 높일 경우, 장비의 하중 및 구동전력소모를 증가시키고, 강한 자기장을 부과할 경우, 자기장 무부하시의 점도를 증가시키는 단점을 안고 있기 때문에 바람직하지 않다.

이러한 단점들을 해결한 자기흐름유체를 개발하여, 이를 효과적으로 적용하기 위한 노력이 미국 등 선진국을 중심으로 꾸준히 진행되고 있고, 자기흐름유체에 관련한 특허 또한 활발한 성과를 보이고 있다. 미국 특허 제 2,667,237호에는 자기흐름유체의 구성물질이 개시되어 있고, 자기흐름유체를 액체, 냉각제, 산화방지 기체, 반고체 상태인 그리스(grease) 연속상에 상자성 또는 강자성의 입자가 분산되어 있는 혼합물로 정의하고 있다. 미국 특허 제 2,575,360호에서는 클러치와 브레이크에서 사용될 수 있는 토크 변환장치를 개시하고, 이 장비에 사용될 수 있는 자기흐름유체의 조성으로 자성입자(carbonyl iron)가 광윤활유(light lubricant oil)에 50%의 부피분율로 분산되어 있는 유체를 기술하였다. 또 다른 미국 특허 제 2,886,151호에서는 전기장 또는 자기장에 반응하는 유체박막을 사용한 동력전달장치와 자기장에 반응하는 유체로서 산화철 입자와 점도가 2~20cp인 윤활등급유(lubricant grade oil)의 혼합물 사용을 기술하였다. 미국 특허 제 2,670,749호와 제 3,010,471호에는 자기흐름유체의 흐름을 조절가능하게 하

는 밸브의 구조가 개시되어 있고, 이용할 수 있는 자성유체로는 페로(ferro), 페라이트(ferrite) 및 상자성(paramagnetic) 물질 등을 포함하였으며, 광중량탄화수소유(light weight hydrocarbon oil)에 분산되어 있는 자성입자로 이루어져 있는 분산계를 자기흐름유체라 정의하였다.

자기흐름유체들은 중력에 의한 침전문제 등으로 인하여, 자기유변학적 거동(magnetorheological activity)에 큰 영향을 받는다. 이러한 침전의 주요한 원인 중의 하나가 바로 자성입자(7.86 g/cm³)와 연속상(silicon oil=0.95 g/cm³) 사이의 밀도 차이에서 기인한 자기흐름유체의 안정성의 저하이다. 이를 극복하기 위하여, 지속적인 노력이 계속되고 있는데, 미국 특허 제 5,043,070호에서는 2개 층의 계면활성제를 자성입자에 코팅한 자성입자를 사용하여 자기흐름유체의 안정화를 시도하였으나 효과는 만족스러운 수준에 이르지 못하였고, 미국 특허 제 5,645,752호에서는 자기흐름유체에 텍스토로픽(thixotropic) 첨가제를 혼합하여, 수소결합을 위한 텍스토로픽 가교(network)를 유도함으로써 자성입자의 침전을 최소화하려고 시도하였으나, 역시 뚜렷한 안정성 증가를 달성하지 못하였다. 따라서 안정성이 향상된 자기흐름유체를 개발하여야 할 필요성이 아직까지 끊임없이 대두되고 있다.

2. 자기흐름유체의 활용

자기흐름유체는 네 개의 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 자기흐름유체의 점성으로 저항하는 구조로서, 클러치/브레이크, 자동차 조향장치, 센터베어링 등의 설계에 응용될 수 있다. 두 번째 모드는 평판 또는 실린더 형상의 두 자극이 고정되어 있고, 평판 사이로 자기흐름유체가 흐르는 형태로 유동모드(flow mode)이다. 일반적으로 유체가 흐르는 관내에서 압력변화와 유량변화가 동시에 일어나는 경우로서, 이 모드는 밸브, 댐퍼 등의 설계에 응용된다. 간극 내에서의 전단응력 분포는 간극의 중심에서 응력값이 영(0)이며, 자극방향으로 선형적인 증가를 하게 된다. 전단응력이 항복응력보다 작은 중심부는 반고체상태의 플러그(plug)가 형성되어 유동을 하게 되며, 전단응력이 항복응력보다 높은 외곽부에서는 뉴토니안 유동을 하게 된다. 따라서, 항복응력이 높을수록 플러그의 두께가 커지므로 간극 내에서의 유체의 유동저항이 커지게 된다. 세 번째 모드는 평행한 두 자극의 간극이 작아지면 자극 사이에서 자기흐름유체가 유출되며, 간극이 커지면 자기흐름유체가 유입되는 형태로서, 자극의 상대운동 방향과 자기흐름유체의 유동방향이 수직인 경우이며, 압착 모드(squeeze-flow mode)라 한다. 이 모드는 주로 댐퍼, 스퀴즈 필름 댐퍼 등의

설계에 응용된다. 네 번째는 복합 모드(mixed mode)로서 전단 모드와 유동 모드가 동시에 작용하는 형태이다. 자기흐름유체를 이용하여 댐퍼를 설계하는 경우 동일한 크기의 자극면적 조건에서 유동모드의 경우가 전단모드보다 큰 댐핑력을 발생시킬 수 있으므로, 진동 제어를 위한 대부분의 MR댐퍼는 유동모드 또는 복합모드로서 작동하도록 설계되고 있다. 한편, 압착 모드로 작동하는 MR댐퍼는 주로 진동변위가 작은 시스템에 효과적으로 적용될 수 있다.

MR응용장치의 핵심기술에는 자기흐름유체 조성기술, 자기흐름유체 응용장치 설계기술, 자기흐름유체 응용장치 모델링 기술, 자기흐름유체 응용시스템의 제어 로직 설계기술, 시스템 인터페이스기술 등이 있다. MR응용장치의 실용화에 성공한 미국과 일본은 자기흐름유체 응용장치기술 개발에 대한 연구를 꾸준히 수행하여 왔으며, 자기흐름유체 응용장치의 핵심기술들을 전반적으로 보유하고 있으며, 최근의 연구는 주로 자기흐름유체와 MR응용장치의 성능향상 및 응용분야 확대에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 자기흐름유체의 경우, 입자의 재질 및 크기를 고려하여 낮은 기본점도와 높은 항복응력을 갖고 칩전 및 마모문제를 최소화하는 연구를 중점적으로 진행하고 있다. MR응용장치의 설계를 위해서는 신뢰도가 높은 무차원 설계모델, 정교한 동적모델, 유동성과 작동모드를 고려한 효율적인 자기회로설계, 전자기소프트웨어를 이용한 정확한 자기회로해석 등이 연구되고 있다. 또한, MR응용 장치가 적용된 시스템의 성능은 제어알고리즘에 의해서도 크게 좌우된다. 따라서, MR응용장치 시스템의 특성을 고려하여 다양한 형태의 제어알고리즘이 시험되고 있다. 그리고, 센서, 마이크로 프로세서, 엠프 등의 MR응용장치 시스템에 요구되는 장치들도 저가, 소형화, 저전력 소모 등을 향한 성능개선이 요구된다. 이러한 MR응용장치 기술은 기계, 전기, 전자, 고분자 공학 등의 통합기술 성격을 갖고 있으며, 그 응용범위가 다양하고 광범위하다.

3. 자기흐름유체를 이용한 방탄복 연구

현재 운용되는 방탄복은 유리섬유, PPTA, UHMWPE, PBO 등 초고강도 섬유로 구성되어 있으나, 활동성을 고려한 중량 제한으로 가슴보호 위주의 방탄복이 주로 운용되고 있다. 따라서, 가슴부위를 포함한 모든 신체부위에 방탄성능을 부여할 수 있는 피복형태의 초경량 방탄복에 대한 연구가 미국 등 선진국을 중심으로 이루어지고 있다. 2003년부터 미국 MIT의 군인나노기술연구소(Institute for Soldier Nanotechnologies)와 MIT Gareth Mckinley 연구팀은 자석과 매우 작은 철입자로 가득찬 유성유체(oily fluid) 즉, 자기흐름유체(Magnetorheological Fluid)를 이용하여 피복형태의 방탄복에 적용하는 연구를 진행하고 있다. Mckinley는 6~8 μm 크기의 철입자를 실리콘(silicon) 오일 등과 혼합하여 충분한 유동성과 강직도를 갖는 자기흐

름유체를 제조하였다. 이 용액은 자기장을 가하게 되면 작은 철 입자들이 자장방향으로 정렬되어 유체는 단단한 물질로 바뀌고, 다시 자기장을 제거하면 즉시 액상으로 되돌아 가는데, 이러한 변화는 2만분의 1초로 매우 빠르게 변화한다. Mckinley는 이 가변성 용액을 기존의 방탄조끼의 재료로 사용하고 있는 공극(air gap)이 풍부한 섬유재료에 혼입하는 방법을 연구하였다. 자기흐름유체가 혼입된 방탄용 섬유재료는 자기장이 없을 때에는 부드러운 섬유재료 특유의 특성을 나타내지만, 자기장을 가하면 그 즉시 섬유의 강직도가 약 50배 이상 강해지며, 이러한 강직도의 변화는 자기장의 강도에 의존한다고 보고하였다. 따라서, 이러한 방탄용 섬유재료와 자기흐름유체의 조합으로 이루어진 방탄소재가 피탄에 의한 직접적인 손상뿐만 아니라 충격파나 유탄을 막을 수 있을 것으로 기대되고 있다.

자기흐름유체를 이용한 방탄소재에 대한 연구는 피복형태의 초경량 방탄복에 적용이 가능한 유체조성 및 유체매트릭스에 대한 연구뿐만 아니라, 자기흐름유체에 지속적으로 자기장을 인가할 수 있는 휴대용 자기장 발생장치에 대한 연구 등 아직 해결해야 할 과제가 많이 남아있다.



Fig. 1 Magnetorheological fluids with no magnetic field(left) and an applied magnetic field(right)

감사의 글

본 연구는 국방과학연구소의 '10년 단계전환 기초연구사업의 지원을 받아 수행 중입니다.

참고자료

- 1) Magnetic fluid shock absorber, US patent 2,667,237 (1954).
- 2) Magnetic fluid torque and force transmitting device, US patent 2,575,360 (1951).
- 3) Field responsive fluid couplings, US patent 2,886,151 (1959).
- 4) Magnetic valve, US patent 2,670,749 (1954).
- 5) Valve for magnetic fluids, US patent 3,010,471 (1961).
- 6) Magnetic solvent extraction, US patent 5,043,070 (1991).
- 7) Thixotropic magnetorheological materials, US patent 5,645,752 (1997).