

철 입자를 이용한 자기 유변 유체의 특성 및 그 응용(인체 보호의)에 관한 연구

김지우, 정호근*

보성고등학교, 서울특별시 138-050

Study on Characteristics of Magnetorheological Fluids Based on Iron Particles and Application(Protection Cloth for Human Body)

Jee Woo, Kim and Ho Keun, Chung*

Po Sung High School, Seoul 138-050, Korea

요 약

본 연구는 자기 유변 유체의 특성을 연구하고 충격 흡수 효과에 대한 실험을 바탕으로 인체 보호의를 제작하여 그 응용 가능성을 탐구하였다. 자기 유변 유체는 일반적으로 자성을 띌 수 있는 입자가 비자성 유체에 분산되어 있는 분산액으로 자기장이 없을 때는 유체와 같은 성질을 가지다가, 자기장이 주어지면 입자가 자기장의 방향으로 배향하면서 고체와 같은 성질을 지니는 스마트 물질이다. 본 연구에서는 일정한 비율로 철 입자를 기름에 분산시킨 자기 유변 유체를 제조하였다. 먼저 자기장의 유무에 따라 제조된 자기 유변 유체가 변하는 것을 광학 현미경으로 관찰하였다. 그리고 자기 유변 유체의 점탄성 성질의 변화를 측정하였으며, 그것을 플라스틱 팩에 넣어 충격 흡수에 관한 실험을 진행하였다. 자기 유변 유체의 충격 흡수에 대한 실험을 통하여 이를 보호의 제작에 응용하고자 하였다. 제작된 보호의는 각종 사고나 재해로부터 인체의 흉부와 척추를 보호하여 인간의 생명을 구하는 보호 장구로서의 중요한 기능을 담당할 수 있다.

주제어 : 자기 유변 유체, 철 입자, 대두유, 점탄성, 충격 흡수

서 론

유변 유체(점탄성 물질)는 TV나 영화에 자주 소개되어 일반인에게 낯설지 않은 물질이다. TV의 과학 프로그램에 소개되어 신비감을 자아냈던 점탄성 물질은 평상시에는 액체의 성질을 띠다가 외부의 압력이 주어지면 고체로 변하는 특이한 성질을 가지고 있다. ‘배트맨 비긴즈(Batman Begins)’라는 영화에는 전류를 흘려주면 액체에서 고체의 성질을 띠게 되는 ER-유체가 소개되기도 하였다.

본 연구의 목적은 자기 유변 유체(루이스 엠스타인과 폴 휴이트, 2002)가 자기장이 없는 상태에서는 액체 상태로 유연하고 자기장이 발생되었을 때는 고체 상태로 단단해짐을 응용하

여 인체 보호의를 제작하는데 있다. 즉 응용 제작된 인체 보호의는 평상시에는 접을 수 있어 이동이 용이하며 사고 발생과 같은 위험시에는 자기장을 발생시켜 딱딱한 물질의 보호 장구로 변하는 장점이 있다.

실험과 탐구 과정은 자기 유변 유체의 유연성과 강도를 조합하면 충격 완화 효과를 갖게 된다는 점에 착안하여 진행되었다. 먼저 자기 유변 유체의 특성을 파악하고, 제조 방법에 따른 특성을 살펴보았으며, 나아가 실제로 보호의로 응용될 수 있음을 확인하였다.

실험 방법

점탄성 유체 및 자기 유변 유체 제조

자기 유변 유체 제조를 위하여 대두유(Soybean oil, CJ

*교신저자: stepha27@paran.com

•2009년 5월 5일 접수, 2009년 6월 21일 수정, 2009년 7월 1일 통과.

Cheiljedang, Korea)와 단상 철 입자(Single phase iron powder, Samchun chemical, Korea)를 구입하여, 특별한 정제 없이 사용하였다. 먼저 철 입자를 막자사발에 넣고 30분 정도 갈아준다. 이 후에 막자사발에 대두유를 조금씩 넣어가면서 곱게 갈아 섞어준다.

입자 관찰 및 자기 유변 유체 성질 관찰

먼저 철 입자의 형태를 0.01 wt%의 농도로 철을 기름에 분산시킨 후 광학현미경을 통하여 관찰하였다. 또한, 자기 유변 유체적 성질을 관찰하기 위하여 샘플을 슬라이드 글라스 위에 올려놓고 외부 자기장이 주어지지 않았을 때와 영구자석으로 외부 자기장이 주어졌을 때 입자의 배열이 변화하는 것을 관찰하였다. 거시적으로 유체가 고체로 변화하는 것을 관찰하기 위하여 전자석을 이용하면 유체에 수직으로 자기장을 주어 자기장의 변화에 따른 유체의 변화를 관찰할 수 있다. 각각의 자기 유변 유체를 고무풍선에 담아 일정한 형태를 가지지 못하는 고무풍선이 자기장이 가해졌을 때 고체와 같이 일정한 형태를 유지하는 것을 관찰하였다. 또한 농도별로 자기 유변 유체를 제작하여, 자기장이 인가되었을 때 반응하는 정도도 측정해 보았다.

자기 유변 유체의 충격 흡수 측정

충격 흡수 실험을 위하여 화학적 내성이 강한 폴리프로필렌(polypropylene) 필름을 이용하여 자기 유변 유체를 담아 3cm x 10cm의 진공 팩을 만들어 단위 셀을 제작하였다. 자기 유변 유체 셀에 전자석을 이용하여 외부에 자기장을 인가하고 그 위에 강체 공을 이용하여 하중에 대한 변형을 관찰하였다.

자기 유변 유체의 실제 응용 분야 탐구

자기장에 효과적으로 반응하는 약 70wt%의 농도로 자기 유변 유체를 제작하여 이것을 폴리프로필렌 필름에 넣어 유체 셀을 만들었다. 그리고 제작된 여러 유체 셀들을 배열하여 충격에 저항함으로써 인체를 보호하는 보호의를 제작하였다.

실험 결과

분산된 자기 유변 입자의 자기장에 따른 변화를 확인하기 위하여, 제조된 자기 유변 유체를 슬라이드 글래스 위에 놓고 커

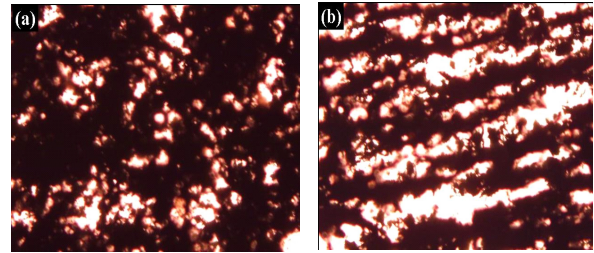


그림 1. (a) 외부 자기장이 없을 때와 (b) 외부 자기장이 주어졌을 때 자기 유변 유체 내 분산되어 있는 철 입자의 변화를 광학현미경을 통하여 관찰한 사진.

버글라스를 썬 후 외부 자기장의 유무에 따른 이미지를 관찰하였다. 그림 1은 자기장이 없을 때 (a)와 자기장이 주어졌을 때 (b) 입자의 배열이 변한 것을 광학현미경을 통하여 100배 (10×10) 확대하여 관찰한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 무질서하게 배열되어 있던 철 입자가 외부에서 자기장이 주어지자 자기장의 방향으로 배열하여 사슬 구조를 만들었음을 확인할 수 있다. 이를 통하여 본 연구에서 만든 자기 유변 유체가 자기장에 의해 사슬 구조를 띄어 고체와 같이 변화할 수 있음을 볼 수 있다.

자기 유변 유체를 각각 전자석 위에 놓고 자기장이 없을 때와 자기장을 가했을 때 변화하는 모습을 디지털 카메라로 촬영하였다.

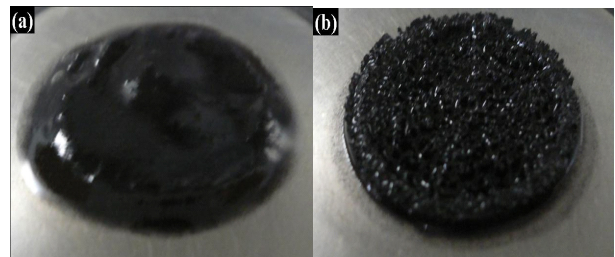


그림 2. (a) 자기장이 없을 때와 (b) 외부 자기장이 인가되었을 때 (170 kA/m), 철입자 분산액의 변화를 관찰한 이미지.

그림 2(a), (b)는 각각 자기장이 없을 때와 170 kA/m의 외부 자기장이 주어졌을 때 만들어진 자기 유변 유체를 이용하여 유체의 변화를 관찰한 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 자기장이 없을 때는 일정한 형태가 없는 유체가 외부 자기장이 주어졌을 때는 일정한 형태로 배향하면서 고체 형태가 되어있는 것을 확인할 수 있다. 이로써 본 연구에서 쓰인 유체가 자기 유변 유체로써 적합함을 확인할 수 있다. 또한 자기장이 인가되

있을 때 형태변화는 0.1초 이하의 시간에 빠르게 변화함도 알 수 있었다.

이와 같은 자기 유변 유체의 유변 유체적 성질을 확인하기 위하여 유체를 고무풍선에 담아 자기장의 유무에 따른 형태의 변화 및 외부 압력에 대한 변형률을 측정하였다. 그림 3(a)와 (b)는 자기장이 없을 때와 주어졌을 때 만들어진 철입자 분산 액을 담은 고무풍선이 변화하는 것을 관찰한 것이다.

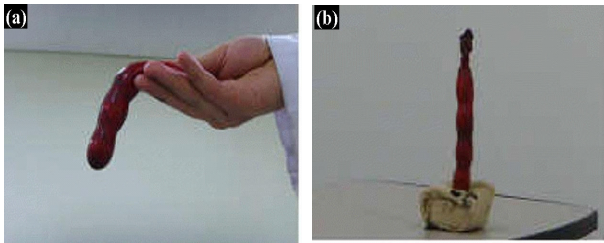


그림 3. (a) 자기장을 주지 않았을 때 자기 유변 유체를 담은 고무풍선의 모습과 (b) 네오뮴 자석(neodymium magnet)위에 고무풍선을 놓았을 때의 모습.

자석으로는 강력한 영구자석인 네오뮴 자석(neodymium magnet)을 사용하였다. 자기장에 노출시키지 않았을 때 유체를 담은 풍선은 휘어지면서 유연한데 비해, 자석 위에 놓아 자기장을 가했을 때는 풍선이 딱딱해지는 고체의 성질을 띄면서 형태를 유지하는 것을 볼 수 있다. 이것은 식용유 안에 자유롭게 분산되어 있던 철가루들이 자석에 의한 자기장(Magnetic Field)의 영향으로 규칙적인 배열을 함으로써 액체의 유동적인 성질을 잃어버렸다고 할 수 있다.

또한 자기 유변 유체의 농도에 따라 자기장에 반응하는 영향을 알아보기 위해 다음의 표 1과 같이 서로 다른 농도의 자기 유변 유체를 제작해 보았다.

표 1. 철가루와 식용유의 비율을 다르게 하여 제작한 자기 유변 유체.

철가루(g)	식용유(g)	철가루 : 식용유의 비율	식용유(ml)	철가루농도 wt%
50	100	0.5 : 1	107.53	33.3
100	100	1 : 1	107.53	50.0
200	100	2 : 1	107.53	66.7
250	100	2.5 : 1	107.53	71.4
300	100	3 : 1	107.53	75.0

위와 같이 각 농도별로 제작한 자기 유변 유체를 풍선에 담

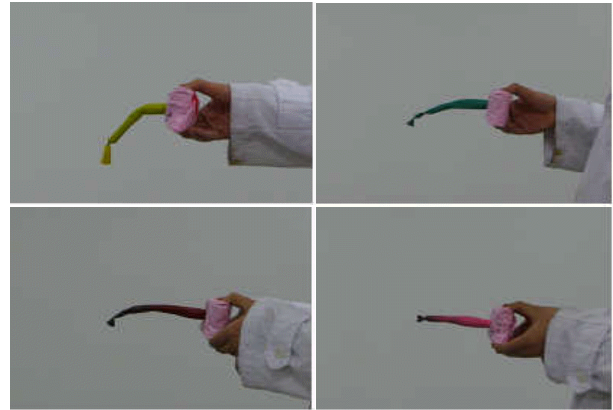


그림 4. 농도별로 다르게 제작한 자기 유변 유체 풍선(왼쪽부터 위에 두 개 50.0wt%, 66.7wt%, 아래 두 개 71.4wt%, 75.0wt%).

아 옆으로 휘어 놓아 휘어지는 각도를 측정하였다(그림 4). 각각의 철가루 농도에 따른 휘어짐의 각도를 그래프로 표시하였다(그림 5).

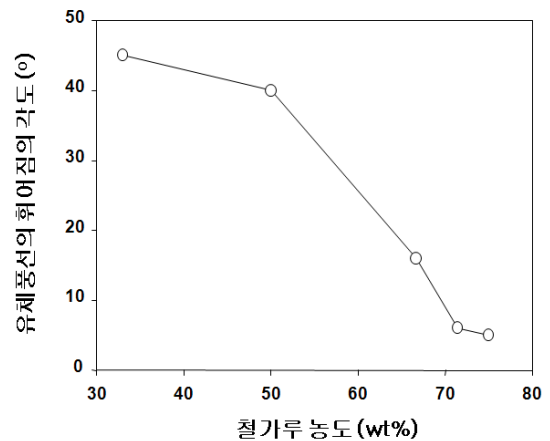


그림 5. 농도의 변화에 따른 휘어짐 각도 측정 그래프.

농도가 증가함에 따라 각도가 작아지는 것은 농도가 증가할수록 자기장에 효과적으로 반응한다고 할 수 있다. 또한 철가루 농도가 50~70wt%사이에서 급격한 변화를 보이는 것을 알 수 있다. 이것은 곧 50~70wt%사이에서 항복응력의 값이 크게 변화한다는 것을 알 수 있으며, 70wt% 이상의 부분에서 최적으로 자기장에 반응한다는 것을 알 수 있다. 또한 70wt% 이상을 초과하면 자기장에 반응하는 휘어짐의 정도가 비슷한 것을 확인할 수 있었다(김지우, 2007).

그림 6은 일반 찰흙에 강철구를 80cm 위에서 떨어뜨렸을 때

(a)와 외부에서 자기장이 인가된 상태에서 자기 유변 유체를 진공 포장하여 만든 셀의 80cm 위에서 강철구를 떨어뜨렸을 때 (b) 50 kA/m (c) 200 kA/m 각각 물질의 형태가 변화하는 것을 관찰한 것이다. 80cm의 낙하 높이는 항복 응력을 측정하기에 적합한 높이로 실험을 위해 설정한 것이다.

표 2. 강철구의 낙하실험.

측정 요소	질량	직경	떨어뜨린 높이	충돌 전 속력
측정값	230g	38mm	80cm	4m/s

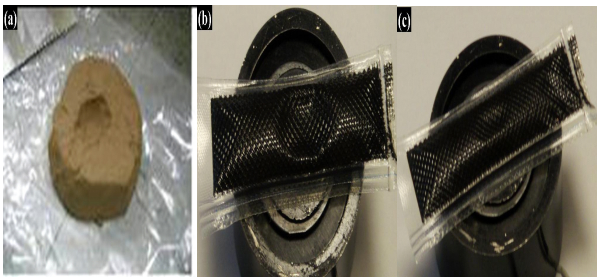


그림 6. 일반 찰흙에 강철구를 떨어뜨렸을 때(a)와 외부에서 자기장이 주어진 상태에서 자기 유변 유체로 만든 셀 위에 강철구를 떨어뜨렸을 때 (b) 50 kA/m (c) 200 kA/m 각각 물질의 형태가 변화하는 것을 관찰한 이미지.

그림 6(a)에서 찰흙이 자기 유변 유체와 비교하였을 때 매우 깊게 파인 것으로 보아, 자기 유변 유체보다는 충격에 저항하는 성질, 즉 항복응력이 더 작은 것을 알 수 있다. 한편, 그림 6(b)와 (c)를 볼 때, 자기장이 인가된 자기 유변 유체가 충격에 더 세게 저항한다는 것을 알 수 있다.

위의 실험들을 통해 각종 요인들(자기장 세기, 농도, 길이)에 따라 자기 유변 유체가 충격에 저항하는 성질, 항복응력을 갖는다는 것을 알게 되었다. 이를 바탕으로 실제 응용 분야를 탐구하기 위해 앞에서 사용된 자기 유변 유체 셀을 가지고 보호의를 제작하였다. 실용 가능한 보호의를 만드는데 적합한 항복 응력값은 추가 실험을 통하여 설정해야 한다.

가로 20cm, 세로 25cm의 철망에 철망 밑에는 지름 3cm의 원형 모양의 영구자석을 배치하여 유체 셀이 자기장의 영향을 최대한 크게 받도록 배치하였다. 이렇게 만들어진 갑옷을 천으로 씌워서 옷의 형태로 만들었다(그림 7).

보호의는 평상시에는 일상복처럼 편안히 착용할 수 있고 접을 수 있지만 유사시에 자기장을 발생시켜 인체를 보호할 수 있는 딱딱한 물질의 보호 장구로 변하게 된다는 장점이 있다.

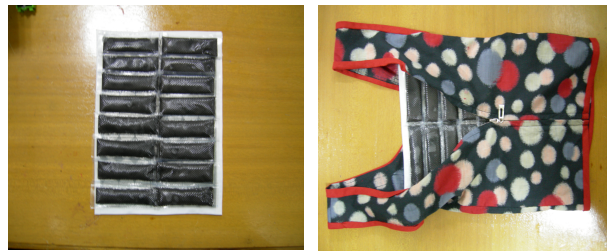


그림 7. 자기 유변 유체 PP셀을 가지고 제작한 보호의.

즉 액체의 상태에서는 외부 압력에 저항하는 강도가 약하지만, 자기장을 발생시켜 고체로 변한 보호의는 외부 압력으로부터 인체를 보호하는 강도가 크게 증가함을 볼 수 있었다.

기존의 시판되는 보호복과 비교할 때 무게는 기존 보호복이 3.5kg이라면 응용 제작된 보호의는 실제 성인의 인체 크기로 환산하여 약 2.5kg으로 추정할 수 있다. 실리퍼터라는 유변 유체를 이용하면 철판자를 이용한 보호의보다 더 가벼운 보호의를 제작하는 것도 가능하다. 응용 제작된 보호의는 휴대가 간편하도록 접을 수 있다는 점에서 부피 또한 기존의 보호복의 1/2로 줄어 들 수 있다.

유변 유체의 특성을 응용한 보호의는 본 연구에서 영구 자석을 사용하였으나 향후 전자석을 이용하면 더 완벽한 보호의를 만들 수 있다. 즉 전기 장치를 이용한 전자석은 점탄성 물질의 성질을 변화시키는 외력을 간단한 전기 장치에 의해 통제할 수 있어서 물질의 성질을 필요에 따라 쉽게 변화시킬 수 있기 때문이다(김지우, 2007). 또한 나노 튜브 nanotube 직물(David et al., 2005)로 유변 유체를 섬유로 만들었을 경우에는 각종 운동복과 같은 보호의에 응용할 가능성이 더 많아진다(김지우, 2007).

고 찰

점탄성 물질이란 점성(Viscous properties)과 탄성(Elastic properties)을 모두 갖춘 물질로써, 점성(Viscous)은 물체의 흐름 정도를 나타내는 성질로 유체적 성질을 의미하며 탄성(Elastic)은 물질의 고체적 성질을 나타내는 것이다(大澤善次郎, 2002).

이러한 점탄성 물질에는 ER 유체와 MR 유체의 두 가지 종류가 있다. 전기장(Electric field)에 의해서 변화하는 유체를 ER-유체라고 한다. ER-유체의 성질·특성의 변화는 다음과 같이 설명될 수 있다. 실리콘 또는 미네랄 오일과 같은 매우 절연성

이 높은 액체에는 극성을 띤 수십억 개의 입자가 골고루 분포돼 있는데, 여기에 전압을 걸어주면 입자의 분포가 달라지는 것이다. 무질서하게 배열해 있던 입자들이 전압에 의해 발생된 전기장(Electric Field)에 의해서 입자들이 규칙적으로 재배열된다. 다시 말해 전기장에서 플러스와 마이너스 전하를 가진 쌍극자가 형성되고 이어 긴 연쇄사슬로 결합되는 것이다. 이렇게 되면 전극 사이의 액체들이 고체의 성질을 띠게 된다(Barns et al., 1999).

자기 유변 유체란 실리콘 오일 또는 미네랄 오일 등의 비전도성 용매 속에 마이크로 크기의 자성을 가질 수 있는 입자들(대표적인 예: 철가루(iron powder))을 분산시킨 용액이다. 또한 자기장(Magnetic Field)이 작용하지 않을 때는 입자가 불규칙적으로 분산되어 등방성의 구조를 가지며, 자기장이 주어지면 자성입자가 분극화되어 자기장 방향으로 배열하여 자유롭게 흐르는 유체에서 높은 항복 응력(yield stress)을 갖는 고체적 성질을 가지게 된다.

그림 8은 자기 유변 유체에 외부 자기장이 주어졌을 때 생기는 현상을 간단한 모식도로 표현한 것이다.



그림 8. 자기 유변 유체의 원리를 나타내는 모식도.

이러한 자기 유변 유체는 외부 자기장에 따라 입자가 사슬구조를 형성할 수 있고, 또한 외력에 저항할 수 있다.

자기 유변 현상은 1948년에 Jacob Rabinow에 의해 최초로 보고되었다(Rabinow, 1948). 이후 수많은 연구팀에서 자기 유변 유체에 대한 다양한 유변물성 연구와 자기 유변 유체를 이용한 장치설계에 대해 연구를 진행해오고 있다(김근주 등, 2001)

자기 유변 유체를 실생활에 응용하기 위해 실용화된 연구를 살펴보면 다음과 같다. 최근 미시간 주립 대학에서 초콜릿을 급커브 때 고체로 변하게 하여 쏠림 방지 충격 흡수 장치로 쓰는 아이디어를 실험으로 시행하였다. 「초콜릿 충격 흡수 장치」(Chocolate Shock Absorber)라 불리는 이 충격 흡수 장치는 초

콜릿의 자기 유변 유체의 성질을 응용하여 「벽돌케이크」로 불리는 물질을 통해 자동차의 충격을 완화시킨 장치이다.

다음 연구로서 공과대 대학원생인 크리스토퍼 도버트씨와 그의 지도교수인 제임스 스테프 박사는 액체 상태의 허쉬 초콜릿에 적당한 고압 전류를 흐르게 하는 실험을 하였다. 전류가 액체에 흐르는 동시에 변화가 나타났는데 묽은 초콜릿 액체가 금세 딱딱한 겔(Gel)형태로 변한 것이다. 92년 전까지 이론에 불과했던 것이 실험을 통해 입증된 것이다.

일리노이 대학의 롱지아 타오 박사팀은 끈 모양을 이룬 옥수수 녹말의 현미경 사진을 찍는데 성공했다. 모터의 기름 위에 떠 있던 옥수수 녹말은 전기장을 걸어주자 예견했던 대로 막대자석의 기능을 발휘했다. 옥수수 녹말이 포함된 등유의 현탁액(액체 속에 고체의 잔 알갱이가 흩어져 떠 있는 상태의 액체)은 전형적인 전기유동학적 유체이다.

전기유동학의 전문가인 윈슬로 박사는 전기 유동학적 성질을 띠는 유상액이 그 성질을 잃지 않으면서 전기장의 세기에 따라 제 기능을 수행하도록 하는 방법을 연구 중에 있다(<http://news.naver.com>).

이상에서 살펴 본 바와 같이 ER 유체와 MR 유체를 이용한 분야는 연구가 진행되고 있는 미개척 분야이다.

결론

본 연구에서는 자기 유변 유체라는 점탄성 유체의 성질을 연구하고, 이를 이용한 보호의를 제작하여 유변 유체의 새로운 응용분야를 탐구하였다. 먼저, 철 입자와 대두유를 이용하여 성공적으로 자기 유변 유체를 제조하였다. 제조된 유체를 풍선에 담아 외부 자기장이 주어진 상태에서 자기 유변 유체가 액체상에서 고체상으로 변하는 것을 확인하였고, 자기장의 변화에 따라 자기 유변 유체에 들어있는 입자의 배향의 변화가 그 원인임을 다양한 관찰을 통해 확인하였다.

제작된 보호의는 각종 사고나 재해로부터 인체의 흉부를 보호하여 인간의 생명을 보호하는 중요한 기능을 담당할 수 있다. 또한 유변 유체의 특성을 지속적으로 연구하여 다양하게 응용한다면 보다 이상적인 인체 보호 장구를 개발할 수 있을 것이다.

ABSTRACT

In this study, we investigated magnetorheological (MR) fluid, which changes its mechanical properties under magnetic field,

and its shock absorption effect. We also investigated a possibility of a practical application by making body-protective cloth. The MR fluid is one of smart materials, which consists of magnetizable particle and suspending non-magnetic medium. MR fluids show liquid-like behaviors without magnetic fields while it changes to solid-like materials under magnetic field. It is due to the alignment of suspended particle to the direction of magnetic field. We fabricated the MR fluids by suspending iron particles into soybean oil at the fixed rate. Also, the macroscopic and microscopic changes of the product fluid was observed using a digital cammra and an optical microscope, respectively. The change of mechanical properties was also investigated. The shock absorption effect of MR fluids was studied using vacuum-packed MR fluids. This study shows a possibility of producing the protection cloth by means of the shock absorption effect of MR fluids. Manufactured protection cloth will hold a great significance in terms of life-saving by shielding people's breast part and backbone of the body from damage caused by accidents which often occur in construction or else.

Key words: Magnetorheological fluids, iron particles, soybean oil, viscoelastic, shock absorption

참고문헌

김근주, 김정훈, 이종원 (2001) 시스템 특성 및 계측 / 자기 유변

- 유체를 이용한 스퀴즈 필름 댐퍼에서의 부강성 효과 규명. Proceedings of the KSNVE Autumn Annual Conference.
- 김지우 (2007) 자기 유변 유체를 이용한 특수 갑옷(인체 보호 장구)에 대한 연구. 제 53회 전국과학전람회 작품 설명서 p 14.
- 김지우 (2007) 자기 유변 유체를 이용한 특수 갑옷에 대한 연구. 제 48회 서울시 과학전람회 작품설명서 p 22.
- 김지우 (2007) 자기 유변 유체를 이용한 특수 갑옷(인체 보호 장구)에 대한 연구. 제 53회 전국과학전람회 작품 설명서 p 27.
- 大澤善次郎 (2002) 기초 고분자과학. 김지홍, 정동준 옮김. 시그마프레스. pp 158-159.
- 루이스 엡스타인, 폴 휴이트 (2002) 재미있는 물리여행. 백운선 옮김. 김영사. p 151.
- Barnes HA, Hutton JF and Waters K (1999) An Introduction to Rheology(유변학). 이승중, 이성재 옮김. 두양사.
- David SH, Liangbing H and George G (2005) Electronic Properties of carbon nanotube/fabric composite. Current Applied Physics. pp 1-2.
- Rabinow J (1948) U.S. Patent No. 2,575,360 (20 November 1951). AIEE Trans. 67, p 1308.
- [http://news.naver.com/news/read.php?mode=LSD&office_id=057&article_id=0000024003&ion_id=115&menu_id=115.](http://news.naver.com/news/read.php?mode=LSD&office_id=057&article_id=0000024003&ion_id=115&menu_id=115)