



(19) 대한민국특허청(KR)

(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2016년03월10일

(11) 등록번호 10-1602315

(24) 등록일자 2016년03월04일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

H01F 1/44 (2006.01)

(21) 출원번호 10-2014-0161351

(22) 출원일자 2014년11월19일

심사청구일자 2014년11월19일

(56) 선행기술조사문헌

KR1020100016310 A*

US20050242322 A1*

KR1020130104066 A*

KR1020080103773 A*

*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자

인하대학교 산학협력단

인천광역시 남구 인하로 100, 인하대학교 (용현동)

(72) 발명자

최승복

인천광역시 남구 인하로298번길 33, 102동 1304호 (주안동, 진흥아파트)

샤 크루티 사일레쉬바이

인천광역시 남구 인하로 100, 인하대학교 2호관 북 380호 (용현동)

알 브이 우파드예

차루셋 캠퍼스 창가, 창가-388 421, 디스트. 아난드, 구자라트, 인도

(74) 대리인

특허법인세신

전체 청구항 수 : 총 9 항

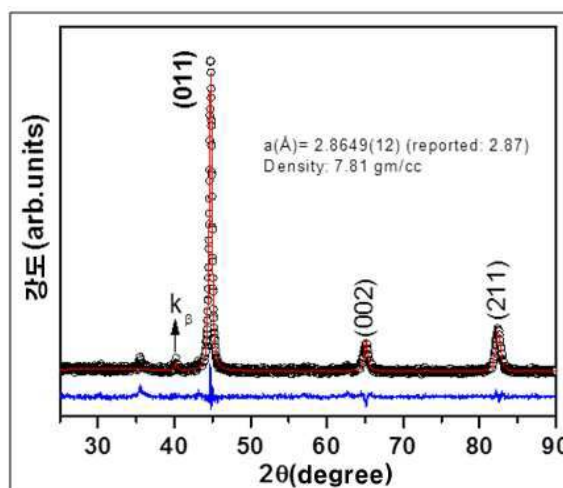
심사관 : 김상철

(54) 발명의 명칭 판 형상의 철 입자들을 포함하는 자기유변유체

(57) 요약

자기유변유체는 마이크로 단위의 자성 입자들이 비 자성 용매에 분산되어 있는 물질로서 자기장을 이용하여 성질을 제어할 수 있는 특성을 갖는다. 본 발명에 따른 자기유변유체는 서로 다른 두 종류의 마이크로 크기의 판 형상의 철 입자를 혼합하여 사용함으로써 자기유변유체의 특성을 강화할 수 있다. 이중 분산된 현탁액과 판 형상의 구조를 사용함으로써 자기유변유체는 낮은 침전율과 우수한 재분산성뿐 아니라 기계적 특성이 뛰어날 수 있다는 이점을 갖는다.

대표도 - 도1



이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 49621-1

부처명 교육과학기술부

연구관리전문기관 한국연구재단

연구사업명 도약연구(도전)

연구과제명 스마트 작동기를 이용한 최소 침습 수술용 햅틱 로봇 시스템의 구축

기 여 율 1/1

주관기관 인하대학교

연구기간 2014.05.01 ~ 2015.04.30

명세서

청구범위

청구항 1

평균 직경이 2 μm 내지 10 μm 인 판 형상의 철 입자와 평균 직경이 19 μm 내지 26 μm 인 판 형상의 철 입자를 포함하는 자성입자;

용매; 및

안정화제를 포함하는 자기유변유체.

청구항 2

삭제

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 자성입자는 철, 니켈, 코발트, 산화철, 코발트철, 철니켈, 철실리콘, 망간아연페라이트, 아연니켈페라이트, 산화크롬, 질화철, 바나듐합금, 텅스텐합금, 구리합금, 망간합금으로 이루어진 군에서 선택된 1종 이상의 입자를 추가로 포함할 수 있는 것인, 자기유변유체.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 자성입자는 전체 자기유변유체 부피에 대해 16 부피%를 갖는, 자기유변유체.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 용매는 에틸렌 글리콜(ethylene glycol), 에틸렌 글리콜 에테르(ethylene glycol ether), 옥타놀(octanol), 미네랄 오일(mineral oil), 파라핀 오일(paraffin oil), 머신 오일(machine oil) 및 실리콘 오일(silicone oil)로 이루어진 군에서 선택된 것인, 자기유변유체.

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 안정화제는 그리스인, 자기유변유체.

청구항 7

제1항에 있어서,

상기 자기유변유체는 전체 자기유변유체에 대해 50 내지 75 중량%의 철 입자, 20 내지 45 중량%의 용매 및 1 내지 10 중량%의 안정화제를 포함하는 자기유변유체.

청구항 8

제1항에 있어서,

상기 자기유변유체의 항복응력은 자기장이 인가되지 않은 경우 0.1 kPa 내지 1 kPa이고, 자기장이 인가된 경우 2 kPa 내지 100 kPa인, 자기유변유체.

청구항 9

제1항에 있어서,

상기 자성입자는 자기장이 인가되지 않은 경우 용매 내에서 균일하게 분산되는 것인, 자기유변유체.

청구항 10

자기유변유체의 제조방법으로서,

용매와 안정화제를 혼합하여 혼합물을 제조하는 단계; 및

상기 혼합물에 평균 직경이 2 μm 내지 10 μm 인 판 형상의 철 입자와 평균 직경이 19 μm 내지 26 μm 인 판 형상의 철 입자를 포함하는 자성입자를 혼합하여 이중 분산 현탁액을 제조하는 단계를 포함하는, 자기유변유체의 제조 방법.

청구항 11

삭제

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 자기장에 따라 유변 성질이 변화하는 자기유변유체에 관한 것으로, 판(plate) 형상의 철 입자를 포함하는 자기유변유체에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 자기유변유체(Magnetorheological Fluid; MRF)는 자기장이 주어짐에 따라 유변 물성이 급격히 변하는 물질로, 자기장이 주어지면 자유롭게 흐르는 유체에서 높은 항복강도(yield strength)를 갖는 고체적 성질로 변하게 된다. 이러한 자기유변유체는 비 자성 용매(nonmagnetic solution)에 자성 입자(magnetic particles)를 분산시킨 분산액(suspension)으로서, 외부로부터 제공되는 자기장의 크기에 따라 유변학적 거동과 전기적, 열적, 기계적 물리적 성질이 달라지는 자기유변현상 (이하 "MR"이라 한다)을 나타내는 유체를 말한다.

[0003] 자기유변유체는 1940년대에서 1950년대 초 사이에 미국 국립 표준 사무국(지금은 미국 국립 표준 기술 연구소)에 있는 Jacob Rabinow에 의해 처음으로 발견되었다. (Rabinow J, AIEE Trans., Vol. 67, No. 1308?15 (1948)) 수년간 단순 실험적인 호기심만 있었던 연구원들은 1980년대 후반에서 1990년대에 자기유변유체를 실제로 사용할 수 있는 기술들이 뒷받침되자 심도 있는 연구를 시작하게 되었다. 그 결과 자기유변유체는 1990년대 중반부터 상업적으로 사용되었다.

[0004] 후에 빈센트(Vincent)와 그의 동료들(J. de Vicente et al., J. Rheol., Vol. 54, No. 1337 (2010))은 자기 유변 특성에 대해 연구를 하였는데, 그 특성은 서로 다른 부피율을 가진 1, 2, 3차원의 세 가지 입자 형태를 사용한다는 것이다.

[0005] 이 유체는 단순히 외부 자기장의 인가에 의해서 10-100 kPa 이상의 높은 항복응력을 가지는 등 기계력을 제어할 수 있으며 단순한 자기장만의 인가에 의해서 부가적인 운동장치의 필요 없이 기계력을 제어할 수 있으므로 응용 장치 설계의 단순화를 가져올 수 있다. 또한, 외부로부터의 인가된 자기장의 크기에 따라 유체특성이 달라지므로 자기장의 제어에 의해 유변학적 물성을 변화시킬 수 있으며 정밀한 유동 특성 제어가 가능하다.

[0006] 자기 유변 현상은 용매에 분산되어 있는 자성 입자들이 현탁액에 인가된 자기장에 따라 분극이 되어, 자기 쌍극자간에 인력이 작용하여, 인가된 자기장의 방향으로 사슬과 같은 구조를 형성하게 되고, 이 사슬 구조들은 유체의 흐름이나 외부에서 가해지는 전단력에 저항을 보임으로써 유변학적 현상인 점도 및 항복응력을 상승시키는 것이다. 자기장이 유지되는 한, 입자간의 사슬 구조는 가역적으로 다시 형성되고 유속이 적을수록 더 많은 입자가 사슬모양을 형성하며 외력이 없는 정지 상태에서는 사슬이 파괴되지 않고 잘 발달되어 있기 때문에 초기 흐름을 유도하기 위해서는 더 많은 전단응력(shear stress), 즉 물질 내에 유동을 일으키기 위한 최소응력으로써 항복응력(yield stress)이 필요하다. 입자의 상호작용에 의해 만들어진 사슬모양의 다발은 외력에 의해 그 구조가 파괴되고, 사슬을 이루는 입자들은 사슬 구조를 유지하려고 전단 속도의 크기에 저항하여 원래의 구조로 복원하려는 힘의 반복에 의해 유변물성의 변화가 생긴다. 즉, 전단 속도가 낮은 영역에서는 자기장에 의해 입자의 상호작용이 활발해지면서 사슬을 유지할 수 있는 입자간의 인력이 우세하며, 높은 전단속도 영역에서는 흐름을

유도하는 유체역학적 힘(Hydrodynamic force)에 의해 입자 간의 사슬모양구조가 파괴되면서 이 두 힘의 크기 차이에 의해 유변학적 거동을 설명할 수 있다. 즉, 자기유변유체 내의 입자가 자기장 방향으로 정렬하고 전단 저항이 증가하는 현상은 입자가 편극화되어 나타나는 상호간의 자기력에 기인한다. 점도의 향상과 더불어 항복응력은 자기유변 성질을 갖는 물질들의 유변학적 거동이 실제 공정 및 제품의 성능 평가에 있어서 본질적인 역할을 함으로써, 물질의 항복응력 및 관련 유변물성에 대한 성질이 중요하다. 또한 자기 유변 유체는 자기장이 인가되어 있지 않을 시에는 안정된 분산유체의 특성을 가지고 있어야하므로, 입자의 안정적인 분산이 중요하다.

[0007] 침전과 재분산성에 대해 안정하다는 것은 기술적 어플리케이션의 관점에서 중요한 사항이다.

[0008] 자기 유동학은 침전과 재분산성이 안정하다는 사항에 대해 중점을 두고 그것들을 다양한 변수들(입자 크기와 모양, 매개 유체의 특성을 확대하는 것, 요변성(thixotropic) 물질 또는 계면 활성제를 추가하는 것, 그리고 나노 크기의 입자를 사용하는 것)에 의해 해결하려고 한다. 그러나 침전하지 않게 하기 위한 대부분의 방법들은 체인 구조를 형성하는 것을 방해한다. 여기서 매개체의 농도가 증가함에 따라 자기 점성 효과가 체인을 형성하는 것은 안정화하게 하는 원인이 된다.

[0009] 한국공개특허 제10-2010-0081799호에서는 폴리비닐부티랄을 카르보닐 아이언에 코팅하여 자성 복합체 입자를 합성하는 방법에 관하여 기술되어 있다.

[0010] 종래에는 대부분 구(sphere) 형상의 철 입자를 가지고 자기유변유체를 제조하였다. 그러나, 구 형상의 철 입자를 사용하는 경우에는 밀도가 고르지 않기 때문에 생기는 침전현상이 있었다. 사실 입자가 두껍고 침전현상이 있는 유체는 사용량이 많은 곳에서 활용하기가 불가능하다. 때문에, 구 형상의 철 입자의 조성과 크기와 관련하여 재분산 방법과 안정성을 높이는 방법들이 다양하게 제시되었지만, 제시된 모든 방법들에는 한계가 존재하였다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0011] 본 발명은 구 형태가 아닌 판(plate) 형상의 철 입자를 포함하는 자기유변유체를 개발하여 낮은 침전율과 우수한 재분산성을 나타내는 것을 목적으로 한다.

과제의 해결 수단

[0012] 본 발명은 서로 다른 평균 직경을 갖는 철 입자를 포함하는 자기유변유체에 관한 것으로, 구체적으로 평균 직경이 2 μm 내지 10 μm 인 철 입자와 평균 직경이 19 μm 내지 26 μm 인 철 입자를 포함하는 자성입자; 용매; 및 안정화제를 포함하는 자기유변유체에 관한 것이다.

[0013] 바람직하게는, 상기 철 입자들은 판 형상일 수 있다.

[0014] 바람직하게는, 상기 자성입자는 철, 니켈, 코발트, 산화철, 코발트철, 철니켈, 철실리콘, 망간아연페라이트, 아연니켈페라이트, 산화크롬, 질화철, 바나듐합금, 텅스텐합금, 구리합금, 망간합금으로 이루어진 군에서 선택된 1종 이상의 입자를 추가로 포함할 수 있다.

[0015] 바람직하게는, 상기 자성입자는 전체 자기유변유체 부피에 대해 16 부피%를 갖는다.

[0016] 바람직하게는, 상기 용매는 에틸렌 글리콜(ethylene glycol), 에틸렌 글리콜 에테르(ethylene glycol ether), 옥타놀(octanol), 미네랄 오일(mineral oil), 파라핀 오일(paraffin oil), 머신 오일(machine oil) 및 실리콘 오일(silicone oil)로 이루어진 군에서 선택된다.

[0017] 바람직하게는, 상기 안정화제는 그리스를 포함한다.

[0018] 바람직하게는, 상기 자기유변유체는 전체 자기유변유체에 대해 50 내지 75 중량%의 철 입자, 20 내지 45 중량%의 용매 및 1 내지 10 중량%의 안정화제를 포함한다.

[0019] 바람직하게는, 상기 자기유변유체의 항복응력은 자기장이 인가되지 않은 경우 0.1 kPa 내지 1 kPa이고, 자기장이 인가된 경우 2 kPa 내지 100 kPa이다.

[0020] 바람직하게는, 상기 자성입자는 자기장이 인가되지 않은 경우 용매 내에서 균일하게 분산된다.

[0021] 또한, 본 발명은 자기유변유체의 제조방법에 관한 것으로, 용매와 안정화제를 혼합하여 혼합물을 제조하는

단계; 및 상기 혼합물에 평균 직경이 2 μm 내지 10 μm 인 철 입자와 평균 직경이 19 μm 내지 26 μm 인 철 입자를 포함하는 자성입자를 혼합하여 이중 분산 현탁액을 제조하는 단계를 포함한다.

[0022] 바람직하게는, 상기 철 입자들은 판 형상이다.

발명의 효과

[0023] 본 발명에 따른 자기유변유체는 서로 다른 두 종류의 마이크로 크기의 평균 직경을 갖는 판 형상의 철 입자를 혼합하여 사용함으로써 자기유변유체의 특성을 강화할 수 있다. 이중 분산된 현탁액과 판 형상의 구조의 철 입자들을 사용하여 제조된 자기유변유체는 낮은 침전율과 우수한 재분산성뿐 아니라 기계적 특성이 뛰어날 수 있다는 이점을 갖는다.

도면의 간단한 설명

[0024] 도 1은 실온에서 판 형상 철 입자들의 x-선 회절무늬를 나타낸다.

도 2a와 2b는 크고 작은 판 형상 철 입자의 평균 직경과 표면형상을 주사전자현미경(SEM)으로 측정된 것을 나타낸다.

도 3은 실온(300K)에서 자기유변유체의 자화 정도를 측정한 그래프이다.

도 4a, 4b 및 4c는 서로 다른 자기장 세기에서 전단 속도에 따라 측정된 점도를 MRF206, MRF315, MRF140 각각에 대하여 나타낸 그래프이다.

도 5는 자기장 세기에 따라 측정된 동적 항복 응력을 MRF206, MRF315, MRF140 각각에 대하여 나타낸 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0025] 본 발명은 서로 다른 평균 직경을 갖는 철 입자들, 용매 및 안정화제를 포함하는 자기유변유체에 관한 것이다.

[0026] 본 발명은 자기유변유체에 사용될 수 있는 자성입자 중 마이크로 크기의 평균 직경을 갖는 철 입자들을 사용한다. 본 발명에서 사용되는 철 입자의 크기는 동일한 조건 하에서 철 입자의 크기를 변경하면서 크기가 주는 영향을 측정하여 최적의 범위를 찾은 것이다. 본 발명에서 사용되는 철 입자들은 평균적으로 2 내지 26 μm 의 크기를 갖는다. 바람직하게는 서로 다른 직경을 갖는 철 입자들을 포함하고, 보다 바람직하게는 2종 이상의 철 입자를 포함할 수 있다. 보다 바람직하게는 2종의 철 입자를 포함하며, 평균 직경이 2 μm 내지 10 μm 인 철 입자와 평균 직경이 19 μm 내지 26 μm 인 철 입자를 포함할 수 있다.

[0027] 또한, 구 형상이 아닌 판 형상의 철 입자를 사용한다. 판 형상의 입자를 사용하는 경우 MR 물질이 낮은 침전율과 우수한 재분산성을 나타낼 수 있다.

[0028] 철 입자들은 전체 자기유변유체 부피에 대해 16%의 부피비를 갖는다. 동일한 조건에서 철 입자의 크기에 따른 영향을 측정하기 위하여 부피비를 한정된 것으로, 이에 한정되지 않으며 본 발명의 목적을 달성하기 위한 범위를 포함한다.

[0029] 자성입자는 철, 니켈, 코발트, 산화철, 코발트철, 철니켈, 철실리콘, 망간아연페라이트, 아연니켈페라이트, 산화크롬, 질화철, 마나뒀합금, 텅스텐합금, 구리합금, 망간합금으로 이루어진 군에서 선택된 1종 이상의 입자를 추가로 포함할 수 있다.

[0030] 자기유변유체에 사용되는 용매로서는 비극성 매체를 사용할 수 있다. 바람직하게는, 에틸렌 글리콜(ethylene glycol), 에틸렌 글리콜 에테르(ethylene glycol ether), 옥타놀(octanol), 미네랄 오일(mineral oil), 파라핀 오일(paraffin oil), 머신 오일(machine oil) 및 실리콘 오일(silicone oil)로 이루어진 군에서 선택될 수 있다. 이와 같은 용매를 사용하는 이유는, 몇몇 응용 기계(펌프, 클러치, 브레이크 등)에서 제어할 수 없는 유체의 움직임을 요구하기 때문이다.

[0031] 자기유변유체는 침전을 예방하기 위하여 적은 양의 안정화제를 포함할 수 있다. 안정화제는 당해 기술분야에서 사용될 수 있는 모든 안정화제를 포함하며, 바람직하게는 그리스를 포함할 수 있다.

[0032] 또한, 자기유변유체는 전체 자기유변유체에 대해 50 내지 75 중량%의 철 입자, 20 내지 45 중량%의 용매 및 1 내지 10 중량%의 안정화제를 포함할 수 있다.

[0033] 이와 같이 제조된 자기유변유체는 자기장이 인가되지 않은 경우 0.1 kPa 내지 1 kPa의 항복응력을 나타내고, 자기장이 인가된 경우 2 kPa 내지 100 kPa의 항복응력을 나타낸다. 또한, 자기장이 인가되지 않은 경우 철 입자들은 용매 내에서 균일하게 분산되어 있다.

[0034] 또한, 본 발명은 자기유변유체를 제조하는 방법에 대한 것으로, 용매와 안정화제를 혼합하여 혼합물을 제조하는 단계; 및 상기 혼합물에 평균 직경이 2 μm 내지 10 μm 인 철 입자와 평균 직경이 19 μm 내지 26 μm 인 철 입자를 포함하는 자성입자를 혼합하여 이중 분산 현탁액을 제조하는 단계를 포함한다.

[0035] 이하, 실시예를 통하여, 본 발명에 따른 자기유변유체에 대하여 상세하게 설명한다. 다만, 이들 실시예는 오로지 본 발명을 보다 구체적으로 설명하기 위한 것으로, 본 발명의 범위가 이들 실시예에 의해 제한되는 것은 아니다.

[0036] 실시예

[0037] 1. MRF 제조 및 특성

[0038] 마이크로(Micron) 크기의 강자성(ferromagnetic) 또는 준강자성(ferrimagnetic) 입자들은 자기적 멀티도메인(multidomain)이고, 자기장 하에서 큰 자기 모멘트에 이른다. 이러한 특성에 기하여, 두 개의 서로 다른 마이크로 크기의 판 형상의 철 입자들(Industrial Metal Powder, Pune, India)을 자기유변유체를 제조하는데 사용하였다. 평균 직경이 2 μm (작은 사이즈)인 철 입자와 19 μm (큰 사이즈)인 철 입자를 총 100g 사용하였다. 이 입자들의 구조와 형태(morphology)는 XRD와 SEM을 이용하여 연구하였다. 도 1은 판 형상 철 입자들의 실온(300K)에서의 x-선 회절 무늬를 나타낸다. 모든 회절 피크들은 $0.2867 \pm 0.0001 \text{ nm}$ 의 격자 정수를 갖는 체심 입방 구조체와 일치한다. 즉, X-선 회절 분석의 결과는 문헌에서 보고된 Fe(철 원소)의 값과 일치한다. 도 2a 및 2b는 본 발명에서 사용한 서로 다른 평균 직경을 갖는 철 입자를 SEM으로 각각 측정된 것을 나타낸다. 작은 입자의 직경은 2 μm 내지 10 μm 이고, 평균 직경은 2 μm 이다. 큰 입자의 직경은 19 μm 내지 26 μm 이고, 평균 직경은 19 μm 이다. 입자들을 40°C에서 57 cSt의 점성과 $0.89 \text{ gm} \cdot \text{cm}^{-3}$ 을 갖는 중질 파라핀(heavy paraffin) 오일 50g에 분산시키고 기계식 교반기로 혼합하였다. 침전을 예방하기 위해 안정화제로서 시판되는 그리스(grease) 6g을 첨가하였다. 혼합물이 잘 분산될 때까지 오랜 시간동안 기계식 교반기로 교반하였다. 0.67, 1.5 및 4.5의 세 개의 서로 다른 무게 분율(작은 입자의 무게(W_s)/큰 입자의 무게(W_L))로 자기유변유체 샘플들을 준비하였고, 각각 MRF206, MRF315, MRF140으로 명명하였다. 혼합물들은 작은 입자가 큰 입자 구조들 사이의 빈 공간을 채우는 동안 큰 입자들이 먼저 사슬 형태 구조를 형성한다는 가정에 기하여 측정되었다.

[0039] 2. 자화 특성

[0040] 도 3은 실온(300K)에서 무게 분율이 서로 다른 세 가지 자기유변유체 샘플(MRF206, MRF315, MRF140)의 자화 정도 나타낸 그래프이다. 입자들의 자기포화는 $1250 \pm 15 \text{ kA m}^{-1}$ 이었다. 경사장(gradient field)에서, 큰 입자의 자기모멘트의 정렬은 작은 입자보다 빠르다. 이 조건하에서, 큰 입자의 초기 자화율과 자기포화는 작은 입자보다 높다. 결과적으로, 자화 분율은 무게 분율이 클수록 증가한다.

[0041] 3. 유변 특성

[0042] 기계적 성능은 시판되는 자기유변 디바이스(MRD 180/1 T magneto-rheological cell)와 결합된 Physica MCR 301 평행 판 유동계(parallel plate rheometer)(Anton Paar, GmbH, Austria)로 측정하였다. 20 mm의 직경과 1 mm의 갭을 갖는 평행 판 측정 시스템을 사용하였다. 자기 회로는 자속선이 평행 디스크(parallel disk)에 수직(normal)하도록 설계된다. 자기장의 방향은 전단 흐름(shear flow)에 수직(perpendicular)이다. 유동계는 유체 샘플들을 통해 최대 1 T의 자기장에 적용할 수 있다. 모든 경우, 샘플들은 313K로 가열된다. 전형적으로, 실험 전에, 30 초 동안 전단률 100 s^{-1} 에서 교반하여 유체를 균질화시키며, 데이터를 기록하기 전에 30 초 동안 안정하게 되도록 둔다. 신뢰성있는 결과들을 재현하는 것이 필수적인 전제조건이다.

[0043]

도 4는 주어진 자기장 세기 및 0.01 내지 800 s⁻¹의 범위에서 제로 자기장에서 MRF 샘플들에 대한 전단률에 대한 측정된 점성을 나타내고, 이것은 회전형 유동계(rotational rheometer)로 측정한다. 일정한 강도의 자기장 인가 시 주어진 전단률에 도달할 수 있는 점도로 증가되어 정량화된다. 대부분의 기술 적용분야, 예를 들어 MR 댐퍼 및 베어링에 대해, 자기유변유체가 흐름 영역(flow region)에서 작용하기 때문에, 점성은 항복응력보다 더 중요하다. 이 물질은 전단률의 증가에 따라 감소되는 점성(η)을 얻는 전단박화 효과(shear-thinning effect)를 허용한다. 도 4a 내지 4c에 나타난 바와 같이, 저 전단률에서 자기장이 존재시 자기유변유체들은 -0.91 내지 -1의 멱법칙 인덱스(power law index)를 나타낸다. 관찰된 멱 지수(power exponent)의 높은 값은 낮은 전단률에서 입자간 자기적 상호작용이 자기유변유체의 경우에 매우 강한 것을 명확하게 나타낸다. 결과적으로, 겔보기 항복응력 및 플라스틱과 같은 특성이 나타나는데, 이는 사슬 형태 구조의 형성을 나타낸다. 고 전단률에서, 전단박화 비율의 감소되는 것처럼 수득 영역(yield region)에서 뉴턴 영역(Newtonian region)으로 전이가 관찰된다. 유사하게, MR 샘플들의 결과들은 저 전단률에서 제로 필드 내의 -0.75 내지 -0.8의 멱함수 인덱스를 갖는 특징이 있다. 전단률에 대한 전단응력의 유사 결과들이 세 개의 모든 MR 샘플들에서 측정되었으나, 본 명세서에 기술하지 않았다. 고 전단률에서, τ 와 $\dot{\gamma}$ 의 관계는 선형인 것처럼 나타나고, 전단응력에 대해 다음의 빙엄 방정식(Bingham equation)에 의해 설명된다:

[0044]

$$\tau = \tau_B + \eta_P \dot{\gamma},$$

[0045]

여기서, τ 는 전단응력이고, τ_B 는 동적(빙엄 모델) 항복응력이고, H 는 인가된 자기장의 세기이고, η_P 는 소성 점도(plastic viscosity)이다. 200 내지 800 s⁻¹ 범위의 전단률은 동적 항복응력을 결정하는데 사용된다. 도 5에 나타나는 바와 같이, 자기장 세기가 증가하면 동적 항복응력 값도 증가한다. 2차 다항식과 일치하는 데이터는 다음과 같이 나타낸다:

[0046]

$$\tau_B = C_0 + C_1 H + C_2 H^2,$$

[0047]

여기서, 0.67, 1.5, 4.0의 다른 무게 분율을 갖는 MRF 샘플들 각각에 대하여, 상수 C_0 는 -0.0562, -0.2385, 0.1429이고, 상수 C_1 은 0.08071, 0.08780, 0.07694이고, 상수 C_2 는 0.0003029, 0.0001994, 0.0003417이다.

[0048]

마이크로 크기의 자기입자들의 이중분산한 현탁액의 경우, 인가된 약간의 자기장때문에, 큰 크기의 입자들부터 짧은 사슬 세그먼트들의 쌍들이 먼저 형성된다. 외부장이 증가하는 경우, 사슬에서 큰 입자들의 작은 입자로 치환되는 것은 전단 하에서 형성된 체인 구조를 약하게 하는 효과가 있다. 그 결과, 체인-체인 상호 작용이 일어난다. 이중 분산된 MRF를 사용하는 주요 이유는 단일 분산된 현탁액에 비해 더 큰 항복응력을 발생시키기 때문이다. 입자들 사이의 자기적 쌍극자간 상호작용이 강화되기 때문에, 전단응력은 자기장의 세기가 증가하면 증가한다. 이것은 항복응력이 유체에서 흐르기 시작할 필요가 있는 경우, 자기유변유체가 빙엄 유체와 같이 행동하는 것을 의미한다. 4.0의 높은 무게 분율에서, 항복응력은 자기장의 증가에 따라 증가한다. 작은 크기의 입자들의 영향은 현탁액의 안정성에 중요한 역할을 한다. 결과적으로, 높은 무게 분율에서 안정성이 높다. 항복 상황(yielding regime) 이상에서의 소성 점도 η_P 는 0.1 Pa s에서 매우 낮다.

[0049]

4. 침전율

[0050]

각각의 MR 물질을 눈금을 매긴 실린더 안에 넣어놓고, 고정 지지대 위에서 매일 표면에 뜨는 액체의 부피를 확인하였다. 그 결과 침전율은 아래와 같이 정의 되었다.

[0051]

$$\text{침전율}(\%) = \frac{\text{표면에 뜨는 액체량}}{\text{전체 MR 유체량}} \times 100(\%)$$

[0052]

위 식을 이용하여 아래 표와 같이 세 가지의 MR 유체의 침전도를 계산하여 표 1에 나타내었다. 이와 같은 결과는, 판 형상의 MR 유체가 기존의 MR 유체보다 낮은 침전율을 갖고, 재분산성이 우수하다는 것을 보여준다.

[0053]

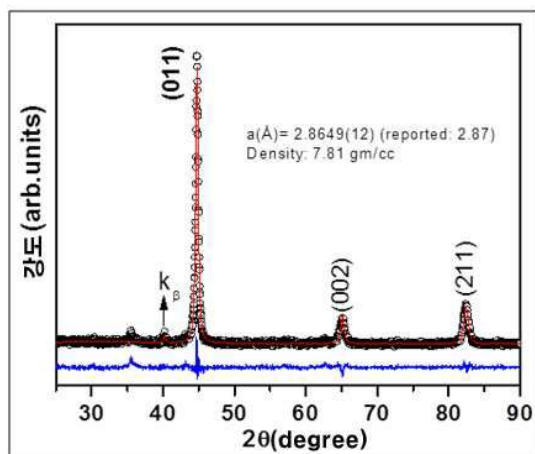
표 1

자기유변유체	평균 침전율(%/일)
MR206	0.8
MR315	1

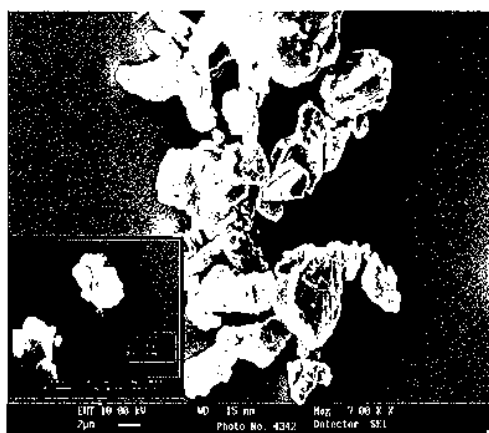
MRF140	0.3
--------	-----

도면

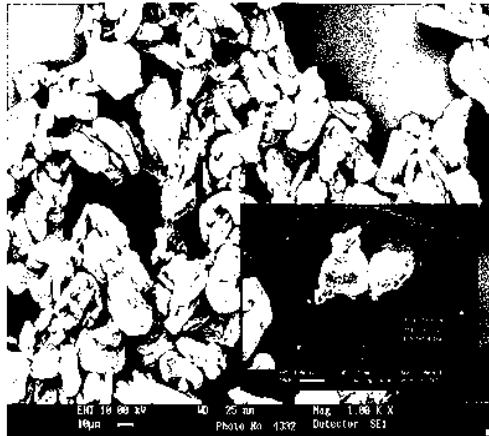
도면1



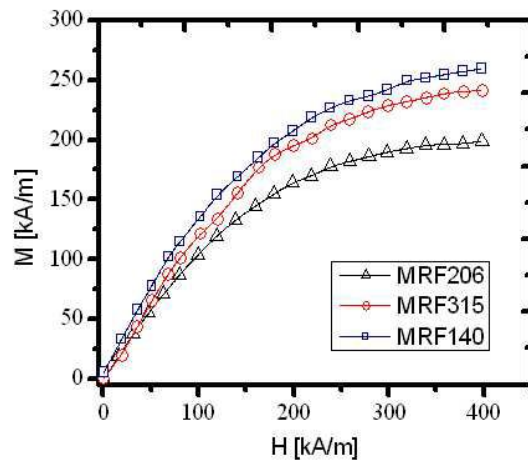
도면2a



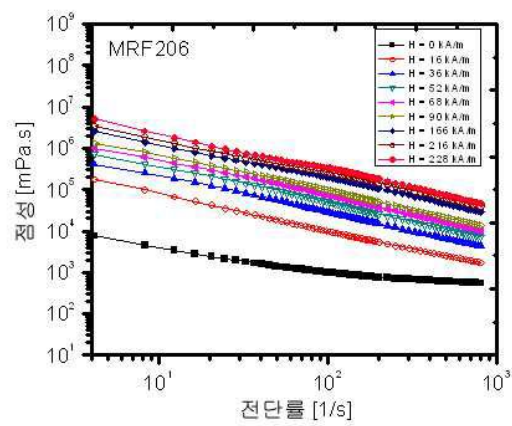
도면2b



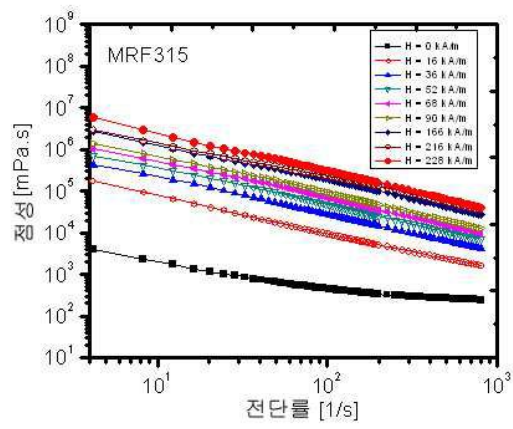
도면3



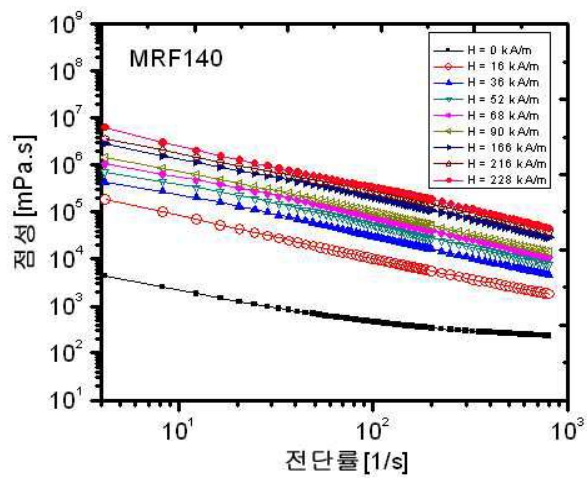
도면4a



도면4b



도면4c



도면5

