

# Magnetorheological Fluids Based on Magnetic Particles Using the Multi-bimodal Method

Young-Tae Kwon\* and Jeong Won Jeong

New-Functionality Powder Materials Research Center, Korea Institute of Materials Science, Changwon 51508, South Korea

(Received 13 January 2026, Received in final form 2 February 2026, Accepted 2 February 2026)

Magnetorheological (MR) fluids are smart materials that undergo a reversible transition from a liquid state to a semisolid state when exposed to an external magnetic field. This behavior arises from the alignment of soft magnetic particles, which form chain-like microstructures depending on the direction of the applied magnetic field. The changes in the chain-like alignment of the microstructure lead to variations in rheologically sensitive responses, such as yield stress, viscosity, and storage modulus. In this study, magnetorheological fluids are fabricated using carbonyl iron particles (CIPs), a representative example of ferromagnetic particles, and their properties were analyzed through a multi-modal approach. Compared to MR fluids made with a single-sized CIP powder, the multi-modal approach-based MR fluid demonstrates superior characteristics, providing a rigid magnetic chain structure that resulted in higher yield stress and viscosity. This study could provide important guidelines for the fabrication of high-performance MR fluids and contribute to applications, particularly in vibration control components utilizing MR fluids.

**Keywords :** magnetorheological fluid, multi-bimodal method, carbonyl iron particle, yield stress, viscosity

## Multi-bimodal 방법을 적용한 연자성 입자 기반 자기 유변 유체의 특성 분석

권영태\* · 정재원

한국재료연구원 신기능분말센터, 창원시 성산구 창원대로 797, 51508

(2026년 1월 13일 받음, 2026년 2월 2일 최종수정본 받음, 2026년 2월 2일 게재확정)

자기 유변 유체는 외부 자기장이 인가되면 액체 상태에서 반고체 상태로 가역적인 전이가 일어나는 스마트 재료이다. 이러한 거동은 유체 내에 분산되어 있는 연자성 입자들이 자기장의 방향에 따라 정렬되어 사슬 형태의 미세 구조를 형성하는 데서 비롯된다. 사슬 형태로 정렬되는 미세구조의 변화는 항복응력, 점도, 저장 탄성률 등 유변학적으로 민감한 반응을 변화시키게 된다. 본 연구에서는 대표적인 연자성 입자로 알려진 carbonyl iron particles(CIPs)을 활용하여 multi-modal 방법 기반의 자기 유변 유체를 제조 및 그 특성을 분석하였다. 단일 크기의 CIP 분말로 제조된 자기 유변 유체에 비해, multi-modal 방법 기반의 자기 유변 유체는 단단한 자기 사슬 구조를 제공함으로써, 높은 항복 응력 및 점도 특성을 보유함을 증명하였다. 본 연구는 고특성의 자기 유변 유체 제조에 중요한 지침이 될 수 있으며, 특히 자기 유변 유체를 활용하는 진동 제어 부품 응용에 기여할 수 있다.

**주제어 :** 자기 유변 유체, multi-bimodal법, carbonyl iron particle, 항복응력, 점도

### I. 서 론

자기 유변 유체는 연자성 입자, 비자성 유체, 그리고 첨가제로 구성되며, 외부 자기장에 반응하여 가역적이고 조절 가능한 유변학적 특성을 보이는 스마트 재료이다[1-3]. 유체 내에 분산된 연자성 재료들은 외부에서 자기장이 가해지면 자

기 분극 현상을 일으키며, 자기장 방향을 따라 사슬 모양의 구조로 정렬됨으로써, 준고체 상태로 변하게 된다. 이 때 자기 입자들의 사슬 구조를 끊는데 필요한 응력을 전단 항복 응력이라 하며, 인가된 자기장의 세기에 비례하여 선형적으로 증가한다[4-6]. 반대로 외부 자기장이 제거되면 연자성 입자들은 자성을 잃으면서 다시 원래의 점성 흐름 상태로 돌아간

다. 이러한 전단 항복 응력과 점도의 유변학적 변화는 자기 유변 유체의 기계적 성능을 평가하는 핵심 지표이다[7-10]. 전단 항복 응력이 높을수록 외부 힘에 대한 변형 저항성과 유변학적 반응의 안정성이 향상되기 때문에, 자기 유변 유체는 자동차 서스펜션 시스템, 파워 스티어링 장치, 지진 댐퍼 등 실시간 진동 및 충격 제어가 필요로 하는 능동형 기계 시스템에 활용될 수 있다[11-15]. 따라서, 낮은 외부 자기장에서도 높은 전단 항복 응력을 구현할 수 있는 자기 유변 유체는 진동 제어, 충격 흡수 및 정밀제어용 차세대 능동형 기계 시스템 설계의 핵심 목표이다.

본 연구에서는 서로 다른 크기의 CIPs와 Fe 나노입자를 활용하여 multi-modal 자기 유변 유체를 제조하였다. CIP는 Fe의 산화/환원이 반복되면서 입자 안 결정립이 계단식으로 자라서 양과처럼 겹겹이 쌓여있는 형태를 가지고 있는 대표적인 연자성 소재로 알려져 있다. 현재, 상용적으로 판매되고 있는 자기 유변 유체는 단일 크기의 CIP를 유체 내에 분산되어 있는 형태이다. 하지만, CIP의 큰 마이크로 입자들 사이의 빈 공간을 작은 나노 입자로 메우면서 강력한 시슬을 형성하는 한편, 결과적으로 자기 유변 유체의 전단 항복 응력을 극대화하는 연구를 진행하였다. 마지막으로, CIP와 Fe 나노 입자로 구성된 자기 유변 유체의 기계적 특성을 최적화하기 위한 공정 조건을 도출하였다.

## II. 실험 방법

본 연구에서 사용된 소재는 CIP(CIP EM, BASF), Fe 나노 입자(Fe, 99.7%, 100 ~130 nm, UNi NANO), 실리콘 오일(KF-96 1000cs, ShinEtsu)이다. Multi-bimodal 자기 유

변 유체를 제조하기 위하여 CIP와 silicone oil 비율이 80:20 wt%로 하였으며, 여기에 Fe 나노 입자를 각각 0 wt%, 2 wt%, 4wt%, 6 wt%, 8 wt%, 10 wt% 비율로 첨가하여 유변학적 특성을 확인하였다. CIP와 Fe 나노 입자의 형상은 전계방출 주사전자 현미경(Scanning electron microscopy; SEM, JIB-4601F, JEOL)을 이용하여 관찰하였다. 분말의 입자들 크기는 입도분석기(LS 13 320, Beckman Coulter)를 사용하여 측정하였다. 자기적 특성은 진동 시료 자석계(Vibrating Sample Magnetometer; VSM, EZ9, Microsense)를 이용하여 -15 kOe에서 15 kOe 범위의 자기장을 인가하여 포화자화( $M_s$ )를 측정하였다. 자기 유변 유체의 특성은 자기 유변 모듈이 장착된 레오미터(Rheometer; magnetorheometer, Trios)를 사용하여 평가하였다. 전단 응력과 점도는 0에서 1 T 범위의 자기장과 0에서 1,200  $s^{-1}$ 까지의 전단 속도 조건에서 측정하였다. 측정된 유변학적 데이터를 바탕으로, 전단 응력-전단 속도 관계를 빙엄 유동 모델(Bingham flow model)  $\tau = \tau_{yB} + K_B\dot{\gamma}$ 을 피팅하여 항복응력 (Yield stress)을 도출하였다. 여기서  $\tau$ 는 전단응력,  $\tau_{yB}$  빙엄 항복응력,  $K_B$  소성 점도(Plastic viscosity),  $\dot{\gamma}$ 는 전단 속력을 의미한다.

## III. 결과 및 고찰

자기 유변 유체는 일반적으로 자성 입자와 기본 액체로 구성되어 있다. 자기장 적용 전, 자성 입자들은 무작위로 분포해 있어 유체의 점도는 상대적으로 낮지만, 외부 자기장이 가해지면 자성 입자들이 자기장의 방향으로 정렬되면서 입자들 간의 상호작용이 강해지고, 결과적으로 유체의 점도와 강도가

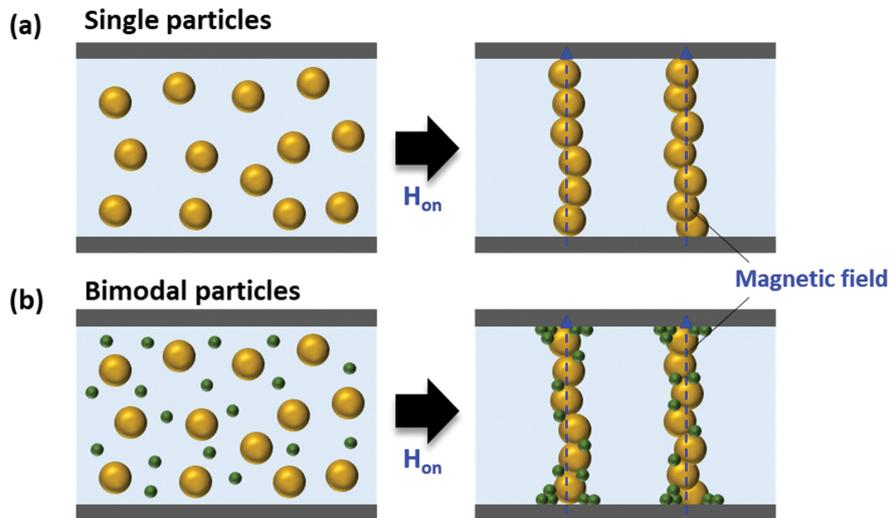


Fig. 1. (Color online) Behavior of MR fluids without and with external magnetic fields (H). Schematic illustrations of the MR fluid containing dispersed (a) single and (b) bimodal particles (left) and ideal particles alignment under externally applied field (right).

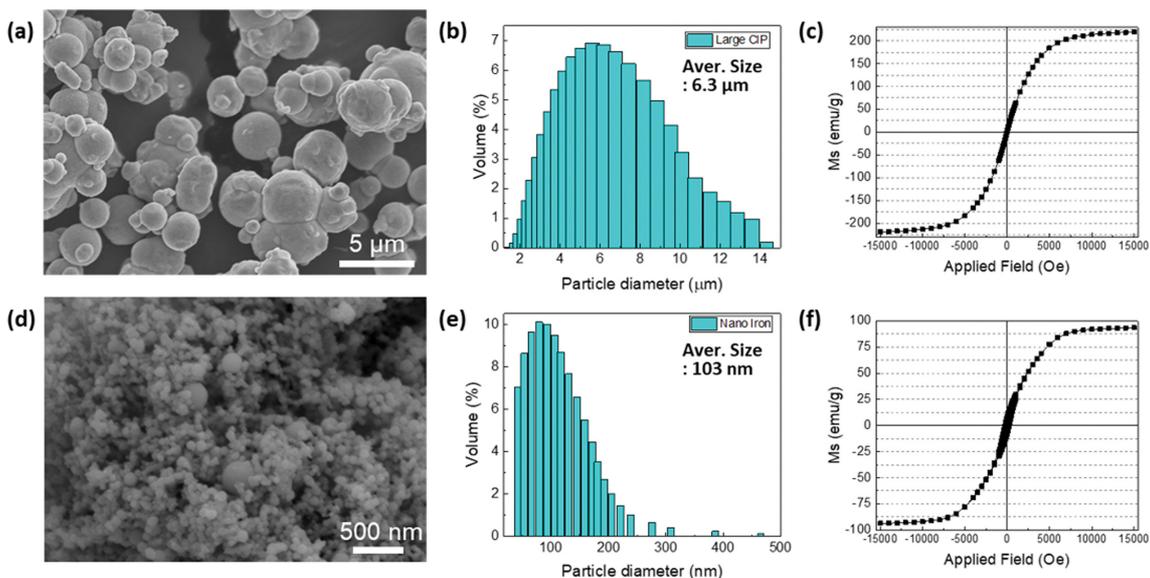
급격하게 증가하게 된다. 이 때, 자기장이 강할수록 자성 입자들의 정렬 정도가 높아져 유체는 더욱 단단해지며, 반대로 자기장이 약해지면 자성 입자들은 무작위로 다시 분포하게 되어 유체는 원래의 유동성을 회복한다. 자기장의 유/무에 따라 자성 입자의 빠른 정렬과 무작위 분포 반응이 이뤄져야 하기 때문에, 자기 유변 유체 내 자성 입자는 연자성 소재를 사용한다. Fig. 1은 이러한 자기 유변 유체의 자기장에 따른 유체 내 거동을 보여주는 모식도이다. 일반적인 자기 유변 유체는 Fig. 1(a)와 같이 수 마이크로 미터 단일 크기의 CIP를 사용한다. 하지만, 단일 크기의 입자로 이뤄진 자기 유변 유체는 좁은 항복 응력 및 점도 제어 범위를 갖게 되어 정밀한 제어가 어려워질 수 있다. Fig. 1(b)는 본 연구에서 제안하는 multi-bimodal 자기 유변 유체로 수 마이크로 미터 크기의 CIP 소재와 Fe 나노 입자로 이루어져 있다. 작은 입자와 큰 입자가 함께 사용되면, 작은 입자는 더 빠르게 자기장에 반응하고, 큰 입자는 더 강한 응집력을 가지고 있어 보다 넓은 항복 응력 및 점도 조절 범위를 제공하여 다양한 조건에서 세밀한 항복 응력 및 점도 제어가 가능하다. 이러한 넓고 세밀한 유변학적 특성 조절 범위를 갖는 자기 유변 유체는 충격 흡수나 진동 제어 시스템에서 더 효과적인 작용을 할 수 있을 것으로 보인다.

Fig. 2는 multi-bimodal 자기 유변 유체 제조에 사용하는 CIP와 Fe 나노 입자의 구조적 자기적 특성을 보여준다. Fig. 2(a)는 본 연구에서 사용된 CIP의 SEM 사진이다. CIP는 넓은 크기 분포를 가지고 있으며, 평균 크기는 6.3  $\mu\text{m}$ 이다 (Fig. 2(b)). 또한, VSM 분석을 통해 CIP는 히스테리시스 루

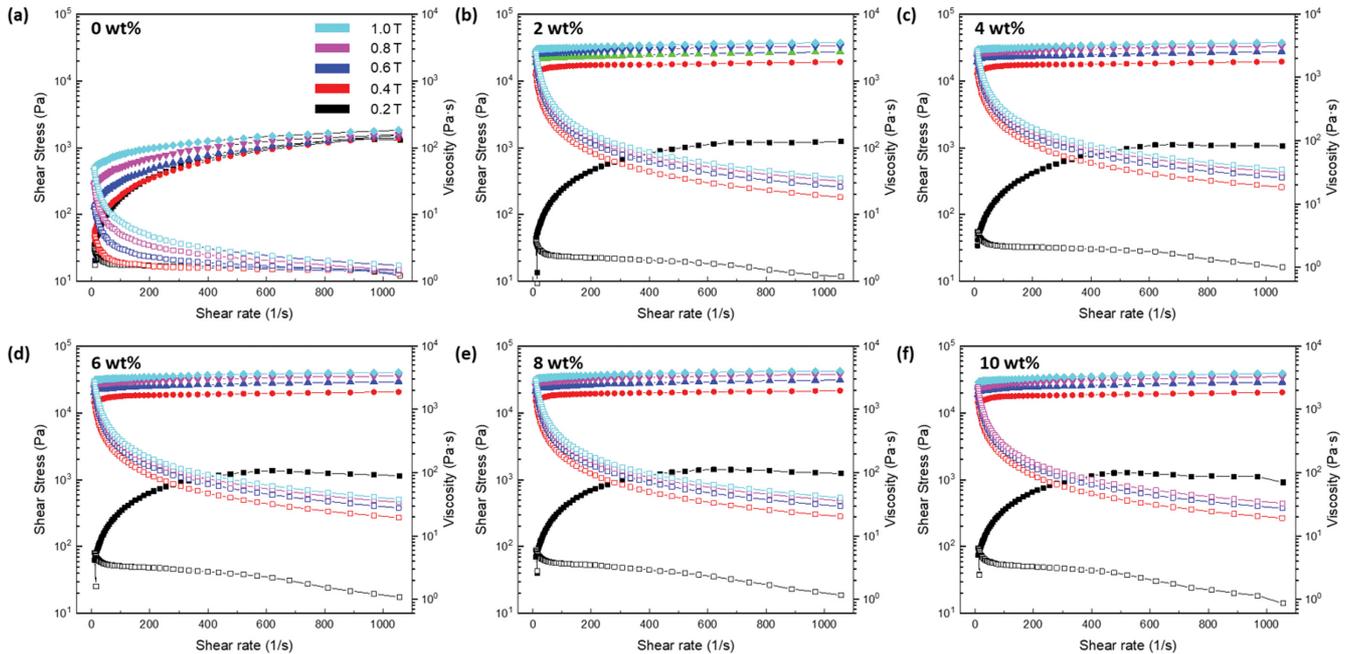
프가 좁고, 자화 포화가 빠르게 일어나는 전형적인 연자성 특성을 확인할 수 있다. 포화자화는 218 emu/g의 세기를 갖는 것을 확인하였다 (Fig. 2(c)). 다음으로, multi-bimodal 자기 유변 유체의 미세 입자로 사용된 Fe 나노 소재는 CIP와 마찬가지로 구형의 구조를 갖는 것을 Fig. 2(d)의 SEM 분석을 통해 확인하였으며, 크기는 103 nm의 평균 크기를 갖고 있었다(Fig. 2(e)). 일반적으로 자기 유변 유체에 사용되는 연자성 소재는 구형의 입자를 사용한다. 구형 입자는 비대칭적인 형태의 입자들에 비해 자기장레 대해 빠르고 균등하게 반응하며, 균일한 정렬로 인해 신뢰성 높은 유체의 항복 응력 및 점도 변화가 일어나기 때문이다. Fe 나노 입자의 자기적 특성을 분석한 결과, 91 emu/g의 포화 자속 밀도를 갖는 것을 확인하였다.

Fig. 3은 0~10 wt.%의 미세 Fe 나노 입자가 함유된 자기 유변 유체의 자기장 세기에 따른 전단 응력(Shear stress) 및 점도를 포함한 유변학 특성을 분석한 데이터이다. 단힌 기호는 전단 속도(Shear rate)에 따른 전단 응력을 나타내며, 열린 기호는 전단 속도와 점도와의 관계를 보여준다. 모든 샘플에서 외부 자기장의 세기가 증가하는 전단 응력과 점도의 상승으로 이어졌다. 이는 강한 외부 자기장일수록 유체 내 분산되어 있는 연자성 입자의 정렬 또한 강해지기 때문에 물질의 변형을 위한 힘을 나타내는 전단 응력이 증가하기 때문이다. 또한, 높은 정렬도는 유체의 점도를 증가 시키게 된다.

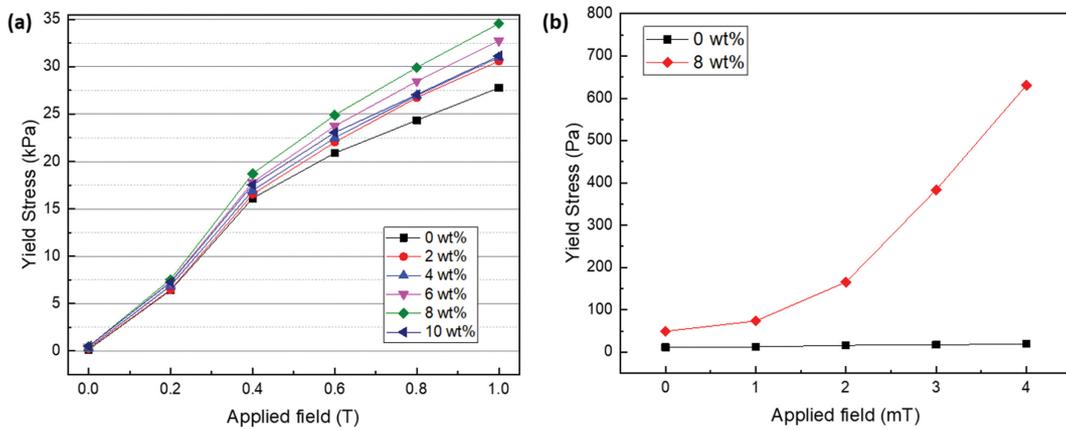
Fig. 4는 자기장 강도에 따른 MR 유체의 항복 응력 데이터를 보여준다. 항복 응력 값은 빙햄 플라스틱 모델에 의해 결정되며, 이는 다음과 같이 표현된다:



**Fig. 2.** (Color online) Soft magnetic particles used in the multimodal MR fluids. (a) SEM image of micro-sized CIP. (b) Size histogram of the CIP. (c) Magnetic characterization of CIP. (d) SEM image and (e) size diagram of nano-sized Fe particles. (f) VSM data for the Fe nanoparticles.



**Fig. 3.** (Color online) Rheological characteristics of the multi-bimodal MR fluids, showing changes in shear stress and viscosity as functions of shear rate and magnetic flux density. The Fe nanoparticles are dispersed in multi-bimodal MR fluids at concentrations of (a) 0 wt%, (b) 2 wt%, (c) 4 wt%, (d) 6 wt%, (e) 8 wt%, and (f) 10 wt%. The close symbols represent the shear stress versus shear rate, and the open symbols stand for the viscosity versus shear rate.



**Fig. 4.** (Color online) Comparison of the rheological behavior of multi-bimodal MR fluids. Changes in yield stress under an externally applied field ranging from (a) 0 to 1.0 T and (b) 0 to 4 mT.

$$\tau = \tau_{yB} + K_B \gamma \tag{1}$$

여기서,  $\tau$ 는 전단 응력,  $\tau_{yB}$ 는 빙햄 항복 응력,  $K_B$ 는 플라스틱 점도,  $\gamma$ 는 전단 속도이다[16]. 이 항복 응력은 자기장에 의해 유도된 체인 형태 구조를 유체 내에서 유지하는 데 필요한 최대 힘을 반영한다. 항복 응력은 오일 기반 기계장치, 예를 들어 구동기(Actuator)에서 중요한 역할을 하며, 이는 기계적 에너지 전송과 시스템이 높은 토크를 견디는 능력에 영향을 미친다. Fig. 4(a)는 0에서부터 1.0 T의 외부 자기장을

인가했을 때의 항복 응력 수치를 보여준다. Fe 나노 입자가 함유되지 않은 자기 유변 유체의 항복응력은 28 kPa이며, 나노 입자의 함량이 높아지면 항복응력은 점차 증가한다. 특히, 8 wt%의 Fe 나노 입자가 multi-bimodal 자기 유변 유체로 된 샘플은 최대 34 kPa의 항복응력을 보였다. 이는 큰 CIP가 작은 Fe 나노 입자들을 연결 또는 간섭하는 형태로 배열되기 때문에 유체 내 강한 물리적 연결을 만들어내며, 결과적으로 항복 응력이 증가된다. 하지만, 10 wt%의 Fe 나노 입자가 포함된 자기 유변 유체의 항복응력은 31 kPa으로 감

소되는 것을 확인하였다. 너무 많은 작은 입자가 있을 경우, 유체 내에서 크기 분포의 불균형이 발생하게 된다. 이때 작은 입자들은 너무 빠르게 움직이고, 큰 입자들이 이들을 충분히 연결하거나 응집시키지 못한다. 결국, 작은 입자들이 강한 체인 구조를 형성하지 못하고, 유체의 구조적 강화가 약해져 항복 응력이 감소하게 된다. 마지막으로, Fig. 4(b)는 0에서 4 mT의 낮은 외부 자기장을 인가했을 때, 0 wt% 및 8 wt%의 Fe 나노 입자가 포함된 자기 유변 유체의 항복 응력 거동 데이터이다. 미세 나노 입자가 포함되지 않은 자기 유변 유체는 낮은 외부 자기장에서는 항복 응력의 변화가 거의 발생하지 않은 반면, 8 wt%의 Fe 나노 입자가 포함된 자기 유변 유체는 낮은 자기장 변화에서도 선형적으로 항복 응력 수치가 증가함을 보였다. 그 이유는 0에서 4 mT의 낮은 외부 자기장으로는 CIP의 정렬을 유도할 수 없지만, 상대적으로 가벼운 Fe 나노 입자는 유체 내 정렬이 가능하기 때문이다. 낮은 외부 자기장에서의 항복응력 결과를 통해 multi-bimodal 자기 유변 유체의 세밀한 유변학적 특성 조절이 가능함을 증명하였다.

#### IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 단일 크기의 연자성 입자로 제조된 자기 유변 유체와 비교하여, CIP와 Fe 나노 입자를 활용한 multi-bimodal 자기 유변 유체가 전단 항복 응력과 점도 등 유변학적 특성이 더 우수함을 입증하였다. 또한, CIP 소재와 미세 Fe 나노입자의 최적 비율을 탐구하기 위한 연구를 진행하였으며, Fe 나노입자의 추가로 전단 항복 응력과 점도가 증가했으며, 특히 8 wt%의 Fe 나노입자가 포함된 샘플에서 최대 34 kPa의 항복 응력을 달성했다. 또한, 자기장에 따른 유변학적 변화를 분석한 결과, 낮은 외부 자기장 인가에서의 전단 응력 변화가 두드러지게 나타났다. 단일 크기의 CIP 소재로 제조된 자기 유변 유체는 전단 응력 변화가 발생하지 않은 반면, Fe 나노입자가 포함된 multi-bimodal 샘플은 낮은 자기장에서도 선형적인 항복 응력 증가를 보였다. 이러한 결과는 multi-bimodal 방법이 자기 유변 유체의 성능을 획기적으로 향상시키는 데 중요한 역할을 한다는 것을 시사한다. 특히, 서로 다른 크기의 입자들이 결합됨으로써 보다 넓은 항복 응력 범위와 정밀한 점도 조절이 가능 해졌으며, 이는 자기 유변 유체가 요구되는 다양한 응용 분야에서 정밀한 제어를 실현할 수 있음을 의미한다. 본 연구는 향후 자기 유변 유체의 성능 향상 및 고성능 유체의 개발을 위한 기초 데이

터를 제공하며, multi-bimodal 방법을 적용한 유체 제조 기술이 미래의 차세대 능동형 시스템 설계에 중요한 역할을 할 것임을 시사한다.

#### 감사의 글

이 논문은 2025년도 산업통상부의 재원으로 한국산업기술 평가관리원의 지원을 받아 수행된 연구임(연구번호 RS-2025-25462587).

#### References

- [1] J. Choi, K. T. Nam, S. Kim, and Y. Seo, *Nano Lett.* **21**, 4973 (2021).
- [2] T. Plachy, M. Cvek, Z. Kozakova, M. Sedlacik, and R. Moucka, *Smart Mater. Struct.* **26**, 025026 (2017).
- [3] Y. P. Seo, S. Han, J. Choi, A. Takahara, H. J. Choi, and Y. Seo, *Adv. Mater.* **30**, 1704769 (2018).
- [4] S. E. A. Hosseini and S. Beskhyroun, *Structures* **68**, 107090 (2024).
- [5] J. de Vicente, D. J. Klingenberg, and R. Hidalgo-Alvarez, *Soft Matter* **7**, 3701 (2011).
- [6] M. Ashtiani, S. H. Hashemabadi, and A. Ghaffari, *J. Magn. Magn. Mater.* **374**, 711 (2015).
- [7] J. S. Kumar, P. S. Paul, G. Raghunathan, and D. G. Alex, *J. Mech. Mater. Eng.* **14**, 13 (2019).
- [8] D. H. Qin, L. Cao, Q. Y. Sun, Y. Huang, and H. L. Li, *Chem. Phys. Lett.* **358**, 484 (2002).
- [9] S. Genç and P. P. Phulé, *Smart Mater. Struct.* **11**, 140 (2002).
- [10] J. Wu, L. Pei, S. Xuan, Q. Yan, and X. Gong, *J. Magn. Magn. Mater.* **408**, 18 (2016).
- [11] L. Quan, L. Bing, P. Yucheng, Z. Yunpu, W. Kang, D. Huaxia, and G. Xinglong, *Smart Mater. & Dev.* **1**, 202405 (2025).
- [12] S. S. Stalin, M. Uthayakumar, P. Balamurugan, M. Pethuraj, J. A. Sładek, and M. Niemczewska-Wójcik, *Adv. Sci. Technol. Res. J.* **19**, 375 (2025).
- [13] J. Liu, G. A. Flores, and R. Sheng, *J. Magn. Magn. Mater.* **225**, 209 (2001).
- [14] D. Cruze, H. G. S. V. S. Jebadurai, S. L. T. D., and S. S. J. E. Christy, *Civ. Eng. J.* **4**, 3058 (2018).
- [15] S. T. Shilan, S. A. Mazlan, Y. Ido, A. Hajalilou, B. Jeyadevan, S. B. Choi, and N. A. A. Yunus, *Smart Mater. Struct.* **25**, 095025 (2016).
- [16] I. A. Frigaard, K. G. Paso, and P. R. de Souza Mendes, *Rheol. Acta.* **56**, 259 (2017).