

## Magnetic Properties of Soft Magnetic Powder Cores with Different Particle Size Mixing Ratios

Minsoo Park, Wooyoung Choi, Jeongwoo Seo, Jiyoung Yoon, and Young Jin Hwang\*

Department of Electrical and Electronic Engineering, Korea Maritime & Ocean University, Busan 49112, South Korea

(Received 7 January 2026, Received in final form 30 April 2026, Accepted 30 April 2026)

In this study, the effect of particle size mixing ratio on the magnetic properties of soft magnetic powder cores (SMPCs) was investigated. Toroidal SMPCs were fabricated by mixing iron powders with particle sizes below 150  $\mu\text{m}$  and relatively fine iron powders with particle sizes below 74  $\mu\text{m}$  at various mixing ratios. The magnetic properties were evaluated using B-H curve measurements, including residual flux density ( $B_r$ ), coercivity ( $H_c$ ), effective permeability ( $\mu_e$ ), and hysteresis loop area. The density and packing ratio of each specimen were evaluated, showing ranges of 6.34–6.72  $\text{g}/\text{cm}^3$  and 90.31–95.73%, respectively. In addition, the residual flux density and maximum effective permeability ranged from 0.21 to 0.52 T and from 220 to 334. In particular, both residual flux density and effective permeability increased with increasing fine-particle content. These findings indicate that particle size mixing ratio is a key factor influencing the magnetic performance of SMPCs and provide fundamental experimental data for controlling their magnetization characteristics.

**Keywords** : soft magnetic powder core, toroid, effective permeability, flux density

### 이종 입도 혼합비에 따른 연자성 분말 코어의 자기적 특성

박민수 · 최우영 · 서정우 · 윤지영 · 황영진\*

국립한국해양대학교 전기전자공학과, 부산광역시 영도구 태종로 727, 49112

(2026년 1월 7일 받음, 2026년 4월 30일 최종수정본 받음, 2026년 4월 30일 게재확정)

본 연구에서는 연자성 분말 코어(soft magnetic powder cores, SMPCs)의 자기적 특성에 대한 입도 혼합비의 영향을 분석하였다. 서로 다른 혼합비로 150  $\mu\text{m}$  이하의 분말과 상대적으로 미세한 74  $\mu\text{m}$  이하의 철 분말을 혼합하여 토로이달 형상의 SMPC 시편을 제작하였다. 자기적 특성은 잔류자속밀도( $B_r$ ), 보자력( $H_c$ ), 유효 투자율 ( $\mu_e$ ), 히스테리시스 루프 면적을 포함한 B-H 곡선 측정을 통해 평가하였다. 각 시편의 밀도와 충전율을 평가한 결과, 밀도는 6.34~6.72  $\text{g}/\text{cm}^3$ , 충전율은 90.31~95.73% 범위였으며, 잔류자속밀도와 최대 유효 투자율은 각각 0.21~0.52 T 및 220~334 범위로 확인되었다. 특히, 미세 입자 함량이 증가함에 따라 잔류자속밀도와 유효 투자율이 증가하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 입도 혼합비가 SMPC의 자기적 성능을 결정하는 주요 인자 중 하나임을 시사하며, SMPC의 자화 특성을 제어하기 위한 기초 실험 자료를 제공한다.

**주제어** : 연자성 분말 코어, 토로이드, 유효 투자율, 자속밀도

### I. 서 론

연자성 소재는 전기기기와 전자기 부품에서 핵심적인 역할을 수행하며, 구동 주파수 증가와 시스템 소형화에 따라 그 중요성이 커지고 있다[1-5]. 기존에 널리 사용되어 온 적층 전기강판은 높은 포화 자속 밀도를 갖지만, 교류 자화 조건

에서 와전류 손실이 증가하고 형상 설계에 제약이 따른다는 한계를 지닌다. 이러한 문제를 보완하기 위해, 자성 분말을 압축 성형한 연자성 분말 코어(Soft Magnetic Powder Core, SMPC)가 제안되었다[6-8]. SMPC는 분말 간 전기적 절연 구조를 통해 와전류 손실을 억제할 수 있으며, 3차원 자기 플럭스 형성과 복잡한 형상 구현이 가능하다는 장점을 갖는다

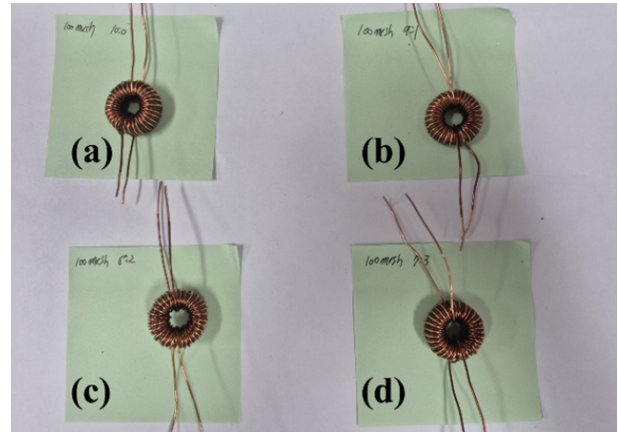
[9,10]. 그러나 SMPC의 자기적 특성은 사용되는 분말의 조성 뿐만 아니라 입자의 크기와 분포, 성형 압력, 열처리 온도 등 다양한 공정 변수에 의해 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다[11-18]. 특히, 이중 입도 혼합 비율은 SMPC의 자화 거동과 자기적 특성에 영향을 미치는 중요한 변수이다. 그러나 SMPC에 관한 기존 연구들은 주로 단일 입자 크기 또는 제한된 조건에서의 특성 변화에 초점을 맞추고 있으며, 다양한 혼합 비율 조건에서의 자기적 특성 변화를 비교한 연구는 상대적으로 부족하다[13,19]. 이에 따라, 본 연구에서는 단일 및 혼합 입자 크기를 갖는 철 분말로 제작한 SMPC를 대상으로, 입자 크기 혼합 비율에 따른 자속밀도( $B$ ), 보자력( $H_c$ ), 그리고 투자율의 변화를 비교 분석하고자 한다.

## II. 실험 방법

### 1. 시편 제작

시편 제작을 위해 사용된 SMPC의 자성 분말은 철 분말이며, 입자 크기는 각각 150  $\mu\text{m}$ , 74  $\mu\text{m}$  이하이다. 또한, 바인더로 사용된 에폭시와 경화제는 각각 STYCAST 1266 PTA와 PTB이며, 원활한 혼합을 위한 용매로는 아세톤을 사용하였다[14-16].

에폭시, 경화제, 그리고 아세톤을 Table I의 비율에 따라 계량하여 1,000 rpm으로 5분간 교반하였다. 이후, 에폭시 함량을 2 wt%로 고정한 상태에서 100 mesh 및 200 mesh 철 분말을 특정 비율로 혼합한 뒤, 한 번 더 5분간 교반하였다. 그 뒤, 70 °C에서 아세톤을 증발시켜 에폭시가 코팅된 철 분말을 제조하였다. 코팅 된 철 분말을 압축 성형 금형에 채운 뒤, 25t 유압식 프레스에서 1,000 MPa로 1차 압축 성형하고, 2차적으로 1,350 MPa로 수행하여 토로이드 코어를 제작하였다. 일반적으로 SMC 코어는 압축 성형 과정에서 발생한 내부 응력을 완화하기 위하여 열처리를 한다. 그러나 본



**Fig. 1.** (Color online) Fabricated SMPCs for magnetic properties measurement with different particle size mixing ratios (a) SMPC-1, (b) SMPC-2, (c) SMPC-3, and (d) SMPC-4.

연구에서는 분말 간 전기적 절연을 확보하고 비교적 간단한 공정으로 시편을 제작하기 위해 에폭시 기반의 유기 절연 코팅을 적용하였다. 사용한 에폭시의 허용 사용 온도는 약 105 °C 수준이므로, 일반적인 응력완화 목적의 고온 열처리를 적용할 경우 에폭시의 열화가 우려된다. 따라서 본 연구에서는 별도의 고온 후열처리를 수행하지 않고 100 °C에서 2시간 경화만 진행하였다.

압축 성형 금형은 내경과 외경이 각각 13 mm, 20 mm인 토로이드 형상이다. 제작된 각 SMPC의 사양은 Table II에 제시하였다. 각 SMPC의 1, 2차층에 각각 30턴씩 코일을 권선하였고, 이렇게 완성된 모든 SMPC 시료는 Fig. 1에 나타내었다.

### 2. 측정법

B-H Curve를 측정하기 위해 자속밀도  $B$ (Magnetic Flux Density)와 자계  $H$ (Magnetic Field)를 측정하여야 한다. 토로이드 코어에서  $H$ 의 경우 식(1)로 표현된다.

**Table I.** Mixing ratio of materials.

Specimens	Iron powder (wt%)	Epoxy + Hardner (wt%)
10:0 core (SMPC-1)	98	
9:1 core (SMPC-2)	88.2 (100 mesh), 9.8 (200 mesh)	2
8:2 core (SMPC-3)	78.4 (100 mesh), 19.6 (200 mesh)	
7:3 core (SMPC-4)	68.6 (100 mesh), 29.4 (200 mesh)	

**Table II.** Dimensions of toroid cores.

Specimens	Outer diameter (mm)	Inner diameter (mm)	Height (mm)	Effective length (mm)	Effective area ( $\text{mm}^2$ )
SMPC-1	20.39	12.84	6.68	52.198	25.217
SMPC-2	20.33	12.87	6.61	52.15	24.65
SMPC-3	20.37	12.53	6.72	51.679	26.342
SMPC-4	20.36	12.76	6.82	52.025	25.916

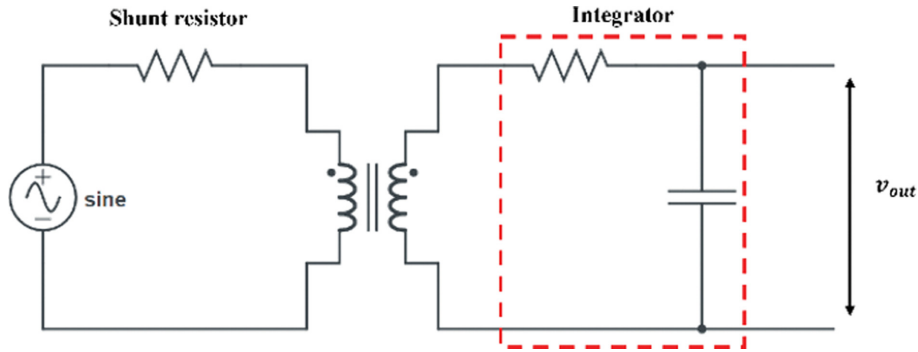


Fig. 2. (Color online) Circuit diagram of B-H Curve measurement system.

$$H = \frac{NI}{l} \tag{1}$$

여기서  $N$ 은 1차측 코일의 턴수,  $I$ 는 1차측 코일에 흐르는 전류,  $l$ 은 토로이드 코어의 유효 길이이다.

$B$ 의 경우 패러데이 전자기 유도 법칙 식(2)로부터 산출된다.

$$\varepsilon = N \frac{d\phi}{dt} \because \phi = BS \tag{2}$$

여기서  $\varepsilon$ 은 2차측 코일에 유도된 전압이고,  $N$ 은 2차측 코일의 턴 수,  $S$ 는 토로이드 코어의 유효 단면적이다.

식(2)를 적분하고  $B$ 에 대해 정리하면 식(3)과 같이 나타난다.

$$B = \frac{1}{NS} \int \varepsilon dt \tag{3}$$

회로에서 적분 과정을 수행하기 위해 적분회로가 필요하다. 적분회로의 출력전압( $v_{out}$ )은 식(4)와 같이 표현된다.

$$v_{out} = \frac{1}{RC} \int v_{in} dt \tag{4}$$

$R$ 과  $C$ 는 각각 적분회로의 저항과 정전용량이다. Fig. 2에서 적분회로의 입력전압( $v_{in}$ )은 토로이드 코어의 2차측 코일에 유

도된 전압이다. 따라서 자속밀도  $B$ 는 식(5)로 나타난다.

$$B = \frac{RC}{NS} v_{out} \tag{5}$$

결과적으로, 토로이드 코어의 형상 치수를 측정하고 1차측 코일에 흐르는 전류와 적분회로의 출력전압으로 자체  $H$ 와 자속밀도  $B$ 를 얻고 오실로스코프에 X, Y축으로 설정하여 B-H Curve를 나타낼 수 있다.

각 시편의 밀도는 코어의 질량과 외형 치수를 이용하여 계산하였고 충전율은 측정된 코어의 밀도에 이론밀도로 나누어 산출하였다. 이론밀도( $d_{Th}$ )는 철 분말과 에폭시로 이루어진 복합체로 가정하여 식(6)으로 계산하였다.

$$d_{Th} = \frac{1}{\frac{w_{Fe}}{d_{Fe}} + \frac{w_E}{d_E}} \tag{6}$$

여기서  $w_{Fe}$ 와  $w_E$ 는 각각 철 분말과 에폭시의 질량 비율이며,  $d_{Fe}$ 와  $d_E$ 는 각 성분의 고유 밀도이다.

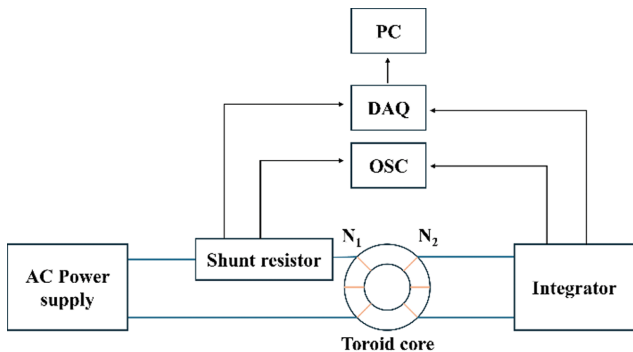


Fig. 3. (Color online) Schematic diagram of B-H Curve measurement system.

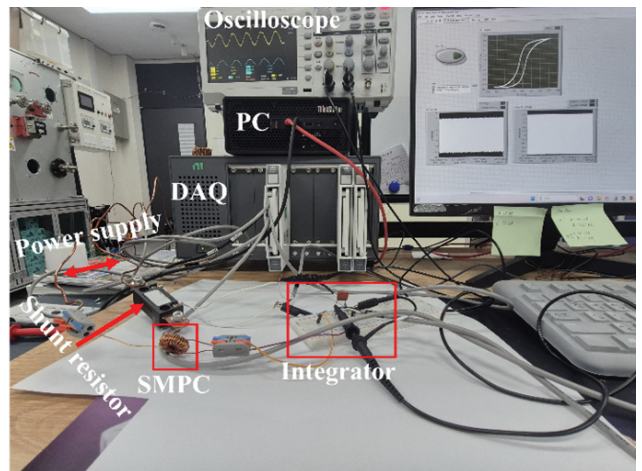


Fig. 4. (Color online) Experimental setup for the B-H curve measurement system.

### 3. 실험 구성

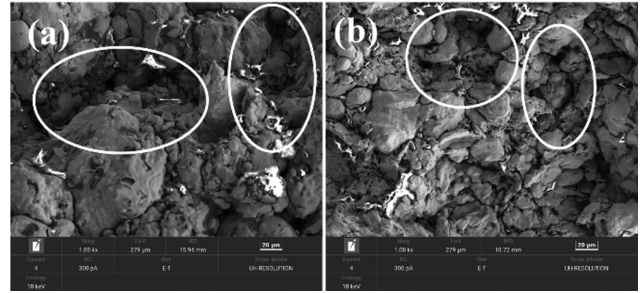
Fig. 3과 Fig. 4는 본 연구에서 사용된 측정 개략도와 B-H Curve 측정 시스템이다. 측정 시스템은 전원 공급부, 전류 검출부, SMPC, 적분회로, 데이터 저장 및 계측장치로 구성된다. 전원공급장치를 사용하여 1차측 권선에 전류를 인가하였으며, 전류는 직렬로 연결된 셉트 저항을 통해 측정하고, 이를 통해 SMPC 내부의 자계  $H$ 를 계산하였다. SMPC의 2차측 권선은 자속 변화에 따른 유도 전압이 발생하며, 이 신호는 적분회로를 통해 자속밀도  $B$ 에 비례하는 전압 신호로 변환된다. 변환된 전압 및 전류 신호는 DAQ 장치를 통해 수집 및 계측하였다.

### III. 실험 결과

Table III은 각 시편의 밀도, 이론밀도 및 충전율을 나타낸다. SMPC-1, SMPC-2, SMPC-3 및 SMPC-4의 밀도는 각각 6.36, 6.43, 6.34 및 6.72  $g/cm^3$ 로 확인되었고, 충전율은 각각 90.60, 91.60, 90.31 및 95.73%로 계산되었다. 이 중 SMPC-4에서 가장 높은 밀도와 충전율이 나타났다. 이러한 결과는 입도 혼합비 변화에 따라 코어의 치밀화 수준이 달라질 수 있음을 보여준다. 다만, SMPC-3에서는 밀도와 충전율이 다소 감소하여, 입도 혼합비 증가에 따른 변화가 모든 시편에서 일관되게 나타나지는 않았다.

**Table III.** Density and compacted packing ratio of SMPC specimens.

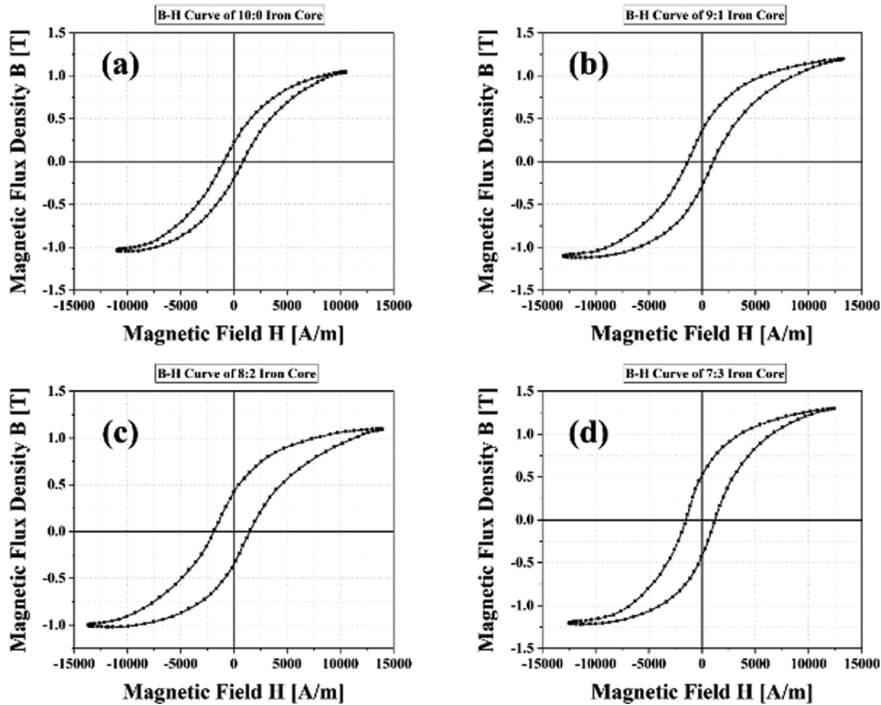
Specimens	Density ( $g/cm^3$ )	Theoretical density ( $g/cm^3$ )	Compacted packing ratio (%)
SMPC-1	6.36	7.02	90.6
SMPC-2	6.43		91.6
SMPC-3	6.34		90.31
SMPC-4	6.72		95.73



**Fig. 5.** Cross-sectional SEM images of SMPC, (a) SMPC-1, (b) SMPC-4.

**Table IV.** Magnetic properties of iron powder cores with different particle size ratios.

Specimens	$B_r$ (T)	$H_c$ (A/m)	$\mu_c$	Loop area ( $J/m^3$ )
SMPC-1	0.21	877	220	3,693
SMPC-2	0.35	1,046	245	6,303
SMPC-3	0.42	1,498	220	8,253
SMPC-4	0.52	1,218	334	7,138



**Fig. 6.** B-H curves of iron powder cores with different particle size mixing ratios measured by using the proposed system (a) SMPC-1, (b) SMPC-2, (c) SMPC-3, and (d) SMPC-4.

Fig. 5는 미세분말 혼합량에 따른 분말 코어의 단면 SEM 이미지를 나타낸다. Fig. 5(a)는 SMPC-1 시편의 단면 사진으로, 큰 입자 사이에 국부적인 빈 공간이 잔존하는 양상이 관찰된다. 반면 Fig. 5(b)의 SMPC-4 시편에서는 SMPC-1의 공극보다 줄었음을 확인할 수 있다.

Table IV와 Fig. 6은 단일 입도 및 이중 입도 철 분말을 적용하여 제작한 연자성 분말 코어의 B-H 곡선과 주요 자기적 특성을 나타낸다. 모든 시료는 1 kHz 조건에서 측정하였고, 주요 자기적 특성은 제한한 시스템으로 측정된 B-H 곡선으로부터 산출하였다. 유효 투자율은 식(6)에 따라 측정된 B-H 곡선의 인접한 두 데이터 점 사이의 자속밀도 변화량  $\Delta B$ 와 자계 변화량  $\Delta H$  비로 계산하였다. 각 구간의 기울기를 진공 투자율( $\mu_0$ )로 나누어 유효 투자율을 산출하였으며, 시편 간 비교에는 측정 자계 범위 내에서 계산된 값 중 최대값을 사용하였다. 히스테리시스 루프 면적( $W_h$ )은 측정된 B-H Curve의 한 주기 데이터에 대해 식(8)을 이용한 수치 적분으로 계산하였다.

$$\mu_e = \frac{\Delta B}{\Delta H} \times \frac{1}{\mu_0} \quad (7)$$

$$W_h = \oint B H \, dB \quad (8)$$

미세입자의 혼합 비율이 증가할수록  $B_c$ 은 0.21 T(SMPC-1), 0.35 T(SMPC-2), 0.42 T(SMPC-3), 0.52 T(SMPC-4)로 단계적으로 증가하였다. 보자력  $H_c$ 은 SMPC-1에서 877 A/m로 측정되었으며, SMPC-2와 SMPC-3에서 각각 1,046 A/m, 1,498 A/m로 증가한 후, SMPC-4에서 1,218 A/m로 감소하는 경향을 보였다. 이와 유사하게 히스테리시스 루프의 면적 또한 3,693 J/m<sup>3</sup>(SMPC-1)~8,253 J/m<sup>3</sup>(SMPC-3)까지 증가한 후, SMPC-4에서 7,138 J/m<sup>3</sup>으로 감소하였다. 한편 유효 투자율은 밀도 및 충전율의 변화 경향과 유사하게 나타났으며, 이는 입도 혼합비에 따른 치밀화 수준의 차이가 자기적 특성 변화와 관련될 가능성을 보여준다. 반면, 보자력과 히스테리시스 루프 면적은 혼합 비율 증가에 따라 단조적인 변화를 보이지 않았으며, 이는 입도 혼합에 따른 미세구조 변화가 자화 과정 및 손실 특성에 복합적으로 작용한 결과로 판단된다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 서로 다른 입도를 갖는 철 분말을 단일 및 조합 비율로 적용하여 제작한 연자성 분말 코어(SMPC)의 자기적 특성을 비교·분석하였다. 각 시편의 밀도와 충전율을 평가한 결과, 밀도는 6.34~6.72 g/cm<sup>3</sup>, 충전율은 90.31~95.73% 범위로 확인되었다. B-H 곡선 측정 결과, 잔류자속밀도는

0.21~0.52 T, 보자력은 877~1,498 A/m, 최대 유효 투자율은 220~334, 히스테리시스 루프 면적은 3,693~8,253 J/m<sup>3</sup> 범위에서 변화하였다. 특히 미세 입자 비율이 증가할수록 밀도 및 충전율이 향상되었으며, 이에 따라 잔류자속밀도와 유효투자율이 증가하는 경향을 나타냈다. 반면, 보자력과 히스테리시스 루프 면적은 입도 혼합비에 따라 비단조적인 변화를 나타내었다. 이는 입도 조합이 자화 응답뿐만 아니라 손실 특성에도 복합적인 영향을 미침을 의미한다. 본 연구는 제한된 조건에서 수행되었으므로, 주파수 변화에 따른 철손 특성 및 에폭시 함량 변화가 자기적 특성에 미치는 영향에 대해서는 향후 추가적인 연구가 필요하다. 그럼에도 불구하고, 본 연구 결과는 이중 입도 혼합비가 SMPC의 자기적 특성 변화에 영향을 미치는 중요한 공정 변수임을 확인하였으며, 입도 설계를 통한 자기적 특성 제어 가능성을 제시한다.

#### 감사의 글

This paper was supported by Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT) grant funded by the Korea Government (MOTIE) (RS-2024-00424595/Regional Residency Program for Cultivating Advanced Research Talent in Next-Generation Marine Mobility Industry Innovation), and the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. RS-2024-00391886).

#### References

- [1] H. Shokrollahi and K. Janghorban, *J. Mater. Process. Technol.* **189**, 1 (2007).
- [2] K. J. Sunday and M. L. Taheri, *Metal Powder Rep.* **72**, 425 (2017).
- [3] H. Kim, *J. Korean. Magn. Soc.* **21**, 77 (2011).
- [4] E. Pošković, F. Franchini, L. Ferraris, E. Fracchia, J. Bidulska, F. Carosio, R. Bidulsky, and M. Actis Grande, *Materials* **14**, 6844 (2021).
- [5] E. A. Perigo, B. Weidenfeller, P. Kollar, and J. Fuzer, *Appl. Phys. Rev.* **5**, 031301 (2018).
- [6] C. Liu, G. Lei, T. Wang, Y. Guo, Y. Wang, and J. Zhu, *IEEE Trans. Ind. Electron.* **64**, 1049 (2017).
- [7] E. Pošković, F. Franchini, M. Actis Grande, L. Ferraris, and R. Bidulsky, *Open Eng.* **8**, 368 (2017).
- [8] M. Actis Grande, L. Ferraris, F. Franchini, and E. Pošković, *IEEE Trans. On Ind. Appl.* **54**, 195 (2017).
- [9] E. Pošković, F. Carosio, F. Franchini, and L. Ferraris, 2022 *Int. Conf. on Electrical Machines (ICEM)*, 565 (2022).
- [10] E. Pošković, F. Franchini, and L. Ferraris, *Appl. Sci.* **12**, 8756

- (2022).
- [11] C. H. Lee, S. M. Oh, H. S. Shin, D. H. Yeo, and J. H. Kim, J. Korean. Inst. Electr. Electron. Mater. Eng. **30**, 782 (2017).
- [12] E. Pošković, L. Ferraris, F. Franchini, and M. Actis Grande, AIP Advances **9**, 035224 (2019).
- [13] H. Shokrollahi and K. Janghorban, Mater. Sci. Eng. B. **134**, 41 (2006).
- [14] Z. Zhu, J. Liu, H. Zhao, J. Pang, P. Wang, and J. Zhang, Materials **16**, 1270 (2023).
- [15] T. A. Laxminarayana, S. Kumar Manna, B. G. Fernandes, and N. Venkataramani, Phys Procedia. **75**, 1396 (2015).
- [16] F. Wang, Y. Dong, L. Chang, Y. Pan, Q. Chi, M. Gong, J. Li, A. He, and X. Wang, J. Solid State Chem. **304**, 1226340 (2021).
- [17] Q. Xie, H. Yu, H. Yuan, G. Han, X. Chen, and Z. Liu, Metals **13**, 813 (2023).
- [18] M. Gong, Y. Dong, J. Huang, L. Chang, Y. Pan, F. Wang, A. He, J. Li, X. Liu, and X. Wang, J. Mater. Sci: Mater Electron. **32**, 8829 (2021).
- [19] M. Anhalt, J. Magn. Magn. Mater. **320**, 366 (2008).