

# 연자성 복합체에서 파우더 크기 분포와 Epoxy Resin에 따른 Packing Density 변화

이창현<sup>1,2</sup>, 오세문<sup>3</sup>, 신호순<sup>1,a</sup>, 여동훈<sup>1</sup>, 김진호<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 한국세라믹기술원 나노융합소재센터

<sup>2</sup> 고려대학교 신소재공학과

<sup>3</sup> 경북대학교 재료공학부

## The Variation of Packing Density According to Powder Size Distribution and Epoxy Resin in Soft Magnetic Composite

Chang Hyun Lee<sup>1,2</sup>, Sea Moon Oh<sup>3</sup>, Hyo Soon Shin<sup>1,a</sup>, Dong Hun Yeo<sup>1</sup>, and Jin Ho Kim<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Nano Convergence Materials Center, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Jinju 52851, Korea

<sup>2</sup> Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Seoul 02841, Korea

<sup>3</sup> Department of Materials Science and Engineering, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

(Received October 19, 2017; Revised October 27, 2017; Accepted October 30, 2017)

**Abstract:** There is growing interest in power inductors in which metal soft magnetic powder and epoxy resin are combined. In this field, the process technology for increasing the packing density of magnetic particles in an injection molding process is very important. However, little research has been reported in this regard. In order to improve the packing density, we investigated and compared the sedimentation heights of pastes for three types of soft magnetic alloy powders as a function of the mixing ratios and the type of resin used. Experimental results showed that the packing density was the highest (71.74%) when the mixing ratio was 80 : 16 : 4 (Sendust : Fe-Si : CIP) according to the particle size using an SE-4125 resin. In addition, the packing density was found to be inversely related to the layer separation distance. As a result, it was confirmed that the dispersion of solid particles in the paste was important for curing; however, the duration of the curing process can greatly affect the packing density of the final composite.

**Keywords:** Inductor, Soft magnetic composite, Packing density, Bimodal, Epoxy

### 1. 서론

자동차 산업에 적용되는 몰딩형 파워인덕터는 절연층이 코팅된 ferrite 금속 분말과 epoxy resin을 혼합하여 코일이 삽입된 case 내에 주입하고 가열 경화 과정을

통하여 경화된 hybrid 소재를 활용하는 인덕터이다. 최근 전자기기에서 프로세서의 동작 속도가 빨라지면서 배터리 소모도 증대되고 있어 파워인덕터의 필요성이 더욱 높아지고 있다 [1].

파워인덕터는 고전류화 및 낮은 직류저항 등의 특성이 계속 증가되고 있는 실정이며 [2,3], 다양한 자성소재와 공정기술을 적용하여 개발되고 있다 [4-7]. 이러한 제품은 코일의 형성과 장입 공정, 원료 금속 연자성 분말의 자성특성 향상, 자성 분말 표면의 절연막 코팅 및 분말을 에폭시 resin에 잘 분산하는 공정 등

a. Corresponding author; [hshin@kicet.re.kr](mailto:hshin@kicet.re.kr)

Copyright ©2017 KIEEME. All rights reserved.  
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

의 기술을 필요로 한다. 이들 기술 요소 중 연자성 분말을 에폭시 resin에 잘 분산하는 공정이 최종 제품의 특성 균일성을 좌우하는 핵심기술이다 [8]. 그러나 연자성 복합체의 경우 사용하는 원료 분말의 밀도가 높고 입자 크기가 매우 커서 쉽게 침강하고 epoxy resin은 층 분리가 일어나 제조공정을 확보하기 어려운 점이 많다. 이러한 어려움에도 불구하고 최상의 분산과 최대의 packing의 상태를 확보하기 위한 연구들은 아직 부족한 상황이다.

따라서 본 연구에서는 입도가 다른 3가지 종류의 연자성 금속 파우더를 혼합하여 packing density에 미치는 영향을 관찰하고자 하였으며, 이때 epoxy resin의 종류 및 혼합 비율이 침강 속도 및 packing density에 미치는 영향을 관찰하고자 하였다.

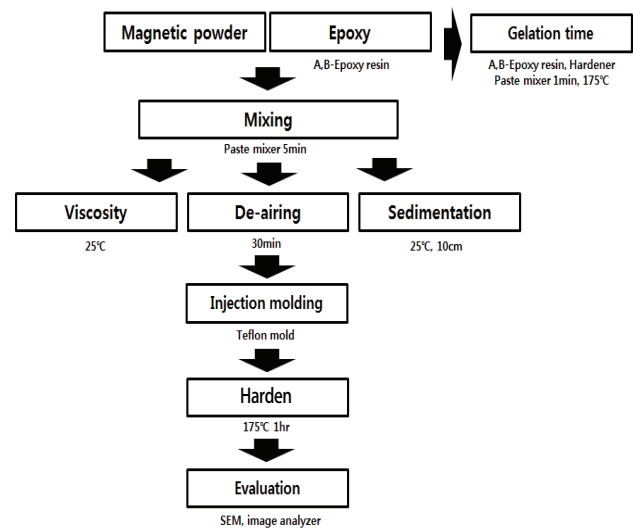
## 2. 실험 방법

연구에 사용된 원료는 연자성 합금분말인 Sendust (Changsung Co. Ltd., Korea)와 Fe-Si계 파우더 (Changsung Co. Ltd., Korea) 그리고 CIP (Carbonyl Iron Powder) (Changsung Co. Ltd., Korea) 3종이다. Epoxy resin은 점도가 다르고 경화 시간이 다른 두 종류의 epoxy로 선정하였다. Epoxy resin은 고점도인 SE-4125 (Shin-A T&C Co. LTD., Korea) (A-resin)과 저점도인 YD-128 (Kukdo Chemical. Co. LTD., Korea)과 PG-207P (Kukdo Chemical. Co. LTD., Korea)를 6 : 4로 혼합한 resin(B-resin)을 사용하였다.

3가지 종류의 연자성 합금분말의 혼합 비율과 샘플의 표기법을 표 1에 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 입도가 가장 큰 Sendust 금속 분말을 기준으로 4가지 혼합비로 실험을 진행하고자 하였다. Sendust 금속 분말 70, 80 vol%를 기준으로 Fe-Si계 분말과 CIP 분말을 1 : 1, 5 : 1 비율로 혼합하여 혼합 비율이 침강 높이 및 packing density에 미치는 영향을 관찰하고자 하였다.

**Table 1.** Mixing ratios of magnetic powders.

Sample No.	Sendust [vol%]	Fe-Si [vol%]	CIP [vol%]
No.7-1	70	15	15
No.7-2		25	5
No.8-1	80	10	10
No.8-2		16	4



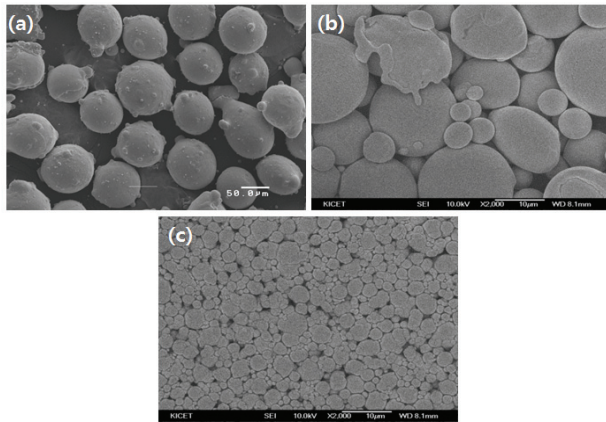
**Fig. 1.** Experimental flow chart.

그림 1은 실험공정을 간략하게 표현한 실험 공정도이다. 두 종류의 epoxy resin을 gelation time tester를 이용하여 175°C 온도에서 gelation time을 측정하였으며, 연자성 합금 분말과 resin의 고형분 함량을 55 vol%에서 70 vol%까지 변화시키며 paste mixer를 이용하여 1,200 rpm의 속도로 5분간 혼합하였다. 이와 같은 방법으로 혼합된 paste의 특성을 평가하기 위하여 점도와 침강 높이를 측정하였으며, 그 후 혼합 과정에서 생성되는 기포를 제거하기 위하여 탈포 공정을 30분간 진행한 후 테프론 몰드에 주입성형하고 175°C에서 1시간 가열 경화하여 몰딩형 인덕터를 제조하였다.

제조한 paste의 점도는 점도계(RVDV2P230, Brookfield, USA)를 이용하여 측정하였으며 원료 분말의 형상과 복합체의 미세구조는 각 복합체의 단면을 절취하고, 정밀하게 polishing한 후, 단면을 전자현미경(JSM 6700F, Jeol, Japan)으로 관찰하였고, 이들 이미지를 이용하여 Image Analyzer (Clemex Vision PE & Lite, Lab & Part Korea Co., Korea) 이미지 분석기법으로 packing density를 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

그림 2는 본 연구에서 사용한 연자성 합금 분말들의 전자 현미경 사진이다. 그림에서 보는 바와 같이 이들은 아토타미징 공정으로 제조된 것으로 전체적으로 구형에 가까운 형상을 나타낸다. 그림 2(a)의 Sendust

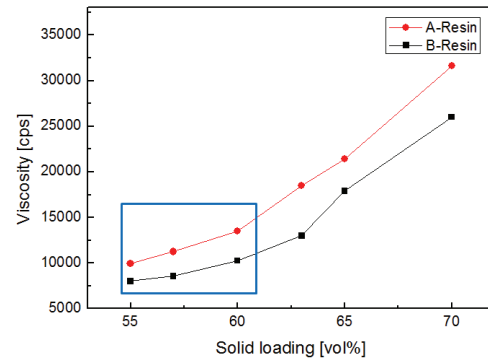


**Fig. 2.** SEM images of magnetic powders (a) sendust, (b) Fe-Si, and (c) CIP.

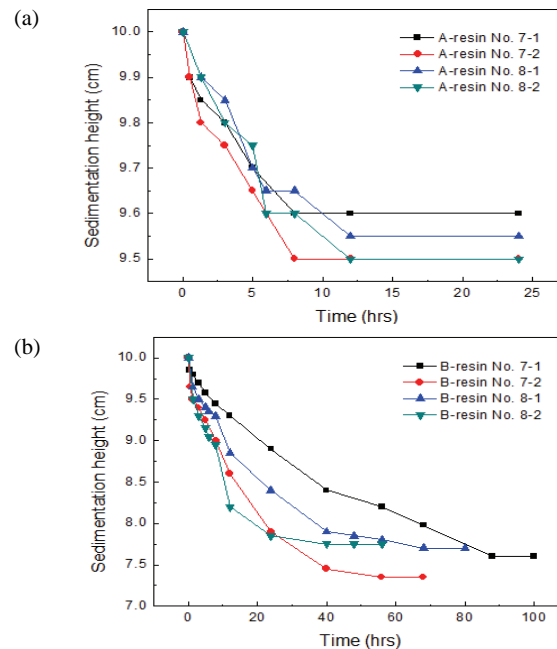
금속 분말은 평균입경이 약 90  $\mu\text{m}$ 이며 입자 크기가 비교적 균일하게 관찰되고, 그림 2(b)는 Fe-Si계 연자성 합금 분말이며 약 10  $\mu\text{m}$ 의 평균입경을 가지고 있으나 작은 입자도 일부 확인할 수 있다. 그림 2(c)는 CIP 원료 분말 약 5  $\mu\text{m}$ 이며 비교적 균일하고 구형에 가깝다. 절연층이 코팅된 연자성 복합체의 경우 자성 특성을 극대화하기 위해 자성 분말의 packing density를 최대화하여야 한다. 본 연구에서는 packing density를 향상시키기 위해 연자성 합금 분말을 3종으로 혼합하여 큰 파우더 사이에 작은 파우더 들이 분포하는 bimodal의 형상을 형성하고자 하였다 [9,10].

그림 3은 Sendust, Fe-Si계 연자성 합금 분말을 7 : 3 부피 비로 혼합 후 두 종류의 epoxy resin과 혼합하여 제조한 paste의 solid loading에 따른 점도를 측정 한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 solid loading이 55 vol%에서 70 vol%로 증가함에 따라 점도 역시 약 10,000 cps에서 30,000 cps로 3배 이상 급격하게 증가하는 경향을 관찰할 수 있었다. 이때, 15,000 cps 이상의 점도에서는 흐름성이 없어 자동주입성형기를 이용한 주입 성형이 불가능하다고 판단하여 solid loading 60 vol%를 기준으로 3종의 연자성 합금 분말의 혼합비에 따른 실험을 진행하였다.

그림 4는 두 종류의 resin에 위 표 1의 비율로 자성 파우더를 각각 혼합한 후 상온에서 유지하면서 시간에 따른 침강 높이를 측정 한 결과이다. 그림 4(a)와 4(b)에서 보는 바와 같이 A-resin을 사용하는 것에 비해 B-resin을 사용하는 것이 혼합 비율에 상관없이 침강 높이가 더 낮은 것을 확인할 수 있다. A-resin은 약 9.5 cm의 높이 부근에서 큰 차이가 없는 데 반하여



**Fig. 3.** Viscosity of slurries with solid loading.



**Fig. 4.** Sedimentation height of slurries (a) A-resin and (b) B-resin.

B-resin은 약 7.5 cm로 약 2 cm의 차이를 보인다. 이는 A-resin에 비해 B-resin에서 분산이 잘 이루어질 수 있음을 의미하며 A-resin에 비해 B-resin의 기울기가 더 큰 것은 그림 3에서 관찰할 수 있듯이 B-resin을 사용하였을 시 paste의 점도가 더 낮아 침강 속도가 빠른 것으로 판단된다. 또한, A-resin의 경우 No.8-2 혼합 조성에서 약간 더 낮은 침강 높이를 보이지만 혼합 조성에 따른 큰 차이가 없는 반면, B-resin의 경우 No.7-2에서 가장 낮은 침강 높이를 나타내었고 이때 충분히 침강이 일어나는 시간은 약 40시간이었다. 그리고 B-resin에서는 가장 입자가 큰

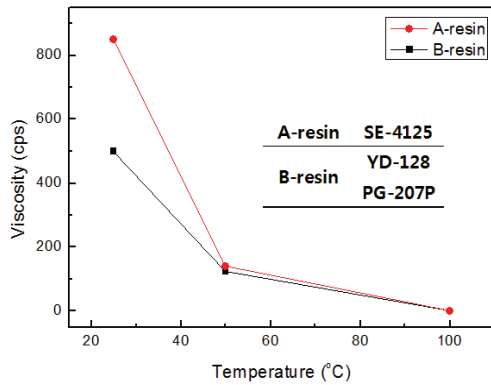


Fig. 5. Viscosity of epoxy resins with temperature.

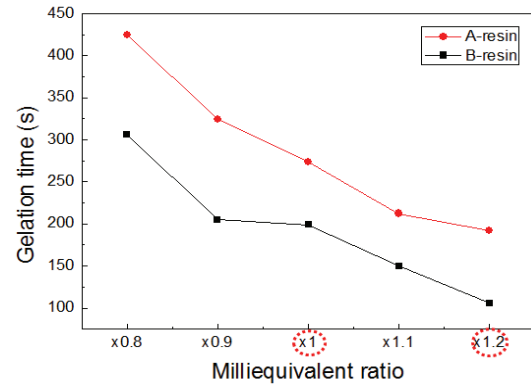


Fig. 6. Gelation time of epoxy resin with milliequivalent ratio.

Sendust 함량이 70 vol%인 경우가 상대적으로 80 vol%에 비하여 침강 높이가 낮았고 Fe-Si 비율이 더 높은 것이 자연 침강 시 packing density에 더 유리한 조건이 된다는 것을 확인할 수 있다.

침강 특성은 epoxy resin의 점도와 연관성이 있을 것으로 판단되며 특히, 경화 공정이 포함되는 주입성형 조건에서는 온도에 따른 resin의 점도 변화가 경화 시에 영향을 줄 수 있다. 그림 5는 본 연구에서 사용하는 두 종류의 resin에 대한 점도를 측정된 것이며 이때 경화제는 각각 당량비로 배합한 후 측정 온도 변화에 따라 점도 변화를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 상온에서 A-resin의 점도는 850 cps의 점도를 나타내었고, B-resin은 500 cps를 나타내어 350 cps의 차이를 나타내었다. 그러나 온도가 증가함에 따라 점도가 급격하게 낮아져 50°C 이상의 온도에서는 두 resin 간의 점도가 비슷하게 나타남을 관찰할 수 있었다. Epoxy resin은 열경화성 수지로 온도가 증가함에 따라 resin의 분자 활동이 활발해짐에 따라 resin의 고유 점도대역에서 벗어난 낮은 점도를 나타내며, 경화가 진행되면 가교반응이 진행되어 점도가 급격히 상승하는 방향으로 이동하게 된다 [11]. 실험에 사용한 resin의 경우도 100°C까지 측정 결과는 점도가 낮아져 두 resin의 점도 차이가 없는 것을 확인할 수 있었다.

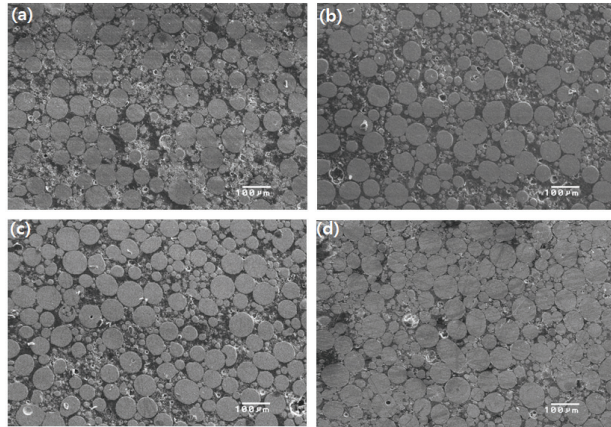
밀도와 입도가 큰 금속 분말을 사용하기 때문에 경화 과정에서도 침강이 일어날 수밖에 없는데 침강은 epoxy resin의 경화 시간에도 많은 영향을 받을 수 있다. 그림 6은 두 종류의 epoxy resin을 각각 경화제를 비율에 따라 혼합 후 175°C에서 경화시키는 데 소요되는 시간을 gelation time 측정을 통하여 비교한 결과이다. 경화제의 비율이 증가함에 따라 gelation time이 감소하는 경향을 보였으며 전체적으로 A-resin보다 B-resin의

Table 2. Separation and area percent with paste composition.

Composition	Separation [%]	Area percent [%]	
A-resin	No.7-1	5.3	61.23
	No.7-2	9.8	62.82
	No.8-1	9.3	68.28
	No.8-2	13.5	71.74
B-resin	No.7-1	4.8	55.32
	No.7-2	8.7	58.75
	No.8-1	8.8	62.25
	No.8-2	10.8	68.35

gelation time이 짧은 것을 관찰할 수 있었다. 위의 결과로 B-resin을 사용 할 경우 A-resin을 사용하는 것보다 경화 시 액상으로 유지되는 시간이 줄어들 것이라 판단하였다.

표 2는 두 종류의 resin에 위의 표 1의 비율로 각각 혼합한 paste를 175°C에서 1시간 경화한 몰딩형 인덕터의 단면을 절취한 후, 자성 입자와 epoxy resin 사이의 층 분리가 일어난 것을 관찰하고, 단면에서 평균적인 층 분리 비율 및 연자성 합금 분말의 복합체에서 packing density라 할 수 있는 area percent를 각각 나타내었다. A-resin을 사용하는 것보다 B-resin을 사용하는 것이 전체적으로 층 분리가 적게 일어난 것을 관찰하였다. 이는 위의 그림 6의 결과에서 볼 수 있듯이 B-resin이 A-resin에 비하여 경화속도가 상대적으로 빨라 침강에 주어지는 시간이 더 짧기 때문이며, 침강에 영향을 줄 수 있는 점도 또한 그림 5의 결과에 비추어 볼 때 경화 온도에서는 두 resin에서 큰 차이가 없을 것으로 예상되기 때문이다. 또한 B-resin을 이용



**Fig. 7.** Cross section images of composites according to the mixing ratio of magnetic powder using A-resin; (a) No.7-1, (b) No.7-2, (c) No.8-1, and (d) No.8-2.

하여 No.7-1 조성을 혼합한 것이 약 4.8%로 가장 적은 층 분리 현상을 나타내었다. 층 분리가 많이 일어날수록 area percent 또한 증가하는 경향을 관찰할 수 있었다. 이는 층 분리가 진행될수록 상층부에 단일 epoxy resin 층이 형성되고 그로 인하여 하층부에 연자성 합금 분말 분율이 상대적으로 증가되기 때문에 나타난 경향이라 판단된다. 이 결과는 그림 4의 결과와 비교하여 볼 때 packing density가 자연 침강에서 분산성이 우수하여 침강 높이가 낮은 조건과 큰 상관성이 없이 층 분기한 packing이 일어날 수 있는 경화 시간을 확보하는 것이 더 중요할 수 있다는 것을 보여준다. 즉, 윗면에 층 분리가 일어나면서 자연 침강에 가까운 형태의 침강 현상이 일어날 경우 복합체 내부의 packing density는 오히려 증가하지만 표면에 epoxy resin의 분리 층의 생성은 피할 수 없다.

그림 7은 A-resin과 Sendust, Fe-Si 그리고 CIP 분말을 표 1에서 제시한 각각의 혼합 비율로 혼합하여 175°C의 온도로 경화한 후 관찰한 단면 미세구조 사진이다. 그림 7(a)의 70:15:15의 비율로 혼합한 것과 그림 7(b)의 70:25:5의 비율로 혼합한 것이 비슷한 packing 상태를 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. 그리고 그림 7(c)와 그림 7(d)의 경우 그림 7(a)와 그림 7(b)에 비하여 상대적으로 높은 packing density를 나타낼 것으로 예상되고 이들의 packing density는 표 2에서 제시한 바 있다. 이것은 입도가 큰 Sendust 분말의 비율이 상대적으로 높기 때문에 이 분말의 침강 속도가 입도가 작은 분말들에 비해 더 빠르기 때문에 경화 과정에서 침강이 더 많이 일어나고 그 결과

packing density에 영향을 준 것으로 판단된다. 또한, B-resin을 사용한 경우에도 비슷한 경향이 나타났고 이것은 표 2의 resin에 따른 층 분리 현상을 관찰한 결과와 비교적 잘 일치하였다.

#### 4. 결론

세 종류의 연자성 합금 분말을 두 종류의 epoxy resin에 각각 혼합하여 분말의 혼합 비율이 packing density에 미치는 영향을 관찰하고자 하였다. 그 결과 침강 높이의 경우 A-resin에 비하여 B-resin을 사용하였을 시 더 낮아 연자성 합금 분말이 A-resin보다 B-resin에 비교적 분산이 잘 된다는 것을 확인하였다. 하지만 경화 후 측정된 area percent는 B-resin보다 A-resin이 상대적으로 높게 측정되었다. 이는 epoxy resin의 경화 시간이 긴 A-resin의 경우 층 분리 현상이 충분히 일어나 입자들이 packing될 수 있는 조건이 주어졌기 때문이다. 경화 공정을 포함하는 epoxy resin을 사용한 paste의 경우 paste 상태에서 고상입자의 분산성 이상으로 경과 공정에서의 경화 시간이 최종 복합체의 packing에 영향을 크게 미칠 수 있음을 확인하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 중소기업청/산업기술혁신사업(World Class 300 프로젝트 R&D)의 지원으로 수행되었음(과제번호: 10050459).

#### REFERENCES

- [1] T. Tokuoka, T. Ishimine, T. Maeda, and K. Matsunuma, *J. Jpn. Soc. Powder Powder Metall.*, **60**, 108 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.2497/jjspm.60.108>]
- [2] J. Mürbe and J. Töpfer, *J. Electroceram.*, **15**, 215 (2005). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s10832-005-3278-8>]
- [3] H. Su, H. Zhang, X. Tang, L. Jia, and Q. Wen, *Mater. Sci. Eng. B*, **129**, 172 (2006). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2006.01.008>]
- [4] S. Y. An, I. S. Kim, S. H. Son, S. Y. Song, J. W. Hahn, and K. R. Choi, *J. Korean Magn. Soc.*, **20**, 182 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.4283/JKMS.2010.20.5.182>]

- [5] W. Y. Jeung, H. K. Kim, and J. O. Lee, *J. Korean Magn. Soc.*, **15**, 241 (2005). [DOI: <https://doi.org/10.4283/JKMS.2005.15.4.241>]
- [6] H. Shokrollahi and K. Janghorban, *J. Mater. Process. Technol.*, **189**, 1 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.02.034>]
- [7] L. Huang, Z. H. Yuan, B. S. Tao, C. H. Wan, P. Guo, Q. T. Zhang, L. Yin, J. F. Feng, T. Nakano, H. Naganuma, H. F. Liu, Y. Yan, and X. F. Han, *J. Appl. Phys.*, **122**, 113903 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4990478>]
- [8] J. W. Han, B. K. Kim, and H. J. Je, *Korean J. Mater. Res.*, **18**, 542 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.3740/MRSK.2008.18.10.542>]
- [9] H.J.H. Brouwers, *Phys. Rev. E*, **87**, 032202 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.87.032202>]
- [10] B. V. Velamakanni and F. F. Lange, *J. Am. Ceram. Soc.*, **74**, 166 (1991). [DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1991.tb07313.x>]
- [11] H. Y. Na, B. C. Yoon, S. H. Kim, and S. J. Lee, *Elastomers Compos.*, **48**, 133 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.7473/EC.2013.48.2.133>]