

## Sub-millimeter 두께 NdFeB 이방성 영구자석 제조 및 자기적 특성

한국표준과학연구원 김형태\*, 손장석, 이상화, 김윤배  
 RRC Kurchatov Institute G.A. Kapustin  
 전북대학교 신소재공학부 김학신

### Magnetic Properties of Anisotropic NdFeB Magnets with Sub-millimeter Thickness

KRISS H.T. Kim\*, J.S. Son, S.H. Lee, Y.B. Kim  
 RRC Kurchatov Institute G.A. Kapustin  
 Chonbuk National Univ. H.S. Kim

#### 1. 서론

열간가공법에 의해 제조된 NdFeB 영구자석은 나노결정립으로 구성되어 있기 때문에 고보자력 특성을 얻을 수 있으며 내부식성이 우수한 장점을 지니고 있다. 고성능 NdFeB 자석은 각종 전자자기기의 소형화에 적합한 소재로서 인식되고 있으나, 작은 크기를 갖는 자석은 제조 후 가공단계를 거쳐 사용될 수 있다. 열간가공법은 집합조직을 갖는 이방성 자석을 얇게 제조할 수 있는 효과적인 방법일 수 있다[1]. 열간소성변형으로 인하여 등방성 구조가 이방성 조직으로 성장하는 과정에서 형성되는 집합조직(texture)의 정렬도(degree of alignment)가 클수록 고에너지를 얻을 수 있으며, 등방성 전구체(precursor)의 변형률과 밀접한 관계가 있다. 최근에 통전가압방식을 적용한 열간가공법으로 자기특성이 우수한 나노결정형 NdFeB 자석을 제조할 수 있는 공정에 대한 연구가 진행되고 있다 [2]. 본 연구에서는 통전가압공정에 의해 밀리미터 이하의 두께로 제조된 이방성 NdFeB 영구자석의 자기적 특성 및 미세조직 변화를 관찰하였다.

#### 2. 실험방법

본 실험에 사용된 초기본말은 미국 GM社에서 상용적으로 시판되고 있는 Nd<sub>14</sub>Fe<sub>80</sub>B<sub>6</sub>(MQPA) 와 Nd<sub>12</sub>Dy<sub>2</sub>Fe<sub>73.2</sub>Co<sub>6.6</sub>Ga<sub>0.6</sub>B<sub>5.6</sub>(MQGU) 이다. 이방성 NdFeB 영구자석을 제조하는 통전가압공정은 CA-press 공정과 CA-deformation 공정으로 이루어져 있으며, 자세한 실험방법은 기 발표된 논문에서 상세히 기술되어 있다 [2]. 직경이 20 mm 인 그라파이트 몰드에 분말 20 g 과 15 g을 장입하여 CA-press 공정에 의해 각각 직경이 20 mm 이고 두께(t)가 8 mm 및 4 mm 인 등방성 자석을 제조하였다. t가 8 mm인 시편의 1/4 조각을 CA-deformation 공정에 의해 변형률(TR)이 70 % 로 가공된 이방성 자석을 제조하였으며, 이 경우 최종적으로 얻어진 두께는 2500 μm이다. 변형률은  $(l_0 - l)/l_0$  로 정의되며,  $l_0$  및  $l$  은 각각 변형전 과 변형후의 t 이다. t가 4 mm인 시편은 직경 7 mm로 가공한 후 CA-deformation 공정에 의해 최대한 변형시켰다. Nd<sub>14</sub>Fe<sub>80</sub>B<sub>6</sub> 전구체 78 %, Nd<sub>12</sub>Dy<sub>2</sub>Fe<sub>73.2</sub>Co<sub>6.6</sub>Ga<sub>0.6</sub>B<sub>5.6</sub> 전구체는 81 % 의 변형률이 얻어졌으며, 최종적으로 얻어진 두께는 각각 900 μm 및 780 μm 이다. 제조된 시편의 자기적 특성은 펄스마그네토미터에 의해 약 80 kOe의 최대인 가자장 영역에서 얻어진 자기이력곡선으로부터 계산하였으며, 미세조직은 전계주사현미경(Field emission scanning electron microscope)으로 관찰하였다.

#### 3. 결과 및 고찰

표 1은 Nd<sub>14</sub>Fe<sub>80</sub>B<sub>6</sub> 및 Nd<sub>12</sub>Dy<sub>2</sub>Fe<sub>73.2</sub>Co<sub>6.6</sub>Ga<sub>0.6</sub>B<sub>5.6</sub> 등방성 전구체 및 이방성 자석의 자기적 특성을 비교하여 나타낸 것이다. Sub-millimeter t 를 갖는 자석(TNM)의 TR 이 millimeter 이상의 t 를 갖는 자석(TKM)의 TR 보다 크에도 불구하고 자기특성은 떨어지고 있음을 알 수 있다. 모든 시편에서 TNM 보다 TKM 의 잔류자화( $B_r$ )와 보자력( $H_c$ )이 크고 이로 인하여 최대자기에너지적( $BH_{max}$ )또한 상대적으로 크게 얻어지고 있으며. 이러한 경향은 상대적으로 Nd<sub>14</sub>Fe<sub>80</sub>B<sub>6</sub> 자석에서 더욱 뚜렷이 나타나고 있다. 자화곡선 외삽법[3]을 이용하여 구한 Nd<sub>14</sub>Fe<sub>80</sub>B<sub>6</sub> TNM 과 TKM의 불일치 경각(misorientation angle,  $\theta$ ) 차이는 8.9 ° 로 TNM 의 c축 정렬도가 TKM 보다 낮음을 알 수 있으며, TNM 의  $B_r$ 이 낮게 얻어지는 원인으로 생각된다.

FESEM 으로 관찰한  $Nd_{14}Fe_{80}B_6$  TNM 의 미세조직상에는 직경이 3-5  $\mu m$  크기의 조대한  $Nd_2Fe_{14}B$  결정립들이 무정렬(Non-aligned) 상태로 많이 분포하고 있으나,  $Nd_{12}Dy_2Fe_{73.2}Co_{6.6}Ga_{0.6}B_{5.6}$  TNM 의 경우 이러한 조대한 결정립은 관찰되지 않았으며 직경이 50-100 nm 임을 확인할 수 있었다. 모든 전구체의 결정립 크기가 50-100 nm 인 점을 감안할 때, 이러한  $Nd_{14}Fe_{80}B_6$  TNM 의 조대 결정립은 소성변형중에 등축적인 결정립 성장으로 인하여 형성된 것이며,  $B_r$  및  $iH_c$  를 저하시키는 직접적인 요인으로 작용한 것으로 추측된다. 반면  $Nd_{12}Dy_2Fe_{73.2}Co_{6.6}Ga_{0.6}B_{5.6}$  전구체의 비이상적 결정립 성장이 억제된 것은 Ga 의 영향인 것으로 사료된다 [4].

그림 1은  $Nd_{14}Fe_{80}B_6$  및  $Nd_{12}Dy_2Fe_{73.2}Co_{6.6}Ga_{0.6}B_{5.6}$  분말로부터 제조된 등방성 전구체 및 이방성 자석의 자기이력곡선을 나타낸 것이다. TNM 과 전구체의  $iH_c$ 를 비교해 보면,  $Nd_{14}Fe_{80}B_6$  TNM 은 전구체의 60 % 가 저하한 반면,  $Nd_{12}Dy_2Fe_{73.2}Co_{6.6}Ga_{0.6}B_{5.6}$  TNM 의  $iH_c$  저하는 35 % 에 불과하고, 각 형성 또한 우수한 것을 알 수 있다. 본 실험에서 얻은 TNM 의 최적 자기특성은 780  $\mu m$   $Nd_{12}Dy_2Fe_{73.2}Co_{6.6}Ga_{0.6}B_{5.6}$  자석의 경우  $B_r = 12.4$  kG,  $iH_c = 16.4$  kOe,  $BH_{max} = 37.1$  MGOe 이며, 900  $\mu m$  인  $Nd_{14}Fe_{80}B_6$  의 경우는  $B_r = 12.6$  kG,  $iH_c = 6.6$  kOe, and  $(BH)_{max} = 30.9$  MGOe 이다.

#### 4. 참고문헌

- [1] R.W. Lee, Appl. Phys. Lett. 46, 790(1985).
- [2] H.T. Kim, Y.B. Kim and H.S. Kim, J. Magn. Magn. Mater. 224, 173(2001).
- [3] Y.B. Kim, Jin Han-Min, J. Magn. Magn. Mater., 169, 114(1997).
- [4] M. Tokugawa, Y. Nozawa, K. Lwazaki, M. Endoh, S. Tanigawa, H. Harada, IEEE Trans. Magn. MAG-25, 3561(1989).

Table 1. The comparison of  $Nd_{14}Fe_{80}B_6$  (MQPA) and  $Nd_{12}Dy_2Fe_{73.2}Co_{6.6}Ga_{0.6}B_{5.6}$  (MQUG)) magnets.

powder	type	t( $\mu m$ )	TR(%)	$\theta$ (deg.)	$iH_c$ (kOe)	$B_r$ (kG)	$BH_{max}$ (MGOe)
MQPA	TKM	2500	70	12.1	10	13.6	43.4
	TNM	900	78	21.2	6.6	12.6	30.9
MQUG	TKM	2500	70	-	18.3	13.1	41.8
	TNM	780	81	14.6	16.4	12.4	37.1

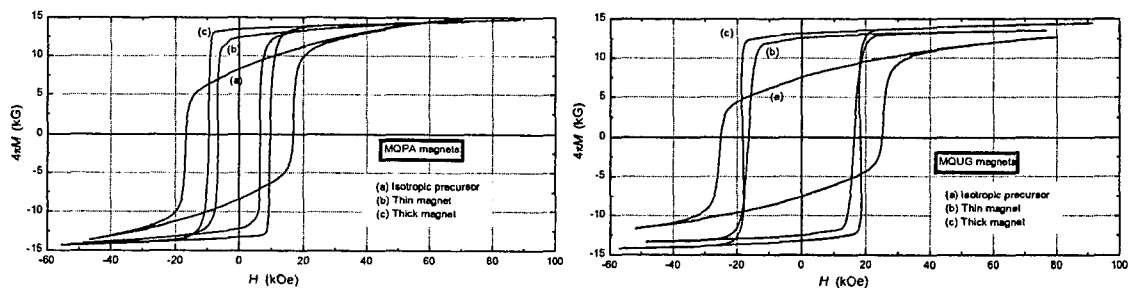


Fig. 1 Magnetic hysteresis curves of the isotropic precursors and textured anisotropic magnets obtained from MQPA and MQUG powders, respectively.