

사출성형용 Nylon 6계 Nd-Fe-Co-Zr-B 펠렛의 자기특성

최승덕·이우영·양충진

산업과학기술연구소, 신소재부문, 자성재료분야

P.O.Box 135, 포항

(1993년 1월 20일 받음)

급속냉각기술로 제조된 $Nd_{10.5}Fe_{79}Co_2Zr_{1.5}B_7$ 합금분말을 사용하여 사출성형용 자성 펠렛을 제조하였다. 입도분포가 다른 두 종류의 분말($38\sim 75\mu m$ 및 $75\sim 50\mu m$)을 사용하여 열가소성(Nylon 6) 펠렛을 제조한 후 자성분말의 임계분율(critical volume fraction)을 결정하고 수지자석의 성형밀도에 따른 자기특성을 고찰하였다. Nylon 6 수지를 사용한 Nd-Fe-Co-Zr-B계 펠렛은 분말입도가 $38\sim 75\mu m$ 인 경우 임계 부피분율은 70%로 나타났고, 그때의 성형밀도는 이론밀도의 90%를 상회 했으나 $75\sim 150\mu m$ 분말의 경우는 같은 분율에서 이론밀도의 87% 수준에 머물렀다. 최적의 자기특성은 분말에 윤활제로서 silicone oil만을 0.5 wt. % 첨가한 경우이며 이때의 자기특성으로, $(BH)_{max}=5.2$ MGOe, $B_r=5.1$ kG 그리고 $H_c=8.8$ kOe의 높은 수준을 보였다. Nylon 6수지자석의 성형밀도를 예측할 수 있는 경험식으로서, $\rho(g/cm^3)=1.1+K\cdot V_s$ 을 얻었으며 $K(5.3\sim 5.6)$ 는 자성분말 입도에 따른 기울기 상수이고 V_s 는 분말의 부피분율이다.

I. 서 론

급속냉각기술로 제조된 분말을 사용하여 수지자석을 만드는 방법으로는 두가지로 대별된다. 첫째는 열경화성수지(thermo-setting)를 사용하는 압축성형식(compression molding)이 있고 둘째는 열가소성수지(thermo-plastic)와 혼합하여 만든 펠렛을 사출(injection molding)에 의해 성형하는 방법이 있다. 최근에 개발된 $Nd_2Fe_{14}B$ 자성상을 근간으로 하는 합금의 급냉분말을 사용하는 희토류계 수지자석(bonded magnet)의 제조 방법은 주로 know-how로 되어 있어, 일반 학술지나 기술지에 발표된 것이 거의 없으나 Ref.[1]과 [2]에 압축성형식 수지자석의 자기특성이 사용된 분말의 특성 및 합금조성에 따라 잘 분석되고 있다.

본 연구 보고서는 축출용회전식 급속냉각기술[3]에 의해 제조한 Nd-Fe-Co-Zr-B계 분말을 사용하여 사출성형식 수지자석의 출발원료로 쓰이는 펠렛의 자기특성을 최적화 하기위해 자성분말의 임계분율 및 밀도를 극대화 하기 위한 논리를 정립하는 연구 결과이다.

수지바인더와 자성분말을 혼합한 분말의 이론밀도(ρ_m)는 사용된 분말과 바인더의 무게 또는 부피분율에 비례 할 것이다. 이때 펠렛내에 기공(pore)이 없다고 가정하면, 펠렛의 이론밀도(ρ_{th})와 바인더의 이론밀도(ρ_b)사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$1/\rho_{th} = f_m / \rho_m + f_b / \rho_b \quad (1)$$

$$f_m = 1 - f_b \quad (2)$$

$$1/\rho_{th} = 1/\rho_b + f_m(1/\rho_m - 1/\rho_b) \quad (3)$$

여기서 f_m 및 f_b 는 각각 분말과 바인더의 무게분율이다. 실제로 분말에 바인더가 혼합되지 않은 상태에서 ($f_m = 1$)는 실험적으로 얻어지는 tap density(ρ_t)가 분말의 부피(V_m)와 무게(W_m)를 결정지어 준다[4]. 즉, $\rho_t = W_m / V_m$ 이다. 펠렛이 형성되는 과정에서는 바인더가 먼저 기공자리를 차지하면서 펠렛의 무게를 증가시키게 될 것이다. 펠렛의 부피를 변화시키지 않고 바인더가 모든 기공을 메웠다고 가정할 때, 사용된 분말과 바인더의 무게로 부터는 :

$$\rho_{th} = (W_m + W_b) / V_m = (W_m + W_b) / (W_m / \rho_t) \quad (4)$$

II. 자성분말의 밀도와 펠렛의 분율

여기서 W_b 는 바인더의 무게이다. 한편 $(W_m + W_b) / W_m = f_m$ 이므로

$$\frac{1}{\rho_{th}} = \frac{f_m}{\rho_t} \quad (5)$$

가 된다. 식(3)과 (5)를 같다고 할때 펠렛의 임계 무게분율이 결정될 수가 있고 이때의 f_m 은 f_{cr} 이 된다[5]. 결국 사용된 재료의 무게나 부피를 실측하지 않고도 측정된 tap density와 이론밀도를 가지고 임계분율을 예측할 수가 있다. 즉,

$$f_{cr} = \frac{1/\rho_b}{1/\rho_t + 1/\rho_b + 1/\rho_m} \quad (6)$$

식(6)을 다시 정리하면 분말의 부피분율(V_{cr})을 결정할 수 있으며 그 관계는 간단히

$$V_{cr} = \rho_t / \rho_m \quad (7)$$

가 된다. 여기서 ρ_m 은 분말의 이론밀도로 사용하였으나 실제로는 pycnometer 실측치로 대체할 수 있으며[5] 이는 급냉분말에 기공이 전혀 없다는 전제하에 가능하다.

III. 실험방법

사용된 합금조성은 $Nd_{10.5}Fe_{79}Co_2Zr_{1.5}B_7$ 이었으며 축출용회전법에 의해 급속냉각제조되었다[3]. 급냉분말은 700℃ /30min 으로 진공중 열처리를 행하여 최적의 자기특성을 부여하였다. 원하는 분말입도는 분말을 기계적 교반기 (attritor)에서 액체중(hexane) 분쇄한 후 38~75 μm 와 75~150 μm 범위로 분류하였다. 수지 바인더로는 nylon 6 (Kolon사 제품)을 쓰고 케플링제로 silane계인 A-1100(Union Carbide사 제품)과 titanate계인 KR 38S (Kenrich사 제품), 그리고 윤활제로서 silicone oil인 KF 96(Shinetsu사 제품)와 stearic acid(Aldrich사 제품)를 사용하였다. 펠렛은 kneader (Kurimoto KRC S-1)를 사용하여 수지분말과 자성분말을 원하는 조성인 73.5~93.8 wt.% 로 섞은 후 단일 투입구(feeder)로 공급하였다. 수지자석은 제조된 펠렛을 프레스를 사용하여 8 ton/cm² 의 수직압력으로 열간압축 성형하였다.

펠렛 및 수지자석의 자기특성은 진동시료형 자력계 (VSM-5, Toei 사)와 히스테리시스 측정기 (B-H loop tracer, LDJ 사)로 측정하고 인가자장은 각각 16kOe 및

19kOe였으므로 본 연구에서 측정된 자기특성은 실제값보다 다소 낮은 값이라 할 수 있다. 시료의 tap density는 ASTM B 527-81, 성형밀도는 ASTM D 792, 경도는 ASTM D 785에 의거하여 측정되었다.

IV. 실험결과 및 고찰

1. 분말함량에 따른 수지자석의 자기특성 및 기계적특성 Nylon 6계 $Nd_{10.5}Fe_{79}Co_2Zr_{1.5}B_7$ 펠렛을 프레스 성형

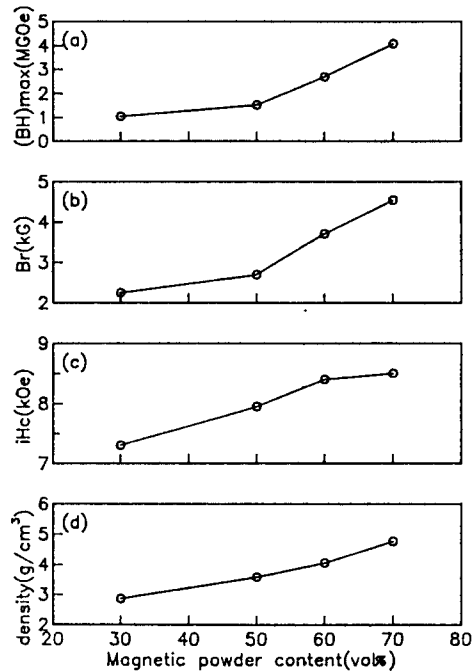


Fig. 1. Magnetic properties and density of nylon 6 bonded magnets made from 75~150 μm powders as a function of volume of the powders.

하여 그 자기특성을 그림 1에 나타내었다. 사용된 분말입도는 75~150 μm 이다. 자석시편은 수지바인더와 자성분말만을 혼합하였으며 첨가제 (coupling agent), 윤활제는 사용하지 않았다. 그러므로 자성분말의 부피분율에 따른 자기특성을 정확히 알 수가 있다. 수지자석의 고유보자력 (H_c)은 성형밀도에 비례하여 점진적으로 증가함을 알 수 있다. 그러나 잔류자속밀도 (B_r)과 그에 따른 최대자기에너지적, $(BH)_{max}$ 는 자성분말의 부피분율 50%까지는 자기특성이 크게 향상되지 않다가 그 이상에서는 급격히 증가한다. 대체로 성형밀도의 증가추세와 자기특성의 향

상은 일치하는 것으로 나타났다. 그러나 수지자석에 자기 특성 향상에 도움이 큰 첨가제를 함유하지 않았기 때문에 최대자기에너지적은 분말함유량 70%에서 4.2 MGOe로 비교적 낮은 값을 보인다. 이때의 성형밀도는 최고 5.0 g/cm³이다.

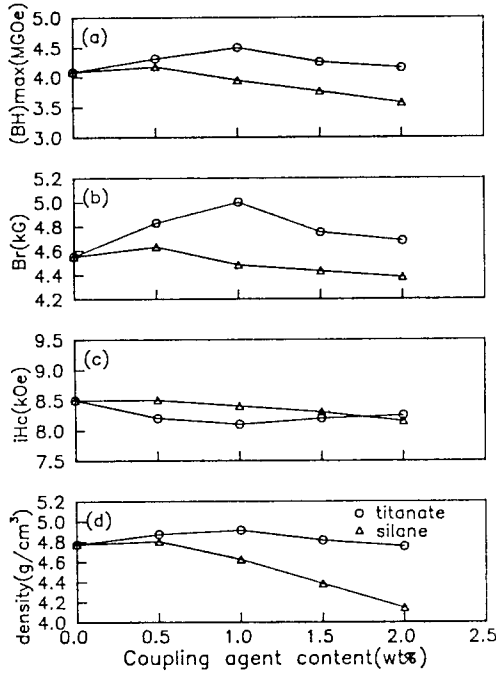


Fig. 2. Magnetic properties and density of nylon 6 bonded magnets made from 75-150 μm powders as a function of weight of the coupling agent, (magnetic powder : nylon 6 = 93.8 wt.% : 6.2 wt.%)

그림 2에는 그림 1에서 사용한 수지자석에 coupling agent의 효과를 보기 위해 titanate 및 silane계를 전체 자석무게의 0~2 wt.%를 첨가한 시편의 자기특성이다. 이 때 자성분말의 무게분율은 93.8 wt.%였다. Titanate계 커플링제를 사용한 경우 보자력을 제외한 자기특성 및 성형밀도는 점진적으로 증가하여 1 wt.%에서 최대치를 보이다가 그 이상에서 비자성인 수지가 증가함으로 자기특성의 감소가 수반된다. 보자력은 대체로 커플링제의 첨가에 따라 점차 감소한다. 여기서 특이할 사항은 압축성형식 수지자석의 경우와는 역으로 silane계 커플링은 자기특성에 역효과를 보이고 있는 것이다. Compression molding에 의한 수지자석 제조에는 silane계가 기계적 특성 및 자기특성에 모두 유리하였고 0.5 wt.%에서 최

적의 특성을 보였으나[6], 사출성형식 수지자석에서는 반대로 titanate계가 오히려 자기특성에 유리함을 알 수 있다. 그림 2(b)에서 보이듯이 titanate coupling계 1 wt.%를 첨가하여 B_r은 5.0 kG로 증가하였다. 마찬가지로 자기특성의 변화는 보자력을 제외하고는 성형밀도의 증가추세에 비례함을 알 수 있다. Titanate 계통의 커플링제는 무기질 표면에 단일 유기분자층을 형성하여 자성분말과는 계면에서 자유 proton이 균일한 반응을 하게되어 접착력 증진, 점도의 감소, 긴 탄소사슬의 형성에 따른 열가소성 수지의 내충격성과 윤활성을 개선해 준다[7].

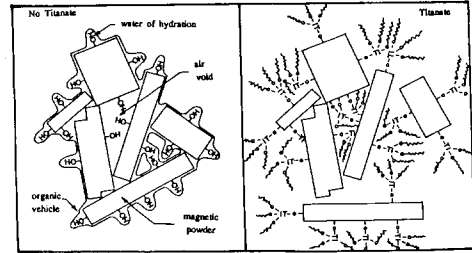


Fig. 3. Schematic illustrations of the role of the titanate coupling agent.

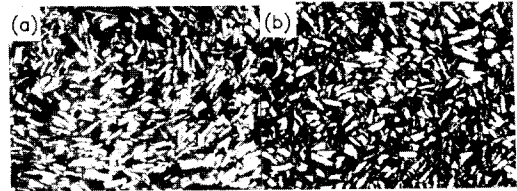


Photo. 1. Optical microstructures of the nylon 6 bonded magnet for (a) the magnets of non titanate-coupled and for (b) titanate-coupled.

그림 3에 titanate계 커플링제의 역할을 도식화하였으며 사진 1에는 실제 수지자석의 미세조직을 보여준다. 사진 1(a)에서 자성분말은 흰색, 수지는 회색, 그리고 기공(void)은 검은 반점형으로 나타난다. 사진 1(b)의 자석은 0.5 wt.% titanate를 함유한 것이며 사진 1(a)는 커플링제를 첨가하지 않은 자석이다. 논한 바와 같이 첨가 여부에 따라 동일한 kneading 시간에서 기공의 함유량이 확실히 보여진다(사진 1(b)에서는 기공이 거의 보이지 않음).

그림 4에는 수지자석의 자기특성을 향상시키기 위한 방법으로 다양한 첨가제를 사용한 경우의 결과를 보여준다. 수지자석의 자기특성과 더불어 기계적 특성을 동시에 향상시키기 위해 커플링제를 윤활제와 더불어 사용하지만 각 첨가제의 조합에 따라 특성이 다를 수 있다. 보자

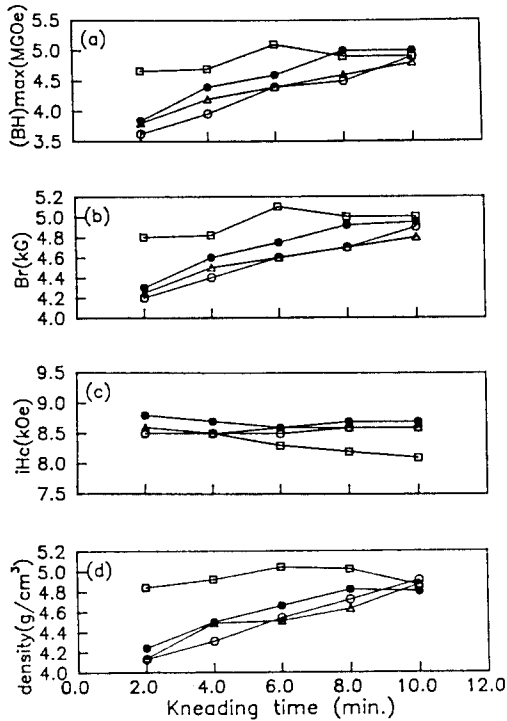


Fig. 4. Magnetic properties and density of nylon 6 bonded magnets made from 38 ~ 75 μ m powders as a function of kneading time. (magnetic powder : nylon 6=93.8 wt.%, 6.2 wt.%)
 ○ 0.5 wt.% titanate, □ 0.5 wt.% silicone oil
 △ 0.5 wt.% titanate + 0.5 wt.% silicone - oil
 ● 0.5 wt.% ti + 0.5 wt.% si-oil + 0.3 wt.% stearic acid

력을 제외한 모든 자기특성은 성형밀도의 변화에 비례한다. 그림 4(d)에 보이듯이 커플링제 단독으로 첨가하는 것 보다는 윤활제를 동시에 사용하는 것이 밀도향상에 효과가 있음을 알 수 있다. 더구나 본 연구에서 알 수 있었던 것은 윤활제로서 silicone oil 과 stearic acid를 같이 사용하는 것이 모든 자기특성에 효과적이었다. 사출성형식 자석의 자기특성을 사용한 펠렛의 성형시간(kneading time)에 따른 함수로 측정할 때 8분까지는 모든 특성이 증가하다가 그 이후로는 포화상태에 다달아 펠렛제조에는 최소한 8분 이상의 kneading이 소요됨을 알 수 있다.

다만 수지자석의 기계적 특성을 동시에 고려한다면 커플링제를 사용하지 않고 윤활제로서 단지 silicone oil 5 wt.% 만을 첨가하는 것이 잔류자속밀도 및 최대자기

에너지적에 유리함이 밝혀졌다(그림 4(a)). 펠렛의 kneading 시간이 6분 이상이 되면 최대 자기에너지적, $(BH)_{max} = 5.2$ MGOe의 값을 얻게된다. 첨가제로서 silicone oil만을 투입한 것은 kneading시간에 관계없이 높은 밀도와 더불어 자기특성(최대에너지적 및 잔류자화)이 높은 것으로 보아 초기부터 윤활이 원만하게 진행되지만 커플링제 및 윤활제를 동시 첨가할 때는 커플링제의 고점도성 때문에 포화특성에 달하는 시간을 요하게 된다.

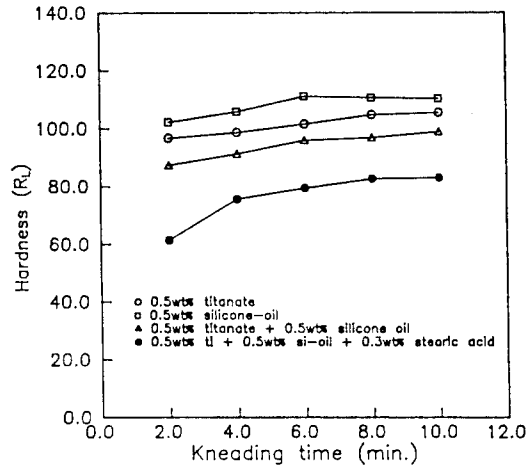


Fig. 5. Hardness variations of nylon 6 bonded magnets made from 38 ~ 75 μ m powders as a function of kneading time (magnetic powder : nylon 6 = 93.8 wt.%, 6.2 wt.%).

Nylon 6 수지자석의 기계적특성을 고려하여 그림 5에 자석의 경도변화를 첨가제에 따라 측정하였다. 그리고 그 변화를 사용한 펠렛의 kneading시간의 함수로 정리하였다. 그림 4에시와 마찬가지로 윤활제로서 silicone oil만을 첨가한 것이 경도가 kneading 시간에 관계없이 높게 나타났고 커플링제, 윤활제등을 함께 혼합할 때는 단위 부피당 비자성체인 첨가제 분율의 증가로 경도는 낮게 나타난다. 즉, 첨가원소가 늘수록 기계적강도는 떨어짐을 알 수 있다. 또한 자기특성에서 본하 바와 같이 kneading 시간이 8분 정도 되어야 경도에서도 포화값을 가지며 이는 밀도변화의 거동과 일치한다. 사진 2에는 첨가제에 따른 수지자석내의 자성분말 분포구조를 보여준다. (a)와 (b)는 0.5 wt.% silicone oil만을 첨가한 자석이고 (c) 및 (d)는 0.5 wt.% titanate + 0.5 wt.% silicone oil + 0.3 wt.% stearic acid 모두를 첨가한 자석이다. 그리고

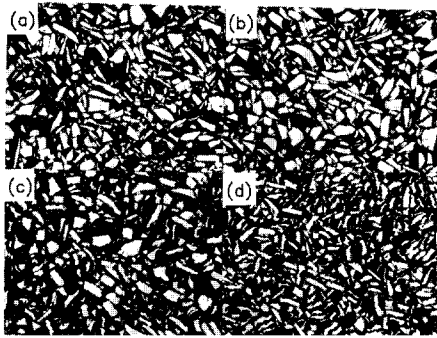


Photo. 2. Optical microstructures showing the powder distribution of nylon 6 bonded magnets.

(a)(b) are for the magnets coupled with 0.5 wt.% silicone oil, and (c)(d) for the magnets with 0.5 wt.% titanate + 0.5 wt.% si - oil + 0.3 wt.% stearic acid. (a)(c) were kneaded for 6min, (d) kneaded for 10min.

(a)와 (c)는 kneading을 6분간 진행한 펠렛을 사용하였고 (b)와 (d)는 10분간 진행한 펠렛을 사용한 자석이다. 최고의 자기특성과 더불어 높은 기계적강도를 보인 silicone oil만을 첨가한 사진 2(a), (b)를 보면 kneading 시간에 관계없이 자성분말의 분포가 고르며 분말의 분쇄 현상이 없고 기공의 존재가 확인되지 않고 있으나, titanate 커플링제와 윤활제를 두종류 같이 사용할 경우에는 (사진(c) 및 (d)) kneading 시간에 따른 자성분말의 분포와 형상이 다르다. 즉, 초기에는 분말의 밀도가 작은 대신 초기 투입대의 분말형상을 유지하나 kneading 후기에는 분말의 분포는 조밀해 지는 대신 분말의 분쇄가 진행되어 입도분포가 불균일하여지는 현상이 발생한다. 초기 분말이 손상을 입어 불균일한 형상을 갖게되면 자화반전 (magnetization reversal) 에 용이하게끔 핵생성의 요인을 유발하는 stray field 효과[8] 를 일으켜 밀도향상에 따른 보자력의 이득이 없다. 그러나 여타 자기적 특성 및 기계적강도 변화는 그림 4 및 5에 나타났듯이 kneading 시간에 따라 뚜렷하다. 위와같은 결과로 볼때 nylon 수지자석에서는 압축성형식 epoxy 수지자석과는 달리 [1, 6] 자기특성 및 기계적특성을 고려해 윤활성을 향상하는 silicone oil만을 첨가하는 것이 바람직하다.

2. 입계분율과 밀도와의 관계

그림 6에 펠렛의 자성분말의 부피분율에 따른 밀도관계

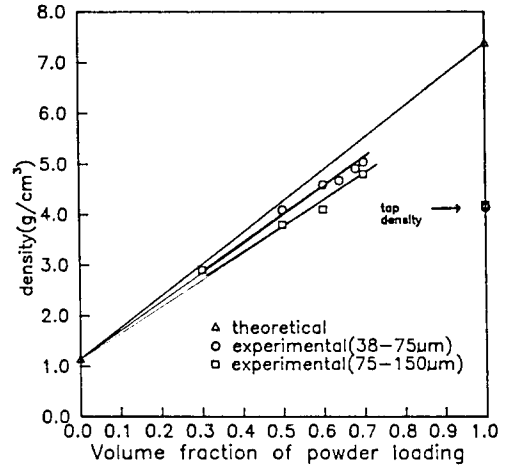


Fig. 6. Density variation of nylon 6 bonded magnets as a function of volume fraction of the Nd-Fe-Co-Zr-B powders.

를 표시하였다. 열경화성 압축성형식 (epoxy base) 수지 자석과는 역으로 사용된 자성분말의 입도가 38~75µm인 펠렛이 75~150µm 펠렛보다 동일한 부피분율에서 성형 밀도가 높음을 알 수 있다. 본 실험에서 최대한도로 투입한 분말의 부피분율 70%에서 38~75µm인 경우, 성형밀도는 이론밀도 (5.5g/cm³)에 비해 91%(5.0g/cm³)에 다달았으나 75~150µm 펠렛에서는 이론밀도의 87% (4.8g/cm³)로 감소한다. 열경화성 수지자석에서는 자성분말이 조대할수록 (150~250µm) 자기특성이 우수하다[2, 6]. 분말의 입도가 어떤든간에 본 연구에서 투입가능했던 최대 부피분율(70%)에서 성형밀도는 Nd-Fe-Co-Zr-B 분말의 tap density보다 높음을 알 수 있다. 자성분말의 입도에 따른 측정밀도 증가경향은 사용된 nylon수지의 밀도를 절편으로 하여 직선적으로 변한다고 볼 수 있으며 이러한 경향이 분말의 임계 분율까지는 적용될 수가 있다. 그러므로 펠렛의 실제 성형밀도(ρ)는 :

$$\rho = \rho_b + K \cdot V_m \tag{8}$$

또는
$$\rho_{cr} = \rho_b + K \cdot \rho_t / \rho_m \tag{9}$$

의 간단한 경험식이 성립되며, 투입된 분말의 분율로서 펠렛 또는 자석의 성형밀도를 추측할 수 있으며 임계밀도는 분말의 측정 ρ_t 및 ρ_m으로 부터 결정할 수가 있다.

여기서 K는 자성분말의 입도에 따른 기울기 상수이다.

Nylon 6 수지자석의 경우, $\rho_b = 1.1 \text{ g/cm}^3$ 이므로 모델링 (modeling)한 값과 실측한 값을 표 I에 비교하였다.

Table I. Comparison of critical density of the nylon 6 magnets

powder size(μm)	K	V_c measured	ρ_c measured	ρ_m measured	ρ_{ct} measured	ρ_{ct} calcul.
38-75	5.6	0.7	4.14	7.27	5.02	4.3
75-150	5.3	0.7	4.18	7.35	4.81	4.1

식 (7)에 의하여 모델링한 값은 실측한 수지자석의 성형 밀도와는 14%~15% 정도의 차이를 보이며, 모델링값이 작게 나온다. 그 이유로는 펠렛에 기공이 전혀 없다고 가정했기 때문이며, 실제로 분말과 수지를 잘 kneading 하였다 하더라도 기공은 존재하기 때문이다. 또한 펠렛제조 시 윤활제인 silicone oil을 사용함으로써 충전율을 향상시

킴으면서 급히 증가하는 것도 같은 맥락으로 해석될 수 있다.

V. 결 론

Nylon 6 수지자석을 제조함에 있어 사용된 자성분말과 수지의 측정밀도로 부터 펠렛 또는 자석의 성형밀도를 예상 할 수 있는 경험식을 성립시켰다. 또한 분말의 tap density 및 pycnometer density로 부터 입체분율을 예측할 수가 있어, 경험식으로 얻어진 값과 비교한 결과, 예측치가 실측치보다 낮게 나왔다. 실측 성형밀도가 높은 이유로는 펠렛 제조시 윤활제를 사용하였고 또한 예측 모델링시 펠렛내에 기공이 전혀 없는 가정하에 전개 했기 때문이다. Nylon 6 수지자석 제조에는 커플링제를 첨가하지 않고 윤활제로서 silicone oil 0.5 wt. % 만을 첨가하는 것이 자기특성 및 기계적특성에 유리함을 알 수 있었다. 자기특성으로 $(BH)_{max} = 5.2 \text{ MGOe}$, $B_r = 5.1 \text{ kG}$ 그리고 $H_c = 8.8 \text{ kOe}$ 의 높은 수준을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] C.J.Yang, W.Y.Lee and S.D.Choi, Proc. 12th Inter. Workshop on Rare Earth Magnets & Its Applications, Canberra, Australia(1992), pp. 541.
- [2] 이우영, 최승덕, 양충진, 한국자기학회지, 1, No.2, 60(1991).
- [3] C.J.Yang, J.Metal Powder Report, 43, 54 (1989).
- [4] R.O.Grey and J.K.Beddown, Powder Tech., 2, 323(1987).
- [5] J.Warren and R.M.German, Metal Injection Molding II, Metal Powder Industries Federation, American Powder Metallurgy Inst., NJ, USA(1989), pp 261.
- [6] S.D.Choi, W.Y.Lee and C.J.Yang, Report 1101 A, Research Institute of Ind. Sci. & Tech., Pohang, Korea, (1992), pp.87.
- [7] G.Pilcher, J.Coating Tech., 51(655), 38(1979).
- [8] H.Krommuller, J. Mag. Soc. Japan, 15(1), 6 (1991).

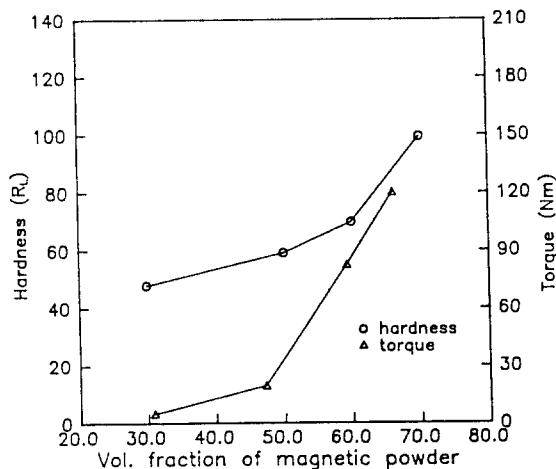


Fig. 7. Hardness and torque variations as a function of volume fraction of magnetic powders in nylon 6 bonded magnets.

킨 결과이다. 본 연구에서 자성분말의 부피분율을 70% 이상으로 할 수 없는 이유로는 그림 7에서와 같이 kneading에 필요한 에너지가 50%를 넘게되면 급격히 증가하기 때문이다. 수지자석의 경도가 분말의 부피분율이 60%를

Magnetic Properties of Nylon 6 based Nd-Fe-Co-Zr-B Pellets for Injection Molding

C. J. Yang, S. D. Choi and W. Y. Lee

*Electromagnetic Materials Lab., Research Institute of Industrial
Science & Technology, P.O.Box 135, Pohang 790-330, Korea*

(Received 20 January 1993)

Nylon 6 based magnetic pellets for injection molding were produced using plasma arc melt-spun $\text{Nd}_{10.5}\text{Fe}_{79}\text{Co}_2\text{Zr}_{1.5}\text{B}_7$ powders. Two sorts of bonded magnets made of two different sizes of particles ($38\sim 75\mu\text{m}$ and $75\sim 150\mu\text{m}$) were prepared to determine critical volume fraction of magnet powders, and the magnetic properties of the magnets were discussed as a function of density. For the nylon 6 based Nd-Fe-Co-Zr-B pellets made of $38\sim 75\mu\text{m}$ particles, the critical volume fraction of powders 0.7 was obtained with the pellet density which is 90% of theoretical density while the magnets of $75\sim 150\mu\text{m}$ showed the density of 87% of the theoretical value with the same volume fraction. The nylon 6 magnets with the addition of 0.5 wt.% silicon oil only exhibited the best magnetic properties to have $H_c = 8.8$ kOe, $B_r = 5.1$ kG and $(BH)_{\text{max}} = 5.2$ MGOe which are of world class. An empirical relationship in predicting the magnet density with a known fraction (V_s) of loading powders was obtained such as $\rho(\text{g}/\text{cm}^3) = 1.1 + K V_s$ where the K ranges over 5.3~5.6 being dependent upon the particle size loaded.