

Fe₃B+Nd₂Fe₁₄B spring magnet 분말 압분체의 Exchange Decoupling

한종수*

영남대학교 물리학과, 경상시

양충진 · 박언병

포항산업과학연구원(RIST), 전자기연구실, 포항시 P.O.Box 135

(2001년 8월 24일 받음, 2001년 9월 15일 최종수정본 받음)

Nano결정립 Nd₂Fe₁₄B+Fe₃B 복합상 자성 압분체의 탈자화 현상을 자기특성 변화 및 δM 측정에 의해 분석하였다. 초기 조성 Nd₄Fe_{73.5}Co₃Hf_{0.5}Ga_{0.5}B_{18.5}의 최대자기에너지적은 리본상태에서 14 MGOe, 분말 압분체에서 6.5 MGOe로 크게 감소하였다. 이러한 현상은 복합상의 리본상태에서 존재하는 교환상호작용력이 분말 압분체에서는 나타나지 않고, 정자장 작용에 의한 탈자화로 인해 잔류자속밀도가 크게 감소한 결과이다. 이는 급냉리본(bulk) 보다 압분체상태에서 정자장 상호작용력이 교환상호작용력보다 더 크게 작용하는 결과로 해석된다. 또한, 자성체 리본을 분쇄하는 과정에서 발생한 응력도 자기특성을 감소시키는 요소임을 확인하였다.

주제어 : 초미세립 복합상, Exchange decoupling, δM plot, 교환상호작용

I. 서 론

초미세립 복합상 영구자석은 4~5 at.%의 낮은 함량의 Nd를 사용하고도 강자성상인 Nd₂Fe₁₄B와 약자성상인 Fe₃B 또는 α -Fe를 nano크기의 결정립으로 상분리(phase separation)시켜 복합화하여 결정립간의 교환상호작용(exchange coupling)으로 높은 잔류자속밀도(B_r)를 발현할 수 있다[1]. 뿐만 아니라 화학적으로도 안정하며 가격대비 성능 경쟁 면에서도 페라이트 자석과도 경쟁이 가능한 새로운 기술의 자성재료로서 기대되고 있다.

최근 nano결정립의 초미세립으로 존재하는 연, 경자성상 사이에서 유발되는 교환상호작용력은 자성상이 규칙적으로 잘 정렬된 경우에 최대자기에너지적(maximum energy product), $(B_r H_c)_{max}$ 를 극대화시킬 수 있다고 하였다[2]. 이러한 초미세립 복합상 영구자석의 잔류자속밀도와 보자력(H_c)는 자성체 결정입자간 교환상호작용력에 큰 영향을 받는다[3, 4]. 입자간 교환상호작용력은 최근 nano결정 초미세립 복합상 급냉리본에서 교환스프링 거동에 관한 연구[5]와 전산모사 모델을 이용한 방법으로 많은 연구가 진행중에 있다. 전산모사 모델은 2, 3차원적 영구자석 형태로 모델링 하거나[6], 또는 결정입자의 모양과 크기를 다르게 모델링하여 가역자화와 역자화 과정동안 자

기특성에 미치는 영향들을 조사하고 있다[7]. 이와 함께, Kelly[10]등은 Stoner-Wohlfarth 관계식[8]에 $\delta M(H)$ 항을 첨가한 δM plot[9]으로 상호작용의 형태와 강도를 평가하는 방법을 제시하였다.

지금까지 우리는 자성상의 규칙적인 정렬과 초미세립의 연, 경자성상을 가지는 급냉리본을 제조하는 연구를 통해 15 MGOe정도의 최대자기에너지적을 가지는 급냉리본을 제조하여 보고한 바 있다[11-14]. 그러나 본드자석을 제조하기 위해서는 급냉리본을 분쇄, 성형하는 과정을 거치게 된다. 이렇게 제조된 Nd-Fe-B계 본드자석에서 Nd₂Fe₁₄B 단일상과 Nd₂Fe₁₄B+Fe, 또는 Nd₂Fe₁₄B+Fe₃B 복합상의 분말성형체, 다시 말하면 벌크 자석의 역자화곡선은 동일한 공정에도 불구하고 서로 다른 거동을 나타낸다. 또한, 복합상의 자석성형체는 단일상의 성형체에 비해 자기특성의 저하가 현저하다. 따라서 본 연구에서는 본드자석 제조 시 사용하는 각종 첨가제를 배제하고, 순수 분말만의 특성을 비교하기 위해 Nd₂Fe₁₄B단일상 및 Nd₂Fe₁₄B+Fe₃B복합상 분말성형체를 제조하여 교환상호작용의 작용과 소멸에 따른 자기특성 저하 원인을 살펴보고자 한다.

II. 실험방법

순도 99.9% Nd와 Fe, 99.5% B, 99.5% Ga, Hf 그리고 Co를 사용하여 Nd₄Fe_{73.5}Co₃Hf_{0.5}Ga_{0.5}B_{18.5} 조성으로

*Tel: (054) 279-6721, E-mail: hanjongsoo@orgio.net

칭량하고, Ar 분위기 하에서 플라즈마 아크 용해 방법을 사용하여 균일한 조성의 주괴(ingot)를 제조하기 위해 3차례 반복 용해 하였다. 제조한 주괴를 추출형 용융회전식(extractive melt spinning) 급냉장치[15]를 사용하여 급속 냉각 자성리본으로 제조하였다. 사용한 급냉회전체는 Mo wheel 로써 냉각회전체의 속도는 19.78 m/s로 하였다. 이렇게 제조한 리본은 ICP 분석을 통하여 조성을 확인하였고, 용해 과정 중 기화하기 쉬운 Nd와 B를 각각 1.2, 0.2 at.%씩 추가로 첨가하여 원하는 조성에 맞추었다.

제조한 급냉 리본은 10⁻⁵ Torr의 고진공에서 650 °C까지 분당 20 °C 증가시킨 후 등온상태에서 10분간 열처리 후 급냉하였다. 이러한 열처리 온도는 590~710 °C까지 같은 조건으로 열처리 한 후 자기특성을 측정하여 가장 양호한 특성을 나타내는 온도로 결정할 것이다. 열처리한 리본은 일본 Toei 사의 진동시료형 자력기(vibrating sample magnetometer)를 이용하여 16 kOe의 자장을 인가한 가운데 자기특성을 측정하였다. 이후 50 g씩 motor grinder를 사용하여 hexane속에서 시간에 따라 분쇄하였다. 분쇄한 리본은 분말상태로 산화 방지를 위해 진공 oven에서 건조하였고, ASTM E11에서 규정한 180, 150, 100, 75, 45 μm의 체(sieve)를 사용하여 입도별로 분급하였다. 성형밀도를 일정하게 하기 위해 입도별로 일정한 무게의 분말을 가지고 일반 프레스를 사용하여 일정한 압력으로 지름 1 cm, 높이 1 cm 정도로 성형하였다. 이후, B-H 히스테리시스 측정기(LDJ사)를 사용하여 자기특성을 측정하였다.

분쇄시간에 따른 분말의 결정구조에 대한 영향을 파악하기 위해 XRD 실험을 행하였고, x-ray fitting program을 사용하여 격자상수를 계산하였다. 분말내부에 불순물 침입의 여부를 파악하기 위해 SAM(scanning Auger microscopy) 실험을 행하였다. 상호작용력의 강도와 형태는 지름 0.4 cm, 높이 0.4 cm의 아주 작은 분말 압분체를 새로이 제조하고, 최대자장 14 kOe의 부가가 가능한 AGM(alternating gradient magnetometer)을 사용하여 잔류자속밀도를 측정 후 δM plot을 통해 상호교환작용의 거동을 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

초미세립 복합상은 양호한 비정질 상태의 리본을 적절한 열처리를 통해 nano결정질의 초미세립의 연, 경자성상을 생성시켜 단일조성 자성체에서 나타나지 않는 자기특성을 얻을 수 있는 자성재료이다. 최적의 자기특성을 나타

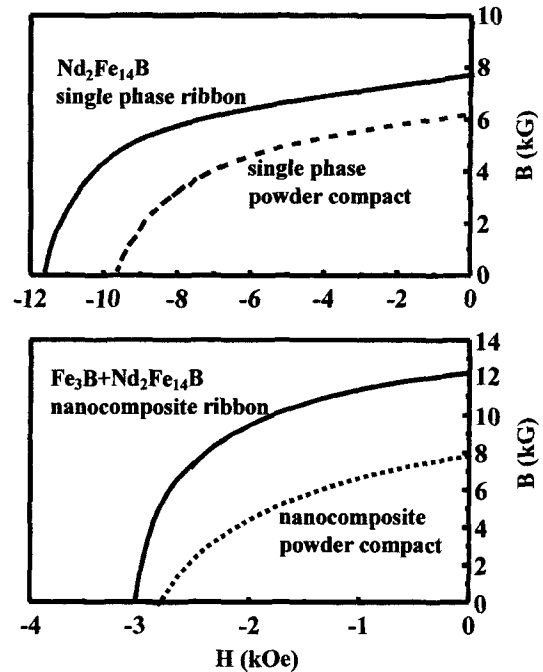


Fig. 1. Comparison of demagnetization behavior for Nd₂Fe₁₄B single phase and Fe₃B+Nd₂Fe₁₄B nanocomposite magnets (single phase powder compact : 80% B_r of ribbon, nanocomposite powder compact : 66% B_r of ribbon).

나게끔 열처리된 리본은 분쇄와 성형과정을 거쳐 영구자석의 형태로 만들어진다. 이러한 영구자석의 최대자기에너지는 분쇄를 거친 자성분말의 특성에 따라 큰 영향을 받는다. 따라서, 우선 자성분말만의 특성을 평가하기 위해 각 단일상 및 복합상 자성분말 성형체를 제조하고 자기특성을 측정하였다. 상기의 방법으로 만들어진 분말 압분체와 리본의 자기특성을 다음의 그림 1에 비교하였다. 그림에서 보이는 바와 같이 단일상과 복합상 분말 압분체의 역자화 곡선에서 단일상의 분말 압분체는 복합상에 비해 잔류자속밀도의 감소가 작다. 단순히 벌크에서 분말 압분체로 변함에 따른 성형밀도의 감소에 의한 잔류자속밀도 및 보자력의 손실만이 나타난다. 급냉리본의 이론밀도를 7.5 g/cm³으로 볼 때 분말 성형체의 측정밀도는 5.7 g/cm³이었으므로 잔류자속밀도의 감소는 대략 25 %를 예상할 수 있으며 실제로 Nd₂Fe₁₄B 단일상 급냉리본의 잔류자속밀도는 8 kG에서 6 kG 범위로 감소되고, 고유보자력은 12 kOe에서 10 kOe 범위로 감소하였으므로 단지 밀도감소에 따른 자기특성의 저하로 판단된다.

그러나, Fe₃B+Nd₂Fe₁₄B복합상에서는 그림에 나타난 바

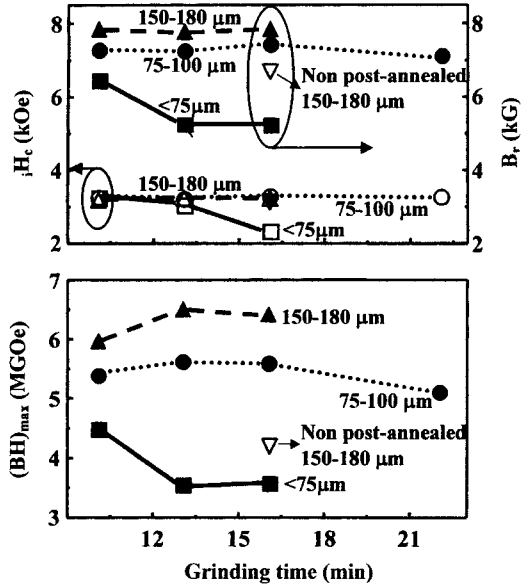


Fig. 2. Variation of remanence B_r , coercivity iH_c and maximum energy product $(BH)_{max}$ as a function of grinding time.

와 같이 리본상태에서 보자력, $iH_c = 3.083$ kOe, 잔류자속 밀도, $B_r = 12$ kG, 분말 압분체에서 보자력 $iH_c = 2.88$ kOe, 잔류자속밀도 $B_r = 7.85$ kG를 나타낸다. 여기서 주목할 사실은 단일상과는 달리 복합상에서는 보자력의 변화는 미미하나 잔류자속밀도의 감소가 현저히 크게 나타난다는 것이다. 복합상의 잔류자속밀도의 증가는 전술한 바와 같이 약자성상과 강자성상의 교환상호작용력에 기인한 것이다. 이러한 이유로, 복합상의 잔류자속밀도 감소는 분말압분체로 제조하는 과정 중 교환상호작용력에 영향을 미치는 결함들이 발생한다고 추정하여, 분말 압분체를 제조하는 과정인 분쇄중에 발생하는 분말의 결함발생에 초점을 맞추었다.

그림 2는 분쇄시간에 따른 자기특성의 변화를 나타내었다. 여기서 입도란 의미는 초기 급냉제조된 리본을 일정시간 분쇄하여 얻어진 일정량을 입도 분포별로 구분한 것으로, 그림에 표기된 입도는 샘플링한 일정량의 분말을 입도별로 구별한 것이다. 그림에서 보이는 바와 같이 상대적으로 입도가 큰 분말 압분체에서 분쇄시간은 자기특성에 큰 영향을 미치지 않는다. 그러나, 분말입도에 따른 자기특성의 차이는 분명히 나타나고, 특히 잔류자속밀도의 차이는 현저하다. 즉, 동일한 분쇄과정에서 시간대 별로 일정량 시료를 채취하여 입도별로 구별하여 자기특성을 측정 한 것으로, 같은 시간대에서 분쇄된 분말중 입도의 차이는

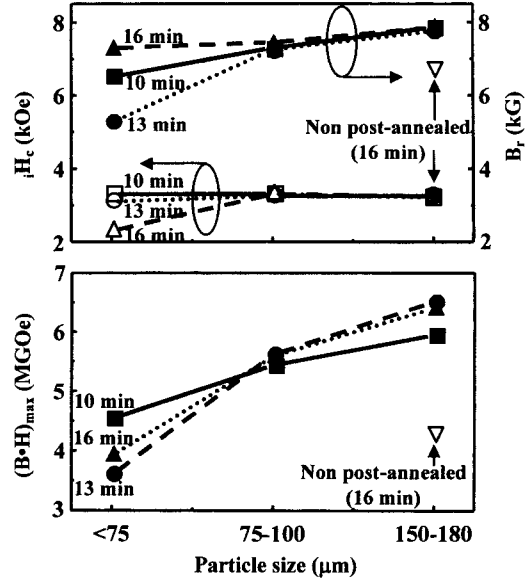


Fig. 3. Variation of remanence B_r , coercivity iH_c and maximum energy product $(BH)_{max}$ as a function of particle size.

분말입자가 변형을 얼마나 하였는지의 차이를 보이게 된다. 분쇄시간이 길수록 입자표면에 발생한 기계적 결함과 응력 또는 입자형상이 분말입자의 역자화 발생점, 즉, 핵생성 결함 등의 유발을 촉진하므로 분쇄시간에 따른 자기특성의 변화를 확인할 필요가 있었다. 전술한 분말의 결함요인을 확인하기 위해 각 시편 분말 압분체는 거의 동일한 성형밀도에서 성형되었다. 분쇄시간에 관계없이 자기특성, 특히 잔류자속밀도는 입도의 크기, 다시 말하면 분쇄과정 중 가공량의 대소에 따라 반자화의 핵생성을 유발하므로 분말입도에 따라 자기특성이 현저히 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 특히 입도 $75 \mu m$ 이하에서는 잔류자속밀도가 6 kG이하로 감소한다. 반면에 고유보자력(iH_c)은 3 kOe를 유지하면서 큰 변화를 보이지 않았다. 분쇄중 가공량의 영향을 확인하기 위해 다음의 그림 3에서와 같이 분말입도 분포에 따른 자기특성의 변화를 재구성 하였다.

일정 시간동안 분쇄작업을 한 모든 시료는 분말의 입도를 구별하여 채취하고, 각 입도에 해당하는 분말 압분체의 자기특성을 측정하여 그림 3에 나타내었다. 입도가 큰 분말에서 순차적으로 자기특성이 높게 측정됨을 다시 한번 확인할 수 있었다. 이는 동일한 시간동안 분쇄하는 과정에서 미세 입도의 입자들이 조대 입도의 입자들보다는 더 많은 충돌을 경험함으로써 입자표면이나 내부에 더 많은 결함들을 가질 것이고, 이러한 결함들이 자기특성을 열화시

킨다고 판단하였다.

그림 2와 3에서 측정된 모든 시료는 분쇄과정을 거친 후 분쇄시에 생겨난 결합들 중의 하나로 예상되는 응력을 제거하기 위해 분말상태 그대로 낮은 온도, 300 °C에서 10분간 열처리를 실시한 후 분말 압분체로 성형한 시료의 자기특성이다. 동시에 분쇄 후 응력제거 열처리를 행하지 않은 압분체 시료의 자기특성(화살표로 표시됨)은 동일한 시간동안 분쇄 후 열처리한 시료보다 같은 입도분포에서 상당히 열등하여 잔류자속밀도의 경우 무려 1 kG 이상의 차이를 보인다.

이러한 결과를 볼 때 응력제거 열처리를 실시한 모든 압분체 시료가 입도분포에 따라 자기특성, 특히 잔류자속 밀도가 미세 입도와 조대 입도에서 상이한 값을 보이는 것은 응력제거 열처리 조건이 적정화 되지 않은 것을 의미한다.

일반적으로 Nd₂Fe₁₄B 단일상 급냉자성체의 탈자화는 반자구 핵생성(reversed magnetic domain)의 확산 및 성장으로 이루어지며, 주로 Kronmuller[16]가 확립해 놓은 식이 자성체 결정립의 형상과 결정립상(grain boundary phase)의 특성까지 고려하여 표현한다.

$$\mu_0 H_c(T) = \alpha \mu_0 H_N^{\min}(T) - N_{eff} J_s(T)$$

여기서 α 는 결정립상의 금속야금학적 요인을 결정하는 변수가 되고, N_{eff} 는 결정립의 형상에 좌우되는 반자장 계수이다. 본 연구자[15]가 측정된 Nd₂Fe₁₄B + Fe₃B nano결정립 복합체 급냉 자성체 분말자석의 α 는 0.519~0.7 범위에서 결정되고, N_{eff} 는 0.025~0.047 범위로 측정되었다. 전술한 α 및 N_{eff} 값은 급속냉각 후 후속 열처리 조건에 따라 미세조직의 변화에 따라 결정되므로 결정립상 및 결정립 형상에 민감한 요인이다. 본 연구에서 얻어진 그림 2 및 3의 결과를 보면 분말입도 분포에 따른 보자력의 변화는 거의 없고 다만, 잔류자속밀도의 현저한 감소가 입도 증가에 따라 수반됨을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 Nd₂Fe₁₄B+Fe₃B 복합자성체 급냉분말의 분쇄과정에서 수반되는 분말입자의 형상, 즉, N_{eff} 값의 증가에 영향을 받아 성형 압분체의 보자력이 감소하는 요인이 될 것이다. 다행히도 사용된 분말의 입도분포가 75~180 μ m 범위를 가지므로 한 개의 입자내에 많은 수의 nano결정립이 존재하여 자성체 결정립간의 교환상호작용에 의한 보자력의 감소는 미미할 것이며, 대신에 분쇄가공에 따른 형상의 불균질로 인해 역자화 자기생성이 활발하여 잔류자속밀도의 급속한 저하가 발생한 결과이다.

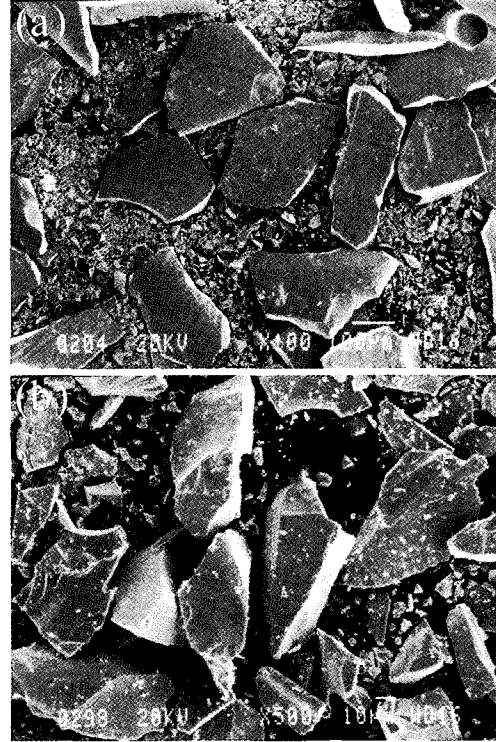


Fig. 4. SEM micrographs of the powders used to produce the compact (particle size (a) 150-180 μ m (b) 45-75 μ m). The surface of coarse particles shows much smoother shape than the fine particles.

전술한 바와 같이 그림 4(a) 및 (b)는 16분 분쇄 후 채취한 분말 중 각각 150~180 μ m, 45~75 μ m 입도를 보이는 분말의 양상을 보여주는 주사전자현미경 사진이다. 그림(b)의 미세분말의 표면을 보면 조대한 분말 (a)보다 더 표면이 거칠고 분말양상도 불균질함을 알 수 있다. 따라서 반자화 발생이 용이하게 일어날 수 있음을 짐작하게 한다.

한편, 급냉 자성분말의 분쇄과정에서 사용된 용매(hexane)에 기본 원소인 C 및 N, 또는 O 원소가 상응된 온도에 의해 분해되어 Nd₂Fe₁₄B 또는 Fe₃B 결정체내에 침입할 수 있는 기회를 배제할 수가 없다. 그림 5는 분쇄 시간에 따라 C 및 O 원소의 침입에 의한 각 결정체의 격자상수의 변화를 x-ray fitting program으로 정밀 측정된 비교치이다. 예상대로 Nd₂Fe₁₄B 결정체의 장축(C axis)이 약 0.5 % 정도 확장되었음을 확인하였다. 결과적으로 Nd₂Fe₁₄B 상의 결정의 부피가 6% 정도 증가하는 것을 볼 수 있었다. X-ray fitting program의 신뢰도가 c축의 0.5 % 신장을 보장할 수 있을지는 확신이 없으나 실험결과 및 과거의 경험으로 볼 때 문제는 없을 것으로 판단한

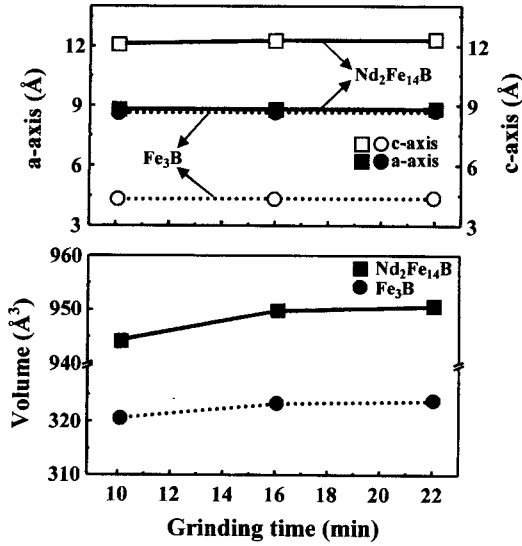


Fig. 5. Variation of lattice parameters as a function of grinding time.

다. 다만, 결정의 부피변화가 자기특성에 큰 영향을 미친다고 보기에는 부피의 변화가 너무 미비하다고 판단된다.

그림 6은 분쇄시 분말내부로의 불순물 침입을 파악하기 위해 Auger 분석을 행한 결과이다. 그림에 보이는 것과 같이 표면에서 대략 50 Å 깊이까지는 탄소와 산소성분의 침입이 현저함을 알 수 있다. 이는, 분석에 사용한 분말입도가 180~150 μm이므로, 분말입자에 비해 0.01% 이하 깊이까지만 침투한 것이다. 따라서, 이렇게 미세한 탄화는 복합상에서 자기특성의 감소에는 큰 영향을 미치지 않는다고 판단하였다. 다만, 분쇄된 입자표면에 얇은 층의 피막이 형성된 결과이므로 잔류자속밀도의 감소가 합리화된 다. 분쇄된 자성체입자의 주 원소인 Nd, Fe 및 B의 큰 변화는 표면으로부터 내부까지 들어가면서 큰 변화는 없는 것으로 보아 조성의 불균질성은 논란의 분제가 없을 것 같다.

자성체 nano결정립 사이에 작용하는 상호교환력을 평가하기 위한 가장 합리적인 방법은 δM을 plot하는 것이다 [9]. 이러한 δM plot을 통해 우리는 상호작용력의 유무와 크기를 관찰하고, 분말압분체의 분말간의 영향을 유추하였다. Stoner-Wohlfarth 이론에 따르면, 상호작용력이 없는 단일 domain 입자에서는 다음식을 만족한다[8].

$$I_d(H) = 1 - 2 I_r(H)$$

여기서, $I_d(H)$ 는 한 방향으로 포화된 샘플에서 역방향으로

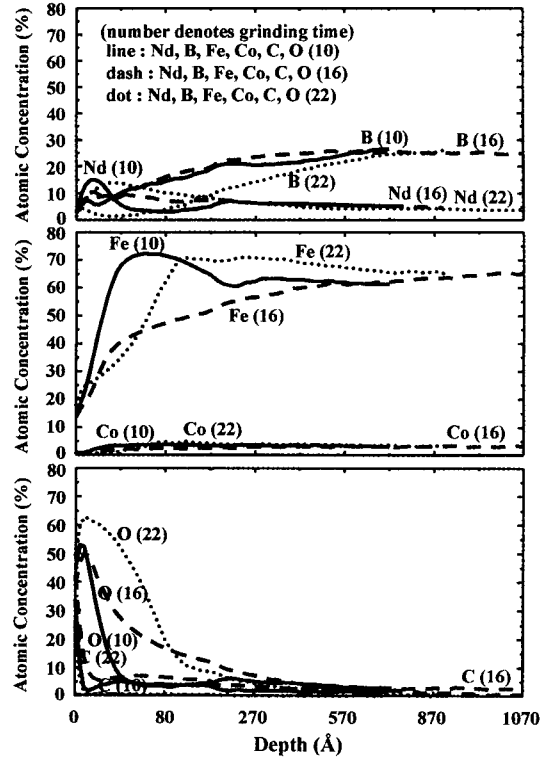


Fig. 6. Auger spectrum of powders after grinding.

탈자를 시키면서 측정된 잔류자화값(직류 탈자화곡선)이고, $I_r(H)$ 는 탈자된 샘플에서 포화상태까지 자장을 증가시키면서 측정된 잔류자화값(등온탈자화곡선)이다. 이 식을 Kelly[9]등은 δM(H) 항을 첨가하여 다음의 식으로 나타내었고, 이것은 상호작용력이 샘플의 자화에 미치는 영향을 나타내주고 있다.

$$\delta M(H) = I_d(H)/I_r(\infty) - [1 - 2 I_r(H)/I_r(\infty)]$$

여기서 $I_r(\infty)$ 는 포화잔류자화 값이다. 상기의 식에서 첫 번째 항이 두번째 항보다 클 때 δM은 양이고, 이는 nano 결정립간의 교환상호작용력을 나타낸다. 그 반대의 경우 인 음의 δM은 정자장(magnetostatic field)에 의한 자화작용력을 나타낸다고 알려져 있다[10].

본 실험에서 δM을 측정된 결과가 그림 7에 나타내었다. 급냉리본(bulk로 간주함)과 분말 압분체에서 각 nano 결정립자간 상호작용력이 어떠한 형태로 변화하는지를 단일상과 복합상에서 보여주고 있다. 리본상태에서는 단일상과 복합상 양쪽 모두 교환상호작용력이 존재하는 것이 보이고, 분말 압분체에서는 정자장에 의한 탈자화 작용력

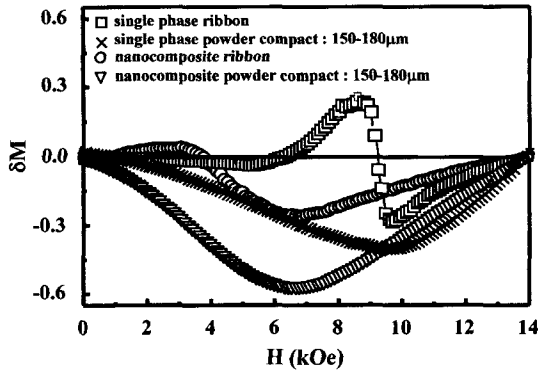


Fig. 7. δM plots as a function of the applied field for the single phase $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ and nanocomposite of $\text{Fe}_3\text{B}+\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ magnet.

만이 나타나고 있다. 단일상 리본에서 양의 δM 값은 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 상간의 협동적인 결합으로 인해 일정방향으로 가역하는 동안 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 경자성상의 반자구 행생성에 필요한 보자력(H_N) 값이 커서 8 kOe 이상이 되면서 급격하게 음의 값으로 감소한다. 그러나, 복합상 리본에서는 연자성상(Fe_3B)과 경자성상($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$)이 공존하므로 상대적으로 작은 H_N , 3.5 kOe 부근에서 상호교환작용의 말소에 의해 탈자화가 되며 그 속도는 단일상에서 보다 상당히 느림을 보여준다. 이러한 교환상호작용력은 전술한 바와 같이 복합상의 잔류자속밀도의 증가를 가져오는 것이다. 그러나, 분말 압분체에서는 단일상이건 복합상이건 경자성상이 존재하긴 하나 교환상호작용력보다 훨씬 더 큰 정자장 상호작용력이 발생하여 복합상만의 교환스프링 행동이 나타나지 않는다. 이러한 결과 복합상 분말 압분체의 잔류자속밀도는 현저하게 감소된다고 판단된다. 따라서 압분체의 보자력은 단일상 또는 복합상의 압분체 공히 분쇄된 조대 입자의 성형에 의한 공극(air gap)에 의한 자장의 분열로 인한 자기특성의 감소로 이해된다. 이러한 정자장상호 작용력의 주 요인으로 잔류자속밀도는 급속히 감소된다.

IV. 결 론

Nd-Fe-B계 nano결정립 초미세립 복합상 영구자석에서 교환상호작용력은 영구자석의 자기특성에 큰 영향을 미친다. 이러한 상호작용력의 변화를 δM plot을 통해 평가하였다. 본 연구에서 영구자석의 가장 대표적인 자기특성인

최대자기에너지적은 리본상태에서 14 MGOe, 분말 압분체에서 6.5 MGOe로 크게 감소하였다. 이러한 현상은 복합상의 리본상태에서 존재하는 교환상호작용력이 분말 압분체에서는 나타나지 않으므로, 잔류자속밀도가 크게 감소한 결과이다. 이는 분말상태에서 정자장 상호작용력이 교환상호작용력보다 더 크게 작용하는 결과이다. 또한, 제조과정에서 발생한 응력도 자기특성을 감소시키는 한 요 소라는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 충남대 “고기능성 자기소자연구센터(ERC)”의 연구비지원(2001D008)과 과기부 극미세구조사업단 연구지원(2000D003)에 의한 것으로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] R. Coehoorn, D. B. de Mooij and C. de Waard, *J. Mater.*, **80**, 101(1989).
- [2] R. Skomski and J. M. D. Coey, *IEEE. Trans. Magn.*, **29**, 2860(1993).
- [3] R. Ficscher, T. Schrefl, H. Kronmüller and J. Fidler, *J. Magn. Magn. Mater.*, **153**, 35(1996).
- [4] G. C. Hadjipanayis and W. Gong, *J. Appl. Phys.*, **64**, 5559(1988).
- [5] I. Panagiotopoulos, L. Withanawasam and G. C. Hadjipanayis, *J. Magn. Magn. Mater.*, **152**, 353(1996).
- [6] T. Schrefl and J. Fidler, *IEEE. Trans. Magn.*, **35**, 3223 (1999).
- [7] T. Schrefl, H. F. Schmidts, J. Fidler and H. Kronmüller, *J. Magn. Magn. Mater.*, **124**, 251(1993).
- [8] E. P. Wohlfarth, *J. Appl. Phys.*, **29**, 595(1958).
- [9] P. E. Kelly, K. O'Grady, P. I. Mayo and R. W. Chantrell, *IEEE. Trans. Magn.*, **25**, 3881(1989).
- [10] I. A. Beardsley and J. G. Zhu, *IEEE. Trans. Magn.*, **27**, 5037(1991).
- [11] C. J. Yang and E. B. Park, *IEEE. Trans. Magn.*, **32**, 4428(1996).
- [12] C. J. Yang and E. B. Park, *J. Magn. Magn. Mater.*, **166**, 243(1997).
- [13] C. J. Yang and E. B. Park, *J. Magn. Magn. Mater.*, **168**, 278(1997).
- [14] Youhui Gao, J. H. Zhu, C. J. Yang and E. B. Park, *J. Appl. Phys.*, **84**(15), 4388(1998).
- [15] 양충진, 대한민국 특허 제048371호(1992), 특허 제 061335 호 (1993).
- [16] M. Seeger, D. Kohler and H. Kronmüller, *J. Magn. Magn. Mater.*, **130**, 165(1994).

Exchange Decoupling of $\text{Fe}_3\text{B}+\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ Spring Magnet Powder Compact

Jong Soo Han*

Yeungnam University, Kyungsan 712-749, Korea

Choong Jin Yang and Eon Byung Park

Electromagnetic Materials Laboratory, Research Institute of Industrial Science & Technology(RIST), Pohang 790-600, Korea

(Received 24 August 2001, in final form 15 September 2001)

Experimentally it is well known that the magnetic properties significantly deteriorate when nanocomposite bonded magnet are made from nanocomposite ribbon. A decrease in maximum energy product of $\text{Fe}_3\text{B}+\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ nanocomposite from 14 MGOe in nanocomposite ribbon to 6.5 MGOe in powder compact was found to be general. Thus, the present study is focused on finding out the root of exchange decoupling of $\text{Fe}_3\text{B}+\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ nanocomposite powder compacts. The exchange decoupling behavior of the powder compact of $\text{Fe}_3\text{B}+\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ composition was studied by measuring DC demagnetization and isothermal remanent demagnetization curves, which are essential for plotting produced δM curve. From the δM plot the deterioration in the magnetic properties resulted from the fact that the magnetostatic interaction became dominant rather than the exchange interaction in powder compact. It is concluded that the demagnetization behavior governed by the dominant magnetostatic interaction reduced the remanence magnetization, which caused the reduction of maximum energy product of the powder compact. We also found that the elimination of residual stress which is unavoidably accumulated during grinding process enhanced the magnetic properties considerably.

Key words : nanocomposite, exchange decoupling, δM plot, exchange interaction