Polymer(Korea) Vol. 26, No. 1, pp 98 104 (2002)

고특성 등방성 $Nd_2Fe_{14}B$/에폭시 본드자석의 연구

조태식† · 정원용*
국립상주대학교 신소재공학과, *한국과학기술연구원 금속공정연구센터
(2001년 9월 15일 접수, 2001년 12월 6일 채택)

A Study on the Isotropic $Nd_2Fe_{14}B$/Epoxy Bonded Magnets with High Characteristics

Tae Sik Cho† and Won Young Jeung*
Department of Materials Science and Engineering, Sangju National University, Sangju 742-711, Korea
**Metal Processing Research Center, KIST, Seoul 130-650, Korea*
†*e-mail : tscho@sangju.ac.kr*
(Received September 15, 2001; accepted December 6, 2001)

요 약: 본 연구는 압축성형으로 제조되는 고특성 등방성 $Nd_2Fe_{14}B$/에폭시 본드자석을 개발하기 위하여 수행되었다. 본드자석의 자기특성은 본드자석의 밀도에 직접적으로 비례하였으며, 평균입도가 200 μm인 $Nd_2Fe_{14}B$ 자성분말을 분쇄공정 없이 그대로 사용할 때 고특성을 나타내었다. 본드자석은 자성분말 기준으로 2.0 wt%의 에폭시 수지, 0.8 wt%의 실란 커플링제, 0.7 wt%의 고온 경화제를 첨가하고, 150 ℃/3시간의 경화조건에서 높은 특성을 나타내었다. 적정조건에서 제조된 고특성 본드자석은 6.1 g/cm^{3}의 밀도, 7.1 kG의 잔류자속밀도, 9.7 MGOe의 최대자기에너지적, 그리고 17 kg/mm^{2}의 압축강도를 나타내었다.

ABSTRACT: This study was investigated to fabricate the isotropic $Nd_2Fe_{14}B$/epoxy bonded magnets with high characteristics produced by compression molding. The magnetic characteristics of the bonded magnets were directly proportional to the density of the magnets and were enhanced by using raw $Nd_2Fe_{14}B$ magnetic powders, having the mean particle size of 200 μm, without additional milling process. The high characteristics of the bonded magnets were achieved at the following conditions; epoxy resin of 2.0 wt%, silane coupling agent of 0.8 wt%, curing agent of 0.7 wt% on the base of magnetic powders, and curing condition of 150 ℃/3 hrs. The bonded magnets at the optimum conditions indicated the high characteristics such as the density of 6.1 g/cm^3, the remanent flux density of 7.1 kG, the maximum energy product of 9.7 MGOe, and the compressive strength of 17 kg/mm^2.

***Keywords*:** *bonded magnet, isotropic $Nd_2Fe_{14}B$ magnetic powders, epoxy resin.*

서 론

레진본드자석은 레진에 자성분말을 혼합하여 레진의 가공성과 자성분말의 기능성을 혼합시킨 복합재료이다.[1] 레진본드자석의 자기특성은 자성분말의 종류, 자성분말의 충진율, 그리고 이방화에 따른 자성분말의 배향성 등에 의하여 주로 변화한다.[2] 자기특성이 매우 큰 희도류계 레진본드자석은 최근 전기·전자제품의 경박소형화 추세에 따라 최적의 영구자석으로 각광을 받고 있다.[3] 그러나 희토류계 레진본드자석은 생산초기에 자기특성인 최대자기에너지적 ($(BH)_{MAX}$)이 3 4 MGOe로 낮아서 사용에 많은 제약을 받아왔다.

Table 1. Characteristics of Isotropic $Nd_2Fe_{14}B$/Epoxy Bonded Magnets Produced by Compression Molding

characteristics	GM (U.S.A.)	Seiko - Epson (Japan)	Sumitomo (Japan)
density (g/cm^3)	6.0	6.5	5.6 6.0
Br (kG)	6.1 7.2	7.1	6.2 7.0
iHc (kOe)	15.0	9.5	≥8.0
$(BH)_{MAX}$ (MGOe)	8.0	10 11	8 10
compressive strength (kg/mm^2)	≥15.0	≥15.0	≥15.0

희토류계인 $Nd_2Fe_{14}B$/에폭시 본드자석은 특성 향상을 위한 연구가 활발하게 진행되어 현재는 DC 모터, 다극형 스테핑 모터 등 적용범위와 사용량이 다양하게 증가하고 있는 추세이다.

본 연구의 목적은 현재 상당량 수입에 의존하고 있는 고특성 등방성 $Nd_2Fe_{14}B$/에폭시 본드자석을 개발하는데 있다. 고특성 등방성 $Nd_2Fe_{14}B$/에폭시 본드자석의 일반적인 목표특성은 6.0 g/cm^3이상의 밀도, 9.5 MGOe이상의 최대자기에너지적, 7 kG이상의 잔류자속밀도 (Br), 그리고 15 kg/mm^2이상의 압축강도를 필요로 한다. 압축성형으로 생산되고 있는 고특성 등방성 $Nd_2Fe_{14}B$/에폭시 본드자석의 주요특성은 Table 1에 요약하여 나타내었다.[4] 등방성 $Nd_2Fe_{14}B$ 자성분말은 특허 소유권자인 미국 GM사의 자성분말만을 사용해야하기 때문에, 고특성 본드자석의 제조시 자기특성은 첨가되는 유기결합제의 종류와 양과 관련된 제조조건에 주로 의존한다. 그러므로 본 연구에서는 고특성 등방성 $Nd_2Fe_{14}B$/에폭시 본드자석을 제조하기 위하여, 다양한 에폭시 수지 혼합물의 종류와 첨가량에 따른 본드자석의 특성을 조사하였다. 이를 토대로 등방성 $Nd_2Fe_{14}B$/에폭시 본드자석의 제조시 고특성의 발현이 가능한 적정조건을 확립하고자 하였다.

실 험

자성분말의 선택 및 분쇄. 본 연구에서는 미국 GM사에서 양산되는 등방성 $Nd_2Fe_{14}B$ 자성분말을 사용하였다. 200 μm의 초기 평균입도를 갖는 자성분말은 에탄올 용제와 아르곤 분위기에서 유성 볼밀을 사용하여 분쇄하였다. 자성분말의 평균입도는 유성 볼밀의 회전수와 분쇄시간을 변화시켜 가면서 각각 약 100, 70, 50, 35 μm로 분쇄하였다. 분쇄된 자성분말은 휘발성이 높은 아세톤으로 용제를 교체한 후 진공건조 오븐을 사용하여 70 ℃에서 3시간 충분히 건조시켰다.

커플링제와 자성분말의 혼합. 본 연구에서 사용한 커플링제는 γ - glycidoxypropyltrimethoxysilane (Union carbide; A - 187)으로서, 기계적 강도가 요구되는 경우에 사용되는 범용 실란 커플링제이다. 커플링제와 자성분말의 혼합은 실험실용 블렌더를 사용하였다. 소량으로 첨가되는 커플링제의 분산성을 향상시키기 위하여 아세톤 용제에 희석시켜서 자성분말과 혼합하는 습식법을 채택하였다. 커플링제로 표면처리된 자성분말은 진공건조 오븐을 사용하여 70 ℃에서 1시간동안 건조시켜서 아세톤을 제거시켰다.

에폭시 수지 조성물과의 혼합. 본 연구에서 사용한 에폭시 수지는 diglycidyl ether of bisphenol A (DGEBA, 국도화학; YD^2 - 128)로서, 184 190 g/eq의 에폭시 당량을 갖는 범용 2관능 에폭시 수지이다. 먼저 에폭시 수지는 상온에서 사용이 용이한 액상으로서 자성분말 기준으로 1 2.5 wt% 소량 첨가되었다. 에폭시 수지의 경화제는 고온 경화제인 방향족 디아민계통의 diaminodiphenyl methane (DDM, Merck)을 자성분말 기준으로 0.2 1 wt% 첨가하여 사용하였으며, 에폭시 수지와의 효과적인 당량비는 35%로 알려져 있다. 활제는 액상상태의 올레인산 (oleic acid, Merck)을 자성분말 기준으로 0.1 0.5 wt% 첨가하여 사용하였다. 에폭시 수지, 경화제, 그리고 활제는 용제인 아세톤에 희석시켜서 젓게로 저어주면서 균일한 용액으로 만들었다. 제조된 에폭시수지 조성물은 커플링제로 표면처리된 자성분말과 실험실용 블렌더에서 혼합되었으며, 진공건조 오븐을 사용하여 70 ℃에서 1시간 동안 건조하여 아세톤을 제거시켰다.

압축성형 및 경화. 건조된 등방성 $Nd_2Fe_{14}B$ 자성분말/에폭시 수지 혼합체는 유압프레스를 사용하여 9톤/cm^2의 압력으로 압축성형을 실시하였다. 압축성형된 성형체는 진공건조 오븐에서 경화처리를 실시하였다. 본 실험에서 사용된 DDM 경화제는 100 ℃이상에서 경화되는 고온 경화제로서, 적정한 경화조건을 선정하기 위하여 경화온도와 경화시간을 변화시켜 가

면서 경화를 실시하였다.

본드자석의 특성 측정. 등방성 $Nd_2Fe_{14}B$/에폭시 본드자석의 자기특성은 전자석형 자화기 (일본 Toei사; TEM - WV 81C - 234)를 사용하여 25 kOe의 자기장을 가해주면서 착자시켰다. 동시에 직류자화 장치 (일본 Toei사; TRF - 5)를 사용하여 자기이력곡선을 측정하였으며, 이것으로부터 본드자석의 자기특성인 잔류자속밀도, 보자력 및 최대자기에너지적을 구하였다. 본드자석의 기계적 특성인 압축강도는 Instron (TT - DM) 기계를 사용하여 측정하였다. 측정시편은 ASTM D695의 방법을 기준으로 직경 12 mm, 높이 8.5 mm의 실린더형으로 제조된 본드자석을 사용하였다. 또한, 본드자석의 밀도는 마이크로미터를 사용하여 시편의 크기를 측정하고 전자저울로 질량을 측정하여 계산되었다.

결과 및 고찰

자성분말 평균입도의 영향. 고특성 레진본드자석의 제조를 위해서는 먼저 적절한 자성분말을 선택하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 미국 GM사에서 멜트 스피닝법으로 양산하고 있는 등방성 $Nd_2Fe_{14}B$ 자성분말을 사용하였다. 등방성 $Nd_2Fe_{14}B$ 자성분말은 잔류자속밀도와 최대자기에너지적의 향상이 가능하고 내열성도 우수한 MQP - D형 분말을 선택하였다. MQP - D형 $Nd_2Fe_{14}B$ 분말의 자기특성은 8.1 kG의 잔류자속밀도, 9.7 kOe의 보자력, 그리고 12.5 MGOe의 최대자기에너지적을 나타낸다.[5] 등방성 $Nd_2Fe_{14}B$ 자성분말의 초기 평균입도는 약 200 μm 이며, 형태는 제조방법인 멜트 스피닝에 기인하여 플레이크 형태이었다.[5]

일반적으로 자성분말의 적절한 평균입도의 선정은 레진본드자석의 압축성형시 성형성과 자기특성의 향상을 위해서 중요하다.[6] 본 연구에서도 등방성 $Nd_2Fe_{14}B$/에폭시 본드자석의 특성에 미치는 자성분말의 평균입도의 영향을 조사하였다. Figure 1에서는 9 ton/cm^{2}의 성형압력에서 자성분말의 평균입도에 따라 제조된 등방성 $Nd_2Fe_{14}B$/에폭시 본드자석의 밀도와 자기특성을 나타내었다. 평균입도가 200 μm인 등방성 $Nd_2Fe_{14}B$ 자성분말은 약 100, 70, 50, 35 μm의 평균입도를 갖는 자성분말로 각각 분쇄하여 사용하였다.

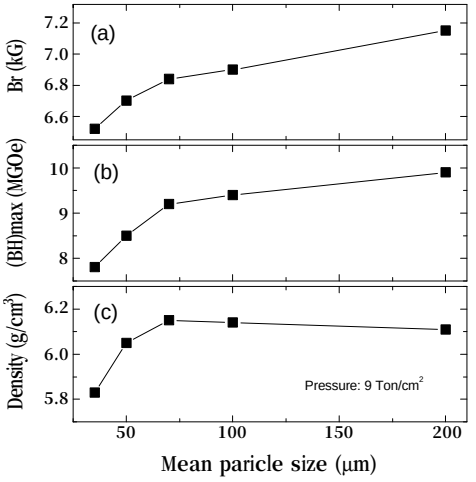

Figure 1. Effect of mean particle size of $Nd_2Fe_{14}B$ magnetic powders on the characteristics of isotropic $Nd_2Fe_{14}B$/epoxy bonded magnets. (a) remanent flux density, (b) maximum energy product, and (c) density.

실험조건은 자성분말 기준으로 에폭시는 2 wt%, 커플링제는 0.8 wt%, 경화제는 0.7 wt%, 그리고 경화조건은 150 ℃/3시간으로 일정하다. Figure 1(a)에서 보듯이, 본드자석의 자기특성인 잔류자속밀도는 자성분말의 평균입도가 작아질수록 감소하였으며, 특히 70 μm 이하의 입도에서 급격히 감소하였다. 또한 Figure 1(b)에서 보듯이, 본드자석의 최대자기에너지적도 자성분말의 평균입도가 작아질수록 감소하였으며, 잔류자속밀도와 거의 유사한 거동을 나타내었다. 이는 잔류자속밀도는 본드자석에 함유된 자성분말의 충전율에 비례하는 크기성질이고, 보자력은 자성분말의 충전율에 관계없이 일정한 세기성질이며,[7] 본 연구에서 $Nd_2Fe_{14}B$ 자성상의 0.05 μm 수준인 임계자구크기가 변하지 않아 보자력이 거의 일정하므로, 본드자석의 최대자기에너지적은 잔류자속밀도에만 직접적으로 비례하기 때문이다.

한편, Figure 1(c)에는 자성분말의 평균입도에 따른 본드자석의 밀도를 나타내었으며, 본드자석의 밀도도 자성분말의 평균입도가 70 μm 이하로 감소함에 따라 급격히 감소하였다. 이는 자성분말의 평균입도가 70 μm 이하로 감소하면 표면적이 증가하여 자성분말 표면에 에폭시 수지가 충분히 존재하지 못하

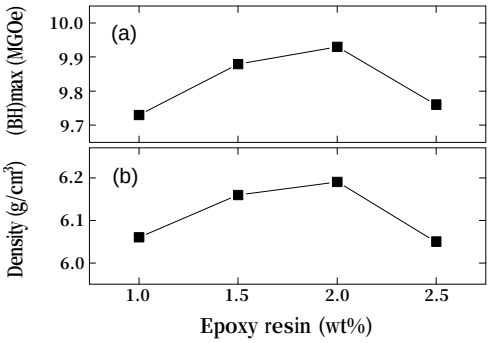

Figure 2. Effect of epoxy resin contents on the characteristics of isotropic $Nd_2Fe_{14}B$/epoxy bonded magnets. (a) maximum energy product and (b) density.

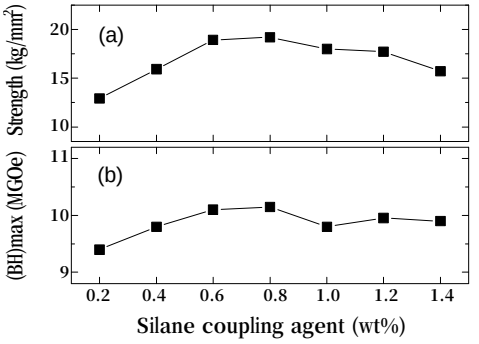

Figure 3. Effect of silane coupling agent contents on the characteristics of isotropic $Nd_2Fe_{14}B$/epoxy bonded magnets. (a) compressive strength and (b) maximum energy product.

기 때문에 압축성형시 기공과 같은 결함의 존재가 가능하여 본드자석의 성형밀도가 감소하는 것에 기인한다.[8] 그러므로 본드자석에서 자성분말의 충전율이 상대적으로 감소하기 때문에 자성분말의 충전율에 직접적으로 비례하는 잔류자속밀도와 최대자기에너지적도 감소하였다. 이상에서 고특성 본드자석을 제조하기 위해서는 자성분말의 추가적인 분쇄공정 없이 평균입도가 200 μm인 등방성 $Nd_2Fe_{14}B$ 자성분말을 그대로 사용하는 것이 효과적이고 경제적이라 판단된다.

에폭시 수지의 영향. 등방성 $Nd_2Fe_{14}B$/에폭시 본드자석은 자성분말의 자기특성과 비자성 물질인 에폭시 수지의 가공성을 혼합시킨 고충진 복합재료이다. 그러므로 등방성 $Nd_2Fe_{14}B$/에폭시 본드자석의 잔류자속밀도와 최대자기에너지적은 비자성 물질인 에폭시 수지의 첨가량에 크게 의존하기 때문에, 본드자석의 자기특성에 미치는 에폭시 수지의 적정한 첨가량을 연구하는 것은 중요하다. Figure 2는 에폭시 수지의 첨가량을 자성분말 기준으로 1 2.5 wt%로 변화시켜 가면서 제조한 본드자석의 최대자기에너지적과 밀도를 나타낸 결과이다. 실험조건은 자성분말 기준으로 커플링제는 0.8 wt%, 경화제는 0.7 wt%, 그리고 경화조건은 150 ℃/3시간으로 일정하다. Figure 2(a)에서 보듯이, 본드자석의 최대자기에너지적은 에폭시 수지의 첨가량에 따라 증가하다가 2 wt%에서 최고값을 나타내었으며, 2 wt% 이상에서는 오히려 감소하는 결과를 나타내었다. 이 결과는 Figure 2(b)에서 나타낸 에폭시 수지의 첨가량에 따른 본드자석의 밀도와도 잘 일치하였다. 이는 에폭시 수지의 첨가량이 상대적으로 부족한 경우, 각각의 자성분말 사이에 에폭시 수지가 충분하지 않기 때문에 본드자석 내에 기공과 같은 결함의 존재로 인하여 본드자석의 밀도와 최대자기에너지적이 감소하는 것에 기인한다.[7] 한편, 에폭시 수지의 첨가량이 상대적으로 과잉인 경우, 7.68 g/cm³의 고밀도인 자성분말과 비교하여 1.17 g/cm³의 저밀도이면서 비자성 물질인 에폭시수지의 함량이 증가하기 때문에 본드자석의 밀도와 최대자기에너지적이 감소하였다. 이상의 결과로부터 고특성 본드자석의 제조를 위한 에폭시 수지의 적절한 첨가량은 자성분말 기준으로 2 wt%로 선정하였다.

커플링제의 영향. 일반적으로 등방성 $Nd_2Fe_{14}B$/에폭시 본드자석은 수 mm의 얇은 두께로 사용되므로 기계적 강도의 향상이 중요하다. 커플링제는 무기물인 자성분말의 표면에 전처리되어 에폭시 수지와의 결합력을 증가시켜 본드자석의 기계적 강도를 향상시키는 첨가제로 알려져 있다.[9] 본 연구에서는 등방성 $Nd_2Fe_{14}B$/에폭시 본드자석의 기계적 강도인 압축강도를 향상시키는 것이 가능하고 범용인 실란계 커플링제를 사용하였다.[10] Figure 3은 자성분말에 표면처리된 실란 커플링제의 첨가량을 자성분말 기준으로 0

1.4 wt%로 변화시켜 가면서 제조한 본드자석의 압축강도와 최대자기에너지적를 나타낸 결과이다. 실험조건은 자성분말 기준으로 에폭시 수지는 2 wt%, 경화제는 0.7 wt%, 그리고 경화조건은 150 ℃/3시간으로 일정하다. Figure 3(a)에서 보듯이 본드자석의

압축강도는 실란 커플링제의 첨가량이 많아지면 증가하다가 0.8 wt%에서 19.2 kg/mm^{2}의 최고값을 나타내었고, 0.8 wt% 이상에서는 감소하는 결과를 나타내었다. 실란 커플링제의 첨가량이 0.8 wt% 이하에서 본드자석의 압축강도가 상대적으로 낮은 이유는 자성분말의 표면이 커플링제로 충분히 처리되지 않으면 커플링제를 통한 자성분말과 에폭시 수지와의 결합력이 감소하기 때문이다. 한편, 실란 커플링제를 0.8 wt% 초과하여 첨가하였을 경우 압축강도가 작아지는 결과는 주목할 만하다. 이는 과잉으로 자성분말의 표면에 처리된 실란 커플링제가 오히려 자성분말과 에폭시 수지와의 결합력을 감소시키기 때문이라 판단된다.

한편, Figure 3(b)에서 보듯이 본드자석의 자기특성인 최대자기에너지적도 실란 커플링제를 첨가함에 따라 증가하다가 0.8 wt%에서 10.15 MGOe의 최대값을 나타내었으며, 0.8 wt% 이상에서는 감소하는 결과를 나타내었다. 이는 자성분말의 표면에 처리되는 적정량의 실란 커플링제는 본드자석의 성형밀도를 향상시켜 최대자기에너지적을 향상시키지만, 0.8 wt% 이상 과잉으로 첨가되면 커플링제가 비자성 물질이기 때문에 오히려 본드자석의 최대자기에너지적을 감소시키는 것으로 해석된다. 상기의 압축강도와 최대자기에너지적의 결과로부터 고특성 본드자석을 제조하기 위하여 자성분말에 표면처리되는 적절한 실란 커플링제의 양은 자성분말 기준으로 0.8 wt%가 적절하였다.

경화제의 영향. 등방성 $Nd_2Fe_{14}B$/에폭시 본드자석의 압축강도를 향상시키기 위해서는 적절한 경화제의 선택과 첨가량을 결정하는 것이 중요하다. 경화제는 저분자량의 에폭시 수지를 서로 결합시켜 경화성 고분자로 만드는 가교제의 역할을 한다.[11] 등방성 $Nd_2Fe_{14}B$/에폭시 본드자석의 양산 제조시 커플링제가 표면처리된 자성분말과 에폭시 수지를 혼합한 시료를 압축성형한 후 경화반응을 별도로 수행해야 하기 때문에, 상온에서 압축성형 전에 경화반응이 일어나지 않아야 한다. 그러므로 본 연구에서는 고온 경화제를 사용하였으며, 사용이 편리한 방향족 디아민계의 DDM 경화제를 선정하였다. Figure 4에는 경화제의 첨가량을 자성분말 기준으로 0.2 1 wt%로 변화시켜 가면서 제조한 본드자석의 압축강도와 자기특

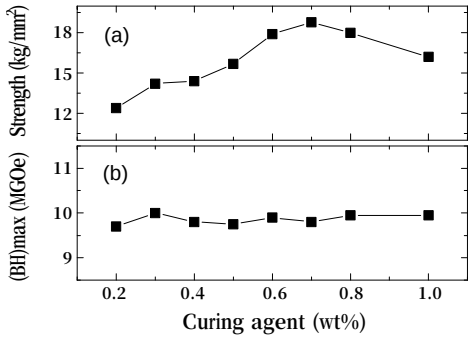

Figure 4. Effect of curing agent contents on the characteristics of isotropic $Nd_2Fe_{14}B$/epoxy bonded magnets. (a) compressive strength and (b) maximum energy product.

성을 나타내었다. 실험조건은 자성분말 기준으로 에폭시는 2 wt%, 커플링제는 0.8 wt%, 그리고 경화조건은 150 ℃/3시간으로 일정하다. Figure 4(a)에서 보듯이, 본드자석의 압축강도는 경화제의 첨가량이 많아지면 증가하다가 0.7 wt%에서 18.8 kg/mm^{2}의 최고값을 나타내었다. 이는 경화제의 첨가량이 많아지면 저분자량의 에폭시 수지를 서로 결합시켜 경화성 고분자로 만드는 경화반응이 향상되기 때문이다. 그러나 경화제의 첨가량이 0.7 wt% 이상 초과하면 본드자석의 압축강도가 오히려 감소하였으며, 이는 미반응한 과잉의 경화제의 영향 때문이라 사료된다. 한편, Figure 4(b)에서 보듯이, 본드자석의 최대자기에너지적은 경화제의 첨가량에 따라 큰 변화를 나타내지 않았다. 이상의 결과로부터 고특성 본드자석을 제조하기 위한 적정한 경화제의 첨가량은 자성분말 기준으로 0.7 wt%가 적절하였다. 이는 적정한 에폭시 수지 첨가량이 자성분말 기준으로 2 wt%인 점을 감안하면, 에폭시 수지와 경화제의 당량비인 35 wt%와도 잘 일치하는 결과이다.

적절한 경화조건을 결정하기 위하여, Figure 5에는 150 ℃의 경화온도에서 경화시간을 변화시켜 가면서 제조한 본드자석의 자기특성, 그리고 압축강도를 나타내었다. 실험조건은 자성분말 기준으로 에폭시는 2 wt%, 커플링제는 0.8 wt%, 그리고 고온 경화제는 0.7 wt%로 일정하다. Figure 5(a)에서 보듯이 본드자석의 압축강도는 경화시간이 5시간까지 길어지면 증가하다가 5시간 이후에는 거의 포화되었다. 이러한

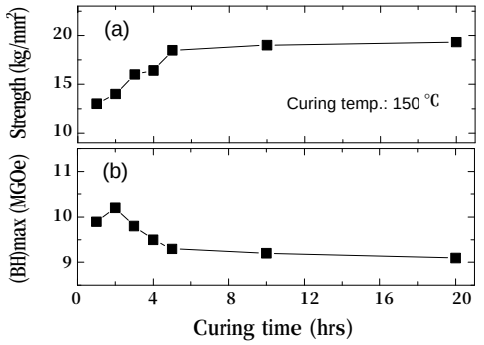

Figure 5. Effect of curing condition on the characteristics of isotropic $Nd_2Fe_{14}B$/epoxy bonded magnets. (a) compressive strength and (b) maximum energy product.

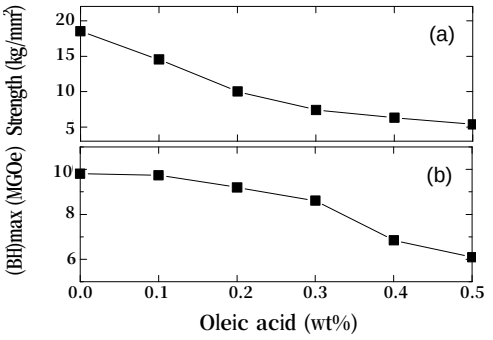

Figure 6. Effect of oleic acid contents on the characteristics of isotropic $Nd_2Fe_{14}B$/epoxy bonded magnets. (a) compressive strength and (b) maximum energy product.

결과는 경화시간이 길어지면 에폭시 수지의 경화반응이 계속적으로 진행되어, 5시간 이후에는 경화반응이 거의 완료되었기 때문이다. 하지만 Figure 5(b)에서 보듯이, 경화시간에 따른 본드자석의 최대자기에너지적은 2시간까지는 10.2 MGOe로 증가하다가 2시간 이후에는 감소하는 결과를 나타내었다. 최대자기에너지적이 2시간까지 증가하는 것은 경화반응으로 인해 본드자석의 밀도가 증가하기 때문임을 실험적으로 확인하였으며, 2시간 이후 감소하는 것은 희토류계인 $Nd_2Fe_{14}B$ 자성분말을 150 ℃의 고온에서 오래 유지함으로 인한 자성분말의 산화에 기인한다. 한편, 150 ℃이하의 경화온도에선 자기특성의 감소는 크지 않으나 경화시간이 너무 길어지는 단점이 있었으며, 150 ℃ 이상의 온도에서는 자성분말의 산화가 심각하여 자기특성의 감소가 크게 일어났다. 이상의 결과로부터 본드자석의 자기특성과 압축강도가 목표특성을 동시에 만족하는 조건인 150 ℃/3시간을 적절한 경화조건으로 선정하였다.

활제의 영향. 등방성 $Nd_2Fe_{14}B$/에폭시 본드자석의 성형밀도와 자기특성 향상을 위하여 활제의 사용을 검토하였다. Figure 6에는 활제인 올레인산을 자성분말 기준으로 0.1 0.5 wt%로 소량 첨가하여 제조한 본드자석의 최대자기에너지적과 압축강도를 나타내었다. 실험조건은 자성분말 기준으로 에폭시는 2 wt%, 커플링제는 0.8 wt%, 경화제는 0.7 wt%, 그리고 경화조건은 150 ℃/3시간으로 일정하다. Figure 6(a)에서 보듯이, 본드자석의 최대자기에너지적은 활제의 첨가량이 증가함에 따라 활제를 사용하지 않은 경우와 비교하여 연속적으로 크게 감소하였다. 이는 활제의 첨가로 인해 본드자석의 밀도가 오히려 감소하기 때문임을 실험적으로 확인하였다. Figure 6(b)에서 보듯이, 본드자석의 압축강도도 활제를 첨가할수록 크게 감소하는 나쁜 결과를 나타내었다. 이는 활제의 첨가가 에폭시 수지와 자성분말간의 결합력을 감소시키기 때문이라 판단된다. 그러므로 본드자석의 특성을 향상시키기 위해서는 활제를 첨가하지 않거나, 효과적인 새로운 활제에 대한 연구가 필요하다고 사료된다. Figure 7에는 적정조건에서 제조된 등방성 $Nd_2Fe_{14}B$/에폭시 본드자석의 자기특성을 나타내는 자기이력곡선의 2상한을 나타내었다. 본드자석의 제조조건은 200 μm의 평균입도를 갖는 자성분말 기준으로 에폭시는 2 wt%, 커플링제는 0.8 wt%, 경화제

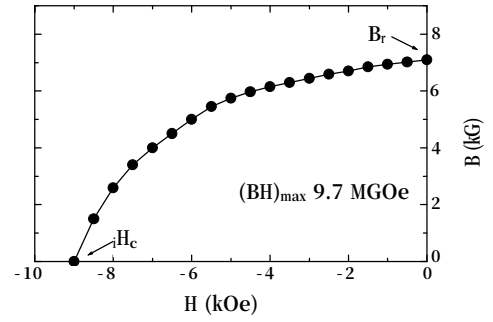

Figure 7. Demagnetizing curve of isotropic $Nd_2Fe_{14}B$/epoxy bonded magnets at the optimum condition.

는 0.7 wt%, 그리고 경화조건은 150 ℃/3시간이다. 본드자석의 자기특성은 7.1 kG의 잔류자속밀도, 9.0 kOe의 고유보자력, 그리고 9.7 MGOe의 최대자기에너지적 등 목표특성을 만족하는 고특성을 나타내었다. 또한 본드자석의 밀도와 압축강도도 각각 목표특성을 만족하는 6.1 g/cm^{2}와 17 kg/mm^{2}를 나타내었다.

결 론

본 연구는 등방성 $Nd_2Fe_{14}B$/에폭시 본드자석의 높은 자기특성과 압축강도가 동시에 발현이 가능한 적정조건을 찾기 위하여 수행되었다. 본드자석의 자기특성은 고밀도인 자성분말의 충전율에 직접적으로 비례하였으며, 본드자석의 압축강도는 다양한 에폭시 수지 혼합물의 종류와 첨가량과 깊은 연관을 나타내었다. 등방성 $Nd_2Fe_{14}B$ 자성분말은 추가적인 분쇄공정 없이 평균입도가 약 200 μm인 자성분말을 그대로 사용하는 것이 본드자석의 자기특성 향상에 효과적이었다. 본드자석의 에폭시 수지 혼합물의 적정조건은 자성분말 기준으로 에폭시 수지는 2.0 wt%, 실란 커플링제는 0.8 wt%, 경화제는 0.7 wt%, 경화조건은 150 ℃/3시간, 그리고 활제는 첨가하지 않는 것이 고특성에 효과적이었다. 상기의 적정조건에서 제조된 등방성 $Nd_2Fe_{14}B$/에폭시 본드자석은 밀도가 6.1 g/cm^2, 잔류자속밀도가 7.1 kG, 최대자기에너지적이 9.7 MGOe, 압축강도가 17 kg/mm^{2}인 목표특성을 만족하는 고특성을 나타내었다.

참 고 문 헌

1. M. Hamamo, *Plastic age*, May, 127 (1988).
2. W. Y. Jeung, T. S. Cho, and T. J. Moon, *J. Korean Magn. Soc*., 4, 219 (1994).
3. J. J. Croat, J. F. Herbst, R. W. Lee, and F. E. Pinkerton, *J. Appl. Phys*., 55, 2078 (1984).
4. H. K. Kim, "Development and Application Technology of Permanent Magnetic Materials", p. 57, KINITI, Seoul, 1990.
5. GM Co. Magnequench Catalogue, No. 10450007, No. 10450013.
6. T. S. Cho, B. S. Park, W. Y. Jeung, and T. J. Moon, *J. Korean Magn. Soc*., 5, 740 (1995).
7. B. D. Cullity, "Introduction to Magnetic Materials", p. 25, Addison - Wesley Publishing Co., Massachusetts, 1972.
8. R. M. German, "Powder Injection Molding", p. 125, MPIF, NJ, 1990.
9. E. P. Plueddemann, "Silane Coupling Agents", p. 146, Plenum Press, New York, 1982.
10. S. J. Monte and G. Sugerman, *Polym. Eng. Sci*., 24, 1369 (1984).
11. F. W. Billmeyer, "Textbook of Polymer Science", p. 445, John Wiley & Sons, New York, 1984.