

## 커플링제가 플라스틱 페라이트 자석의 레올로지와 자기특성에 미치는 영향

이석희 · 최준환 · 문탁진

고려대학교 공과대학 재료공학과, 서울 136-701

정원용

한국과학기술연구원 금속공정연구센터, 서울 136-791

(1998년 7월 30일 받음, 1998년 10월 15일 최종수정본 받음)

커플링제 종류에 따른 플라스틱 페라이트 이방성 자석의 레올로지와 자기특성에 미치는 영향을 조사하여 비교하였다. 커플링제는 silane A174와 titanate TTS를 사용하였으며, 고분자 결합제는 polypropylene(PP), 자성분말은 Sr-페라이트를 사용하였다. TTS의 첨가가 A174의 첨가보다 혼합물의 점도 감소와 자기특성 증가에 더 효과적이었다. 커플링제가 첨가되지 않은 혼합물과 비교하여, A174는 23 %, TTS는 50 %의 점도 감소 효과를 나타내었다(전단율  $1280 \text{ sec}^{-1}$ 에서). 4 kOe의 자장하에서 사출성형한 플라스틱 이방성 자석은 커플링제로 처리되지 않은 자석 (잔류자속밀도 : 1.89 kG, 최대자기에너지적 : 0.84 MGOe)에 비해 A174 처리에 의해 잔류자속밀도는 2.25 kG, 최대자기에너지적은 1.23 MGOe로 향상되었으며, TTS의 처리에 의해 잔류자속밀도는 2.35 kG, 최대자기에너지적은 1.33 MGOe로 각각 향상되었다.

### I. 서 론

사출성형에 의한 플라스틱 자석의 제조는 자성분말을 고분자 물질내에 분산시켜 유동성을 부여한 후 자기장이 형성된 금형내에 주입하여 이루어진다. 사출성형에 의해 제조된 플라스틱 이방성 영구자석의 자기특성은 분말의 충전율과 충전된 분말의 배향도에 의존한다. 분말의 충전율은 혼합물의 조성을 변화시킴으로써 얻을 수 있으며, 충전된 분말의 배향도는 금형내의 자기장의 세기와 혼합물의 점도에 의존한다. 자기장의 세기는 금형설계와 전류의 세기에 의해 조절되며, 혼합물의 점도는 결합제로 사용된 고분자 물질의 용융점도, 자성분말의 형상, 평균입도, 입도분포, 충전율, 성형조건, 성형조제의 사용 등에 의존한다. 커플링제는 위의 자기특성 의존변수중에서 성형조제에 포함된다.

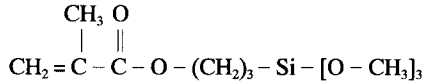
커플링제는 고분자와 충전물로 구성된 복합체의 기계적 강도와 성형성을 개선하기 위해 개발되었으며, 커플링제의 종류에는 silane계, titanate계[1], zirconate계[2], zirco-aluminate계[3] 등이 있다. 커플링제는 충전물 표면에 화학결합으로 고정되며, 젖음성 증가, 점도 저하, 충격강도 증가, 충전율 증가 등의 효과가 있다[4-6]. 저하된 점도는 성형성을 개선하고 혼합물의 균질성을 향상시킨다.

본 연구에서는, 여러 커플링제 중에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 silane계와 titanate계를 선택하여 이들의 첨가가 플라스틱 자석의 유변학적 특성 및 자기특성에 미치는 영향을 조사하여 비교하였다. 본 실험에서 선택한 커플링제는 silane계 A174 ( $\gamma$ -methacryloxypropyl trimethoxy silane)와 titanate계 TTS (isopropyl triisostearoyl titanate)이며, 두 물질의 화학구조의 형태학적 측면에서 점도에 미치는 영향을 비교하였다. 모세관 레오미터를 이용하여 혼합물의 점도를 조사하였으며, 플라스틱 이방성 자석을 제조하여 커플링제 처리 여부에 따른 자기특성 변화를 조사하였다.

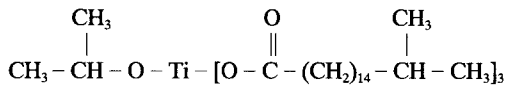
### II. 실험방법

커플링제 영향을 조사하기 위한 혼합물의 결합제로 polypropylene(PP)를 사용하였다. PP는 Daelim Co.의 상업용 제품 PP-141로 펠렛(pellet) 형태이며, 용융지수는  $25 \text{ g/min}$ (by ASTM D1238/L), 밀도는  $0.91 \text{ g/cm}^3$ , 녹는점은  $169^\circ\text{C}$ 이다. High density polyethylene(HDPE)를 사용하여 페라이트 분말의 충전율에 따른 자기특성 변화를 조사하였다. HDPE는 Samsung General Chemicals Co.의 상업용 제품 J520A로 펠렛 형태이며, 용융지수는  $18.0 \text{ g/min}$ (by ASTM D1238, 190

°C에서 측정), 밀도는 0.958 g/cm<sup>3</sup>, 녹는점은 131 °C이다. PP/페라이트 혼합물을 위한 silane 커플링제는 아래에 표시된 Union Carbide Co.의 상업용 제품 A174 (γ-methacryloxypropyl trimethoxy silane, 비중 : 1.045)를,



titanate 커플링제는 다음에 표시된 Kenrich Petrochemicals Inc.의 상업용 제품 TTS (isopropyl triisostearoyl titanate)를 사용하였다.



이방성 자성분말은 스트론튬 페라이트(SrO · 6Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)로 Bangara Co.의 상업용 제품인 OP-71을 사용하였으며, 공기투과법으로 조사한 이 분말의 평균입도는 1.4 μm이며, 이론밀도는 5.11 g/cm<sup>3</sup>이다.

분말표면의 커플링제 처리는 슬러리 공정을 이용하였다. 커플링제 양은 페라이트 분말의 1.0 wt.%를 사용하였으며, A174는 methanol에 그리고 TTS는 n-hexane에 각각 희석하였다. 커플링제 용액과 페라이트 분말의 슬러리는 40 °C의 오븐에서 진공으로 하루동안 건조되었다.

건조된 분말은 회분식 혼합기에서 고분자와 일차 혼합되었다. PP/페라이트 혼합물은 180 °C에서, HDPE/페라이트 혼합물은 150 °C에서 혼합되었다. 먼저 정량된 페라이트 분말의 70 % 정도와 고분자를 혼합하여 고분자가 용융되어 단일 혼합물을 형성하면 나머지 분말을 넣어 다시 혼합하였다. 혼합물은 압출기에 투입하기 적당한 크기로 절단된 후 일축압출기에서 압출되었다. PP/페라이트 혼합물은 200 °C에서, HDPE/페라이트 혼합물은 210 °C에서 압출되었다.

PP/페라이트 혼합물의 점도는 Rosand사의 RH14-C 모세관 레오미터로 측정하였다. 사용된 다이의 모세관 지름은 1 mm, 길이는 16 mm이다. 배럴온도는 200 °C였으며, 혼합물의 온도평형을 위해 2분간 유지 후 압출하였다. 여러 전단율을 얻기 위해 레오미터 피스톤의 속도를 변화시켰다. 전단응력을 결정하는 압력변화는 다이의 입구에 위치한 변환기에서 측정되었다. 전단응력과 전단율의 비는 겔보기 점도를 나타낸다.

자기특성 측정을 위한 시편은 램식 사출기를 이용하여 직육면체의 형태로 제조되었으며, PP/페라이트 혼

합물은 200 °C, HDPE/페라이트 혼합물은 210 °C의 배럴에서 상온의 금형으로 사출되었다. 사출성형시 금형에는 유도자기장을 인가하여 분말을 배향시켰다. 자기특성의 측정은 Toei사의 TRF 5AH1 DC-fluxmeter를 사용하였다.

준비된 혼합물들의 정확한 조성은 열질량분석기(TGA)를 이용하여 조사하였다. 열질량분석은 공기중에서 10 °C/min로 800 °C까지 승온하여 무게변화를 측정하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 3.1 혼합물의 조성

Table I에 본 연구에 사용된 고분자/페라이트 혼합물들의 조성을 나타내었다. PP-ferrite와 HDPE-ferrite는 커플링제로 처리되지 않은 분말을 사용한 혼합물이다. PP-ferrite-1.0 % A174와 PP-ferrite-1.0 % TTS는 커플링제 A174와 TTS로 각각 처리된 분말을 사용한 혼합물이다. 커플링제는 페라이트 분말의 1.0 wt.%에 해당하는 양을 사용하였으며, 두 커플링제의 효과를 비교하기 위해 동일한 양을 첨가하였다. 분말과 PP의 부피 비는 57 : 43이 되도록 정량하였다.

Table I의 HDPE-ferrite 혼합물을 이용하여 분말충전율에 따른 자기특성의 변화를 조사하였다. 분말충전율은 9.9-55.7 vol.% 사이에서 변화시켰으며, 커플링제는 사용하지 않았다.

커플링제는 넓은 의미에서 결합제로 분류될 수 있으며, 커플링제의 사용으로 혼합물의 실제 조성은 변하게 된다. 따라서 커플링제 첨가로 인한 혼합물의 조성

Table I. Composition of ferrite suspensions

Sample code	Sr-ferrite powder	PP	HDPE	Ashing results
PP-ferrite	88.2 (57)	11.8 <sup>d</sup> (43 <sup>e</sup> )	-	88.1
PP-ferrite-1.0 % A174	88.2 <sup>a</sup> (57)	11.8 (43)	-	87.5
PP-ferrite-1.0 % TTS	88.2 <sup>b</sup> (57)	11.8 (43)	-	87.0
HDPE-ferrite	X <sup>c</sup>	-	100-X	-

<sup>a</sup>The powder was treated with 1.0 wt.% silane-A174 coupling agent.

<sup>b</sup>The powder was treated with 1.0 wt.% titanate-TTS coupling agent.

<sup>c</sup>Several suspensions with different composition were prepared.

<sup>d</sup>Weight percent.

<sup>e</sup>Volume percent.

변화를 열질량 분석법을 이용하여 조사하였다(ashing results). 열질량분석법은 혼합물의 균질도 평가에도 이용되고 있다[7].

Table I의 열질량 분석 결과에서 보듯이, 분말의 커플링제 처리로 인하여 혼합물의 실제 분말충전율은 감소하였으며, 혼합물의 점도에 미치는 커플링제 영향을 고찰시 이러한 조성 변화에 의한 영향도 고려해야 한다. 그 이유는 임계분말충전율 부근의 혼합조성에서는 작은 조성의 차이가 큰 점도의 차이로 증폭되어 나타나기 때문이다. 그러나 커플링제 처리로 인한 조성 변화를 정확히 측정하기에는 어려움이 있다. 그 이유는 커플링제가 처리중에 수분 또는 무기물 표면과의 반응으로 인하여 분자구조가 변하게 되고, 이로 인해 첨가된 양과 처리후에 분말표면에 남아 있는 양에는 차이가 발생하기 때문이다. 열질량 분석법에 의한 조성 확인에서도 커플링제의 종류에 따라 열분해 후 분말사이에 잔류하는 물질의 양이 다르고, 또한 Si와 Ti 같은 원소가 열분해 후에도 잔류하기 때문이다.

A174 분자중의 trimethoxy ( $-(OCH_3)_3$ ) 작용기는 처리중에 분말표면의 수분과 반응하여 메탄올( $CH_3OH$ )을 생성하며 trihydroxy ( $-(OH)_3$ ) 작용기로 변한다. 이렇게 생성된 메탄올은 분말 건조시 제거되며, 이 반응으로 인하여 A174 분자의 무게 손실이 발생하게 된다[8]. A174는 분자마다 3개의  $-OH$  기를 가지며, 이들 작용기는 페라이트 분말표면의  $-OH$  기와 반응하여 화학결합을 형성하거나 다른 A174 분자와 반응하여 연속적인 network을 형성한다[6]. 반면에, TTS는 무기물 표면의  $-OH$ 기와 반응하여  $HOCH(CH_3)_2$ 를 생성하면서 분말표면과 화학결합을 형성한다[6].

위의 A174와 TTS의 무기물과의 반응에서 중요한 것은 가교결합(cross-linkage) 형성의 유무이다. A174 분자들은 서로 반응하여 가교그물(cross-linked network)을 형성할 수 있는 반면에, TTS는 분자들간에 가교그물을 형성할 수 없다. 그 이유는 가교반응의 여부가 작용기의 수에 의존하기 때문이며, A174의 작용기( $-OH$ )는 세 개이므로 가교반응이 가능하고, TTS의 작용기는 한 개이므로 가교반응이 불가능하다. 가교반응은 일반적으로 물질의 탄성율을 증가시키고 신장율을 저하시킨다[8]. Silane 커플링제 처리에 의한 강도 증가는 여러 연구기들에 의해 보고되었으며[9-11], 이러한 강도 증가는 silane 커플링제의 이러한 가교반응에 기인하는 것으로 생각된다.

### 3.2 점도에 미치는 영향

Fig. 1은 커플링제 처리에 따른 점도 변화를 전단율의 함수로 나타낸 것이다. 혼합물의 조성은 Table I에 나타나 있다. 전단율  $1280 \text{ sec}^{-1}$ 에서, 순수한 PP만의 점도는  $71 \text{ Pa}\cdot\text{sec}$ 이었으며, 전단율 증가로 유사소성(pseudoplasticity)이 증가하는 것을 볼 수 있다. 페라이트 분말 57 vol.%의 충전으로 인해 PP-ferrite 혼합물의 점도는  $348 \text{ Pa}\cdot\text{sec}$ 로 급격히 증가하였다. 이렇게 증가한 혼합물의 점도는 커플링제 silane A-174 처리에 의해  $269 \text{ Pa}\cdot\text{sec}$ 로, titanate TTS 처리에 의해  $176 \text{ Pa}\cdot\text{sec}$ 로 각각 감소하였다. 위의 결과에서 혼합물의 점도는 커플링제 처리로 인해 감소되며, 커플링제 종류에 의존함을 알 수 있다.

복합체에서 커플링제 처리에 의한 점도 감소를 설명하는 메카니즘은 아직 분명치 않으며[12], 다음의 여러 커플링제 효과들을 근거로 추론할 수 있다. 커플링제는 젖음성 개선, 윤택작용, 분산도 증가, 혼합물의 조성 변화 등의 효과가 있다.

첫째로, 커플링제 처리는 분말의 표면에너지를 변화시켜 고분자와의 젖음성을 개선한다. 무기물 표면의  $-OH$ 기가 커플링제와 결합함으로써 분말의 표면은 커플링제의 반대편 말단까지 연장되며, 유기물의 표면과 같은 화학적 성질을 가지게 된다. 이렇게 형성된 분말 표면의 탄화수소로 인해 고분자 물질과의 젖음성이 향

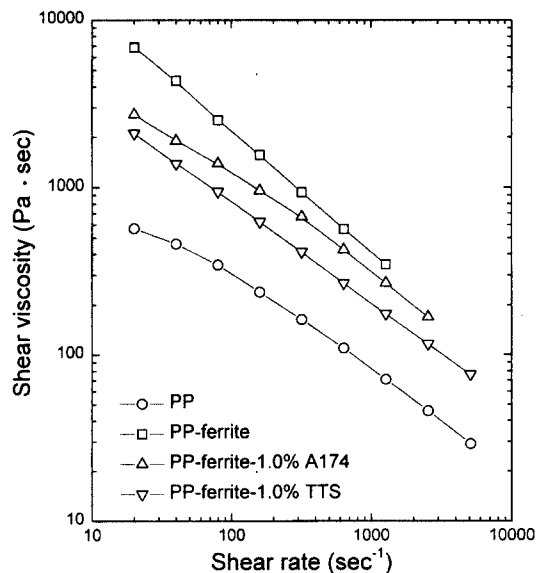


Fig. 1. Viscosity vs shear rate for the PP/ferrite suspensions. T = 200 °C.

상된다.

둘째로, 커플링제 또는 표면 활성 첨가제는 혼합물과 벽면 사이에서 혼합물의 흐름성을 증가시키는 외부 윤�활제 역할을 한다. 외부 윤�활제는 고분자의 점도를 변화시키지 않으면서 성형성을 개선한다. 그리고 커플링제는 고분자를 가소화하여 용융점도를 저하시키는 내부 윤�활제 역할도 한다. 분말표면과 결합한 A174의 주사슬(main chain)의 길이보다 TTS의 주사슬의 길이가 약 세 배 정도 길며, TTS 한 분자에는 세 가닥의 주사슬이 존재한다. 분말 표면에 형성된 TTS의 여러 가닥의 길고 유연한 주사슬층은 PP를 가소화시키는데 효과적이다. 이러한 TTS의 효과적인 가소화 작용은 Fig. 1에서 보여주는 A174 처리보다 큰 점도 감소를 설명해준다.

셋째로, 분말간에는 van der Waals 인력이 존재하며 분말 입자가 클수록 이 인력은 증가한다. 그러나 미세한 분말은 단위 부피당 분말의 수가 많으므로 분말간의 상호작용이 더욱 중요해진다. 분말 표면에 결합된 커플링제 층의 두께만큼 분말간의 거리는 증가하고, van der Waals 인력은 감소한다. 예를 들면, L. Nyborg [13]의 결과에서, 0.2  $\mu\text{m}$ 의 입도를 가지고 0.5 nm 거리만큼 떨어진 질화규소 분말간의 인력 포텐셜은 155 kT였다. 그러나 유기물층에 의해 분말의 두께가 1.6 nm 증가하면 인력 포텐셜은 15 kT로 급격히 감소하였다. 이러한 분말간 인력 포텐셜의 감소는 분말들간의 뭉침과 응집을 방지함으로써 혼합물에서의 분말의 분산도를 향상시킨다. 그리고 혼합물의 균질도 향상은 플라스틱 자석의 자기특성 증가로 이어진다[14].

넷째로, 커플링제는 결합제와 같은 작용을 하며, 커플링제로 처리된 분말의 사용은 혼합물의 실제적인 분말충전율을 감소시킨다. 실제로 Table I의 열질량분석 결과(ashing result)에서, 커플링제로 처리된 혼합물의 분말충전율이 감소함을 확인하였다. 이렇게 감소된 분말충전율은 혼합물의 점도를 감소시키는 효과가 있다.

Table II는 커플링제 처리에 따른 혼합물의 흐름 거동 지수와 흐름도의 변화를 나타낸 것이다. Table II의 결과는 Fig. 1로부터 계산되었으며, 전단율  $1280 \text{ sec}^{-1}$ 에서의 값이다. 흐름 거동 지수  $n$ 은 전단 응력(또는 점도)과 전단율과의 관계를 나타낸다. Table II에서 양의  $n$ 값은 혼합물의 유사소성 흐름거동을 의미한다. 지수  $n$  값이 작아질수록 Fig. 1의 그래프 기울기가 증가하며, 이는 전단율에 대한 점도의 의존도가 커짐을 의미

Table II. Flow parameters

Formulation	Flow behaviour index (n)	Fluidity (1/ $\eta$ ) $\text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \times 10^{-3}$
pure PP	0.37	14.0
PP-ferrite	0.28	2.9
PP-ferrite-1.0 % A174	0.34	3.7
PP-ferrite-1.0 % TTS	0.39	5.7

한다.

점도는 흐름에 대한 저항이며, 흐름도는 점도의 역(1/ $\eta$ )으로 정의된다. 커플링제 처리에 의해 흐름도가 증가하였으며, A174보다 TTS에 의한 혼합물의 흐름도 개선 효과가 더 큰 것을 볼 수 있다. 흐름도가 클수록 플라스틱 이방성 자석에서 더 높은 배향도를 기대할 수 있으며, 이는 자기특성 향상으로 이어진다.

### 3.3 자기특성에 미치는 영향

Fig. 2와 Fig. 3은 커플링제 처리에 따른 플라스틱 자석의 잔류자속밀도와 최대자기에너지적의 변화를 보여준다. 커플링제로 처리되지 않은, 분말함량 57 vol.%의 PP-ferrite 플라스틱 자석은 인가자장 증가에 따라 자기특성이 거의 직선적으로 증가하였으며, 높은 자기특성을 얻기 위해서는 매우 큰 인가자장이 필요하였다. 커플링제로 처리된 플라스틱 자석은 낮은 인가자

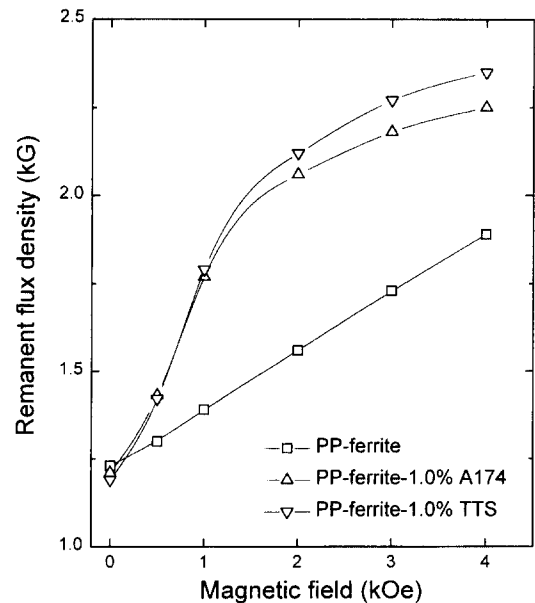


Fig. 2. Remanent flux density vs applied magnetic field for the PP / ferrite magnets.

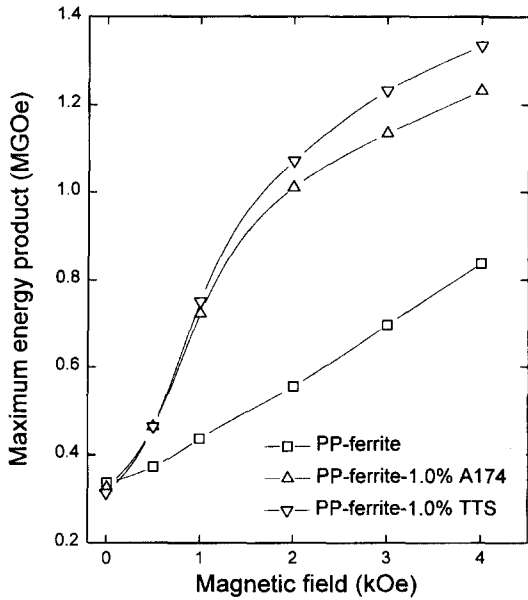


Fig. 3. Maximum energy product vs applied magnetic field for the PP/ferrite magnets.

장에서 급격한 증가를 보이다가 인가자장 2 kOe 이상에서 포화 자화값에 근접하면서 증가율이 둔화되어 완만한 증가 경향을 나타내었다. Silane A-174로 처리된 플라스틱 자석보다 titanate TTS로 처리된 자석에서 더 높은 자기특성을 나타냈으며, 이는 Fig. 1의 결과처럼 TTS 처리에 의한 혼합물의 점도 감소 효과가 더 컸기 때문이다. 인가자장 0 kOe의 등방성 자석에서 자기특성에 차이를 보이는 것은, Table I에서 보듯이, 커플링제 처리에 의해 혼합물들의 충전율이 변했기 때문이다. 등방성 자석의 자기특성은 분말충전율만의 함수이다.

Fig. 2와 Fig. 3에서 커플링제로 처리되지 않은 PP-ferrite 자석의 자기특성이 인가자장에 따라 직선적으로 증가한 것은 혼합물의 높은 점도로 인한 분말의 낮은 배향도 때문이며, 이는 Fig. 4의 결과로 명백하다.

Fig. 4는 충전율이 다른 HDPE-ferrite 자석의 잔류자속밀도를 인가자장의 함수로 나타낸 것이다. 커플링제는 사용되지 않았다. 분말충전율 약 30 vol.%까지는 혼합물의 점도가 충분히 낮아서 약 2 kOe의 인가자장에서 포화 자속밀도값에 도달하는 것을 볼 수 있다. 이는 2 kOe 정도의 인가자장에서 이미 대부분의 분말이 배향되었음을 의미한다. 그러나 그 이상의 분말충전율에서는 잔류자속밀도의 초기 증가율이 점차 둔화되면서 그래프가 포물선에서 점차 직선의 형태로 변하고

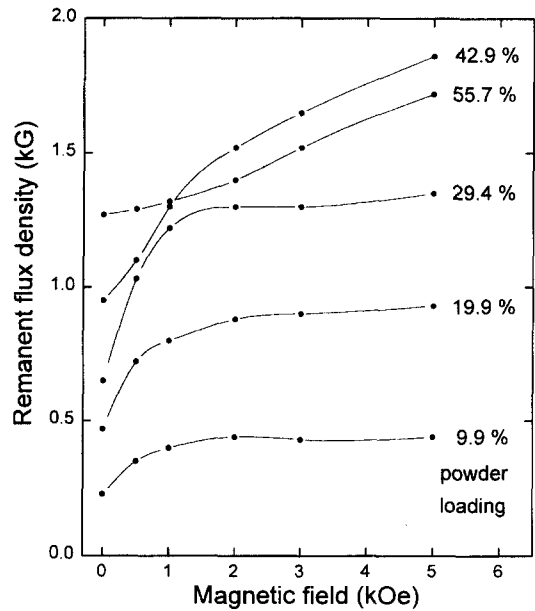


Fig. 4. Remanent flux density vs applied magnetic field for the HDPE / ferrite magnets.

있음을 볼 수 있다. 이는 혼합물의 점도가 높아 분말을 배향시키기 위해 극복해야 하는 마찰력이 크기 때문이다. 플라스틱 자석의 자기특성은 분말의 충전율과 배향도의 함수이다. 커플링제의 사용은 혼합물의 점도를 저하시켜 분말충전율을 증가시키며, 분말 표면에 형성된 윤활층이 분말간의 마찰력을 감소시켜 분말의 배향도를 향상시킨다.

Fig. 5는 커플링제 처리에 따른 플라스틱 자석의 자기이력곡선을 나타낸 것이다. 사출성형시 인가자장은

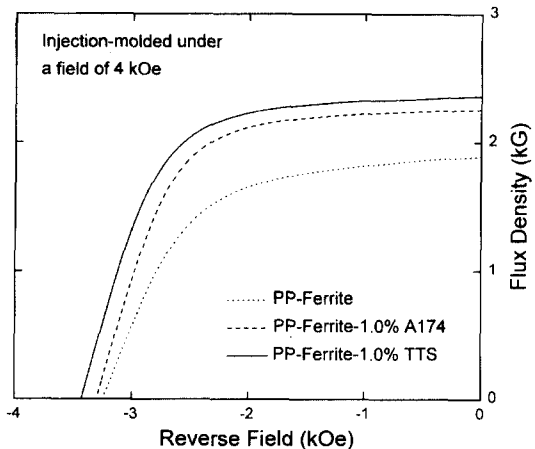


Fig. 5. Hysteresis graphs of PP/ferrite magnets.

4 kOe이었다. 잔류자속밀도의 차이는 혼합물의 점도차이로 인한 분말의 배향도 차이에 기인하며, 보자력의 차이는 분말충전율의 차이에 기인한다. 단자구 분말로 충전된 플라스틱 페라이트 자석은 분말충전율 증가에 따라 보자력은 감소하며, 충전율의 증가에 따라 보자력의 감소율은 더욱 증가한다[15]. 따라서 임계충전율 근처의 높은 충전율에서, 작은 충전율의 차이는 큰 보자력의 차이로 증폭되어 나타나게 된다. 이 보자력 결과는 Table I의 열분해 결과 및 Fig. 2와 Fig. 3의 0 kOe에서의 등방성 자기특성 결과와 정확히 일치한다.

플라스틱 자석에서 고자기 특성을 얻기 위해서는 분말의 충전율과 배향도의 극대화가 요구된다. 자기특성은 분말충전율의 증가에 따라 증가하다가 감소하여 극대값을 보이며, 이는 충전율 증가에 따른 점도 증가로 분말 배향도가 급격히 감소하기 때문이다[16]. 이 극대값의 위치는 인가자장과 혼합물의 점도에 의존한다. 인가자장의 증가에 의한 자기특성 증가에는 한계가 있으므로 혼합물의 점도 저하가 필수적이며, 본 연구 결과에서 보듯이, 커플링제에 의한 분말처리는 혼합물의 점도를 저하시킬 수 있는 효과적인 방법이었다.

#### IV. 결 론

플라스틱 페라이트 이방성 자석에서 titanate계 커플링제인 TTS의 첨가가 silane계 커플링제인 A174의 첨가보다 점도 감소 및 자기특성 증가에 더 효과적이었다. 이는, A174 분자와 비교하면, TTS 분자의 주사슬의 길이가 매우 길고 network 구조를 형성하지 않아 결합제(PP)를 더 효과적으로 가소화시키고, 분말간 거리를 더 멀게함으로써 분말간 인력포텐셜 감소효과가 더 크기 때문인 것으로 생각된다. 57 vol.% 충전율의 PP/페라이트 플라스틱 자석에서, A174 커플링제 처리에

의해 잔류자속밀도는 사출성형시 인가자장 4 kOe에서 20 % 증가하였으며, 최대자기에너지적은 47 % 증가하였다. 그리고 TTS 커플링제 처리에 의해 잔류자속밀도는 24 % 증가하였으며, 최대자기에너지적은 60 % 증가하였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] S. J. Monte and G. Sugerman, *Polym. Eng. Sci.* **24**, 1369(1984).
- [2] Idem, Titanate and Zirconate Coupling Agents, Kenrich Petrochemicals Inc., Bayonne, NJ (1985), p. 7.
- [3] L. B. Cohen, US Patent 4539048, (1985).
- [4] Bulletin KR-0975-2, Kenrich Petrochemicals Inc., Bayonne, NJ (1975).
- [5] Bulletins KR-0376-4 and KR-1076-5, Kenrich Petrochemicals Inc., Bayonne, NJ (1976).
- [6] R. B. Seymour, Additives for Plastics, Academic Press, NY, (1978), Vol. 1, pp. 123-167.
- [7] M. J. Edirisinghe and J. R. G. Evans, *Br. Ceram. Trans. J.* **86**, 18(1987).
- [8] M. S. M. Alger, *Polymer Science Dictionary*, Elsevier Sci. Publ. Co., UK, 1989.
- [9] J. G. Zhang, M. J. Edirisinghe and J. R. G. Evans, *J. Mat. Sci.* **23**, 2115(1988).
- [10] C. D. Han, T. Van Den. Weghe, P. Shete and J. R. Haw, *Polym. Eng. and Sci.* **21**, 196(1981).
- [11] M. S. Boaira and C. E. Chaffey, *Polym. Eng. and Sci.* **17**, 715(1977).
- [12] C. D. Han, C. Sandford and H. J. Yoo, *Polym. Eng. and Sci.* **18**, 849(1978).
- [13] L. Nyborg, E. Carlstrom, A. Warren and H. Bertilsson, *Powder Metall.*, **41**(1), 41(1998).
- [14] S. H. Lee, J. W. Choi, T. J. Moon and W. Y. Jeung, *J. Kor. Mag. Soc.* **8**(2), 86(1998).
- [15] W. Y. Jeung, S. H. Lee and J. W. Choi, to be published.
- [16] S. H. Lee, J. W. Choi, T. J. Moon and W. Y. Jeung, *J. Kor. Mag. Soc.* **8**(3), 150(1998).

## **Effects of Coupling Agents on the Rheological and Magnetic Properties of Plastic Ferrite Magnets**

**S. H. Lee, J. W. Choi, T. J. Moon**

*Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea*

**W. Y. Jeung**

*Center for Metal Processing, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 130-650, Korea*

(Received 30 July 1998, in final form 15 October 1998)

Effects of coupling agents on the rheological and magnetic properties of plastic ferrite magnets were investigated. Magnetic powder used was Sr-ferrite, and binder used was polypropylene (PP), and coupling agents used were  $\gamma$ -methacryloxypropyl trimethoxy silane (A174) and isopropyl triisostearoyl titanate (TTS). It was found that the addition of coupling agents to the PP/ferrite system reduced the melt viscosity and increased the magnetic properties considerably, and the treatment with TTS showed greater effect than A174 did. By comparison with that of the untreated one, the apparent viscosities of the mixtures treated with A174 and TTS decreased 23 % and 50 %, respectively, at the shear rate of  $1280 \text{ sec}^{-1}$ . Untreated plastic magnets showed remanent flux density ( $B_r$ ) of 1.89 kG and maximum energy product ( $BH_{\text{max}}$ ) of 0.84 MGOe, and A174 treated magnets showed of  $B_r$  2.25 kG and  $BH_{\text{max}}$  of 1.23 MGOe. TTS treated magnets showed  $B_r$  of 2.35 kG and  $BH_{\text{max}}$  of 1.33 MGOe.