

## 정전분무 장치를 이용한 C축 일방향 바륨페라이트( $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ) 박막형성

이 혜 문\* · 김 용 진

한국기계연구원 부설 재료연구소 기능재료연구본부

(2010년 2월 9일 투고; 2010년 3월 3일 수정; 2010년 3월 5일 게재확정)

## Preparation of C-plane oriented $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ film by electrospray deposition of colloidal precursor particles

Hye Moon Lee\*, Yong Jin Kim

Functional materials division, Korea Institute of Materials and Science

(Received 9 February 2010; received in revised form 3 March 2010; accepted 5 March 2010)

### Abstract

New process consisting of electrospray and epitaxial crystal growth processes was applied to the preparation of c-plane oriented barium ferrite ( $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ) thin film for high density magnetic recording media. Sodium citrate aided process was proper to preparation of amorphous  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  nanoparticles with geometric mean diameter of 3 nm and geometric standard deviation of 1.1. The electrospray was applicable to the prepare of amorphous  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  thin film on a substrate, and the film thickness could be controlled by adjusting the electrospray deposition time. The c-plane oriented  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  thin film was successfully prepared by 3 step annealing process of the  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  amorphous film on a sapphire( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) substrate; annealing at 350°C for 30 min, annealing at 500°C for 30 min, and annealing at 700°C for 60 min.

**Keywords** : Barium ferrite, Electrospray deposition, Epitaxial crystal growth, Magnetic nanoparticles

### 1. 서 론

육각관상의 결정 구조를 지니는 바륨페라이트( $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ )는 매우 높은 자기결정 비등방성(magnetocrystalline anisotropy)과 퀴리온도(curie tem-

perature)를 지닐 뿐만 아니라 화학적 내식 및 내마모 특성이 뛰어나고 우수한 자기특성을 지녀 FePt와 더불어 고용량 수직 자기기록 매체용 원료소재로 매우 유용하게 사용될 수 있는 대표적 원료소재로 간주되고 있다 (Yu and Lin, 2004; Fu *et al.*, 2003; Liu *et al.*, 2005; Lee *et al.*, 2008).  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ 를 고용량 자기기록 매체 제조에 활용하기 위해서는 첫째 바륨페라이트 결정격자의 크기를 나노미터 크기

\* Corresponding author.

Tel : +82-55-280-3519, E-mail : hylee@kims.re.kr

유지시켜야 하며, 둘째 기관상의 결정격자 방향을 C축에 수직방향으로 정렬하는 기술이 필요하다.

Pulsed laser deposition(PLD)과 스퍼터링 공정은 위와 같은 2가지 요구사항을 만족시키는 박막 제조에 매우 유용한 방법으로 소개되고 있어 최근에는 BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> 고용량 자기기록 매체 개발에 PLD 및 스퍼터링 공정을 활용하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다. Rafique *et al.* (2008)은 PLD 공정을 통해 사파이어 기관에 결정방향이 C축으로 정렬된 BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> 박막을 형성시킨 바 있으며, Hylton *et al.* (1993)은 스퍼터링 및 후열처리 공정을 통해 동일 방향으로 결정이 정렬된 BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> 박막을 제조한 바 있다. PLD 및 스퍼터링 공정은 BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> 나노입자를 기관위에 고르게 침착시키는 데 매우 효과적이었으나 모두 진공 분위기를 필요로 하는 기술로 제조 공정이 비교적 복잡하고 공정비용 또한 비싸다는 단점을 지니고 있다. 즉 보다 간단하고 경제적인 방법으로 고용량 자기기록 매체 제조하기 위해서는 상압 분위기에서 비교적 짧은 시간에 BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> 나노입자를 특정 기관 상에 고르게 침착시키는 기술과 결정방향을 C축 일방향으로 균일하게 정렬하는 기술이 필요하다.

정전분무장치(electrospray system)는 콜로이드 상태의 나노입자를 에어로졸 상태로 기상에 고르게 분산시키는 데 매우 유용하게 활용된다. 에어로졸 상태로 분산된 나노입자는 다량의 단위 하전수(number of elementary unit charge)를 지닌 입자간 응집이 최소화될 수 있으며 접지 또는 반대 극의 전압이 인가된 기관에 균일하게 침착되므로 최근에는 정전분무장치를 이용한 기능성 나노입자 침착기술 등 다양한 연구가 진행되고 있다 (Lee *et al.*, 2007; Lenggoro *et al.*, 2006). 또한 자성 박막을 구성하는 미세 격자의 자기방향은 결정방향과 일치하는 특성을 지닌다. 즉 박막을 구성하는 격자들의 결정방향을 동일 방향으로 제어할 경우 자기력의 방향 또한 특정방향으로 균일 제어가 가능하다. 특정 기관에 침착된 나노 격자의 결정을 특정방향으로 균일하게 제어하기 위해서는 침착된 나노입자와 동일한 결정 구조를 지닌 기관을 사용하여 열처리 과정을 수행하는 에피택셜 결정 성장(epitaxial crystal growth) 방법이 매우 유용하게 사용되고 있다. 본 연구에서는 상압 분위기에서 비교적 간단한 방법으로 고용량

자기기록 매체용 C축 일방향 나노구조 BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> 박막을 형성하기 위해 정전분무법과 에피택셜 결정 성장 방법을 복합적으로 활용한 실험 연구를 수행하였다.

고용량 자기기록 매체용 C축 일방향 나노구조 BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> 박막을 형성하기 위해 활용된 기초 소재는 sodium citrate aided 방법으로 제조된 콜로이드 상태의 BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> 비정질 나노입자가 사용되었으며, 정전분무법과 에피택셜 결정 성장 방법을 통해 만들어진 BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> 박막에 대해서는 결정구조 및 방향 그리고 자기 특성 분석을 수행하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 Sodium citrate aided법에 의한 비정질

#### BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> 나노입자 제조

비정질 BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> 나노입자 제조를 위해 Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·9H<sub>2</sub>O (Aldrich; ≥99%), BaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O (Aldrich; ≥99%), Na<sub>3</sub>C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>O<sub>7</sub>·2H<sub>2</sub>O (Aldrich; ≥99%)를 증류수에 녹여 0.7M의 Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>, BaCl<sub>2</sub>, Na<sub>3</sub>C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>O<sub>7</sub> 용액을 각각 제조하였다. 둥근 바닥 플라스크에 제조된 Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 용액 120mL와 BaCl<sub>2</sub> 용액 10mL를 넣고 교반하면서 130mL의 Na<sub>3</sub>C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>O<sub>7</sub> 용액을 첨가하고 9N 농도의 NaOH용액을 이용하여 pH를 약 10으로 조절하며 Ar 분위기 100°C에서 약 3시간동안 반응시켰다. 반응용액이 붉은 갈색으로 변하게 되면 수화반응이 완전히 끝난 것으로 상온에서 냉각시킨 후 수세과정을 통해 반응 부산물을 제거하고 최종적으로는 EtOH에 분산된 비정질 상태의 BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> 나노입자를 함유한 콜로이드 서스펜션 용액을 제조하였다.

### 2.2 C축 일방향 BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> 박막 형성

C축 일방향의 결정구조를 지니는 BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> 박막 형성을 위해서는 BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>와 동일한 육각관상의 결정구조를 지니는 기관에 2.1에서 합성한 비정질 상태의 BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> 나노입자를 균일 코팅하는 기술과 코팅된 비정질 BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> 나노입자를 기관의 결정방향과 동일한 방향의 결정을 형성하기위한 열처리 기술이 필요하다.

그림 1은 본 연구에서 사용된 나노입자 균일코팅

및 결정화에 활용된 정전분무코팅 및 열처리 과정을 개략적으로 나타낸 그림이다. 정전분무코팅 장치는 크게 시린지 펌프와 시린지로 구성된 콜로이드 서스펜션 용액 공급 부와 전압인가를 통한 서스펜션 용액의 분무 액적화 부, 그리고 분무된 액적을 특정 기판에 박막화하는 코팅 부로 구성된다.  $BaFe_{12}O_{19}$  나노입자를 함유한 콜로이드 서스펜션 용액은 고정밀 제어가 가능한 시린지 펌프(model PHD 2000, Harvard apparatus)에 의해 약 125 $\mu$ m 내径의 스테인레스 시린지 튜브로 공급된다. 이때 서스펜션 용액의 안정한 정전분무를 위해 약 3000~5000 V의 양극 직류전압을 콜로이드 용액에 인가하여 분무상태를 콘젯(cone-jet) 모드로 유지하였다. 정전 분무된 콜로이드 용액의 액적은 스테인리스 튜브 끝에서 약 3~4cm 거리에 놓인 가로, 세로 각각 10mm 크기의 기판에 정전기력에 의해 침착되도록 하였으며 이때 사용된 기판은  $BaFe_{12}O_{19}$ 과 동일한 육각판상의 결정구조를 지닌 사파이어( $Al_2O_3$ ) 소재를 사용하였다.

기판에 침착 코팅된 비정질 입자의 결정 방향은 비정질 입자 코팅층 두께 및 열처리 온도에 따라 결정될 수 있다. 그러므로 본 실험에서는 0~120분 범위에서 정전분무 코팅 시간을 제어하여 비정질  $BaFe_{12}O_{19}$  막의 두께를 변화시켰으며, 결정화를 위한 열처리는 700 $^{\circ}$ C(승온속도 700 $^{\circ}$ C/시간), 800 $^{\circ}$ C(승온속도 800 $^{\circ}$ C/시간)에서 수행하였다.

### 2.3 특성분석

Sodium citrate aided법에 의해 제조된 비정질 상태의  $BaFe_{12}O_{19}$  나노분말의 크기 및 형상은 투과전자현미경(TEM; JEOL, JEM-2100F)을 통해서 관찰하였으며,  $BaFe_{12}O_{19}$ 의 합성 여부 및  $BaFe_{12}O_{19}$  박막의 결정방향 확인은 X-선 회절분석 장치(XRD; Rigaku D/Max 2200)를 이용하여 수행하였다. 또한 vibrating sample magnetometer(VSM; Lakeshore, 7400S)를 이용하여 사파이어 기판에 형성된  $BaFe_{12}O_{19}$  박막의 자기적 특성을 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

그림 2 (a)와 (b)는 각각 sodium citrate aided법에 의해 제조된 비정질 상태의  $BaFe_{12}O_{19}$  입자의 형상을 관찰할 수 있는 TEM 사진과 열처리 전후의 XRD 패턴을 보여준다. 합성된 입자는 구의 형상을 보이고 있으며 약 3nm의 평균 입경과 입경 간 기하 표준편차 값이 약 1.1을 보여 매우 균일한 크기로 합성되었음을 알 수 있다. 또한 XRD 패턴을 살펴보면 합성분말을 알루미늄나 도가니에 넣고 공기 분위기 약 800 $^{\circ}$ C에서 100분간 열처리할 경우 비정질 상태에서 hexaferrite 결정구조를 지니는  $BaFe_{12}O_{19}$  입자가 형성되는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과를 종합해 볼 때 본 연구에 이용된 sodium citrate aided법은 균일한 크기의 비정질  $BaFe_{12}O_{19}$  나노입자를 합

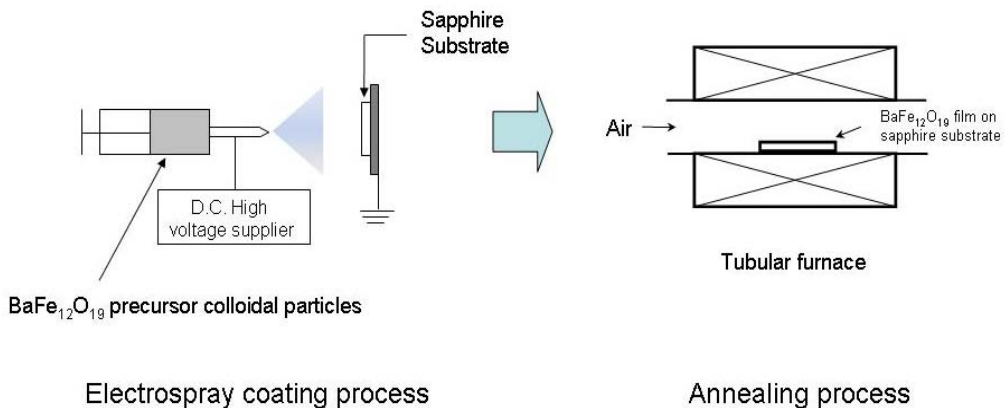


Figure 1. Electro spray coating and post annealing processes for preparation of c-plane oriented  $BaFe_{12}O_{19}$  film on a substrate

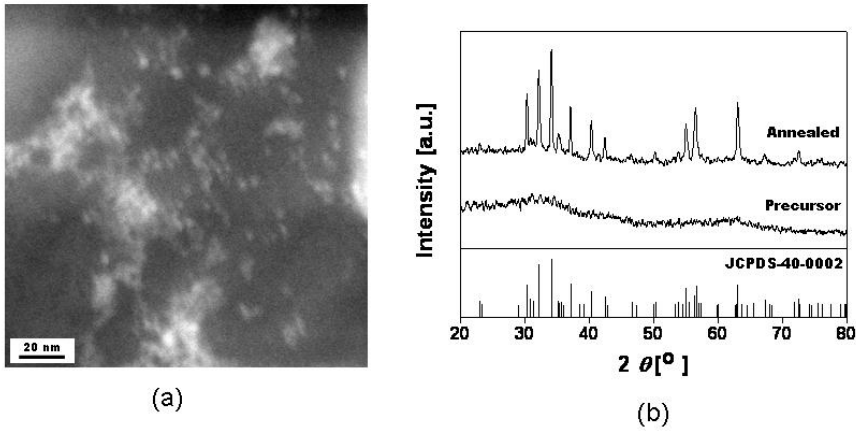


Figure 2. TEM image of the precursor particles (a) and XRD patterns of BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> particles as-synthesized and annealed at 800°C (b).

성하는 데 매우 효과적이었음을 알 수 있다.

Sodium citrate aided 방법으로 제조된 비정질 BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> 나노입자를 함유하는 콜로이드 용액은 정전분무 코팅 공정을 통해 0001 방향으로 결정이 제어된 사파이어 기판위에 박막으로 침착되었으며, 침착된 비정질 입자를 기판과 동일 방향으로 결정형성을 유도하기 위해 열처리 조건을 최적화 하였다. 그림 3은 정전분무코팅이 수행된 시간에 따라 기판에 형성된 비정질 BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> 막을 보여주는 것으로 코팅 시간이 길수록 기판에 형성된 막의 색이 짙은 갈색으로 변화하는 것을 볼 수 있어 막의 두께는 코팅 수행 시간에 따라 효과적으로 제어될 수 있음을 간접적으로 확인할 수 있었다.

정전분무코팅 시간에 따라 형성된 BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> 박막을 각각 열처리한 샘플의 결정구조를 XRD 분석을 통해 조사하였다. 그림 4 (a)와 (b)는 정전분무코팅 공정을 통해 비정질 상태의 BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> 나노입자를



Figure 3. BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> films on sapphire(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) substrate at various electro-spray coating times

사파이어 기판에 약 10~100분간 코팅하고 이를 각각 700°C 그리고 800°C에서 100분간 열처리를 수행한 후 샘플의 XRD 패턴을 보여준다. 그림 2(b)에서 보듯이 다양한 방향으로 성장한 BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> 분말의 결정구조와는 다르게 사파이어 기판의 샘플은 대부분의 결정이 0001 방향으로 성장한 것을 확인할 수 있다. 그러나 사파이어 기판의 샘플에서는 샘플링 시간에 상관없이 즉 코팅필름 두께와 관계없이 약 28도 그리고 39도의 2θ에서 미지의 결정 피크가 약하게 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 열처리 온도가 800°C이었을 때의 샘플에서 좀 더 명확하게 볼 수 있다. 2θ 값이 39도에서 나타나는 미지의 피크는 샘플링 시간이 길수록 다시 말해서 사파이어 기판에 침착된 비정질 BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> 필름의 두께가 두꺼워질수록 그 강도가 커지는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 열처리 과정 중 육각관상 결정구조를 지닌 BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>뿐만 아니라 미지의 불순물 결정이 일부 생성되었기 때문으로 생각된다. Kim *et al.* (2007)에 의하면 sodium citrate aided 방법으로 제조된 비정질 BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> 입자에는 hydroxyl 그룹의 물질과 citrate 복합물이 상당량 잔류한다. 불순물 생성의 원인을 본 연구에서 명확히 밝히기는 어렵지만 열처리 전 기판에 침착된 비정질 BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> 입자 외 hydroxyl 그룹의 물질과 citrate 복합물이 열처리 과정 중의 불순물 결정 형성에 영향을 미쳤으리라 판단되어 불순물 결정화 형성 전에 hydroxyl 그룹의 물질과 citrate 복합물을 완전히 열분해할 수 있도록 열처

리 조건을 다음과 같이 최적화하였다. 실험 결과를 종합해 볼 때  $700^\circ\text{C}$  그리고  $800^\circ\text{C}$ 로 열처리 된 샘플의 XRD 분석결과 샘플링 시간은 30분, 열처리는 비교적 낮은 온도에서 수행하는 것이 불순물에 대한 패턴의 강도가 가장 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한 본 연구에서 제조된 비정질  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  입자에 대해서 TG-DTA 열분석을 수행한 결과(그림 5) hydroxyl그룹의 물질과 citrate 복합물은 각각  $220^\circ\text{C}$ 와  $500^\circ\text{C}$ 에서 발생한 열분해로 인해 질량감소가 일어나는 것을 알 수 있으며 약  $670^\circ\text{C}$  부근에서 발열반응을 보여 비정질 상태의  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ 가 육각관상

의 결정구조로 변화되는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과를 바탕으로 30분간 샘플링한 사파이어 기판을  $350^\circ\text{C}$ 에서 30분,  $500^\circ\text{C}$ 에서 다시 30분간 열처리하여 hydroxyl그룹의 물질과 citrate 복합물을 완전히 열분해 제거한 후, 침착된 비정질  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  나노입자의 결정화를 위해  $700^\circ\text{C}$ 에서 1시간 동안 열처리를 수행하였다. 그림 6과 7은 각각 개선된 열처리 조건에서 000l 사파이어 기판위에 형성된 막의 XRD 패턴과 VSM 분석을 통해 측정된 자기이력곡선(Hysteresis loop)을 보여준다. 개선된 열처리 과정을 거친 샘플의 XRD 패턴에서는 앞선 결과에서 나

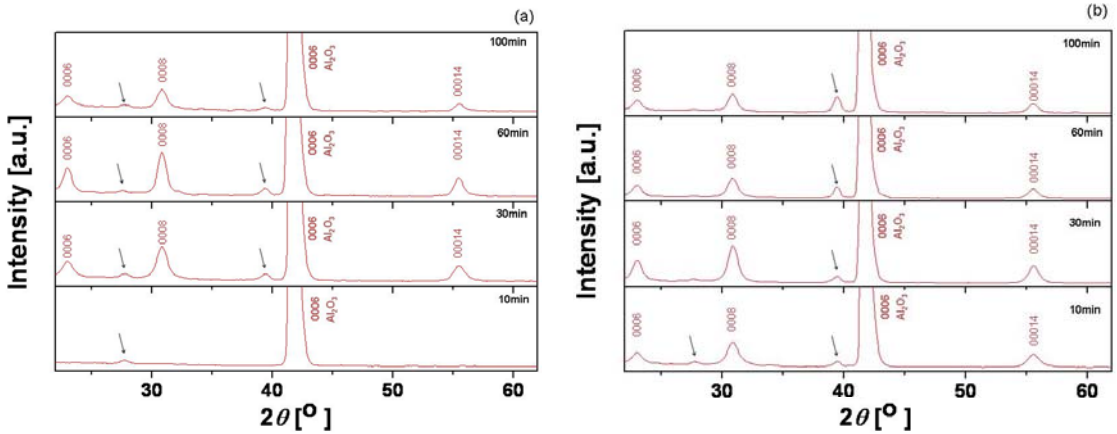


Figure 4. XRD patterns for  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  thin films annealed at  $700^\circ\text{C}$  (a) and  $800^\circ\text{C}$  (b) for 100 min.

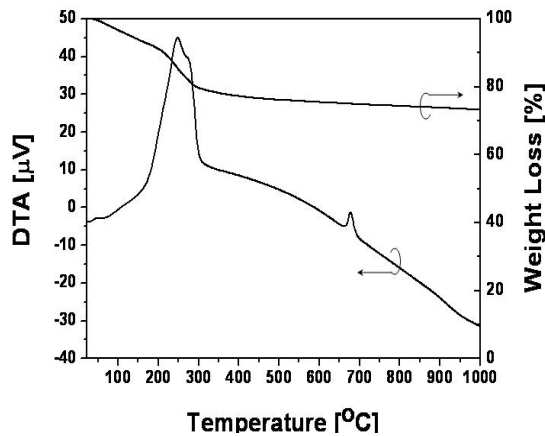


Figure 5. Thermal gravimetric (TG) and differential thermal analysis (DTA) curves for as synthesized  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  nanoparticles.

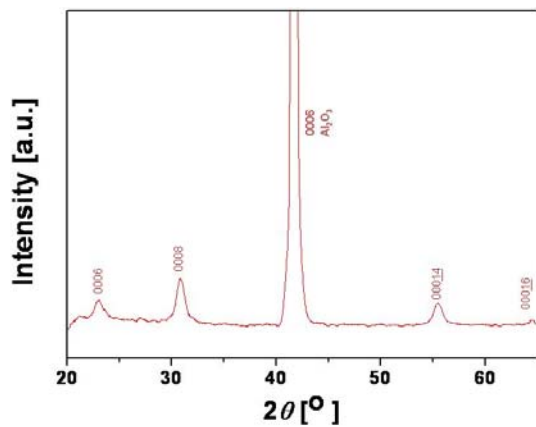


Figure 6. XRD pattern for  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  thin film annealed at  $350^\circ\text{C}$  for 30 min,  $500^\circ\text{C}$  for 30 min, and  $700^\circ\text{C}$  for 60 min.

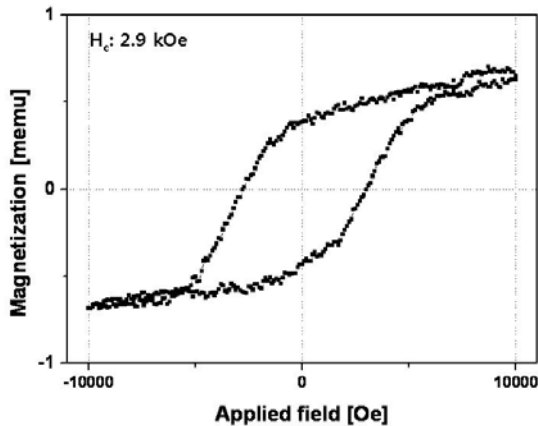


Figure 7. Magnetization hysteresis loop for  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  thin film annealed at  $350^\circ\text{C}$  for 30 min,  $500^\circ\text{C}$  for 30 min, and  $700^\circ\text{C}$  for 60 min.

타났던 불순물 결정 패턴은 사라지고 모든 결정이 사파이어 기판과 같은 0001 방향으로 성장한 것을 확인할 수 있었다. 자기적 특성을 알 수 있는 히스테리시스 루프를 보면  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  박막 두께가 약 400nm로 매우 얇아 매끄러운 곡선으로 이루어지는 않았지만 보자력(magnetic coercivity)은 약 2900 Oe로 비교적 높은 자기 특성을 보였으며, 이는 본 연구에서 사용된 정전분무법과 에피텍셜 결정 성장법이 고용량 자기기록 매체에 필요한  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  박막 형성에 활용 가능성이 있음을 보여주는 결과라 할 수 있다.

$\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  박막을 고용량 자기기록 매체로 활용하기 위해서는 자기장과 수직 및 수평 방향에 따른 박막의 자기특성이 서로 다른 자기 이방성을 보여야 하나, 본 연구를 통해 제조된  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  박막에서는 자기 이방성을 명확하게는 확인할 수 없었다. 이는 제조된  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  박막의 결정이 C축으로 정렬되어 있다는 XRD 분석 결과를 고려할 때 박막의 결정방향 문제라기보다는 박막의 두께가 너무 얇아 자기장과 수평방향의 자기특성이 정확하게 측정되지 않았기 때문이라 판단된다. 그러나 본 기술을 고용량 자기기록매체 제조에 활용하기 위해서는 보다 정밀한 방법으로 제조 박막의 자기 이방성을 확인하는 것이 반드시 필요하다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 정전분무(electrospray) 방법과 에피텍셜 결정 성장(epitaxial crystal growth) 방법을 복합적으로 사용하여 상압 분위기에서 고용량 자기기록 매체용  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  박막 형성을 위한 기초연구를 시도하였다. Sodium citrate aided 공정을 통해 약 3nm 크기의 구형  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  비정질 입자를 효과적으로 합성할 수 있었다. 정전분무 코팅 공정을 통해 비정질  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  나노입자 박막이 성공적으로 형성할 수 있었으며 박막의 두께는 코팅 공정 시간에 따라 효과적으로 제어됨을 알 수 있었다. 0001 방향의 사파이어 기판에 형성된 비정질  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  박막의 C축 일방향 결정화를 위해서는 1 단계 열처리 보다는 sodium citrate aided 공정을 통해 제조된 비정질  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  입자에 함유되어 있는 hydroxyl 그룹의 물질과 citrate 복합물을  $350^\circ\text{C}$ ,  $500^\circ\text{C}$ 에서 완전히 제거한 후  $700^\circ\text{C}$ 에서 결정화를 이루는 것이 효과적임을 확인할 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 한국기계연구원 부설 재료연구소 기본연구사업의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- Fu, L., Liu, X., Xhang, Y., Dravid, V.P., and Mirkin, C.A. (2003). Nanopatterning of "hard" magnetic nanostructures via dip-pen nanolithography and sol-based ink, *Nanoletters*, 3(6), 757-760.
- Hylton, T.L., Parker, M.A., Coffey, K.R., Howard, J.K. (1993). Properties of epitaxial Ba-hexaferrite thin films sapphire substrates, *Journal of Applied Physics*, 73(10), 6257-6259.
- Kim, S.-G., Wang, W.-N., Iwaki, t., Yabuki, A., and Okuyama, K. (2007). Crystallization of barium ferrite nanoparticles by a sodium citrate-aided

- synthetic process, *The Journal of Physics and Chemistry C.*, 111(28), 10175-10180
- Lee, H.M., Bae, S.-Y., Yu, J.-H., and Kim, Y.-J. (2008). Preparation of unsintered spherical  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  nanoparticles via an alcohol-assisted spray-pyrolysis route, *Journal of The American Ceramic Society*, 91(9), 2856-2861.
- Lee, H.M., Kim, S.-G., Matsui, I., Iwaki, T., Iskandar, K., Lenggoro, I.W., and Okuyama, K. (2007). Monolayer deposition of L10 FePt nanoparticles via electrospray route, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 313(1), 62-68.
- Lenggoro, I.W., Lee, H.M., and Okuyama, K. (2006). Nanoparticles assembly in patterned "plus/minus" surface from electrospray of colloidal dispersion, *Journal of Colloid and Interface Science*, 303(1), 124-130.
- Liu, X.H., Hong, M.H., Song, W.D., Chen, G.X., Lam, H.M.J., Wang, J.P., and Chong, T.C. (2005). Barium ferrite ( $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ) thin films prepared by pulsed laser deposition on MgO buffered Si substrates, *Applied Physics A*, 80(3), 611-614.
- Rafique, M.S., Khaleeq-ur-Rahman, M., Saif-ur-Rehman, Anjum, S., Anwar, M.S., Bhatti, K.A., Saeed, S., and Awan, M.S. (2008). Effect of external magnetic field on the deposition of  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ , *Vacuum*, 82, 1233-1237.
- Yu, H.-F. and Lin, H.-Y. (2004). Preparation and thermal behavior of aerosol derived  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  nanoparticles, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 283(1-2), 190-198.