

# 자기 garnet film을 이용한 철단결정의 자기관측법과 응용

이재광 · 김철성

국민대학교 자연과학대학 물리학과

서울 성북구 정릉동 861-1, 136-702

(1995년 7월 5일 받음, 1995년 9월 1일 최종수정본 받음)

자성물질의 자구를 관측하고, 표면의 자기전하를 측정하는 간단하면서도 정량적인 방법을 제시하였다. 관측방법은 자기 garnet film을 사용하며, 이 방법을 이용하여 {100} 철단결정 표면의 자구를 관측할 수 있었다. garnet film의 자구는 garnet 면과 수직인 자기장에 의해서만 변하고 임계 자기장에서는 사라진다. 그러나, 철단결정의 자구는 단결정 표면에 평행하게 걸어진 자기장에 대하여서는 영향을 받지만 수직하게 가한 자기장에는 아무런 영향을 받지 않는다. 위와 같은 성질을 이용하여 철단결정과 평행한 자기장을 가할 때 철단결정의 자구에 유도된 전하에 인하여 garnet film의 자구가 변화하며, 이 garnet film의 자구는 편광된 빛을 이용하여 직접 관측할 수 있다. 이 방법으로 철단결정의 표면에 유도 되는 자기전하 분포를 측정할 수 있었고, 또한 단결정에 걸어진 전류가 변할때 단결정 자구의 움직임을 관측할 수 있었다. 이 관측한 결과를 이용하여 철단결정에 전류를 가할 때의 비대칭적으로 유도되는 교류 자기감수율 실험의 결과를 설명할 수 있었다.

## I. 서 론

최근 들어 자기저항 측정에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이것은 자기박막을 이용한 magnetic head와 magnetic sensor 등의 사용 범위가 광범하기 때문이다. 자기저항의 변화는 전류의 방향과 자성물질 내부의 자기화 방향과의 관계에 의하여 결정되며, 이러한 이유로 자기저항 측정에서 표면의 자기화 변화를 이해하는 것은 매우 중요하다. 표면의 자구를 관측하기 위하여, Bitter의 방법[1], 고배율 Kerr microscopy[2]나, 편광 분석기를 이용한 scanning electron microscopy (SEMPA)[3] 등과 같은 방법이 사용되고 있다. Bitter의 방법을 사용시, ferrite의 입자나 물 때문에 시료를 장기간 사용할 수 없는 불편한 점이 있으며, SEMPA나, Kerr microscopy 등은 유지와 관리에 많은 비용이 필요하다.

고온 초전도 물질의 내부 자기장을 측정하기 위하여 자기 garnet film이 사용되고 있다. 이 자기 garnet film은 자기 bubble memory를 위하여 만들어 졌으며, 이 film의 자기화 방향은 garnet 면과 수직 혹은 garnet 면에 위치한다. 자기화 방향이 garnet 면에 수직인 자기구조를 가진 garnet film은 bubble 자구의 폭이 garnet 면에 가해진 수직 방향의 자기장 크기에 의하여 증감 함을 나타내며, garnet의 자구는 수직 방향으로 가해진 임계 자기장에서 정확히 소멸된다. 또한 bubble 자구의 폭에 의하여 임계 자기장의 크기가 결정된다. 그러나 garnet 면과 수직인 방향의 자기화를 가진 garnet film은 garnet 면

에 평행하게 가한 자기장에는 영향을 받지 않는다. 이러한 성질을 이용하여 초전도 물질의 표면에 형성된 자기장을 garnet film을 이용하여 측정한다.

자화물질에 자기장을 걸어 주면, 자화물질 내부의 자기장을 줄이기 위하여 자기전하가 유도된다. 유도된 자기전하는 자화물질의 체적자기전하밀도  $\rho_M$  혹은 표면자기전하밀  $\sigma_M$ 로 표현되며, 유도된 자기전하는 대부분 자화물질의 표면에 위치한다[4]. 이 표면전하는 다음과 같이 정의된다:  $\rho_M = \hat{n} \cdot \vec{M}$ . 여기서  $\hat{n}$ 은 자화물질 표면에 수직 방향을 나타내며,  $\vec{M}$ 은 이 물질의 자기화를 나타낸다. 그러므로 자화물질의 수직인 자기화를 측정하면 표면 자기전하를 알 수 있다. 이러한 성질을 이용하여, 포화자기화가 큰 자화물질의 표면에서 자기구조나 자장에 의하여 자성물질의 표면에 유도되는 자기전하를 측정할 수 있다.

이 논문에서는 garnet film을 이용한 새로운 자기관측 방법을 제시하고, 이 방법을 이용하여 {100} 철단결정 표면에서의 자기구조의 변화를 관측하려 한다. 철단결정에 걸어진 자기장과 전류의 변화시 자화물질의 표면 자구를 관측 함으로써 교류 자기감수율 실험에서 이해하지 못했던 실험 결과를 설명하려 한다[5]. garnet film의 자기화와 자화물질 표면에 수직인 자기화와의 관계를 이용하여, 철단결정 표면의 자기화를 측정할 수 있으며, 이 측정으로부터 표면 자기전하를 알 수 있다. garnet film을 이용한 자기관측 방법은 ferrite 입자를 이용한 Bitter의 방법을 대신하여 포화자기화(staturation magnetization)가 큰 자화물질의 표면 자기관측에 사용 될 수 있을 것이다.

## II. 실험

자기전하와 자기관측을 위하여 사용한 시료는 {100} 철 단결정으로, 크기는  $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m} \times 0.5\ \text{cm}$ 이다. 철 단결정은 간단한 Landau 자기구조를 지니고 있으며[1], 이 구조는 교류 자기감수를 실험으로 확인 하였다. 철의 포화자기화(saturation magnetization)는 1716 Oe이며, 사용한 시료 중앙에서의 임계 자기장(departure field)는 15 Oe이다. 실험에 사용한 garnet film은 Russia에서 제조된 것으로, 상업적으로 미국에서 구입 하였다. 이 film의 bubble 자기 폭은  $2\ \mu\text{m}$ 이고, garnet 면

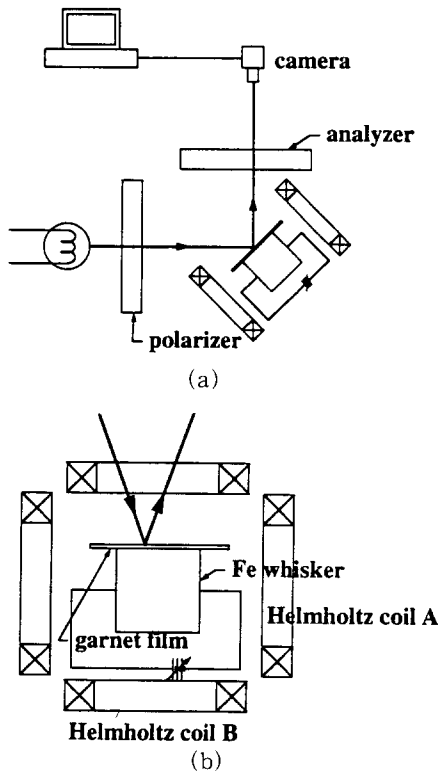


Fig. 1. (a) Schematic diagram for the domain observation using a magnetic garnet film. The lamp, the polarizer, and the analyzer are parts of a microscope. (b) Detailed diagram of (a) near the whisker. Helmholtz coil A is designed to generate a homogeneous magnetic field parallel to the principal axis of the {100} whisker and Coil B is for the field perpendicular to the axis of the whisker.

과 수직인 방향의 자기화를 가지고 있으며, 임계 자기장의 크기는 6 Oe이다. film과 철단결정의 좋은 접촉을 위

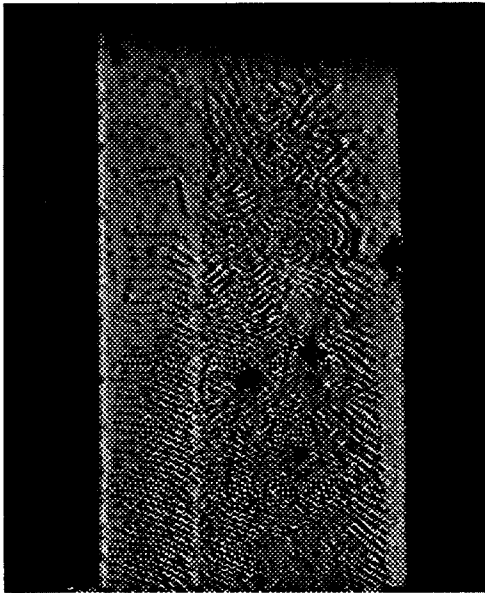
하여, 현미경 slide에 사용되는 기름을 이용하였다. garnet과 철단결정의 접촉이 좋으면 garnet film을 통하여 garnet과 철단결정 사이에 간섭무늬를 관측할 수 있다. 이 기름은 또한 공기로부터의 철 산화를 방지하여 준다.

자기관측과 자기전하 측정을 위한 측정장치는 Fig. 1과 같이 설치 하였다. 램프에서 나온 빛이 편광판을 통과한 후, 편광된 빛은 현미경을 통과하고, 이 빛이 garnet 면의 수직 자기화와 산란 후, 다시 분석기를 지난 후 garnet의 자구를 육안으로 관측이 가능하다. 또는, garnet film 면의 자기화 정보를 가지고 있는 편광된 빛을 CCD 카메라에 의하여 computer로 수집할 수 있다. {100} 철 단결정의 자기 변화를 위하여 단결정의 중심축과 평행한 방향에 자기장을 가해주기 위하여 Helmholtz coil A을 설치하였다. 그러나, 충분히 자화되지 않는 한, garnet 내부의 자기구조를 변화 시키기에는 유도되는 수직 자기량이 너무 작으므로, 또 하나의 Helmholtz coil B을 철 단결정의 중심축과 수직인 방향으로 설치하였다. 이 coil을 이용하여 garnet film 면에 수직인 방향으로 자기장을 가할수 있게 장치 하였다. garnet film 면에 임계 자기장 근처 까지 수직하는 자기장을 걸어준 상태에서는, 철단결정의 표면에 형성되는 작은 자기장 변화의 관측이 가능하다. coil과 시료의 상세한 배치는 Fig. 1(b)에 나타나 있으며, 표면 자기장의 크기는 garnet film으로 부터 CCD 카메라에 들어온 빛의 밝기에 의하여 결정된다.

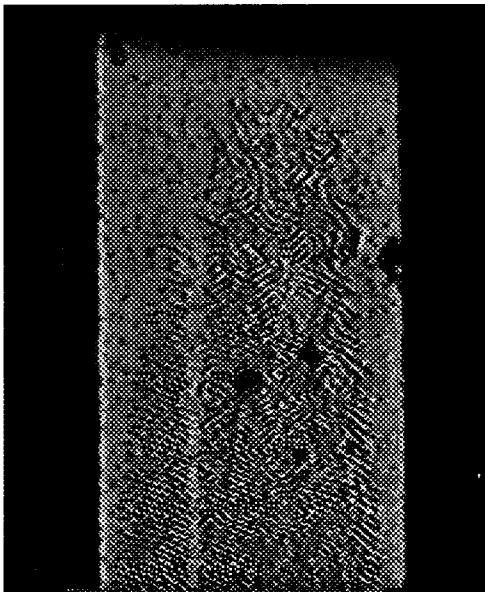
## III. 실험 결과 및 고찰

본 실험을 가능하게 한 것은, garnet과 철단결정의 자기장에 대한 성질 때문이다. garnet film은 garnet면에 수직인 방향으로 가한 자기장에 의해서만 garnet의 자구가 영향을 받을 뿐, 수평 방향으로 가한 자기장에는 아무런 영향을 받지 않는다. 반면, {100} 철단결정의 자기 표면과 수직 방향의 자기장을 걸어 주더라도 단결정의 자기구조나, 자기화에 변화를 주지 않으나, 단결정의 중심축에 평행하게 가해진 외부 자기장에 의해서만 단결정의 자구가 변화된다. 다시말해, Helmholtz coil B로부터 가해지는 수직 방향의 자기장은 garnet에만 영향을 주므로, 수직 자기장을 변화시켜 garnet film의 bubble 자구를 볼 수 있게 자기장을 설치하여도, 철단결정의 자구에는 아무런 영향을 주지 않는다. 한편 다른 Helmholtz coil A에서 형성된 자기장은 철단결정에만 영향을 줄 뿐, garnet film의 자구에는 아무 영향을 주지 않는다.

Fig. 2는 garnet film을 이용하여 {100} 철단결정 표면의 자구를 관측한 사진이다. Fig. 2(a)를 위하여 단결정



(a)



(b)

Fig. 2. Domain structures observe with a magnetic magnetic garnet film while magnetic field for (a) 2 Oe and (b) 4 Oe perpendicular to the garnet surface and the field, 6 Oe, is applied along the principal axis of the whisker.

의 중심축과 평행하게 6 Oe의 자기장과, 수직 방향으로 2

Oe를 동시에 가하였다. Fig. 2(b)는 Fig. 2(a)와 같은 평행한 자기장과 4 Oe의 수직한 자기장을 걸어 주었다. Fig. 2는 garnet film의 자구에 의하여 형성된 것이며, maze pattern의 자구가 없는 곳은 garnet의 자구가 포화된 것을 나타내며, 이것은 곧 철단결정 표면의 수직성분 자기화가 큰 곳을 의미한다. 단결정과 평행한 자기장에 의하여 철단결정이 자화되므로, 단결정 양단과 자구벽에 표면 자기전하가 유도되며, 이 표면의 자기전하가 garnet film의 자구에 수직한 자기장을 형성한다. 이때 유도된 수직성분의 자기장에 의하여 garnet의 자구 폭이 변화하게 되며, 유도된 자기장이 충분히 크면 garnet의 자구는 소멸한다. 철단결정의 중심에 garnet film의 자구가 없는 곳은 철단결정의 자구벽이 있는 곳을 나타낸다. 단결정에 수직한 방향의 자기장을 변화시켜도, Fig. 2(a)와 (b)에 나타난 것과 같이 단결정의 자구벽에는 아무 영향을 미치지 않으나, garnet film 자구의 증감이 잘 나타나 있다. 철단결정에 평행한 방향의 자기장을 변화시키면 자구벽이 좌우로 움직이는 것이 관측 되었다. 또한 단결정에 자기장을 가한 후 단결정 표면의 관측 위치를 단결정의 한 끝에서 다른 끝으로 변화시킬 때, garnet film을 통하여 관측한 철단결정 표면이 흰색에서 검정색으로 변화하는 것을 관측할 수 있었다. 이것은 단결정의 중심축에 평행한 자기장을 가함으로써 철단결정의 양 끝에 유도된 표면전하가 다른 부호를 가짐을 의미한다.

{100} 철단결정에 외부 자기장이 없이 전류를 임계 전류 이상의 전류로부터 반대 방향의 임계 전류 이상의 값으로 변화시킬 때의 교류 자기감수율은 Fig. 3(a)와 같이 나타난다. 자기감수율의 큰 증감은, 자구가 한 안정된 자구 상태에서 다른 안정된 상태로 변화함으로써 발생한다. 다시말해, 이 변화는 철단결정의 자구가 전류에 의하여 변화한 자구상태에서 Landau와 같은 자구로, 다시 변화한 자구상태로 변환하므로써 유도된 자기감수율이다. 이때의 자구 변화에 대하여 참고 문헌 5에 상세히 설명되어 있다. 그러나 일부 측정된 교류 자기감수율은 Fig. 3(b)나 (c)와 같이 반응하기도 한다. 이들 자기감수율은 위에 설명한 자구 변화에 의하여 유도되어야 할 모든 교류 자기감수율이 측정되지 않고 있다. 이 같은 자기감수율을 이해하기 위하여 garnet film을 이용하여 전류를 변화시킬 때 철단결정 표면의 자구 변화를 관측하였으며, 그 결과는 Fig. 4에 나타나 있다.

철단결정에 걸어진 전류와 수직한 자기장이 모두 없을 때 Fig. 4(a)와 같이 자구벽은 단결정의 중앙에 위치한다. 이 시료에 가해주는 자기장 없이 0 mA에서부터 전류를 증가하여 주면 38 mA에서 Fig. 4(b)와 같이 Y-모양

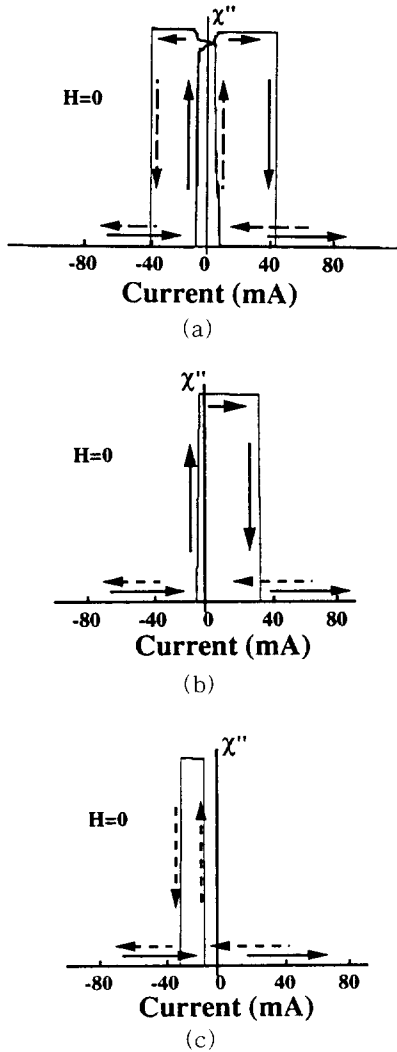


Fig. 3. Out-of-phase components of the ac susceptibility while varying currents without external field shows the symmetric (a) and asymmetric (b) and (c) behavior. The sudden increase and decrease of the ac response is induced from the transformation from one stable structure to another stable structure while currents are varying. The magnitude of the high susceptibility is the same one measured with a Landau structure and the zero susceptibility indicates the whisker has the rotated structure.

의 자구벽이 단결정 표면에 형성되며 이 자구는 계속적으로 전류가 증가 함에따라 Fig. 4(c)와 같이 이 자구벽이 서서히 진행 함을 관측 되었다. 또 다른 경우는 전류가 증

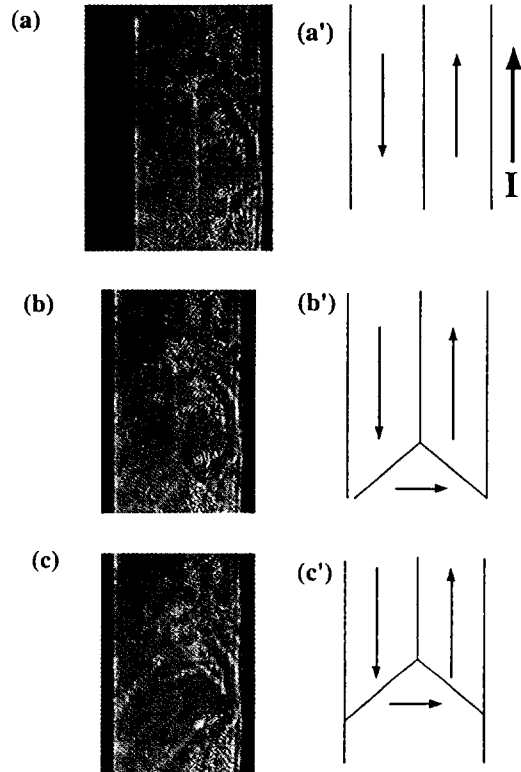


Fig. 4. Domain structures on the surface of a {100} iron whisker while current varying without external field. No change of the domain structure (a) has been observed until the applied current becomes 37 mA. The 180° domain wall remains at the middle of the whisker. At 38 mA, a Y-shaped domain wall is generated at the bottom of the observed surface (b). As the current increases further, the Y-shaped wall propagates upward as shown in (c). Schematic diagrams of observed surfaces (a), (b), and (c) are shown in (a'), (b'), and (c'), respectively.

가함으로써 어느한 전류 값에서 단결정 중앙에 180° 자구벽이 순간적으로 없어지는 것을 관측할 수 있었다. 반대로 철단결정에 걸어주는 전류를 큰 전류에서 작은 전류로 변환시 위에서 관측한 Y-형태의 자구로의 변화를 관측할 수 있었다. 또한 자구가 한 회전된 상태에서 다른 회전된 상태로 순간적으로 전환 됨을 관측할 수 있었다. 위와 같은 관측으로 Fig. 3(b)와 (c)의 자기감수율 결과에 대한 설명이 가능하다. 참고문헌 5에 설명한 것과 같이 단결정에 전류를 걸어주지 않거나, 혹은 자구변화를 시키기에 충분히 크지 않으면, Fig. 3(a)와 같은 자구구조를 가진

다. 철단결정에 걸어진 전류를 변화 시킴으로써 자구가 회전된 상태에서 Landau 자구 상태로 다시 회전된 상태로 전환시 자구변화는 처음 관측된 Y-모양의 자구벽 형성과 소멸로 설명이 가능하다. 다시말해 Y-모양의 자구벽 형성과 소멸은 Landau 자구구조에 의한 교류 자기감수율의 반응할 수 있는 충분한 시간적 여유를 의미한다. 위와 같은 자구구조 변화시의 교류 자기감수율은 Fig. 3(a)와 같이 예상된다. Fig. 3(b)와 (c)의 관측되지 않은 자기감수율 부분은 나중에 관측한 자구의 변화로 설명할 수 있다. 다시말해, 강한 전류에 의하여 형성된 자구구조가 전류를 줄이면 회전된 구조를 유지하다가 다른 방향의 전류가 충분히 커지면 한순간 자기화의 방향이 바뀌어지므로 Landau 자구구조에 의하여 유도되어야 할 교류 자기감수율이 관측되지 않는다고 설명할 수 있다.

원통형 자화물질의 중심축이 부분적으로 자화되도록 중심축과 평행하게 자기장을 가해주면 자화물질의 표면에 자기전하가 유도되며, 그때 표면자기전하는 다음과 같이 분포 한다고 정의된다[6].

$$\sigma_s(R, z) = (L/R)^{-\frac{1}{3}}[(1 - z/L)^{-\frac{1}{3}} - (1 + z/L)^{-\frac{1}{3}}] \quad (1)$$

한편, 원통형 양끝에서의 표면전하는 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_e(\rho, \pm L) = \pm [(1 - \rho/R)^{-\frac{1}{3}} + (1 + \rho/R)^{-\frac{1}{3}}] \quad (2)$$

여기서  $2L$ 과  $R$ 은 원통형 자화물질의 길이와 반지름을 나타내며,  $z$ 와  $r$ 는 각각 원통형 중앙과 중심으로부터의 거리를 나타낸다. 한편, 직사각형 자화물질의 표면 자기전하 분포는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_M(x, y) = \pm A[(1 - y/L)^{-\frac{1}{3}} - (1 + y/L)^{-\frac{1}{3}}] [(1 - x/d)^{-\frac{1}{3}} + (1 + x/d)^{-\frac{1}{3}}] \quad (3)$$

$x$ 와  $y$ 는 직사각형의 중심으로부터 거리이고,  $2d$ 는 직사각형의 폭을 나타낸다.  $A$ 는 유도된 전하량의 크기에 의하여 결정되는 상수 값이다.

단결정 표면의 자기전하를 측정한 결과는 Fig. 5(a)에 나타나 있다. 측정을 위하여 걸어진 전류 없이 철단결정

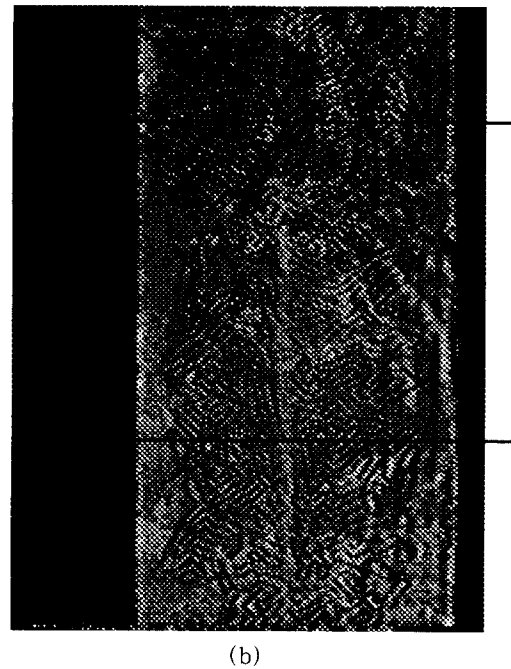
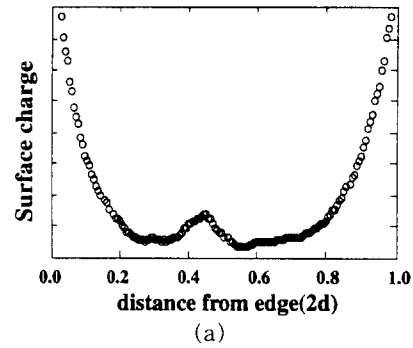


Fig. 5. (a) Magnetization normal to the surface is measured across the width of the whisker. Magnetic surface charge density is proportional to the normal component of the magnetization at the surfaces. Its magnitude is directly related to the brightness of the garnet film. A small bump near the center of the film indicates the position of the 180° domain wall. The magnetization inside the marked area (b) is averaged to reduce the noise from the bubble domain on the garnet film.

중심축과 평행하게 2~3 Oe의 자기장을 가하였다. 이 결과는 Fig. 5(b)에 있는 철단결정 표면에 표시된 부분을 garnet film의 자구에 의한 효과를 줄이기 위하여 자기화를 측정한 후 평균한 값이다.  $y$ 축의 값은 철단결정 표면에 수직인 자기화의 상대적 크기를 나타내며, 이 값은 곧

자기전하 값이 된다. Fig. 5(a)에서 유도된 자기전하가 철단결정의 양편에 축적 됨을 보이고 있다. 측정값 중앙에 있는 약간 큰 자기화는 자구벽이 위치한 곳을 의미한다. 단결정 내부의 자구벽에 의한 자기화를 제외한 측정값을 이용하여 표면 자기전하 분포를 알기 위하여 아래와 같은 함수를 이용하여 계산 하였다.

$$\sigma_M = C + B[(1 - x/d)^{-\alpha} + (1 + x/d)^{-\alpha}] \quad (4)$$

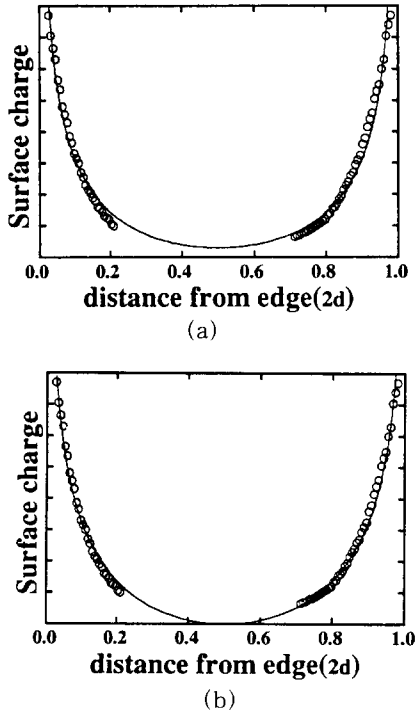


Fig. 6. Comparison between the measured (o) and fitting (-) magnetic charge distribution for (a)  $\alpha = 1/3$  and (b)  $\alpha = 0.23$ .

Fig. 6은 측정된 표면전하를 least squares method를 사용하여 fitting한 결과이다. 이때  $\alpha$ 는 실험으로부터 0.12 ~ 0.23 사이의 값임을 알수 있었다. 위 식의 B와 C는 유도된 표면전하 양에 의하여 결정되는 상수 값이다. 실험결과로부터 얻어진  $\alpha$ 는 이전에 예상한 값보다 작음을 보이고 있다. 이는 직사각형 자화물질의 자기소거인자를 계산하기 위하여 자화물질 내부의 자구벽 혹은 표면의 defect 등

에 의한 효과를 고려하지 않고 계산하였기 때문이다. 그러나 측정된 전하분포는 Fig. 6에 나타난 것과 같이 예측된 전하분포가 측정값과 큰 차이가 없음을 나타낸다.

#### IV. 결 론

본 실험은 garnet film을 이용한 자구 관측법을 사용하여 포화자기화가 큰 자화물질의 자구를 관측할 수 있었으며, 이 방법을 이용하여 1950년도 말에 관측 되었던 철단결정 표면의 여러 자구구조를 관측할 수 있었다[1, 7]. 이 관측법은 또한 ferrite 입자를 이용한 Bitter의 방법으로 관측을 할 수 없었던 {100} 철단결정의 전류 변화에 의한 자구의 움직임을 직접 관측할 수 있었으며, 그 결과 전류 변화시 이전에 설명할 수 없었던 비대칭적 교류 자기감수율의 실험 결과를 이해할 수 있었다[5]. 또한 garnet film을 이용하여 철단결정 표면과 수직하는 자기화를 측정할 수 있었으며, 이 측정된 자기전하는 예측된 표면 자기전하보다 빠른 크기로 증가함을 알 수 있었다. garnet film을 이용한 자구관측 방법은 Bitter의 방법을 사용시 ferrite 입자나 물에 의해 시료표면과의 접촉으로 장기간 표면관측이 불가능한 단점을 보완하여 포화자기장이 큰 자화물질의 표면 관측에 사용할 수 있으며, 또한 자화물질 표면에 수직하는 자기화를 측정하는데 사용할 수 있을 것이다.

#### 참 고 문 헌

[1] R. V. Coleman and G. G. Scott, Phys. Rev. **107**, 1276(1957).  
 [2] A. Hubert, J. de Phys. **49**, 1859(1988).  
 [3] M. R. Scheinfein, J. Unguris, R. J. Celotta, and D. C. Pierce, Phys. Rev. Lett. **63**, 668 (1989).  
 [4] D. S. Bloomberg and A. S. Arrott, Can. J. Phys. **53**, 1454(1974).  
 [5] 이 재광, 한국자기학회지, **5**, 179(1995).  
 [6] T. L. Templeton and A. S. Arrott, J. Appl. Phys. **55**, 6(1984).  
 [7] R. W. DeBlois and C. D. Graham, Jr., J. Appl. Phys. **29**, 528(1958).

## Domain observation for iron whiskers with magnetic garnet film and its application

Jae-Gwang Lee and Chul Sung Kim

*Department of Physics, Kookmin University, Seoul, 136-702, Korea*

(Received 5 July 1995, in final form 1 September 1995)

We have found a method which is convenient and sufficiently quantitative for observing domain structures on magnetic materials. Domain observation with magnetic garnet films has been performed to understand the change in domain structures on {100} iron whiskers. Domains on the garnet films are directly observable by using polarized light. The stripe patterns in garnet films disappear at precise critical fields, applied in the direction perpendicular to the film. In whiskers the fields generated perpendicular to the surface depend on the domain configuration and the fields applied parallel to the surface, but not on a field applied perpendicular to the surface. This magnetic behavior enables us to measure the magnetic charge distribution on surfaces of iron whiskers with magnetic garnet films. The movement of the domain structure has been observed while varying currents are applied along the whisker. This observation enables us to understand the previously unsolved result of the ac susceptibility measurement.