

Fe 박막에서의 박하우젠 현상 연구

이헌성 · 류광수 · 신성철*

한국과학기술원(KAIST)물리학과, 스핀정보물질연구단, 대전시 유성구 구성동 과학로, 305-701

강임석

한국과학영재학교, 부산시 부산진구 당감3동 백양관문로 111, 614-822

(2009년 7월 24일 받음, 2009년 8월 31일 최종수정본 받음, 2009년 9월 1일 게재확정)

Sputtering 방법으로 유리기판위에 50-nm Fe 박막을 증착하여 박하우젠 현상을 연구하였다. 실험실 자체 제작 장비인 광자기 현미경을 사용하여 박하우젠 점프가 일어나는 동안 자구 이미지를 촬영함으로써 박하우젠 현상을 실시간으로 직접 관찰하였다. 자구 이미지들을 관찰한 결과 박하우젠 점프가 같은 실험조건에서 측정되었음에도 불구하고 매우 무작위적인 모습을 보이는 것을 확인하였다. 1000번 이상의 측정을 통해 박하우젠 점프크기의 통계분포를 구하였는데, 점프크기의 분포가 거듭제곱법칙 분포를 보임을 확인하였고, 임계지수는 1.14 ± 0.03 의 값을 보임을 확인하였다.

주제어 : 박하우젠 현상, 임계지수, 임계축척현상, 거듭제곱법칙

I. 서 론

초고밀도 자기기록장치와 스핀트로닉스 소자로서 강자성체 박막 시스템이 크게 주목을 받고 있다. 특히 그 구동 방법에 자화역전과정이 중요한 역할을 하는 스핀트로닉스 디바이스가 주목을 받으면서 자화역전과정 또는 자구동역학에 대한 연구가 중요하게 대두되었는데 근본적으로 자화역전과정은 무작위적이고 불연속적인 점프를 통해 이루어지는 것으로 알려져 있다[1]. 이를 박하우젠 현상(Barkhausen avalanches)이라 한다. 이러한 박하우젠 효과는 강자성체를 이용한 소자를 제작하는데 있어 장애물로 작용하고 있다. 따라서 강자성체를 이용한 디바이스의 신뢰성 향상을 위해 강자성체 박막시스템에서 일어나는 자화역전과정의 무작위적인 특성을 이해하는 것이 매우 중요한 문제로 대두되고 있다.

현재까지 연구된 바에 의하면 강자성체 박막에서의 박하우젠 점프크기의 통계분포가 거듭제곱법칙(power-law)으로 표현되는 임계축척현상(critical scaling behavior)을 보인다[2]. 즉, 점프크기를 s 라 할 때, 점프크기 s 가 나올 확률 $P(s)$ 는 다음과 같은 분포를 갖는다.

$$P(s) \sim s^{-\tau}$$

여기서 τ 는 임계지수(critical exponent)라 하는데 임계축척현상에서 점프크기의 확률분포를 결정짓는 가장 중요한 요소이다.

최근 박하우젠 현상의 임계축척현상에 대해 많은 연구가 이루어져 왔는데, 거듭제곱법칙에서 임계지수가 어떠한 값을 갖

느냐에 대한 연구가 주를 이루어 왔다[3]. 특히 2차원 구조를 갖는 박막시스템에서는 자화역전과정을 직접 실시간으로 관찰할 수 있는 실험장비가 매우 유용하게 이용되어 왔다. 그 첫 번째 예로서 Co 박막에서의 박하우젠 현상이 연구가 되었는데, 자화역전과정이 불연속적이고 급격한 점프에 의해 일어나고, 그 과정이 자구벽동역학에 의해 발생한다는 것을 실시간으로 자구이미지를 촬영함으로써 직접 확인하였다[4]. 이 실험에서 거듭제곱분포의 임계지수가 1.33으로 계산되었는데 이는 기존의 CZDS 모델과 잘 일치하는 값이다[5]. 또 다른 예로 MnAs 박막에서 박하우젠 현상이 연구되었는데 온도를 섭씨 20도에서 35도로 변화시키에 따라 자구형성패턴이 달라짐을 직접 관찰하였다. 또한 임계지수 역시 온도가 증가함에 따라 1.34에서 1.02로 변화하는, 즉 두 개의 보편성 집단 사이를 오가는 임계축척현상을 보임을 확인하였다[6].

위의 예에서 볼 수 있듯이 자구이미지를 실시간으로 직접 관찰하는 것이 박하우젠 현상을 연구하는데 있어서 매우 중요한 역할을 하는 것을 알 수 있다. Co와 더불어 대표적인 강자성체 물질 중의 하나인 Fe 박막의 경우 현재까지 자구이미지를 직접 관찰하면서 박하우젠 현상에 대해 연구한 결과가 없는 상황이다. 물론 Fe 박막에서 magneto-optical Kerr effect(MOKE) 장비를 이용해 박하우젠 현상이 연구가 된 적은 있었다. 그 실험에서 박하우젠 점프크기의 통계분포가 거듭제곱분포를 따르고 임계지수의 값은 1.1로 계산되었다[7]. 하지만 기존의 Fe 박막에서 이루어진 실험은 자화역전과정 동안에 오직 Kerr intensity의 차이만이 측정되었을 뿐 자구 및 자구벽이 실제로 어떻게 움직이는지는 관측하지 못했다.

본 연구에서는 Fe 박막에서 박하우젠 현상을 실시간으로

*Tel: (042) 350-2528, E-mail: scshin@kaist.ac.kr

직접 관찰하였다. 이를 위해 실험실 자체 제작 장비인 광자기 현미경을 이용하여 자화역전과정동안 자구 이미지를 실시간으로 직접 촬영하면서 자구 및 자구벽이 어떠한 움직임을 보이는지를 관찰하였다. 20 °C의 일정한 온도에서 1000번 이상의 반복 실험을 통해 얻어진 자구 이미지들로부터 박하우젠 점프크기를 계산하고, 이를 수집하여 박하우젠 점프크기의 통계분포를 구하였다. 이러한 방법으로 얻어진 통계분포를 통하여 박하우젠 점프크기가 거듭제곱분포로 나타난다는 것을 보이고 임계지수의 값을 계산하였다.

II. 실험 방법

강자성체의 자화역전과정을 측정하기 위하여 본 연구에서는 실험실 자체 제작 장비인 광자기 현미경(Magneto-Optical Microscope Magnetometer)을 사용하였다[8]. 광자기 현미경은 기본적으로 시료에 자기장을 인가하기 위한 전자석, 광원인 Hg램프, 자성체의 자화상태를 Kerr 효과를 이용하여 측정하기 위한 두 개의 편광기, 시료에 광을 집속시키기 위한 대물렌즈로 구성되어 있다. 또한 실시간으로 자구 및 자구벽이 변화하는 것을 직접 관찰하기 위해 CCD를 이용하여 이미지를 촬영하였다. 시료에 수평 방향의 자기장을 인가하기 위해 전자석에 Bi-polar 전원공급장치를 이용하여 전원을 공급하였고, 이러한 모든 것들은 컴퓨터에 프로그래밍화되어 통제되었다. Fig. 1은 광자기 현미경의 개략도이다.

이 장비의 특징은 MOKE(Magneto-Optic Kerr Effect)현상을 통해 얻어진 자구 이미지를 최대 1000배의 배율로 실시간 측정할 수 있다는 점이다. MOKE 신호를 극대화하기 위해 100 W Hg 램프를 사용하였고, 흡수율이 10^{-3} 인 sheet-type

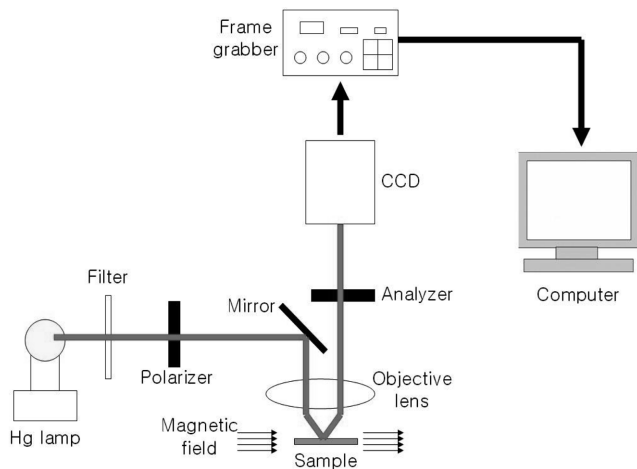


Fig. 1. Schematic diagram of magneto-optical microscope magnetometer setup. The relevant optics is adjusted to provide an incident illumination angle of 20° from the film normal.

편광기를 사용하였다. 이를 통해 Kerr angle 0.1 degree 이상의 분해능으로 자구를 관찰할 수 있다. MOKE를 통해 얻어진 자구 이미지는 대물렌즈와 접안렌즈의 조합에 따라 최대 1000배의 배율과 0.4 μm의 공간 분해능을 갖고 있다.

실시간으로 자구를 측정하기 위해 고감도 CCD 카메라와 Frame grabber 시스템이 장착되어 있다. 자구 이미지는 CCD 앞에 장착된 증폭기를 통해 최대 10⁴까지 증폭된다. CCD array는 752 × 580 픽셀로 구성되어 있다. CCD 카메라로 측정된 이미지는 Frame grabber를 통해 전송되어 컴퓨터에 최대 초당 30 frame으로 저장된다. 컴퓨터에 저장된 이미지는 자체 제작된 이미지 처리 프로그램에 의해서 흑백, 혹은 컬러 이미지로 저장되어 각 구역이 어느 시간에 자화역전이 이루어졌는지를 실시간으로 관찰할 수 있고, 이를 통해서 자구 및 자구벽이 어떠한 방식으로 변화되어가는지 직접 관찰할 수 있다.

50-nm Fe 박막은 dc magnetron sputtering 방법을 이용하여 유리기판 위에 제작되었다. 2×10^{-6} Torr의 기본 압력에서 5 mTorr의 Ar 압력으로 증착되었고, 산화 방지 및 Kerr 시그널의 극대화를 위해 Si₃N₄를 RF magnetron sputtering 방법을 이용하여 70 nm 오버코팅하였다. 또한 유도자기이방성을 가하기 위해 시료 제작 과정에서 약 500 Oe의 자기장을 인가하였다.

III. 결과 및 고찰

Fig. 2(a)는 50-nm Fe 시료에서 광자기 현미경을 이용하여

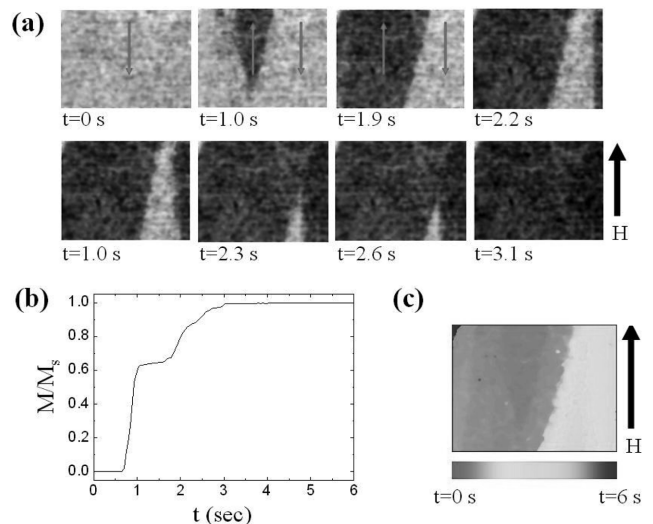


Fig. 2. (a) Domain images of 50-nm Fe film captured by magneto-optical microscope magnetometer during Barkhausen avalanche. (b) Magnetization reversal curve corresponding to the Fig. 2. (a). (c) Time-resolved domain-evolution pattern. The color code from red to blue indicate the elapsed time when the magnetization reverses.

박하우젠 점프가 일어나는 과정을 촬영한 것이다. 일단, 센 자기장을 가하여 자화를 아래쪽 방향으로 정렬시킨 뒤, 보자력 근처의 자기장을 위쪽 방향으로 6초 동안 인가하여 자화 역전과정을 측정하였다. 각각의 자구 이미지들은 특정한 시간에서 자구의 모양을 나타낸다. 화살표로 표시된 바와 같이 밝은 부분은 자화가 아래쪽 방향으로 정렬된 부분을 나타내고, 어두운 부분은 자화가 위쪽 방향으로 정렬된 부분을 나타낸다. Fig. 2(b)는 Fig. 2(a)의 자구이미지가 나타내는 자화역전과정을 그래프로 표시한 것이다. 가로축은 보자력 근처의 자기장을 인가한 시간을 나타내고 세로축은 Fe 박막의 자화정도를 나타낸다. 그래프에서 볼 수 있듯이 자화역전과정이 불연속적이고 급격한 박하우젠 점프에 의해 일어난다는 것을 알 수 있다. Fig. 2(c)는 자화역전과정을 하나의 이미지에 표현한 자구형성패턴이다. 광자기 현미경을 이용하여 박하우젠 점프를 촬영한 뒤 이미지 처리 과정을 통해 박막의 어느 부분이 어느 시간에 자화역전이 일어났는지를 색깔로 표시하였다. 즉, 이미지의 색깔은 자화역전이 발생한 시간을 나타낸다.

Fig. 3은 50-nm Fe 박막에서 박하우젠 점프를 측정할 자구형성패턴이다. 측정시의 온도는 모두 20 °C로 일정하게 유지되었다. 관측된 영역의 넓이는 그림에 표시되어 있는 바와 같이 80 × 64 μm²이다. 자구형성패턴에서 볼 수 있듯이 자화역전과정이 불연속적이고 급격한 박하우젠 점프에 의해 일어난다는 것을 알 수 있다. 또한 같은 실험조건에서 측정된 것임에도 불구하고 6장의 이미지 모두 다른 모습을 보이고 있다. 이는 박하우젠 점프가 측정할 때마다 일정한 패턴을 보이지 않고 매우 무작위적으로 일어난다는 것을 나타낸다. 박하우젠 점프가 발생하는 동안 자구벽이 형성되는 모양이나 자구벽이 형성되는 위치, 점프크기 등이 측정할 때마다 다른 모습을 보인다는 것을 알 수 있다. 즉, 50-nm Fe 박막에서 발생하는 자화역전과정은 박하우젠 임계축척현상의 가장 큰 특징 중의 하나인 무작위성(randomness)을 보임을 확인할 수 있다.

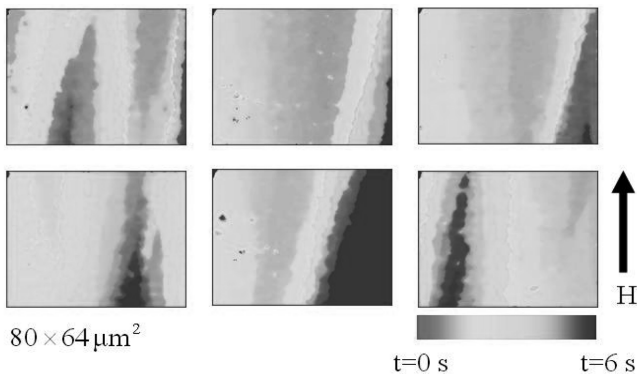


Fig. 3. Representative time-resolved domain-evolution patterns in 50-nm Fe film.

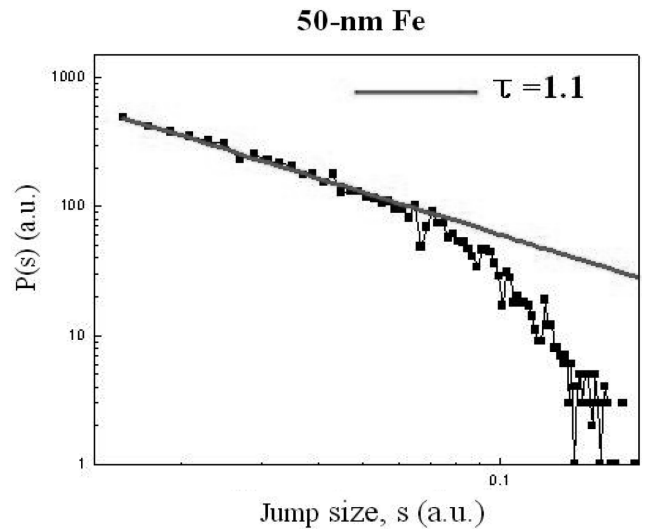


Fig. 4. Distribution of Barkhausen jump sizes in 50-nm Fe film. Fitting curve with $\tau = 1.1$ is denoted at this graph.

위에서 언급한 방법대로 자화역전과정을 반복적으로 측정하여 박하우젠 점프크기의 통계적인 분포를 구하였다. Fig. 4는 1000번 이상의 자화역전과정 측정을 통해 각각의 자화역전과정에 해당되는 자구형성패턴들을 수집하고, 이렇게 얻어진 자구형성패턴들로부터 박하우젠 점프크기를 계산한 뒤, 점프크기의 통계분포를 구하여 히스토그램으로 나타낸 것이다. 가로축은 점프크기를 나타내고 세로축은 가로축에 해당되는 점프크기가 나타날 확률을 나타낸다. 가로축과 세로축 모두 로그스케일로 표현되었다. 그래프에서 볼 수 있듯이 박하우젠 점프크기의 통계분포가 거듭제곱법칙 분포(power-law distribution), $P(s) \sim s^{-\tau}$ 를 보임을 알 수 있다. 점프크기의 분포로부터 임계지수 τ 의 값을 구하였는데, $\tau = 1.14 \pm 0.03$ 로 계산되었다. 이는 기존에 Pappin 그룹에 의해 연구된 Fe 박막에서의 박하우젠 임계축척현상에서 나온 결과와 일치하는 값이다[7]. 반면에 Co 박막에서 연구된 박하우젠 임계축척현상에서는 임계지수의 값이 1.33으로 계산되었는데[4] 이는 본 연구에서 계산된 임계지수와 상당히 차이를 보이는 값이다. 특히 Co와 Fe 박막의 경우 자화역전과정을 나타내는 자구형성패턴이 서로 큰 차이를 보이지 않음에도 불구하고 서로 다른 임계지수가 나오는 것에 대한 근본적인 의문점은 아직 풀리지 않은 상황이다. 박하우젠 임계축척현상의 심오한 이해를 위해서 본 연구와 관련된 이론적, 실험적인 연구가 지속되어야 할 것이다.

IV. 결 론

본 연구에서는 50-nm Fe 박막에서의 박하우젠 현상을 연

구하였다. 이를 위하여 광자기 현미경을 이용하여 Fe 박막에서 실제로 자구 및 자구 벽이 어떻게 변화하면서 자화역전과정이 이루어지는가를 실시간으로 직접 관찰하고 또한 이를 통하여 박하우젠 점프크기의 통계적인 분포를 구하였다. 1000 번 이상의 자화역전과정 측정을 통해 점프크기의 통계분포를 구하고 그 분포가 거듭제곱분포를 보임을 확인하였다. 박하우젠 점프크기의 통계분포로부터 임계지수의 값을 계산한 결과 1.1 근처의 값을 갖는 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 R&E (Research and Education) 프로그램과 국가 지정 연구실사업(National Research Laboratory)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] H. Barkhausen, Phys. Z., **20**, 401 (1919).
- [2] J. P. Sethna, K. A. Dahman, and C. R. Myers, Nature, **410**, 242 (2001).
- [3] G. Durin and S. Zapperi, Phys. Rev. Lett., **84**, 4705 (2000).
- [4] D.-H. Kim, S.-B. Choe, and S.-C. Shin, Phys. Rev. Lett., **90**, 087203 (2003).
- [5] P. Cizeau, C. Zapperi, G. Durin, and H. E. Stanley, Phys. Rev. Lett., **79**, 4669 (1997).
- [6] K.-S. Ryu, H. Akinaga, and S.-C. Shin, Nat. Phys., **3**, 547 (2007).
- [7] E. Puppini, Phys. Rev. Lett., **84**, 5415 (2000).
- [8] S.-B. Choe and S.-C. Shin, Phys. Rev. Lett., **86**, 532 (2001).

Study on Barkhausen Avalanches in Fe Thin Film

Hun-Sung Lee, Kwang-Su Ryu, and Sung-Chul Shin*

*Department of Physics and Center for Nanospinics of Spintronic Materials,
Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Daejeon 305-701, Korea*

Im-Seok Kang

Korea Science Academy, Busan 614-822, Korea

(Received 24 July 2009, Received in final form 31 August 2009, Accepted 1 September 2009)

We report a direct observation of Barkhausen avalanches in 50-nm Fe film, using a magneto-optical microscope magnetometer, capable of time-resolved domain observation. The time-resolved domain-evolution patterns exhibit that the occurrence of Barkhausen jump is random with respect to interval, size, and location. From the repetitive measurements more than 1000 times, we found that the probability distribution of Barkhausen jump size follows a power-law distribution and the critical exponent reveals the value of 1.14 ± 0.03 .

Keywords : Barkhausen avalanches, critical scaling behavior, critical exponent, power-law distribution