

Decision Method of Magnetic Domain Walls Using Pixel Value Operation in the Magnetic Domain Image Observed by Kerr Microscopy

Young-Hak Kim*

Department of Electrical Engineering, University of Pukyong University, Busan 48513, Korea

(Received 8 February 2017, Received in final form 21 February 2017, Accepted 21 February 2017)

Kerr microscopy was assembled to observe magnetic domain image of ultra thin 3 %Si-Fe by using parts of an optical microscope. Digital images were obtained from CCD camera attached to the microscopy. A method was suggested to decide a boundary between magnetic domain regions in this study. The method was using some operations such as subtraction, integration and least mean square approximation for pixel values in the digital image. The method has a strong point that high priced image processor is not needed in the Kerr microscopy system. From the results that three different domain walls were observed and magnetic flux density of 0.085 [T], this method could be applied in the magnetic domain regions having a straight 180° domain wall.

Keywords : Kerr microscope, digital image, pixel value, magnetic domain

자기광학현미경으로부터 관찰한 자구모양의 픽셀값 연산을 이용한 자벽선 결정방법

김영학*

부경대학교 전기공학과, 부산시 남구 용소로 45, 48513

(2017년 2월 8일 받음, 2017년 2월 21일 최종수정본 받음, 2017년 2월 21일 게재확정)

기존의 광학현미경을 분해 하여 Kerr 현미경을 구성한 다음, 180도 자벽을 가지는 극박 3 %Si-Fe에 대해 자구모양을 관찰하였다. CCD 카메라로 취득한 한 단 한 장의 디지털 자구모양으로부터 자구영역의 경계선을 고가의 고속 영상처리장치 없이 결정하였다. 자구모양의 경계선 결정 방법은 디지털 자구모양의 픽셀값을 감산, 적분, 최소자승법의 연산을 이용하는 것이다. 이 방법은 많은 디지털 이미지를 연속적으로 취득하여 다중 합산하는 종래의 방식보다는 비용이 적게 든다. 이 연구 결과로부터 3개의 경계선과 0.085[T]의 자속밀도가 구해져 시편의 중심부와 같이 180° 자벽 만이 형성되는 영역이라면 이 방법을 적용할 수 있다.

주제어 : Kerr 현미경, 디지털영상, 픽셀값, 자구

I. 서 론

영구자석의 연구나 자계센서와 같은 자기소자의 연구에 자성체의 자화과정을 파악하는 것이 중요하다. 자화과정의 핵심이 되는 자속밀도의 변화는 자구영역의 경계가 되는 자벽이 동 및 회전에 의해 발생하며 자구관찰을 통해 알 수가 있다 [1-3]. 자성체의 자구영역을 관찰하는 방법은 여러 가지가 있다. 강자성체 분말을 이용하는 Bitter법[4], 자성체의 자화에 의해 반사광의 회전각을 이용하는 Kerr 현미경을 이용하는 방법[5], 입사하는 전자가 시편의 자화에 의해 로렌츠 힘을 받

아 시편에서 산란시켜 관찰하는 주사전자현미경(SEM)을 이용하는 방법[6] 등이 있다. 이와 같은 자구관찰 장치에서 중요한 것은 자화방향이 서로 다른 자화영역이 뚜렷한 명암으로 대비(contrast)되도록 하는 것이다. Kerr 현미경에 의한 자구관찰방법에서는 시편에서 반사되는 반사광을 CCD(charge coupled device) 이미지 센서로 수집한 다음, 이 센서에서 발생하는 전기신호를 처리하여 자구모양의 명암의 대비를 뚜렷하게 하고 있다[7]. 또한 CCD 카메라의 일반화로 자구관찰 장치에 CCD 카메라를 부착시켜 CCD 카메라에서 수집한 디지털이미지의 연산으로 명암을 뚜렷하게 할 수 있다[8]. 이 방법은 관찰한 자구모양의 디지털 이미지로부터 기준이 되는 자구모양의 디지털 이미지를 감산하여 명암의 대비를 뚜렷하게 한다. 이 때, 기준 자구모양은 직류자계 등으로 시편의 자

화를 포화시켜 관찰한 것이다. 하지만 이 단계에서도 자구모양은 명암의 대비가 거의 없기 때문에 눈으로 인식할 수 없다. 따라서 명암의 대비를 선명하게 나타내기 위해 30초 동안 1/30초 간격으로 관찰한 자구모양의 디지털 이미지를 합산해야 하므로 많은 디지털 이미지와 이를 고속으로 처리할 수 있는 고속 영상처리장치가 필요하다. 본 연구에서는 자화 방향이 인접한 자구와 180°로 다른 자구구조를 가지는 극박 3%Si-Fe[9] 시편을 이용하여 Kerr 현미경으로 자구구조를 관찰하였다. 먼저 종래의 연구에서와 같이 눈으로 인식할 수 있을 정도의 명암대비를 가지게 하기 위해 자구모양의 디지털 이미지를 합산하여 자구모양을 구하였다. 다음에 이것을 이 논문에서 제시하는 방법인 한 장의 디지털 이미지의 픽셀값 연산으로 구한 자구모양과 비교하였다. 이 방법은 눈으로는 인식할 수 없는 명암의 대비를 가지는 한 장의 디지털 이미지라도 픽셀값에는 자구영역의 정보를 가지고 있다는 것을 이용하는 것이다. 그리고 이 방법은 별도의 고속 영상처리장치가 없더라도 자구영역의 경계선을 관찰하고 이로부터 자화의 변화인 동작지속밀도를 구할 수 있는 특징을 가진다.

II. 자구관찰 및 자구모양 선명화 방법

Fig. 1은 자구모양을 취득하기 위한 관찰원리와 장치의 구성을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 광원에서 발생한 빛은 조리개와 렌즈를 통과하여 평행광이 되고 다시 편광자를 통과해 특정방향으로 편파되어 시편에 조사되도록 한다. 시편에 조사된 빛은 커 효과(Kerr effect)에 의해 시편의 자화방향에 따라 편광의 회전방향이 달라지게 된다. 만약 시편의 각 자구의 자화방향이 180°로 다르다면 그 경계에서 반사된 빛의 편광면의 회전방향이 서로 반대가 된다. 따라서 검광자를 회전시켜 어느 특정방향의 편광면만을 통과시킬 수 있으므로 검광자를 통과하는 쪽은 밝게 되고 통과하지 못한 쪽은 어둡게 된다. 따라서 자구모양의 관찰원리는 서로 반대 방향의 자화 방향을 가지는 자구영역을 명암의 대비로로 관찰하는 것이다. Fig. 1(b)는 자구모양을 관찰하기 위한 장치를 나타낸 것이다. 이 장치는 입사광과 반사광의 경로가 서로 다르기 때문에 기존의 광학현미경을 분해하여 제작하였다. 광원은 100 W 할로겐 램프를 이용하였으며 인가전압을 가변하여 할로겐 램프의 출력을 조절할 수 있도록 하였다. 시편홀드는 시편에서 반사된 빛이 대물렌즈로 최대한 많이 통과시키기 위해 45° 경사를 가지도록 하였다. 자구 모양의 디지털 데이터는 8 bit CCD 카메라를 이용하여 저장하였고 해상도는 1024 × 1280이었다. Fig. 2는 CCD 카메라에서 취득되는 자구모양의 크기를 나타낸 것으로 10 : 1의 대물렌즈를 사용할 때 접안렌즈로 보이는 크기는 직경 약 4 mm이며 CCD 카메라에 관찰되는

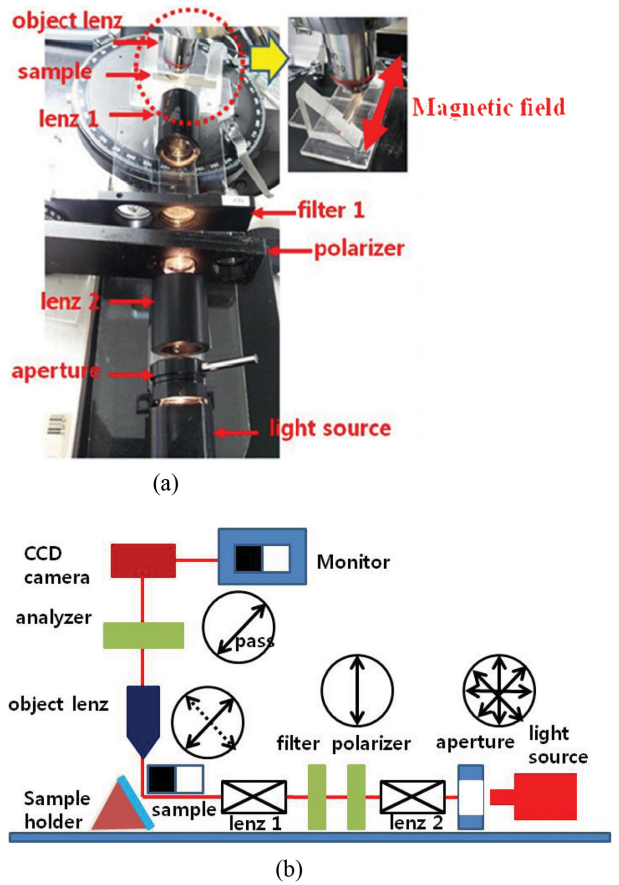


Fig. 1. (Color online) Observation principle and apparatus used in this experiment.

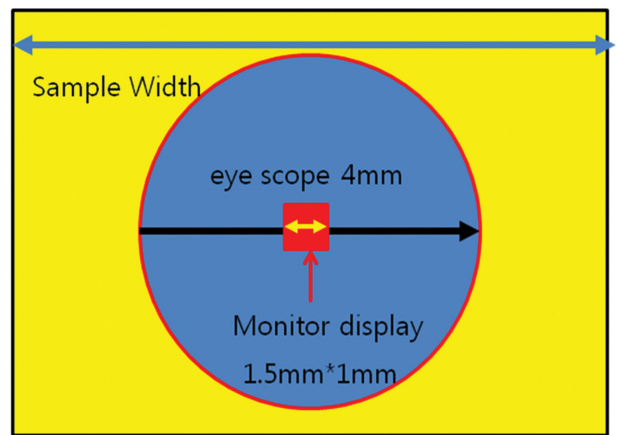


Fig. 2. (Color online) Image size displayed on the monitor of Kerr microscopy apparatus.

면적은 1.5 mm × mm였다. 커 효과(Kerr effect)에 의한 편광면의 회전각이 아주 작아 접안렌즈나 CCD 카메라로는 명암이 구분되지 않는다. 이를 선명하게 하기 위해서는 1024개의 픽셀값의 연산이 선명화 작업에 필요하다. Fig. 3은 자구모양의 선명화 방법을 설명한 것이다. 우선 시편의 자화를 강한

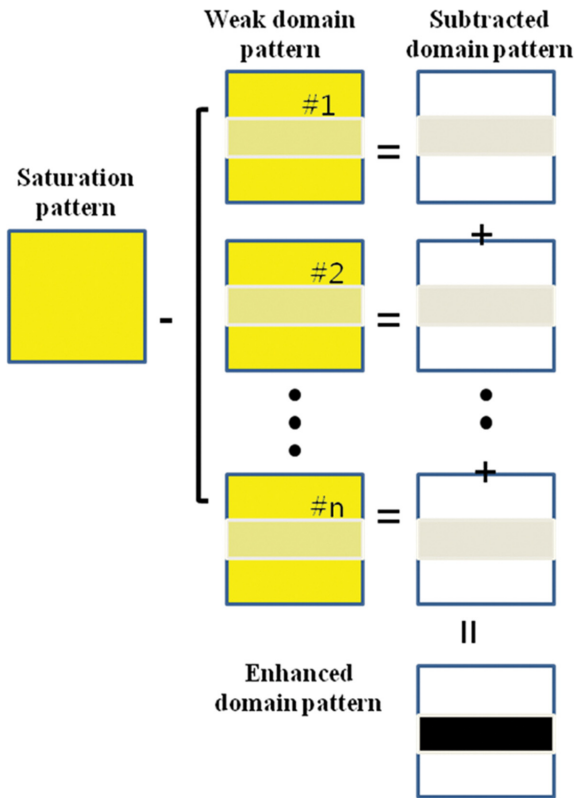


Fig. 3. (Color online) Contrast enhancement of digital image by superposing magnetic domain images.

계 한 다음 이를 CCD 카메라로 이미지를 취득한다. 여기서 취득한 디지털 이미지는 자구모양과 관계없는 배경 이미지만이 구해진다. 다음에 인가자계를 제거하면 시편의 자화는 어떤 자화상태(잔류자화상태)에 있게 되고 시편에는 자화방향으로서 다른 몇 개의 자구영역이 출현하게 된다. 이것을 다시 CCD 카메라로 취득한다. 이 두 장의 포화상태와 잔류상태를 나타내는 자구모양의 디지털 이미지를 감산을 한다. 이것은 자구모양을 가지는 디지털 이미지에서 배경이미지를 제거하기 위한 것이다. 이것으로 눈으로는 확인할 수 없으나 아주 미약한 흑백모양의 자구모양이 얻어지고 다중 합산하면 명암의 대비가 합산의 횟수의 증가에 따라 선명하게 나타난다.

III. 자구모양의 경계선 및 자속밀도 결정방법

관찰된 자구모양에서 검은 색과 흰 색의 자구영역의 픽셀 값이 명확하게 차이가 난다면 자화방향이 다른 영역 사이의 경계선을 쉽게 결정할 수 있다. 하지만 실제로는 각 영역의 픽셀 값에는 배경 이미지가 완벽하게 제거되지 않아 노이즈가 더해져 있어 이 픽셀값 만으로는 쉽게 경계선을 결정할 수 없다. Fig. 4는 4개의 자구영역을 가지는 자구모양에서 “a”와 “b”열로 표시된 임의의 열의 1024개의 픽셀값을 나타

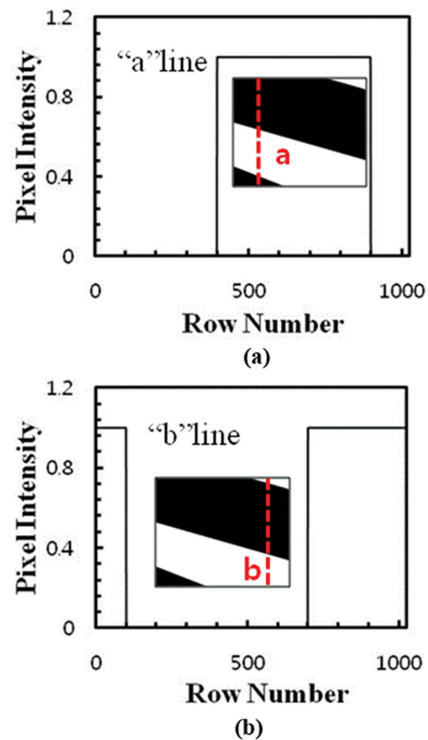


Fig. 4. (Color online) Pixel values of a specific row in magnetic domain image shown as an example.

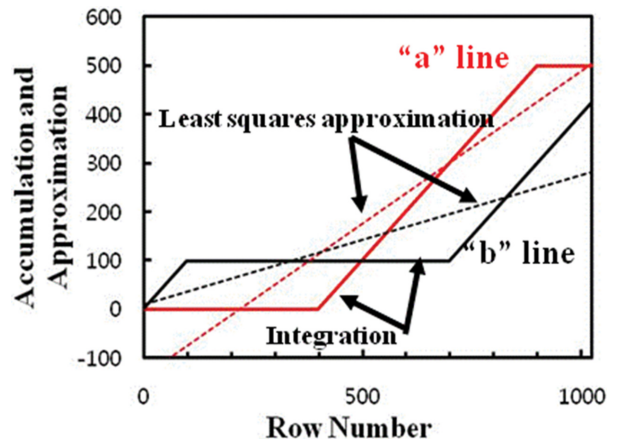


Fig. 5. (Color online) Integrated values and least square approximations for pixel values at the a specific row of Fig. 4.

낸 것이다. 편의상 검은 색 자구영역의 픽셀값을 0, 흰 색을 1로 하였고 노이즈는 없는 것으로 하였다. “a”열에서는 400번째, 900번째가 흑과 백의 경계지점이며 “b”열에서는 100번째와 600번째가 그 경계지점이 된다. 각 자구영역의 경계선을 결정하기 위해 우선 각 열의 픽셀값을 적분한다. Fig. 5는 각 열에서 적분한 값과 이에 대한 최소자승법의 추세선을 나타낸 것이다. 적분값을 나타내는 선에서 변곡점이 자구영역의 경계점의 위치가 됨을 알 수 있다. 그리고 근사식의 추세선

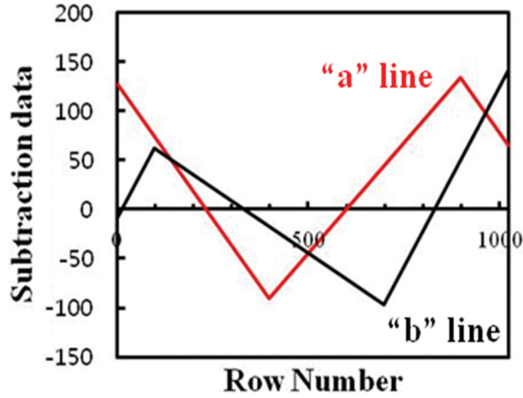


Fig. 6. (Color online) Subtracted values between the integrated values and least square approximation shown in the Fig. 5.

은 각 자구의 중앙 위치, 즉 자구모양의 경계선 사이의 중앙에서 적분값과 교차하게 된다. Fig. 6에는 앞 그림에서 나타난 적분값과 추세선의 근사값을 뺀 결과를 나타내었다. 이 연산결과는 0을 중심으로 양의 값과 음의 값을 가지며 극소치와 극대치가 각 열에서 나타난다. 이 그림에서는 극대값과 극소값의 위치가 두 영역의 경계점의 위치가 되며 이 점들의 위치를 전체 1280개의 열에 대해 구함으로써 전체의 경계선을 구할 수 있다. 자구영역의 경계선이 결정되면 각 자구영역의 면적을 구할 수 있고 이를 이용하여 관찰 영역의 자화 상태를 나타내는 자속밀도가 구해진다. 강자성체의 시편이 외부로부터 강한 자계가 인가되어 시편의 자화가 포화되면 포화자속밀도 $+B_s$ (이 시편의 경우 2.03[T])를 가진다고 하면 반대방향으로 자계를 인가 시에는 $-B_s$ 를 가지게 된다. 시편에 인가되는 자계를 감소시키면 시편의 자속밀도는 $+B_s$ 와 $-B_s$ 의 포화자속밀도 사이의 값을 가진다. 이 크기에 따라 다수의 자구가 나타나고 검은 색 영역과 흰 색 영역의 면적이 정해진다. 이 실험에서 각 영역의 면적은 각 영역의 픽셀수로 대체할 수 있으므로 자속밀도는 다음 식을 이용해서 구할 수 있다.

$$B_b = \frac{\text{검은색영역의픽셀수}}{\text{관찰영역의픽셀수}} \times B_s \quad (1)$$

$$B_w = \frac{\text{흰색영역의픽셀수}}{\text{관찰영역의픽셀수}} \times B_s \quad (2)$$

$$|B| = B_b - B_w \quad (3)$$

III. 결과 및 고찰

Fig. 7은 Fig. 4의 자구모양의 선명화 방법을 이용하여 구한 것이다. Fig. 7(a)는 회도류계 영구자석의 강한 외부 자계로 강자성체 시편을 포화시켜 취득한 것이고 Fig. 7(b)-(f)는

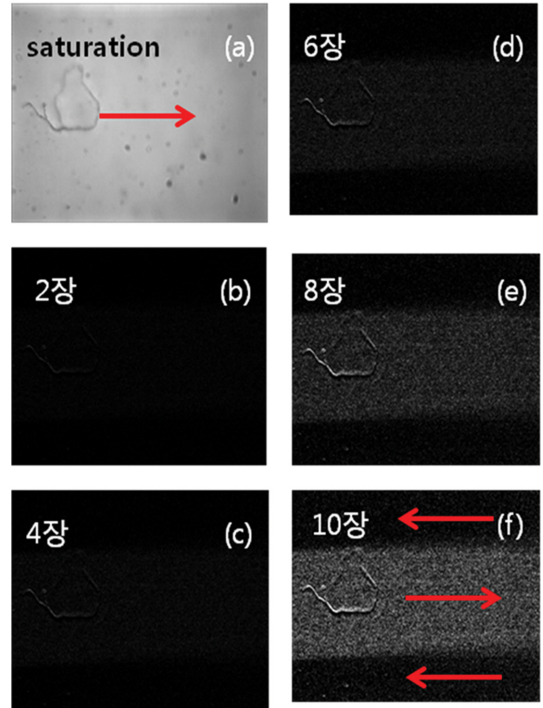


Fig. 7. (Color online) Dependence of contrast on the number of superposed domain image.

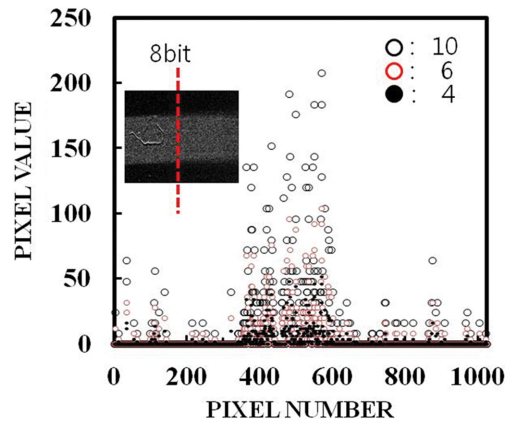


Fig. 8. (Color online) The variation of pixel values according to the number of the superposed domain images.

디지털 이미지를 2회씩 증가시켜 합산한 것이다. 그림에서와 같이 8회 이상의 합산에 의해 검은 색 영역과 흰 색 영역이 뚜렷해짐을 알 수 있다. Fig. 8은 4회, 6회, 10회 합산된 자구모양에서 동일한 열의 픽셀값을 나타내어 서로 비교한 것이다. 각 영역의 픽셀값은 합산 횟수에 비례하여 단순 증가하며 눈으로 식별은 안되지만 각 영역의 자화 정보를 가지고 있었다. Fig. 9는 각 영역의 경계선이 경사지도록 하여 관찰한 자구모양이다. 이것은 앞에서 설명한 경계선 결정방법이 경사진 경우에도 적용될 수 있음을 나타내기 위함이다. Fig.

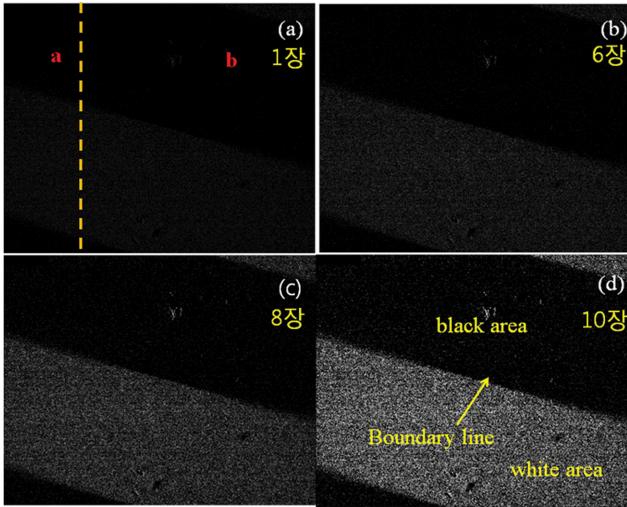


Fig. 9. (Color online) Images according to the number of the superposed domain images for inclined domain images.

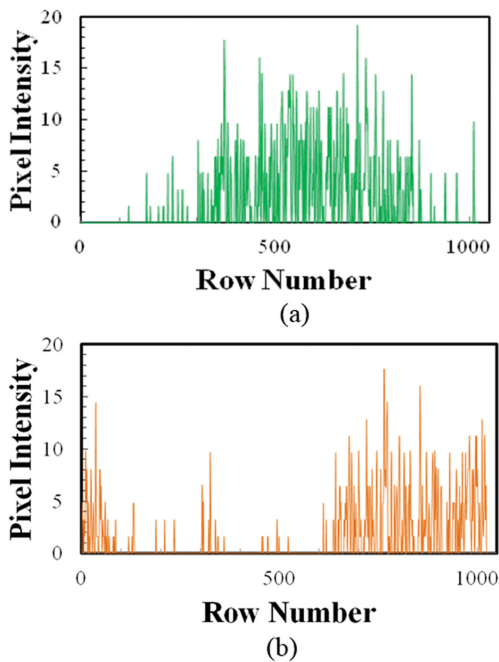


Fig. 10. (Color online) Pixel values at the “a” and “b” rows shown in the Fig. 9.

9(a)는 1장, 즉 다중 합산을 하지 않은 것, Fig. 9(b)-(d)은 6장, 8장, 10장을 다중 합산한 것이다. 앞의 선명화 방법의 설명과 같이 다중 합산에 의해 자구영역이 선명해짐을 알 수 있다. 관찰된 자구모양에서 자구영역은 4개가 있으며 각 자구영역의 경계선은 3개가 관찰되었다. Fig. 10은 눈으로 확인할 수 없을 정도로 미약한 Fig. 10(a)에서 “a”와 “b”열의 픽셀값을 나타내었다. 8 bit로 취득된 데이터이므로 가질 수 있는 픽셀값은 0의 최소치와 255의 최대치 사이의 값을 가질

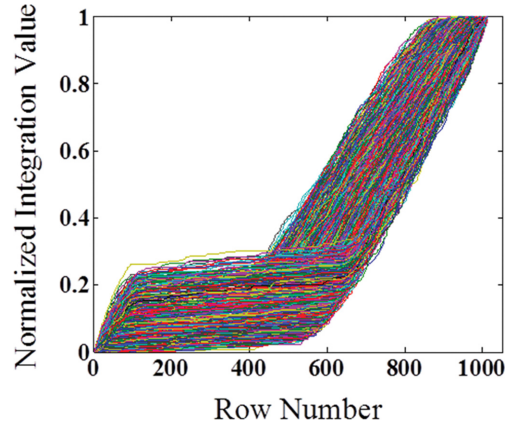


Fig. 11. (Color online) Integrated values at the 1280 rows shown in the Fig. 10.

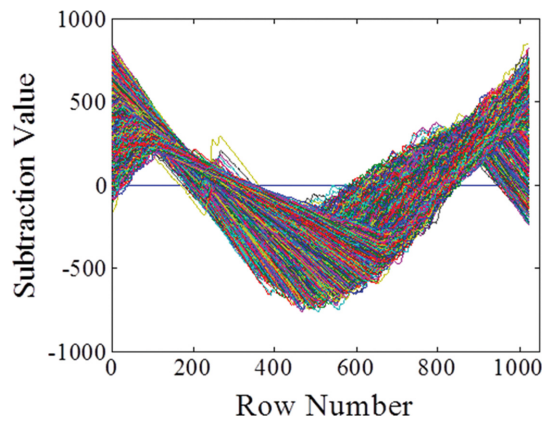


Fig. 12. (Color online) Subtraction results between the integrated values and least squares approximation in the Fig. 11.

수 있지만 다중 합산을 하지 않은 것이므로 아주 작은 픽셀 값을 가진다. Fig. 11는 자구모양 전체인 1280개의 열에 대해 적분한 것이다. 적분된 픽셀값은 Fig. 6에서와 같이 경계선 부근에서 변곡점을 가지며 증가함을 알 수 있다. Fig. 5의 설명에서 나타낸 동일한 방법으로 적분값으로부터 최소자승법에 의한 추세선을 구하였다. Fig. 12은 Fig. 11에서 구한 픽셀값의 적분치와 근사식으로부터 구한 값을 서로 감산한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 6에서 와 같이 이 값들은 0을 중심으로 +와 - 값을 가지며 각 열에서는 최대치와 최소치가 나타남을 알 수 있다. Fig. 13은 Fig. 12에서 구한 최소치와 최대치의 픽셀위치를 1024개의 열과 1280개의 행에 대해 나타낸 것이다. 노이즈에 대한 픽셀값의 영향으로 직선으로 나타나지 않지만 경계선의 위치를 비교적 정확하게 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig. 14는 각 경계선을 나타내는 지점의 값을 다시 최소자승법으로 근사하여 나타낸 것이다. 이 그림과 Fig. 8의 자구모양을 비교하면 경계선의 위치가 일치함을 알 수 있었다. 이 결과는 Fig. 9(d)에서 나타낸 눈으로 확인

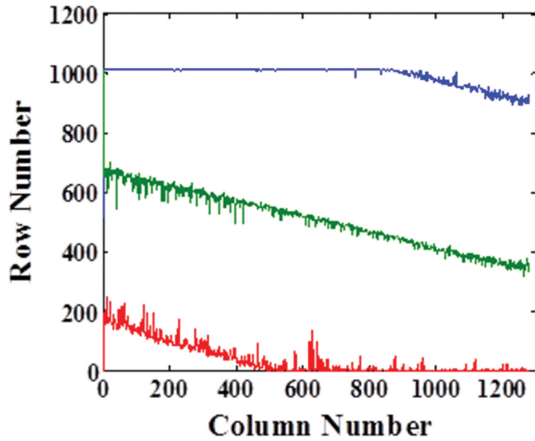


Fig. 13. (Color online) Locations of the maximum and the minimum existed in the data of the Fig. 12.

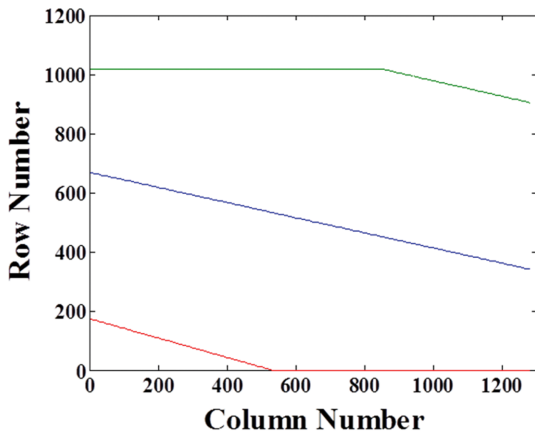


Fig. 14. (Color online) Domain wall boundary obtained by least square approximation from Fig. 12.

할 수 있는 정도의 자구모양에 대한 연산에서도 동일하였다. 이것은 다중합산에 의해 각 지점의 픽셀값이 합산횟수에 단순 비례하여 증가하기 때문이다. 여기서 구해진 경계선을 이용하여 시편의 자화상태인 자속밀도를 식(1)과 (2)로 구할 수 있다. 이 때 자속밀도는 시편의 면내에서 x방향(이미지의 가로 방향)과 y방향(이미지의 세로방향)의 자속밀도 벡터합의 크기를 의미한다. 이 그림에서 검은 색 영역의 픽셀수는 682808 개이며 흰 색 영역이 627912개였다. 따라서 전체의 픽셀수가 1310720(1024 × 1280)개이므로 시편의 포화자속밀도, 2.03[T]을 대입하여 계산하면 검은 색 영역의 자속밀도는 1.0575[T], 흰색영역의 자속밀도는 0.9725[T]였다. 따라서 관찰영역의 자속밀도의 절대치는 식(3)으로부터 0.085[T]였다. 이 방법으로 자계가 인가되어 경계선의 위치가 이동하더라도 인가자계에 대한 자속밀도의 변화를 구할 수 있다고 생각된다.

IV. 결 론

Kerr 현미경으로 취득한 단 한 장의 디지털 이미지로 경사진 자구영역의 경계선을 식별할 수 있는 방법에 대해 검토하였다. 사용한 시편은 180° 자벽을 가진 극박 3 %Si-Fe이다. 이 방법은 시편의 중심부와 같이 자벽이 직선이 유지되는 영역에서 적용할 수 있다. 이 방법은 고가의 고속 영상처리장치가 필요 없어 관찰 장치의 비용을 줄일 수 있다는 장점을 가진다.

아래는 본 연구에서 얻어진 주요 결과이다.

자화를 포화시켜 관찰한 자구모양의 이미지 데이터와 임의의 자화상태의 이미지 데이터를 감산하여 이를 다중합산으로 검은 색 영역과 흰색영역으로 구분되는 선명한 자구모양을 얻을 수 있었다.

단 한 장의 자구모양으로부터 자구영역의 경계선을 이미지 데이터의 연산, 즉 적분, 최소자승법에 의한 근사식, 감산 등의 연산을 이용하여 구할 수 있었다.

구해진 경계선을 이용하여 구한 자구 영역의 픽셀수로부터 관찰영역의 자속밀도를 구할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2016년)에 의하여 연구되었음.

References

- [1] M. Takezawa, Y. Nagashima, Y. Morimoto, and J. Yamasaki, IEEE Trans. Magn. **47**, 3256 (2011).
- [2] B. Fisher, L. Panina, N. Fry, and D. J. Mapps, High P, IEEE Trans. Magn. **49**, 89 (2013).
- [3] S. Choi, Y. H. Kim, B. Yoon, C. S. b Yang, and K. H. Shin, IEEE Trans. Magn. **47**, 2573 (2011).
- [4] M. Nose, M. Mitera, K. Shirakawa, T. Kimura, T. Masumoto, and H. Fujimori, IEEE Trans. J. Magn. Japan **9**, 59 (1994).
- [5] M. Takezawa and J. Yamasaki, IEEE Trans. Magn. **37**, 2034 (2001).
- [6] Y. H. Kim, M. Yamaguchi, and K. I. Arai, IEEE Trans. J. Magn. Japan **9**, 261 (1994).
- [7] A. Honda and K. Shirae, IEEE Trans. Magn. **17**, 3096 (1981).
- [8] M. Takezawa and J. Yamasaki, IEEE Trans. Magn. **37**, 2034 (2001).
- [9] K. I. Arai, H. Satoh, S. Agatsuma, and K. Ishiyama, IEEE Trans. Magn. **26**, 1969 (1990).