

# 로렌즈 SEM을 이용한 동적자구 모양의 관찰

김영학

부산수산대학교 전기공학과

荒井賢一

日本 東北大學 電氣通信研究所

(1995년 8월 28일 받음, 1995년 10월 24일 최종수정본 받음)

로렌즈 SEM을 이용하여 동적자구 모양의 관찰에 대한 검토가 50Hz~10kHz의 주파수 범위에서 수행되었다. 동적자구 모양의 관찰은 여자주파수와 SEM의 주사주파수의 정수 배와의 사이에 미소한 차를 두고 관찰하는 방법이며, 이 관찰 방법에 따라서 시뮬레이션하여 시뮬레이션한 모양과 관찰모양을 비교 검토하였다. 또한 더욱 높은 주파수에서 동적자구 모양을 관찰하기 위해서는 SEM의 주사주파수의 안정화에 대한 대책이 필요한 것을 알았다.

## I. 서 론

자성체에 대한 자구관찰은 주로 강자성체의 콜로이드액을 이용하는 방법 [1] [2], 자기 KERR 효과를 이용하는 방법 [3] [4], 로렌즈 SEM을 이용하는 방법 [5] - [9] 등에 의해 수행되고 있다. 이들 방법 중, 로렌즈 SEM에 의한 자구관찰의 특징은 강자성체의 콜로이드액을 이용하는 방법과 자기 KERR 효과를 이용하는 방법과는 달리 강판 자체에 거울 면과 같이 연마를 하는 것을 필요치 않는 것이다. 특히 방향성 규소강판과 같이 철손의 감소를 목적으로 강판의 표면에 장력피막을 입히는 경우에도 로렌즈 SEM에 부착된 전자총의 가속전압을 상승시켜 자구관찰이 가능하다.

SEM을 이용하는 동적자구모양의 관찰방법에는 SEM의 주사선의 주사시간에 대한 주파수(이하 주사 주파수라고 한다.)를 규소강판을 여자하는 여자주파수와 동기시켜 수행하는 방법이 일반적으로 이용되고 있다 [11] [12]. 그러나, 이 방법으로는 여자주파수가 증가함에 따라 SEM의 주사주파수와 여자주파수와의 사이에 동기를 이루게 하는 것이 어렵기 때문에 동적자구관찰은 주로 상용주파수 범위 내에서 수행되고 있다.

본 논문에서는 로렌즈 SEM을 이용하여 50Hz-10 kHz의 주파수 범위에 있어서의 동적자구 모양의 관찰 방법에 대해서 검토하며, 관찰된 동적자구모양을 시뮬레이션에 의한 자구모양과 비교 검토한다. 관찰방법으로는 SEM의 주사주파수의 정수 배와 여자주파수와의 사이에 극히 적은 차를 가지게 하는 것이 특징이다 [13].

## II. 정적 자구관찰

입방정의 자기이방성을 가지는 재료의 자구관찰을 로렌즈 SEM(일본전자 시판품: JSM-840A, SM-MDI 40 TYPE II)으로 하는 경우, 반사전자를 이용하는 것이 일반적이고 [14], 본 연구에 있어서의 관찰 방법도 이 원리를 이용하였다. Fig. 1은 반사전자에 의한 자구 모양의 발생 원리를 설명한 것이다 [15]. 180° 자벽을 가지는 시료의 표면을 SEM의 전자총에 대하여 45° 경사 시켜 배치하면 입사전자는 재료의 자화방향에 따라 로렌즈 힘을 받는 방향이 틀리게 된다. 이 때문에 반사전자의 방향이 자화방향에 따라 반대가 되어 검출기에서 상대적인 반사전자의 양에 차가 발생되어 흑색과 백색으로 관찰된다.

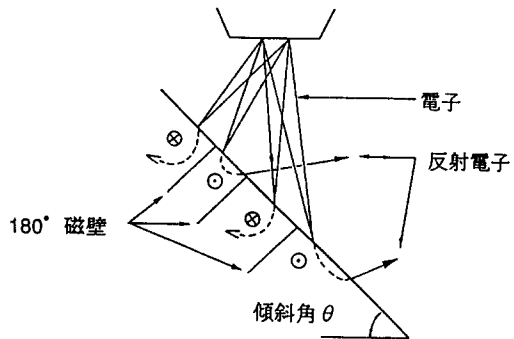


Fig. 1. Principle of static domain observation

## III. 동적 자구관찰

### 1. 관찰 방법 및 동적자구모양의 해석

Fig. 2는 동적자구모양의 관찰 방법을 설명한 것이다.

그림의 좌우방향이 시료의 폭 방향이며, 상하가 시료의 길이 방향이다. 그림에서는 시료의 길이 방향에 6개의 180° 자벽이 있다고 가정하고 있다. 이 자벽은 교류여자에 의해 시료의 폭 방향으로 이동을 하며 이 이동을 장소와 시간의 함수로서 나타낸 것이 그림 중의 6개의 정현파 모양이다. 그리고 화면을 가로지르는 다수의 선은 SEM의 주사선이다. 자구 모양의 흑색과 백색의 경계는 주사선과 자벽과의 교점에 생기기 때문에 실제로 관찰되는 것은 두꺼운 곡선 모양이다. 따라서 이 관찰방법은 자벽의 순시적인 움직임을 관찰하는 것이 아니고 정현파 적인 자벽의 움직임을 샘플링 하여 관찰하는 것이기 때문에 SEM의 주사 주파수와 여자주파수의 차에 의해 관찰되는 모양도 크게 변하게 된다. 단 이 곡선은 SEM의 주사 시간에 따른 자벽의 이동 경로를 나타낸 것으로 어떤 순간에 있어서의 자벽의 형상을 나타내는 것이 아니다.

위에서 설명한 바와 같이, 동적자구모양의 흑색과 백색의 경계선은 자벽의 순시적인 위치와 전자총의 위치가 일치하는 점에서 생기므로 자속 정현파 조건으로 여자될 때, 자벽의 기준위치와 자속 진폭을 입력치로 하여 여자주파수에 대한 동적자구모양은 식(1)을 계산하여 시뮬레이션 가능하다.

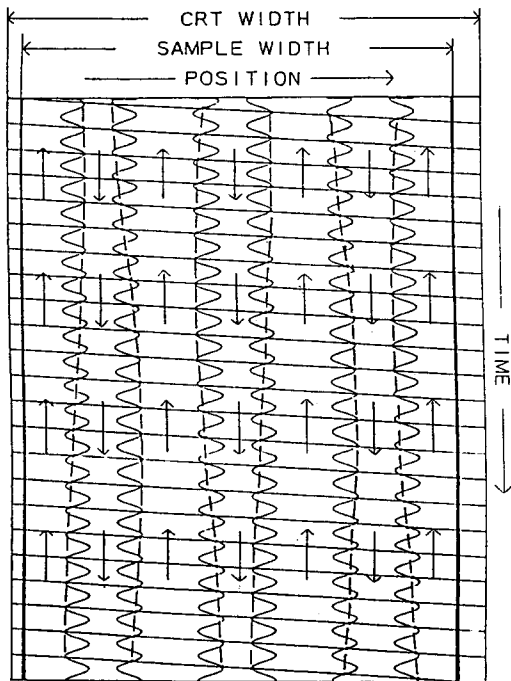


Fig. 2. Observation method of dynamic domain pattern.

$$A_m \cos(\omega t - \psi) + B_m =$$

$$\frac{F_s}{(T_s - T_r)} t + [(k-1) \frac{1 + (T_r - T_s)}{(T_s - T_r)}] F_s \quad (1)$$

단,  $A_m$ 은 자벽이동의 진폭,  $B_m$ 은 m번째의 자벽의 기준위치,  $\omega$ 는 t=0에 있어서의 여자주파수와  $\psi$ 는 주사주파수의 위상차,  $F_s$ 는 주사거리,  $T_s$ 는 1개의 주사선의 주사시간,  $T_r$ 은 주사종료 후로부터 주사개시까지의 휴지시간이다. 식(1)의 좌변은 자벽의 위치를 나타내고, 우변은 k번째의 주사선의 위치를 나타낸다. 좌표원점은 Fig. 2의 좌측 상단에 주사 개시 점을 선택했다. 식(1)을 계산할 때 한 개의 정현파와 하나의 직선의 교차점은 홀수개 존재하기 때문에 주의할 필요가 있다. 복수의 교점이 존재할 가능성이 있는 것은 다음과 같은 주사선의 기울기가 기준 위치에 있어서의 정현파의 기울기 보다 작은 경우이다.

$$\frac{F_s}{(T_s - T_r)} < \omega A_m \quad (2)$$

계산에 있어서  $T_s$ 는 실험의 설정치인 20ms로 고정하였다. 또한 시뮬레이션에서는 주사개시로부터의 주사선 400개에 대해서 수행하여 표시하였다. 실제의 동적 자구관찰에서도 SEM의 주사선은 400개이다.

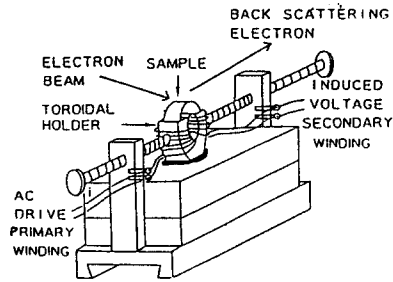
Fig. 3은 동적자구관찰에 이용한 시료 대를 나타낸 것이다. 트로이드 자침의 경우에는 Fig. 3(a)와 같이 시료를 장착한 케이스에 여자권선과 검출권선을 입혀 여자권선에 교류 신호를 인가하여 동적자구모양의 관찰을 수행할 수 있다. 스트림 형태의 시료에 대해서는 Fig. 3(b)에 나타내는 것과 같이 검출 권선을 시료에 삽입하여 페라이트 요크에 올려 두고 동적 자구모양의 관찰을 수행하였다. 이 때 관찰조건으로서는 SEM의 필라멘트는 LaB<sub>6</sub>를 사용하였고 가속전압은 40 kV, 필라멘트의 전류는 300 μA로 하였다.

Fig. 4는 관찰과 시뮬레이션에 의한 자구모양에서 톱니파 모양의 잇발 수와 각도를 측정하는 예를 나타낸 것이다. 잇발 수는 그림 중의 ①~④를 세어, 각도는 그림을 가로지르는 수평선과 그림 중의 A~E를 연결하는 직선과의 각도를 측정하여 구하였다.

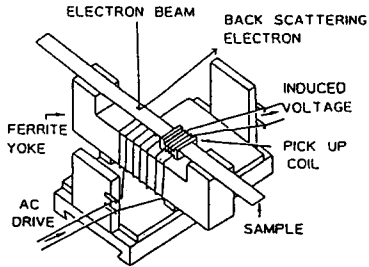
Fig. 5는 관찰된 동적자구모양을 나타낸 것이다. 시료는 길이가 100mm, 폭이 5mm의 스트림 형태의 규소 강판을 이용하였다. 관찰 조건은 SEM의 주사선이 400개, SEM의 주사주파수는 50.0 Hz이고 여자 주파수는 주사주파수에 대하여 ±1 Hz, ±0.5 Hz, ±0.2 Hz, 0 Hz의 차를 두었다. 이 그림으로부터 관찰된 자구모양은 톱니파의 모양을 나타내고, 여

자주파수와 주사주파수의 차가 변화함에 따라 관찰된 자구모양도 크게 변화함을 알 수 있다. 한 화면 당의 톱니파 모양의 잇발 수는 주사주파수와 여자주파수의 차가 클수록 증가한다. 톱니파모양의 각도는 여자 주파수가 주사 주파수에 대하여 차가 -인 경우에는  $90^\circ$  이하가 되어 왼쪽으로, +인 경우에는  $90^\circ$  이상이 되어 오른쪽으로 기울어지는 모양으로 관찰된다. 여자주파수와 주사주파수가 동

일한 경우에는 자구모양은 정지해 있는 것과 같이 관찰되므로 동적인 자구모양을 관찰하기 위해서는 주사주파수와 여자주파수의 차를 두게 하여 관찰할 필요가 있는 것을 이 그림으로부터 알 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 3. Sample holder used in the observation of dynamic domain patterns.

(a) toroidal sample (b) strip sample

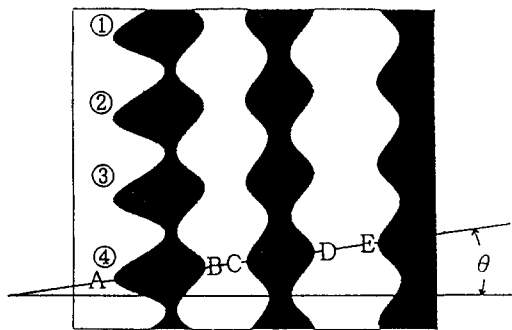


Fig. 4. Number and angle of sawtooth wave in dynamic domain patterns.

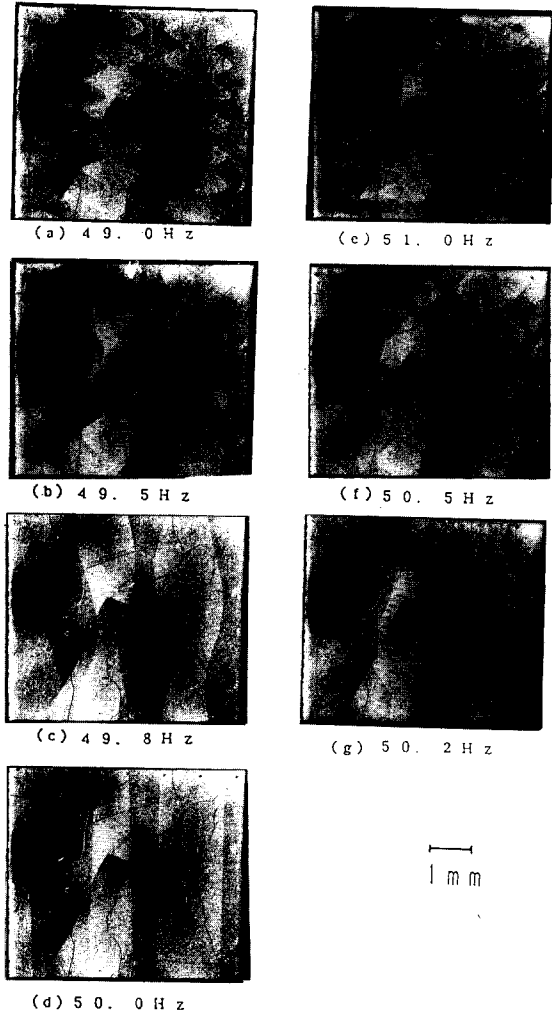


Fig. 5. Observed dynamic domain patterns.

Fig. 6은 Fig. 5에 표시한 관찰 조건과 똑같이 하여 시뮬레이션을 한 것이다. 이 그림으로부터 시뮬레이션에 의한 모양은 Fig. 5의 모양과 같이 주사주파수와 여자주파수의 차의 변화에 의해 모양의 각도와 수가 변화함을 알 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 5와 6에서 톱니파 모양의 잇발 수와 각

도를 비교한 것이다. Fig. 7(a)에서 그 차가  $-1\text{Hz} \sim +1\text{Hz}$ 의 범위에서는 각 모양의 각도가  $180^\circ \sim 0^\circ$ 로 변화하며 관찰된 모양의 각도는 시뮬레이션에 의한 모양의 각도와 일치함을 알 수 있다. Fig. 7(b)에서 나타내는 바와 같이 관찰에 의한 톱니파 모양의 잇발 수는 주시주파수와 여자주파수와의 차가 클수록 증가하며, 시뮬레이션에 의한 모양의 잇발 수와 일치한다.

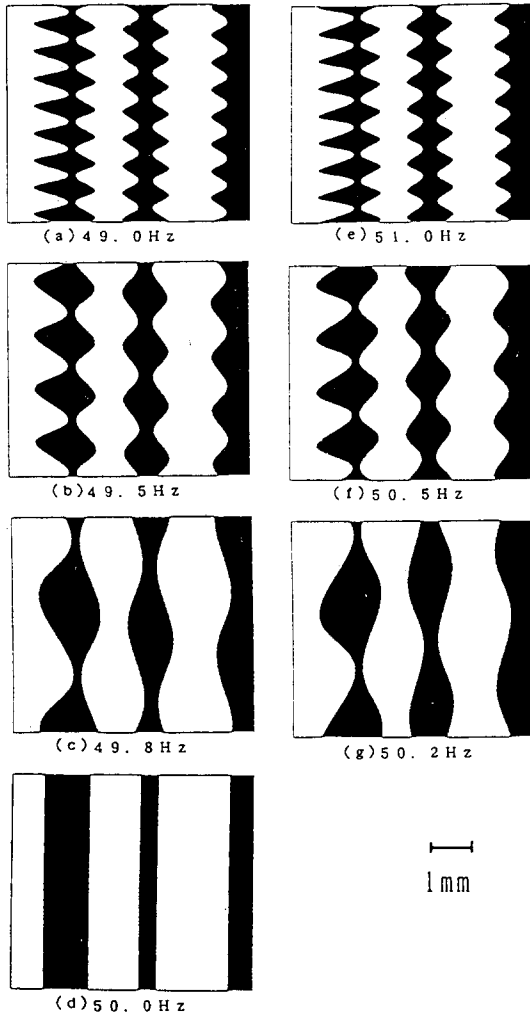


Fig. 6 Simulated dynamic domain patterns.

Fig. 8은 주시주파수의 정수 배와 여자주파수의 차를  $1.0\text{ Hz}$ 로 두고 여자주파수를  $201\text{ Hz} \sim 2001\text{ Hz}$ 로 한 경우에 있어 관찰과 시뮬레이션에 의한 모양을 나타낸 것이

다. 이 때 관찰되는 동적자구 패턴을 명확히 나타내기 위해 동작 지속밀도를 낮추어 자벽수의 증가가 없도록 하였다. 관찰에 의한 톱니파의 각도는 여자주파수의 증가에 따라 크게 되며, 시뮬레이션에 의한 톱니파 모양의 각도와 수는 거의 일치한다.

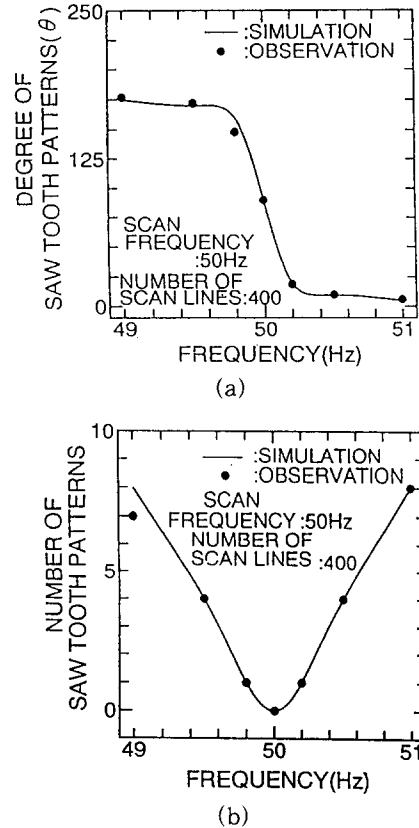


Fig. 7. Comparison of simulated and observed dynamic domain patterns in number and angle of saw-tooth wave.

(a) angle (b) number

Fig. 9는 Fig. 8의 관찰된 모양과 시뮬레이션의 모양을 각도와 수를  $50\text{ Hz} \sim 2\text{ kHz}$ 의 주파수범위에서 비교한 것이다. 이때 여자주파수와 주시주파수의 정수 배와의 차를  $1\text{ Hz}$ 로 두었다. Fig. 9(a)에 나타내는 바와 같이 시뮬레이션에 의한 모양의 각도는 여자주파수에 대하여 증가하는 경향을 나타내고 관찰에 의한 모양의 각도의 주파수에 대한 경향과 거의 일치한다. 그러나 주파수에 따라서는 관찰과 시뮬레이션에서는 톱니파 모양의 각도에

차가 발생하였다. Fig. 9(b)에서 나타내는 바와 같이 톱니파 모양의 잇발수의 비교에서는 시뮬레이션에 의한 모양의 수는 여자주파수의 증가와 관계없이 일정치를 나타내지만 관찰된 모양의 잇발 수는 주파수에 따라서 그 수가 변화하였다. 주파수 201 Hz와 2001 Hz에 있어서의 톱니파 모양의 수로부터 시뮬레이션에 의한 여자주파수와 주사주파수의 차를 구해 보면 실험 시에 설정된 여자주파수와 주사주파수의 정수 배와의 차인 1 Hz보다 작아 201 Hz에서는 -0.7 Hz, 2001 Hz에서는 -0.2 Hz였다. 이것은 주사주파수가 50.0 Hz를 중심으로 아주 적은 주파수 변동이 로렌츠 SEM의 내부에서 발생한 것으로 생각된다. 그러나 Fig. 8(d)로부터 2 kHz에서 주사주파수와 여자주파수의 차에 조금의 변화가 있어도 자벽이 이동하고 있는 것은 관찰이 가능함을 알 수 있다.

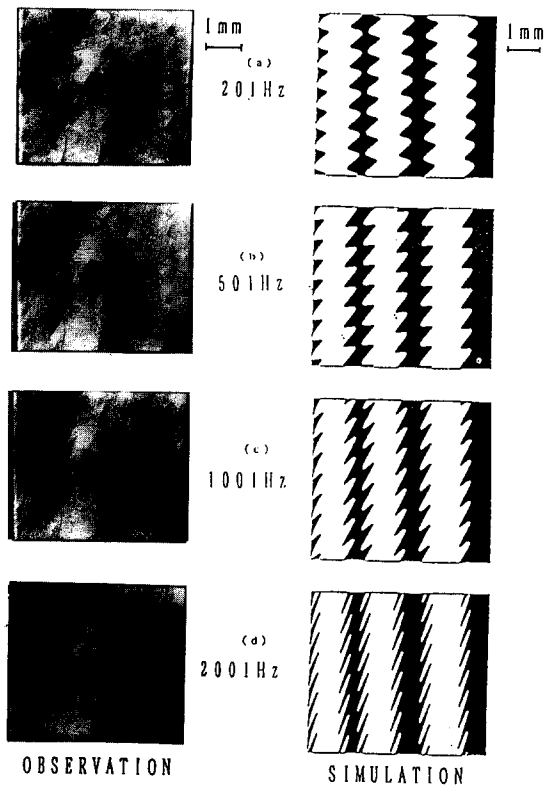


Fig. 8. Observed and simulated dynamic domain patterns.

Fig. 10은 주사주파수와 여자주파수와의 차를 1 Hz로 한 경우, 여자주파수 5.001 kHz와 10.001 kHz에 있어서의 동적자구의 모양을 나타낸 것이다. Fig. 10(a)에 나타내는 바와 같이 5 kHz의 여자주파수에서는 모양으로 부

터 자벽이 이동하고 있는 것을 확인할 수 있다. 그러나, Fig. 10(b)의 10 kHz까지 주파수가 증가하면 자벽이동의 관찰이 극히 어려워짐을 알 수 있다. 이것은 SEM의 주사주파수의 불안정에 의한 것으로 생각되며, 더욱 높은 주파수까지 동적자구모양을 관찰하기 위해서는 SEM의 주사주파수의 안정화에 대한 대책이 필요하다고 생각된다.

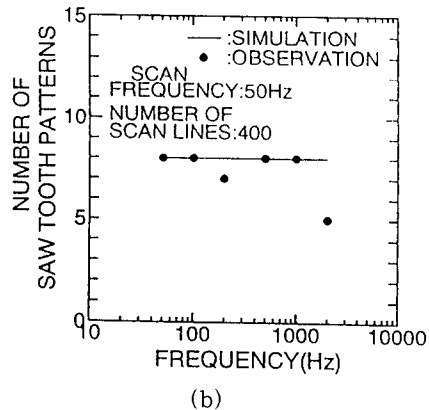
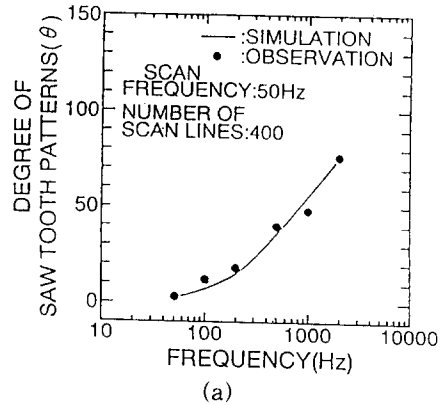


Fig. 9. Comparison of simulated and observed dynamic domain patterns in number and angle of sawtooth wave.

(a) angle (b) number

이 관찰 방법에 의한 동적자구모양으로부터 Fig. 11과 같이 자벽 수와 자벽의 이동거리인  $\Delta L_1 \sim \Delta L_5$ 와 같은 동적 자구거동을 여자주파수 5 kHz 까지 관찰할 수 있고, 자벽의 이동거리로부터 자벽의 이동속도와 표면자속밀도의 계산이 가능하기 때문에 자벽이동에 의해 발생되는 손실을 이론적으로 구할 수 있다[16].

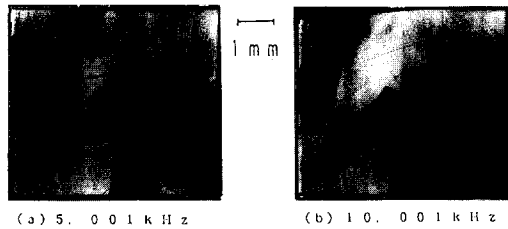


Fig. 10. Observed dynamic domain patterns at 5.001 kHz and 10.001 kHz.

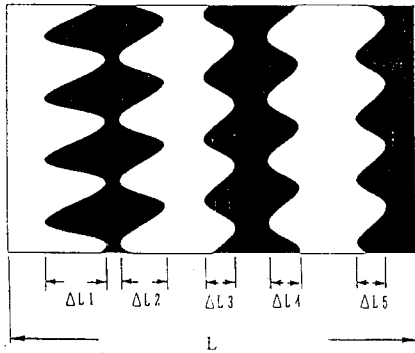


Fig. 11. Dynamic domain behaviors obtained from observed dynamic domain pattern.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 로렌츠 SEM을 이용하여 동적자구모양의 관찰에 대한 검토를 50 Hz ~ 10 kHz의 주파수 범위에서 수행하였다. 동적자구 모양의 관찰은 여자주파수와 SEM의 주사주파수의 정수 배와의 사이에 미소한 차를 두고 관찰하는 방법에 의한 것이며 관찰되어지는 모양은 톱니파의 모양이다. 이 관찰 방법에 따라서 시뮬레이션을 하여 시뮬레이션한 모양과 관찰모양과 비교하여 관찰모양에 대해 해석하였다. 이하 얻어진 결과를 나타낸다.

- (1) SEM의 주사주파수의 정수 배와 여자주파수와의 사이에 미소한 차를 두고 관찰함에 의해 5 kHz까지 동적 자구관찰이 가능하였다.
- (2) 관찰된 동적자구모양은 톱니파 모양이고 SEM의 주사주파수의 정수 배와 여자 주파수와의 미소한 차가 변화함에 의해 모양이 크게 변화하였으며, 관찰모양과 시뮬레이션 모양은 거의 일치하였다.
- (3) 더욱 높은 주파수에서 관찰하기 위해서는 SEM의 주사주파수의 안정화에 대한 대책이 필요한 것을 알았

다.

#### 참 고 문 헌

- [ 1 ] F. Bitter : Phys. Rev., **38**, 1903(1931).
- [ 2 ] F. Bitter : Phys. Rev., **41**, 507(1931).
- [ 3 ] H. J. William, F. G. Forster and E. A. Wood : Phys. Rev., **82**, 119(1951).
- [ 4 ] G. L. Houze, Jr : J. Appl. Phys., **38**, 1089 (1967).
- [ 5 ] D. J. Fathers, J. P. Jakuvovics, D. C. Joy, D. E. Newbury and H. Yakowitz : Phys. Stat. Sol., **20(a)**, 535(1973).
- [ 6 ] D. J. Fathers, J. P. Jakuvovics, D. C. Joy, D. E. Newbury and H. Yakowitz : Phys. Stat. Sol., **22(a)**, 609(1974).
- [ 7 ] 山本敏行, 津野勝重 : 固體物理, **10**, 23(1975).
- [ 8 ] 山本敏行, 津野勝重 : 固體物理, **11**, 513(1976).
- [ 9 ] R. Shimizu, T. Ikuta, M. Kinoshita, T. Murayama, H. Nishizawa and T. Yamamoto : Jpn, J. Appl. Phys., **15**, 967(1976).
- [ 10 ] T. Ikuta and R. Shimizu : Phys. Stat. Sol., **23(a)**, 605(1974).
- [ 11 ] R. Shimizu and T. Ikuta : Appl. Phys. Lett., **44**, 811(1984).
- [ 12 ] E. Mivehchi, P. Beckley, D. H. Horrocks and C. H. Porter : IEEE Trans. Magn., **26**, 1975 (1990).
- [ 13 ] K. I. Arai, Y. H. Kim and M. Yamaguchi : J. Appl. Phys., **70**, 6256(1991).
- [ 14 ] T. Yamamoto and K. Tsuno : AIP Conf. Proc., Magn. Mag. Mater., **29**, 572(1975).
- [ 15 ] 일본전자(SM-MDI40 TYPE II 자구관찰장치) 취급 설명서.
- [ 16 ] J. W. Shilling and G. L. Houze : IEEE Trans. Magn. **10**, 195(1974).

## Observation of Dynamic Domain Patterns using Lorentz SEM

Y. H. Kim

*Department of Electrical Engineering, National Fishery University of Pusan*

K. I. Arai

*Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, Sendai, Japan*

(Received 28 August 1995, in final form 24 October 1995)

This paper discussed on the observation of dynamic domain patterns using Lorentz SEM in the frequency region of 50 Hz-10 kHz. The observed dynamic domain patterns were compared with the simulated ones. The observation method is characterized by using the slight difference between the exciting frequency and the multiples of the scanning frequency of SEM.