한국공작기계학회지 Vol.18 No.5 2009. 10. pp. 455~461
Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers

전자현미경의 이미지 향상을 위한 주사시스템의 안정성

김승재*, 김동환+

(논문접수일 2009. 2. 25, 심사완료일 2009. 9. 10)

Scanning System Stability for Improving SEM Image

Seung Jae Kim*, Dong Hwan Kim+

Abstract

In a scanning electron microscopy, image distortion is a critical issue and it is needed to be eliminated by some kinds of schemes. In this work, scanning frequency and scanning wave form are adjusted to have an improved image. The relationship between scan coil and its driver is investigated and appropriate frequency and wave form are suggested. It is proved that the selected frequency and wave form showed an enhanced image with less distortion, which were done by experiments. In addition, a noise elimination is addressed, providing improved image with a GROUND signal integration with the amplifier and the scan driver.

Key Words : Scanning electron microscope(전자현미경), Scan driver(스캔드라이버), enhancement(해상도 향상), Scan generation (스캔파형), Image distortion(영상왜곡)

1. 서 론

전자현미경에서 영상을 획득하기 위해서는 전자빔을 시료 표면에 주사하여야 한다. 전자빔 주사방식은 브라운관 TV의 주사방식과 동일한 방법으로 이루어진다[1,2]. Fig. 1에서는 전자현미경에서 전자빔을 시료 표면에 주사하여 영상을 획득 하는 일련의 과정을 도식화 하였다. 촬상관의 타깃(target)면에 만들어진 전기상은 대전량이 무수한 점으로 만들어져 있는데, 이것을 화상의 전기 신호(영상신호)로 꺼내기 위해 화면을 왼쪽 끝에서 오른쪽 끝으로 분해하는 것을 수평주사라 하며, 수평 주사에 의해서 만들어지는 가로선을 주사선이라 한다. 주사선을 위쪽에서 아래쪽으로 늘어놓아 가는 주사를 수직주사라 하며 이 주사선으로 구성되는 화면을 래스터(raster)라 한다. 1개의 주사선에서 다음의 주사선으로 옮기는 사이를 귀선(Flyback line)이라 하며 이 기간을 될 수 있는 대로 짧아지도록 한다. Fig. 2에 X, Y주사신호에 전자빔이 시료 표면을 주사하는 모습이다.

* 서울산업대학교 나노생산기술연구소
+ 교신저자, 서울산업대학교 기계설계자동화공학부 (dhkim@snut.ac.kr)
주소: 139-743 서울시 노원구 공릉길 138

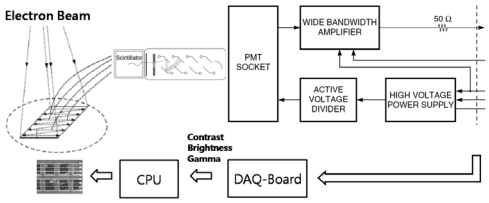


Fig. 1 General method of imaging from SEM system

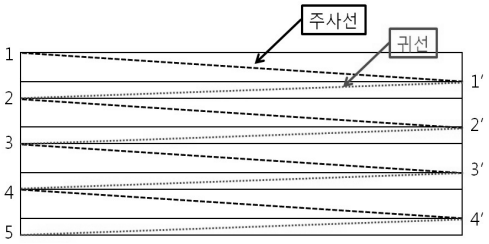


Fig. 2 Electron beam path: raster scan

2. 주사신호 및 영상획득

2.1 주사신호 시스템

편향기는 전류와 전압을 인가하여 주사영역(scanning area)을 결정해주는 역할을 한다. 전자빔이 가지는 고유의 자기장과 코일이 가지는 자기장이 서로 평행하여 미는 힘과 당기는 힘을 유도하게 되어 전자빔이 서로의 자기장에 의해서 어느 정도의 일정범위로 편향되어 주사영역을 화면에 보여주게 된다[3]. 주사영역의 범위는 전류나 전압에 의해 결정되는데 전류 및 전압의 세기가 클수록 자기장에 미치는 범위가 넓어져 넓은 영역을 주사하게 된다. Fig. 2.1에서는 편향기에 인가된 전류에 의한 X, Y방향의 자기장의 형성을 보여 주고 있다.

2.2 주사신호의 주파수 및 영상

주사신호의 주파수를 결정하기 위하여 2차전자 신호를영상신호로 변환하기위한 아날로그 디지털 컨버터(analog to digital converter, ADC)의 샘플링 속도를 고려 하여야 한다. 전자빔의 위치가 주사신호에 의해 편향기에 자기장을 형성함으로써 전자빔의 위치를 이동시키게 되고 이때, 시료 표면에서 튀어 나오는 2차전자를 수집하여 영상 데이터를 만든다[4]. 주사신호의 주파수와 초당 영상의 업데이트 횟수를 결정하기 위해서는 영상의 해상도와 아날로그 입력 샘플링 속도 즉, 2차전자 신호가 디지털 변환을 위한 샘플링 시간에

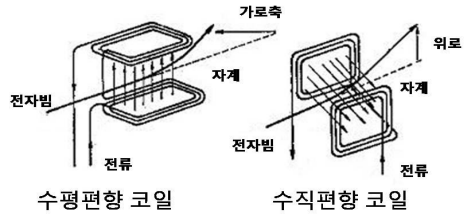


Fig. 3 Magnetic field formation of deflection coil

의해서 가로 방향 영상의 해상도를 곱하면 가로 방향 주사신호의 주기가 결정되고, 세로 방향 주사신호의 주기는 가로방향 주사신호에 세로방향 영상해상도를 곱하면 된다. 한 프레임의 영상을 만들기 위해 세로 방향 주사신호 주기의 역수, 주파수는 초당 영상의 갱신 횟수와 같다. 식 (2.1-3)을 통해서 가로, 세로 방향의 주사신호의 주파수를 계산할 수 있다.

$$T_{hor} = P_{hor} \times \frac{1}{I_{sample}} \tag{1}$$

$$T_{ver} = P_{ver} \times T_{hor} \tag{2}$$

$$F_s = \frac{1}{T_{ver}} \tag{3}$$

여기서 가로방향의 주사신호의 주기는 T_{hor}이며, 세로방향의 주사신호 주기는 T_{ver}이다. F_s는 초당 영상의 갱신 횟수이다. 전자현미경에서 320×320(pixel)($P_{hor} \times P_{ver}$)의 해상도를 갖는 영상을 얻고자 할 때, 아날로그 입력신호의 샘플링 시간(I_{sample})이 1.25MHz로 가정한다면, 가로방향의 주사신호의 주기의 역수 취하게 되면 가로방향 주사신호의 주파수(3.906KHz)이고, 세로방향의 주사신호도 가로방향과 동일한 방법으로 주사신호의 주파수(12.2Hz)가 된다. 세로 방향의 주파수는 초당 영상정보 갱신하는 시간과 동일하며 약 12프레임이 될 것이다. 본 연구에서 제작한 전자현미경 시스템에서도 ADC의 샘플링 주파수는 최대 1.25MHz이다.

3. 주사신호 시스템의 응답

3.1 주사신호 시스템의 응답한계

주사신호 발생기(scan generator)에서 생성한 주사신호는 주사신호 드라이버(scan driver)를 통해서 충분한 전압과 전류의 보정이 이루어져야 한다. 주사신호의 전류의 크기는

주사전자현미경에서 전자빔이 시료표면을 주사하는 영역을 결정한다[5,6]. 편향기는 코일로 구성되어져 있고 코일의 고유 특성인 임피던스(impedance)성분을 충분히 고려하여 주사 신호의 주파수와 형상을 고려하여야 한다. 주사신호는 드라이버를 통해 편향기에 가해지고 이로 인하여 전자빔의 위치를 이동시킴으로써 일정 영역에 전자빔을 주사 할 수 있게 된다[7,8]. 주사신호의 주파수는 주사신호 시스템(주사신호 드라이버와 편향기) Fig. 4의 대역폭(bandwidth)을 고려하여 주파수를 결정하여한다. 시스템의 대역폭을 벗어난 주사신호는 과도응답(overshoot) 을 보이며 영상에서 왜곡을 발생 시키며, 의도하지 않은 시료표면의 영역을 주사하게 된다. 분석 장비인 주사전자현미경에서의 영상왜곡은 치명적일 수 있다. 주사신호 시스템의 대역폭을 측정 하기위하여

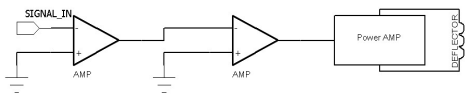


Fig. 4 Schematic of scanning System

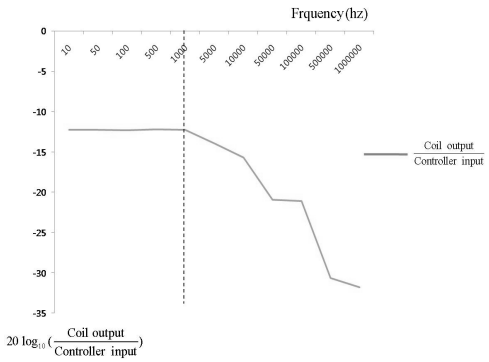


Fig. 5 Characteristic of system response

Table 1 Sine waveform frequency and its voltage

Frequency (hz)	Phase	Input (v)	Driver (v)	Coil (v)	C/D	C/I
1	-6	3.47	4.93	0.846	-15.3095	-12.2592
10	-5	3.47	4.93	0.846	-15.3095	-12.2502
100	-5	3.48	4.96	0.844	-15.3828	-12.3047
1000	-2	3.47	5.24	0.844	-15.8598	-12.2797
10000	-2	3.51	8.61	0.577	-23.4765	-15.6826
100000	-120	3.48	8.45	0.306	-28.8227	-21.1172
1000000	-151	3.47	1.9	0.089	-26.5873	-31.7686

사인파를 입력으로 하여 주파수에 따른 전압 이득을 통하여 실험하였다. Fig. 5에 결과를 그래프로 표현하였다. 가로축은 입력신호인 사인파의 주파수에 해당하고 세로축은 전압 증폭도이다. 전압 증폭도 A_v와 전압이득 G_v에는 식 (3.1)의 관계가 있다[9,10].

$$G_v = 20\log_{10} A_v \ [dB] \tag{4}$$

주사신호의 주파수를 결정함에 있어 주사신호의 최대 주파수가 시스템의 최대 주파수 범위를 넘어가지 않아야 한다. 측정된 주사시스템의 응답 특성은 3.5KHz 미만임을 알 수 있었다: Fig. 5, Table 3.2 참고

3.2 단위계단신호의 응답특성

삼각파신호에서 신호의 한 주기안에 단위시간(ADC Sampling Speed) Amplitude가 변한다. 이는 연속적으로 크기가 변화는 선형구간에서는 큰 영향을 미치지 않지만, 변화가 급격한 구간(귀선 구간)에서는 문제가 발생된다. Fig. 6(a)은 본 연구에서 제작한 주사전자현미경 시스템에서의 전체영역을 의미하는 10V 계단응답을 보여준다. 최종치(+5 V)의 10~90% 까지의 상승시간은 1.98 us(DA 출력), 3.76 us(코일 출력)이다. 정착시간은 3.13us(DA 출력), 14.4 us(코일 출력)이다. Fig. 6(b)은 1 V 계단응답을 보여준다. 최종치(+0.5 V)의 10~90%까지의 상승시간은 0.41 us(DA 출력), 3.23 us(코일 출력)이다. 정착시간은 1.26 us(DA 출력), 9.46 us(코일 출력)이다. 단위시간당 큰 전압변화에 따른 느린 응답을 보여주고 있다. 최대 주사영역에서의 X축 주사신호의 전압값이 최초 -5 V에서 +5 V까지 주사 후 -5 V로 복귀하는데 최대 14.4 us의 정착시간을 보인다.

4. 주사신호와 영상

4.1 주사신호의 주파수에 따른 영상왜곡

앞서 결정된 주사신호 시스템의 응답한계를 참고하여 영

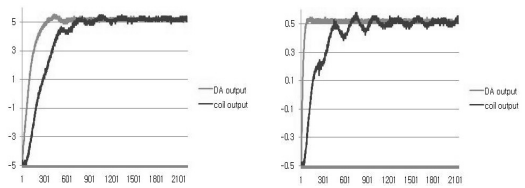


Fig. 6 Step response of scan signal system : (a) 5V step response and (b) 0.5V step response

상의 해상도와 영상 획득시간을 고려하여 주사신호의 주파수를 결정한다. 주사신호의 주파수를 변화 시켜 주사신호 시스템의 응답한계에 따른 획득된 영상과의 상관관계를 실험하였다. 주사신호의 주파수가 빨라짐에 따라 영상을 획득하는 구간과 원점으로 복귀하는 구간에서 주사신호의 변화율이 시간이 빨라짐에 따라서 영향을 받게 된다. 주사신호의 한주기안에서 신호의 상승 구간과 신호의 하강 구간으로 구분되어 진다. 주사신호의 왜곡이 발생하는 구간은 신호의 극점에 해당하는 부분이고, 이를 최소화 하기위한 방법으로 좌표점의 복귀를 위한 구간에서 시간 지연이다. 주사신호 주파수 및 주사신호의 한 주기 안에서 하강 구간의 형상을 바꿔보면서 영상에서의 왜곡 비율을 비교했다. Fig. 8에서 보는 것과 같이 주사신호의 시간의 비를 정의한다. 식 (5)에 T_R는 신호의 상승 구간에 해당하는 시간이고, T_F는 신호의 하강 구간에 해당하는 시간이다.

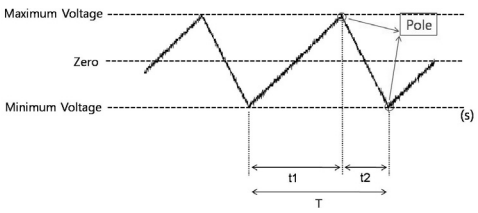
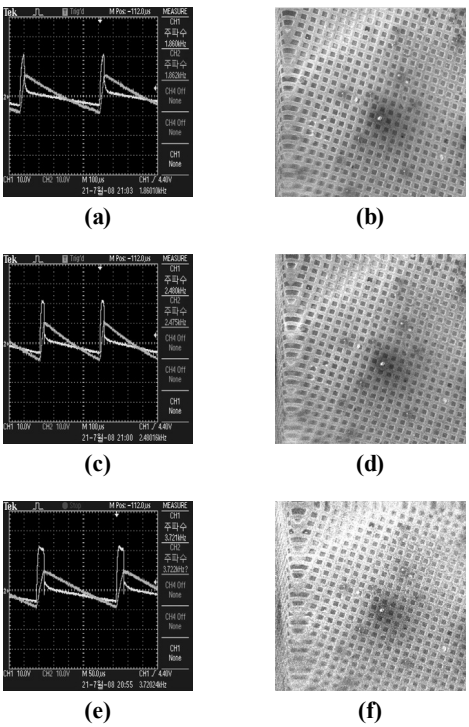


Fig. 7 Scan waveform duty ratio



(a) **(b)** **(c)** **(d)** **(e)** **(f)**

Fig. 8 Frequency of X-direction waveform (a) scan waveform, (b) SEM image of 1.953KHz, (c) scan waveform, (d) SEM image of 2.604KHz, (e) scan waveform, (f) SEM image of 3.906KHz

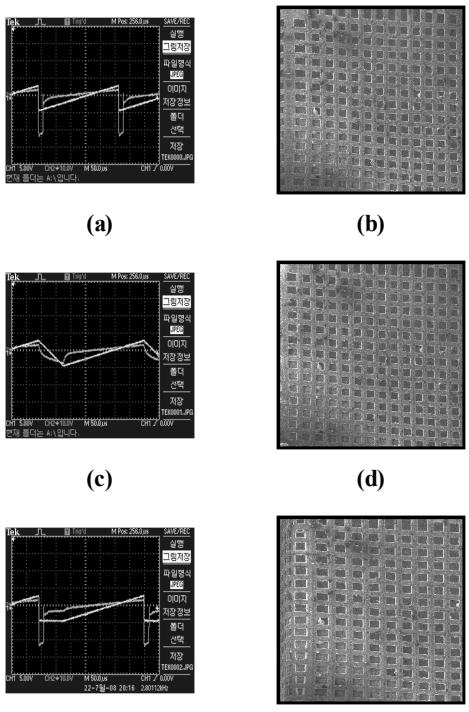
$$T_R(\%) = \frac{t_1}{t_1 + t_2} \times 100$$

$$T_F(\%) = \frac{t_2}{t_1 + t_2} \times 100 \quad (5)$$

주사신호의 주파수에 따른 영상을 비교 분석해본 결과 주사신호 발생기(scan generator)에서 발생되어 주사신호 드라이버를 거쳐 편향코일에 인가되는 입력 신호(파란색)와 편향코일을 거쳐 나오는 출력 신호(노란색)를 보여주고 있다. 실제 주사영역이 결정되는 신호를 분석해보면 Fig. 8(a), (c)와 (e)를 통해 극점에서의 신호의 과도응답특성의 비율은 주파수가 빨라짐에 따라 미세하게 늘어나는 것을 확인할 수 있다. 시스템의 주파수 응답특성에서 실험한 결과와 단위계단 신호의 응답특성에서의 결과와 유사한 결과가 나왔다. 주사신호에서 왜곡의 비율이 커짐에 주사신호의 선형적 구간이 줄어들어 주사영역의 변화를 가져온다. 이는 영상의 왜곡을 초래하고 Fig. 8(b), (d)와 (f)를 통해서 확인할 수 있다. 주사 신호의 주파수는 영상의 업데이트 시간과 직접적으로 관련이 있고 실험을 실시한 주사신호의 주파수는 약 2배 이상의 주사신호의 주파수 안에서 실험 하였다. 영상 왜곡의 비율을 줄이기 위해 영상 업데이트 시간을 고려하여 보다 나은 영상 획득을 위하여 주사신호의 주파수 3.0KHz에서 다음 실험을 실시하였다.

4.2 주사신호의 형상에 따른 영상왜곡

주사신호는 영상을 얻어오는 구간과 원점으로 복귀하는 구간으로 나눠진다. 주사신호의 과도응답이 발생하는 구간은 신호의 전압 변화율이 큰 원점 복귀 구간에서 나타나며 이는 편향기가 코일로 구성되어져 있어 코일의 고유 특성의 역기전력에 따른 과도응답 현상이 발생하였다[15]. 주사신호의 한주기 안에서 원점 복귀를 위한 구간에서 시간 지연을 위하여 신호의 형상을 변화시켜 주사신호의 과도응답 특성을 실험해 보았다. Fig. 9 참조. 주사신호의 하강구간의 비율을 줄이지 않고 더 많은 영역을 주사하고 실제 출력 영상에



(a) (b)

(c) (d)

(e) (f)

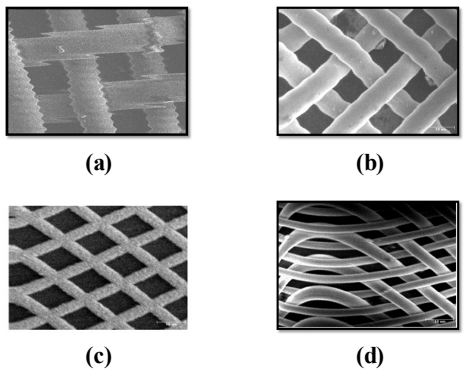
Fig. 9 (a) scan waveform (b) SEM image for default setting: (c) scan waveform (d) SEM image for flat shaped waveform: (e) scan waveform (f) SEM image for flat and sloped waveform

서는 없애 버리는 방법, 주사신호의 하강구간 형상을 slope type, 그리고 flatness type 비교해 보았다. Fig. 9(b)의 왜곡율은 12%, (d)의 왜곡율은 8%, (f)의 왜곡율은 15%로 나타났다. 실험을 통해 급격한 변화를 최소화시키기 위해 slope 형태로 신호시간을 지연시킨 주사신호에서 영상의 왜곡 비율이 가장 줄어들었다. 왜곡의 비율은 획득된 영상의 픽셀 개수의 비율로 계산하였다.

5. 노이즈 발생 원인 및 해결

5.1 원형 주사신호 생성

주사전자현미경에서 여러 종류의 노이즈가 발생하여 영상의 질을 떨어뜨린다. Noise의 종류를 분석하여 그 각각에 대한 대책을 세움으로써 궁극적으로 System에 대한 전체적인 노이즈 대책을 세움으로써 질 좋은 영상을 얻을 수 있을 것이다. 시료대의 불안한 조립에 의한 노이즈 및 Aperture오



(a) (b)

(c) (d)

Fig. 10 Image results caused by noises: (a) stage, backlash, (b) unstable ground, (c) aperture contamination, (d) scan driver distortion

염에 의한 노이즈가 있다. 또한 각종 전원과 접지선사이에서 발생하는 전위차로 인한 Signal의 오차가 있을 수 있다.부분적인 회로가 거리상으로 멀리 떨어져 있을 경우 전선의 도전율에 의해 전위차가 발생한다. 이것을 방지하기 위하여 접지선을 보강해야 할 것이다. 전원 공급 장치로서 SMPS(Switching Mode Power Supply)를 사용하고 있으며, 일반 Linear Power Supply의 60Hz Ripple 성분 외에 대략 100kHz 정도의 Switching Frequency를 절대 무시할수 없다. Linear Transformer를 이용한 Power Supply를사용할 경우와 비교한다면 상대적으로 큰 값의 노이즈 Level을 가진다. 또한 진공상태를 유지하기 위하여 사용되는 Motor Pump의 진동 노이즈 또한 무시 할 수 없을 것이다.

5.2 노이즈 해결 방안

근본적으로 SMPS가 가지고 있는 Ripple 성분 및 Switching Noise 성분을 제거할 수 없으므로(Fig. 11) 회로의 배선 등을 통하여 그 영향을 최소화하여야 한다. 주사신호 발생기로

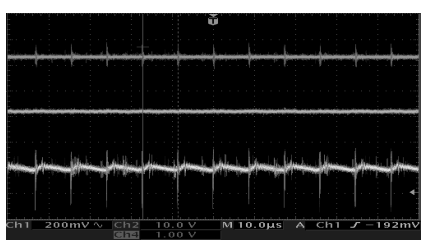
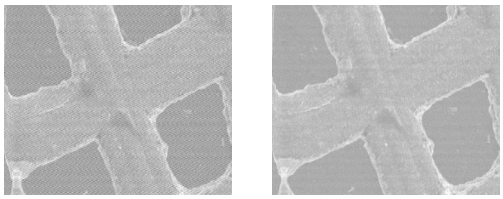


Fig. 11 Classes of electric noise occurred in SEM



(a) (b)

Fig. 12 Ground separation of scan amp. & generator (a) and common ground connection (b)

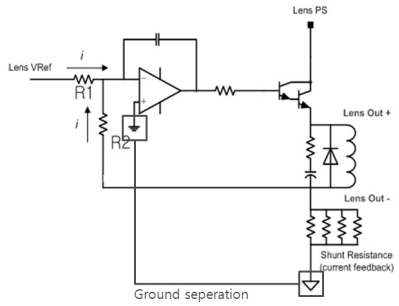


Fig. 13 Schematic of scan amplifier circuit

부터 나오는 신호를 주사신호드라이버로 전송하는 과정에서 접지선을 전압 Source에서 연결하고, Direct로 연결하지 않을 경우(Fig. 12)와 Direct로 연결한경우의 Image 차이를 보여준다. 이것은 Scan Waveform 자체의 문제가 아니고, 접지선의 전위차에 의하여 생긴 문제로 볼 수 있다. 폐루프에 유기된 기전력과 기전력을 발생시키는 자계 사이의 정량적인 관계인 Faraday의 법칙에서의해 식 (6)의 Coil에 흐르는 전류가 변화하여 생기는 자기 유도 작용에 의해 유기되는 기전력은 식 (7) 나타나며 이것은 전류의 급격한 변화가 있을 경우 Power Amp에 치명적인 손상을 입힐 수 있다. Fig. 13에 접지선의 분리된 회로를 도식화 하였다.

$$V = \frac{-d\Phi}{dt}, (\Phi: \text{전체 자속}) \quad (6)$$

$$V = -L \times \frac{di}{dt} \quad (7)$$

6. 결 론

본 연구에서는 주사전자현미경에서 적절히 조절된 전자빔은 편향기를 통하여 일정 면 주사하게 되고 이때 고해상도 영상을 얻기 위해 주사시스템의 응답한계가 영상에 미치는 영향을 실험하였다. 주사신호 드라이버의 응답특성과 편향코일의 임피던스 성분으로 인한 주사파형의 상승 하강구간에서 과도응답 특성이 나타났고 이를 해결하기 위한 3가지 방안을 제시하였다.

(1) 주사시스템의 주파수 응답특성을 분석하여 이상적인 주사신호의 주파수(약 3.0kHz)를 결정하였다.
(2) 주사신호의 하강구간의 형상(flatness, slope)을 다양하게 변화시켜 주사신호의 극점에서 과도응답을 줄일 수 있었다. slope형태의 주사신호에서 낮은 왜곡율(8%)로 나타났다.
(3) 전자현미경의 영상의 왜곡 발생의 요소중 하나인 노이즈 문제를 측정하고 접지선을 스캔드라이버와 스캔증폭기와 공동으로 사용하는 방안을 제시하였고 기타 기구적인 요인에 의한 이미지 왜곡에 대해 수집·분석하였다.

후 기

본 연구는 서울시 산학연 협력사업의 지원으로 수행되었음(과제번호 10583).

참 고 문 헌

(1) Wells, O. C. and Bremer, C. G., 1968, “Voltage measurement in the scanning electron microscope,” *Journal of Physics E*, Vol. 1, pp. 902~906.
(2) Jeol, *A Guide to Scanning Microscope Observation*, Jeol, Japan, pp. 4~35.
(3) Lim, S. J., Lee, C. H., and Kang. J. H., 2005, “Development of Controller for Optimal Beam Scanning in E-Beam Manufacture System,” *Proceeding of the KSPE 2005 fall annual conference*, pp. 166~169.
(4) Lee, S. U., Jeon, J. U., and Han., S. H. 2004, “The Electron Detector in Scanning Electron Microscope,” *Proceeding of the KSMTE 2004 spring annual conference*, pp. 513~517.
(5) Kim, S. J., Kim, D. H., Park, M. J., Oh, S. K., and Jang, D. Y., 2008, “Controller Circuit analysis and Scan Generation modulation for enhancing SEM

image," *Proceeding of the KSMTE 2008 spring annual conference*, pp. 108~111.

(6) Kim, D. H., Kim, Y. D., Park, M. J., and Jang, D. Y., 2007, "Methodologies for enhancing resolution a scanning electron microscopy," *Proceeding of the KSMTE 2007 spring annual conference*, pp. 80~83.

(7) Lee, K. W. and Thong, J. T. L., 1999, "Improving the speed of scanning electron microscope deflection system," *Measurement Science and Technology*, Vol. 10, pp. 1070~1074.

(8) Kim, D. H., Kim, S. J., Park, M. J., Oh, S. K., and Jang, D. Y., 2008, "Methodologies for enhancing performance of Scan drivers in a Scanning electron Microscope," *Proceeding of the KSME 2008 spring annual conference*, pp. 22~23.

(9) Song, D. Y., Lee, S. H., Jung, T. U., Cho, S. E., Park, S. J., and Kim, D. O., 2008, "Development of Back-emf Filter Circuit for Driving Sensorless BLDC Motors," *The Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 13, No. 1, pp. 63~69.

(10) Pluska, M. Ratajczak and Katcki, J. J., 2006, "Elimination of scanning electron microscopy image periodic distortions with digital signal processing methods," *Journal of Microscopy*, Vol. 224, pp. 82~92.