

주사 전자현미경의 이미지 해상도 향상을 위한 방안 및 실험적 검증

김동환*, 김영대⁺, 박만진⁺⁺, 장동영^{**}, 박 근^{***}

(논문접수일 2007. 6. 20, 심사완료일 2007. 8. 7)

Methodologies and Verifications for Enhancing Resolution of a Scanning Electron Microscopy

Dong Hwan Kim*, Young Dae Kim⁺, Man Jin Park⁺⁺, Dong Young Jang^{**}, Keun Park^{***}

Abstract

The electric part of thermal SEM(Scanning Electron Microscopy) consists of high voltage generation, lens control, and image processing. Several methodologies for enhancing SEM image are addressed and those results are verified through analyses and experiments. The controller employs a DSP(Digital Signal Processing), making the system more flexible and convenient than the classical analogue based controller. In some parts based the analog circuit, there are inevitable sources of noise and image distortion. The experimental investigation is provided along with analytical proof to enhance the SEM image.

Key Words : SEM(전자 주사 현미경), image distortion(이미지 왜곡), noise elimination(노이즈 제거), image enhancement(이미지 향상), lens control(렌즈 제어), experimental proof(실험 검증)

1. 서론

전자빔원은 전자빔을 발생하는 방식에 따라 열전자 방사형(thermionic electron emission)과 전계 방사형(field

emission)으로 구분할 수 있다^(1,2). 열전자 방출형 전자현미경(thermal SEM)의 전장부는 전자빔의 발생 및 가속을 위한 고압부와 렌즈 등을 제어하기 위한 제어부 그리고, 이미지를 처리하기 위한 검출부 및 프로그램 부분으로 나눌 수 있다.

* 서울산업대학교 기계설계자동화공학부 (dhkim@snut.ac.kr)
주소: 139-743 서울시 노원구 공릉2동 172

+ 서울산업대 나노생산기술연구소

++ 서울대학교 기계항공공학부

** 서울산업대학교 산업정보시스템공학과

*** 서울산업대학교 기계설계자동화공학부

본 연구에서는 열전자 방출형 전자현미경의 가장 핵심적인 부분이라 할 수 있는 전자빔을 가속시키는 고압부의 제어를 별도의 제어기를 사용하지 않고, DSP를 이용하여 렌즈의 제어부와 통합시킴으로써 전장부 회로의 단순화의 가능성을 확인하였다. 이러한 요인은 편리성을 향상시키기도 하지만 전자현미경의 해상도를 증대시키는데 때로는 장애가 될 수 있다.

렌즈 제어부는 초점(focus)을 형성하기 위한 대물렌즈(object lens)와 2개의 집속렌즈(condenser lens)를 제어하고 동시에 전자빔을 고속 주사하는 x, y 방향으로 주사코일(scan coil), 그리고, 전자총 얼라인먼트 코일, 이미지 이동 코일 등을 제어한다³⁾. 각 코일에 흐르는 전류를 적절히 조정함으로써 집속된 전자빔을 시편에 주사하여 2차전자 검출기로부터 시편으로부터 방출되는 전자의 양을 포집하여 이미지를 형성하여 시편의 표면에 대한 형상을 측정하게 된다. 이 과정에서 각 코일에 흐르는 전류의 왜곡이나 적절하지 못한 정도가 결국 전자현미경의 해상도를 좌우하게 된다.

주사코일을 제외한 나머지 코일들은 DC 전류를 제어함으로써 그 각각의 역할을 수행하고, x,y 주사코일은 일정 신호(기본적으로 톱니파를 사용)의 AC 전류(톱니파)를 제어함으로써 그 역할을 수행한다.

본 연구는 전장부의 통합과 함께 이미지의 초점과 배율을 향상시키기 위하여 대물렌즈, 집속렌즈 및 주사코일의 전류 제어시의 접지 및 전원 관리와 그것이 이미지에 미치는 영향에 관하여 실험하여 접지(earth) 및 기저신호(ground), 그리고 전원의 관리가 이미지에 커다란 영향을 미친다는 것을 확인하였다.

2. 전장부의 구조

현재 개발 중인 열전자 방출 현미경의 전장부는 Fig. 1과 같은 구조로 되어있으며, DSP를 이용한 각 제어부의 개별 기본 동작에 대한 시험을 하였다. Fig. 1에서 Front 패널은 디지털 제어 방식인 PC를 통한 제어와 함께 작업자가 편하게 사용할 수 있는 고전적인 아날로그(analog) 방식으로 생각할 수 있도록 엔코더 볼륨(encoder volume)을 사용한 제어를 도안한 것이다.

각 블록 별 개발 현황은 아래와 같다.

2.1 고압부

현재 연구에는 Spelman 사의 고압 발생기와 FT-LAB의 고압 발생기 2종류의 고압 발생기를 보유하고 있으며, 고압부의 제어를 위해 FT-LAB의 고압 발생기를 모델로 DSP(TI사의 TMS320LF2407)를 이용한 제어를 실험하였다. Fig. 2는 DSP 이후의 블록으로 디지털/아날로그변환기(DAC)와 증폭기(OP-Amp)의 구성을 보여준다. 이 실험을 함에 있어서 고압 발생기를 제어하고, 되먹임(feedback)되어 나오는 값의 모니터링은 큰 문제가 없었으나, 과연 실제로 발생하는 고전압이 모니터링 되는 값과 일치하는 가하는 것이었다. DSP는 복합적인 입력이나 출력을 손쉽게 구현할 수 있기에 SEM의 성능에 대한 실험이나 최적 상태를 찾아 가는데 유용하게 쓰이게 된다. DSP의 빠른 신호 발생은 미세한 신호를 제 시간에 보내줌으로써 아날로그 제어 방식에서는 구현하기 어려운 여러 복합적인 신호의 형성을 가능하게 하여 궁극적으로 SEM의 성능향상에 기여할 수 있다.

실제로 고압의 측정은 절연유속에서 실시했으며, 각 측정 포인트의 실제 값과 측정값 사이에는 큰 오차가 있었다.

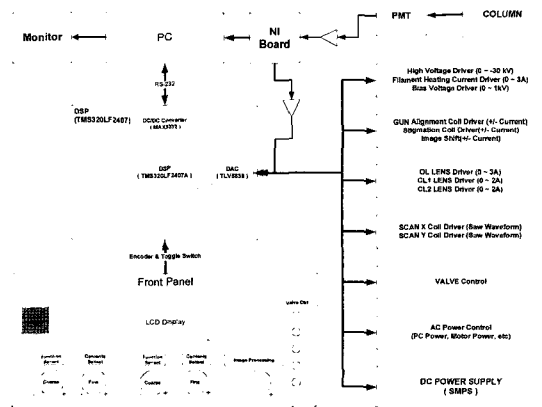


Fig. 1 전장부 구조

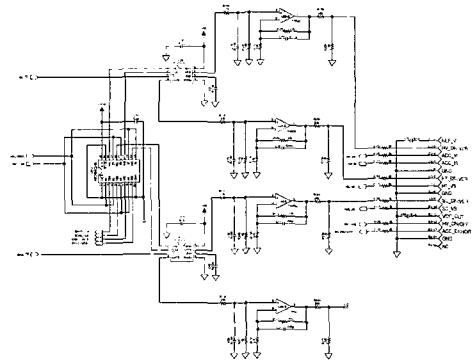


Fig. 2 고압 발생기 제어 회로

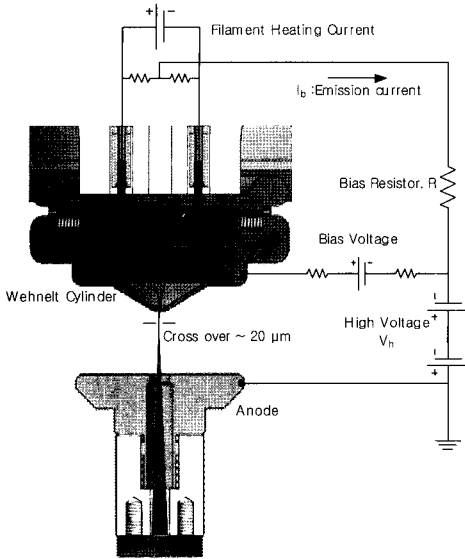


Fig. 3 열전자 방출 전자총의 전기적인 구조

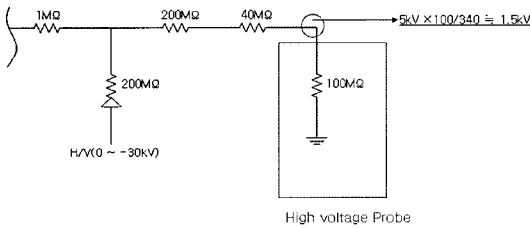


Fig. 4 P6015A의 측정 예

오차의 이유로는 측정을 위해 사용된 고압 측정용 프로브 (probe)인 Tektronix사의 P6015A의 입력 임피던스(input Impedance)가 100MΩ이어서 한 예로 바이어스(bias)의 출력 임피던스(output Impedance)가 240MΩ인 곳에서 측정한 경우는 실제 값의 100/340 출력밖에 확인할 수 없었다.

하지만, 이 실험에서 고압 발생기의 제어가 DSP를 이용하여 가능함을 확인하였으며, 수 GΩ 이상의 입력임피던스를 가지는 프로브를 사용하거나, 임피던스를 계산하여 환산할 경우 근사 값을 얻을 수 있음을 확인하였다.

2.2 렌즈 제어

Fig. 5는 전자빔의 집속을 위하여 사용되고 있는 대물렌즈의 증폭기이다. 대물렌즈로 사용되는 코일의 DC에서의 임피던스는 약 2~3Ω이므로 전류 제어를 위하여 부하로서 사용되는 1Ω 저항까지 합하여 최대 허용 전류는 약 3.5A 정도

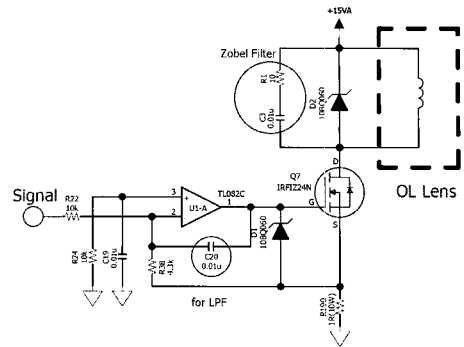


Fig. 5 대물렌즈 제어용 회로

이다.

전류 가변 시 렌즈의 안정적인 동작을 위하여 조벨 필터 (Zobel filter)를 추가하였으며, 안정적인 게이트 드라이브 (gate drive)를 위하여 노이즈 유입을 막기 위한 저주파필터 회로를 추가하였다. 극한 상황인 임펄스 잡음(impulse noise) 유입에서의 부품 보호를 목적으로 한 쇼키 장벽 다이오드 (Schottky barrier diode)도 삽입되었다. 프리앰프로 OP-Amp를 사용하였으며, 반전 증폭 회로를 응용하였다.

대물, 집속렌즈(CL1, CL2) 등의 렌즈는 0 ~ 3A의 동작 특성을 가지도록 설계하였으며, 전자빔의 집속에 가장 민감하게 영향을 미침을 알 수 있었다.

2.3 주사코일 증폭기 제어

주사코일 증폭기의 특징은 삼각파를 소스로서 사용하여 시료의 일정 구역을 주사할 수 있도록 하였다.

Fig. 6과 같은 X, Y의 파형을 스캔코일에 가함으로써 Fig. 7과 같은 형태의 스캔이 가능하다. 파형은 시료의 스캔 구간을 나타내며, 배율에 따른 구간의 면적에 대한 평가는 하지 않았다. 표준 시료에 대한 이미지가 10,000배 이상의 배율

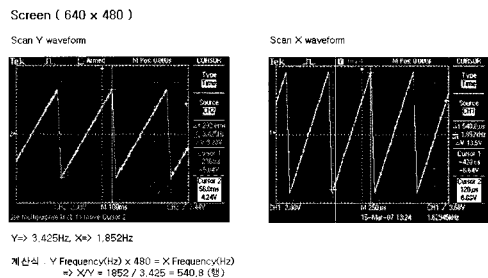


Fig. 6 주사 파형

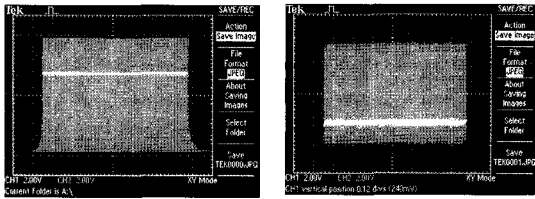


Fig. 7 주사파형의 X-Y합성 파형

을 가질 때 의미가 있으므로 Fig. 7에서는 주사파형의 크기를 변화시키므로써 배율을 변화시킬 수 있다는 것만을 확인할 수 있다.

Fig. 7의 좌측 사진에서 경계가 형성되는 것은 X 파형의 피크부분에서의 오차로 볼 수 있다. 파형의 생성은 NI사의 PCI-6251을 이용했으며, 이미지 생성을 위한 동기 신호 또한 6251을 이용하였다. PCI-6251의 ADC, DAC의 해상도는 16비트이며, ADC의 샘플링주파수 F_s 는 1.2MHz를 사용하고 있다. 주사의 이미지 크기와 프레임수는 샘플링주파수를 기준으로 설정하였다.

예로서 피크대 피크(P-to-P) 0.1A를 주사하고, 이미지에 30um가 한 화면에 캡처 되었다면, 이상적인 경우에 한해서 1개의 행에서의 분해능은 $F_s \div X(f)$ 이 되고, 그것이 30um이므로 최대 가능한 분해능은 $(30 \times 10^{-6}) \div \{F_s \div X(f)\}$ 이다. 따라서, 약 46nm($X(f)=1.852kHz$)의 거리를 판독할 수 있다.

2.4 얼라인 코일(Align coil)의 제어

얼라인용으로 사용되는 것으로는 전자빔의 주사 축을 조정하는 전자총 얼라인, 상의 위치를 이동시키는 이미지 이동, 산란전자 등으로 인하여 생기는 집속 오류를 보정해주는 스티그메터(stigmator)등이 있다.

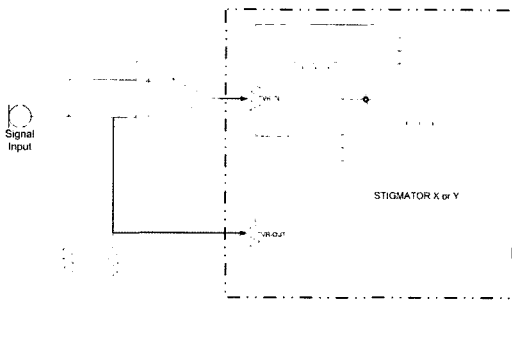


Fig. 8 Stigmator Coil의 구조

특히, 스티그메터 코일의 경우 X, Y가 각각 4개의 코일로 이루어져 있고, 가변저항의 조정을 통하여 집속의 보정을 할 수 있다. 코일의 특성상 4개의 코일 특성은 미세하게 차이가 날 수 밖에 없고, 가변저항을 통해 그 차이를 맞추어 줌으로써 역할을 원활히 수행할 수 있다. 가변저항의 조정 사양은 배율을 높이기 위해 지속적인 검토가 필요하다.

2.5 광증배관 증폭 회로

시료에서 발생되어 나오는 2차 전자를 집속하여 광증배관인 PMT(photo multiplier tube)에 의해 생성된 전기 신호를 증폭하는 증폭기이다. 증폭 계인은 약 66dB로 설계되었고, 오프셋(off-set) 조정이 가능하고, 평평한 주파수 응답 특성을 위하여 LM318을 사용하였다. LM318의 주파수 응답은 저 신호에서 15MHz이다.

현재는 전원 안정화와 주파수 응답의 개선을 위하여 각 전원에 스너버(Snuber)를 추가하였고, C5를 3pF을 수정하여 50kHz까지 10%이내의 주파수 특성을 가지도록 하였다.

그리고, 추후 선로상에서의 노이즈 개선을 위하여 평형모드(balance mode)로의 출력을 고려중이다.

3. 이미지의 개선

이미지의 개선을 위하여 노이즈의 종류를 분석하여 그 각

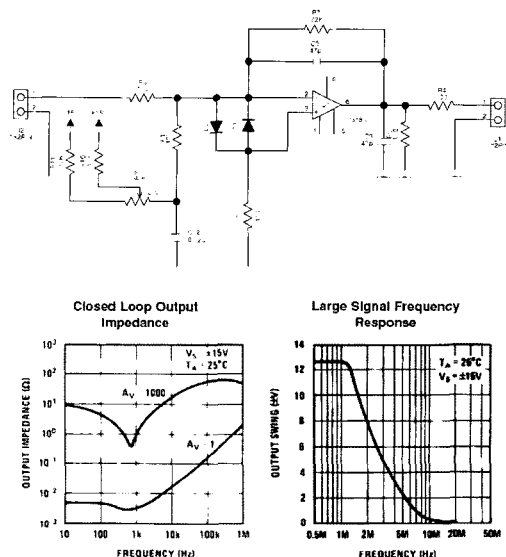


Fig. 9 PMT 증폭 회로 및 LM318 특성

각에 대한 대책을 세움으로써 궁극적으로 시스템에 대한 전체적인 노이즈 대책을 세우기 위하여 세분화하여 보았다.

3.1 전위차

각종 전원과 GND사이에서 발생하는 전위차로 인한 신호의 오차가 있을 수 있다. 부분적인 회로가 거리상으로 멀리 떨어져 있을 경우 전선(동선)의 도전율에 의해 전위차가 발생한다. 이것을 방지하기 위하여 GND를 보강할 경우 폐회로에 의한 발진이 일어날 수 있으므로 이를 조심하여야 한다.

3.2 정전원 전력원(SMPS) 전원 노이즈

전원 공급 장치로서 SMPS(Switching Mode Power Supply)를 사용할 경우 일반 선형 파워공급기(linear power supply)의 60Hz 리플 성분 외에 대략 100kHz 정도의 스위칭 주파수를 절대 무시할 수 없다. 선형 변압기를 이용한 파워공급기를 사용할 경우와 비교한다면 상대적으로 큰 값의 노이즈 수준을 가진다(수 십 mV).

3.3 모터 펌프의 진동 노이즈

진공 상태를 유지하기 위하여 사용되는 모터펌프의 진동 노이즈로서 저주파 성분을 가지고 있으며 이 신호 역시 이미지에 영향을 주는 경우가 많다.

3.4 부품의 특성

부품의 특성상 한계가 나타날 수밖에 없는 것이며, 대표적으로는 OP-Amp의 주파수 응답성이 있다. 고주파 신호의 경우 부품의 밴드폭 때문에 실제 신호에 나타나지 않을 경우도 발생하므로 적절한 주파수 응답을 가지는 부품으로 선정해야 한다.

3.5 기타

AC 전원선을 통하여 유입되는 유도성 노이즈(AC 전력 도전성), 전파상의 간섭 노이즈(EMC, Electromagnetic Compatibility), 정전기 등이며, 제품의 성능보다는 시스템의 수명 등에 영향을 준다.

3.6 회로 설계상의 노이즈

노이즈라기 보다는 설계상 부품 상호간의 크로스톡(crosstalk) 등으로 인하여 원치 않는 신호가 전달되는 것으로 저주파 필터, Zobel 필터등의 필터나 댐핑 스너버(damping, snuber) 등의 회로를 추가함으로써 원치 않는 신호를 제거한다.

4. 이미지 개선 방안

4.1 전위차의 개념

본 연구에 사용되는 제어기의 기본 형태는 아래 Fig. 10과 같다. Fig. 10은 대물렌즈의 전류 제어를 위한 회로의 예이며, 그 외 집속 CL1, CL2 등도 유사한 형태의 전류 제어용 증폭기이다.

통상적인 개념으로서의 전위는 전압이라는 표현과 동일시 한다. 그러나 전압이라 표현하는 것은 GND를 기준으로 했을 때의 포텐셜을 의미하며 절대적인 값이라고 할 수 있다. 그러나 전위라는 표현은 절대적인 기준이 없는 상대적인 값을 의미한다. 위의 Fig. 10에서 -15V에 대한 +15V의 전위차는 30V이다. 전압의 개념으로는 30V라는 표현을 할 수 없지만, 전위의 개념으로는 +30V라는 표현을 쓸 수 있는 것이다. 위의 Fig. 8에서는 GND를 3가지로 나누었으며, 전압은 2가지(+15V, +15VA)로 나누어 설계했다.

일반적인 디지털회로에서는 GND의 통합 형태인 공통 그라운드(common ground) 형태로 설계가 되어있고, 또한 접지의 개념도 GND와 동일시 되어있으나, 전위의 개념을 도입하여 전류 제어 증폭기에서도 예비 앰프(OP-Amp사용)의 0전위, 파워앰프(FET로 도식)의 0전위, 그리고 전체에 대한 접지를 분리하여 접지를 공통으로 사용하고, 파워 앰프에서는 +15VA와 그에 상응하는 0전위, 예비앰프에서는 +15V, -15V에 상응하는 0전위를 사용하였다. 근본적으로는 전원 공급 장치(Power Supply)에서 같은 전원을 사용하는 것이지만 부분적인 회로에서만 본다면 서로 독립적인 전위를 가지도록 설계를 하였다. 한 마디로 +15V와 +15VA간의 전위차는 중요시 하지 않고 GND와의 관계를 중요시 하였다. 파워 앰프단에서 발생할 수 있는 노이즈성분이 예비 앰프단으로 전도되어 파워앰프에 또다시 노이즈성분으로써 영향을

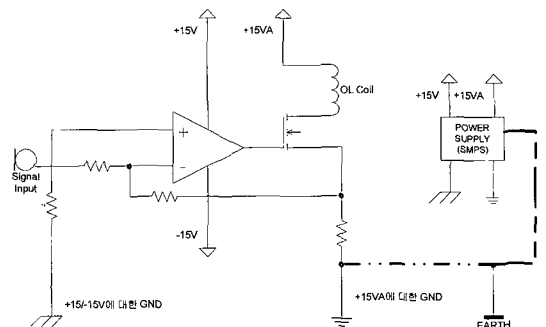


Fig. 10 대물렌즈의 GND의 구분

주는 불필요한 피이드백 현상이 일어나지 않도록 분리를 한 것이다. 이것은 파워앰프의 게이트 드라이버(gate driver) 역할을 하는 OP-Amp 신호의 잡음 신호비(Signal to Noise Ratio: SNR)를 높이기 위한 수단으로 사용한 것이다.

4.2 전위차가 SEM의 이미지에 미치는 영향

아래 Fig. 11과 Fig 12는 주사파형(Triangle-wave) 제너레이터로부터 나오는 신호를 주사증폭기(scan amplifier)로 전송하는 과정에서 GND를 전압 소스에서 연결하고, 직접 연결하지 않을 경우(Fig. 11)와 직접 연결한 경우의 이미지 차이를 보여준다(Fig. 12).

이것은 주사파형 자체의 문제가 아니고, GND의 전위차에 의하여 생긴 문제로 볼 수 있다. 이와 같은 전위차는 렌즈들(OL, CL1, CL2)과 같이 전류를 많이 필요로 하는 경우

(약 1~2A)에 있어서 더욱 잘 나타나며, 전류의 흐름에 영향을 주게 된다.

폐루프에 유기된 기전력과 기전력을 발생시키는 자계 사이의 정량적인 관계인 Faraday의 법칙⁽⁵⁾

$$V = - d\Phi/dt \tag{1}$$

Φ 는 전체 자속이며 이 자속은 유한요소해석으로 값을 추정하거나⁽⁶⁾ 실험으로 구할수 있다. 여기서 코일에 흐르는 전류가 변화하여 생기는 자기 유도 작용에 의해 유기되는 기전력은

$$V = - L \times di/dt \tag{2}$$

와 같이 나타나며, 이것은 전류의 급격한 변화가 있을 경우 파워앰프로 사용되고 있는 FET에 치명적인 손상을 입힐 수 있으며, Fig. 12와 같이 이미지에도 영향을 미친다.

4.3 SMPS 스위칭노이즈의 처리

근본적으로 SMPS가 가지고 있는 리플 성분 및 스위칭 노이즈성분을 제거할 수 없으므로 회로의 배선 등을 통하여 그 영향을 최소화하여야 한다.

특정 회로를 위하여 공급하는 전압에 있어서, 그 전원(Fig. 5)과 함께 GND를 위한 배선은 전류량을 고려하여 전기선의 굵기 등을 결정하여 최단 거리로 하여야 한다. 현재의 실험은 주어진 실험 조건에서의 최단 거리 등을 적용한 상태이다. 회로 부분별로 별도의 정류 장치(damping, Snubber 등)는 고려가 되지 않았고, GND 및 전위에 관계한 실험을 하였다.

4.4 회로 상에서의 노이즈 개선

렌즈 역할을 하는 코일의 전류 변화에 따른 임피던스 특성



Fig. 11 스캔앰프와 제너레이터간의 GND 분리시

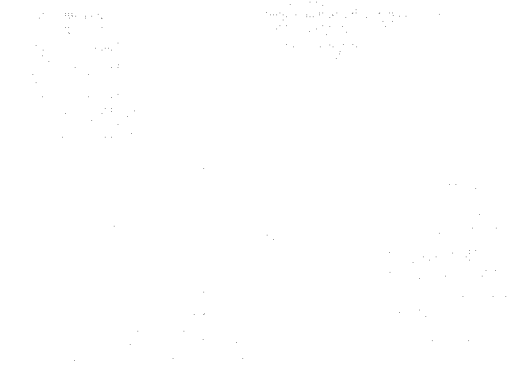


Fig. 12 스캔앰프와 제너레이터간의 GND 통합시

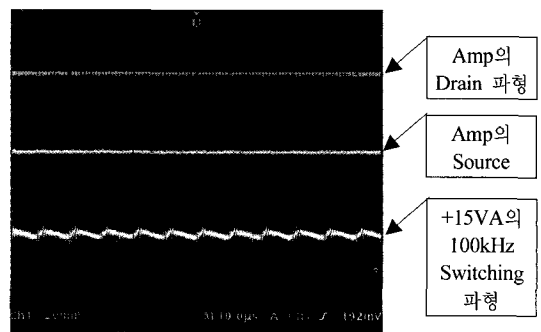


Fig. 13 SMPS의 스위칭 노이즈

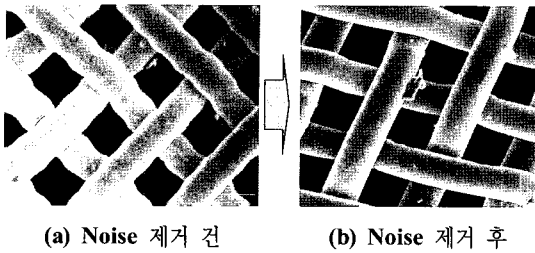


Fig. 14 SEM의 해상도 증대

변화를 최소화하고, 역기전력으로부터 부품을 보호할 목적으로 조벨 필터⁽⁴⁾를 추가하였으며, 파워앰프 역할을 하는 FET(field effect transistor)의 게이트 인가 전압의 안정을 위하여 예비앰프의 피이드백으로 커패시터를 사용하였다.

기존의 회로는 Fig. 5와 같으며 추가적으로 파워앰프로 사용되는 FET의 드레인과 GND간에 0.1uF의 커패시터가 있었으나, 렌즈에 약 2A이상의 전류를 공급할 경우 발전 현상이 일어남을 알 수 있었다. 앰프의 안정화가 이루어지지 않은 상태에서의 발전이긴 하였으나, 렌즈와의 상호작용으로 인한 현상으로 파악되며, 제거 후 3A의 전류가 흐를 때까지 발전이 일어나지 않음을 확인할 수 있었다. Fig. 5와 같이 변경 후 전류 제어의 안정성이 향상되었다. 노이즈 수준이 Average로 약 1V에 가깝던 것이 회로 수정 후 수백 mV로 감소됨을 확인할 수 있었다. 이것은 회로 추가만으로 이루어진 결과라고 단정 지을 수는 없지만, 주변으로 부터의 영향을 상대적으로 감소시켰다는 측면에서 안정성의 향상 요인이라 할 수 있다.

Fig. 5의 회로에서 안정성을 위하여 사용된 조벨 필터, OP-Amp에서의 RC 저주파통과 필터, 쇼키 장벽 다이오우드 등은 일반적으로 많이 사용되는 보호 회로이다. Fig. 14는 노이즈 개선을 통한 SEM 이미지 향상의 결과를 보여주고 있다.

5. 결론

본 연구의 목적은 제어부의 단순화 및 이미지 해상도 확보에 있으며, 제어부의 단순화는 시스템에 대한 충분한 이해를 근거로 사용자 인터페이스가 편리할 수 있도록 계속적인 설계 보안을 진행해야 하며, 현재 사용 중인 여러 종류의 노이즈제거 기술(RC 필터, 조벨 필터, 댐퍼, Snubber 등)습득 및 적용을 선행해야 하며, 시스템에 대해서 최적화해야 함을 알 수 있었다.

Fig. 5는 전원 소스와 GND의 처리와 각종 필터 등을 추가함으로써 얻어진 결과이며, 시료는 30um의 거리를 가지는

표준 시료의 이미지이다. SMPS에 의한 약 100kHz의 노이즈 성분은 존재하며, 추후 해결해야 할 과제로 남아있다. 현재 상태의 배율(분해능)은 약 3,000배 정도로 볼 수 있으며, 추후 약 30,000배까지의 분해능을 목표로 설정하고 있다.

현재 얻은 결과는 노이즈의 종류 및 개선 방안을 파악할 수 준이며, 앞으로 RC 필터의 컷오프 주파수, 코일의 인덕턴스에 상응하는 Zobel 필터의 계수, 배선상의 GND 문제 향상을 위한 접점의 위치, 자석의 페라이트 코어등의 사용 여부, 신호 선로의 보호, 시스템의 상호 간섭 등을 추가적으로 검토하여 이미지의 해상도의 향상을 도모할 수 있는 틀을 마련하였다.

또한 제어부 구성 시 DSP를 채용함으로써 미세한 신호의 입력이 가능하며 PC 프로그램과 연계하여 각 코일의 전류를 모니터링 할 수 있고 동시 제어가 가능하게 하였다. 이러한 장점은 SEM의 해상도를 높이기 위한 최적의 렌즈별 설정 전류를 구하는데도 기여한다. 차후 개발 중인 자동 초점 기능 역시 DSP를 채용함으로써 가능하게 된다.

후 기

본 연구는 서울시에서 지원하는 ‘나노 공정기술 및 장비 개발 산학연 혁신 클러스터’ 사업(과제번호: 10583)의 지원으로 진행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

- (1) Orloff, J., 2004, *Handbook of Charged Particle Optics*, CRC Press.
- (2) Lee, R. E, 1993, *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*, PTR Prentice Hall.
- (3) Reimer, L., 1998, *Scanning Electron Microscopy - Physics of Image Formation and Microanalysis*, Springer, Berlin.
- (4) Millman, J. and Grabel, A, "Microelectronics, second edition," *Large-Signal Electronics Power Circuits and Systems*, Vol. 17, pp. 773~812.
- (5) Kang, H. B. and Lee, J. A, "Electromagnetic Theory," *Electromagnetic Induction*, Vol. 12, pp. 287~299.
- (6) Park, K. Park, M. J., Kim, D. H. and Jang, D. Y., 2006, "Numerical analysis for electron optical system of a field emission SEM," *Trans. Kor. Soc. Mech. Engr. (A)*, Vol. 30, pp. 1577~1583.