

집속 전자 빔 장치에서 스캔 주파수에 따른 실시간 디지털 필터 설계에 관한 연구[§]

김승재* · 오세규* · 양경선* · 정광오** · 김동환****†

* 서울과학기술대학교 나노생산기술연구소

** 서울과학기술대학교, NID 융합기술대학원 나노 IT 융합프로그램

*** 서울과학기술대학교 기계설계자동화공학부

Study on Real-Time Digital Filter Design as Function of Scanning Frequency of Focused Electron Beam

Seung Jae Kim*, Se Kyu Oh*, Kyung Sun Yang*, Kwang Oh Jung** and Dong Hwan Kim****†

* Nano Manufacturing Device, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology

** Graduate School of NID Fusion Tech, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology

*** Dept. of Mechanical and Automation Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology

(Received June 15, 2010 ; Revised February 8, 2011 ; Accepted February 10, 2011)

Key Words: DSP(디지털신호처리), Digital Filter(디지털 필터), Frequency Analysis(주파수분석), Bandwidth(대역폭), Sampling Frequency(샘플링 주파수), Signal Generator(신호발생기), SEM(주사전자현미경)

초록: 열 전자 방출 형 전자 빔 장치에서 영상을 획득하기 위해서는 텅스텐 필라멘트에서 발생한 전자 빔을 스캔 할 장치가 필요하다. 이때, 스캔 되는 주파수에 따라서 시료 표면에서 튀어 나오는 2 차 전자신호에 대하여 잡음 성분의 발생이 다르게 나타난다. 본 연구에서는 잡음 성분 제거를 위한 필터 설계를 위해서 2 차 전자신호에 대한 실시간 주파수 분석을 통해 신호와 잡음 성분을 구분했다. 그리고 부동 소수점 연산이 가능한 DSP 에서 디지털 필터 설계를 통하여 신호대비 잡음 성분 제거를 통하여 고배율로 획득한 전자현미경의 영상의 질을 향상 시켰다.

Abstract: To acquire images in a thermionic-scanning electron-beam system, a scanning unit is needed to control the electron beam emitted from the tungsten filament source. In scanning the electron beam on the solid surface, the signal-to-noise ratio depends on the scanning frequency. We used a digital filter to reduce noise by analyzing the real-time frequency of a secondary electron signal. The noise and the true image signal were well separated. We designed the digital filter via a DSP floating-point operation, and the noise elimination resulted in enhanced image quality in a high-resolution mode.

- 기호설명 -

B_R	: SPI 의 통신속도	C_x	: 오프셋 값	[Pixel]
S_R	: SPI 의 프리스케일러	f_x, f_y	: 수평 수직 방향의 스캔 주파수	[Hz]
L_{clk}	: 디바이스에 입력 되는 클럭	P_x, P_y	: 영상의 가로 세로 해상도	[Pixel]
n	: 샘플 개수	b_k	: 필터의 계수	
		$x[n-k]$: 입력 신호	
		$y[n]$: 필터를 거친 출력 값	
		ω_p	: 통과 주파수	[Hz]
		ω_s	: 차단 주파수	[Hz]
		$\omega[n]$: 윈도우 함수	

§ 이 논문은 2010 년도 대한기계학회 동역학 및 제어부문 춘계 학술대회 (2010. 6. 3.-4., 광주과학기술원) 발표논문임.

† Corresponding Author, dhkim@snut.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서론

1.1 SEM의 스캔 파형

집속 전자 빔^(1,2) 장치에서 전자 빔(electron-beam)을 스캔 하기 위해서는 수평편향코일과 수직편향코일에 교류 신호를 인가하여 전자 빔을 원하는 좌표에 위치 시킬 수 있어야 한다.⁽¹⁻⁵⁾ 전자 빔에는 전자력이 작용하여 직진하는 빔의 진행 방향이 구부러지고, 그 편향의 정도는 편향 코일에 인가되는 전류의 크기와 방향에 따라서 조절된다. 전류의 세기가 클수록 자기장에 미치는 범위가 넓어져 넓은 영역을 스캔 한다. 스캔파형은 교류신호이며 주파수는 영상신호로 변환하기 위한 아날로그 디지털 컨버터(analog to digital converter, ADC)의 샘플링 속도와 일치시켜야 하는 영상의 해상도(resolution)에 의해 결정된다.^(6,7) 이 때, 전자 현미경에서 획득 한 영상신호에서의 스펙트럼을 분석해보면 스캔신호의 주파수 안에서 크기가 다른 형태로 신호가 존재한다. 스캔 주파수의 범위를 벗어난 신호는 잡음(noise) 성분으로 판단하고 이 잡음은 영상신호에 비해 고 주파수 성분으로 나타난다. 신호에서 나타나는 고 주파수 잡음 성분을 제거하기 위해서는 저주파 통과 필터(low pass filter, LPF), 또는 특정 주파수 신호를 제거 하기 위한 대역 통과 필터(band pass filter, BPF)를 적용시킴으로써 효과를 얻을 수 있다. 필터를 설계 하기 위해 앞서 아날로그필터에 비해 디지털 필터는 소프트웨어 기반으로 구현되기 때문에 필터 계수의 변경이 자유롭고, 알고리즘으로 손쉽게 포함될 수 있다. 반면 아날로그 필터는 R, L, C로 구성된 회로가 필요하고, 구현된 이후에 변경이 어려우며 열화 현상이 있다는 단점이 있다.⁽⁸⁻¹¹⁾

스캔주파수 선정에는 영상 신호에서 존재하는 주파수 성분은 스캔 주파수를 벗어 날 수 없으므로 필터 구현 시 컷 오프 주파수(cut off frequency)를 기준으로 설계했다

1.2 SEM의 신호처리

현 시스템에서 디지털 필터를 구현하는데 있어 두 가지의 고려 사항이 있다. 첫째, 디지털 필터 구현용 프로세서의 데이터 샘플링 속도는 ADC 샘플링 속도의 2 배 이상으로 되어야 한다. 둘째, 신호 복원용 DAC의 데이터 쓰기 속도는 ADC의 샘플링 속도보다 느리면 안 된다. 복원 시 속도가 느리면 데이터 손실의 문제가 생기기 때문이다. 본 논문에서는 Fig. 1에 알 수 있듯이 2차 전자 신호가 증폭기(amplifier, AMP)를 거쳐 영상 신호로

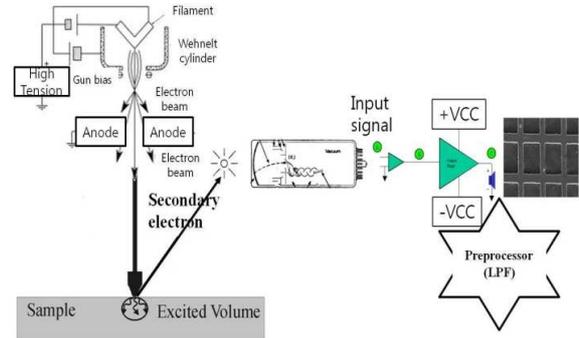


Fig. 1 Focused E-beam microscopy system

변환하기 위한 ADC 사이에 전 처리기(preprocess)를 설계하여 필터를 구현 했으며, SEM의 영상을 측정하여 필터의 성능을 검증 하였다.

2. 시스템 설계 및 신호 분석

디지털 필터를 설계 하기 위해 앞서 2차 전자 신호를 받아서 전 처리기를 거쳐 다시 아날로그 신호를 복원 하기 위하여 일련의 데이터 처리 과정이 설계 되어야 한다. 이를 위한 방안을 기술하고자 한다.

2.1 시스템 설계

주사전자현미경에서 스캔은 X, Y 방향의 두 신호에 의해서 래스터⁽⁷⁾스캔(raster scan)방식으로 시료 표면을 스캔 하게 된다. 스캔 주파수는 하나의 2차 전자 신호를 획득하는 시간과 표현하고자 하는 영상의 해상도에 따라서 결정된다. 현재 구현된 ADC의 샘플링 속도가 1.25Mhz이다. 320×320(pixel)해상도의 영상을 얻기 위해서 가로방향의 스캔파형 주파수(3.906KHz)와 세로방향의 주파수(12.2Hz)가 결정된다. 현 시스템에서 디지털 필터는 Fig. 1에서 나타난 것처럼 AMP와 영상처리 장치 사이에 프로세서 설계를 통하여 구성된다. 디지털 필터를 구현할 프로세서에서의 데이터 샘플링 속도에서는 ADC로 데이터를 전송하기 위한 DAC의 데이터 쓰기 속도가 고려 되어야 한다. 프로세서와 DAC는 시리얼 동기통신(Serial Peripheral Interface, SPI)으로 구성되었으며, SPI의 통신 속도 B_R 은 다음 식 (1)에 의해 계산 된다.

$$B_R = \frac{L_{clk}}{S_R + 1} \quad (1)$$

여기서, L_{clk} 디바이스에 입력되는 클럭(clock)에

해당되고, S_R 은 SPI 의 프리스케일러(prescaler)에 해당하는 값이다. 본 연구에서는 L_{clk} 가 37.5MHz, S_R 이 3 이 선정되었다. 따라서, 통신속도는 9.375×10^6 bps 이다. 1 바이트를 쓰기 위해서는 8 개의 클럭이 필요하고 총 853nsec 가 소요된다. 이 시간은 프로세서가 필터링(filtering) 과정 중 연산시간을 제외한 데이터 복원 하는데 걸리는 시간이다. 샘플링 속도가 느리면 데이터 획득이 제대로 이루어지지 않으므로 데이터를 잃을 수 있고, 복원 시 데이터를 쓰는 속도가 느려도 영상 표현 문제가 초래 될 수 있다. Fig. 2 에서는 구현된 시스템의 블록 다이어그램을 보여주며 본 시스템은 JTAG 을 통해 실시간으로 분석된 주파수를 모니터링 할 수 있다. TMS320F28335 프로세서로 디지털 필터가 구현되었으며, 필터를 거친 신호는 다시 DAC 에 의해서 아날로그 신호로 복원 되는 구조로 되어 있다. ADC, DAC 는 12bits 의 분해 능을 가지고 있다.⁽⁸⁾

2.2 신호 분석

2 차 전자 신호는 PMT(photomultiplier)의 AMP 를 거쳐 ADC 로 입력될 때, 영상신호 이외에 잡음 성분 성분이 섞여 들어가는데, 일반적인 주파수 분석을 통해서 는 신호와 잡음의 분석이 부정

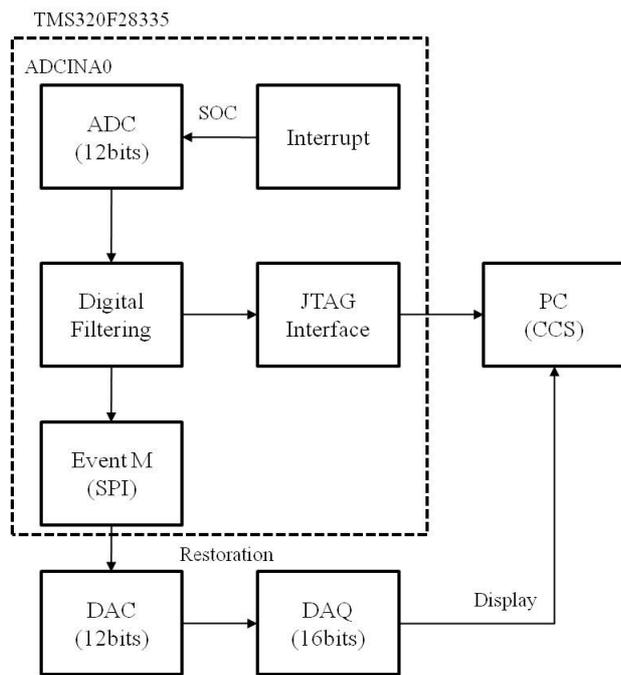


Fig. 2 Low pass filter system schematic using by TMS302F28335

확하고 영상에서 존재하는 신호는 스캔주파수 안에서 크기가 다른 형태로 존재하므로 스캔주파수를 벗어난 주파수 대역의 신호는 잡음 성분으로 판단된다. 고주파 잡음성분은 저주파 통과 필터를 설계하여 제거 가능하다. 현 시스템에서의 데이터 샘플링에 따른 스캔 주파수는 다음 식과 같다. 식 (2), (3)에서 주파수를 계산할 때 n 은 샘플 개수이며, n 의 개수가 하나 이상이면 오버샘플링을 의미한다. C_x 는 스캔 시스템의 응답 특성 한계에 따른 왜곡 된 영상을 제거하기 위한 오프셋 값이다.⁽⁶⁻⁸⁾

$$f_x = \frac{S}{(P_x \times n) + C_x} \tag{2}$$

$$f_y = \frac{S}{((P_x \times n) + C_x) \times P_y} \tag{3}$$

Table 1 은 샘플 개수에 따른 수평, 수직 방향의 스캔 주파수이다. 여기서, f_x, f_y 는 수평, 수직 방

Table 1 Scan frequency analysis for sampling frequency

Sample Num	Scan freq. (X)	Scan freq. (Y)
1	2.976KHz	9.920Hz
2	1.736KHz	5.787Hz
3	1.225KHz	4.084Hz
4	0.946KHz	3.156Hz
5	0.771KHz	2.572Hz
6	0.651KHz	2.170Hz
7	0.563KHz	1.876Hz
8	0.496KHz	1.653Hz

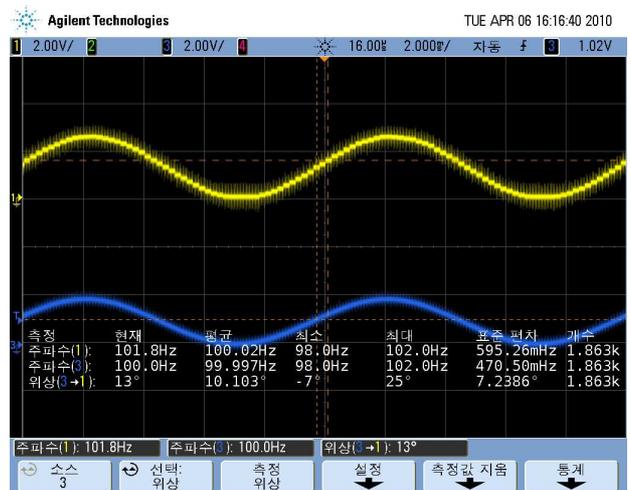


Fig. 3 Sinusoidal waveform restoration

향의 스캔 주파수에 해당되고, P_x, P_y 는 영상의 가로, 세로 해상도에 해당된다. Fig. 3 은 설계된 시스템에서 정현파 실험을 실시한 결과이다. 신호의 주파수는 100Hz 인 정현파를 입력으로 실험하였다. Fig. 3 에서 위 파형은 필터링한 후 신호이고, 아래 파형은 원 신호이다. DAC 의 분해능 저하로 인하여 복원 시 다소 데이터의 부정확한 부분이 확인되었으나, 그 정도가 크지 않아 무시할 수 있다고 판단 하였다.

3. 디지털 필터 설계

3.1 디지털 필터

디지털 필터는 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$y[n] = \sum_{k=0}^M b_k x[n-k] \quad (4)$$

식 (4)는 M 차 FIR 필터⁽⁹⁻¹¹⁾로 설계된 식이다. b_k 는 필터의 계수이고, $x[n-k]$ 는 실제 입력 신호이며, $y[n]$ 이 결과 값이다. Fig. 4 는 FIR 필터의 연산과정을 나타내고 있다. 본 논문에서는 필터 설계를 위해서 TI 사에서 제공하는 필터 설계 유틸리티 ezfir16⁽¹⁰⁾을 사용하여 설계했다. ezfir16 은 matlab 환경에서 개발된 유틸리티이다. LPF 설계 시 통과 주파수(cutoff frequency = corner frequency): ω_p 와 차단주파수(stop frequency) : ω_s 을 결정하고, 그 차이($\omega_s - \omega_p$)에 해당하는 트랜지션(transition) 밴드를 고려하여 필터의 차수를 정했다. 이때, 차수가 높아 질수록 트랜지션 밴드가 좁아지고 보다 이상적인 필터 설계가 가능하다. 다음 식 (5)는 FIR 필터의 차분 방정식이다. 시간 영역과 Z 영역의 사이의 식에서는 시간영역 지연소자 Z^{-1} 의 승산기로 처리하면 된다.

$$y(nT) = h_0 \times x(nT) + h_1 \times x(nT - T) + h_2 \times x(nT - 2T) + h_3 \times x(nT - 3T) \quad (5)$$

$x(nT)$ 는 필터의 입력 값에 해당하고, $y(nT)$ 는 필터의 출력 값에 해당한다. 차분 방정식의 양변을 Z 변환하여 이항하면 전달 함수를 구할 수 있다. 구해진 전달 함수는 식 (6)과 같다.

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = h_0 + h_1 Z^{-1} + h_2 Z^{-2} + h_3 Z^{-3} \quad (6)$$

Fig. 5 는 통과 주파수와 차단 주파수에 따른 구간 및 리플(ripple) 전압에 대한 그래프이다. 128

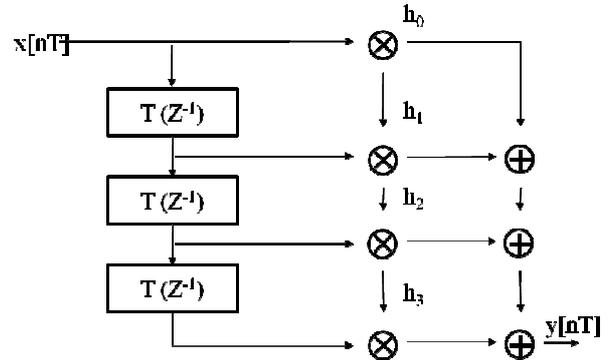


Fig. 4 Finite impulse response filter direct form

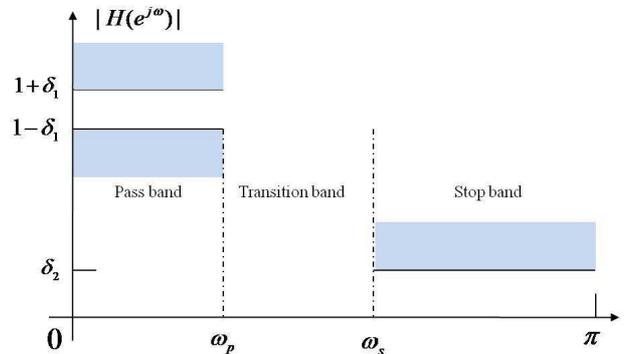


Fig. 5 Relationship between ripple voltage and frequency

차를 적용한 이유는 필터의 차수가 높아지면 트랜지션 밴드가 줄어들면서 성능이 향상되며, 여유있는 프로세서의 컴퓨팅과워를 유용하게 활용할 수 있는 장점이 있기 때문이다.

3.2 디지털 필터 구현

TI 사의 ezfir16 을 사용하여 디지털 필터 설계 시 필터 차수, 필터 종류, 윈도우 종류, 샘플링 주파수, 컷 오프 주파수에 대한 입력 값을 기준으로 필터 계수 즉 전달 함수를 계산하였다. Fig. 6 은 FIR 필터 설계를 위한 순차도 이다. 디지털 FIR 필터의 수식을 보면 유한한 길이의 입력만을 이용하기에 매 필터링 시 입력 데이터 들 사이에 불연속(깁스(Gibbs) 현상)이 초래된다. 그렇기 때문에 유한한 길이의 입력이라 할지라도 양 끝을 0 으로 만들면 신호의 불연속을 제거 할 수 있다. 이를 테이퍼링(tapering)이라 또는 윈도우(windowing)이라 한다. 윈도우는 필터 계수를 구할 때, 윈도우 함수를 곱한 것이다.⁽¹⁰⁾ 앞서 결정된 스캔 주파수를 토대로 컷 오프 주파수를 결정하고, 디지털 필터를 구현한 프로세서에서 ADC 샘플링 속도(2MHz)를 설계했다. 윈도우는 해밍 윈도우(hamming window, HW)를 적용 하였다. Fig. 7 은 해

밍 윈도우의 결과이며, 식 (7)은 해밍 윈도우의 함수이다.

$$w[n] = \begin{cases} 0.5 - 0.5 \cos(2\pi n/M), & 0 \leq n \leq M \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

3.3 디지털 필터 결과

필터의 계수는 정수형 데이터로 출력되며, 필터 계수 두 개가 이어 붙은 형태이다. DMAC(Direct Memory Access Controller)⁽⁸⁾연산을 위하여 즉 데이터 항 하나당 필터 계수 2 개를 이어 붙였다. 필터의 차수는 128 이며, 컷 오프 주파수 2.976KHz 의

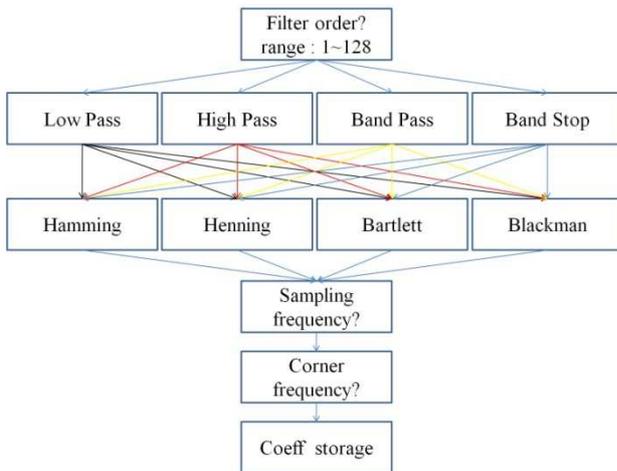


Fig. 6 FIR filter design process

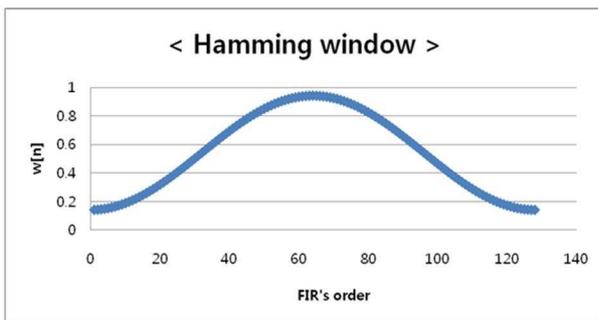


Fig. 7 128th order's hamming window

```

2976 - 메모장
파일(F) 편집(E) 서식(O) 보기(V) 도움말(H)
#define FIR6_COEFF (형
1954, -5222346, -663455, -784568, -915743, -1046917, -1112574, -1178245, -1243927, -1244081,
-1178704, -1113327, -918676, -654883, -261810, 131274, 720990, 1376236, 2031508, 2752332,
3473173, 4128434, 4783830, 5308109, 5701327, 5832413, 5716900, 5373713, 4716388, 3735335,
2424704, 766343, -1179701, -3407891, -5832693, -8388572, -10944456, -13369273, -15663023, -17563561,
-19701888, -19388334, -20119472, -19523656, -17956802, -15403908, -11736439, -7077858, -1310700, 5505035,
13238274, 21954555, 31325196, 41222130, 51511279, 61931502, 72351725, 82444269, 92012526, 100658887,
108789744, 115474418, 120913906, 124911605, 127335440)
    
```

Fig. 8 FIR filter output format

LPF 의 필터 출력 계수는 Fig. 8 에 해당하고, 주파수에 따른 크기(magnitude)와 위상(phase)의 결과는 Fig. 9 와 같다.

4. 실험 결과

본 연구진에서 개발한 SEM-EBL 장비에서 제안된 필터를 사용하여 SEM 의 영상을 측정하여 제안된 필터의 성능을 검증하였다.

4.1 디지털 필터를 적용한 영상

영상신호에서 스캔 주파수에 비례하지 않은 주기를 가진 신호는 잡음 성분으로 판단된다. 잡음 성분의 주기는 스캔 주파수마다 다르다. 본 연구에서는 전 처리기를 통해 디지털 필터를 설계 적용하여 잡음 성분을 제거 했다. 필터가 적용된 결과는 영상을 가지고 판단되었다. Fig. 10 은 필터를

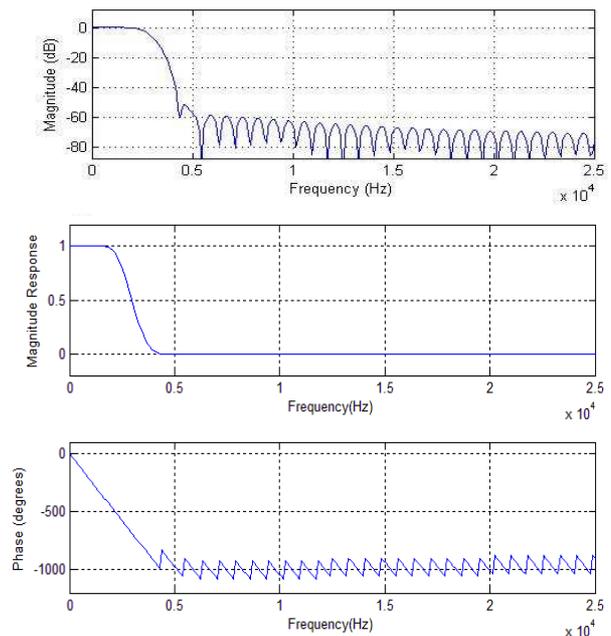
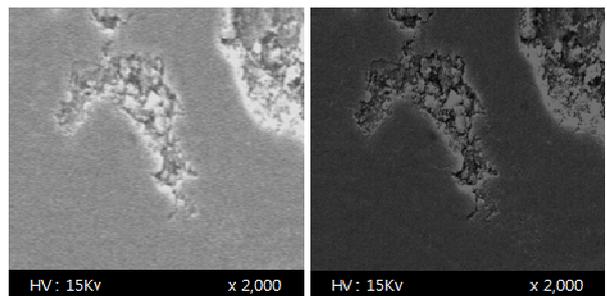


Fig. 9 Magnitude response and phase according to the cut off frequency



(a) Original image (b) Restoration image

Fig. 10 SEM image restoration with sampling frequency of 2MHz

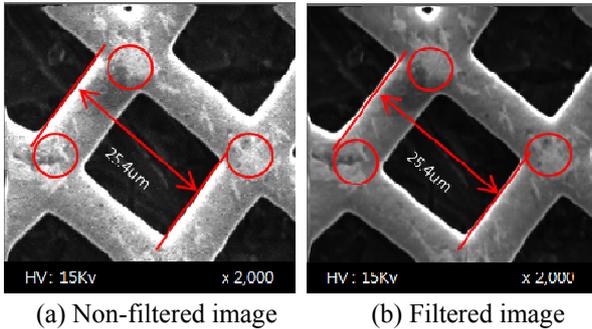


Fig. 11 SEM images without filter (a) and with filter (b): sampling frequency of 2.976 KHz

적용하기 전에 전 처리기에서의 영상신호 복원 능력을 시험 한 결과이다. 전체적으로 영상의 대비(contrast)값이 떨어져 어두운 결과가 나왔다. X 방향 스캔의 주파수(2.976KHz)를 기준으로 디지털 필터의 컷 오프 주파수(2.976KHz)를 결정했다. 그리고 2 차 전자 신호 샘플링 주파수(2MHz)를 필터 설계 시 적용했다. 결과 영상은 Fig. 11 이고, (a)는 필터를 거치지 않은 영상, (b)는 LPF 를 거친 영상이다. 시료 표면에서 튀어나온 2 차 전자 신호는 최대 1,000 배로 높은 증폭 과정을 거쳐 영상 신호로 만들어진다. 고 해상도의 영상을 획득하기 위해서 텅스텐 필라멘트에서 만들어진 전자 빔의 전류를 최소로 하고, 시료 표면에서 발생하는 2 차 전자를 최대로 증폭하여 영상을 획득하였다. 이때, 증폭비(signal to noise ratio, SNR)가 높아지면서 잡음 성분도 함께 증폭이 되는데 필터를 적용하여 이런 잡음들을 줄일 수 있었다. 실험 결과에서 나타난 영상을 보면 시료 표면에 있는 입자(particle)들의 형태를 관찰 할 수 있다. Fig. 11 에서 보여지는 것과 같이 LPF 를 거친 영상에서 샘플의 입자들이 선명해지고 백색잡음이 줄어든걸 확인 할 수 있다. 그러나 DAC 의 분해 능 저하로 인한 영상의 에지(edge)에서 예리한(sharp)면이 저하된 결과가 나왔다.

5. 결론

전자현미경의 영상획득 시스템에서 영상의 성능을 향상시키기 위하여 실시간 영상신호 이외에 잡음 성분을 제거하기 위한 필터를 적용하였다. 이 과정에서, 검증된 설계 툴을 통하고 현 시스템 안에서 필요한 필터의 성질과 주의점 등을 고려하여 필터를 설계함으로써 보다 우수한 영상을 획득할 수 있었다. 일반적으로 전자 빔이 시료 표면에 부딪히고 발생한 2 차 전자 신호의 주파수 분석을 통해서 신호와 잡음 성분을 구분하기에는 앨리어

싱(aliasing) 등으로 인하여 신호와 잡음 성분을 구별하기 어렵다고 판단했다. 즉, 스캔 주파수에 안에서 영상의 모든 신호가 표현될 것이며 크기가 다르게 나타나기에 각각의 스캔 주파수 마다 LPF 를 적용시켜 주파수 범위를 벗어난 신호를 차단시켜 영상을 비교 분석한 결과 잡음 성분이 제거된 것을 확인하였다. 그러나 본 논문에서 설계한 필터는 디지털 필터 구현용 디바이스의 분해능 저하로 인하여 출력 영상의 데이터 손실이 나타났다. 이는 분해능이 높은 ADC, DAC 를 선택하여 설계하고, 디지털 필터 구현용 프로세서와 영상 출력용 프로세서와의 시스템 통합을 할 경우 극복 될 수 있다고 판단된다.

후 기

본 논문은 서울시 산학연 협력사업의 지원으로 수행되었습니다. (과제번호: 10583)

참고문헌

- (1) 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.
- (2) JEOL., 2006, *Guide to Scanning Microscope, Observation*, JEOL, Japan, pp. 5~35.
- (3) Millman, J. and Grabel, A., 1988, *Microelectronics*, Mc Graw-Hill, New York, pp.118~201.
- (4) Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Echlin. P., Joy. D. C., Fiori, C. and Lifshin, E., 1989, *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis*, Plenum Press, New York, Vol. 3, pp. 119~123.
- (5) Kim, D.H., 1993, "Basic Theory and Application of Scanning Electron Microscopy," *Analytical Science & Technology*, Vol. 6, No. 2, pp. 53A~61A
- (6) 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.
- (7) Kim, S.J and Kim, D.H., 2009, "Scanning System Stability for Improving SEM Image," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol.18, No. 5, pp. 455~461.
- (8) Hawkes, P.W., 2001, "Advance in Imaging and Electron Physics," *Academic Press*, San Diego Vol.115, pp. 205~212.
- (9) Grandner, F.M. 1986, "A Transformation for Digital Simulation of Analog Filters," *IEE Trans. On*

- Communications*, Vol. 34, No. 7, pp. 676~680.
- (10) T.I, 2002, *Filter Library*, Texas Instruments, USA, pp. 1~17.
- (11) Kossidas, A.T. and Pactitis, S.A., 1983, "Comb Filter-Simulation and Design," *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 25, No. 1, pp. 27~30.
- (12) 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.
- (13) Ratajczak, P.M. 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.