

## 전자 현미경 영상의 혼합 잡음 제거 알고리즘에 관한 연구

최재혁 · 박선우

서울시립대학교 전자·전기공학부  
(1999년 2월 24일 접수)

### Design of mixed noise reduction algorithm for SEM image

Je Hyuk Choi and Sun Woo Park

School of Electronic Engineering, University of Seoul, Jeonng-Dong 90,  
Dongdaemun-Gu, Seoul 130-743, Korea  
(Received February 24, 1999)

**요 약** - 본 논문에서는, 개인용 PC를 이용한 새로운 혼합 잡음 제거 알고리즘으로 설계된 전자현미경 (SEM: Scanning Electron Microscope) 영상 처리 시스템을 제안하였다. 전자현미경 같이 반도체 시료 등의 세밀한 부분을 보는 시스템은 잡음에 매우 민감하므로, 출력 영상의 잡음 제거가 시스템 성능의 중요한 요인이 된다. 혼합 잡음으로 오염된 영상에 대해 가중-D(weighted-D) 필터는 균일 잡음과 가우시안 잡음은 효과적으로 제거하는 반면, 임펄스 잡음은 완전히 제거하지 못하는 단점이 있다. 본 논문에서 혼합 잡음 제거를 위해 제안한, 개선된 필터링 알고리즘은 NMSE(Normalized Mean Square Errors)를 이용하여 평가하였다. NMSE 이 용시 제안된 필터가 가중-D 필터보다 0.96~2.5배 향상된 결과를 보였다.

**Abstract** - In this paper, the SEM image processing system based on PC is designed, and a new noise reduction filtering algorithm is proposed. The SEM image obtained in semiconductor processing line is sensitive to noise, therefore, noise reduction of the image is important. In the case of an image corrupted with mixed noise, the weighted-D filter can remove uniform and Gaussian noise effectively, but can not remove impulse noise properly. A new improved filtering algorithm is proposed to reduce mixed-noise. The performance of the proposed filter is quantitatively evaluated by use of the normalized mean square errors (NMSE). The experimental results show that the performance of the proposed filter is obtained between 0.96 and 2.5 times better than that of weighted-D filter in NMSE evaluation.

## 1. 서 론

미세 구조의 자세한 관찰이 필요한 반도체 제품의 설계, 검사 및 분류와 재료 산업 분야는 최근 10년동안 많은 발전을 거듭해 왔다. 이에 따라, 미세 구조를 볼 수 있는 전자현미경(SEM: scanning electron microscope)의 수요가 늘고있는 실정이다.

전자현미경 같이 반도체 시료 등의 세밀한 부분을 보는 시스템은 미세한 먼지 등에 기인한 잡음에 민감하므로, 출력 영상의 잡음 제거가 시스템 성능의 중요한 요인이 된다. 그러나 하드웨어적인 잡음 제거는 전체시스템의 비용을 증가시키는 단점을 가지고 있다[1-4]. 이러

한 문제점을 해결하기 위하여 여러 가지 잡음제거를 위한 필터링 기법이 많은 학자들에 의해 연구가 진행되고 있다[5-12].

SEM 영상 처리는 중요한 정보량을 가진 경계선(edge)을 보존하면서 잡음을 제거하는 것이 중요하다[2, 3, 5-8]. 기존의 저대역 통과 필터를 사용할 경우에는 경계선이 희미해져 많은 정보량의 손실을 가져온다[3, 5-6].

경계선 보존 잡음제거 필터링 방법 중에는 차순 통계학(order statistics)을 바탕으로 하고 있는 메디안(median) 필터가 영상 개선에 많이 적용되고 있다[5-11, 13-15]. 그러나, 메디안 필터는 임펄스(impulse), 가우시안(gaussian) 또는 균일(uniform) 분포형 잡음이 복합적

으로 오염된 영상에 대해서는 성능이 떨어지는 단점을 가지고 있다[2, 3, 5-8].

Wu와 Kundu[2, 3]는 이러한 단점을 보완한 필터링 방법으로 가중-D(weighted-D) 필터를 제안하였다. 가중-D 필터는 혼합잡음에 대해서 임펄스 성분이 적은 경우에는 성능이 우수하지만 임펄스 성분이 3%이상인 영상의 경우에는 임펄스 잡음을 완전히 제거하지 못하는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 개인용 컴퓨터를 이용한 초소형 전자현미경 영상처리 시스템을 개발하였으며, 위의 잡음 제거 문제점을 해결하기 위해 새로운 필터링 알고리즘을 제안하였다. 이를 위해서, 차순 통계학에 근간을 둔 비선형 필터링 기법을 이용하여 적절한 영역 범위를 결정해 주었고, 그 영역 안에 포함된 화소들의 평균을 구하는 구조와 결합시켜 보다 향상된 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘을 여러 형태의 혼합잡음이 부가된 영상에 대해 실험하여, 시각적인 면과 정량적인 면에서 비교 평가를 하였다.

## 2. 전자현미경 영상처리 시스템 설계

본 논문에서 설계 제작된 전자 현미경 시스템 구조는 Fig. 1과 같다. 제작된 시스템은 컴퓨터에서 배율, 주사

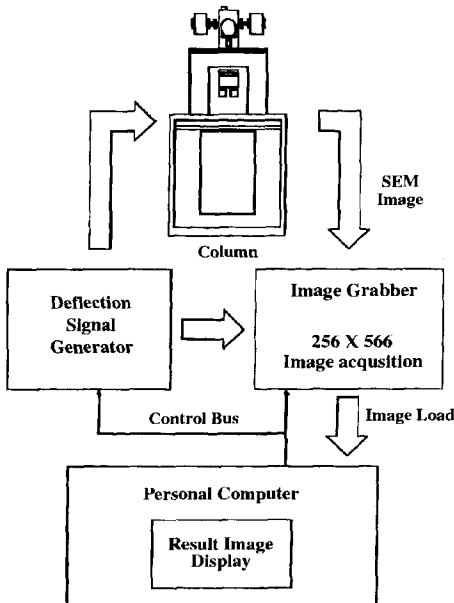


Fig. 1. Structure of designed SEM.

속도, 위치, 시작 신호등의 각종 제어 정보를 편향 신호 발생 장치(deflection signal generator)에 인가하여 전자현미경을 제어한다. 또한 영상 획득 장치(image grabber)에도 영상을 저장하고, 불러오는 신호를 인가한다. 전자현미경으로부터 나온 영상 신호는 디지털 값으로 변환되어 영상 획득 장치의 메모리에 저장된다. 이 영상을 컴퓨터에서 읽어들이고 후 잡음을 제거하기 위한 필터링, 영상의 밝기/대비 보정(brightness/contrast adjustment) 등의 영상 처리를 하여 화면에 나타내게 되며, 파일로 저장할 수 있도록 하였다.

영상획득장치의 설계는 다음과 같이 하였다. 전자현미경의 2차 여기 전자 검출기인 SED(second electron detector)에서 나온 아날로그 신호가 디지털 영상 데이터로 쓰이기 위해서는 디지털 신호로 변환되어야 한다. SED에서 나온 아날로그 신호는 A/D 변환기의 입력 범위에 맞게 크기를 조정하였다. 아날로그 신호는 8bit 디지털 값으로 변환되어, 한 샘플은 256 단계로 나타내도록 하였다.

디지털 값으로 변환된 영상의 표본 값이 RAM(random access memory)에 저장된다. 본 시스템에서는 기억 소자로 파이프 RAM(pipe RAM, FIFO RAM) 2개를 사용하여 두 프레임의 영상을 저장할 수 있다. 파이프 RAM은 클럭 신호에 따라 주소(address)가 자동으로 증가하며, 따라서 주소가 필요하지 않아 회로가 간단하게 된다.

컴퓨터에서 RAM에 제어 신호를 인가하여, 영상 획득 장치부터 RAM에 데이터를 기록하거나 RAM에 기록된 영상 데이터를 컴퓨터로 가져오도록 하였다.

## 3. 혼합 잡음 제거 알고리즘의 제안

### 3.1 가중-D 필터

영상처리에 있어서 필터링 윈도우 중앙 화소값의 특성이 경계선 보존에 중요한 요인으로 작용한다고 알려져 있다[2, 16-17].

이러한 특성을 이용하여 Hodges-Lehman[2, 3]은 필터윈도우의 중앙 화소값을 기준으로 수평, 수직, 두 대각선 방향의 대칭화소값에 같은 가중치를 주는 D 필터를 제안하였는데 이는 식 (1)과 같다.

$$D = MED\{(X_i + X_{9-i+1}) \cdot 1/2\} \quad (1)$$

1 ≤ i ≤ 5

여기서 MED{·}은 중간값 추출 연산자이며  $X_1, \dots,$

$X_0$  는  $3 \times 3$  윈도우 화소값들을 4방향의 대칭성을 고려하여 배열한 집합이다. 이와 같이 배열된 집합에 가중치  $1/2$ 를 곱하고 중간 값을 추출한다. 그러나  $D$  필터는 가중치가 같기 때문에, 만약 영상이 임펄스에 오염되었을 때에는 경계선이 파괴되는 단점이 있다.

이러한 단점을 극복하기 위해서 Wu-Kundu [2,3]는 필터 윈도우의 화소값이 식 (2) 영역 안에 들어가는지를 판별하여 필터의 가중치를 바꾸어주는 가중-D 필터를 제안하였다.

$$X_0 - q \leq X_i \leq X_0 + q \tag{2}$$

여기서  $q$ 는 잡음의 표준 편차와 밀접하게 관련되어 있는데 통계적으로  $2.5\sigma \sim 3\sigma$ 로 정한다[2-5].

가중-D 필터의 식을 식 (3)에 나타내었다. 식 (4)는 바꾸어주는 가중치 관계식이다. 여기서  $R_i$ 는 식 (5)에 의해서 정의된 논리 변수들이다.

$$D_i = \{(X_i \cdot w(i) + X_{9-i+1} \cdot w(9-i+1))\}$$

$$x_D = MED \{D_i\}$$

where  $1 \leq i \leq 5$ ,  $w(i) + w(9-i+1) = 1$  (3)

$$w(i) = 1/2; w(n-i+1) = 1/2$$

when  $R_1 = R_2 = 1$  or  $R_1 = R_2 = 0$  (4a)

$$w(i) = 1; w(n-i+1) = 0$$

when  $R_1 = 1$  and  $R_2 = 0$  (4b)

$$w(i) = 0; w(n-i+1) = 1$$

when  $R_1 = 0$  and  $R_2 = 1$  (4c)

$$R_1 = 1 \text{ when } X_0 - q \leq X_i \leq X_0 + q$$

otherwise  $R_1 = 0$  (5a)

$$R_2 = 1 \text{ when } X_0 - q \leq X_{n-i+1} \leq X_0 + q$$

otherwise  $R_2 = 0$  (5b)

필터의 구조를 살펴보면 경계선이 나타났을 경우, 즉 화소값이 크게 변화하는 영역일 때에는 필터의 가중치는 식 (4b)와 식 (4c)에 의해서 결정되고, 동질화소 영역이나 천천히 변화하는 영역에서는 식 (4a)처럼 필터의 가중치를 선택한다. 중앙 화소값이 임펄스에 오염되었을 때에는 식 (4a)처럼 필터의 가중치를 선택하여 임펄스를 제거하는 효과를 나타낸다. 이처럼 영상의 화소값들이 식 (2)의 영역 안에 들어가는지를 판별하여 적응적으로 필터 가중치가 변화되므로 향상된 결과를 얻을 수 있다.

그러나, 이 가중-D 필터는 영상에 임펄스 잡음이 많

거나 가우시안 잡음의 분산이 큰 경우에는, 임펄스 잡음과 가우시안 잡음을 완전히 제거 못하는 단점이 있다. 이것은 많은 임펄스 잡음과 가우시안 잡음이 가중-D 필터의 적응 인자값을 결정하는 식 (2)의 영역을 편이시키고, 또 대칭 화소값들도 오염되는 확률이 커져 전체적인 필터링 과정에 영향을 미치기 때문이다.

### 3.2. 혼합 잡음으로 오염된 영상 신호 모델

혼합 잡음으로 오염된 영상 신호는 다음과 같이 모델링(modeling) 할 수 있다.

$$x_{i,j} = \begin{cases} s_{i,j} + n_{i,j} : \\ \text{with the probability } 1 - (\pi_1 + \pi_2) \\ x_{\max} : \text{with the probability } \pi_1 \\ x_{\min} : \text{with the probability } \pi_2 \end{cases} \tag{6}$$

여기서,  $s_{i,j}$ 는 원 영상,  $n_{i,j}$ 는 평균이 0이고 균일 분포 혹은 가우시안 분포를 갖는 통계적으로 독립인 백색 랜덤 잡음이다.  $x_{\max}$ 는  $\pi_1$ 의 발생 확률을 가지는 영상 화소의 동적 범위(dynamic range)내에서 최대값이다.  $x_{\min}$ 는  $\pi_2$ 의 발생 확률을 가지는 영상 화소의 동적 범위 내에서 최소값이다.

### 3.3. 새로운 혼합 잡음 제거 필터의 제안

본 연구에서는 경계선 보존 효과가 좋은 비선형 필터링 기법인 가중-D 필터의 구조를 이용하여 신뢰성 있는 영역 범위를 결정하고, 그 영역 안에 포함된 화소들의 평균을 구하는 구조와 결합시켜 다음과 같은 새로운 필터링 방법을 제시하였다.

먼저,  $5 \times 5$  크기의 기준 윈도우(base window)  $W_B$ 를 설정하고, 이 내부에서 중앙 화소값  $X_0$ 를 기준으로  $3 \times 3$  크기의 부윈도우(sub-window)  $W_S$ 를 정한다. 이들 윈도우의 구조는 Fig. 2에 나타내었다. 그리고, 식 (7)처럼 중앙 화소값  $X_0$ 가 상위 임계값인  $T_H$  이상이거나, 하위 임계값  $T_L$  이하이면 부윈도우  $W_S$ 의 중간값(median value)을 구해 중앙 화소값  $X_0$ 와 대체한다. 여기서, 임계값  $T_H$ 와  $T_L$ 을 쓰는 이유는 임펄스 잡음을 제거하는 효과와 함께 좀더 정확한 영역범위를 설정하는 장점이 있기 때문이다. 임계값  $T_H$ 와  $T_L$ 은 경험적인 수치이며 필터 설계시 변경 가능한 값이다. 본 연구에서  $T_H$ 는 gray 화상에서 상위 98%,  $T_L$ 는 하위 3%에 해당하는 값으로 설정하였다.

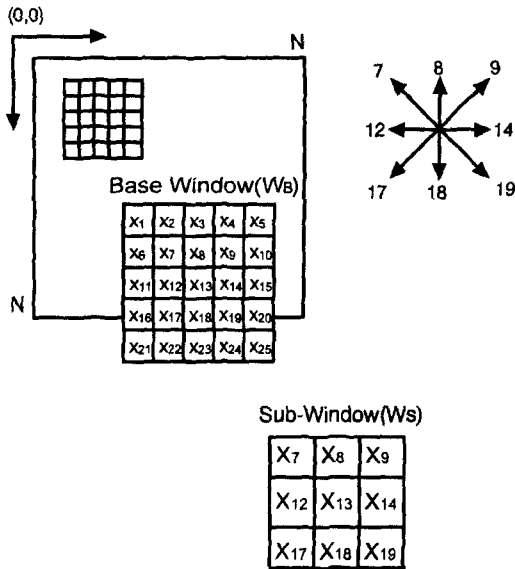


Fig. 2. Base-Window  $W_b$  and Sub-Window  $W_s$ .

$$X_0 = MED\{W_s\} \text{ if } X_0 \geq T_H \text{ or } X_0 \leq T_L$$

$$X_0 = X_0 \quad \text{otherwise} \quad (7)$$

식 (7)에 의해서 구한값을 식 (2)에 대입하여 가중치 판별 영역을 구한다. 부윈도우  $W_s$ 의 4방향 대칭 화소값들이 식 (2)영역 안에 포함되는지 안 되는지를 판별하여 식 4(a)-(c)를 이용하여 가중치를 결정한다. 가중-D 필터의 출력은 식 (3)에 나타내었다.

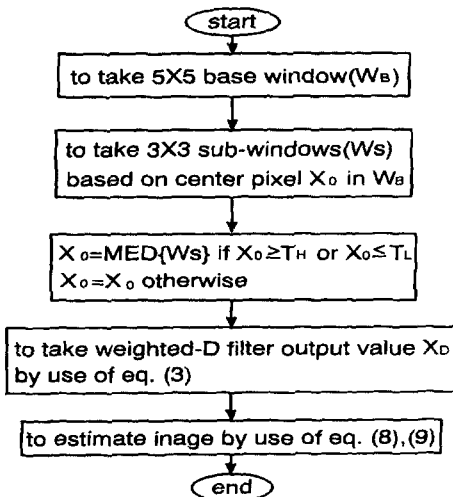


Fig. 3. Software flowchart of the proposed algorithm.

식 (3)에 출력값  $x_D$ 를 가지고, 다시 식 (8)의 영역을 설정한다.  $5 \times 5$  기준 윈도우  $W_b$  안에 화소값들중에서 식 (8)의 영역 안에 들어가는 화소 값들의 집합  $W_{Bi}$ 의 평균을 구하면 식 (9)와 같이 최종적인 필터의 출력  $x_{out}$ 를 구할 수 있다. 여기서,  $MEAN\{ \}$ 은 평균값 추출 연산자이다.

$$x_D - q \leq X_i \leq x_D + q \quad (8)$$

$$x_{out} = MEAN\{W_{Bi}\} \quad (9)$$

이러한 방법을 쓰는 이유는 필터의 중앙 화소 값과 비슷한 값을 추정하여 영역에 신뢰성을 높이고, 영역 안에 포함되는 화소값들의 평균을 구함으로써 남아있는 가우시안 잡음이나 균일 분포 잡음을 제거하는 효과를 얻기 위해서이다.

## 4. 실험 및 결과 고찰

### 4.1. 실험 방법

본 연구에서 제작한 전자 현미경 영상처리 시스템을 평가하기 위해 실리콘웨이퍼 위에 격자 무늬를 만든 시편을 제작하였다. 제작한 시편의 격자 선의 간격은 가로 세로 약  $100 \mu\text{m}$ 이며 격자 선의 폭은 약  $10 \mu\text{m}$ 이다.

그리고, 본 연구에서 제안한 혼합잡음 제거 알고리즘의 성능을 알아보기 위해  $256 \times 256$  Lena 영상을 이용하였다. 실험 영상을 이용하여 제안한 알고리즘과 기존의 알고리즘을 비교 평가하여 타당성을 검증하고, 전자현미경으로 획득한 영상에 대해 제안한 알고리즘을 적용하였다.

### 4.2. 실험 결과 및 고찰

본 연구에서는 실험 영상으로 Lena 영상을 사용하였다. Lena 영상에 분산이 100, 200인 가우시안(Gaussian) 분포 잡음 및 균일 분포 잡음을 부가하고, 여기에 다시 임펄스 잡음(positive impulse, negative impulse, salt & pepper)을 1%에서 10%의 범위로 오염시켜 실험 영상 데이터로 사용하였다. 먼저 제안한 알고리즘과 가중-D 필터와의 혼합잡음제거 성능을 시각적인 관점에서 비교 평가해 보기 위하여 대표적으로 Gaussian + Positive impulse형 잡음으로 오염된 실험 영상에 대해 필터링한 결과를 Fig. 4에 나타내었다(가우시안과 균일 잡음, 그리고 positive 임펄스, negative 임펄스, salt & pepper 잡음을 모두 실험하였으나 본 논문에서는 지면관계로 대표적으

로 Gaussian + positive 임펄스 잡음의 결과만 기술하였다.) 가중-D 필터를 적용한 결과가 Fig. 4(a)이고, 제안한 알고리즘을 이용하여 필터링 한 결과를 Fig. 4(b)에 나타내었다.

Fig. 4에서 볼 수 있듯이, 가중-D필터링에 의한 결과 영상은 임펄스 잡음을 완전히 제거하지 못한 반면, 제안된 알고리즘에 의한 결과 영상은 시각적으로 상당한 개선 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 이는 본 연구에서 제안한 알고리즘이 비선형 필터와 선형 필터의 상호보완적인 구조로 인해 영역 판별에 대한 신뢰도가 높기 때문에, 기존의 가중-D 필터링보다 혼합잡음 제거에 더



Fig. 4. Filtering of images contaminated by Gaussian + positive impulse. (a) weighted-D filtering and (b) proposed filtering.

효과적임을 입증하였다.

영상의 질을 정량적으로 평가하는 몇몇 수학적 기준이 제안되어 객관적인 참고 자료로서 사용되고 있으며 [2, 3, 5, 6], 본 논문에서는 이러한 수학적 기준들 가운데서, 식 (10)과 같이 정의된 NMSE(normalized mean square errors) 값을 영상의 정량적인 비교를 위해 사용하였다.

$$NMSE = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} [Y_{i,j} - S_{i,j}]^2}{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} [X_{i,j} - S_{i,j}]^2} \quad (10)$$

여기서,  $S_{ij}$ 는 원 영상,  $X_{ij}$ 는 오염된 영상,  $Y_{ij}$ 는 필터링된 영상이며,  $N, M$ 은 영상의 크기이다.

가우시안 또는 균일 분포 잡음만으로 오염된 영상에 대해 제안된 알고리즘과 가중-D 필터를 이용하여 잡음 제거 처리를 한후 NMSE값을 측정하여 Fig. 5에 나타내

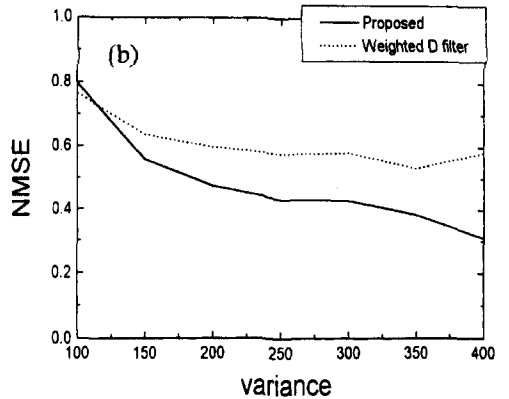
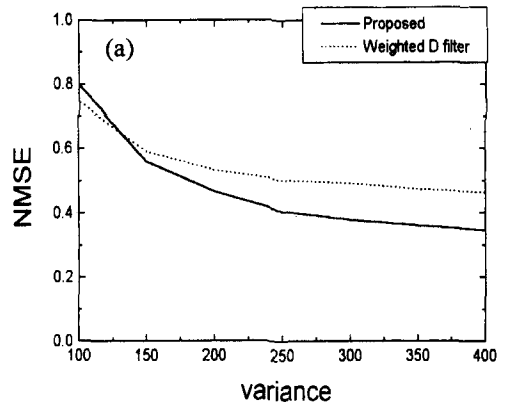


Fig. 5. NMSE values; (a) for the images corrupted with Gaussian noise and (b) the images corrupted with uniform noise.

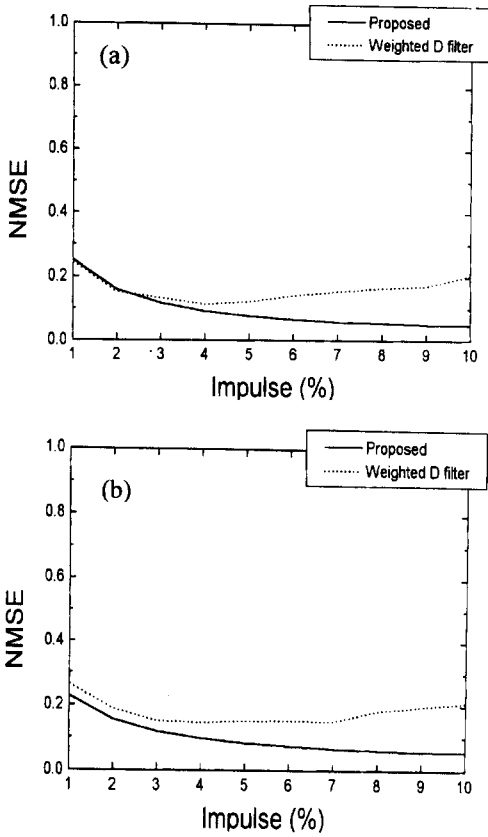


Fig. 6. NMSE values for Gaussian+positive impulse contaminated image. (a) for variance=100 and (b) variance=200.

었다. 그래프에서 잡음의 분산이 150 이상인 경우 제안한 필터가 더 좋은 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

Fig. 6은 Gaussian+positive형 혼합잡음 영상에 대해서, 제안된 알고리즘과 가중-D 필터를 적용해 얻은 영상의 NMSE값을 구하여 나타낸 것이다. 이 NMSE값을 비교해 볼 때, Gaussian + positive형 잡음은 최소 0.96배에서 최고 2.5배의 향상 효과를 얻을 수 있었다.

이로부터, 제안한 필터가 정량적인 면과 시각적인 면에서 가중-D 필터보다 잡음 제거 성능이 우수하고, 잡음의 오염 정도가 심해질수록 영상의 개선 효과가 향상되는 것을 알 수 있었다.

제작한 SEM에서 획득한 영상에 대해 제안한 필터와 가중-D 필터의 출력 영상을 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7에서, 실제로 반도체 패턴 영상에 혼합잡음이 섞여있을 때는 Lena 영상에서의와 같은 효과를 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 이로부터 제안한 필터링 방법이 가

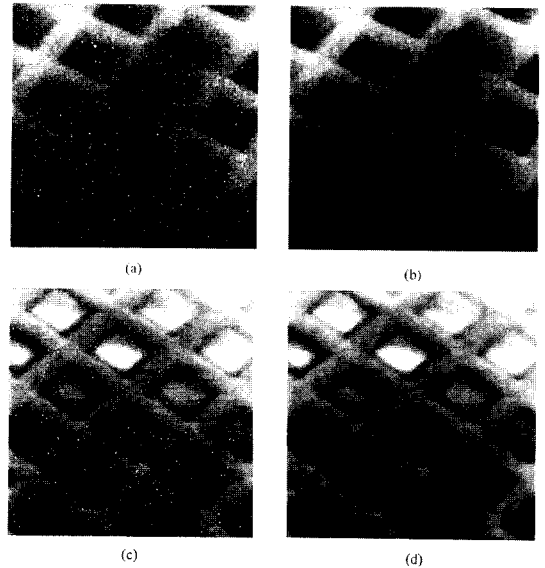


Fig. 7. Comparison of the SEM images filtered by weighted-D and the one proposed here. (a) weighted-D filtering (ratio 10,000, scan time 1/30 sec), (b) proposed filtering (ratio 10,000, scan time 1/30 sec), (c) weighted-D filtering (ratio 10,000, scan time 1 sec), and (d) proposed filtering (ratio 10,000, scan time 1 sec).

중-D 필터보다 더 큰 잡음 제거 효과를 얻을 수 있음은 물론, 전자 현미경 영상은 경계선 부근의 정보가 중요하다는 점을 감안한다면, 영상의 경계선과 선명도에서 제안한 방법이 더 효과적임을 알 수 있다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 개인용 컴퓨터를 이용한 전자 현미경 영상 시스템을 제작하고 혼합잡음 제거를 위하여 기존의 잡음제거 방법보다 우수한 잡음 제거 알고리즘을 제안하였다. 본 논문에서 제안한 잡음제거 알고리즘은 기존의 가중-D 필터 구조를 이용하여 적절한 영역범위를 결정하고, 그 영역 안에 포함된 화소값들의 평균을 구하는 구조와 결합시킴으로써 혼합 잡음 제거에 보다 우수한 필터링 효과를 얻을 수 있었다. 제안된 필터링 방법은 다단계 임펄스 잡음제거 방법을 사용하여, 기존의 가중-D 필터가 임펄스 잡음이 3% 이상인 경우 그 잡음을 완전히 제거하지 못하는 단점을 보완하였으며, 가우시안이나 균일 분포 잡음을 효과적으로 제거하기 위하여, 충분한 데이터량을 확보하는 장점을 가진 다중 원도형

방법을 사용하여, 영역판별에 따라 포함된 화소값의 평균을 구하였다. NMSE값으로 측정된 정량적인 분석에서, Gaussian + positive impulse형 혼합잡음으로 오염된 영상에 대해서는 최소 0.96배, 최고 2.5배의 향상 효과를 얻을 수 있었다.

본 논문에서 제안한 방법은 다중 윈도우링으로 인한 데이터 정렬 부분에서 처리 시간이 증가하는데, 이는 고속 DSP(digital signal processor)칩을 이용하면 해결될 수 있을 것이며, 전자 현미경에서 뿐만 아니라 다른 산업 분야에서 널리 응용될 수 있으리라 사료된다.

### 참고문헌

- [1] Wen-Rong Wu and Amalan Kundu, IEEE, Circuit and System, Vol. 38, No. 4, Apr. (1991).
- [2] I. Pitas, "Digital Image Processing Algorithms", Prentice Hall, (1993).
- [3] I Pitas, A. N. Venetsanopolous, "Nonlinear digital filters principles and applications", Kluwer Academic Publishers, (1990).
- [4] I Pitas, A. N. Venetsanopolous, "Order Static in Digital Image Processing", proc. of IEEE, Vol. 80, No. 12, Dec. (1992).
- [5] R. Crane, "A Simplified Approach to Image Processing", Prentice Hall (1997).
- [6] W. K. Pratt, "Digital Image Processing", 2nd ED., John Wiley & Sons (1991).
- [7] A. K. Jain, "Fundamentals of Digital Image Processing", Prentice Hall, (1989).
- [8] J. S. Lim, "Two-Dimensional Signal and Image Processing", Prentice Hall, (1990).
- [9] J. S. Lee, proc. of IEEE Computer Society Conf. on Pattern Recognition and Image Processing, pp. 55-61, (1978).
- [10] Giovanni Ramponi, IEEE Signal Processing Letters, Vol. 3, No. 3, pp. 63-65, Mar. (1997).
- [11] S. J. Orfanidis, "Optimum Signal Processing", McGraw-Hill, (1988).
- [12] S. Haykin, "Adaptive Filter Theory", Prentice-Hall, (1991).
- [13] G. Ramponi, Electron. Lett., Vol. 31, pp. 865-866, May. (1995).
- [14] H. M. Lin, A. N. Wilson Jr., IEEE Trans. Circuit and Systems, Vol. 35, No. 6, Jun. (1988).
- [15] J. P. Fitch, E. J. Coyle, N. C. Gallagher Jr., IEEE Trans. Acoustics, Speech and Signal Processing, Vol. ASSP-32, No. 6, DEC. (1984).
- [16] G. R. Arce, R. E. Foster, IEEE Trans. Acoustics, Speech Signal Processing, Vol. 38. No. 9, Sep. (1991).
- [17] S. J. Ko, Y. J. Lee, IEEE Trans. Circuit and Systems, Vol. 38, No. 9, Sep. (1991).
- [18] 황재욱, 김재천 공역, 일본 전자현미경 학회 관동지부편, "주사 전자 현미경의 기초", 반도출판사, 1994.