

신규 설치된 HVEM용 고전압 CCD 카메라의 정량 특성 평가 Quantitative characteristics of a new high-voltage CCD camera

김영민, 김윤중

한국기초과학지원연구원 전자현미경연구부

1. 서론

HVEM의 주요 기록 장치로서 HV-GIF (High-voltage Gatan Image Filter)에 장착되어 사용되어 왔던 HV-MS (High-voltage MultiScanTM charge coupled device, $1k \times 1k$ pixels) 카메라는 2006년 12월에 2K급인 HVEM용 UltraScanTM 타입의 카메라 (SP US1000 HV-IF)로 교체되었다. 기존의 HV-MS 카메라의 화소 크기는 $24 \mu\text{m}$ 이나 신규 카메라는 $14 \mu\text{m}$ 의 화소 크기를 가지고 있어 카메라의 전체 물리적 크기가 큰 차이가 나지 않았기 때문에 HV-GIF의 광학 시스템을 그대로 적용하여 설치할 수 있었다.

기존에 사용하던 HV-MS 카메라는 형광판을 기준으로 할 때 imaging 면적이 $1.28 \times 1.28 \text{ mm}^2$ 이며 14 bit의 dynamic range에 약 2 counts/e⁻의 sensitivity를 갖는다. 이러한 카메라 성능으로 HVEM의 사양분해능 1.2 Å을 구현하는 양질의 원자분해 영상을 획득하기 위해선 40,000배 이상의 배율에서 입사 전자 밀도를 300 pA/cm^2 이상으로 빔을 집중하여야 한다. 교체된 카메라는 16 bit의 2K급 카메라로 dynamic range와 화소 분해능이 향상되었기 때문에 HVEM의 사양분해능을 구현하는 현미경 배율이 20,000배로 감소함에 따라 상대적인 FOV (Field-of-View) 향상을 꾀할 수 있고 EELS 분석에서 스펙트럼의 분산도를 0.5 eV/pix로 정밀화 할 수 있다. 또한 UltraScan 타입의 본 카메라는 기존의 MultiScan 타입에 비해 DQE (detection quantum efficiency)가 높고 Nyquist limit에서 MTF가 30%이상 유지되므로 고대비 영상 구현 성능이 뛰어나다.

기록 자료의 품질은 카메라의 특성과 직결되므로 카메라의 특성을 정량적으로 평가하는 방법들이 여러 연구자들에 의해 제안되어 왔다 [1-4]. 그러나 각각의 측정 방법들은 일반적인 면에서는 잘 정의되나 실질적인 면에서는 각각의 카메라들의 용도와 특성에 따라서 달라지게 된다. 본 연구에서는 기존의 HV-MS 카메라의 정량 특성 평가 [5]에서 제시된 방법들을 동일하게 적용하여 신규 설치된 카메라의 성능을 평가하고 비교하였으며 이의 결과로부터 신규 설치된 카메라의 최적 응용 조건을 고찰하였다.

2. SP US1000 HV-IF 카메라의 성능

CCD 카메라의 성능을 나타내는 정량적 척도들은 흔히 MTF (modulation transfer function)으로 정의되는 detector resolution과 dynamic range, DQE (detection quantum efficiency), linearity, uniformity, average gain 등이 있다. 이 들 파라메타들의 평가로부터 기존에 사용되던 HV-MSD 카메라와 신규 설치된 카메라의 성능을 정량 비교하였고 카메라의 성능을 최적 활용할 수 있는 실험 조건들을 고려하였다.

(1) MTF (modulation transfer function)

카메라 자체의 분해능을 나타내는 수단으로 본 실험에서는 noise 측정법을 적용하여 기존 카메라와 신규 설치된 카메라간의 MTF 변화 양상을 비교하였다. Noise 측정법은 빔을 넓게 펼쳐서 uniform illumination을 만들고 카메라에 약 1초 정도의 노출조건으로 noise 이미지를 획득한 후 해당 이미지를 FFT (fast Fourier Transform) 변환하여 Fourier 공간에서의 스펙트럼이 MTF에 의해 감쇠되는 최대 주파수 영역을 분석하는 방법이다. 기존의 HV-MSD 카메라나 신규 설치된 카메라 모두 MTF의 사양값은 Nyquist limit (0.5 1/pixel)에서 30%의 신호 레벨을 유지하는 것이다. Fig. 1은 noise method에 의한 MTF 평가 결과로서 Nyquist limit까지 확장되는 power 스펙트럼에서 MTF가 30% 정도를 유지하는 것으로 볼 때 두 카메라 모두 사양 값을 만족하고 있음을 알 수 있다. 그러나 중간 주파수 영역에서는 신규 카메라의 MTF 값이 HV-MSD 카메라의 경우보다 작은 경향이 있음을 볼 수 있다. 이는 신규 카메라의 설치로 실제 결상 영역의 물리적 크기가 유사한 영역에 화소수만 4배로 크게 한 경우로서 개별 화소에 대한 MTF의 일대일 비교는 동일한 조건이 아니기 때문에 큰 의미는 없는 것이다.

(2) DQE (detection quantum efficiency)

DQE는 CCD의 read-out 과정에서 입력신호 대비 노이즈발생 정도를 나타내는 척도로서 카메라의 noise performance를 나타낸다. 가속전압과 electron dose의 함수로서 DQE는 변화한다. Electron dose가 실험적으로 beam brightness와 배율에 의존하기 때문에 장비의 분해능을 실현하는 배율에서의 DQE와 최대 DQE를 만족하는 분석 조건은 다르게 설정될 수 있으므로 이를 평가하는 것이 필요하다. 기존의 HV-MSD 카메라와 신규 설치된 카메라에 대하여 1250 kV 하에서 electron dose의 함수로서 DQE 변화를 Fig. 2의 (a)에 나타내었고 이 들 DQE 비 (DQE_{New}/DQE_{Old})의 변화를 (b)에 나타내었다. 최대 DQE는 HV-MSD 카메라의 경우 약 0.76인 반면 신규 카메라의 경우 약 0.95로 DQE가 더 높다. 그러나 신규 카메라의 경우 약 $1,000 \text{ e}^-/\text{pix}$ 이하의 electron dose 영역에서는 오히려 HV-MSD 카메라의 DQE보다 낮게 나타나는 것을 볼 수 있

다. 이는 신규 카메라의 경우 동일한 전자 조사 조건에서 4배로 결상 화소가 증가되었기 때문에 개별 화소에 대한 상대적인 입사 전자 신호의 감소가 유발되어 나타나는 현상이다. 따라서 본 DQE 측정 결과로부터 높은 전자 조사 조건하에서는 신규 카메라가 이전 보다 양질의 영상을 제공하는 반면 낮은 전자 조사 조건에서는 영상 품질이 오히려 떨어지기 때문에 재료의 고분해능 영상에는 보다 유리하지만 low dose가 필요한 실험 조건에서는 불리하다는 것을 알 수 있다.

(3) Dynamic range

HV-MSD 카메라의 dynamic range는 14 bit이고 신규 설치된 UltraScan™ 타입의 카메라는 16 bit이다. 그러나 실험적으로 획득하게 되는 값은 사양값과 다르게 나타나며 실험적인 dynamic range는 아래와 같은 식으로 평가한다.

$$\text{Dynamic range} = \log_2 (I_{\max}/\sigma_b) \text{ (bit)}$$

여기서, I_{\max} 는 detector의 saturation level에서의 electron count를 나타내고 σ_b 는 dark current 이미지의 noise level값을 나타낸다. 실험적으로 측정된 dynamic range는 HV-MSD의 경우 12 bit ($\sim 4000 e^-$) 이고 신규 카메라의 경우 14 bit ($\sim 16,000 e^-$)로 평가되었다. 신규 카메라의 실험적인 dynamic range가 훨씬 넓기 때문에 전자 조사 조건에 있어 유연성을 확보할 수 있지만 이는 electron dose가 큰 영역에서 보다 유효하고 낮은 electron dose에서는 DQE 평가에서 보았듯이 오히려 불리한 것으로 나타났다.

(4) Uniformity

Uniformity는 각각의 화소들에 대한 electron acquisition의 편차를 나타낸다. 카메라의 uniformity는 실험적인 dynamic range를 벗어나는 강한 전자 조사 조건하에서는 급격히 불량해진다. 또한 shot noise level이 dark current에 의한 read-out level과 유사해지는 약한 전자 조사 조건하에서도 uniformity가 급격히 불량해진다. 따라서 양호한 uniformity의 획득은 이들의 조건을 피하는 중간 영역에서 결정이 된다. 이의 결과를 Fig. 3에 나타내었으며 1~2%의 uniformity 편차가 나는 양질의 영상을 획득할 수 있는 electron dose 조건은 HV-MSD 카메라의 경우 $0.9\sim 12 (\times 10^3 e^-/\text{pix})$ 이며 신규 카메라의 경우 $1.2\sim 20 (\times 10^3 e^-/\text{pix})$ 으로 신규 카메라가 보다 넓은 전자 조사 범위에서 좋은 uniformity를 유지하는 것으로 평가되었다.

(5) Average gain

Average gain은 electron dose 대비 각 화소 당 측정된 electron count를 나타내며 scintillator와 optical-coupling 그리고 CCD 자체의 sensitivity 등과 같은 detector 디자

인에 의존한다. HVEM용 카메라는 고전압 전자를 기록하기 위해 특별히 고안된 것으로 저전압용 UltraScan™ 타입의 카메라들보다 gain값이 우수하지 못하다. 전체 electron dose 영역에서 HV-MSD 카메라의 경우 0.3으로 gain 값이 측정되었으며 신규 카메라는 100 e⁻/pix 이상인 electron dose 영역에서는 0.4로 기존 카메라보다 우수한 gain값을 실현하였으나 그 이하의 electron dose 조건에서는 dose량 감소에 따라 급격히 감소하는 양상을 나타내었다.

3. 요약

카메라의 정량 평가 결과로부터 신규 설치된 HVEM용 고전압 CCD 카메라 (SP US1000 HV-IF)는 기존의 HV-MSD 카메라에 비해 read-out noise level과 shot noise 발생거동, average gain, dynamic range, uniformity, DQE 등이 향상된 결과를 보여 주었고 MTF는 전과 유사한 결과를 나타내었다. 그러나 linearity가 HV-MSD 카메라에 비해 그 범위가 좁으며 낮은 전자 조사 조건하에서는 전반적인 카메라 성능이 오히려 HV-MSD 카메라의 경우보다 낮은 결과를 나타내었다. 따라서 본 신규 카메라는 낮은 전자 조사 조건이 필요한 실험에서는 기록 성능의 개선을 나타내지 않지만 고속 영상 기록 기능을 활용한 재료의 역동적 분석과 함께 원자분해 영상 작업과 EELS 분석에 있어선 이전 보다 기록 성능의 뚜렷한 개선을 나타낼 것으로 기대할 수 있다.

References

- [1] Zuo JM, Ultramicroscopy 66 : 21, 1996.
- [2] Zuo JM. Microsc. Res. Tech. 49 : 245, 2000.
- [3] de Ruijter, Weiss JK, Rev. Sci. Instrum. 63(10) : 4314, 1992.
- [4] Fan GY, Ellisman MH, J. Microsc. 200 : 1, 2000.
- [5] 김영민 등, 제 37차 한국전자현미경학회 춘계학술대회, 서울대, p.159, 2006.

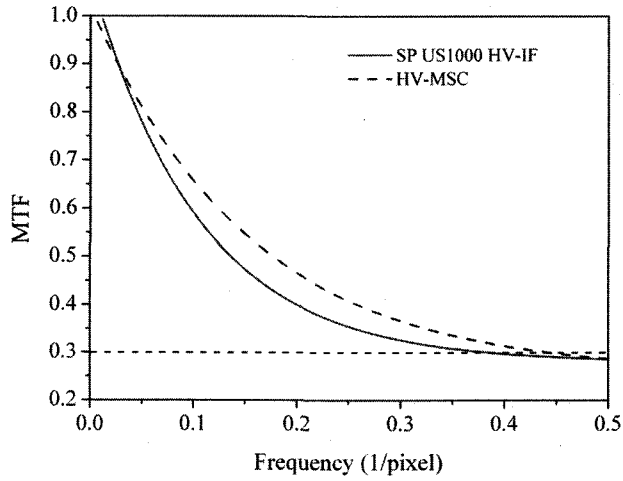


Fig. 1. Comparison of MTF results of HV-MSC and the replaced camera (SP US1000 HV-IF).

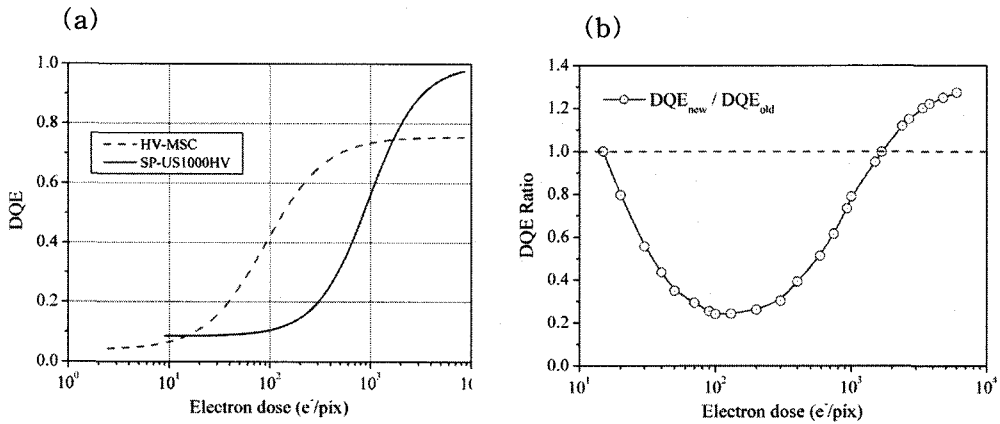


Fig. 2. (a) Comparison of DQE results as a function of electron dose. (b) The DQE ratio of HV-MSC to the replaced camera as a function of electron dose.

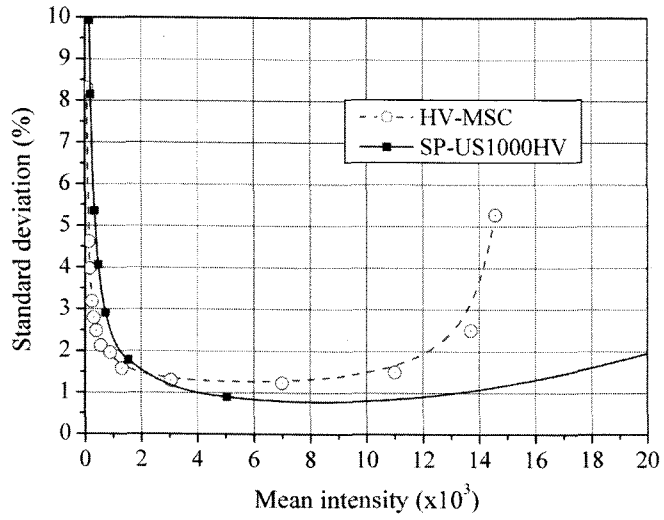


Fig. 3. Uniformity comparison of electron acquisition.