

**KBSI-HVEM 투사렌즈 전류제어에 의한 CCD Camera의  
Field of View (FOV) 확장**  
**Enlargement of field-of-view (FOV) of the CCD camera by the current  
adjustment of the projection lens system in KBSI-HVEM**

김영민<sup>1</sup>, 심효석<sup>2</sup>, 김윤중<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 한국기초과학지원연구원 나노환경연구부 전자현미경팀

<sup>2</sup>(주) 지올코리아 기술지원본부

### 1. 서론

KBSI-HVEM은 필름작업 시 최저 배율이 2,000배이며 FOV (field of view)는  $40\mu\text{m} \times 50\mu\text{m} = 2000\mu\text{m}^2$ 가 된다. 따라서 지금까지 삼차원 구조 합성을 위해  $\mu\text{m}$ 단위의 거대시료 및 반도체의 HVEM 고투과력을 이용한 tilt series는 필름 작업과 뒤이은 디지털 이미지 변환 등의 작업을 거치는 복잡한 과정을 거쳐야 했고 이에 따라 필름 스캔과 이미지 변환 및 편집 과정 중에 발생하는 영상정렬 불일치문제로 양질의 이미지 합성은 어려운 실정이었다. 다시 말해 삼차원 합성 프로그램으로 가기도 전에 이미 실험적 오류를 유발할 여지들을 떠안고 실험이 진행된다는 것이다. 이에 대한 대안으로 CCD 카메라를 이용한 이미지 acquisition이 있지만 본 KBSI-HVEM의 GIF (gatan imaging filter)에 장착된 MS-CCD (multiscan charge coupled device,  $1\text{K} \times 1\text{K}$  pixels)는 post column 방식으로 필름 이미지 영역의 약 0.02% (필름 이미지 확대 배율 89.9x)만을 CCD 영상으로 나타낼 수 있으며 최저 2,000x의 배율에서의 field of view는  $660\text{nm} \times 660\text{nm} = 0.436\mu\text{m}^2$  밖에 되지 않는다. 비록 HVEM의 LOW MAG 기능이 있다고는 하지만 이것은 대물렌즈가 결상에 관여하지 않고 중간렌즈와 projection 렌즈에 의해 시편 영상이 구현되므로 초점이 맞는 시편 영상을 얻을 수 없으며 단지 시편 영상의 그림자만을 추적하므로 시편 탐색 기능 이외엔 쓸모가 없다. 따라서 GIF MS-CCD를 이용한  $\mu\text{m}$ 단위의 거대 시료에 대한 삼차원 tilt series의 획득은 현실적으로 불가능한 것처럼 여겨졌다.

그러나 GIF MS-CCD 카메라를 이용한 넓은 FOV 확보에 대한 한 가지 가능성은 대부분의 투과전자현미경 장비가 갖고 있는 free lens control 기능에 있다. 투과 전자현미경의 경통 내부에 장착된 각각의 렌즈 여기 전류를 자유롭게 조절함으로써 조사계에선 빔 수렴도 및 빔 크기를 제어할 수 있고 중간렌즈 및 투영렌즈의 조합에 의해선 결상된 시편영상의 배율 및 camera length, detector의 collection angle 등을 바꿀 수 있다. 따라서 post-column 방식으로 부착된 detector들의 제한된 FOV는 시편영상의 배율을 결정

하는 중간렌즈 및 투사렌즈계의 전류값을 조정함으로써 바꿀 수 있게 된다.

본 연구에서는 전자기렌즈의 초점과 배율 및 geometry에 관한 기본지식[1]으로 부터 투사계 렌즈의 여기 전류값 변화에 따른 렌즈 파라메타 값들의 변화를 예측하고 이를 실험적으로 획득한 결과와 비교한 후 입력 전류변화에 따른 GIF MS-CCD 카메라의 FOV 변화를 알아보려고 하였다. 또한 각 파라메타들의 상관관계에 관한 실험식을 유도 하여 최대 FOV 뿐만 아니라 실험 목적에 맞는 FOV를 렌즈 전류값에 따라 선택 가능 하도록 입력 전류에 따라 전자현미경의 형광판상에 표시된 필름 영역과 등가인 배율 기준 곡선을 확보함으로써 tomography 대상 시료의 관심영역에 맞는 전류 값을 선택가능 하도록 하였다.

## 2. 실험 방법

실험에 사용된 표준시편은 90°cross grating replica (2160 lines/mm, TAAB lab. limited)로서 projection lens 전류에 따른 FOV 및 image distortion을 측정하는 기준으로 사용하였다. 이미지 획득은 KBSI-HVEM의 post-column imaging filter인 GIF에 장착된 MS-CCD 카메라를 이용하였고 전자현미경의 최소 영상 배율인 2,000x에서의 FOV (660nm x 660nm = 0.436 $\mu\text{m}^2$ )를 기준으로 projection lens의 입력전류를 감소시켜 가면서 나타나는 FOV의 변화와 image distortion 양상을 관찰하였다.

## 3. 결과 및 고찰

렌즈에서 결정되는 결상배율 M은 렌즈에서 결상면까지의 거리를 V라 할 때 아래의 식 (1)과 같이 나타내며 현미경의 경통 설계 및 렌즈의 초점 거리 f와 상관관계를 갖는다.

$$M - 1 = -\frac{V}{f} \quad (1)$$

또한 전자기 렌즈의 초점거리 f는 Liebman [1]의 결과와 같이 입력 전류값 I 뿐만 아니라 pole-piece gap S 및 bore gap B, 렌즈의 coil turn 수 N에 의한 렌즈 디자인에 의존하며 아래의 식 (2)와 같이 변화한다.

$$\frac{1}{f} = \frac{A_0(NI)^2}{V_r(S+B)} \quad \text{여기서, } V_r = \text{상대성 가속전압, } A_0 = \text{상수} \quad (2)$$

식 (2) 및 (1)에 의해 전자기 렌즈를 통과한 영상의 결상면에서의 배율거동이 결정되므로 초고전압 투과전자현미경의 경통 및 projection lens 디자인 값과 제조사로부터 제공

받은 보정상수 값을 활용하여 입력 전류값에 따른 초점거리  $f$  및 배율  $M$ 의 변화를 예측할 수 있다.

그림 1의 (a)는 입력 전류  $I$  및 렌즈 디자인 (S+B)에 따라 변화하는 렌즈 초점거리  $f$ 의 거동을 나타낸 것이다. 입력 전류  $I$ 가 감소함에 따라 초점거리  $f$ 는 선형적으로 감소하다가 최소 초점거리를 지나면서 그 초점거리가 급격하게 증가하는 양상을 나타내며 선형 감소영역의 기울기 및 최소 초점거리는 렌즈 디자인에 의해 영향을 받음을 알 수 있었다. 이러한 일반적인 관계에 대해 초고전압 투과전자현미경의 intermediate lens 및 projection lens의 디자인 값들을 적용하여 나타내면 그림 1의 (b)와 같이 나타낼 수 있다. 현미경의 최소 배율 2,000x에서 최소 초점거리는 렌즈 전류가 약 1.4A일 때 나타남을 알 수 있었다.

그림 2는 상기 결과로부터 얻어진 초점거리  $f$ 의 입력 전류  $I$  및 렌즈 디자인 (S+B)에 대한 의존성으로부터 식 (1)을 적용하여 나타낸 결상 배율의 거동을 나타낸다. 결상 배율  $M$ 은 초점거리  $f$ 가 선형적으로 감소하여 최소 초점거리에 이를 때까지 렌즈의 전류를 감소시키면 ㉔와 같이 지수 함수적으로 감소되며 이에 따라 FOV도 지수 함수적으로 증가하게 된다. 그러나 최소 초점거리를 지나게 되면 오히려 ㉕와 같이 배율이 증가되며 결상된 영상은 이미지면(여기선 형광판)을 지나서 형성되도록 하는 초점거리를 갖기 때문에 변형된 허상을 맺게 된다. 따라서 projection lens의 입력 전류 감소에 따른 배율감소와 FOV 증가를 피한다면 렌즈의 최소 초점거리 이내의 범위로 입력 전류를 조절하여야 하며 그 때에 최대의 FOV를 획득할 수 있음을 본 결과로부터 알 수 있었다.

KBSI-HVEM의 최소 영상배율인 2,000x에서 projection lens의 전류값은 4.74A이고 상기의 결과에서 보듯이 최소 초점거리가 형성될 때의 입력 전류값은 1.4A이므로 전류값 변화에 따른 FOV의 조정은 해당 범위 이내에서 이루어져야 하며 GIF MS-CCD 카메라로 획득할 수 있는 최대의 FOV는 1.4A 근처에서 형성된다는 것을 알 수 있었다. 그림 3에 해당 결과를 나타내었는데 이미 예측된 바와 같이 결상 배율은 projection lens의 전류가 감소됨에 따라 감소되고 이에 따라 FOV가 상응하여 증가됨을 그림으로부터 알 수 있다. 그림 3의 (A)는 최소 현미경 배율인 2,000x 일 경우에 GIF MS-CCD 카메라로 획득할 수 있는 이미지 영역이다. Projection lens의 입력 전류조절에 의해 획득할 수 있는 최대 이미지 영역은 그림 (C)와 같으며 이때의 전류값은 1.64A였다. 이 때에 FOV의 확장은 약 15.3배에 이르고  $10.6\mu\text{m} \times 10.6\mu\text{m}$  ( $112\mu\text{m}^2$ )의 결상 영역을 갖게 된다. 해당 결상 영역은 KBSI-HVEM으로 8,800x에서 작업할 때 필름으로 기록할 수 있는 영역과 동등하다. 따라서 약 8,000x 이상의 배율에서 필름 영역에 포함되는 시료의 경우에는 projection lens의 전류값 조절에 의해 GIF MS-CCD 카메라로 받아들일 수 있음을 의미한다. Projection lens의 전류 조절 범위는 실험적으로 1.64A ~ 7.5A이며 해당 전류에

따라 변화하는 FOV는 현미경의 최소 배율인 2,000x에서 GIF MS-CCD 카메라로 획득한 FOV를 1로 하였을 때 변화되는 배수로 정의되며 아래의 실험식을 따른다.

$$\text{Relative field of view} \quad F_{ov} = 258 \times \exp\left(-\frac{I(A)}{0.62}\right) + 0.73 \quad (3)$$

상기 식 (3)과 표준시편을 이용한 측정 결과를 토대로 projection lens의 전류변화에 따른 이미지 영역과 필름으로 현미경의 배율에 따라 획득 할 수 있는 이미지 영역을 대등 비교하는 곡선을 그릴 수가 있는데 이를 그림 4에 나타내었다. 본 곡선을 이용하면 약 8,800x 이상의 현미경 배율에서 작업할 경우 해당 필름 영역을 GIF MS-CCD로 모두 획득할 수 있으므로 고투과력을 이용한 tomography 적용 시편의 region-of-interest를 고려한 FOV 설정에 능동적으로 대처 할 수 있는 장점이 있다.

본 연구로부터 KBSI-HVEM에 장착된 post-column 방식의 GIF MS-CCD 카메라의 제한적인 FOV를 현미경의 결상 배율을 관장하는 투사계 렌즈군 중 projection lens의 전류 제어에 의해 극복할 수 있음을 알 수 있었으며 약 8,800x 이상의 배율 영역에 대한 필름 기록 영역을 GIF MS-CCD 카메라로 획득 할 수 있으므로 KBSI-HVEM의 고투과력 및 고경사 tilt 기능을 활용한 의생물 및 재료의 tomography 시편 적용에 매우 유익할 것으로 사료된다. 또한 본 방식을 확장하여 intermediate lens의 조합과 그에 대한 실험식을 확보하게 되면 각종 detector들의 FOV 제한 문제에 대해 보다 유연하게 대처할 수 있을 것으로 보인다.

### References

- [1] Spence JCH, High Resolution Electron Microscopy 3rd. : 15-47, 2003.

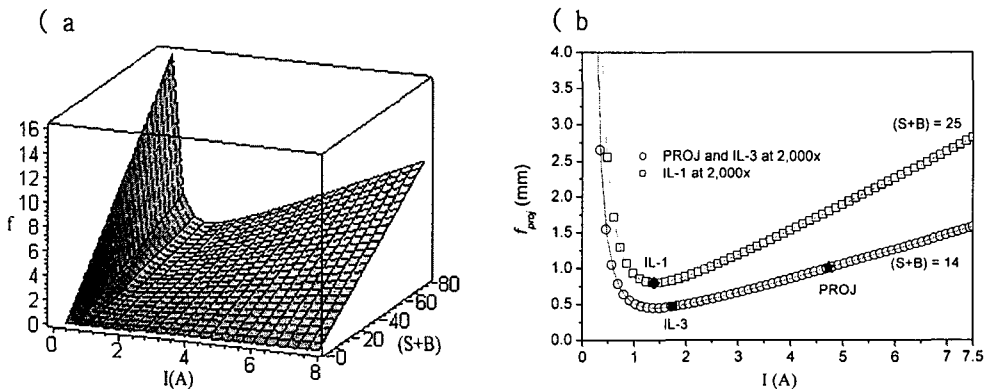


Fig. 1. (a) Focal lengths of the projection lens as a function of lens design (S+B) and lens current I (b) Focal lengths of the intermediate and projection lenses in the case of KBSI-HVEM.

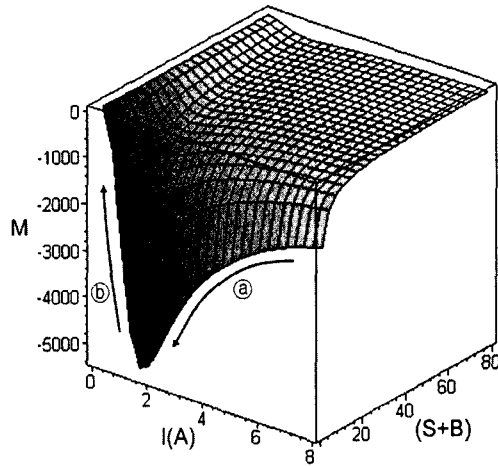


Fig. 2. Variation of the image magnification by the projection lens as a function of lens design (S+B) and lens current I.

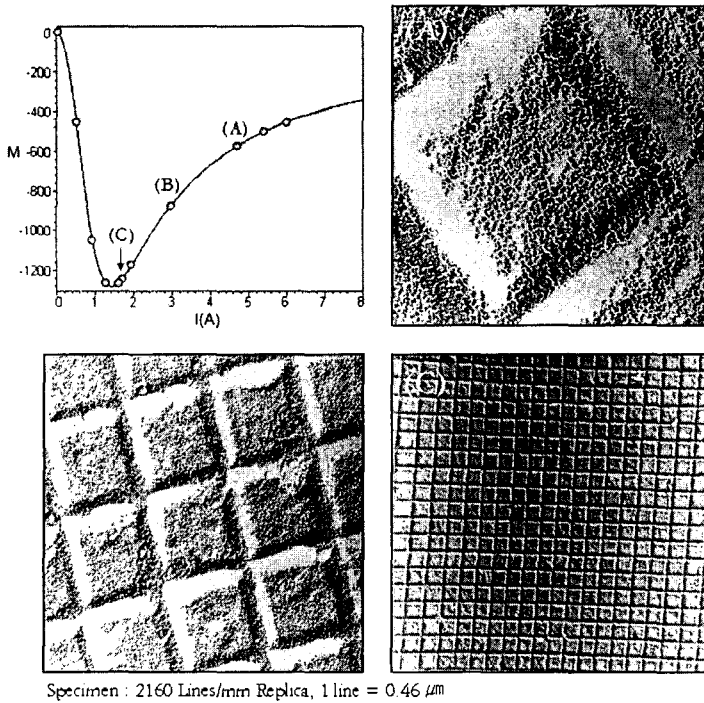


Fig. 3. Variation of the image magnification according to the adjustment of the projection lens current and the corresponding images for the enlargement of field-of-view.

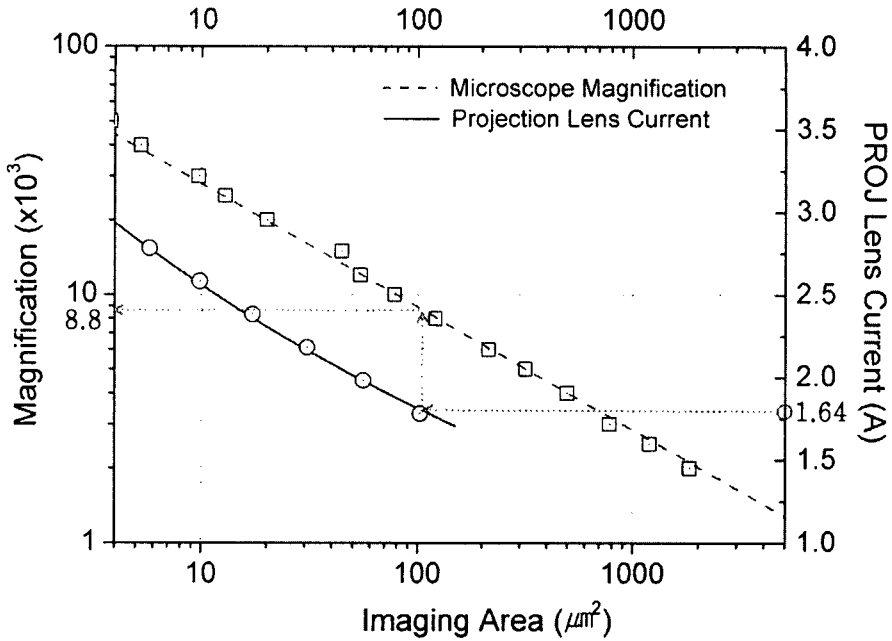


Fig. 4. Equivalent curve for the imaging area acquired from the GIF MS-CCD camera by the control of projection lens current and the corresponding microscope magnification with film recording.