

그림 흑백/칼라인지 확인요망-그림 해상도가 좋지 않습니다. 원본화일 있으면 보내주세요

한국전자현미경학회지 제 35 권 제 4호 2005
Korean J. Electron Microscopy 35(4), 000-000(2005)

KBSI-HVEM 투사렌즈 전류제어에 의한 CCD Camera의 Field of View(FOV) 확장

김 영 민, 심 효 식¹, 김 윤 중*
한국기초과학지원연구원 전자현미경연구부
¹지울코리아(주) 기술지원본부

Enlargement of Field-of-View (FOV) of the CCD Camera by the Current Adjustment of the Projection Lens System in the KBSI-HVEM

Young-Min Kim, Hyo-Sik Shim¹ and Youn-Joong Kim*

Division of Electron Microscopic Research, Korea Basic Science Institute, 52
Yeoeun-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-333 Korea

¹Technical Support Division, JEOL Korea Ltd., 218-16 Nonhyun-dong, Gangnam-gu,
Seoul, 135-010, Korea

(Received November 30, 2005; Accepted December 20, 2005)

ABSTRACT

A FOV (field of view) of the HV MSC (high voltage multi scan CCD, 1024×1024 pixels) camera mounted in the post column HV GIF (high voltage gatan image filter) has been drastically enlarged by the projection lens current adjustment. An imaging area of the HV MSC camera obtained at the lowest magnification (2,000x) is 112 μm^2 which corresponds to the recording area of the film at the magnification of 8,800x, while the achievable recording area is only 0.43 μm^2 at the same magnification without this technique. Ignoring the image distortion of less than 5%, we have designed an on site reference graph to estimate projection lens currents for microscope magnifications above 8,800x, where the recording area on the HV MSC is same as that on the film.

Key words : CCD camera, Field of view(FOV), High voltage electron microscope (HVEM), Projection lens

서 론

시료 영상기록 매체로 필름을 대체할 CCD 카메라

는 선형 전자감응도가 높고 넓은 dynamic range를 갖
추고 있을 뿐만 아니라 관찰과 동시에 기록 및 영상
처리가 가능하고 결상 과정에서 feedback이 바로 이
루어지므로 비점보정 영상을 얻는데 훨씬 수월하다

*Correspondence should be addressed to Dr. Youn-Joong Kim, Division of Electron Microscopic Research, Korea Basic Science Institute, 52 Yeoeun-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-333 Korea. Ph.: (042) 865-3596, FAX: (042) 865-3939, E-mail y-jkim@kbsi.re.kr

(Zuo, 2000). 이러한 CCD 카메라의 장점은 전자현미경의 정밀한 정량 분석에 대한 가능성을 열어 주었다 (de Ruijter & Weiss, 1992). CCD 카메라는 현미경의 부속 장비로서 결상에 대한 물리적 특성에 따라 장비의 특정 위치에 설치된다. 특히 현미경에 설치된 이미지 필터의 장점을 이용할 경우에는 필터의 뒷단에 장착되게 된다. 이미지 필터는 현미경 경통 내의 투사렌즈 하단에 설치되는데 대칭 필터로서 다수의 수차 요인들을 제거하거나 존재하는 현미경 경통과 동일한 광선을 형성하지 못하는 단점이 있는 in-column 필터와, 현미경의 형광판 하단에 설치되어 광선 경로를 90도 바꾸지만 현미경의 광선과 동일성을 유지하는 post-column 필터가 있다. Post-column 방식은 in-column 방식과는 달리 비대칭 필터로서 다수의 수차 요인들이 포함되므로 이를 제거하기 위한 다극렌즈 시스템, 즉 또 하나의 투사렌즈 시스템을 갖추고 있다 (Sigle, 2005). 그러나 post-column 필터는 기하학적 위치로 인하여 실제 현미경 배율 보다 훨씬 확대된 영상을 관찰하여 고분해능 작업에는 유리하나 이에 따른 FOV 제한이 따르게 되어 특별한 렌즈조합을 쓰지 않는 한 넓은 시료 영상을 획득하기가 곤란하다. KBSI-HVEM에 장착된 이미지 필터 또한 post-column 방식으로 이미지 필터 뒷단에 설치된 HV-MS-C 카메라로는 저배율 영상을 관찰하는데 제약이 따른다. 따라서 관찰 영역이 극히 제한되어 시료 전체의 상황을 감지할 수 없기 때문에 이미지 필터의 entrance aperture로 들어가는 FOV를 현미경의 투사렌즈 조합에 의해 조절하여야 한다. 따라서 특정한 투사렌즈군의 조합에 의한 저배율 관찰 모드가 설정되어 있어 장비 하단의 post-column 필터와 제어가 연동되어 동작하지 않는다면 현장의 작업자가 넓은 영역의 시편 영상을 얻기란 쉽지 않다.

KBSI-HVEM은 필름작업 시 최저 결상 배율 2,000배에서 FOV는 $2000 \mu\text{m}^2$ ($40 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$)가 된다. 따라서 지금까지 μm 단위의 거대시료 및 반도체의 삼차원 구조 합성을 위해서 HVEM의 고투과력을 활용한 tilt-series 영상을 획득할 경우, 필름기록 및 현상작업과 뒤이은 디지털 이미지 변환 등의 복잡한 과정을 거쳐야 했고 이미지 편집과정 중에 발생하는 영상정렬 불일치 문제로 양질의 이미지 합성에 많은 시간과

노력이 소모되었다. 이에 대한 대안으로 CCD 카메라를 이용한 이미지 기록이 있지만 본 KBSI-HVEM의 HV-GIF post-column 필터에 장착된 HV-MS-C 카메라는 동일 현미경 배율에서 필름 기록영역 대비 약 0.02%만을 CCD 영상으로 나타낼 수 있으며 최저 배율 2,000배에서 FOV는 $0.43 \mu\text{m}^2$ ($660 \text{nm} \times 660 \text{nm}$)밖에 되지 않는다. 비록 현미경에서 2,000배 이하의 저배율 모드가 있기는 하나 이것은 대플렌즈가 결상에 관여하지 않고 중간렌즈와 투사렌즈에 의해 시편 영상이 구현되므로 초점이 맞는 시편 영상을 얻을 수 없으며 단지 시편의 그림자만을 추적하므로 시편 탐색기능 이외엔 쓸모가 없다. 이에 따라 CCD 카메라 및 post-column 필터의 여러 장점에도 불구하고 μm 단위의 비교적 큰 의·생물 및 반도체 시료에 대한 결상과 이를 응용한 tilt-series의 획득은 필름 이외엔 대안이 없는 것처럼 여겨졌다.

그러나 HV-MS-C 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 투사렌즈의 조합에 의해선 결상된 시편영상의 배율 및 camera length, detector의 collection angle 등을 바꿀 수 있다. 따라서 post-column 방식으로 부착된 CCD 카메라의 제한된 FOV는 시편영상의 배율을 결정하는 중간렌즈 및 투사렌즈계의 전류 값을 조정함으로써 바꿀 수 있게 된다. 투사렌즈군의 전류 값 변경에 의한 배율 축소와 이에 따른 post-column 이미지 필터 카메라의 FOV 확장을 도모하고자 할 경우 투사렌즈 수차에 의해 다양한 형태의 영상 변형이 수반되므로 이를 분석하여야 하며 실험적으로 가능할 경우엔 보정할 필요가 있다 (Capitani et al., 2005). 이는 제조사에서 최적화 시킨 투사렌즈군의 전류 여기 값을 임의로 변화시켜 배율을 바꾸게 되면 초점 거리가 바뀌며 수차가 증가하기 때문이다.

본 연구에서는 전자기렌즈의 초점과 배율 및 geometry에 관한 기본지식 (Spence, 2003)으로 부터 투사계 렌즈의 여기 전류값 변화에 따른 렌즈 파라메타 값들의 변화를 예측하고 이를 실험적으로 획득한

결과와 비교한 후 입력 전류변화에 따른 HV-MSK 카메라의 FOV 변화를 알아보고자 하였다. 또한 각 파라메타들의 상관관계에 관한 실험식을 유도하여 최대 FOV 뿐만 아니라 입력 전류값 변화에 의해 획득할 수 있는 결상영역이 필름 영역과 등가인 현미경 배율 기준곡선을 확보하여 시료의 관심영역에 맞는 전류값을 현장에서 선택가능 하도록 하였다.

실험 방법

실험에 사용된 표준시편은 90° cross grating repli-ca (2160 lines/mm (1 line = 0.46 μm), TAAB Lab. Limited)로서 투사렌즈의 입력 전류변화에 따른 FOV 및 영상 변형을 측정하는 기준으로 사용하였다. 이미지 획득은 KBSI-HVEM의 post-column 이미지 필터인 HV-GIF에 장착된 HV-MSK 카메라를 이용하였고 전자현미경의 최소 결상 배율인 2,000배에서의 FOV (660 nm × 660 nm = 0.43 μm²)를 기준으로 투사렌즈 입력전류 감소에 따라 나타나는 FOV의 변화와 영상 변형 양상을 관찰하였다.

결과 및 고찰

렌즈에서 결정되는 결상배율 M은 렌즈에서 결상면

까지의 거리를 V라 할 때 아래의 식(1)과 같이 나타내며 현미경의 경통 설계 및 렌즈의 초점 거리 f와 상관관계를 갖는다.

$$M-1 = -\frac{V}{f} \tag{1}$$

또한 전자기 렌즈의 초점거리 f는 Liebman (Spence, 2003)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.

$$\frac{1}{f} = \frac{A_o (NI)^2}{V_r (S+B)} \tag{2}$$

여기서, V_r = 상대성 가속전압,
 A_o = 상수

식(1) 및 (2)에 의해 전자기 렌즈를 통과한 전자 빔의 결상면에서의 배율거동이 결정되므로 전자기 렌즈의 전류 변화에 따른 전자현미경의 결상 배율거동을 이해하기 위해선 전자현미경의 경통 설계 및 투사렌즈 디자인 값들(pole-piece gap S 및 bore gap B)과 제조사로부터 제공받은 보정상수 값을 활용하여야 하며 이들로 부터 입력 전류값 변화에 따른 초점거리 f 및 배율 M의 변화를 예측할 수 있다.

그림 1의 (a)는 입력 전류 I 및 렌즈 디자인(S+B)에 따라 변화하는 렌즈 초점거리 f의 거동을 나타낸

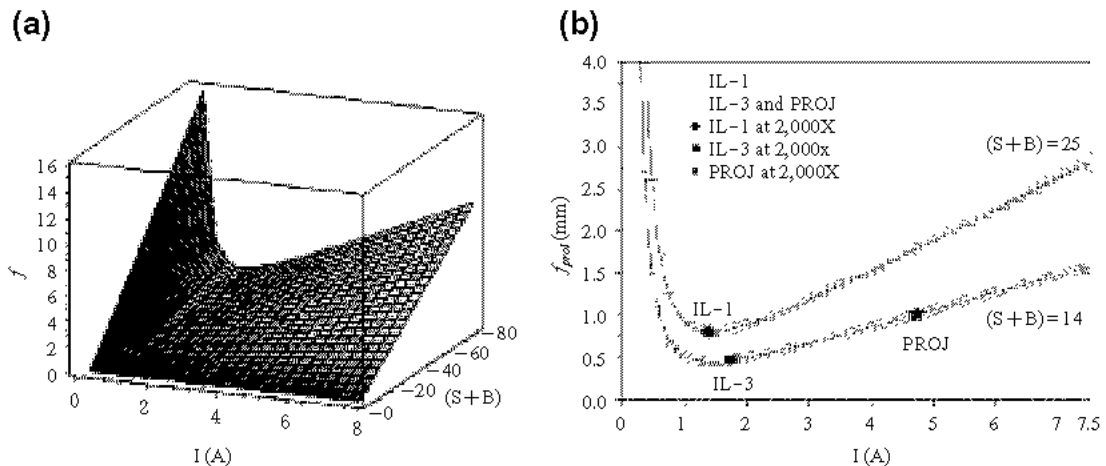


Fig. 1. (a) Focal length variation of the projection lens as a function of lens design (S+B) and lens current I. (b) Focal length variation of the intermediate and projection lenses with respect to decrease of the lens current I in case of the KBSI-HVEM.

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 디자인 ($S+B$)에 의해 영향을 받음을 알 수 있다. 렌즈 디자인 ($S+B$)값이 큰 경우에는 입력 전류 I 에 따른 초점거리 f 의 변화가 커지며 최소 초점거리 값 또한 증가한다는 것을 그림으로부터 알 수 있다. 최소 초점거리 이전의 낮은 렌즈 전류값 영역에서는 작은 전류 변화에도 초점거리가 비선형적으로 급격히 변화되는데 이 영역에서는 결상된 영상의 변형이 심해지며 실제 영상과는 다른 가상 영상을 형성하게 된다. 따라서 전자기 렌즈의 전류값은 최소 초점거리를 결정하는 최소 전류값 이상에서 설정되어야 함을 알 수 있으며 최소 전류값은 렌즈 디자인 ($S+B$)에 의해 결정된다는 것을 알 수 있다. 이러한 일반적인 관계에 대해 초고전압 투과전자현미경의 중간렌즈 및 투사렌즈의 디자인 값들을 적용하여 입력 전류값에 따른 각 렌즈의 초점거리 변화를 나타내면 그림 1의 (b)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 중간렌즈 1(IL-1)의 ($S+B$)는 25mm이며 중간렌즈 3(IL-3) 및 투사렌즈(PROJ)의 ($S+B$)는 14 mm이다. 현미경의 최소 결상 배율 2,000배(중간렌즈 2는 꺼짐)에서 투사계 렌즈군, 즉 중간렌즈1(◆), 중간렌즈3(●), 투사렌즈(★)의 설정 전류값과 그에 따른 초점거리를 그림 1의 (b)에 표시하였다. 그림에서 보듯이 중간렌즈군(IL-1, IL-3)의 설정 전류값들은 중간렌즈 1이 1.39A이고 중간렌즈 3이 1.75A로서 최소 초점 거리를 나타내는 전류값 1.4A 위치에 가까이 있기 때문에 현재의 배율에서 중간렌즈군의 입력전류 조정에 의해서는 보다 낮은 배율을 획득할 수 없으므로 FOV 확장을 도모할 수 없다. 반면 투사렌즈의 설정 전류는 4.74A로서 최소 전류값까지 전류조정 범위가 크기 때문에 투사렌즈 전류값을 낮춤에 의해 배율이 감소되고 이에 따른 카메라의 FOV가 확장됨을 예상할 수 있다. 따라서 본 실험에서는 HV-MSK 카메라의 FOV 확장을 위해 투사계 렌즈군의 투사렌즈의 입력전류만을 조정하였다.

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

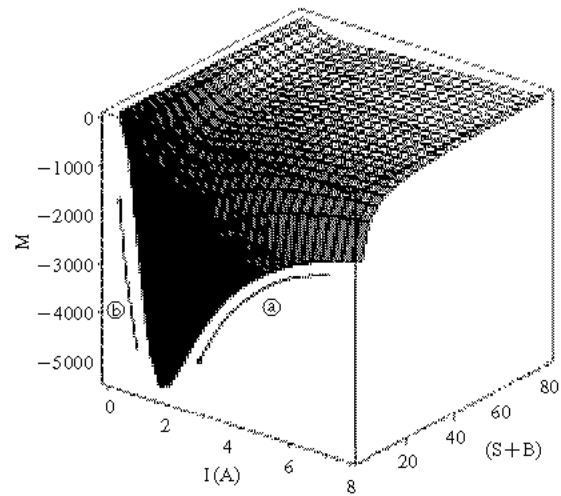


Fig. 2. Behavior of image magnification by the projection lens as a function of lens design ($S+B$) and lens current I .

나타낸다. 결상 배율 M 은 초점거리 f 가 선형적으로 감소하여 최소 초점거리에 이를 때까지 렌즈의 전류를 감소시키면 그림 2의 (a)와 같이 지수 함수적으로 감소되며 이에 따라 FOV도 지수 함수적으로 증가하게 된다. 그러나 최소 초점거리를 지나게 되면 오히려 그림 2의 (b)와 같이 다시 배율이 증가되며 결상된 영상은 변형되고 확대된 허상을 맺게 된다. 따라서 투사렌즈의 입력 전류 감소에 따른 배율감소와 FOV 증가를 꾀한다면 렌즈의 초점거리가 최소값에 도달되지 않는 범위에서 입력 전류를 조절하여야 하며 그 때에 최대의 FOV를 획득할 수 있음을 본 그림의 결과로부터 예측할 수 있다.

결과적으로 KBSI-HVEM의 최소 결상 배율인 2,000배에서 투사렌즈의 전류 설정값은 4.74A이고 상기의 결과에서 보듯이 최소 초점거리가 형성될 때의 입력 전류값은 1.4A이므로 전류값 변화에 따른 FOV의 조정은 해당 범위 안에서 이루어 져야하며 HV-MSK 카메라로 획득할 수 있는 최대의 FOV는 1.4A 근처에서 형성된다는 것을 알 수 있다. 이에 대한 결과는 그림 3에 나타내었는데 결상 배율 M 이 투사렌즈의 전류 I 가 감소됨에 따라 지수함수적으로 감소되고 이에 따라 FOV가 상응하여 증가됨을 볼 수 있다. 그림 3의 (a)는 최소 결상 배율 2,000배에서 HV-

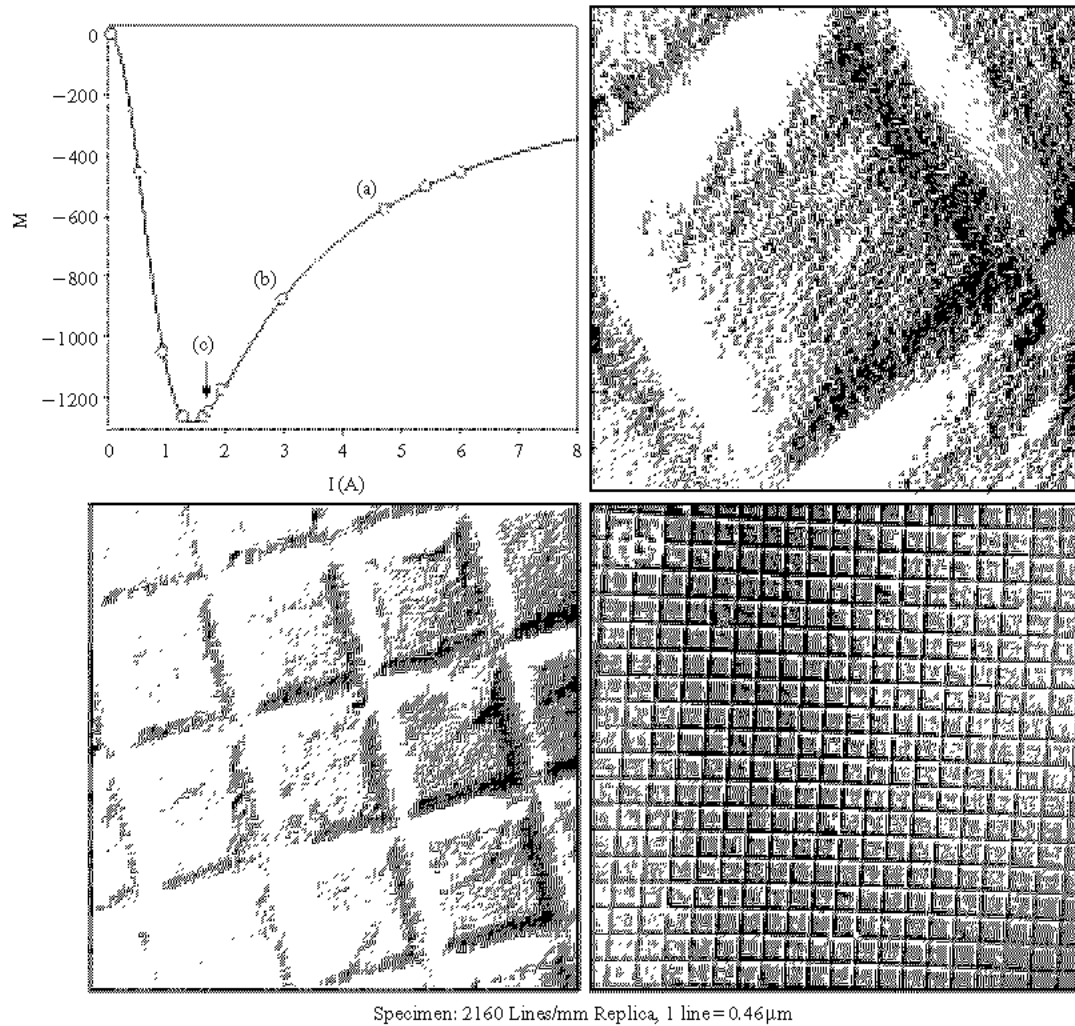


Fig. 3. Image magnification changes according to adjustment of the projection lens current in the KBSI-HVEM and the corresponding images (a), (b), and (c) showing the enlargement of field-of-view.

MSC 카메라로 획득할 수 있는 이미지 영역 ($660 \text{ nm} \times 660 \text{ nm} = 0.43 \mu\text{m}^2$)이며 투사렌즈의 입력 전류조절에 의해 (b)와 (c)로 표시된 바와 같이 결상 배율이 감소된다. 획득 가능한 최대 FOV는 그림 (c)와 같으며 이때의 전류값은 1.64A였다. 이때의 FOV는 $10.6 \mu\text{m} \times 10.6 \mu\text{m}$ ($112 \mu\text{m}^2$)로서 면적비로 약 260배 확장된 것과 같다. 해당 결상 영역은 KBSI-HVEM으로 8,800배에서 작업할 때 필름으로 기록할 수 있는 영역과 동등하다. 따라서 약 8,000배 이상의 배율에서 필름

영역에 포함되는 시료의 경우에는 투사렌즈의 전류값 조절에 의해 HV-MSK 카메라로 결상할 수 있음을 의미한다.

투사렌즈의 전류 조절 범위는 실험적으로 1.4A ~ 7.5A (렌즈최대치)이며 해당 전류에 따라 변화하는 FOV는 현미경의 최소 배율인 2,000배에서 HV-MSK 카메라로 획득한 FOV를 1로 하였을 때의 상대적 FOV로 나타낼 수 있는데 이를 그림 4의 (a)에 나타내었다. 그림 4의 (b)는 (a)에 대한 수치적인 결과이다. 투

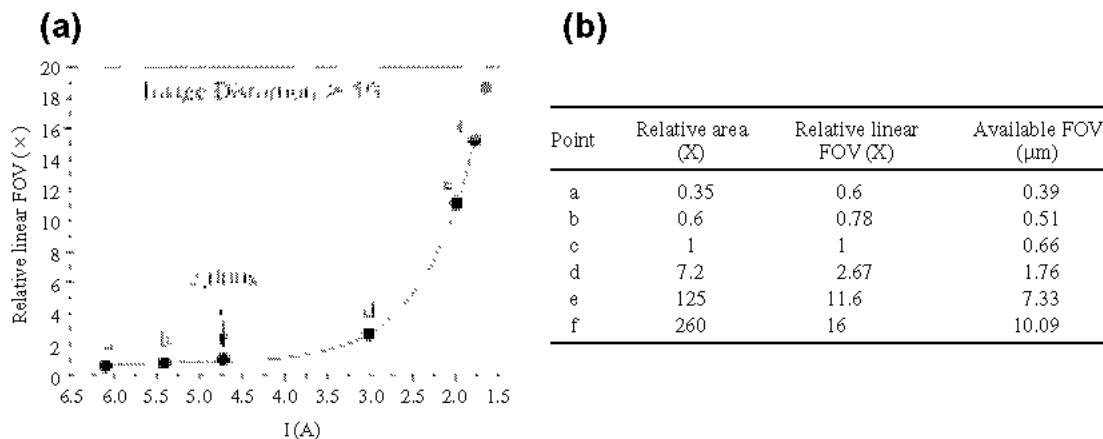


Fig. 4. (a) Relative linear FOV with respect to decrease of the projection lens current. The image is distorted above 5% when the lens current is set below 1.64A as shown in the shaded area. (b) Numerical data of the curve (a).

사렌즈의 입력 전류값이 1.64A보다 작아지게 되면 replica 격자 표준시편의 영상 변형 정도가 5% 이상이 되며 이후부터는 작은 입력 전류의 변화에도 그 변형 정도는 크게 나타나게 되므로 비록 최소값이 1.4A일 지라도 실질적으로 변화시킬 수 있는 입력 전류 조정 범위는 이미지 변형을 고려하여 1.64A~4.7A까지이다. 영상 변형 기준 5%는 실질적으로 측정 오차에 준하며 이 시점 이후 부터는 매우 작은 전류변화에도 매우 큰 영상 변형 오차가 유발되기 때문에 영상 변형의 시작점으로 보면 된다. 따라서 최대 5%의 영상 변형을 감수하고 획득할 수 있는 최대 FOV는 그림 4 (a)의 f위치(1.64A)와 같으며 선형 길이 10.6 μm까지의 시편 영역을 결상할 수 있게 된다. 그림 4의 결과와 같이 투사렌즈 입력 전류 I에 대한 상대적인 FOV의 지수함수적 의존성은 아래의 실험식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

Relative field of view

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

상기 실험식(3)을 활용하여 계산한 투사렌즈의 입력 전류값(1.64A~4.7A) 변화에 따른 FOV와 필름에서 획득하는 FOV가 일치하는 현미경 결상 배율을 나타내는 곡선을 그릴 수가 있는데 이를 그림 5에 나타내었다. 본 곡선을 활용하면 투사렌즈의 입력전류 감

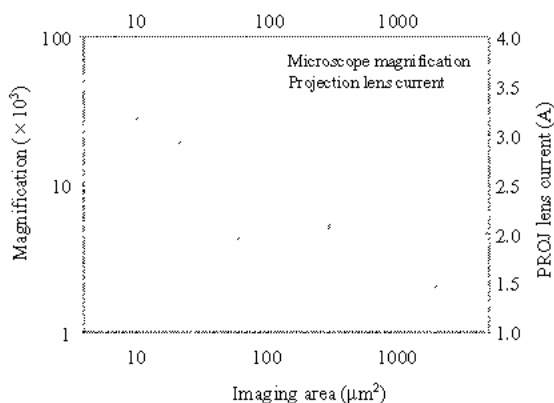


Fig. 5. The experimental reference curve to estimate the projection lens current which corresponds to the recording area of the film at a microscope magnification.

소에 의해 확장된 FOV가 어떤 현미경 배율에서의 필름 기록 영역과 동등한 영역을 나타내는지 현장에서 평가할 수 있다. 예로서 본 실험에서의 최대 FOV는 투사렌즈 전류값이 1.64A일 때 얻어지므로 그림 5의 오른쪽 투사렌즈 전류값(실선 표시)이 1.64A일 때의 결상 영역값 112 μm²에서 수직으로 연장하여 현미경 배율과 결상 영역간의 관계(점선 표시)를 나타내는 곡선과 만나도록 하면 현미경 배율이 8,800배를 나타낸다는 것을 알 수 있다. 따라서 본 그림을 실험에서 활용하면 최저 8,800배 이상의 현미경 배율에서 필름

기록 영역과 동등한 FOV를 확보하기 위해 설정되어야 할 투사렌즈 전류값을 바로 가늠할 수 있으므로 필름을 대체한 CCD 기록에 시료의 관심영역을 고려하여 능동적으로 대처할 수 있는 장점이 있다.

결 론

본 연구로부터 KBSI-HVEM에 장착된 post-column 방식의 HV-GIF에 장착된 HV-MSD 카메라의 제한적인 FOV를 현미경의 결상 배율을 확장하는 투사계 렌즈군 중 투사렌즈의 전류 제어에 의해 극복할 수 있음을 알 수 있었으며 약 5%의 이미지 변형을 감안할 때 현미경 최저 결상 배율 2000배에서의 FOV ($0.43 \mu\text{m}^2$)를 기준으로 260배 확장된 FOV ($112 \mu\text{m}^2$)를 획득할 수 있었으며 이는 8,800배에서의 필름 기록 영역과 동등한 결상 영역이다. 이와 더불어 투사렌즈 전류 설정값 조정에 의해 얻어지는 결상영역이 필름기록 영역과 동등한 현미경 배율간의 관계를 나타내는 곡선으로부터 현장에서 시료의 관심영역에 알맞은 투사렌즈 전류값을 설정할 수 있는 기준을 만들 수 있었다. 본 방식을 확장하여 투사계 렌즈군의 조합과 그에 대한 실험식을 확보하게 되면 각종 detector들의 FOV 제한 문제에 대해 보다 유연하게 대처할 수 있을 것으로 보인다.

참 고 문 헌

Capitani GC, Oleynikov P, Hovmöller S, Mellini M: A

practical method to detect and correct for lens distortion in the TEM. Ultramicroscopy, in press, 2005.

de Ruijter WJ, Weiss JK: Methods to measure properties of slow scan CCD cameras for electron detection. Rev Sci Instr 63 : 4314-4321, 1992.

Sigle W: Analytical transmission electron microscopy. Annu Rev Mater Res 35 : 239-314, 2005.

Spence JCH: High Resolution Electron Microscopy 3rd Edition : 15-47, 2003.

Zuo JM: Electron detection characteristics of a slow scan CCD camera, imaging plates and film, and electron image restoration. Microsc Res Tech 49 : 245-268, 2000.

< 국문초록 >

초고전압 투과전자현미경 (HVEM)에 장착된 post-column 방식의 HV-GIF (high voltage gatan image filter)의 영상기록 장치인 HV-MSD (high voltage multi scan CCD, 1024×1024 픽셀) 카메라의 결상영역은 현미경 최소 관찰 배율인 2,000배에서 $0.43 \mu\text{m}^2$ 로서 동일 배율에서 필름 기록영역 ($2000 \mu\text{m}^2$)에 비해 약 0.02%에 해당하는 매우 적은 영역이다. 이러한 결상 영역 제한성을 개선하고자 투사렌즈 전류조정 기법을 도입하였으며 본 연구의 결과로 HV-MSD의 결상영역은 $112 \mu\text{m}^2$ 로 비약적으로 증가하였다. 이는 약 8,800배에서 필름으로 기록할 수 있는 영역과 동일하였다. 이와 더불어 투사렌즈 조절에 따른 이미지 변형정도를 약 5%이하까지 허용하고 8,800배 이상에서 필름 기록영역과 동일한 HV-MSD 결상영역을 확보할 수 있는 실험적인 참조곡선을 고안하였다.