

유한요소해석을 사용한 주사전자 현미경 대물렌즈의 특성평가 Evaluation of an Objective Lens for Scanning Electron Microscope by FE Analysis

이재진¹, 박만진², *박근³, 김동환³, 장동영⁴

J. J. Lee¹, M. J. Park², *K. Park(kpark@snut.ac.kr)³, D. H. Kim³, D. Y. Jang⁴

¹ 서울산업대학교 기계설계자동화공학부 원, ² 서울대학교 기계설계항공공학부 원,

³ 서울산업대학교 기계설계자동화공학부, ⁴ 서울산업대학교 산업정보시스템공학과

Key words : Scanning electron microscope, Electron optical system, Objective lens, Finite element analysis

1. 서론

주사전자 현미경(Scanning Electron Microscope; SEM)은 광학현미경에서 빛의 파장(300~700nm)에 인한 분해능의 한계를 극복하기 위해 파장 1nm 이하인 전자빔을 사용함으로써 분해능을 향상시킨 측정장비로 생물학, 의학 및 다양한 공학 분야에서 널리 사용되고 있다. 주사전자 현미경의 전자광학계는 크게 전자빔원(electron beam source), 전자기렌즈(electro-magnetic lens), 검출기(detector) 등으로 이루어져 있다.^{1,2} 이중 전자 렌즈는 원하는 위치에 전자빔의 초점을 맞추기 위해 사용되며, 집속렌즈와 대물렌즈로 구성되어 있다. 전자 렌즈는 일반적으로 원통형으로 권선된 코일에 전류를 인가하여 자기장을 형성시킴으로써 전자빔의 방향을 제어해주는 역할을 수행하는데, 전자빔의 집속도를 높이기 위해 투자율이 높은 순철로 제작된 극편(pole piece) 주변에 구리선 코일이 감겨지는 구조로 되어 있다.^{3,4} 따라서 전자 렌즈의 설계시 적절한 극편의 구조 및 치수의 선정이 매우 중요하며, 이러한 목적으로 유한요소해석을 사용하여 전자 렌즈의 설계에 따른 집속특성을 예측하기 위한 연구가 진행되어 왔다.⁵⁻⁸ 본 연구에서는 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS™를 사용하여 열전자형 주사전자현미경의 대물렌즈에 대한 해석을 수행하여 렌즈의 형상설계에 따른 자기장 집속효과의 차이를 분석하고자 한다.

2. 주사전자현미경의 대물렌즈 설계

주사전자현미경의 기본 구조를 살펴보면 전자광학계를 포함하는 경통부(column unit), 측정용 시료가 장착되는 챔버(chamber), 경통 내의 고진공을 유지하기 위한 진공부, 고전압 공급부 및 제어부 등으로 구성된다. 이중 경통부는 대표적으로 전자빔원과 전자 렌즈계, 편향 코일, 조리개 등으로 구성되어 있다. 주사전자현미경의 전자렌즈계는 일반적으로 집속렌즈(condenser lens)와 대물렌즈(objective lens)로 구성되어 있다. 집속렌즈는 전자총 양극의 하단에 위치하고 있으며, 방사된 전자빔을 집속시켜줌으로써 시료에 도달하는 전자빔의 양과 직경을 조절해주는 역할을 수행한다. 집속렌즈를 통해 조절된 전자의 양은 상의 밝기와 선명도에 영향을 미치게 된다. 대물렌즈는 측정하고자 하는 시료의 상단에 위치하고 있으며, 입사된 전자빔을 적절히 굴절시켜 상의 초점을 맞추어주는 역할을 한다. 따라서 대물렌즈의 성능이 주사전자현미경의 분해능을 결정하는 중요한 요인으로서 작용한다.⁸

Fig. 1에 본 연구에서 검토하고자 하는 대물렌즈의 형상을 도시하였다. 여기서 검게 표시한 부분은 순철(상대투자율: 4000)이며, 빗금친 부분은 탄소강(상대투자율: 300)으로 설정하였다. Fig. 1 (a)는 본 연구자의 선행연구에서 사용된 모델(Type 1)로 극편간의 간격이 넓어 집속효율이 다소 떨어지는 것으로 분석되었다.⁸ Fig. 1 (b)와 (c)는 렌즈 하단면에서의 집속효과를 높이기 위해 극편설계시 경사를 부여한

형태로 (b)의 경우는 축방향으로 간극을 배열(Axial gap)하였고, (c)의 경우는 반경방향으로 간극을 배열(Radial gap)하였다. Fig. 1 (d)는 집속효과를 더욱 증가시키기 위해 극편의 경사를 2중으로 부여한 형태이다. 본 연구에서는 Fig. 1에서 제시한 4가지 형태에 대해 수치해석을 통한 집속특성을 예측하고자 한다.

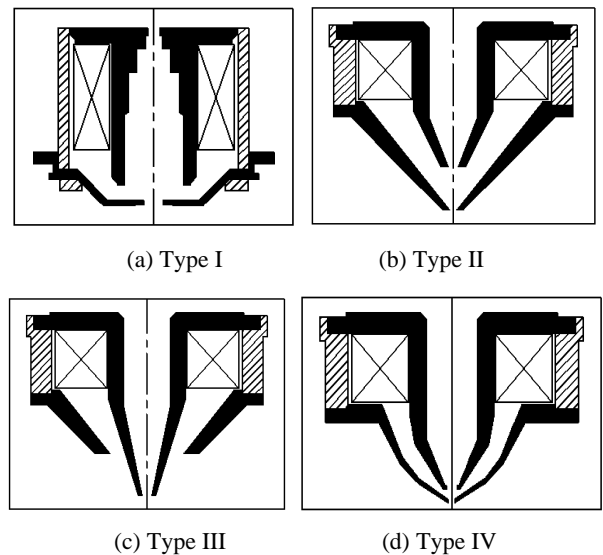


Fig. 1 Types of objective lenses in the SEM column

3. 유한요소해석을 사용한 대물렌즈의 특성평가

Fig. 1에 도시된 4가지 형태의 렌즈의 집속특성을 비교하기 위해 유한요소해석을 실시하였다. 해석은 ANSYS™10.0을 사용하였으며, 렌즈의 형상이 축대칭인 점을 감안하여 2차원 축대칭 형태로 해석 영역을 정의하였다. 해석을 위해 2차원 4절점 사각형 요소를 사용하여 유한요소망을 구성하였고, 특히 극편 주변에서의 자기장의 급격한 변화를 적절히 묘사하기 위해 적응적 요소망 세분화(Adaptive mesh refinement)를 실시하였다. Table 1에 각각의 렌즈에 대한 경계조건을 비교하였는데, Type II, III, IV의 경우 코일의 형상이 동일한 관계로 동일한 전류밀도를 부과하였다.

Table 1 Current condition for 4 objective lenses

Lens type	Current (A)	Current density (A/mm ²)
Type I	1.66	0.9531
Type II	1.59	0.9051
Type III	1.59	0.9051
Type IV	1.59	0.9051

Fig. 2에 해석 결과로부터 얻어진 자속선(flux line)의 분포를 도시하였는데, 코일에서 발생된 자기장이 상대적으로 투자율이 높은 순철과 탄소강 부위를 투과하지 못함으로

인해 극편 주변, 즉 렌즈의 하단부에 집중됨을 알 수 있다. 대물렌즈의 경우 측정하고자 하는 시편 상단에 위치하게 되므로 렌즈의 하단에 자기장이 집중되어야 한다. 해석 결과를 보면 Type III 의 경우 극편을 중심으로 렌즈 바깥쪽 방향으로 자속선이 분포하여 자기장의 손실이 발생함을 알 수 있다. 반면 Type IV 의 경우 자속선의 집중도가 가장 높음을 알 수 있다.

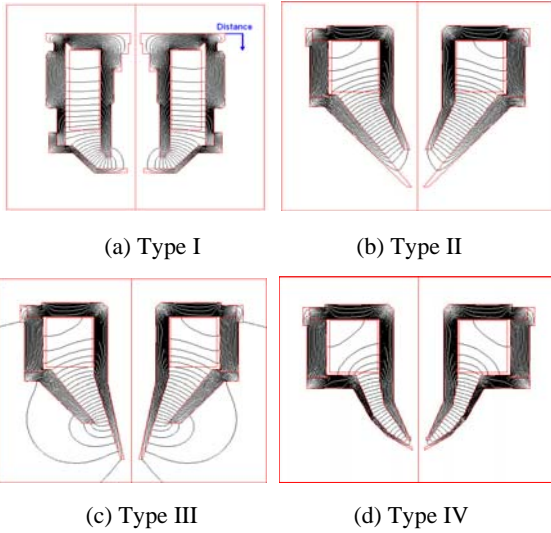


Fig. 2 Types of objective lenses in the SEM column

Fig. 3에 4가지 형태의 렌즈에 대해 렌즈 상면으로부터의 중심축 거리에 따른 자속밀도의 변화를 그래프로 도시하였다. 우선 Type I과 II의 경우 그래프의 형태에서 약간의 차이가 있는 점을 제외하면 최대 자속밀도의 크기, 폭, 발생 지점 등이 유사하게 나타나 큰 차이가 없는 것으로 분석되었다. Type III의 경우 극편에서 다소 떨어진 지점에서 자속 밀도가 증가하는 형태를 보였으며, 크기도 가장 낮게 나타나 상대적으로 집중특성이 가장 낮음을 알 수 있다. 반면에 Type IV의 경우 타 렌즈에 비해 자속밀도의 집중도가 가장 우수하며, 최대 자속밀도의 크기도 타 렌즈의 2배에 해당하여 집중능력이 가장 뛰어난 것으로 판단된다. Table 2에 보다 정량적인 비교를 위해 렌즈별 최대 자속밀도의 발생 위치와 크기를 비교하였다.

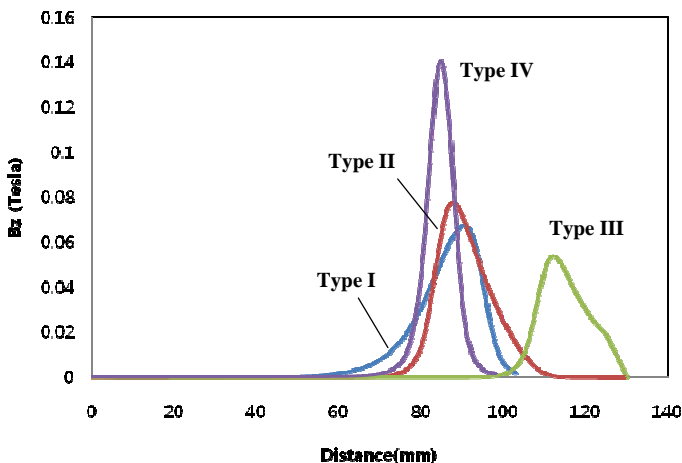


Fig. 3 Comparison of axial flux distributions for the each type of objective lens

Table 2 Peak flux and position for 4 objective lenses

Lens type	Position (mm)	Peak flux (T)
Type I	90.90	0.0669
Type II	87.36	0.0774
Type III	112.32	0.0539
Type IV	84.87	0.1404

4. 결론

이상으로 본 연구에서는 열전자형 주사전자현미경의 대물렌즈에 대해 유한요소해석을 실시하였고 해석 결과로부터 렌즈의 형상설계에 따른 대물렌즈의 집중특성을 고찰하였다. 상기 해석결과를 토대로 극편의 경사를 2 중으로 부여한 Type IV 의 경우가 가장 우수한 집중특성을 보임을 확인하였다. 이러한 연구결과는 향후 주사전자현미경의 설계 과정에서 최적의 집중특성을 갖는 렌즈계의 설계에 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 실제 모델의 개발과정에서 제안된 해석기법을 활용함으로써 전자빔의 궤적 예측기법과 효과적으로 연계할 전망이다.

후기

본 연구는 산업자원부 차세대 신기술 개발사업(과제명: 전자빔 기반 복합 나노형상 측정기술 개발) 및 서울시에서 지원하는 ‘나노 공정기술 및 장비개발 산학연 혁신 클러스터’ 사업의 지원으로 진행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Lee, R. E., "Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis," Prentice Hall, 1993.
2. Reimer, L., "Scanning Electron Microscopy -Physics of Image Formation and Microanalysis," Springer, Berlin, 1998.
3. Hawkes, P. W., "Magnetic Electron Lenses," Springer, Berlin, 1982.
4. Orloff, J., "Handbook of Charged Particle Optics," CRC Press, New York, 2004.
5. Juma, S. M. and Mulvey, T., "Miniature rotation-free magnetic electron lenses for the electron microscope," J. Phys. E: Sci. Instrum., **11**, pp. 759 - 764, 1978.
6. Lencova, B. and Lenc, M., "Program AMAG for the computation of vector potential distribution in rotationally asymmetric magnetic electron lenses by the finite element method," SEM'86, Chicago, USA, pp. 879 - 915, 1986.
7. Alamir, A. S. A., "A study on effect of current density on magnetic lenses," Optik, **114**, pp. 85 - 88, 2003.
8. Park, K., Jung, H. W., Park, M. J., Kim, D. H., and Jang, D. Y., "A study on design and analysis for magnetic lenses of a scanning electron microscope using finite element method," J. Kor. Soc. Prec. Engng., **24**, pp. 95 - 102, 2007.