

전자빔 가공기용 자기 렌즈의 자기장 제어구조 설계

노승국*(한국기계연구원), 이찬홍(한국기계연구원), 백영종(SKEM(주))

Design and Analysis of Magnetic Field Control in Electron Lenses for a E-Beam Writer

S. K. Ro(KIMM), C. H. Lee(KIMM), Y. J. Paik(SKEM Co)

ABSTRACT

The electron beam machining provides very high resolution up to nanometer scale, hence the E-beam writing technology is rapidly growing in MEMS and nano-engineering areas. In the optical column of the e-beam writer, there are several lenses condensing and focusing electron beams from electron gun with fringing magnetic fields. To achieve small spot size as 1-2 nm for higher power of electron beam, magnetic lenses should be designed considering their magnetic field distribution. In this paper, the magnetic field at two condenser lenses and object lens are calculated with finite element method and discussed its performances.

Key Words : Electron lens (전자빔 렌즈), magnetic lens(자기 렌즈), electromagnentic analysis (전자기장 해석)

1. 서론

최근 MEMS 및 나노관련 기술의 산업계의 파급 효과가 커지면서 관련 기술개발이 활발하게 이루어지고 있으나 관련 핵심장비의 국산화율은 아직 매우 미흡한 실정이다. 특히, 빔 노광장치의 경우는 주요한 핵심요소 장치임에도 불구하고 전량 수입에 의존하고 있으며 미국, 일본, 유럽 등의 선진국들에서는 차세대형 전자 빔 장치를 개발하여 현재 일부 응용하고 있으나 아직 국내의 경우에는 현장에서 시도되지 않고 있어, 이러한 장비기술의 개발이 요구되고 있는 실정이다. 이 중 전자빔 가공기는 전자빔을 주사하여 원하는 패턴을 직접 성형 하거나 마스크를 제작하는데 적용되며, 일반적인 광학식 노광장비에 비하여 30nm 이하의 매우 높은 해상도를 얻을 수 있는 장점이 있다. 이러한 전자빔 가공기의 개발을 위해서는 경통부의 전자빔 발생 및 전자빔 제어 기술, 전자빔의 검출 및 화상처리 기술, 구조 설계 및 진공 기술, 정밀 위치제어와 가공 제어 기술 등이 요구된다.

전자빔 가공기의 핵심 구성요소인 경통부에는 전자빔을 가공에 적합한 크기로 집속시키고, 원하는

위치로 제어하기 위한 렌즈들과 전자빔 차단장치 등이 위치하게 되며, 가공기의 성능을 결정하는 매우 중요한 부분이라고 할 수 있다. 이 중 전자빔 제어를 위한 렌즈들은 전자빔 소스에서 발생한 빔의 spot 크기를 1nm-1 μ m의 크기로 축소하여 시료에 주사하는 역할을 하는 집속렌즈 및 최종 초점 조절을 위한 대물 렌즈 등이 있다. 이러한 전자빔 렌즈의 효율성은 최종적인 전자빔 주사 정밀도를 정하는 중요한 역할로 초기의 빔 크기가 10-50 μ m 임을 감안하면 100-1000배의 축소가 필요하다. 전자빔을 집속시키는 렌즈의 방법으로는 전자석을 이용한 자기장(Magnetic Field)을 이용하는 방법이 주로 적용되며, 이는 전자가 이동함에 있어서 자기장을 통과할 때의 로렌즈 힘에 의해 휘어지는 것을 이용하여 전자빔을 압축하게 되며, 이러한 역할을 위해서, 자극에 공극을 위치시켜 굴곡된 자기장(fringing field)을 형성시키게 된다.

본 연구에서는 설계된 전자빔 가공기의 집속 및 대물 전자렌즈의 성능을 해석하기 위하여 2차원 축대칭 유한요소 모델을 이용하여 설계된 전자렌즈부의 자기장 분포를 해석하였으며 렌즈를 구성하는 철심에서의 자기포화와 자기장 분포, 공극에서의

fringing field의 특성 등 전자빔 집속을 위한 자기장 분포특성을 해석하였다.

2. 전자빔 가공기용 자기렌즈

2.1 전자빔 렌즈의 개요

Fig. 1은 Fringing field가 어떻게 전자빔의 렌즈역할을 하는지 나타내고 있다. 전자렌즈의 원리를 이해하기 위하여 가장 간단한 자석을 고려하면 Fig. 1과 같다. 이렇게 생성된 각각의 자속선에서의 B를 반경방향과 축방향(전자빔의 진행방향)으로 나누어 B_r 과 B_z 로 나타낼 때 반경방향 자속의 방향은 반대가 되지만 진행방향의 자속의 크기는 중앙에서 최대가 됨을 알 수 있다. 이러한 자기장을 e 의 전하를 가진 전자가 속도 v 로 지나간다고 할 때 전자에 작용하는 힘 F 는 오른손 법칙에 의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{F} = -e(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (1)$$

이러한 힘에 의하여 전자빔의 굴절이 일어나게 되는데 수직방향의 속도 v_z 를 갖는 전자가 자기장으로 들어올 때, 반경방향의 자속에 의하여 발생하는 힘은 각도방향의 힘 $F_{\theta in}$ 으로 다음과 같은 성분을 갖게 된다.

$$\mathbf{F}_{\theta in} = -e(\mathbf{v}_z \times \mathbf{B}_r) \quad (2)$$

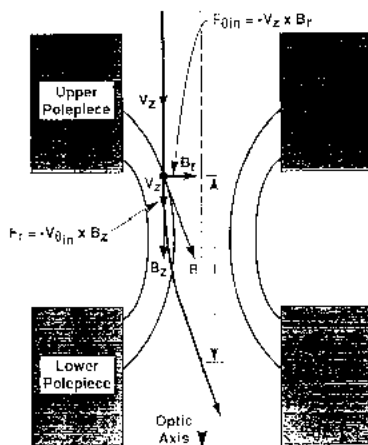


Fig. 1 Forces acting on a electron moving through fringing magnetic fields

이러한 힘은 결과적으로 전자에 각속도 $v_{\theta in}$ 을 발생시키며, 이 속도는 다시 수직방향 자속에 의하여 반경방향의 힘 F_r 을 발생시키게 된다.

$$\mathbf{F}_r = -e(\mathbf{v}_{\theta in} \times \mathbf{B}_z) \quad (3)$$

이러한 반경방향 힘은 결과적으로 전자빔을 수직축 쪽으로 휘게하며 이때 전자가 수직축을 통과하게 되는 점까지의 거리를 전자기 렌즈의 초점거리 f 라고 한다. 여기서 전자기 렌즈를 통과하는 전자빔의 경우 일반 광학 렌즈와는 다르게 휘어짐과 함께, 비틀림도 발생하게 됨을 알 수 있다.

여기서 렌즈의 주요 특성인 초점 거리는 자기장의 세기에 따라 달라진다는 것을 알 수 있다. 따라서 렌즈의 특성은 전자석 코일에 흐르는 전류 I 를 변화시킴으로써 조절할 수 있다. 대부분의 경우 초점거리는 다음과 같은 상관관계를 가지고 있는 것으로 알려져 있다.^[1]

$$f \propto \frac{V_0}{(NI)^2} \quad (4)$$

여기서 V_0 는 전자빔의 가속 전압을 나타내며 N 은 전자석 코일의 감은 수를 나타낸다. 즉, 전류의 세기가 클수록 초점 거리는 작아지는데 이는 자기장의 세기가 커지기 때문이며, 가속 전압이 커질수록 전자의 이동 속도가 빨라지므로 초점거리가 길어지는 결과를 나타내게 된다.

전자현미경에 비하여 높은 가속 전압을 요구하는 가공기 시스템을 위해서는 결국 전자 렌즈부분에서 발생하는 Fringing field의 크기, 특히 특히 짧은 초점거리를 위해서는 B_r 의 크기가 상대적으로 큰 것이 유리하다 할 수 있다. 이러한 자속의 크기를 크게 하는 것은 코일의 감은 수와 전류, 그리고 렌즈 극(pole piece)의 형태와 재료에 영향을 받게 된다. 이러한 자속밀도의 크기와 분포를 검증하는 것이 필요하며 특히 자극 재료의 자화 특성이 비선형적이므로 유한요소 해석 방법이 유용하게 적용될 수 있다.

2.2 전자렌즈 설계

Fig. 2는 본 연구에서 설계된 전자빔 렌즈의 구성을 나타내고 있다. 우선 두개의 집속렌즈가 위치하게 되며, 여기에는 각각 920 turn의 코일이 위치하게 된다. 1.2mm 두께의 권선을 적용하여 최대 3A의 전류가 가능하게 하였다. 최 하단에는 대물렌즈가 위치하며 600 turn의 1.2mm 두께의 권선을 갖도록 설계하였다. 또한 전자빔의 수평 수직 편향을 위한 코일은 대물렌즈 작용부의 이전에 해당하는 대물렌즈 자극(pole piece)내에 위치하는 구성을 적용하였으며, 집속렌즈 부분에는 1mm 크기의 aperture를 사용하고 최종적으로 200um aperture를 통하여 가공물에 주사

하도록 한다.

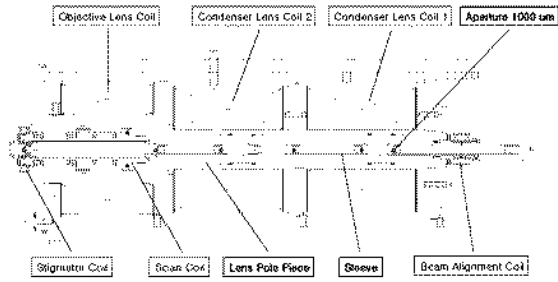


Fig. 2 Diagram of electron beam optic column

3. 자기렌즈의 자기장 제어구조 해석

3.1. 해석 모델

Fig. 3은 설계된 경통부의 자기장 해석을 위한 유한요소 모델을 나타내고 있다. 유한요소 해석은 ANSYS 7.1 사용하였으며, 자기장 요소인 PLANE 53 요소를 적용하였으며 원통대칭형인 구성을 감안하여 2차원 Axisymmetric 모델로 간략화 하였다. 해석에 있어서 가장 중요한 부분인 렌즈 부분에 대해서는 Fig. 3b)~d)와 같이 세밀한 요소를 적용하여 자기장 분포를 확인할 수 있도록 하였다. 공기 및 진공 부위, 그리고 권선부위의 상대 투자율은 1로 가정하였으며, 순철 철심부분에 대해서는 자화특성은 Fig. 4의 B-H 곡선과 같은 비선형특성을 적용하였다.

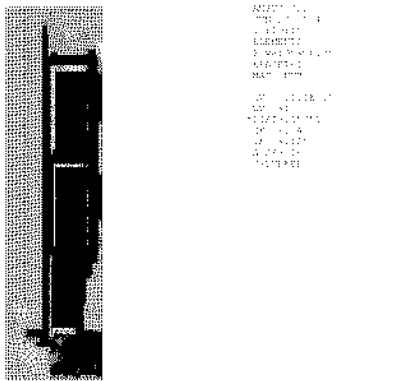
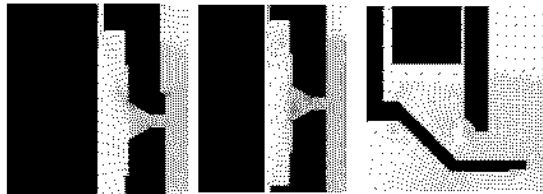


Fig. 3a. axisymmetric FE model of the column



b. 1st condensing c. 2nd condensing d. object lens
Fig. 3 FE model of magnetic lenses

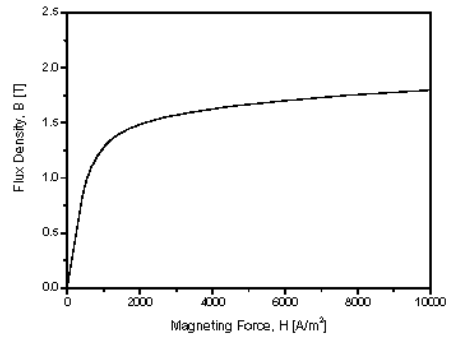


Fig. 4 B-H curve of material for pole pieces (pure iron)

3.2 자기장 분포 해석

Fig. 5는 각 코일에 2A의 전류가 흐를 때의 자속 밀도의 크기를 나타내고 있다. 여기서 거의 대부분의 자기장은 철심에 분포함을 알 수 있다. 경통 및 자극 재료의 자속밀도가 2.0 T를 넘을 경우 순철에서의 상대 투자율이 낮아지면서 자화될 수 있으나 그러나 일부 집중 렌즈 부근을 제외하곤 대체로 1.0T 전후의 양호한 자속밀도를 나타내고 있음을 알 수 있다. 전류의 방향이 세 코일이 모두 같으므로 자속의 흐름방향도 일치하게 된다. 따라서 내부의 자극(pole piece)부분과 대물렌즈 부분의 외부 경통에서 자속밀도의 크기가 크게 나타나게 된다.

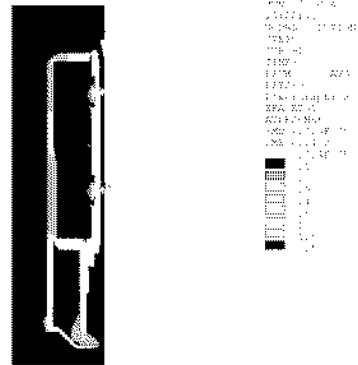
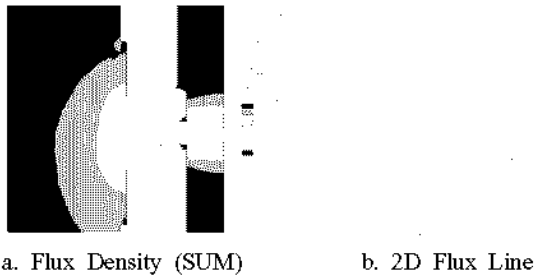


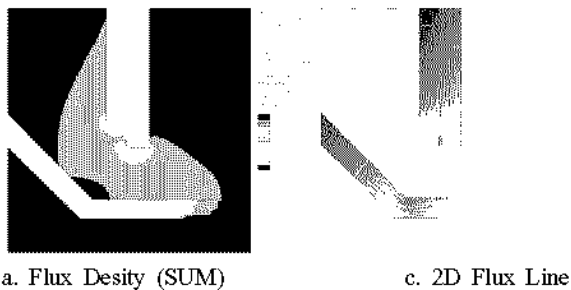
Fig. 5 Flux density at currents are 2A for all coils

실제적으로 가장 중요한 부분인 각 렌즈 부분에서의 자기장의 분포를 알아보면 다음과 같다. 우선 Fig. 6의 첫 번째 집중렌즈부분에서의 자속밀도를 보면 중심에서의 자속밀도 분포가 약 0.5 T까지 나타나며 중심에서 멀어질수록 커지고 있음을 알 수 있다. 또한 자기력선 분포를 보면 전자의 궤적을 집중시키기 위한 Fringing field가 잘 형성되고 있음을 알 수 있다.



a. Flux Density (SUM) b. 2D Flux Line
Fig. 6 Magnetic flux at condenser lens 1(I=2A)

Fig. 7은 대물렌즈 부분에서의 자속밀도 분포를 나타내고 있으며, 집속렌즈부분에 비하여 공극의 크기가 커서 전체적으로 자속밀도의 크기가 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 집속렌즈가 전자빔의 밀도를 높여주는 데 주 역할이 있는 반면, 대물렌즈는 초점을 잡아야 하며 특히, 내부의 편향 코일에 의해 편향되는 빔에 대하여 작용하도록 설계되었으며, 해석 결과에서 반경방향의 자속이 존재하는 범위가 넓게 나타나고 있음을 알 수 있다.



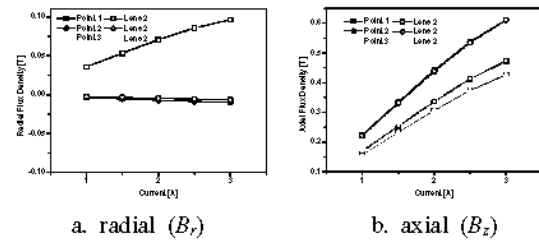
a. Flux Density (SUM) b. 2D Flux Line
Fig. 7 Magnetic flux at object lens (I=2A)

3.3 제어 전류변화에 따른 자속 분포 해석

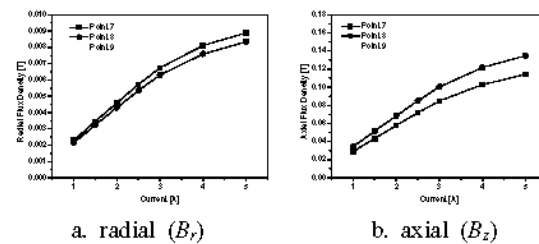
제어전류에 따른 집속 렌즈부분에서의 자속밀도를 그래프로 나타내보면 Fig. 8과 같다. 각각 중심에서 0.8mm 떨어진 위치에서 두 자극의 중간점 (position 2)과 약 20mm 축방향으로 떨어진 지점의 (position 1, 3) B_r 과 B_z 를 나타낸 것으로 전류와 거의 선형적인 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 최대 3A에서 반경방향 자속밀도가 약 0.1T까지 가능하나 자극의 포화 가능성이 있으므로 2.5A 이상은 바람직하지 않다고 할 수 있으며, 2번째 집속렌즈에서 축방향 자속이 약간 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

대물렌즈에 대해서는 Fig. 9에 나타나있는 바와 같이 축에서 1.6mm 떨어진 3개의 지점에 대하여 3A까지는 선형적인 특성을 보이고 있음을 알 수 있다. 대물렌즈의 자극에서의 자속밀도는 집속렌즈에 비하여 크지 않으므로 약 5A까지에서도 대부분 1.5T 정도의 크기를 나타냈으며 최종 aperture에 가장 근접한

point 9에서의 반경방향 자속밀도가 상대적으로 작게 나타나고 있음을 알 수 있다.



a. radial (B_r) b. axial (B_z)
Fig. 8 Flux density of condenser lenses varying current



a. radial (B_r) b. axial (B_z)
Fig. 9 Flux density of the object lens varying current

4. 결론

본 연구에서는 전자빔 가공기 경통부내에서 전자빔의 집속과 초점을 담당하는 집속 및 대물 렌즈의 특성에 대하여 유한요소법을 통한 해석을 수행하였다. 자성체 자극의 공극에서 발생하는 fringing field를 이용하는 자기 렌즈의 특성을 검토하기 위하여 2차원 축대칭 유한요소 모델을 구축하였으며, 제어전류의 변화에 따른 자기장의 분포형태와 크기를 해석하였다. 해석결과 대물렌즈의 경우 2.5A 이하의 전류에서 자극에서의 자기포화가 없는 구동이 가능함을 알 수 있었으며, 이때 반경 0.8mm 위치에서의 반경방향 자속밀도는 약 0.08T 정도로 나타났으며 공극을 사이로 대칭적인 형태를 보이고 있음을 알 수 있었다. 대물렌즈의 경우는 넓은 범위에서 전자빔의 집속을 위한 분포를 나타내었으며, 3A까지 전류에 대해 선형적인 자속밀도를 나타내었으며, 반경방향 자속밀도는 최대 0.009 T를 나타내었다.

참고문헌

1. Joseph I. Goldstein, A. D. Roming Jr., Dale E. Newbury, Charles E. Lyman, et al, "Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis", 2nd Ed. Plenum Press, pp.21-67, 1992
2. Hermann Wollnik, "Optics of Charged Particles", Academic Prss., 1987