

◆특집◆ 에너지 빔 이용 정밀가공 기술

전자빔 가공을 위한 전자빔 광학 해석에 관한 연구

이응기*

Study on Electron Optic Analysis for Electron-beam Processes

Eung Ki Lee*

Key Words : E-beam lithography (전자빔 묘화), Electron optics (전자 광학), Magnetic lens (자계 렌즈), Magnetic field (자계), pole (자극)

1. 서론

초미세 가공 기술은 빛과 전자를 이용하는 기술의 발달과 함께 급속도로 발전해 왔다. 차세대 초미세 가공기술의 경쟁력은 원천기술을 상품화시키는 방법에 의해 달려 있으며, 이는 공정장비와 초미세 부품의 생산기술에 의하여 주도될 전망이다. 특히, 초미세 부품 생산 기술의 발전에 있어서 없어서는 안 될 핵심기술이 나노정밀도를 구현할 수 있는 고도의 가공기술이다. 초미세 부품산업의 성장에는 에너지빔을 응용하여 기존의 미세 가공기술을 넘어설 수 있는 장비의 개발이 필수적이다.

여러 가지 초미세 가공 기술 중 리소그래피(lithography) 기술의 개발 및 적용이 차세대 실용적인 기술로서 유력하다. 즉 X-ray 리소그래피, SCALPEL (Scattering with Angular Limitation Projection E-beam Lithography), IPL (Ion-beam Projection Lithography), EPL (E-beam Projection Lithography), EBDW (E-beam Direct Writing), EUVL (Extreme Ultra Violet Lithography) 등이 그것이다.

이러한 차세대 가공 기술 중 전자빔 리소그래피

(EBDW)기술은 EUVL과 함께 가장 유력한 차세대 리소그래피 기술로 평가되고 있다. 전자빔기술(EBDW)은 상대적으로 크기가 작고 구조가 단순하여 개발이 용이하며, 특히 멀티 마이크로칼럼 방식을 이용하여 고효율, 고생산성(High Throughput)을 기대할 수 있는 방식이다.

전자빔을 이용한 초미세 가공기술은 영국의 물리학자 톰슨(J. J. Thomson)이 1989년 전자의 실체를 확인한 이후 진공기술의 발달과 함께 급속한 발달을 하였다. 1905년 아인슈타인(A. Einstein)이 상대성 원리를 발표하고, 맥스웰(Maxwell)이 방정식을 보편화하였다. 에너지빔의 광학적 설계에 의해 이중 사중극 자계(magnetic quadrupole doublet)이 1976년 Heidelberg, 1977년 Karlsruhe에서 소개되었고, 1980년 Oxford에서 삼중(triplet) 자계 렌즈를 구성하여 1 μ m의 분해능이 실현되었으며, 1985년 Melbourne에서는 구면 수차(spherical aberration)의 개선에 관한 연구가 이루어졌다. 이외에 1979년 Los Alamos와 M.I.T.에서 초전도 솔레노이드 렌즈를 도입하여 연구를 계속하고 있으며, 고온초전도체의 실용화에 따라 그 활용성이 가속화될 전망이다.¹

기존의 고 분해능의 전자빔 리소그래피 기술은 구조적인 문제로 인한 생산성(throughput)의 한계를 가지고 있다. 기존의 전자빔 기술을 초미세 부품생

* 공주대학교 기계자동차공학부 기계공학전공
Tel. 041-521-9252 / 9560, Fax. 041-555-9123
Email : eklee@kongju.ac.kr

산에 확대 적용하기 위해서는 효율성의 증대와 초미세화가 필요한데, 이를 위해서는 기존의 단일 컬럼의 단일 빔(Fig. 1)을 이용하는 기술을 확장하여 다중 컬럼의 다중 빔(multi beam)을 사용하는 방법(fig. 2)으로 확대 적용함으로써 달성할 수 있다.

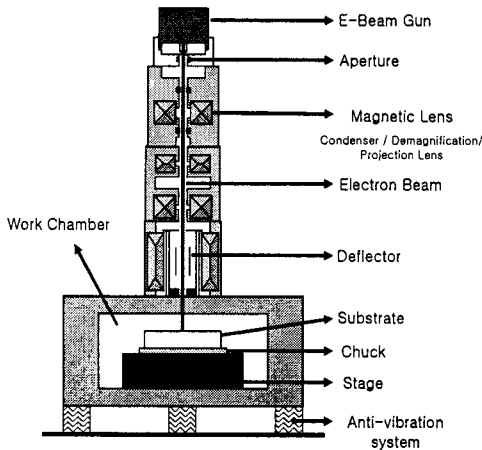


Fig. 1 E-beam System

Fig. 2는 멀티전자빔 리소그래피의 개념도를 보여주고 있다. 소형 전자칼럼을 다수 사용하여 동시에 여러 위치에서의 가공을 동시에 진행하는 멀티 전자빔 리소그래피가 가능하다. 즉, 한 column의 전자빔이 mask 없이 각 칼럼의 범위에서 패턴을 직접 가공할 수 있게 된다.

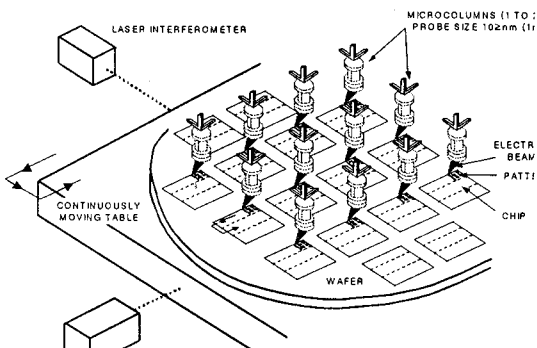


Fig. 2 Multi-column E-beam System

멀티빔 리소그래피는 대상물(substrate)을 빠르게 Exposure하기 위하여 다수의 초소형 칼럼이 사용되며, 다수의 초소형 칼럼을 피사체의 범위 내에서 병렬로 배열하여 배열한 칼럼의 숫자만큼

Throughput 향상시키고, 마스크 없이(maskless) 직접 노광이 가능하여 생산 공정이 단순화되어 초미세 부품의 생산 원가를 절감할 수 있다. 미세 패턴은 50 - 100 μm 의 범위 내에서 Vector Scan Mode 또는 Raster Scan Mode를 이용하여 쓰여지며, 연속된 패턴은 정밀 제어되는 Table에 의하여 Stitch되어 쓰여지게 된다. 동시에 다수의 가공을 진행함으로써 고 생산성(high throughput)의 멀티전자빔 장비를 실현할 수 있다.

단일빔 칼럼이 복수로 연동되는 멀티 전자빔 리소그래피를 위하여 멀티 전자빔 리소그래피 장비를 구성하기 위한 초소형 전자칼럼의 개발 및 설계가 필요하며 멀티시스템제어기술, 저 에너지용 resist, 등의 문제점 해결을 위한 연구가 현재 '차세대 신기술개발사업(산업자원부)'에서 진행 중이다. 전자칼럼은 멀티구조가 가능하게 초소형으로 설계하여야 하며, 이를 위한 전자 방출원, 전자렌즈, 전자빔 Blanker, 전자빔 제어(Scan Deflector), 포커스렌즈, 감지장치(Detector)의 설계가 이루어져야 한다.(Fig. 3)

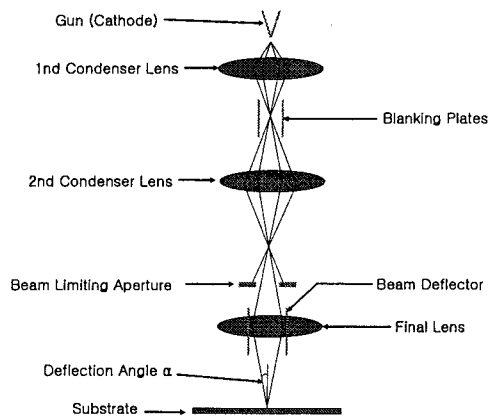


Fig. 3 Schematic diagram of the E-beam lithography optic system

멀티 마이크로 칼럼형 전자빔 리소그래피 시스템을 설계하기 위하여 우선적으로 요구되는 기술은 전자빔의 거동에 대한 광학적 해석 기술이다. 본 연구는 멀티 전자빔 리소그래피용 마이크로 칼럼의 설계를 위하여 전자빔의 광학적 특성을 해석하고, 마이크로 칼럼의 렌즈 설계 및 전자빔 거동의 예측을 위한 빔광학 전산모사 기술을 개발한다. 이를

활용하여 빔 사이즈 수십 nm 급에 적용될 수 있는 전자계 렌즈, 전자빔의 궤적 등 제어계 모형을 구축하고, 각 부품이 이루는 기하학적 구조 등의 Simulation 기술을 개발한다. 본 연구의 궁극적인 목표는 미세 전자빔 거동 해석 기술을 개발하여 초미세 가공용 멀티 전자빔 리소그래피 장치의 개발에 있다.

2. 자기 렌즈의 자계(magnetic field)

자기력(magnetic force)이 영향을 주는 공간을 자계라 하며, 어떤 도선에 전류가 흐르면 도선 주위에는 자계가 형성되어 자기 작용이 발생한다. 이러한 현상은 1820년 외르스테드(Oersted)가 실험적으로 발견한 것으로, 전자빔 리소그래피용 컬럼 내의 전자계 렌즈 내의 Cu coil을 따라서 전류가 흐를 때 전극 주위에 자기장을 형성하여 중심의 수직방향으로 이동하는 전자의 진행방향을 조절하는 렌즈로서의 역할을 하게 된다. 자계 렌즈는 전류로부터 자계가 형성되므로 전류의 세기를 조절하여 자기장의 세기를 변화시킬 수 있다. 이러한 특성을 활용하여 자기장의 세기 변화로 렌즈의 초점거리를 변화시킬 수 있으므로, 광학 렌즈와 달리 렌즈를 교체하지 않고, 배율 및 초점 심도의 변화가 가능한 특성을 갖는다.² 또한, 전자계 렌즈는 자기장의 세기가 광축에서 멀수록 강하기 때문에 구면수차 보정이 불가능하며, 분해능이 제한되는 한계를 갖는다.

전자빔 컬럼에 많이 사용되는 사중극 렌즈(quadruplet lens)는 소위 Russian Quadruplet으로도 불리며 이는 개발초기에 주로 Leningrad 그룹이 빔 광학 해석을 수행했기 때문이다. 사중극 렌즈의 4개의 자극(NSNS)은 내부쌍과 외부쌍이 각각 동일한 전원에 연결된다.³

사중극 렌즈의 자기적 위치에너지인 자위(magnetic potential) U 는 라플라스(Laplace) 방정식으로 표시할 수 있다. (식 1)

$$\nabla^2 U = 0 \tag{1}$$

사극 자석의 자극 면(pole face)의 형상이 쌍곡선(hyperbola-shape)인 경우, (식 1)의 라플라스 방정식은 다음의 (식 2)와 같은 해를 가지게 된다.

$$U = -Gxy \tag{2}$$

자계 내에서 자기력의 세기(magnetic force)는 단위 점 자극이 받는 힘을 의미하며, 자기 렌즈 내의 전자빔의 거동에 직접적인 영향을 주는 인자가 된다. 자기력의 세기는 곧 자위(magnetic potential)의 gradient이다. 즉, 자계의 세기는 자위의 경도(기울기)와 같다는 의미이다. 쌍곡선의 자극 면을 갖는 자기 렌즈의 자기력의 세기는 (식 3)과 같이 유도된다.

$$B_x = -\frac{\partial U}{\partial x} = Gx \tag{3}$$

$$B_y = -\frac{\partial U}{\partial y} = Gy$$

전자빔 컬럼에서 요구되는 자기력 구배 G 와 자극면이 이루는 공간이 결정되면, 자기 렌즈에 필요한 전류를 계산할 수 있어 전자빔 컬럼에 필요한 전원장치의 용량도 계산할 수 있게 된다.

2.1 자계의 전산 모사(simulation)

사중극 렌즈의 자위 및 자기력 해석식을 적용하여 자계의 전산 모사를 수행하였다.

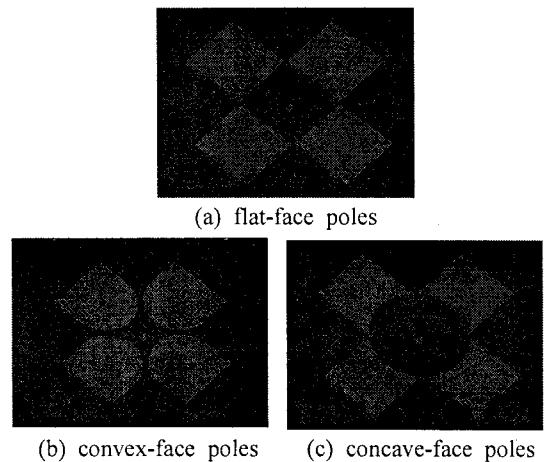


Fig. 4 Pole-surface examples for the computer simulation of magnetic fields

사중극 렌즈의 자극면을 단순한 형상으로 가정하여 형상을 모델링(modeling)하여 각 자극면 형상에 대하여 형성되는 자계를 전산 모사하였다. 본

연구에서 간단한 형상으로 3종류의 자극면 형상에 대한 자계 해석을 수행하였다. Fig. 4에 도시되어 있는 3종의 자극면 형상에 대한 자계 분포를 전산 모사한 결과는 다음과 같다.

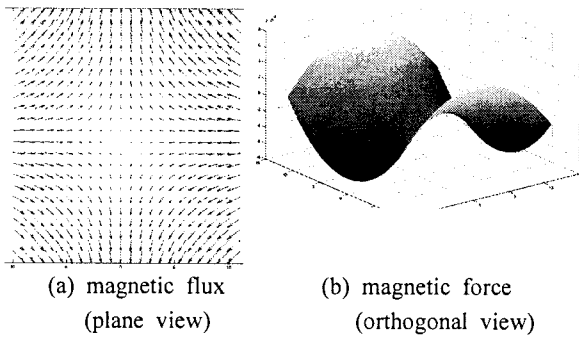


Fig. 5 Simulated magnetic field of the flat-face magnetic pole

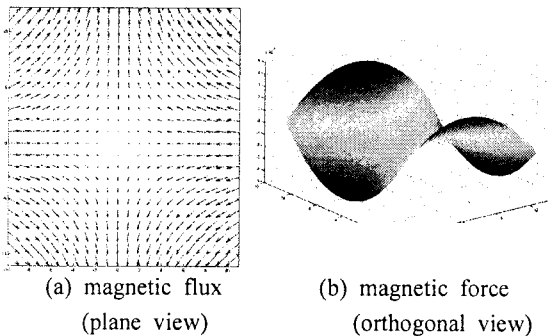


Fig. 6 Simulated magnetic field of the convex-face magnetic pole

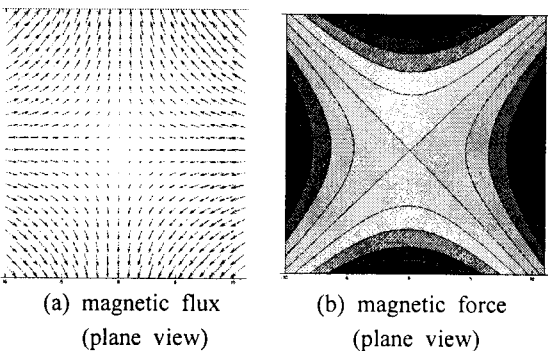


Fig. 7 Simulated magnetic field of the convex-face magnetic pole

본 연구에서 예로 선택한 3종의 자극면 형상을 갖는 사중극 렌즈에 대한 자계의 세기 및 자력선 분포에 대한 전산 모사 결과가 Fig. 5 ~ Fig. 7에 도시되어 있다. 각 자극면 형상에 대한 자장구배가 수치적으로 해석되었다. 자장구배는 전자빔이 통과하는 구간에서만 의미가 있으므로, 그 구간을 벗어난 곳의 자기장은 자계 렌즈에서 불필요한 구간이 된다. 일반적으로 전자빔용 컬럼의 전자 렌즈의 개구부 전영역을 렌즈로서 활용하는 것이 아니며, 전자빔이 통과하는 실제 운전 공간은 극히 제한적이며, 이러한 운동공간에서의 자속분포를 목적에 맞도록 구현하여야 한다. 조립에서의 위치 오차 등 여러 요인으로 전자빔이 전자렌즈의 중양을 통과하지 않는 경우도 발생하므로 실제 전자 렌즈의 자극면 설계에서는 유효 공간을 설정하고, 실현 가능한 자극 전류량의 범위에서 자극이 유효 공간에 대하여 목표로 하는 자속 분포를 구현할 수 있는 기하학적인 자극면 형상을 설계하여야 한다.

2.2 자계의 측정

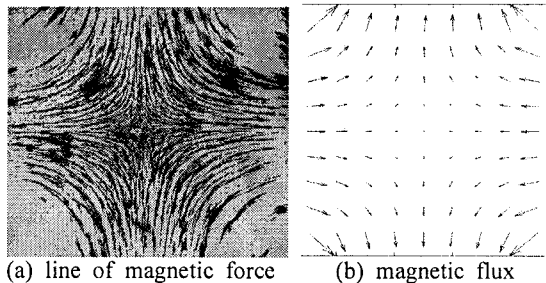


Fig. 8 Measured force intensity and the directions of magnetic forces (flat-face pole)

자계의 전산모사 결과에 대한 검증을 위하여 자극을 배치하고, Hall Probe를 사용하여 자기력 측정 실험을 수행하였다. (Fig. 8) 측정된 자기력의 전반적인 경향은 Fig.5에서 보여지는 전산모사 결과와 같은 경향을 갖는 것으로 판단된다.

3. 자계에서의 전자빔 거동

3.1 자계에서의 전자의 이동

전자발생원(e-beam gun)에서 방출되는 전자는 자기 렌즈들로 구성된 전자빔 컬럼에 입사되며, collimator 슬릿에 의해 재단되어 지고, 최종 집속렌

즈에 의해 작은 크기의 빔으로 집속된다.(Fig. 3)

본 연구에서 멀티 전자빔 리소그래피에 적용하고자 하는 마이크로 전자칼럼은 소형의 크기로서 매우 짧은 길이를 가지고 있어 전자방출원에서 방출된 전자가 렌즈를 통과하는 비율이 기존의 전자칼럼보다 우수한 결과를 보일 것으로 예측된다.

자기 렌즈로부터 생성되는 자계 내를 전자가 이동하는 경우, 자계와 전자와의 상호작용에 의한 힘이 발생한다. 이 힘에 의하여 전자의 운동이 변화된다. 자속밀도(B)의 자계 내에 q(C)의 전자가 u(m/s)의 속도로 자계에 수직으로 이동하는 경우 작용하는 힘의 크기는 (식 4)와 같이 주어진다.

$$F = qu \times B \quad (4)$$

여기서 전자의 전하 $q = e = -1.6 \times 10^{-19}$ (C)이며, 전자가 받게 되는 힘의 방향은 Fleming의 왼손 법칙에 따른다.

전자빔을 집속하기 위하여는 전자빔을 구성하는 개개의 전자들에 축방향으로 힘이 작용하여야 한다. 전자 방출원(e-beam gun)으로부터 방출되어 발산하는 모든 전자들이 다시 일점으로 집속되기 위해서는 힘이 광축으로부터 거리에 비례해야 한다.⁴ 이러한 특성을 갖는 자기 렌즈의 형상 설계 및 배치가 전자빔 광학 해석의 주요 목적이다. 이를 위하여 본 연구에서는 자기 렌즈에 의하여 생성되는 자계에 의하여 운동이 변화되는 전자빔의 거동 시뮬레이션 기술을 개발한다. 3차원적으로 전산 모사된 자계 내를 전자들이 이동하며 자계의 영향으로 인하여 운동이 변화되는 현상에 대한 컴퓨터 모델을 수립하고 시뮬레이션을 수행하였다.

3.2 전자빔 거동 시뮬레이션

자계 내에서의 전자빔 거동을 시뮬레이션 하기 위하여, 이중극(dipole), 사중극(quadrupole) 그리고 팔중극(octapole)으로 구성된 자기 렌즈에 의한 전자빔 거동을 분석하였다.

3.2.1 이중극 렌즈 (dipole lens)

이중극 렌즈 내에서의 전자빔 거동에 대한 해석을 수행하였다. 이중극 렌즈에 의한 자계는 Fig. 9와 같은 형태를 가지며, N극에서 S극으로 평행하게 진행되는 자속선을 보여준다.

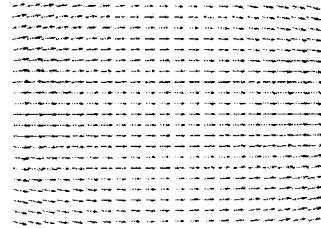


Fig. 9 Magnetic field in a dipole lens

Fig. 9와 같은 평행한 자계 내로 원형의 전자빔이 진행할 때의 거동을 해석한 결과가 Fig. 10에 도시되어 있다. Fig. 10의 결과에서 이중극 렌즈 내를 진행하는 전자빔은 한 방향으로 굴절되어 진행한다.

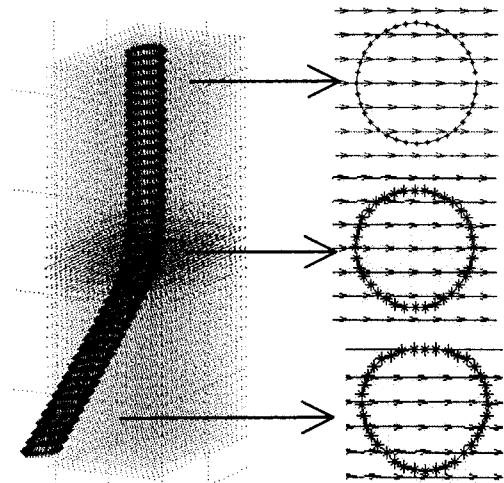


Fig. 10 E-beam behavior in a dipole lens

3.2.2 사중극 렌즈 (quadrupole lens)

사중극 렌즈는 4개의 전극이 전자빔 광축에 대하여 축대칭을 이루며 NSNS로 교대로 배치된다. 임의의 위치에서 자장(field)의 세기는 축으로부터의 거리에 비례하므로 1차집속(first order focusing) 조건이 만족된다. 이러한 특성으로 단일 사중극 렌즈로는 전자빔을 한 점이 아니라 한 선상에 모을 수 있게 된다. (Fig. 11)

사중극 렌즈를 통과하는 전자빔의 거동에 대한 전산 모사 결과(Fig. 12)는 사중극 렌즈의 특성으로서 일반적으로 알려져 있는 Fig. 11과 같은 경향을 보여주는 것을 확인할 수 있다.

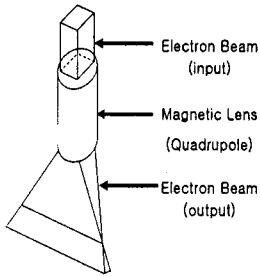


Fig. 11 The action of a quadrupole lens

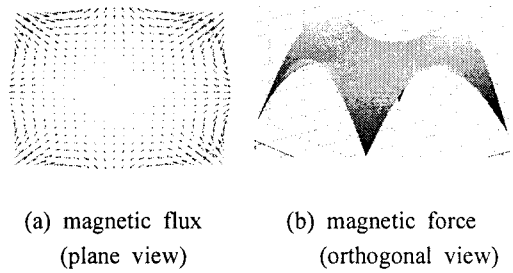


Fig. 13 Simulated magnetic field of the octapole lens

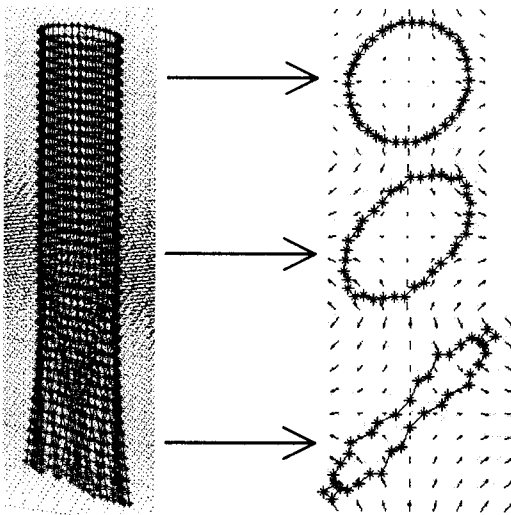


Fig. 12 E-beam behavior in a quadrupole lens

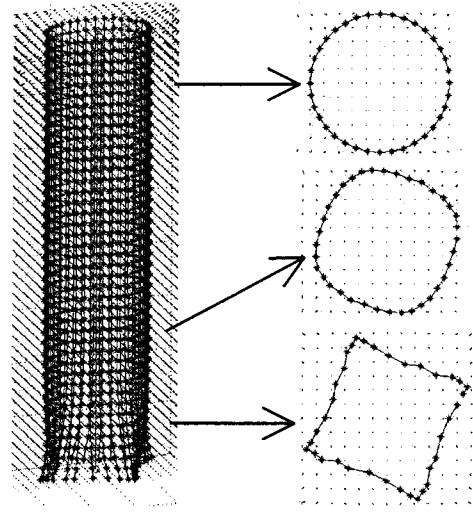


Fig. 14 E-beam behavior in a octapole lens

3.2.3 팔중극 렌즈 (octapole lens)

전자를 집속 혹은 발산시키는 축대칭 자기 렌즈의 경우, 원리적으로 수차가 언제나 플러스 값을 가지게 된다. 광학 렌즈와 같이 음수의 수차를 가질 수 없기 때문에 항상 수렴렌즈(즉, 볼록렌즈)이다. 이 때문에 복수의 렌즈를 이용하더라도 수차를 상쇄할 수 없다.⁵ 전자빔의 집속을 위하여 자기다극 렌즈를 사용함으로써 고차의 수차를 보정하는 방안을 사용한다. 본 연구에서는 고차 자기다극렌즈로서 팔중극 렌즈의 거동 해석에 전산 모사를 적용하여 특성을 분석하였다.

팔중극 렌즈에 의한 자계는 Fig. 13과 같이 생성되며, 생성된 자계에 의하여 전자빔은 Fig 14와 같이 진행하게 된다. 사중극 렌즈를 사용하는 경우 전자빔이 선의 형태로 집속하게 되는 것과 비교하여(Fig. 12), 팔중극 렌즈를 사용하는 경우 원형으로 입사하는 전자빔이 사각 형상으로 집속되는 특성을

보이고 있다.

3.3 전자빔의 집속

전자빔의 점집속을 실현하기 위해서는 pole의 극성을 교대로 위치하여 두 개 이상의 렌즈들을 조합하여야 한다. 빔 광학계의 공간분해능 및 작동상의 편의성을 고려하여 일반적으로 이중(doublet), 삼중(triplet) 및 사중(quadruplet) 렌즈의 조합이 사용되고 있다.⁶

본 연구에서는 자기 렌즈를 이용한 전자빔의 집속을 이루기 위한 기본 특성을 파악하기 위하여 이중(doublet) 렌즈에서의 전자빔 거동을 전산 모사하였다. (Fig. 15) 사중극 렌즈가 이중으로 위치하고 이 사이를 원형 분포의 전자빔이 입사하는 경우, 전자빔의 형상이 원, 타원, 선의 형태로 변화함을 관찰할 수 있다.

Fig. 15에서 전자빔이 타원 형상인 단계에서 또

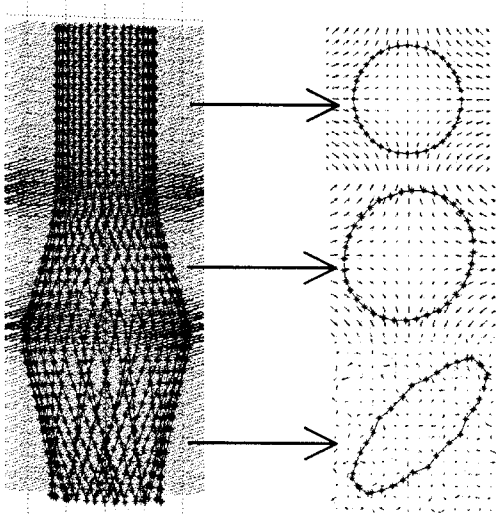


Fig. 15 E-beam behavior in a doublet quadrupole lens

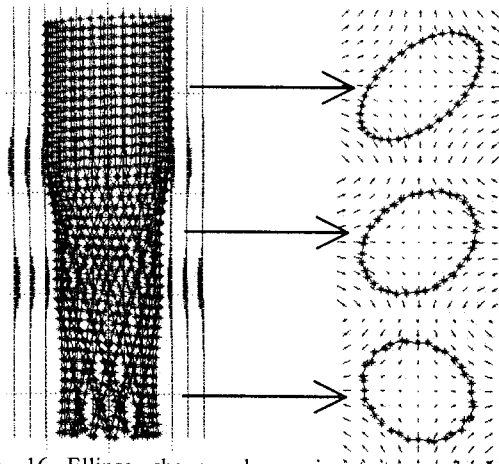


Fig. 16 Ellipse shape e-beam input to a doublet quadrupole lens system

다른 자기 렌즈를 적용함으로써 타원 형상의 장축을 보다 짧게 변형시킴으로써 빔을 집중시키는 전산 모사를 시도하여 Fig. 16과 같이 가능함을 볼 수 있었다.

4. 고찰

자기 렌즈는 코일이 감긴 원통형의 전자석으로 전자가 자계를 이동할 때 휘게되는 성질을 이용하여 전자빔을 굴절시키는 역할을 한다. 코일로 전류가 흐를 때 자계가 형성되면, 이동 중의 전자는 이

자계에 의하여 굴절되어, 결과적으로 전자는 아래 방향으로 나선형의 궤적(helical path)을 가지며 흐르게 되는 것을 본 연구의 전산 모사에서 확인할 수 있었다. 자극면의 형상에 따른 자계의 분포를 검토한 결과, 자기 렌즈 내에서 전자빔이 이동하는 유효 영역에서의 자계는 자극면의 형상과 큰 영향이 없는 것으로 판단된다. 자극면의 형상 선정에 있어서, 자계의 자속분포와 전자 컬럼의 공간을 보다 소형화하기 위하여 오목한(concave) 원형을 갖는 자극면 형상으로 설계하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

본 연구에서 개발하고자 하는 전자빔 컬럼은 초미세 가공을 위하여 빔의 스폿 크기(spot size)를 수십 nA 수준으로 집중하는 것을 목표로 한다. 빔 전류량이 매우 적어 공간전하효과를 무시할 수 있을 것으로 예측된다.⁷

5. 결론

본 연구는 멀티 전자빔 리소그래피 시스템을 개발하기 위한 마이크로 전자 컬럼을 설계하기 위한 기반 기술을 개발하는 것을 목적으로 한다. 전자빔 컬럼을 설계하기 위한 전자빔의 거동에 대한 광학적 해석 및 전산 모사(simulation)를 수행하였으며, 이를 통하여 마이크로 빔라인을 설계하기 위한 기반 기술이 확보되었다.

자기 렌즈의 자극 형상에 따른 자계 분포를 3차원적으로 해석하였고, 자극면의 형상에 따른 자계의 자속구배에 관한 해석이 수행되었으며, 자기 렌즈에 의하여 생성되는 자계 내를 이동하는 전자빔의 거동을 검토하였다. 전자빔의 집중을 위하여 4극 이상의 다극전자렌즈를 적용하는 것이 필요하다. 특히, 사중극 렌즈를 통과한 전자빔이 선형으로 집중되는 경향을 보이므로 사중극 렌즈를 사용하는 경우 이중(doublet) 이상의 렌즈를 중복하여 컬럼에 적용하여야 한다.

본 연구를 통하여 개발되는 초미니 전자빔 컬럼 설계 기술은 멀티전자빔 리소그래피에 응용이 가능하다. 본 연구를 기반으로 연구 기간 내에 목표한 결과를 달성할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 차세대신기술개발사업(산업자원부,

과제번호 : 10030092)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Legge, G. J. F., O'Brien, P. M., Sealock, R. M., Allan, G. L., Bench, G., Moloney, G., Jamieson, D. N. and Mazzolini, A. P., "The design of a versatile scanning proton microprobe of high resolution and efficiency," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, Vol. 30, Issue 3, pp. 252-259, 1988.
2. Jerby, E., "Angular steering of the free-electron-laser far-field radiation beam," Physical review A, Vol. 41, No. 7, pp. 3804-3811, 1990.
3. Rebrow, V. A., Ponomarev, A. G., Palchik, V. K. and Melnik, N. G., "The new design of magnetic quadrupole lens doublet manufactured from a single piece," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, Vol. 260, Issue 1, pp. 34-38, 2007.
4. Edgcombe, C. J., Lupini, A. R. and Taylor, J. H., "Robust optimization for magnetic lens design," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Vol. 427, Issue 1-2, pp. 306-309, 1999.
5. Almir, A. S. A., "Ultimate performance of objective magnetic lens," Ultramicroscopy, Vol. 101, Issue 2-4, pp. 241-246, 2004.
6. Mottershead, T., Barlow, D., Blind, B., Hogan, G., Jason, A., Merrill, F., Morley, K., Morris, C., Saunders, A. and Valdiviez, R., "Design and operation of a proton microscope for radiography at 800 MeV," Proceeding of the Particle Acceleration Conference, pp. 702-704, 2003.
7. Mankos, M., Adler, D., Veneklasen, L. and Munro, E., "Electron optics for high throughput low energy electron microscopy," Surface Science, Vol. 601, Issue 20, pp. 4733-4741, 2007.