

# 소형 전자빔 칼럼내 전자빔 거동 해석

## Analysis of the Electron Beam in the Micro Column

\*홍성철<sup>1</sup>, 인재준<sup>2</sup>, #이응기<sup>3</sup>

\*S. C. Hong(gin\_dali@naver.com)<sup>1</sup>, J. J. In(injaejun@hotmail.com)<sup>2</sup>, #E. K. Lee(eklee@kongju.ac.kr)<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 공주대학교 기계설계과, <sup>2</sup> 공주대학교 기계공학과, <sup>3</sup> 공주대학교 기계자동차공학부

Key words : Electron beam, lithography, micro column, electric lens, electric field

### NOMENCLATURE

- $\vec{r} = (r, \Phi, z)$  : 전자의 위치벡터
- $\vec{r}' = (r', \Phi', z')$  : 렌즈의 위치벡터
- $\vec{R}$  : 전기장의 벡터
- $a_\rho, a_\Phi, a_z$  : 원통좌표계의 단위벡터
- $a_R$  : 전기장의 단위벡터
- $\theta$  : 전자와 xy평면이 이루는 각도
- $\theta'$  : 렌즈와 xy평면이 이루는 각도
- $\rho_s$  : 면속전하밀도

### 1. 서론

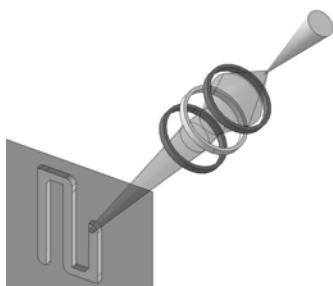
전자빔을 이용한 리소그라피 기술이 가진 여러 장점으로 인해 국내외로 많은 관심이 기울어지는 기술이다. 초기 연구되었던 고에너지 방식의 리소그라피 기술은 낮은 에너지 효율이나 생산성 문제 등을 극복하기 위하여 차츰 저에너지, 소형화 되고 있는 추세이다. 이미 1994년 미국의 IBM 연구소에서 1keV 이하의 저에너지를 이용하는 마이크로칼럼이 개발에 성공하였고 AT&T Bell 연구소와 유럽, 일본 등에서 활발한 연구가 진행되고 있다. 국내에서는 1990년 초 서울대에서 연구를 시작한 이후에 몇몇 대학 및 기업을 중심으로 연구가 진행되어지고 있다.

소형(마이크로) 전자빔 리소그라피 연구에서 중점적으로 다루어지는 것은 마이크로칼럼 안에서 낮은 에너지를 이용하여 높은 효율을 발휘하는 것과 생산공정시 높은 분해능을 갖는 것이다. 높은 효율과 분해능을 얻기 위해서는 전자 방출원의 세기, 전기렌즈에 가해지는 전압의 크기, 가공 물체와 전기렌즈 사이의 거리 등 여러 가지 변수들의 값을 이용하여 최적화된 파라미터 값들을 찾을 수 있다.

본 연구는 이러한 전자빔 칼럼 내에서 전자빔 거동에 영향을 미치는 변수들을 제어하는 전산모사 프로그램을 개발하여 소형 칼럼의 에너지 효율 및 분해능을 높이고자 한다.

### 2. 전자빔 칼럼의 구조

전자빔 칼럼 내의 전자빔 거동을 이해하기 위해서는 전자빔 칼럼 구조의 이해가 수반되어야 한다. 기본적인 전자빔의 구성요소를 살펴보면 칼럼의 가장 상단에 전자가 방출되는 Tip이 위치하게 된다. Tip에서 방출된 전자는 3개의 렌즈로 구성된 Source lens를 지나가게 된다. Source lens의 역할은 조리개를 통해 유효공간을 지나가는 전자들을 모아주고 유효공간 밖을 지나가는 전자들을 걸러준다. 실질적으로 Tip에서 방출된 모든 전자들을 제어할 수는 없다. 방출된 모든 전자를 제어하려 한다면 전자들이 칼럼 내에서 상호작용을 일으켜 전자빔의 분해능을 저하시키게 될 것이다. 또한 공작물 표면에서 전자들과 가공된 resist 간의 간섭



< Fig. 1 Electron beam column >

현상으로 인한 근접효과가 발생되어 정밀한 가공이 어렵게 된다. 그렇게 때문에 조리개를 통하여 전자빔을 filtering 하는 것이다. Source lens를 통해서 선별된 전자들은 다시 3개의 렌즈로 구성된 Einzel lens를 통과하게 된다. Einzel lens는 산란된 전자빔을 Focusing 해주는 역할을 하게 된다. 최종적으로 Einzel lens에서 모아진 전자들이 공작물 위에 도포된 resist와 반응하여 공작물을 가공하게 된다.

### 3. 렌즈의 해석 및 전산모사

앞서 언급한 내용처럼 칼럼 내에서 실질적으로 방출된 전자들을 움직이게 하는 것은 Source lens와 Einzel lens 이므로 렌즈가 전자에 미치는 힘에 대하여 해석을 하였다(Fig. 2).

전자가 고리형의 단 렌즈를 통과할 때 전자는 렌즈 높이만큼의 원통 안에 들어있다고 할 수 있다.[1-2] 여기서 해석을 용이하게 하기 위하여 xz평면상에 전자를 놓고 렌즈 표면에 해당하는 원통에서 미소면적을 가정하였다. 일반적으로 알려진 전기장의 식을 이용하여 원통좌표계 상의 미소면적이 전자에 미치는 전기장은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.[3]

$$dE = \frac{\rho_s d\Phi dz \vec{R}}{4\pi\epsilon_0 |R|^3} \tag{1}$$

여기에 원통좌표계에서 직각좌표계로 변환한 R벡터와 R벡터의 크기를 구하고 (식 1)에 대입하여 원통형으로 전자를 둘러싼 렌즈가 전자에 미치는 전기장을 구할 수 있다.

$$|R| = \sqrt{(r\cos\theta - r'\cos\theta')^2 + (r\sin\theta - r'\sin\theta')^2 + (z - z')^2}$$

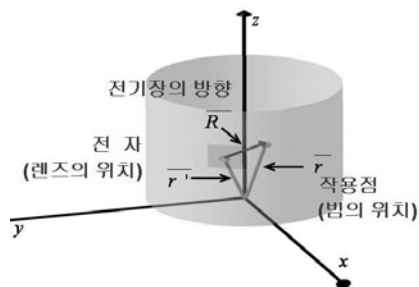
$$\vec{R} = \sqrt{(r\cos\theta - r'\cos\theta')^2 + (r\sin\theta - r'\sin\theta')^2} \vec{a}_r + \tan^{-1}(r\sin\theta - r'\sin\theta') / (r\cos\theta - r'\cos\theta') \vec{a}_\Phi + (z - z') \vec{a}_z \tag{2}$$

$$E_\rho = \left[ \int_0^{2\pi} \int_{L_1}^{L_2} \frac{\rho_s \sqrt{(r\cos\theta - r'\cos\theta')^2 + (r\sin\theta - r'\sin\theta')^2}}{4\pi\epsilon_0 |R|^3} dz d\Phi \right] \vec{a}_\rho$$

$$E_z = \left[ \int_0^{2\pi} \int_{L_1}^{L_2} \frac{\rho_s (z - z')}{4\pi\epsilon_0 |R|^3} dz d\Phi \right] \vec{a}_z \tag{3}$$

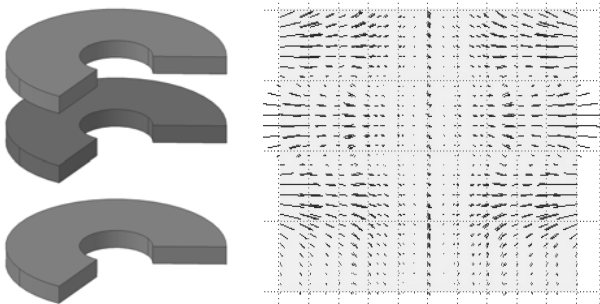
여기서 원통좌표계의  $\Phi$  방향의 힘들은 서로 상쇄되어 원통 내에 전자에 미치는 전기장은  $\rho$  방향과 z방향이 된다.

유도된 전기장으로 Source lens와 Einzel lens의 전기장을 Matlab을 이용하여 전산모사 하였다. Source lens의 조리개 직경은 100 $\mu$ m

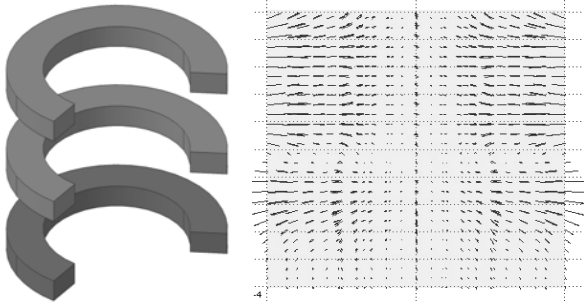


< Fig. 2 Analysis model of the electron beam through the single lens >

이고 첫 번째 렌즈와 세 번째 렌즈에 (-) 전압을 주고 가운데 렌즈에 (+) 전압을 주었다(Fig. 3). Einzel lens 조리개 직경은 200 $\mu$ m 이고 첫 번째(최상단) 렌즈와 두 번째 렌즈에 (-) 전압을 주고 마지막 렌즈에 (+) 전압을 주어서 전산모사 하였다(Fig. 4). 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이 (-) 전압을 가했을 때 전기장의 힘이 렌즈의 안쪽으로 가해지는 것을 볼 수 있고, (+) 전압을 가했을 시에는 전기장의 힘이 렌즈의 바깥쪽으로 가해지는 것을 확인할 수 있다.



(a) Source lens (b) electric fields in source lens  
< Fig. 3 The analysis model of source lens and the simulation result >



(a) Einzel lens (b) electric fields in einzel lens  
< Fig. 4 The analysis model of einzel lens and the simulation result >

**4. 칼럼 내 전자빔 거동의 해석**

소형 전자빔 칼럼 내 전자빔의 거동을 전산모사 하기 위하여 해석된 전기장에 의해 움직이는 전자빔의 움직임을 확인해야 한다. 전계와 자계 내에서 하전입자의 움직임은 로렌츠 힘으로 주어진다. [4]

$$F = q(E + v \times B) \tag{4}$$

전계와 자계가 모두 존재할 시 하전입자의 운동은 전계와 자계에 대한 운동과 전기장과 자기장에 수직인 운동의 합이므로 자계가 없는 전계 내에서의 하전입자의 운동은 뉴턴의 법칙을 따르게 된다.

$$m \frac{dv_x}{dt} = -eE_x \tag{5}$$

이 식을 시간에 대한 거리의 2계도 함수로 표시하고 두 번 적분을 하면 입자의 운동방정식을 구하게 된다.

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{e}{m}E_x t \tag{6}$$

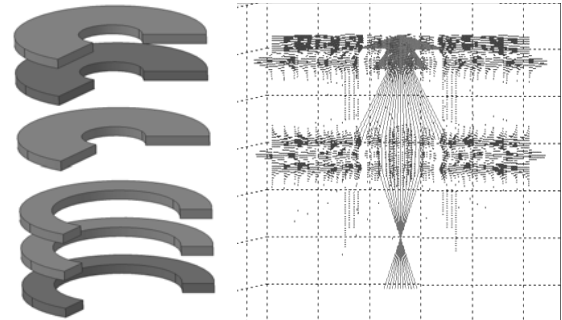
$$x = x_0 + v_0t - \frac{e}{2m}E_x t^2$$

**5. 칼럼 내 전자빔 전산모사**

전자빔 칼럼의 전체적인 모델링을 하고 렌즈에 의한 전기장의 전산모사를 이용하여 렌즈에서 나오는 전기장을 전산모사 하였고 전자빔의 운동방정식을 적용하여 칼럼 내 전자빔의 궤적을 전산모사 하였다(Fig. 5). 각각의 렌즈 두께는 2 $\mu$ m이고 Source

lens와 Einzel lens 사이의 거리는 3mm이다. Tip과 Source lens는 70 $\mu$ m 떨어져있다.

전산모사를 통해 Source lens와 Einzel lens이 전자빔에 미치는 전기장을 확인할 수 있고 중심축 상단에 위치한 Tip에서 방출된 전자들이 렌즈의 조리개를 통해 전자빔의 거동이 멈추는 것을 볼 수 있다. 최종적으로 Einzel lens의 상단 조리개를 통과한 전자들은 Einzel lens에 의해 집속되어 공작물에 도포된 resist와 반응하게 된다. Fig. 5b은 전자빔의 집속이 Einzel lens와 공작물 중간에 맞추어진 상태이다.



(a) column model (b) Result of the simulation  
< Fig. 5 Simulation of micro electron beam column >

**6. 결 론**

본 연구는 소형 전자빔 칼럼의 효율성을 높이기 위하여 칼럼 내 전자빔 거동의 전산모사를 개발하는 것을 목적으로 한다. 개발된 전자빔 거동 전산모사 프로그램은 여러 변수들의 파라미터 값들의 영향을 받는 전자빔 거동의 전산모사가 가능하다. 렌즈의 두께, 렌즈의 물성치(투과율), 조리개 직경, Source lens와 Einzel lens에 인가되는 전압, Einzel lens와 공작물 간의 거리 등등, 변수들의 다양한 파라미터 값을 입력받아서 전자빔의 궤적을 전산모사 함으로써 보다 높은 효율을 갖고 목표로 하는 최적의 분해능을 갖는 소형 전자빔 칼럼 설계에 적용시킬 수 있다.

**후 기**

본 연구는 지식경제부 차세대산업기술개발 사업으로 주관기관인 생산기술연구원의 지원으로 수행되었습니다.

**참고문헌**

1. 양성일, "Duality를 통해 바라본 전자장의 세계", 생능출판사
2. 이귀연, "Mathcad를 활용한 전자기학", 글누리
3. Arthur beiser, "Physics fifth edition", addison-Wesley
4. 이준식, 김도영, "평판 디스플레이 공학," 홍릉과학출판사, p.282