

SIMION 시뮬레이터를 이용한 정전렌즈의 빔 집속 성능

Beam Focusing Performance of Electrostatic Lens using SIMION Simulator

오명호¹, 정인승², 이종항^{3,✉}Maeng Ho Oh¹, In Sung Jeong² and Jong Hang Lee^{3,✉}¹ 한국산업기술대학교 지식기반기술에너지대학원 (Graduate School of Knowledge-based Technology & Energy, Korea Polytechnic Univ.)² 연세대학교 물리학과 (Department of Physics, Yonsei Univ.)³ 한국산업기술대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Korea Polytechnic Univ.)

✉ Corresponding author: ljh@kpu.ac.kr, Tel: 031-8041-0403

Manuscript received: 2008.11.21 / Accepted: 2009.1.6

Focused-ion-beam (FIB) system is capable of both machining and measuring in nano-scale; hence nano-scale focusing quality is important. This paper investigates design parameters of two electrostatic lenses in order to achieve the best ion beam focusing performance. Commercial SIMION simulator is used to optimize the dimensions of the condenser and objective lenses and investigate the influence of assembly error on focusing quality. The simulation results show that the beam focusing quality is not influenced by angle deviation within ± 0.02 deg and geometrical eccentricity within ± 50 micrometers.

Key Words: Focused Ion Beam (집속이온빔), Ion Column (이온컬럼), Design Parameter (설계파라미터), Condenser Lens (집속렌즈), Objective Lens (대물렌즈), Focusing Quality (집속상태), Assembly Error (조립오차)

1. 서론

최근 각광을 받고 있는 집속이온빔(Focused Ion Beam, FIB) 장치는 온라인으로 마이크로-나노급 가공, 측정, 증착이 가능하다. 이 집속이온빔 장치의 핵심부품은 이온을 발생시키는 이온원(ion source)과 이온을 수송 및 편향시켜주는 이온컬럼(column)이다. 이와 관련된 연구는 고 전류밀도, 고 선명도, 낮은 에너지 퍼짐 등의 빔특성, 이온수송 시 발생하는 수차의 최소화, 그리고 이 집속이온빔 장치를 이용한 가공 및 증착¹들이 있다.

이응기²는 마이크로 전자빔 칼럼을 설계하기 위하여 전자빔 거동에 대한 광학적 해석과 시뮬레이션을 수행하였다. Kawanami³는 축대칭장에서 근축이온제적을 분석하여, 초점거리, 확대율, 그리고 색수차와 구면수차의 특성을 해석적으로 유도하였

다. Sakaguchi⁴는 30-100kV의 가속전압 조건에서 최소 빔직경과 색수차 계수와의 관계를 연구하였다. 그는 미세 빔을 만들 수 있는 가속전압을 평가하여 이온컬럼의 설계에 응용하였다. Munro⁵는 CAD를 이용한 전자 및 이온컬럼의 설계방법을 연구하였다. 그는 정전렌즈와 디플렉터(deflector)의 전기장 분포, 전자제적과 수차, 동적수정, 쿨롱상호작용의 효과, 그리고 컬럼의 최적화와 공차들에 대하여 연구하였다. Morita⁶는 얼라인먼트 마크를 검출하여 분해능을 계산하였다. 그는 신호대잡음비에 따라 분해능이 변화되며, 가장 우수한 분해능을 만들 수 있는 최적의 전류영역이 존재한다고 주장하였다.

정전렌즈의 전극치수와 인가전압은 빔의 집속 성능에 영향을 준다. 그리고 부품들의 복잡성과 제작상의 한계로 인하여 조립된 렌즈는 이온빔의

중심축에 대해서 기하학적인 대칭을 이룰 수 없게 된다. 이것은 렌즈 내에 형성된 전기장이 축대칭의 등전위분포를 이루는데 방해요소가 된다는 것을 의미한다. 그러므로 이온빔은 최적의 집속성능을 발휘할 수 없게 된다. 따라서 양질의 미세한 빔을 얻기 위해서는 정전렌즈의 적절한 치수설계와 인가전압, 그리고 렌즈의 조립오차가 빔의 집속성능에 어떠한 영향을 미치는가를 파악할 필요가 있다.

본 논문에서는 SIMION 시뮬레이터를 이용하여 정전렌즈의 설계치수 변화가 빔 집속성능에 어떠한 영향을 미치는가를 파악하였다. 또한, 양질의 미세 빔으로 집속하기 위해서는 가공 및 조립오차가 어느 정도의 공차범위 내에 있어야 하는가에 대하여 연구하였다.

2. 기초이론

일반적으로 정전렌즈는 3 극 원통형상의 아인켈렌즈(Einzel lens)를 이용한다. Fig. 1 은 등전위분포를 이루고 있는 아인켈렌즈의 단면도이다. 렌즈의 중앙전극에는 영전위(ground), 양끝전극에는 일정한 전위를 가하여, Fig. 1 과 같이 렌즈 내부에 원주 방향(r)으로 전기장이 생성된다. 이온빔이 원통축 방향(z)으로 입사되면 렌즈 내부의 전기장에 의해서 이온빔의 경로가 변화되어 초점이 생성된다.

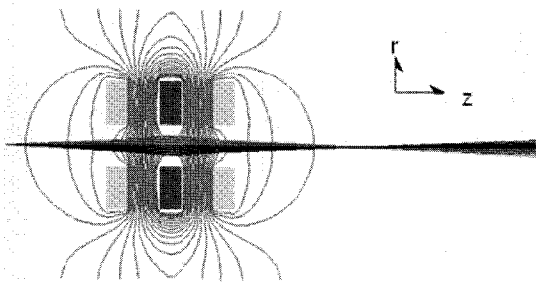


Fig. 1 Equipotential lines in the Einzel lens

전기장 내의 전하거동을 해석하기 위해서는 다음과 같은 몇 가지 가정⁷이 필요하다. ①입자는 고전적인 입자로 고려되며 파동성은 없다. ②입자의 전하와 질량만을 고려한다. ③입자는 정지장에서 움직인다. ④장치의 중앙경로는 축상에 있거나 대칭장의 평면상에 있다. ⑤첫 항의 효과만 고려한다. ⑥근축장만을 고려한다. ⑦입자간의 상호작용은

무시한다.

①,②번 가정은 이온을 고려한 경우 드브로이 물질파의 파장이 매우 작아 무시할 정도의 양이 되기 때문이며, ③,④번은 일반적인 렌즈시스템에서 구현하는 조건이다. ⑤,⑥번은 근축장으로 가정하면 고차 항들의 소거로 수식을 단순화시킬 수 있기 때문이다. ⑦번 가정은 포아송식으로 전하거동을 기술할 수 있게 해준다.

전하입자의 거동을 용이하게 해석하기 위해서 축대칭 렌즈를 고려한다. 렌즈내의 전위를 $V(r,z)$ 라고 하면, 원통좌표계에서의 Laplace 방정식은 다음 식과 같이 된다.

$$\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V}{\partial r} \right) = 0 \tag{1}$$

전하입자의 운동방정식과 에너지보존법칙을 이용하면 다음과 같은 근축케도방정식(paraxial ray equation)이 된다.

$$\frac{d^2 r}{dz^2} + \frac{V'(z)}{2V(z)} \frac{dr}{dz} + \frac{V''(z)}{4V(z)} r = 0 \tag{2}$$

이 식에 $R = rV^{1/4}$ 와 $T = V'/V$ 를 대입하면 Picht 방정식이 된다.

$$\frac{d^2 R}{dz^2} + \frac{3}{16} T^2 R = 0 \tag{3}$$

Picht 방정식에서 함수 R 을 찾아서 전기장내의 입자들의 궤적⁷을 구할 수 있다.

3. 시뮬레이션 방법

3.1 시뮬레이션 장치

Fig. 2 는 시뮬레이션에 이용된 이온컬럼의 구조이다. 이온원에서 발생된 이온들은 두 개의 정전렌즈와 가변어퍼처, 스티그메이터(stigmator), 디플렉터 등을 지나서 필요한 시료대 위치에 이온빔이 도달하게 된다. 이온빔이 두 개의 렌즈를 통과하게 되면 구면수차가 발생되며, 이 수차를 최소화하기 위해 두 개의 렌즈 사이에 가변어퍼처와 스티그메이터가 설치된다.

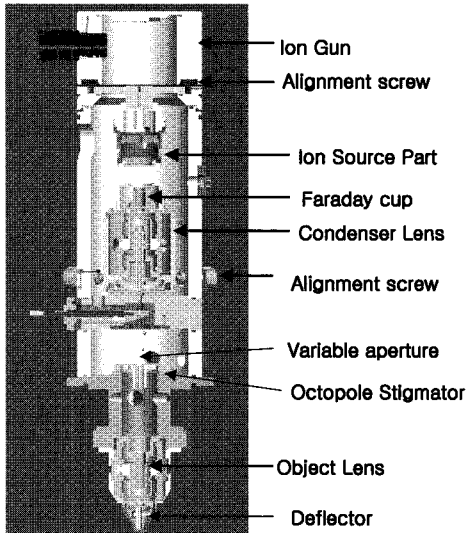


Fig. 2 Ion column structure

해석에 이용된 시뮬레이터는 SIMION 3D 7.0 이다. 이 시뮬레이터는 인가전압에 따른 등전위선을 표현할 수 있어 장치내의 전위분포를 관찰할 수 있으며, 전하입자의 초기조건을 입력하여 입자의 거동도 표현할 수 있다. 전하입자의 거동은 4 계 룬지쿠타(4th order Runge-Kutta)방법을 사용하여 라플라스 방정식의 해를 찾음으로써 묘사된다. 이온 빔의 경로변화를 관찰하는 것은 광학에서 빛의 경로를 분석하는 것과 동일한 효과를 얻을 수 있다.

3.2 시뮬레이션 방법

3.2.1 렌즈전극의 치수변화에 따른 집속성능

도면상의 설계치수를 SIMION 에 입력할 때, 이온빔의 경로에 기여도가 큰 근축 영역은 좀 더 세밀하게 입력하여 전압이 가해지는 전극과 그렇지 않은 곳을 구별하였다. 이온컬럼은 5,000,000 개의 픽셀(pixel)을 가지고 5,000×1,000 의 크기로 실행보다 10 배(편심과 편각 시뮬레이션에서는 100 배)로 확대하여 입력하였다.

집속이온빔 장치에서 빔의 집속에 기여도가 큰 부분은 이온빔 발진부, 집속렌즈, 대물렌즈, 그리고 디플렉터이다. 이온빔 발진부의 전압은 이온빔의 가속에 기여하므로 시뮬레이션 시 초기에너지가 된다.

입사이온의 조건은 Table 1 과 같이 이온의 종류, 전하량, 에너지, 빔 간격, 입사방법(평행입사와 구면입사)이 있으며, 렌즈에 입력된 이온빔은 중심

축으로부터 일정한 간격으로 평행한 입사빔으로 간주하였다.

Table 1 Incident ion beam condition for condenser lens

Ion source	Charge	Energy	Beam interval	Aperture dia. of faraday cup
Ga	+1	12 keV	0.01 mm	0.4 mm

Table 2 는 렌즈전극의 치수변화와 관련된 조건으로써, 시뮬레이션의 종류는 전극 사이의 거리, 전극두께, 전극구멍의 크기들에 대한 조합이 된다. Table 2 내의 (*)는 시뮬레이션 시 비교분석을 용이하게 하기 위한 기준렌즈의 치수로서, 전극 사이의 거리 5mm, 전극두께 1mm, 전극구멍의 직경 3mm 를 이용하였다. Fig. 3 은 기준렌즈의 단면도이다.

Table 2 Experimental conditions

Experiment parameters	Dimension
Electrode distance	1, 3, 5(*), 7, 9 mm
Electrode thickness	1(*), 2, 3, 4, 5 mm
Electrode hole diameter	3(*), 4, 5, 6, 7, 8 mm

* : the dimension of reference lens

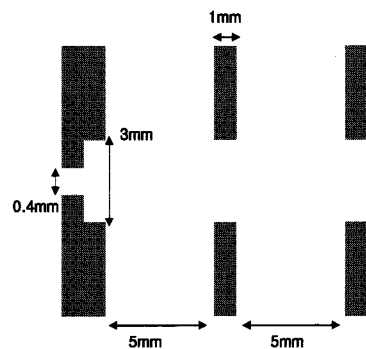


Fig. 3 Schematic diagram of reference lens

시뮬레이션 순서는 다음과 같다. 각각의 모형에 대해 집속렌즈의 인가전압을 변화(대물렌즈의 인가전압 변화는 없음)시켜 인출빔의 수와 빔의 분포를 관찰한다. 이때, 대물렌즈 지역에서 빔이 가장 많이 집속되는 집속렌즈의 인가전압을 찾는다. 이 집속렌즈의 인가전압에 대해서 대물렌즈의

인가전압을 변화시켜서 인출빔의 수와 직경을 측정하였다.

3.2.2 조립 및 가공오차에 따른 집속성능

시뮬레이션 시 집속렌즈와 대물렌즈에서 기하학적인 중심축에 편심과 편각이 존재한다고 가정하였으며, 이 값들의 변화에 따른 빔의 크기와 빔 중심축의 위치를 측정하였다.

나머지 시뮬레이션 방법은 “3.2.1. 렌즈전극의 치수변화에 따른 집속성능”과 동일하다. 입사빔의 조건은 Table 1 과 동일하나, 빔 관찰을 용이하게 하기 위해서 이온에너지를 15keV 로 설정하였다.

4. 시뮬레이션 결과

4.1 렌즈전극의 치수변화에 따른 집속성능

대물렌즈 지역에 빔이 용이하게 집속되는 집속 렌즈의 인가전압은 2kV 이었다. 이 조건과 전극두께 1mm, 전극의 구멍직경 3mm 에서 대물렌즈의 인가전압과 전극 사이의 간격을 변화시킨 시뮬레이션 결과가 Fig. 4 이다. 전극간격이 3mm 에서 빔의 직경변화가 가장 크며, 그 외의 전극간격에서는 빔 직경은 완만하게 변화하였다.

었다. 또한, 기준전극보다 전극두께가 증가하고, 집속렌즈의 인가전압이 증가하면 인출빔의 수는 감소한다. 이것은 전극두께가 증가하면 전극간격이 좁아지고, 작은 영역에서 강한 전기장을 받기 때문이다. 즉, 강한 전기장은 빔의 굴절률을 증가시켜 초점위치를 집속렌즈 쪽으로 이동시킴으로써 대물렌즈를 통과하는 빔의 수를 감소시키기 때문이다.

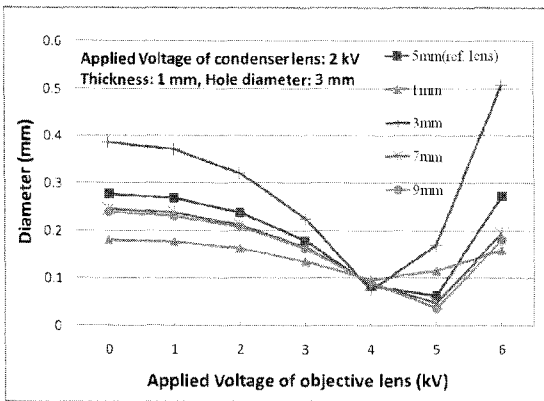


Fig. 4 Beam focusing performance for the variation of electrode distance according to applied voltage of objective lens

Fig. 5 는 전극두께 1mm 와 전극간격 5mm 에서 전극구멍의 직경과 대물렌즈의 인가전압을 변화시킨 시뮬레이션 결과이다. 집속렌즈의 인가전압이 3kV 이상이 되면 인출빔의 수가 줄어들며, 전극구멍의 직경이 감소하면 인출빔의 수도 같이 감소하

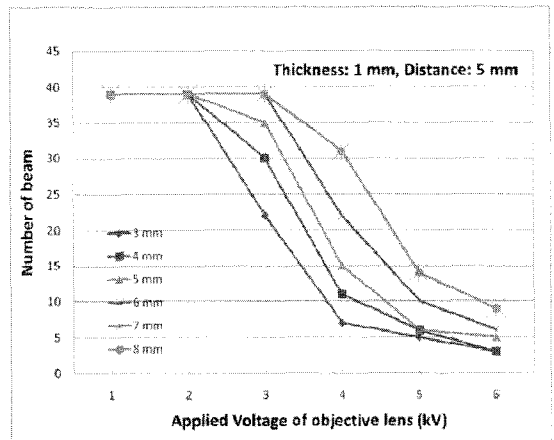


Fig. 5 Number of beam for the variation of electrode-hole diameter according to applied voltage of objective lens

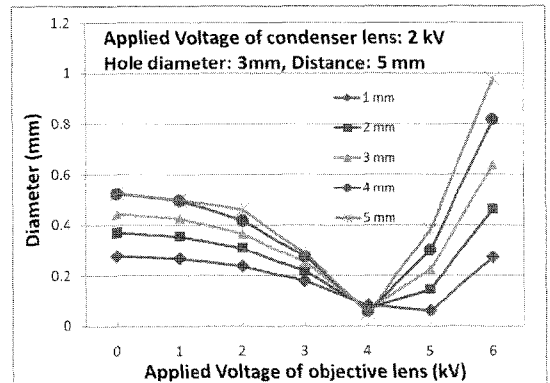


Fig. 6 Beam focusing performance for the variation of electrode thickness according to applied voltage of objective lens

Fig. 6 은 전극구멍의 직경 3mm, 전극간격 5mm, 집속렌즈의 인가전압이 2kV 일 때 전극두께 변화에 대한 빔 직경이다. 대물렌즈의 인가전압을 증가시키면 4kV 에서 빔직경이 최소가 된다. 또한 전

극두께를 증가시키면 빔직경이 증가 또는 감소하는 기울기가 증가한다. 즉, 기준전극보다 두께를 증가시키면 빔직경은 4kV 이하에서는 급격히 감소하나, 그 이상에서는 급격히 증가한다. 이와 같이 전극두께에 관한 시뮬레이션 결과는 Fig. 5의 결과에 대한 원인과 동일한 것으로 판단된다.

Table 3 은 이상의 시뮬레이션 결과들 중에서 빔 집속이 우수한 것들만 모아 놓은 것이다. Table 3 에서 A, B, C 그룹의 표기는 인가전압의 변화에 따른 빔직경의 변화가 유사한 경향이 있는 것들을 모아서 나타낸 것이다.

Table 3 Simulation results for the best beams

No.	Symbol	Thick-ness	Hole Dia.	Dist-ance	Applied Voltage	Min. Beam Dia(mm)	Group
1	1080	1	8		3	0.01819	C
2	1060	1	6		2	0.03701	C
3	990	1	3	9	5	0.03708	A
4	2080	2	8		4	0.03712	C
5	1070	1	7		3	0.04042	C
6	4080	4	8		2	0.05123	C
7	3080	3	8		3	0.05171	C
8	5030	5	3		4	0.05368	B
9	2040	2	4		5	0.05798	A
10	4030	4	3		4	0.05859	B
11	1030	1	3		5	0.06197	A

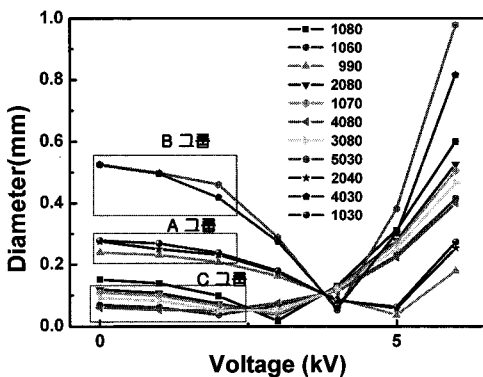


Fig. 7 Simulation results of the best beam diameter(A group: 990, 2040, 1030, B group: 5030, 4030, C group: 1080, 1060, 2080, 1070, 4080, 3080)

Fig. 7 은 Table 3 의 결과를 그림으로 나타낸 것이다. 그림과 같이 A 그룹은 인가전압에 따라 기준

렌즈와 유사한 빔직경의 경향을 보여주고 있다. A 그룹은 인가전압에 따라 빔직경의 변화가 C 그룹에 비하여 제어하기가 용이하다. B 그룹은 A 그룹보다는 인가전압이 작은 영역에서는 제어가 쉽지만, 인가전압이 높아지면 빔들이 발산하여 집속 성능이 떨어진다는 것을 알 수 있다. 따라서 A, B, C 그룹 중에서 A 그룹의 경우가 인가전압의 변화에 따른 빔직경의 제어가 가장 용이할 것이라고 판단된다.

4.2 조립 및 가공오차에 따른 집속성능

정전렌즈에 조립 및 가공오차가 있게 되면 조립된 렌즈들은 편심 또는 편각이 있게 된다. 이러한 렌즈의 기하학적인 편심과 편각은 전기장분포를 변화시켜빔의 이동경로에 영향을 주게 된다.

Fig. 8 과 Fig. 9 는 대물렌즈의 중심축이 10, 20, 30, 40, 50 μm 만큼 편심되고, 각각의 경우에 대해 빔이 ± 0.01 , ± 0.02 도로 편각 될 경우 시료대에서 측정된 빔 크기와 중심이다. 그림과 같이 렌즈에 +0.02 도의 편각과 50 μm 의 편심이 있게 되면 빔크기는 774nm 로 감소하나, 빔중심은 160 μm 만큼 벗어나게 된다.

Fig. 8 과 Fig. 9 는 50 μm 이내의 편심과 ± 0.02 도 이내의 편각에서는 빔크기와 빔중심이 제어 가능한 범위 내에 있음을 보여준다. 그러나 50 μm 와 ± 0.02 도 이상의 편심과 편각이 존재하게 되면 초점이 형성되지 않거나 시료대 쪽으로 빔이 인출되지 않는 현상을 관찰할 수 있었다.

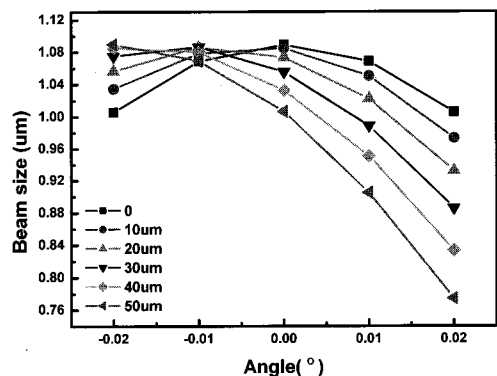


Fig. 8 Beam size for angle deviation error

편심이 없고 집속렌즈의 인가전압이 4.5kV 이면 대물렌즈에서는 평행한 빔을 얻을 수 있었으며,

집속렌즈의 인가전압이 4.5kV 이고 대물렌즈의 인가전압이 7.25kV 가 되면 최소의 빔크기를 얻을 수 있었다.

Fig. 10 은 렌즈전극들이 편심되었을 경우(편각이 없음)에 대한 빔크기와 빔중심을 나타낸 것이다. 그림과 같이 편심이 증가하면 빔중심은 증가하나 빔크기는 감소하는 경향을 보여준다.

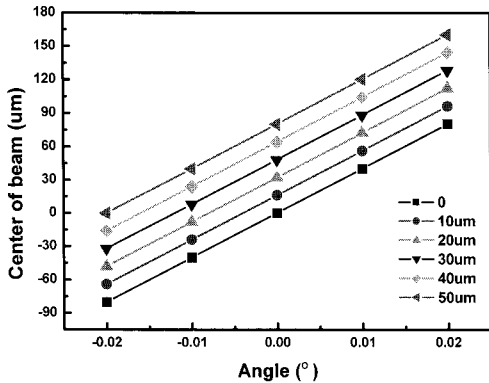


Fig. 9 Beam center for angle deviation error

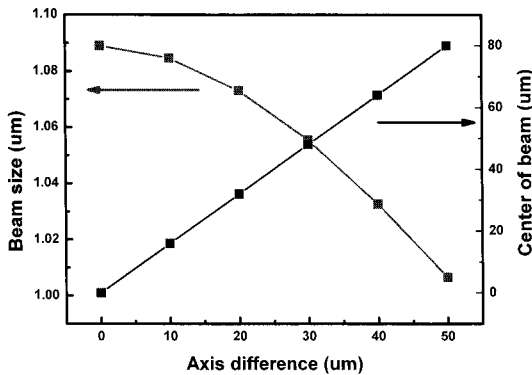


Fig. 10 Beam size and center according to geometrical eccentricity(angle deviation error of zero deg.)

5. 결론

이온컬럼은 여러 부품으로 구성되어 있으므로 성능의 최적화를 위해서는 부품들의 치수설계가 중요하다. 본 논문에서는 SIMION 을 이용하여 정전렌즈의 설계치수와 가공 및 조립오차에서 생기는 편심 및 편각들이 빔 집속도에 미치는 영향을 시뮬레이션 한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 렌즈전극의 설계치수 변화에 대한 해석결과, 기준렌즈의 경우가 가장 좋은 집속도를 보여주었다. 기준렌즈로부터 설계치수의 변화는 집속도를 감소시키는 경향을 보여주었다.

(2) 편심과 편각에 대한 해석결과, 편심 ±50 μm 와 편각 ±0.02 도 이내에서는 집속도에 큰 영향을 주지 않았다. 그러나 편심과 편각이 그 이상으로 증가하게 되면 이온컬럼으로부터 빔을 인출할 수 없거나 집속도가 현저히 감소하는 결과를 얻을 수 있었다.

후 기

본 연구는 지식경제부에서 지원하고 있는 “고효율 에너지빔 응용 초미세 부품 제조용 In-line 시스템 개발”로부터 지원을 받아 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Lee, H. W., Han, J., Min, B. K. and Lee, S. J., “Simulation of Focused Ion Beam Processes for Micro-Nano Machining,” Journal of the KSPE, Vol. 25, No. 3, pp. 44-49, 2008.
2. Lee, E. K., “Study on Electron Optic Analysis for Electron-beam Processes,” Journal of the KSPE, Vol. 25, No. 3, pp. 15-22, 2008.
3. Kawanami, Y. and Ishitani, T., “General ization of Electrostatic Lens Characteristics using the Picht Ray Trajectories,” J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 17, No. 4, pp. 1400-1405, 1999.
4. Sakaguchi, K. and Sekine, T., “Focused Ion Beam Optical Column Design and Consideration on Minimum Attainable Beam Size,” J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 16, No. 4, pp. 2462-2468, 1998.
5. Munro, E., “Electron and Ion Optical Design Software for Integrated Circuit Manufacturing Equipment,” J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 15, No. 6, pp. 2692-2791, 1997.
6. Morita, T., Arimoto, H., Miyauchi, E. and Hashimoto, H., “Alignment Accuracy of Focused Ion Beam Implantation,” Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 26, No. 6, pp. 955-958, 1987.
7. Dahl, P., “Introduction to Electron and Ion optics,” Academic press, 1973.