

<연구논문>

최적 FIB렌즈구조 설계를 위한 Simulator 개발

송현옥 · 박화식* · 황호정* · 박선우** · 김철주**
조광섭*** · 김태환*** · 서윤호*** · 강승언***

*중앙대학교 전자공학과, **서울시립대학교 제어계측공학과
***광운대학교 물리학과
(1992년 4월 16일 접수)

Development of Simulator for the Design of Optimal FIB Lens Structure

Song Hyun-Wok, Park Hwa-Sik, Hwang Ho-Jung, Park Woo, Kim Thul-Ju,
Cho Guang-Sup, Kim Tae-Whan, Seo Yoon-Ho and Kang Seung-Oun

Department of Electrohic Engineering Chung-Ang Univ.
Department of Control & Instrumentation Engineering Seoul City Univ.
****Department of Physics Kwang-Woon Univ.*

(Received April 16, 1992)

요 약— 경계요소법을 이용하여 Finely-focused ion beam 시스템을 위한 전계형 렌즈용 시뮬레이터를 개발하였다. 경계요소법을 시뮬레이터에 적용함으로써 기존의 유한요소법, 차분근사법에서는 피할 수 없었던 내부격자망 구성이 불필요하게 됨에 따라 계산속도를 현저히 줄일 뿐만 아니라 불규칙 경계에 대한 요소분할이 가능하게 되어 최적렌즈구조 설계의 새로운 요소인 전극구조의 모양을 자유롭게 시뮬레이션할 수 있게 되었다. 또한 개발된 시뮬레이터를 이용하여 최적조건을 만족하는 구조를 제안한다. 이때 렌즈설계조건은 beam half-angle 3.0 mrad, working distance 50 mm, 빔에너지 퍼짐 (beam energy spread) 10 eV, 가속에너지 35 keV이다.

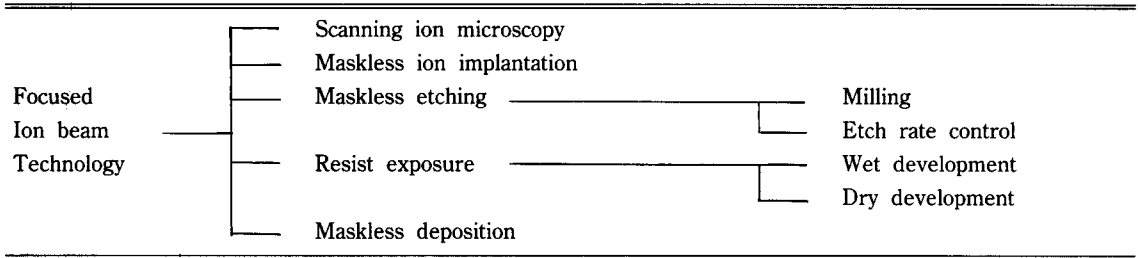
Abstract— We developed a simulator in which BEM (Boundary Element Method) is employed for the design of FIB lenses. It is possible to get a marked reduction of CPU time compared with other simulators which use FEM or FDM based on a large size of internal mesh, and it is also possible to discretize irregular boundary exactly. These advantages of BEM can make it possible to simulate a new shape of electrode which is an important factor in the design of optimal lenses structure. Thereby, we proposed a new lenses structure satisfies the optimal condition. The lense design conditions are 3.0 mrad of beam half-angle, 50 mm of working distance, 10 eV of beam energy spread and 35 keV of accelerating energy.

1. 서 론

Submicron 패턴을 가지는 VLSI 연구와 개발에 있어서 focused ion beam(FIB) 기술은 전자빔 식각의 초소선폭 제한의 극복과 반도체 소자제작에 있어서

마스크 없는 공정(direct writing)을 가능하게 함으로서 그 중요성을 더해가고 있다. 이러한 FIB 기술의 응용분야로서는 maskless implantation[1, 2], milling [3], lithography[4], film deposition[3] 등이 있으며 표 1[5]에 나열하였다.

표 1. FIB 기술의 분야별 응용분야



이온빔을 집속하기 위한 렌즈설계에 있어서 렌즈의 구조는 렌즈수차(spherical and chromatic aberration)에 영향을 미치며, 그 수차에 의해서 target의 beam size가 변화함으로써 렌즈구조에 따른 전위의 해석과 그 전위에 의한 렌즈수차의 해석은 매우 중요한 과점이다.

경통내부의 전위를 계산하는 방법에는 유한차분법(FDM : Finite Difference Method)[6], 유한요소법(FEM : Finite Element Method)[7]과 경계요소법(BEM : Boundary Element Method)[8] 등이 있다. 유한차분법과 유한요소법은 렌즈전역의 모든 요소절점에서 전위를 구해야 하며 메모리 용량의 증가와 계산시간이 길어진다는 단점과 격자망 크기에 렌즈의 모양이 제한을 받는 반면 경계요소법은 해석영역의 경계에서 직접 전위를 구해 이온빔의 궤적을 구함으로써 계산시간의 감소를 이룰 수 있다. 특히 실제 렌즈상의 곡면처리 등의 문제에서는 경계요소법이 가장 적절하다. 따라서 본 연구에서는 일정요소, Gauss 적분을 이용한 BEM 정식화, 이산화에 의하여 다양한 모양을 가지는 렌즈에서의 빔궤적, 색수차(chromatic aberration), 구면수차(spherical aberration) 등을 효율적으로 계산가능한 시뮬레이터를 개발하였다.

2장에서는 근축선방정식(paraxial ray equation)의 유도과 수차방정식을 나타내었으며 3장에서는 경계요소법을 적용하기 위한 경계조건의 설정과 지배방정식에 대한 이산화과정을 설명하였고 4장에서는 모의실험결과와 수차방정식에 의한 개선을 비교하였으며, 5장에서는 결론을 나타내었다.

2. 근축선방정식

전하가 근축선상을 비행할 때, 경통내부의 원통좌

표계에서 θ 방향으로 전위의 변화가 없다면 전하는 회전하지 않고 비행하게 된다. 그러므로 계산된 전위분포면에서의 전하운동은 r, z의 두축으로써 표시된다[9].

$$m \frac{d^2r}{dt^2} = -q \frac{\partial \Phi(r, z)}{\partial r}$$

$$m \frac{d^2z}{dt^2} = -q \frac{\partial \Phi(r, z)}{\partial z} \tag{1}$$

전하가 비행하는 위치는 다음과 같다.

$$\frac{d^2r}{dz^2} = \left[\ddot{r} - \frac{dr}{dz} \right] / \dot{z} \tag{2}$$

에너지보존법칙의 운동에너지와 potential 에너지관례로부터 식 (3)이 된다.

$$E_{total} = \frac{1}{2} m \dot{z}^2 \left[1 + \left(\frac{dr}{dz} \right)^2 \right] + q\Phi(r, z) \tag{3}$$

위 식 (2)와 식 (3)으로부터 전하의 비행방정식은 식 (4)로 쓸 수 있다.

$$\frac{d^2r}{dz^2} = \left[1 + \left(\frac{dr}{dz} \right)^2 \right] \frac{q}{2} \left[- \frac{\partial \Phi(r, z)}{\partial r} + \frac{dr}{dz} \frac{\partial \Phi(r, z)}{\partial z} \right] / [E_t - q\Phi(r, z)] \tag{4}$$

경통내부의 전하가 내부전위분포에 미치는 영향을 무시하고 전하가 근축선상을 비행할 때($r \approx 0$, $dr/dz < 1$ [9]) 경통내부의 전위는 원통좌표계의 laplace 방정식으로부터 식 (5)와 같이 표현된다.

$$\Phi(z, r) = \Phi(z) - \frac{r^2}{4} \Phi''(z) + \frac{r^4}{64} \Phi^{(4)}(z) \dots \tag{5}$$

그러므로

$$\frac{\partial \Phi}{\partial r}(r, z) \cong -\frac{r}{2} \Phi''(z), \quad \frac{\partial \Phi}{\partial z}(r, z) \cong \Phi'(z), \quad \Phi(r, z) \cong \Phi(z)$$

이 되며 식 (4)의 $E_t - q\Phi(r, z)$ 는 total 에너지에서 potential 에너지의 차이므로 다음과 같이 표시된다.

$$E_{total} - q\Phi(r, z) = \text{Kinetic Energy} \quad (6)$$

위 식 (6)은 식 (7), (8)과 같이 쓸 수 있다.

$$q(V_{source} - \Phi(r, z)) = qU(z) \quad (7)$$

$$K.E = qU(z) \quad (8)$$

그러므로 식 (4)는 식 (9)와 같이 된다.

$$\frac{d^2 r}{dz^2} + \frac{U'(z)}{2U(z)} \frac{dr}{dz} + \frac{U''(z)}{4U(z)} r = 0 \quad (9)$$

렌즈의 이미지면에서의 구면수차(C_{si}), 색수차(C_{ci}) 방정식은 다음과 같다[10].

$$C_{si} = \frac{1}{16 U_i^{1/2} r_i^4} \int_{z_0}^{z_i} \left\{ \frac{5}{4} \left(\frac{U''}{U} \right)^2 + \frac{5}{24} \left(\frac{U'}{U} \right)^4 \right\} r^4 + \frac{14}{3} \left(\frac{U'}{U} \right)^3 r' r^3 - \frac{3}{2} \left(\frac{U''}{U} \right)^2 r'^2 r^2 \Big\} U^{1/2} dz \quad (10)$$

$$C_{ci} = \frac{U_i^{1/2}}{r_i^2} \int_{z_0}^{z_i} \left[\frac{U'}{2U} r' r + \frac{U''}{4U} r^2 \right] U^{-1/2} dz \quad (11)$$

위 식 (10, 11)에서 $r=r(z)$ 이며 식 (9)의 해이다. 그리고 $U=U(z)$, $U_i=U(z_i)$ 이며 $U(z)=V_{source} - \Phi(z)$ (축전위)이다.

3. 모델의 수치해석

렌즈경통내에서의 빔 궤적을 구하기 위하여는 식 (9)와 같이 경통내의 전위를 알아야 한다. 경통내의 전위변화는 Laplace 방정식(space-charge free)을 만족하는 것으로 생각하면 경계요소법을 적용하므로써 근축선방정식에 필요한 축상의 전위만을 경계조건으로 구할 수 있다. 다른 수치계산법, 즉 유한차분법이나 유한요소법 등의 방법을 이용할 경우 반드시 경통내부를 세부요소로 분할하여 각 세부요소의 절점에서 전위값을 계산하여야만 한다. 이 때문에 계산시간이 증대되며 이를 해결하기 위해 성진요소를 사용할 경우

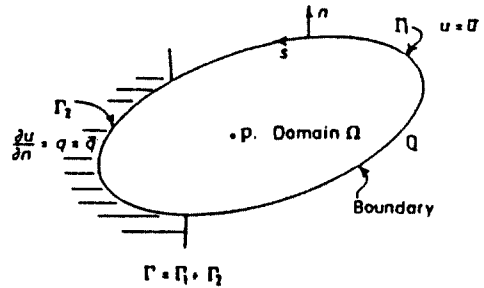


그림 1. 면적 Ω 의 경계영역 분할.

큰 허용오차를 감수하지 않으면 안된다. 이 밖에도 변곡표면에서의 요소분할이 곤란하므로 실제 구조의 적용에 어려움이 있게 된다.

정식화 및 일정요소에 의한 이산화 : 해석하고자 하는 경통내의 전하가 축전위가 미치는 영향을 무시할 수 있는 경우 Laplace 방정식의 해인 전위를 구하면 된다.

그림 1과 같이 경계요소법을 적용시키는 경계영역을 Γ_1, Γ_2 로 나누어 Γ_1 상에서는 일정한 전위 u 가 주어지고 Γ_2 상에서는 경계법선 방향으로 전위미분값 q 가 경계조건으로 주어졌을 경우 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla^2 u = 0; \text{ 풀고자 하는 방정식}$$

$$u = u'; \Gamma_1 \text{ 상에서의 경계조건값}$$

$$q = q'; \Gamma_2 \text{ 상에서의 경계조건값}$$

기본해 u^* 를 대입한 Laplace 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla^2 u^*(p, p') + \delta(p, p') = 0 \quad (12)$$

$\delta(p, p')$: Dirac의 delta 함수

Green 정리를 이용하여 영역적분을 경계적분으로 바꿔주면 다음과 같다.

$$\int_{\Omega} [u(p) \nabla^2 u^*(p, p') - u^*(p, p') \nabla^2 u(p)] d\Omega = \int_{\Gamma} [u(Q) q^*(Q, p') - u^*(Q, p') q(Q)] dT \quad (13)$$

q^* : 기본해의 법선성분

p, p' : 영역내의 점

Q, Q' : 경계상의 임의점과 기준점

q : u 의 normal 성분

윗 식의 좌변을 정리하여 다시 쓰면 기본해 u^* 을 갖는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$u(p') = - \int_{\Gamma} [u(Q)q^*(Q, p') - u^*(Q, p')q(Q)] d\Gamma$$

$$u^*(p, p') = \frac{1}{2\pi} \log \frac{1}{r(p, p')} \quad (14)$$

여기서 r 은 영역내의 독점 p, p' 사이의 거리를 의미한다. 기본해를 대입하여 경계상의 점 Q' 에 관한 식으로 변환하면 다음과 같이 표현된다.

$$\pi u(Q') = - \int_{\Gamma} \left[u(Q) \frac{\partial}{\partial n} \left\{ \log \frac{1}{r(Q, Q')} \right\} - \log \left\{ \frac{1}{r(Q, Q')} \right\} \frac{\partial u(Q)}{\partial n} \right] d\Gamma \quad (15)$$

식 (15)를 Γ 상의 임의의 점 즉, $Q' = M_i$ 에 관한 식으로 표현하면 식 (16)이 된다.

$$\pi u_i = \sum_{j=1}^N \left[\left\{ - \int_{C_j} \frac{\partial}{\partial n} \left(\log \frac{1}{r} \right) ds \right\} u_j + \left\{ \int_{C_j} \log \frac{1}{r} ds \right\} q_j \right] \quad (16)$$

여기서 C_j 의 적분항은 요소 C_j 상의 선적분하며

$$h'_{ij} = - \frac{1}{2\pi} \int_{C_j} \frac{\partial}{\partial n} \left(\log \frac{1}{r} \right) ds$$

$$g_{ij} = \frac{1}{2\pi} \int_{C_j} \log \frac{1}{r} ds \quad (17)$$

로 두면 식 (16)은 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{1}{2} u_i = \sum_{j=1}^M [h'_{ij} u_j + g_{ij} q_j] \quad (18)$$

식 (16)은 i 번째 절점 M_i 에 관한 식이다. $i=1 \sim N$ 개의 각절점에 관한식을 쓰면 N 개의 식이 얻어지고 이를 Matrix로 쓰면 다음과 같다.

$$\frac{1}{2} u = H' u + G q \quad (19)$$

$$H = \frac{1}{2} I - H' \text{라 하면 식 (19)는}$$

$$H u = G q \quad (20)$$

가 되어 N 원 연립 1차 방정식이 된다. 식 (20)의 계수 Matrix H 와 G 의 각 요소는 다음과 같다.

$$h'_{ij} = \frac{\delta_{ij}}{2} + \frac{1}{2\pi} \int_{C_j} \frac{\partial}{\partial n} \left(\log \frac{1}{r} \right) ds$$

$$g_{ij} = \frac{1}{2\pi} \int_{C_j} \log \frac{1}{r} ds \quad (21)$$

여기서 δ_{ij} 는 Kronecker의 delta이며

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & ; i=j \\ 0 & ; i \neq j \end{cases}$$

인 관계가 성립한다.

그림 1에서와 같이 경계조건에 따라 기지값과 미지값이 존재하는데 식 (20)을 이용하여 이 값들을 재배열하여 나타내면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$[K] [X] = [F] \quad (23)$$

이 때 X 는 미지값, F 는 기지값의 Matrix가 되어 X 에 관한 N 원 연립 1차 방정식이 되고 미지수 $X = K^{-1}F$ 는 Gauss 소거법으로 풀게된다.

4. 시뮬레이션 결과

이온빔의 집속을 위한 렌즈는 Einzel 렌즈가 일반적이며, 이 Einzel 렌즈의 양측 바깥전극판의 전위를 같게 함으로서 들어오는(image side) 빔과 나가는(object side) 빔의 에너지 변화가 없으며 3장의 전극판으로 구성되어 있다.

본 장에서는 Einzel 렌즈에 대한 모의실험결과를 보고 새로운 렌즈 최적화에 대해 논술하겠다.

4.1. 평판형 렌즈구조 결정

구면수차 d_s 와 색수차 d_c , 전체수차 d_t 는 다음 식 (24)[10]와 같다.

$$d_s = 1/2 C_{si} \alpha_i^3$$

$$d_c = C_{ci} \alpha_i (\Delta E/E) \quad (24)$$

$$d_t = (d_s^2 + d_c^2)^{1/2}$$

위 식 (24)에서 C_{si} , C_{ci} 는 렌즈의 이미지면에서의 수차계수이며 ΔE 는 빔에너지 퍼짐, E 는 가속에너지, α_i 는 이미지축의 빔 수렴각이다.

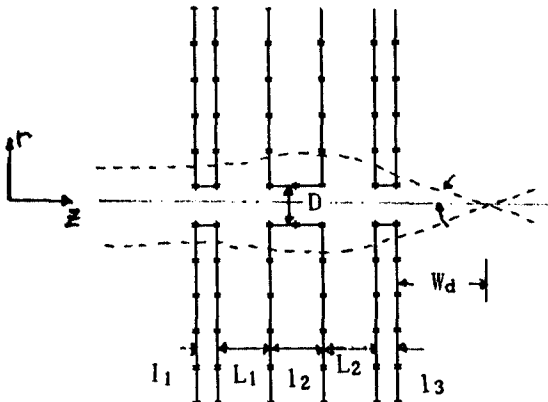


그림 2. Eizel 렌즈디자인 변수, object면 Z_0 , image면 Z_i , working distance W_d , beam half angle α , 및 가운데 전극전압 V .

표 2. 렌즈설계조건

Accelerating energy E_a	35 keV
Beam energy spread ΔE	10 eV
Beam half-angle α_i	3.0 mrad
Working distance W_d	50 mm

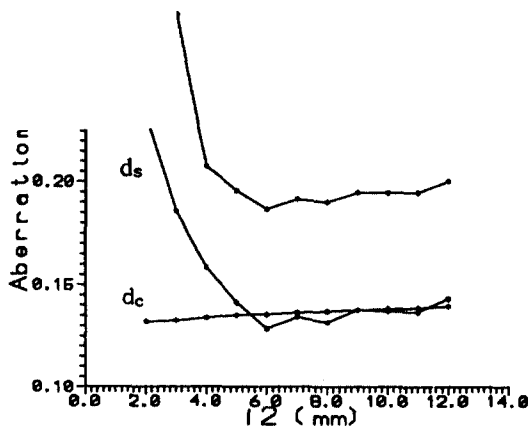


그림 3. 가운데 전극 두께 l_2 의 변화에 따른 구면수차 d_s , 색수차 d_c , 및 전체수차 d_i 의 값.

모의실험 할 Einzel 렌즈의 구조와 조건은 그림 2와 표 2에 나타내었다. 렌즈의 구조를 확정하는 방법은 한 요소씩 정해나가는 방법을 택하였으며, 순서는 l_2 의 두께를 정하고 다음으로 D 의 크기, L_1 , L_2 의 순으로 하였다.

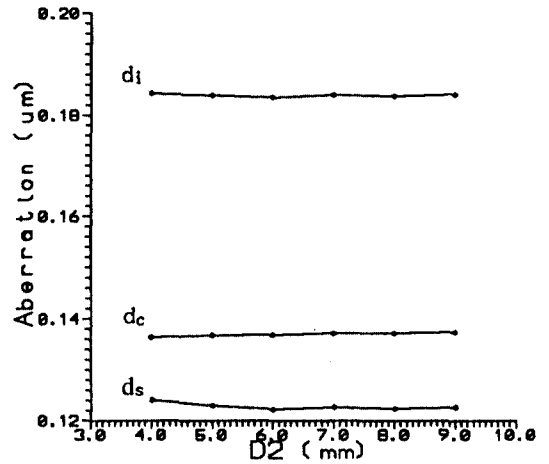


그림 4. 가운데 전극 구멍크기 D 의 변화에 따른 구면수차 d_s , 색수차 d_c 및 전체수차 d_i 의 값.

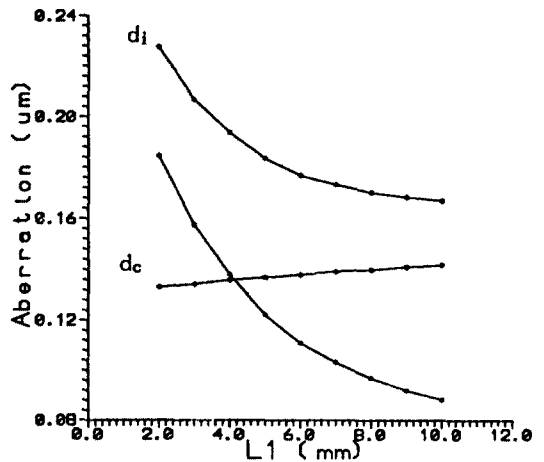


그림 5. 앞 전극간격 L_1 의 변화에 따른 구면수차 d_s , 색수차 d_c 및 전체수차 d_i 의 값.

그림 3는 $l_1=l_3=2$ mm, $D_1=D_2=D_3=3$ mm, $L_1=L_2=5$ mm로 하고 l_2 두께를 2 mm에서 12 mm까지 변화시키며 d_s , d_c , d_i 를 살펴본 것이다. d_s 는 l_2 가 6 mm인 값에서 제일 작은 값을 보였으며, d_c 는 l_2 가 증가할수록 약간씩 커지고 있다. 그림 4는 l_2 를 6 mm로 정하고 D_2 를 변화시키면서 모의실험한 결과이다. D_2 가 커질수록 d_s , d_c 가 줄어들고는 있으나 큰 영향을 주지는 못하고 있다. 그림 5의 경우 L_1 의 길이가 커질수록 d_i 의 값이 작아지고는 있으나 상대적으로 높은 전압과 렌즈크기의 증가를 초래하므로 $L_1=5$ mm인 경우로 선택한다. 그림 6의 경우 최소 d_i 값을

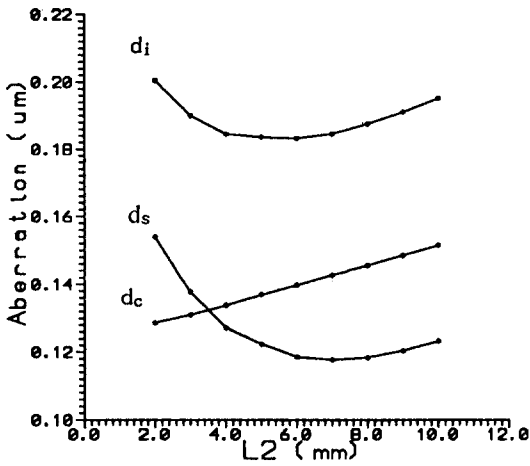


그림 6. 뒤 전극간격 L_2 의 변화에 따른 구면수차 d_s , 색수차 d_c 및 전체수차 d_i 의 값.

가지는 L_2 는 6 mm인 경우이나 그림 5 조건의 모의 실험보다 큰 값이므로 $L_2=5$ mm의 값으로 정한다.

각 모의실험 결과 색수차는 전계가 강할수록 작은 값을 갖고 구면수차는 전계의 변화가 작을수록 작은 값을 보여주었다. 위의 모의실험결과로 결정된 렌즈의 모의실험 결과를 그림 7에 보였으며 계산된 수차의 값은 구면수차 $1.047E4$ mm, 색수차 $1.578E2$ mm이다.

4.2. 평판형 렌즈구조에 대한 고찰

그림 7는 Einzel 렌즈에 대한 시뮬레이션 결과이다. 식 (10)과 식 (11)에서 보듯이 색수차와 구면수차는 $U''(z)/U(z)$ 에 유사한 모양을 가짐을 알 수 있다. 또한 $U''(z)/U(z)$ 의 peak 값을 위치와 렌즈의 edge 부분과 일치하는 것을 볼 수 있다.

그림 8는 렌즈의 축전위값을 식 (25)로 근사하여 그린 것이다.[9]

$$\begin{aligned} \Phi(z) = & V_2 - \frac{V_2 - V_1}{\pi(1-d)} \left[(z+1)\tan^{-1}\frac{z+1}{R_2} + (z-1)\tan^{-1}\frac{z-1}{R_2} \right. \\ & \left. + 2R_2 - 2R_2 - (z+d)\tan^{-1}\frac{z-d}{R_1} - (z-d)\tan^{-1}\frac{z-d}{R_1} \right] \end{aligned} \quad (25)$$

그림 8의 전위곡선을 4구간으로 구분하면, 첫번째로 선형구간, 두 개의 포물선 구간, 마지막으로 선형구간으로 나눌수 있다.

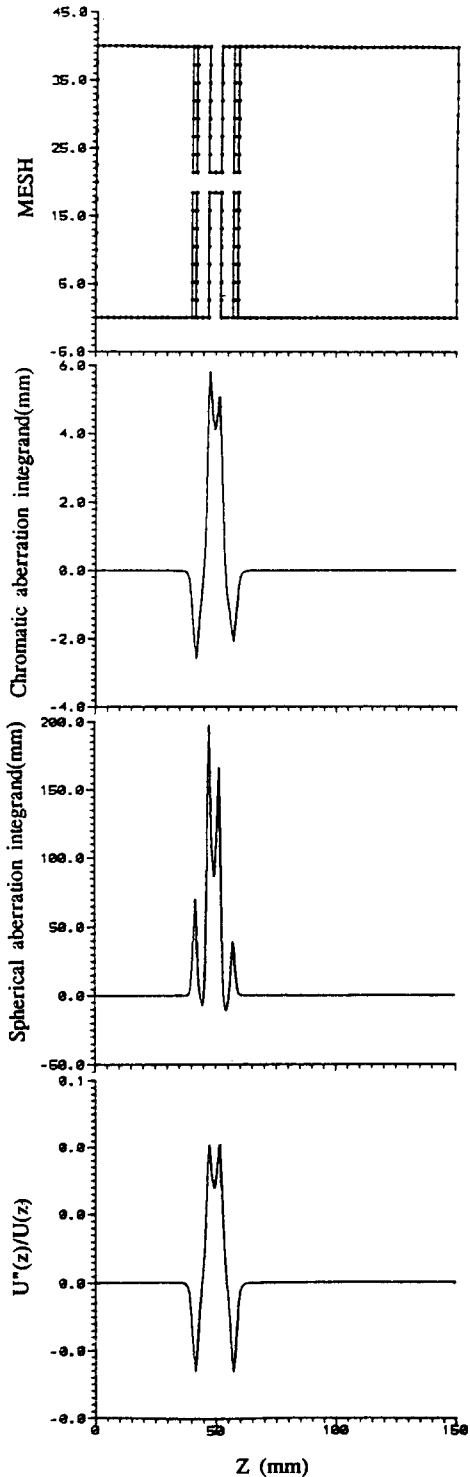


그림 7. Einzel 렌즈의 시뮬레이션 결과.

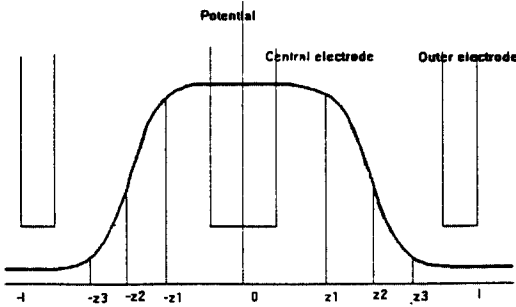


그림 8. 일반적인 축 전위모양.

$$\begin{aligned}
 \Phi_1(z) &= \Phi(0) & 0 \leq |z| \leq z_1 \\
 \Phi_2(z) &= \Phi(0) + p(z \pm z_1)^2 & z_1 \leq |z| \leq z_2 \\
 \Phi_3(z) &= \Phi(1) + q(z \pm z_3)^2 & z_2 \leq |z| \leq z_3 \\
 \Phi_4(z) &= \Phi(1) & z_3 \leq |z| \leq 1
 \end{aligned}
 \tag{26}$$

$$p = \frac{1}{(1-g_2)(g_2-g_1)} \frac{\Phi(1) - \Phi(0)}{l^2}$$

$$q = \frac{-1}{(1-g_2)(g_2-g_1)} \frac{\Phi(1) - \Phi(0)}{l^2}$$

식 (25)를 두번 미분하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned}
 \Phi_2''(z) &= \frac{2}{(1-g_2)(g_2-g_1)} \frac{\Phi(1) - \Phi(0)}{l^2} \\
 \Phi_3''(z) &= \frac{-2}{(1-g_2)(g_2-g_1)} \frac{\Phi(1) - \Phi(0)}{l^2}
 \end{aligned}
 \tag{27}$$

$\Phi_2''(z)$ 와 $\Phi_3''(z)$ 의 값이 감소하려면 $g_1 \cong g_2 \cong 1$ 이면 $2/\{(1-g_1)(g_2-g_1)\}$ 와 $-2/\{(1-g_1)(1-g_2)\}$ 이 0에 수렴하므로 최적의 조건이 될 수 있다. 즉, $U''(z)/U(z)$ 의 peak 값은 z_1, z_3 즉 선형구간과 포물선구간변화 부근에 존재함으로써 완만한 구간변화를 위해 렌즈모양의 변화가 요구된다. $z_3 \sim 1$ 구간은 바깥 전극의 두께를 줄여 선형구간을 없애므로써 완만한 전위변화를 유도하고 가운데 전극의 $-z_1 \sim z_1$ 구간의 모양을 사다리꼴로 변형시킴으로써 개선을 시도하였다(그림 9)-MESH).

4.3. 개선된 모양의 Einzel 렌즈의 시뮬레이션 결과 및 비교

그림 (9)은 그림 (9)-(MESH)의 시뮬레이션 결과이

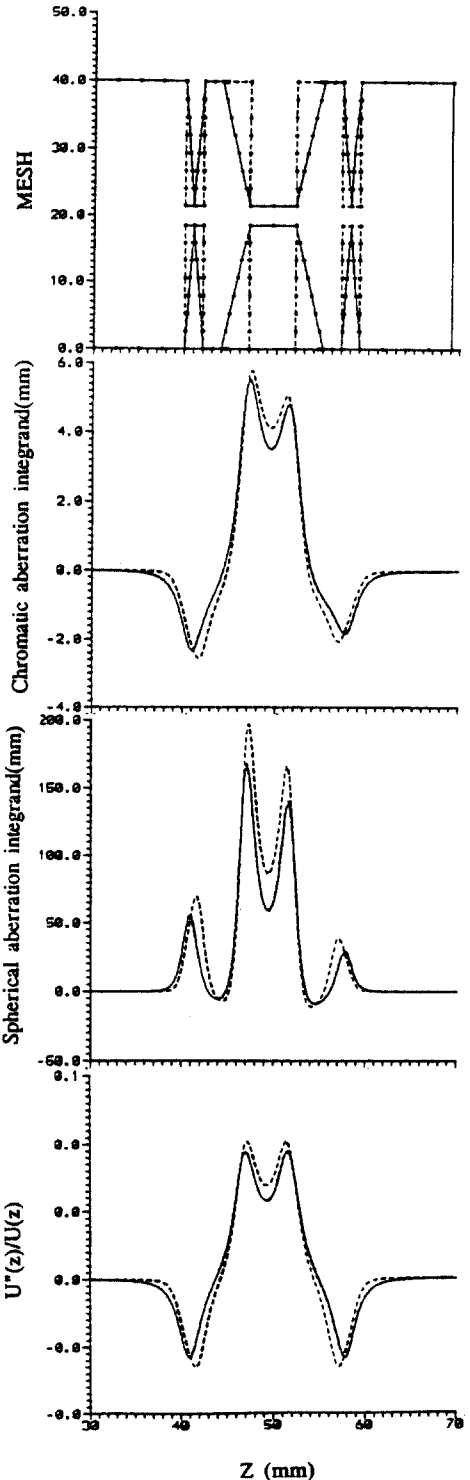


그림 9. 새로운 모양의 Einzel 렌즈의 시뮬레이션 결과.

다. 구면수차의 경우, 모든 영역에서의 값이 0의 방향으로 줄어들어 뚜렷한 향상의 효과를 보여주었으며 전체적으로 17% 향상(1.047E4 mm \rightarrow 0.864E4 mm) 하였다. 그러나 색수차는 모든 영역에서 0의 값의 방향으로 줄어들어 바람직한 현상을 보여주었으나 전체적으로는 2%의 악화현상(1.578E2 mm \rightarrow 1.612E2 mm)이 일어났다. 그림 5에서도 나타나듯이 (-)영역의 값이 상대적으로 (+)영역의 값보다 더 개선되었으므로 전체적인 색수차 값은 증가하였다. 이는 (+)영역의 가운데 전극에서 더 많은 개선여지가 남아있음을 보여주는 것이다.

타겟에서의 빔 크기는 구면수차에 의한 d_s 가 0.12 μ m, 색수차에 의한 d_c 가 0.14 μ m로 전체 빔 크기는 0.18 μ m이다.

5. 결 론

경계요소법을 이용하여 렌즈설계 및 특성평가용 시뮬레이터를 개발하였다. 경계요소법을 이용함으로써 다음과 같은 장점이 있다. 첫째, 다양한 렌즈모양을 시뮬레이션 할 수 있으며, 둘째, 컴퓨터 메모리의 효율적인 사용으로 많은 절점에서의 전위를 구할 수 있으며 빠른 계산시간을 보여주었다. 절점 15000개(10 μ m/1개)를 IBMPC 486 160 MHz로 계산할 경우 120 초의 계산시간을 소요하였다. 본 시뮬레이터를 이용하여 $U'(z)/U(z)$ 와 색수차, 구면수차의 관계를 도출함으로써 새로운 전극 구조를 제안할 수 있었다. 바깥전극은 가능한 얇은 모양의 삼각형으로 만들며 가운데 전극은 사다리꼴로 만든다. 밀변부분은 절연과 과가 일어나지 않는 범위내에서 가능한한 크게 한다. 개발된 시뮬레이터는 이온원 부분부터 타겟부분까지 전영역에서 사용이 가능하며 공간전하효과를 고려하면 좀더 실제에 가까운 시뮬레이터가 될 수 있다고 생각된다.

참고문헌

1. V. Wang, J. W. Ward and R. L. Seliger, "A mass-separating focused-ion-beam system for maskless ion implantation", *J. Vac. Sci. Technol.* **19**(4), Nov/Dec 1158 1981.
2. T. Shiokawa, P. H. Kim, K. Toyoda, S. Namaba, K. Gamo, R. Aihara and N. Anazawa, "200 kV Mass-Separating Fine Focused Ion Beam Apparatus", *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 24, No. 7 July L566 (1985).
3. K. Nikawa, "Application of focused ion beam technique to failure analysis of very large scale integrations: A review", *J. Vac. Sci. Technol.* **B9**(5), Sep/Oct 2566 (1991).
4. H. Kaneko, Y. Yasuoka, K. Gamo and S. Namba, "Nitrocellulose as a self-developing resizer for focused ion beam lithography", *J. Vac. Sci. Technol.* **B6**(3), May/June 982 (1988).
5. T. Kato, H. Morimoto, K. Saitoh and H. Nakata, "Submicron pattern fabrication by focused ion beam", *J. Vac. Sci. Technol.* **B3**(1), Jan/Feb 50 (1985).
6. N. K. Kang, J. Orloff, L. W. Swanson and D. Tuggle, "An improved method for numericals of point electron and ion source optics", *J. Vac. Sic. Technol.* **19**, 1077 (1981).
7. Xieqing Zhu and Eric Munro, "A computer program for electron gun design using second-order finite elements", *J. Vac. Sci. Technol.* **B7**(6), Nov/Dec 1862 (1989).
8. 박화식, 유동화, 송영진, 황호정, "집적회로상의 선간 정전용량 계산을 위한 시뮬레이션에 관한 연구" 대한전자공학회 논문지 1월 25일 1992.
9. A. B. El-Karen, J. C. J. El-Kareh, "Electron Beams, Lenses, and Optics", Vol. 1 p. 15.
10. Mike N Szilagyi, "Electron optical synthesis and Optimization", *Proc. IEEE.* Vol. 73, No. 3, 412 March (1985).