

다구찌방법을 이용한 다중이온빔 광학계의 최적설계 Optimal Design of Multi-Ion Beam Optics using Taguchi Method

*김연태, 김태곤, #민병권, 이상조

*Y. T. Kim, T.-G. Kim, #B.-K. Min(bkmin@yonsei.ac.kr), S. J. Lee
연세대학교 기계공학부

Key words : electrostatic lens, electrostatic analysis, multi response optimization, focused ion beam

1. 서론

집속이온빔 가공장비는 이온원에서 발생된 이온을 수~수십킬로 볼트로 가속하고 정전렌즈를 이용하여 집속시킨 후, 빔을 정밀하게 편향시켜 나노 영역을 가공하는 장비로, 측정을 위한 재료 단면 절단, TEM 시편의 제작 등 측정 분야와 마스크 수리, 미세부품이나 미세패턴의 제작 등에 사용되고 있다.¹ 하지만, 수십~수백 나노 크기의 단일 이온빔을 이용하므로 생산성이 매우 낮다는 한계가 있다. 다중이온빔 장비는 단일 이온빔 장비가 가진 생산성의 한계를 극복하기 위하여 다수의 빔을 방출시키고, 이를 구분된 상태로 집속시킨 후 넓은 범위를 동시 가공하여 가공 속도를 높이는 장비이다.

Figure 1은 본 연구단에서 설계된 다중빔 집속 광학계의 개략도이다.² 다중빔 집속 광학계는 크게 평행빔 생성부와 다중빔 집속부로 이루어진다. 다중빔 집속부의 주요 형상 관계는 Pitch's equation³에서 계산된 주요 형상식에 따라 결정되게 된다. 다중빔 집속부에서 1st lens의 전압 값을 조절하여 표준빔 측정부에 최소 집속점을 형성하면, 다중빔이 표준빔 측정부를 통과 후 1st lens와 같은 전압 값을 가진 2nd lens에 의해 다시 집속되어 시편상에 다시 분리 집속된다. 따라서 표준빔 측정부에 영상 획득 장치를 설치하여 최소 집속점을 형성하면 가공 에너지의 변화에 상관없이 다중빔의 집속 보정이 가능하다.

다중이온빔 가공장비는 마스크없이 재료를 3차원 형상으로 가공해야 하기 때문에 단위 면적당 에너지 양이 커야하고 빔의 크기가 작아야한다. 따라서 고배율의 다중이온빔 가공장비용 광학계 개발이 필요하다. 본 연구에서는 앞서 개발된 다중이온빔 광학계와 그 형상관계를 시뮬레이션하였으며 다구찌 최적화 방법을 이용하여 선형 집속도, 빔 집속도, 집속 균질성의 세가지 다중 응답에 대하여 최적 설계를 수행하였다.

2. 인자와 응답 설정

다중이온빔 집속 광학계의 집속 성능은 설계된 광학계의 집속도 뿐만 아니라 집속 보정 등 제어할 수 없는 다른 인자들도 영향을 받을 수 있다. 개발된 광학계의 집속 보정은 표준빔 측정부에서 얻어지는 이미지를 바탕으로 렌즈의 전압 조절을 통한 수동 초점 조절 방법을 통해 이루어진다. 따라서 사용자의 장비 사용 능숙도에 따라 집속 성능이 변하게 된다.

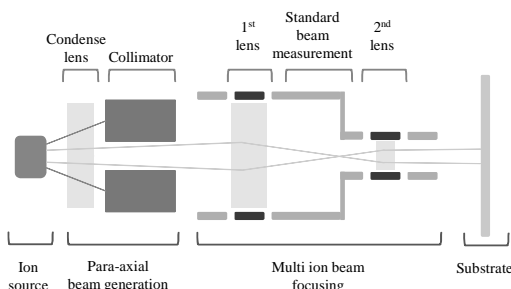


Fig. 1 Schematic of multi ion beam optics

또한 광학계와 시편과의 거리는 가공시 시편과 스테이지의 진직도에 의해 변화하게 되는데, 광학계 통과 후 집속되는 다중빔의 초점 거리는 고정되어 있으므로 거리 변화에 따라 광학계의 집속 성능이 변하게 된다. 위와 같은 집속 보정이나 초점 거리 변화와 같은 인자는 제어할 수 없는 잡음으로 볼 수 있다. 따라서 다중이온빔 집속 광학계는 집속 성능뿐 아니라 잡음에 대해 가공장비로서 신뢰성을 갖는 설계가 필요하다.

다구찌 방법은 잡음에 의해 일어나는 성능 특성치의 분산이 작고, 평균이 목표치에 근접하도록 하는 제어인자의 조건을 최적화 방법이다.⁴ 따라서 다구찌 방법을 사용하면 성능 향상과 잡음에 강건한 광학계의 설계가 가능하다.

Figure 2는 개발된 광학계의 형상을 결정하는 제어 인자를 보여준다. L₁부터 L₄는 각각의 렌즈를 구성하는 전극의 길이이며, G는 전극 사이의 간격, D₁부터 D₃는 렌즈 내경의 크기이다.

최적화를 위한 제어인자, 잡음인자, 그리고 응답을 Table 1에 요약하였다. 제어인자는 개별 렌즈의 형상 특성, 광학계를 구성하는 렌즈의 수나 위치, 그리고 목표 배율로 구성되어 있다. 이 중에서 전체 렌즈의 위치 및 개별 렌즈의 형상 관계는 개발된 광학계의 형상 관계식에 의해 전극의 길이와 배율에 따라 결정된다. 전극간의 간격은 최대 허용 전압에 따라 5 mm로 고정하고, 표준빔 측정부의 내경은 빔의 최대 직경인 500 μm으로 고정하면 4개의 제어인자로 전체 설계의 표현이 가능하다.

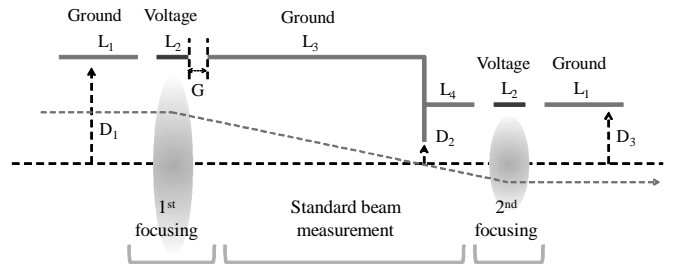


Fig. 2 Geometrical parameters of multi ion beam optics

Table 1 parameters and responses

Type	Parameters	Optimization variable
Control factors	L1	Ground electrode thickness (L_gnd)
	L2	Lens electrode thickness (L_lens)
	L3	Relate with
	L4	linear magnification
	D1	(M)
	D2	Fixed
	D3	Lens diameter (Hole)
Noise factors	G	Fixed
	-	Focus voltage (V)
	-	Distance (Z)
Response	-	Spot size (M ₁)
	-	Variance of linear magnification (M ₂)
	-	Variance of spot size (M ₃)

Table 2 Normalized STB result with multi response methods

Exp.	L_lens	L_gnd	H	M	M ₁	M ₂	M ₃	S/N
1	1	1	1	1	0.016	0.015	2.3E-4	15.096
2	1	2	2	2	0.024	0.011	0.126	7.933
3	1	3	3	3	0.062	0.005	0.180	6.075
4	2	1	2	3	0.012	0.006	0.076	10.233
5	2	2	3	1	0.003	0.235	0.003	6.195
6	2	3	1	2	0.284	0.038	0.018	4.681
7	3	1	3	2	0.061	0.069	0.108	6.245
8	3	2	1	3	0.400	0.007	0.200	2.170
9	3	3	2	1	0.002	0.400	2.8E-5	3.960

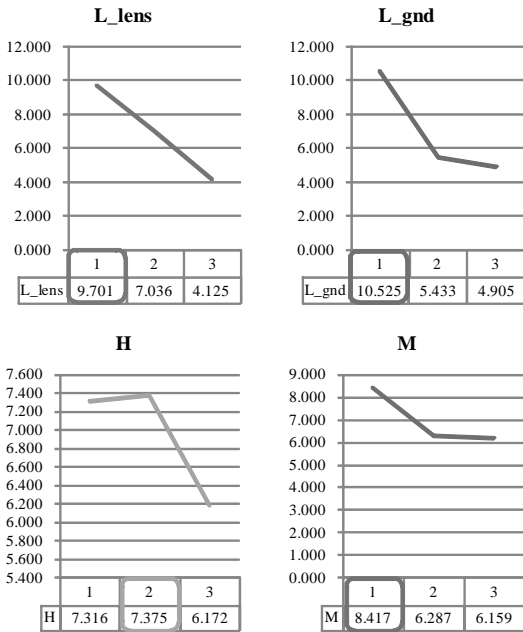


Fig. 3 The S/N ratio chart and optimal level of factors

다중빔의 집속도는 표준빔 집속부에 최소 집속점을 집속시키는 사용자의 능속도와 스테이지의 반복정밀도, 시편의 기울어진 정도, 시편의 표면 상태에 따라지는 시편과 렌즈와의 거리에 따라 달라진다. 따라서 최소 집속점을 형성하는 렌즈의 전압과 렌즈와 시편과의 거리를 잡음인자로 설정하였다.

다중 이온빔 광학계는 단일 이온빔이 가지는 구면수차와 코마 수차를 포함하면서 상의 왜곡이라는 개념을 가지고 있다. 상의 왜곡은 렌즈 내부의 굴절을 차이로 인해 렌즈 중심과의 거리에 따라 집속 배율이 달라져서 생성되는 수차이다. 따라서 다중 이온빔 광학계는 개별 이온빔의 집속을 최소로 집속해 주는 기능뿐 아니라 복수의 이온빔의 선형 집속 배율이 같아야 하며 또한 각각 빔의 특성이 균일해야 한다. 따라서 최적화의 응답은 개별 빔의 선형집속 비율의 분산, 개별 빔 크기의 평균, 그리고 개별 빔 크기 분산의 망소 특성으로 계산하였다.

3. 시뮬레이션 및 결과 분석

3 수준을 가진 4 개의 제어인자와 2 개의 잡음인자에 대한 응답을 알아보기 위하여 L₃⁴의 직교배열표를 사용하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션은 상용 해석프로그램인 OPERA 3D 를 이용하였으며, 잡음인자인 초점 전압과 초점 거리는 시뮬레이션 상에서 구현 하였다.⁵ 시뮬레이션 결과로부터 응답을 계산하고, 각각 응답을 망목특성 손실함수로 계산한 후 그 값을 정규화하고(normalization) 여기에 비중치(importance value)를 곱한 값을 더하여 하나의 응답으로 표현한 후, S/N 비를 계산하여 다중 응답을 처리하였다.⁴

Table 2 은 분석 결과를 나타낸다. 결과에 대한 가중치로 개별 빔의 선형집속비율의 분산은 0.4, 개별 빔의 크기의 평균은 0.4, 개별 빔 크기의 분산은 0.2 으로 설정한 후, S/N 비로 나타내었다. Figure 3 은 각 인자의 수준에 대한 S/N 비를 특성치로 하는 결과 분석 그래프이다. 분석 결과 최적 설계 인자는 L_lens 가 1 수준, L_gnd 가 1 수준, H 가 2 수준, M 이 1 수준일 때 이었으며, 이때 예측되는 S/N 비는 15.156 으로 나타났다.

4. 결론

다중 이온빔 장비는 다수의 이온빔을 사용하여 대면적에 동시 가공함으로써 가공 속도를 증가시켜 기존 단일 이온빔 장비가 가진 낮은 생산성의 한계를 극복하는 장비이다. 다중 이온빔을 집속하는 광학계는 이온 전사장비의 광학계와 그 기능이 유사하다. 하지만 다중 이온빔 장비는 재료를 직접 가공하기 때문에 단위면적당 에너지 양이 커야 하므로 고배율의 다중 이온빔 장비용 광학계의 개발이 필요하다. 따라서 개발된 집속 보정이 가능한 다중 이온빔 집속 광학계를 기반으로 최적설계를 수행하였다. 다중 이온빔 광학계는 집속 성능뿐 아니라 가공장비로의 가공 신뢰도 또한 중요하기 때문에 가공 중 생길 수 있는 잡음을 고려하여 다구찌 방법을 이용하여 최적설계를 수행하였다. 또한 다중빔 집속 광학계는 기존의 단일빔 광학계와 달리 집속도 뿐 아니라 형상 및 에너지 균질도가 유지되어야 한다. 따라서 선형 집속도, 빔 집속도, 집속 균질성의 다중응답을 고려하였다.

L₃⁴의 직교배열표를 사용하여 인자를 배치하고, 상용 전자기 해석 프로그램인 OPERA3D 를 이용한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 최적화를 수행하였다. 잡음 인자는 시뮬레이션 조건을 변경하여 인위적으로 생성하였으며, 시뮬레이션 결과로부터 응답을 계산하고, 각각 응답을 망목특성 손실함수로 계산한 후 그 값을 정규화하고(normalization) 여기에 비중치(importance value)를 곱한 값을 더하여 하나의 응답으로 표현한 후, S/N 비를 계산하여 다중 응답을 처리하였다. 분석 결과 최적의 설계인자는 L_lens 가 1 수준, L_gnd 가 1 수준, H 가 2 수준, M 이 1 수준일 때 이었으며, 이때 예측되는 S/N 비는 15.156 으로 나타났다. 향후 최적화된 설계 인자를 바탕으로 실제 다중 이온빔 광학계를 제작하여 최적화 결과를 검증할 예정이다.

후기

본 연구는 지식경제부 산업기술개발사업인 “고효율 에너지빔 응용 초미세 부품 제조용 In-line 시스템 개발” 연구비 지원으로 이루어 졌습니다.

참고문헌

- Lucille A. Giannuzzi, Fred A. Stevie, "Introduction to focused ion beams," Springer, 2005.
- 김연태, 김태곤, 민병권, 이상조, “다중 이온빔 장비를 위한 정진 렌즈 집속 광학계 설계”, 한국정밀공학회, 2008년도 추계학술대회논문집, pp.857-858, 2008.
- D.W.O heddle, "Electrostatic Lens Systems 2nd edition," Institute of Physics Publishing, 2000.
- Lee-Ing Tong and Chao-Ton Su, "The optimization of multi response problems in the Taguchi method," International Journal of Quality & Reliability Management, Vol. 14 No. 4, pp. 367-380, 1997.
- W.T. Cheng, H.C. Li, C.N. Huang, "Simulation and optimization of silicon thermal CVD through CFD integrating Taguchi method," Chemical Engineering Journal, Vol.137, pp.603-613, 2008.