

다중이온빔 광학계의 조립오차에 의한 가공 정밀도 평가 Aberration Analysis due to Misalignment in Multi Ion Beam Optics

*김승태, 김태곤, #민병권, 이상조

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

Key words : Multi Ion Beam, Focused Ion Beam, Aberration, Misalignment, Perturbation

1. 서론

초미세 부품 가공을 위한 가공 기술은 여러 가지가 있는데, 그 중 집속이온빔(Focused Ion Beam, FIB)는 한 장비에서 여러 가지 가공(밀링, 증착, 이온주입 등)을 마스크 없이 할 수 있는 장점으로 초미세 가공 장비로 사용되고 있다. 하지만 하나의 이온빔을 스캐닝해서 가공하는 방식으로 가공 속도가 생산성이 낮은 단점이 있다. 이런 단점을 극복하기 위해서 복수 개의 빔을 동시에 조사해 재료를 가공하는 다중이온빔이 제안되었다.¹ 다중 이온빔은 스테이지 이송을 통해 가공 면적을 증가시키고, 여러 개의 빔을 사용하여 FIB보다 생산성을 증가시킬 수 있다.

Figure 1은 다중이온빔 장비의 개략도이다. 이온소스에서 발생된 이온빔은 멀티 어퍼처(multi aperture)를 통해 다수의 이온빔으로 분리되며, 1st lens와 2nd lens로 구성된 광학계를 통해 집속되고 시편에 조사된다. 광학계 중간에서 다중이온빔이 교차하고, 교차점을 조정하기 위해 디플렉터(deflector), SED(Secondary Electron Detector), 포커싱 어퍼처(Focusing aperture)를 설치하였다.

집속이온빔 장비를 비롯하여 전자현미경 등 정전렌즈 광학계를 가진 장비는 가공과 조립에 따른 공차를 가지고 있다. 전자빔, 이온빔 등 하전입자빔이 광학계의 중심을 지나지 않을 경우 코마, 비점수차 등 수차에 따라 집속 성능이 저하된다. 전자빔, 이온빔 장비는 이러한 공차를 스티그메이터(stigmator)와 디플렉터를 이용하여 보정한다. 하지만 다중이온빔 장비에서는 빔의 조사 영역이 넓고, 개별 빔에 발생하는 수차의 양이 다르기 때문에 단일 이온빔 장비에서의 수차 보정 방법을 적용하기 힘들다. 따라서 조립오차를 줄여 수차를 최소화해야 할 필요가 있다. 조립오차가 수차 발생에 어떤 영향을 끼치는 지에 대한 연구는 있었지만, 대부분의 연구가 빔의 조사 영역이 작은 단일 이온빔에 국한되어 있었다.^{2,3,4} 본 논문에서는 다중이온빔 광학계의 조립 오차에 따른 가공 정밀도를 평가하고, 수차 발생에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 수차 발생 이론

Figure 2는 2X2 다중이온빔을 시편에 조사하여 가공한 결과이다. Multi aperture의 형상이 원이기 때문에 수차가 없다면 집속된 빔의 형상도 원이어야 하는데, 가공된 형상을 보면 모두 타원형으로 가공된 결과를 알 수 있다. 이는 타원형으로 집속되는 비점수차와 혜성의 꼬리처럼 발생하는 코마 때문이다. Figure 2의 (b)와 (c)는 Figure 2(a)의 사각형 내부의 가공 가공결과를 타원의 단축과 장축으로 나누어 각각 단면을 측정된 결과이다. 비점수차와 코마는 모두 구면수차의 한 종류이며, 하전입자빔에서는 비점수차와 코마가 대표적인 구면수차이다. 구면수차는 다음과 같은 식에 의해 결정된다.

$$\Delta r = -MC_{s(M)}\alpha_0^3 \quad (1)$$

위 식에서 Δr 은 구면수차의 크기, M 은 광학계의 집속률, $C_{s(M)}$ 은 렌즈 특성 함수이며 α_0 는 이온빔의 입사각이다.⁵ 광학계의 설계 및 집속률에 따라 렌즈 특성 함수는 값이 바뀌는데, 그 값이 항상 음의 값이기 때문에 우변에 -1을 곱하게 된다. 식 (1)을 보면 수차의 크기가 입사각에 세제곱에 비례함을 알 수 있다. 비점수차와 코마 모두 광학계를 지나는 이온빔의 입사각이 0이 아닐 경우에 발생하며, 비점수차로 인해 빔이 타원형으로

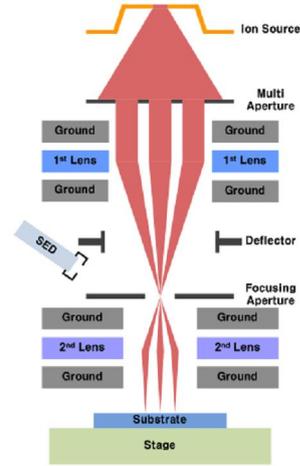


Fig. 1 Schematic of Multi Ion Beam system

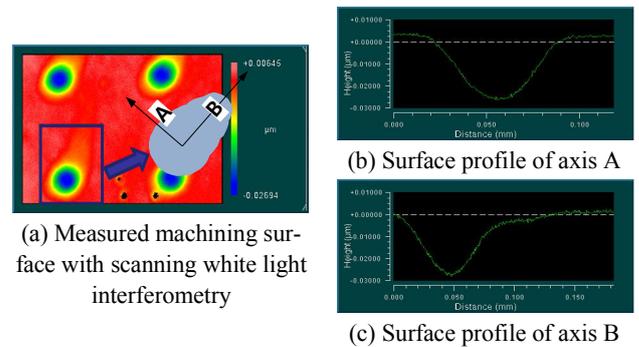


Fig. 2 Machining result of aberration occurrence

변하거나 코마에 의해 빔의 형상이 혜성의 꼬리처럼 나타난다.

3. 실험

다중이온빔 광학계에서 입사각이 0이 아니라는 것은 광학계의 중심선을 지나지 않는 것이며, 이것은 광학계의 조립오차 때문이다. 본 연구에서는 광학계를 구성하는 각 요소들의 조립오차를 변화시키면서 수차가 발생하는 영향을 측정하였다. 이온소스는 RF형 기체이온소스(Ar 이온)를 사용하였으며 25배 광학계와 2X2 멀티 어퍼처를 이용하였다. 광학계의 조립오차에 따른 전자기장의 왜곡을 극대화하기 위해서 광학계를 지나는 이온빔의 물리적 위치를 변경했다. 1st 렌즈를 지나는 이온빔의 중심은 이온소스와 멀티 어퍼처의 매니플레이터를 이용하여 중심을 변경하였고, 2nd 렌즈를 지나는 이온빔의 중심은 디플렉터를 이용해서 변경하였다.

광학계를 지나는 이온빔의 위치는 포커싱 어퍼처를 통해 얻은 이차전자이미지를 통해 확인하였다. 개별 중인 다중이온빔 광학계의 집속 특성과 멀티 어퍼처의 크기를 고려하여 실험 조건을 설정하였다. 실험은 1st 렌즈와 2nd 렌즈를 지나는 이온빔의 중심이 각각 광학계의 중심을 지나갈 경우, 100 μm 벗어난 경우, 200 μm 벗어난 경우를 수행하였다. 1st 렌즈는 이차전자 이미지

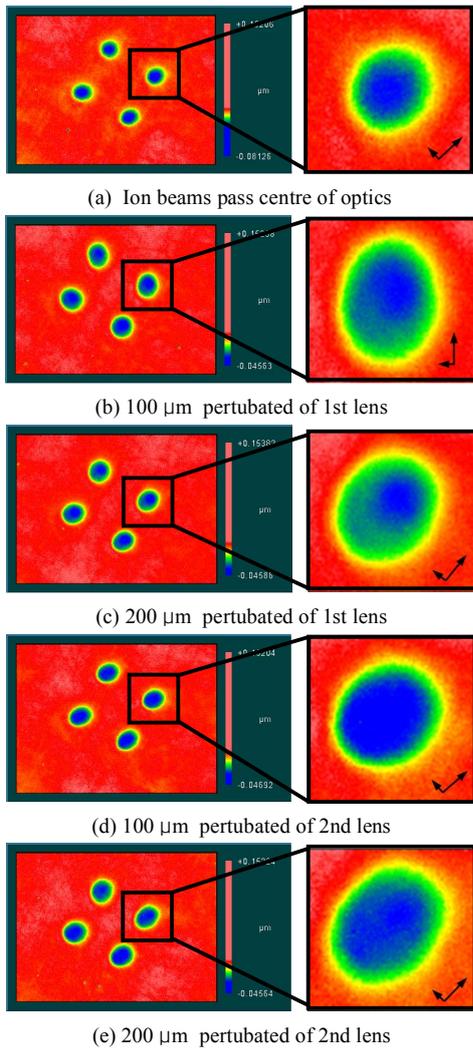


Fig. 3 Machining result of multi ion beam

기준으로 3시 방향으로, 2nd 렌즈는 9시 방향으로 빔의 중심을 변경시켰다. 다중이온빔 장비를 통해 실리콘을 가공 후 결과를 측정하여 수차의 발생을 알아보았다.

4. 결과 분석

Figure 3는 각 실험 결과를 백색광주사간섭계를 이용하여 측정 한 결과이다. 이온빔이 중심에서 멀어질수록 스팟의 크기가 커지는데, 스팟의 형상이 타원형으로 되는 비점수차가 발생하고 코마에 의해서 가공 깊이가 일정하지 않음을 알 수 있다. 또한 1st 렌즈의 조립오차 실험 결과의 경우 빔의 세기가 집중된 부분이 뚜렷히 나타나며, 중심부 주변으로 수차의 영향에 의해 세기가 고르게 분포하지 않는다. 2nd 렌즈의 조립오차 실험 결과는 빔이 타원형으로 변하는 비점수차가 나타나며, 조립오차가 커질 경우 수차에 의해 빔의 형상이 왜곡되는 결과가 측정되었다. 각 실험 결과에서 나타는 수차의 종류와 정도는 실험 조건에 따라 일정 경향이 있음을 알 수 있었다.

Figure 4는 각 실험 조건에서 발생한 수차를 정량화하였다. 모든 결과에서 나타나는 비점수차와 코마가 복합적으로 발생하여 각 수차의 발생 정도를 직접적으로 정량화하기 힘들기 때문에, 수차로 인해 변형된 빔의 가공 결과에서 장축과 단축의 평균을 평균 스팟 크기로 정의했다. 같은 조건에서 수행한 가공 결과의 크기가 각각 틀리기 때문에 네 개의 빔을 모두 계산한 후에 평균값을 통해 각 실험 조건의 결과를 산출하였다. 조립오차가 없는 경우의 가공 결과가 크기가 제일 작고, 원형이며, 가공 깊이가 일정하다. 1st 렌즈와 2nd 렌즈의 조립오차가 커질수록

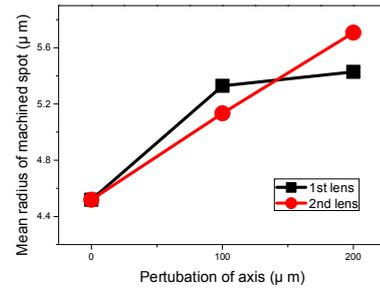


Fig. 4 Mean radius of machined spot with respect to perturbation of axis

수차 발생으로 인해 가공 결과가 원이 아니거나 가공 결과의 깊이가 일정하지 않은 것을 알 수 있다. 결국 수차 발생은 가공된 스팟의 크기를 증가시키기 때문에 1st 렌즈와 2nd 렌즈의 조립오차 실험에서 모두 평균 스팟 크기가 증가하는 결과가 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 다중이온빔 장비에서 조립오차로 발생할 수 있는 수차를 측정하고 결과를 분석하였다. 조립오차는 가공오차에 기인하며, 이온빔 집속을 위해 정전기 렌즈에서 발생하는 전자기장은 조립오차에 의해 왜곡되며, 그 결과 왜곡이 심해질수록 이온빔에서 수차가 더 크게 발생할 것이라고 예상하였다. 개발 중인 다중이온빔 장비를 통해 조립오차를 설정하고, 가공 실험을 통해서 각각의 조건에서 발생한 수차를 측정하고 분석하였다. 이온빔이 광학계의 중심을 지나는 경우에 가공물의 평균 스팟 반경이 약 4.5 μm 이고, 1st와 2nd 렌즈가 중심에서 100 μm 벗어난 경우에는 수차의 발생으로 인해 각각 17%와 20% 증가했으며 200 μm 벗어난 경우에는 각각 13%와 26% 증가한 결과가 측정되었다.

후기

본 연구는 지식경제부 주관의 청정제조기반산업원천기술개발사업인 '고효율 에너지빔 응용 초미세 부품 제조용 In-line 시스템 개발' 연구비 지원으로 이루어 졌습니다.

참고문헌

1. Elmar, P., Loeschner, H., et al., "Projection maskless patterning (PMLP) for the fabrication of leading-edge complex masks and nano-imprint templates", Photomask Technology 2007, Proceedings of the SPIE, **6730**, 673033, 2007.
2. Sturrock, P. A., "The Aberrations of Magnetic Electron Lenses due to Asymmetries" Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, **243** 387-429, 1951.
3. Tsumagari, T., Murakami, J., et al., "Aberrations of electrostatic systems with machining error." Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, **4**, 140-142, 1986.
4. Munro, E., "Finite difference programs for computing tolerances for electrostatic lenses." Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, **6**, 941-948, 1988.
5. Heddl, D. W. O., "Electrostatic lens systems", Institute of Physics Publishing, 80-104, 2000.