

## 집속이온빔을 이용한 미세구조물 가공의 형상정밀도 향상

김경석<sup>\*</sup>, 정재원, 민병권, 이상조(연세대학교 기계공학부)  
박철우, 이종항(한국산업기술대학교 기계공학과)

A New Approach to Reduce Geometric Error in FIB Fabrication of Micro Structures

K. S. Kim<sup>\*</sup>, J. W. Jung, B.-K. Min, S. J. Lee (School of Mechanical Engineering, Yonsei University)  
C. W. Park, J. H. Lee (Department of Mechanical Engineering, Korea Polytechnic University)

### ABSTRACT

Focused Ion Beam machining is an attractive approach to produce nano-scale 3D structures. However, like other beam-based manufacturing processes, the redeposition of the sputtered material during the machining deteriorates the geometric accuracy of ion beam machining. In this research a new approach to reduce the geometric error in FIB machining is introduced. The observed redeposition phenomena have been compared with existing theoretical model. Although the redeposition effect has good repeatability the prediction of exact amount of geometric error in ion beam machining is difficult. Therefore, proposed method utilizes process control approach. Developed algorithm measures the redeposition amount after every production cycle and modifies next process plan. The method has been implemented to a real FIB machine and the experimental results demonstrated considerable improvement of five micrometer-sized pocket machining.

**Key Words :** 마이크로 가공 (Micro fabrication), 재부착 (Redeposition), 형상오차보정 (Geometric error compensation)

### 1. 서론

최근 마이크로-나노 단위 크기의 형상을 가진 미세 구조물을 제작할 수 있는 다양한 공정이 연구되고 있다. 그 중 집속이온빔(Focused Ion Beam, FIB)을 이용한 미세구조물의 제작은 상대적으로 다양한 재료에 대하여 에칭 및 증착 공정을 적용할 수 있고 3 차원 형상의 가공이 용이하여 새롭게 주목을 받고 있다. FIB 가공방법의 하나인 이온빔 에칭<sup>1</sup>은 일반적으로 갈륨(gallium)이온이 이온 소스로 사용되는데, 이온에 가속전압을 걸어주어 시료 표면의 정확한 위치에 충돌시켜 스퍼터링(sputtering)<sup>2</sup> 현상을 통해 특정부위의 재료를 제거하는 방법이다.

그러나, 3 차원의 구조물을 스퍼터링 공정을 이용하여 가공할 경우 제거된 재료의 일부가 가공면에 다시 부착(redereposition)되는 현상이 발생하는데 이는 미세 구조물의 형상정밀도를 떨어뜨리는 요인이 된다.<sup>3</sup>

본 연구에서는 FIB 에칭 가공 시 재부착에 의해

발생되는 가공오차를 보정하는 방법을 제안한다. 제안된 방법은 먼저 재부착에 의한 형상오차를 측정하고, 보정하기 위한 공정계획을 자동으로 계산해주게 되는 것이다. 이온빔가공의 경우 재료의 재부착을 정확하게 예측하기가 힘들고, 특히 보정된 새로운 가공계획에 의한 가공에서도 또다시 새로운 형태의 재부착이 일어나므로 이론적인 공정계획의 수립이 힘들다.

따라서, 본 연구에서는 공정제어 기법을 응용하여 체계적이고 반복적인 실험을 이용한 방법을 제시한다. 이온빔가공 시에 재부착된 재료의 형태를 정확하게 측정하기 위해 화상처리기법을 이용하여 가공 중에 얻은 이미지로부터 형상오차 정보를 추출하고, 이를 개발된 공정제어 알고리즘을 이용하여 이온빔가공기에 직접 입력할 수 있는 공정계획으로 자동변환 하는 프로그램을 개발하였다.

다음 절에서는 이온빔가공의 재부착 모델과 보정 알고리즘과 이를 이용하여 실리콘 웨이퍼에서 정육면체 포켓을 가공한 실험 결과를 소개한다.

## 2. 재부착 모델

Orloff 등은 이론적인 모델<sup>4</sup>을 통하여 이온빔가공의 재부착을 설명하였다. 이온빔가공시 벽면에서 발생하는 재부착 현상을 Fig. 1과 같은 기하학적 모델을 이용하여 설명하였으며, 가공 깊이에 따라 재부착되는 이온의 상대적 양을 식(1)로 표현하였다.

$$F(h) = \frac{F_0}{2} \int_0^h \frac{\cos \alpha \cos \beta}{r} dx = \frac{F_0 h}{2} \int_0^h \frac{x dx}{r} \quad (1)$$

이때,  $F_0$ 는 제거되는 입자들의 총 개수,  $d$ 는 가공 폭,  $h$ 는 가공 깊이이다.

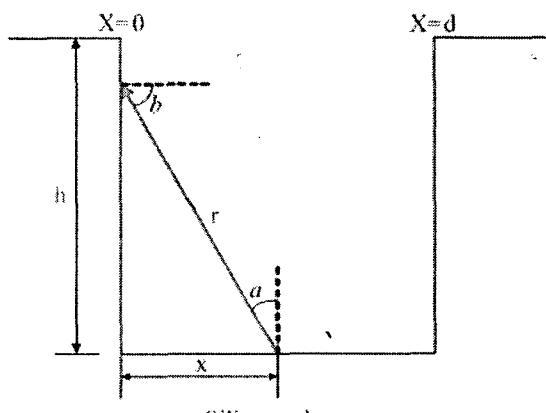


Fig. 1 Modeling of the redeposition<sup>4</sup>

Fig. 2 는 본 연구를 위해서 3면의 길이가 각각 5  $\mu\text{m}$  인 정육면체 포켓을 실리콘 웨이퍼에 보정 없이 가공한 단면형상이다. 이온빔을 이용한 측정 시 가공 단면을 보호하기 위해 포켓 위에 탄소를 증착하고 포켓의 중앙부를 에칭하여 단면을 관측했다. 측정된 포켓의 윗쪽, 깊이, 아랫쪽은 각각 5.09  $\mu\text{m}$ , 5.01  $\mu\text{m}$ , 4.18  $\mu\text{m}$ 이다.

그림에서 볼 수 있듯이 재부착된 이온의 두깨가 포켓의 바닥면에 가까워 절수록 두꺼워짐을 알 수 있으며, 이는 Orloff 에 의해서 제시된 모델의 경향과 일치하게 된다. 여러 차례의 실험 결과를 통하여 동일한 형상의 포켓을 가공할 경우, 이온의 재부착 양은 반복적으로 일정하다는 것을 관찰할 수 있었다. 따라서, Fig. 2에서와 같이 어떤 보정도 없을 때는 가공 치수의 오차가 생기지만, 원하는 가공형상에 대한 정확한 보정 정보를 가질 수 있다면 이온빔 가공을 통해 얻어지는 최종 형상은 반복적으로 일정한 규칙성을 가질 것임을 예상할 수 있다.

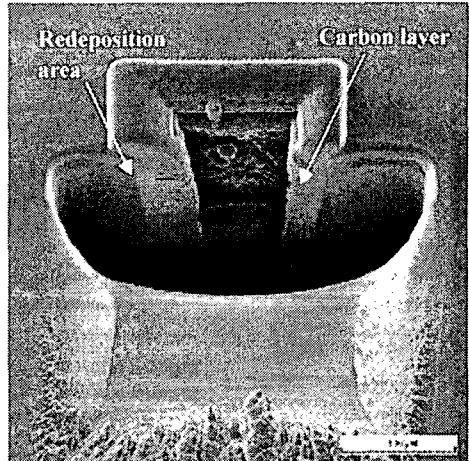


Fig. 2 Observation of redeposition

## 3. 가공오차 보정

본 연구에서 제안하는 가공오차 보정방법은 재부착 양을 측정하기 위한 화상처리기법과 재부착에 의한 형상오차만큼을 새로운 공정계획에 포함시켜 수정가공 하기 위한 알고리즘으로 구성되어 있다.

Fig. 3 은 포켓을 가공한 후에 FIB 장비로부터 직접 받은 이미지를 처리하여 재부착부위의 색대비차에 따른 모서리 검출을 하는 장면이다. 화상처리 프로그램은 LabVIEW 를 이용하여 개발하였다. 개발된 프로그램을 이용하여 재부착 형상을 정량적으로 검출하고 이를 이용해 깊이 방향의 가공오차를 계산하여 공정제어 알고리즘에 사용할 수 있게 한다. 즉, 오차보정을 위한 공정계획이 수립되어진다.

Fig. 4 는 FIB 가공 시의 형상정밀도 향상을 위한 공정제어 알고리즘이다. 재부착에 의한 가공오차는 한 차례의 가공이 종료된 후에 측정할 수 있으므로 그림에서의 피드백 루프는 한번의 가공이 완료될

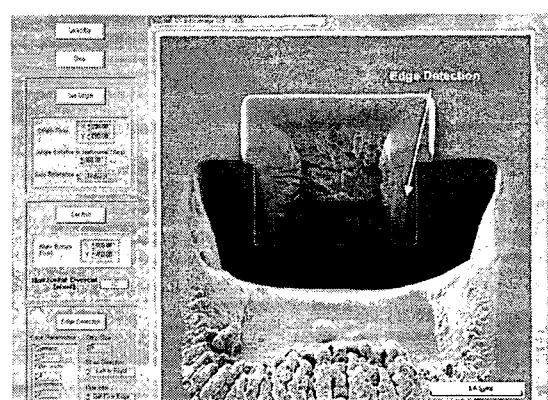


Fig. 3 Image processing for measurement

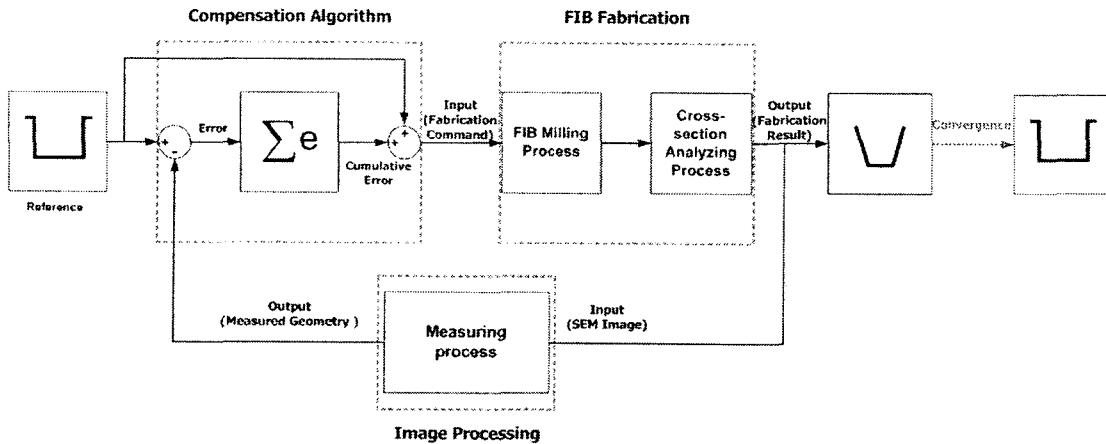


Fig. 4 Geometric error compensation method

때마다 작동을 하게 된다. 그럼에서와 같이 설계 도면에서 실제 가공형상을 뺀 값이 재부착에 의한 가공오차가 되며, FIB 가공에서 재부착된 부분을 제거하기 위해서는 이온빔의 추가적인 조사가 필요하다. 따라서, 제시된 방법에서는 가공영역을 실제 이온빔의 스캔위치에 따라 가공영역을  $n$  개의 영역으로 나눈 후 각각의 영역에서의 이온빔의 스캔방향으로의 재부착 양을 계산하여 그 값을 다음 가공계획에 추가하는 방법을 사용한다. 이때, 한 차례의 오차 보정 후에도 남아있는 오차 제거를 위해 새로운 가공계획에 의한 가공과정에서 새로운 재부착이 발생하게 된다. 따라서 가공오차가 원하는 범위 안에 들어갈 때까지 반복적인 가공 및 측정을 통하여 가공계획을 개선, 오차를 보정해 가는 방법을 사용한다.

$i$ 번째 반복 공정에서  $r_{n,i}$  을  $n$ 번째 이온빔 스캔위치에서의 도면상의 가공 깊이,  $f_{n,i}$  을  $n$ 번째 스캔위치에서의 실제 가공된 깊이라 하면, 재부착에 의한 오차는 식(2)와 같다.

$$e_{n,i} = r_{n,i} - f_{n,i} \quad (2)$$

따라서,  $N$  번의 반복 공정을 수행했을 때에  $n$  번째 스캔 위치에서의 누적 형상오차는 식(3)과 같다.

$$E_{n,N} = e_{n,1} + e_{n,2} + \cdots + e_{n,N} = \sum_{i=1}^N e_{n,i} \quad (3)$$

$E_{n,N}$ 의 값을 설계상의 치수에 더한 값이 보정된 가공계획이 되며, 반복 공정 중  $e_{n,i}$ 의 값이 정해진 오차 범위 내로 들어오면 반복을 멈추고, 정해진 공정계획으로 모든 부품을 가공하게 된다.

#### 4. 실험 결과

Fig. 5 는 본 연구에서 사용한 이온빔가공 장비(SMI2050, SII Nanotechnology)의 사진이다. 전류는 1318 pA, 직경은 100 nm의 이온빔을 사용하였다. 가공에는 Table1 과 같은 조건이 사용되었다. Fig. 6 은 3 면의 길이가 5 μm 인 정육면체 포켓을 가공한 단면 형상을 보여준다. 가공형상 오차보정방법을 적용하기 전(Fig. 6(a))과 적용 후(Fig. 6(b))의 치수 오차를 측정하여 Fig. 7 에 나타내었다.

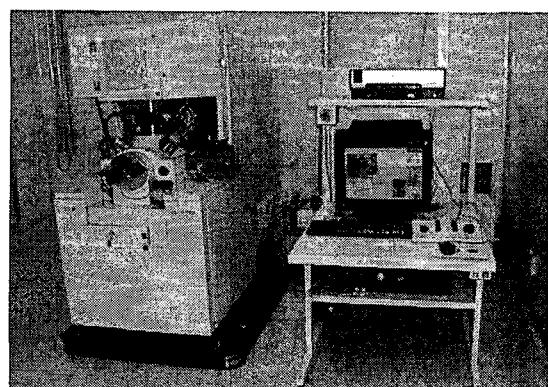
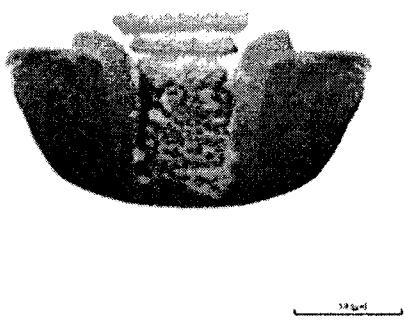


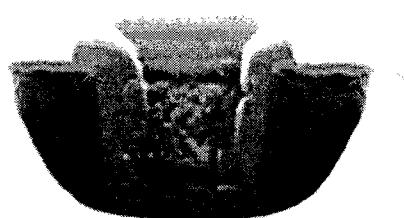
Fig. 5 Focused ion beam equipment

Table 1 Experiment conditions

Condition	Value
Substrate	Silicon (100)
Beam size (nm)	100
Beam current (pA)	1318
Dwell time (msec)	3



(a) before compensation



(a) after compensation

Fig. 6 Cross section of pocket (60° tilted view)

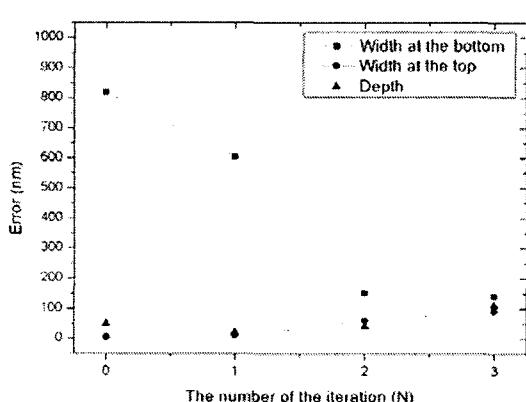


Fig. 7 Geometric error improvement w.r.t. iteration

Fig. 7에서 볼 수 있듯이, 가공오차 보정방법을 적용할 경우 윗쪽과 깊이는 일정하게 유지하면서, 바닥면의 폭은 초기 820 nm 의 가공형상오차를 3 차례의 반복 공정을 통하여 150 nm 까지 줄일 수 있었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 FIB 공정에서 발생되는 재부착에 의한 미세 구조물의 형상정밀도가 저하되는 원인을 해결하고자 새로운 가공방법을 제안했다. 화상처리 방법을 이용하여 측정한 오차를 공정제어기법을 이용하여 보정하는 방법으로 5 μm 포켓 가공 시 보정 전 820 nm 였던 가공형상오차를 150 nm 까지 줄일 수 있었다. 본 연구에 제안한 방법은 FIB를 이용하는 모든 기하학적 형태의 3 차원 에칭가공에 적용될 수 있으며 실제 가공기계에 쉽게 적용할 수 있도록 화상처리기법과 가공경로 작성 프로그램을 개발하여 과정을 자동화하였다.

## 후기

본 연구는 산업자원부의 산업기술기반조성사업인 마이크로 나노 점·선 가공기반 구축 사업의 결과물입니다.

## 참고문헌

1. Lipp, S., Frey, L., Lehrer, C., Frank, B., Demm, E., Ryssel, H., "Investigation on the topology of structures milled and etched by focused ion beam," Journal of Vacuum Science & Technology B, Vol. 14, pp. 3996-3999, 1996.
2. Santamore, D., Edinge, K., Orloff, J., Melngailis, J., "Focused Ion Beam sputter yield change as a function of scan speed," Journal of Vacuum Science & Technology B, Vol. 15, pp. 2346-2349, 1997.
3. Cairney, J., Mounroe, P., "Redeposition effects in transmission electron microscope specimens of FeAl-WC Composites prepared using a focused ion beam," The International Journal of Microstructure and Micromechanics, Vol. 34, pp. 97-107, 2003.
4. Orloff, J., Utlaut, M., "High resolution focused ion beams: FIB and its application," Kluwer Academic and Plenum Publishers, pp. 205-224, 2003.