

# 선택적 빔 차단을 통한 집속이온빔 가공 정밀도 향상

## Improvement of Ion Beam Resolution in FIB Process by Selective Beam Blocking

한민희<sup>1</sup>, 한진<sup>1</sup>, 김태곤<sup>1</sup>, 민병권<sup>1,✉</sup>, 이상조<sup>1</sup>  
Min Hee Han<sup>1</sup>, Jin Han<sup>1</sup>, Tae-Gon Kim<sup>1</sup>, Byung-Kwon Min<sup>1,✉</sup> and Sang Jo Lee<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 연세대학교 기계공학과 (School of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.)  
✉ Corresponding author: bkmin@yonsei.ac.kr, Tel: 02-2123-5813

Manuscript received: 2009.12.31 / Accepted: 2010.4.23

*In focused ion beam (FIB) fabrication processes the ion beam intensity with Gaussian profile has a drawback for high resolution machining. In this paper, the fabrication method to modify the beam profile at substrate using silt mask is proposed to increase the machining resolution at high current. Slit mask is utilized to block the part of beam and transmit only high intensity portion. A nano manipulator is utilized to handle the silt mask. Geometrical analysis on fabricated profile through silt mask was conducted. By utilizing proposed method, improvement of machining resolution was achieved.*

Key Words: Slit Mask (슬릿 마스크), Nano Fabrication (나노 가공), Focused Ion Beam (집속이온빔)

### 1. 서론

나노 가공 기술은 초정밀 부품제작에 필수적으로 요구되는 기술이다. 집속이온빔 장치 (Focused Ion Beam, FIB)는 대표적인 나노 가공 장비로서, 마스크 없이 직접 가공이 가능하여 최근 그 활용도가 증가하고 있다.<sup>1,2</sup> 일반적으로 FIB는 반도체 회로 수정 등에 이용되고 있지만, 유연한 공정 가능성으로 인해 광학부품, 센서, 전자부품의 시제품 제작에 활용도가 증가되고 있다.<sup>3,4</sup>

FIB 장비의 기능은 크게 4 가지로 분류된다. 첫째 밀링 공정으로, 가공하고자 하는 표면에 FIB 소스인 갈륨 이온을 일정 전압으로 가속시켜 가공 표면에 조사하면 갈륨 이온이 가공 표면의 원자간의 결합력을 끊는 스퍼터링 현상을 통해 원하는 형상으로 재료를 제거할 수 있다.<sup>5,6</sup> 둘째 갈륨 이온의 주입(implantation) 공정으로, FIB 장비를 통해 갈륨 이온을 시편에 일정 깊이만큼 주입할 수 있다.<sup>7</sup> 이때 주입되는 깊이는 가속 전압에 따라 달라

진다.<sup>8</sup> 셋째 이미지 측정공정으로, 이온이 시편의 분자와 충돌하게 될 때 시편분자들의 결합을 끊게 되면서 발생하게 되는 이차 전자(secondary electron)를 검출하여 이미지를 생성할 수 있다.<sup>9</sup> 이렇게 생성된 이미지를 통해 가공된 후의 모습이나 가공 전의 이미지를 볼 수 있다. 넷째, 증착(deposition) 공정으로, 증착하고자 하는 가스를 인젝터를 통해 표면에 흡착시키고 가속된 갈륨 이온 에너지에 의하여 증착 가스를 분해시켜 표면에 쌓아 올리는 것이다.<sup>10</sup>

이온빔의 강도는 가우시안 분포를 따르고 끝단의 퍼짐 특성으로 인해 중앙 부분은 높은 이온빔 강도로 인해 깊게 파여지는 반면 이온 빔의 양 끝단은 빔의 강도가 약하기 때문에 얇고 넓게 파진다. 이러한 특성으로 인해 가공 영역의 양 끝단에서는 일정곡률을 지니게 되며 가공 벽면이 수직으로 나타나지 못하여 가공 정밀도가 저하된다.<sup>6</sup>

집속이온빔 가공에서 가공 정밀도를 높이기 위해 이온빔 시뮬레이션을 통하여 가공 형상을 보정

하는 연구가 진행되고 있다.<sup>11</sup> 시뮬레이션을 이용하여 가공 형상을 예측해 가공 정밀도를 높이는 방법으로 재증착(redeposition) 현상을 고려해 가공 정밀도를 향상시킬 수 있다. 하지만 이온빔이 가우시안 분포를 가지고 있는 특성 때문에 발생하는 한계는 극복하기 어렵다. 다른 가공 방법으로는 이온빔 리소그래피를 이용하여 마스크를 제작한 후 DRIE (deep reactive ion etching)로 가공하여 수직형상의 가공 정밀도를 향상시키는 방법이 있다.

본 연구에서는 이온빔이 가우시안 형상으로 존재하는 특성 때문에 발생하는 가공형상의 한계를 극복하기 위해 가우시안 분포의 특정 영역을 슬릿 마스크를 통해 차단(blocking)하여 가공정밀도를 높이는 방법을 제안하였다. 그림 1 은 본 연구에서 제안한 방법을 개략적으로 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 이온빔은 가우시안 분포를 가지고 있고 분포에 따라 가공된다. 그 결과 가공 벽면의 형상이 수직이 되지 못하는 문제가 있다. 하지만 본 연구에서 제안한 방법과 같이 슬릿 마스크를 이용하여 가우시안의 끝단을 차단하면 가공면의 기울기가 수직에 가까워진다.

FIB 공정에서 빔의 크기는 가공하고자 하는 패턴의 정밀도를 고려하여 결정된다. 높은 정밀도를 가진 패턴을 가공할 때에는 직경이 작은 빔을 이용해야 하는데, 작은 빔의 경우 빔 전류가 작아 가공시간이 증가하는 문제가 있다.<sup>12</sup> 하지만 본 논문에서 제안하는 선택적 빔 차단을 이용하면 큰 직경의 빔을 차단하여 사용할 수 있기 때문에 높은 전류를 이용하여 빠른 속도로 가공할 수 있다.

2 절에서는 슬릿 마스크 실험 방법에 대해 설명하였다. 2.1 절에서는 실리콘 재료에 빔의 일부를 차단하며 점가공(spot beam) 형태로 이온 빔을 조사하여 빔 차단 효과를 확인하였다. 2.2 절에서는

2.1 절에서 확인한 현상을 이용하여 슬릿 마스크를 제작하고 슬릿의 폭보다 큰 빔을 투과시켜 이온 빔의 강도 분포 중 약한 부분이 제거된 결과를 보였다. 3 절에서는 사각형의 포켓 형상을 가공할 때 마스크를 이용한 가공 방법이 가공 벽면(sidewall)의 기울기를 향상시킬 수 있음을 보였다.

## 2. 실험 방법 및 결과

슬릿 마스크를 이용 이온 빔의 강도 분포 중 미약한 부분을 차단하여 정밀도를 높이는 연구를 실행하기 위해 2 가지 방법으로 실험을 진행하였다. 첫번째 실험으로, 실리콘 블록을 이용하여 단일 이온빔의 절반 영역을 차단하여 시편에 1 초 동안 조사한 후 가공형상분석을 통해 절반 영역이 차단된 빔의 가공 특성을 분석하였다. 두 번째 실험으로, 마스크에 일정 폭을 가지는 슬릿 가공을 한 후 슬릿 폭보다 큰 빔 직경을 지닌 이온 빔을 1 초 동안 조사 한 후 가공 단면을 분석하였다. 이온 빔 조사는 FIB 를 이용하였고 단면 분석을 위해 주사탐침현미경(Scanning probe microscopy, SPM)을 이용하였다. 슬릿 마스크의 이동을 위해 진공 챔버 안에 인입된 나노 구동기(manipulator)를 이용하였다.

### 2.1 실리콘 블록을 통한 이온 빔 강도 분포의 차단

마스크를 이용한 이온빔 일부의 차단 효과를 알아보기 위해 그림 2 와 같은 기초 실험을 하였다. 실리콘 블록을 마스크로 사용하여 이온빔의 절반을 차단하면 차단되지 않은 이온 빔만 시편에 조사되어 가공된다(그림 2 의 A). 차단 효과의 비교를 위해 다른 가공 조건을 변화시키지 않고 실리콘 웨이퍼 표면에 같은 조건으로 가공을 하였다(그림 2 의 B). 실리콘 블록의 두께는 5  $\mu\text{m}$  이며,

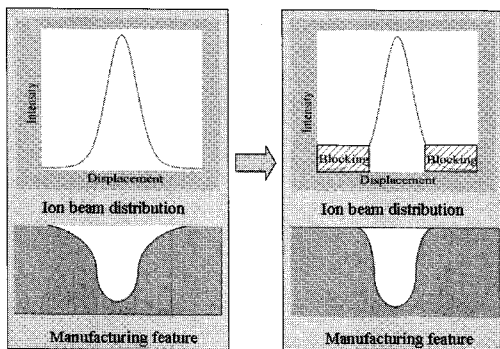


Fig. 1 Ion beam blocking concept using slit mask

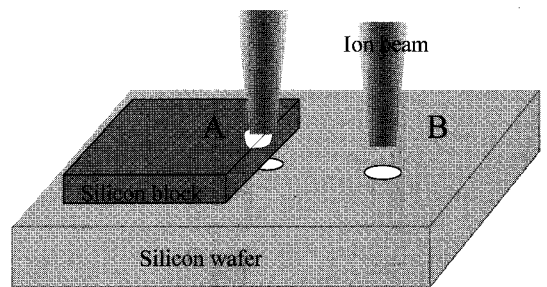


Fig. 2 schematic diagram half of ion beam blocking

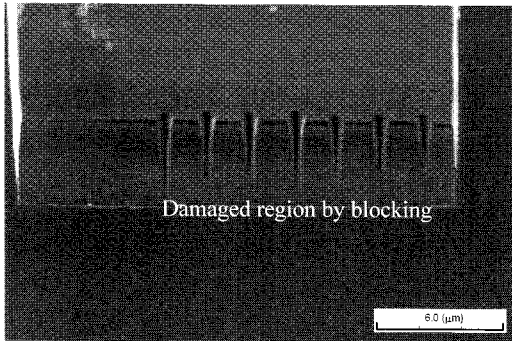


Fig. 3 FIB image of silicon block section after beam irradiation

가공되는 시편의 소재 또한 실리콘이다. 일반적으로 마스크 선정은 시편보다 스퍼터링 수율이 작은 재료를 선택하지만, 제작의 용이성을 고려하여 동일한 재료를 사용하였다. 이온 빔의 절반을 차단한 실험에서 사용된 빔 사이즈는 240 nm 이며, 빔 전류는 3000 pA 이다.

조사된 이온빔에 의해 마스크가 관통하지 않아야 이온빔의 일부만 실리콘 웨이퍼에 조사되기 때문에 실리콘 블록이 관통되지 않도록 이온빔 조사 시간을 결정해야한다. 실리콘의 에칭율을 계산하여 두께 5 μm 의 블록이 관통이 되지 않게 이온빔 조사 시간을 결정하면 되지만 실리콘 블록의 경우 open wall 형상으로 재증착 등이 발생하기 어려운 형상이다. 따라서 일반적인 hole 가공에서의 에칭율보다 훨씬 크기 때문에 실험적으로 조사 시간을 결정하였다. 그림 3 은 실리콘 블록으로 이온빔의 절반을 차단한 후 가공했을 때의 실리콘 블록의 FIB 사진이다. 5 μm 의 두께의 실리콘 블록의 손상 부위에서 확인할 수 있듯이, 밑면 부분까지 가공되지 않아 이온 빔의 절반을 효과적으로 차단하였다.

그림 4 와 그림 5 는 각각 spot beam 조사 후의 가공 형상과 실리콘 블록을 이용하여 spot beam 의 절반을 차단한 후 가공 한 형상을 SPM 을 통하여 측정 한 결과이다. 그림 4 의 단면 이미지에서 확인할 수 있듯이, 가공된 형상은 가우시안 분포를 나타내고 있다. 가공된 형상의 직경은 약 2.8 μm 이다. 가공된 형상의 크기를 살펴보면 이온 빔의 분포가 빔의 직경에 비해 넓게 나타난다는 것을 확인할 수 있다. 이온 빔의 직경은 FWHM (Full Width Half Maximum)으로 정의되는데 실제 조사되는 이온빔의 크기는 이보다 크기 때문이다. 또한

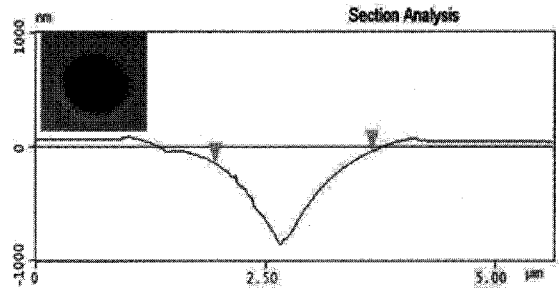


Fig. 4 SPM image without silicon block

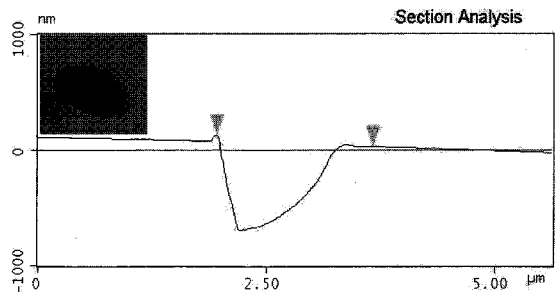


Fig. 5 SPM image with silicon block

빔 퍼짐 (beam broadening)현상으로 인해 실제 가공되는 크기는 증가될 수 있다. 실리콘 블록을 통해 이온빔을 차단한 경우 그림 5 와 같은 가공 형상을 보이며 가공 폭은 약 1.5 μm 이다. 그림 4 의 가공 단면과 비교해 보았을 때 이온 빔의 분포 중심의 좌측 부분이 제거되어서, 가공된 형상의 기울기가 가파르게 변화됨을 확인하였다. 이 실험을 통해 빔의 일부를 차단하여 가공 형상의 기울기를 증가시킬 수 있음을 확인하였다.

## 2.2 슬릿 마스크를 이용한 가공 정밀도 향상 방법

앞 절에서 실리콘 블록이 이온 빔의 강도 분포 중 절반을 차단하였을 때, 일정 영역의 이온 빔 분포가 실제 가공에서도 차단됨을 실험적으로 확인하였다. 이온 빔의 분포를 실리콘 블록을 통해 차단하였을 때 가공되는 형상의 기울기가 변화된다는 점을 고려할 때, 이온 빔의 분포의 일부분을 차단하여 시편을 가공하게 되면 가공 정밀도가 향상될 것이다. 이온 빔의 강도가 작은 부분을 효과적으로 제거하기 위해, 실리콘 블록에 이온빔의 크기보다 작은 슬릿을 제작하고 제작된 슬릿에 이온빔을 조사하여 이온 빔 강도가 작은 부분을 슬릿을 통해 차단하였다.

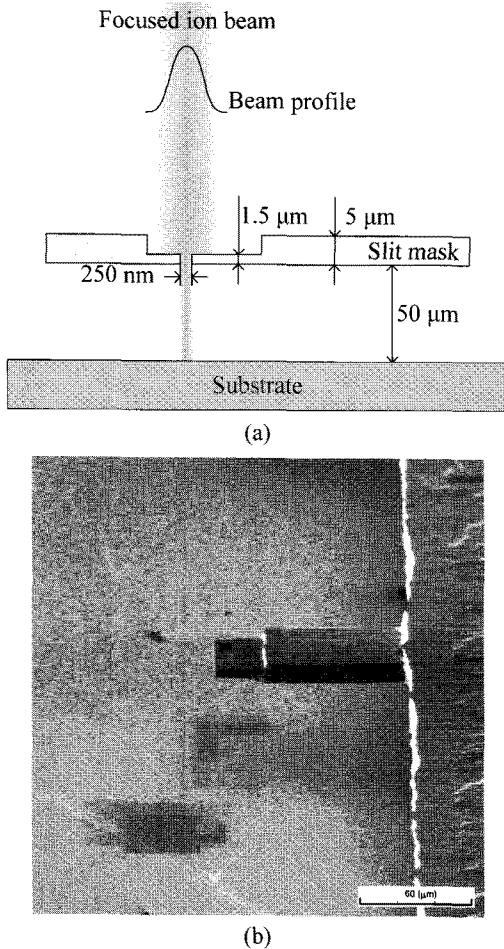


Fig. 6 Beam blocking using the slit mask to improve processing accuracy (a) Experimental schematic (b) FIB image of slit mask and substrate

그림 6(a)는 실험 방법에 대한 개략도이다. 그림과 같이 입사되는 이온이 마스크에 수직으로 조사되어야 하기 때문에 시편과 슬릿 마스크는 간격이 일정하고 평행으로 유지되어야 한다. 이온 빔이 집속 렌즈를 통과한 후 시편 표면에 초점 잡히기 전 어느 일정 범위 이상 부분에서 빔의 분포를 제거해 주게 되면 이온 빔의 가공 효율성에 영향을 줄 수 있기 때문에 시편과 슬릿 마스크 사이의 거리를 변화시켜 주면서 실험해 보았다. 그 결과 마스크와 시편 사이의 거리가 40~60 μm 일 때 가공 효율성에 크게 영향을 주지 않는 것을 기초 실험을 통하여 확인하였다.

그림 6(b)는 FIB 장치를 통해 제작된 슬릿 마스크와 실리콘 웨이퍼 이미지이다. 슬릿 마스크의

두께는 5 μm 이고 슬릿 마스크와 시편 사이의 간격(gap distance)은 50 μm 이다. 실리콘 웨이퍼의 질은 음영 부분이 이온 빔 조사에 의해 재료가 제거된 부분이다.

그림 7 은 실리콘 블록에 제작된 슬릿 마스크 FIB 이미지이다. 그림 7(a)과 같이 5 μm 두께의 실리콘 membrane 에 FIB 밀링을 이용하여 1.5 μm 두께의 membrane 을 제작한 후 폭 250 nm 의 슬릿을 가공하였다. 이와 같이 제작된 슬릿을 이용하여 이온빔을 조사하여 시편을 가공하였다. 조사된 이온빔 사이즈와 전류는 각각 60 nm, 710 pA 이다. 그림 7(b)는 제작된 슬릿 가공 후 이온 빔을 조사하여 일정 영역을 차단하여 스텐실 마스크의 일부가 스퍼터링된 현상을 보여준다.

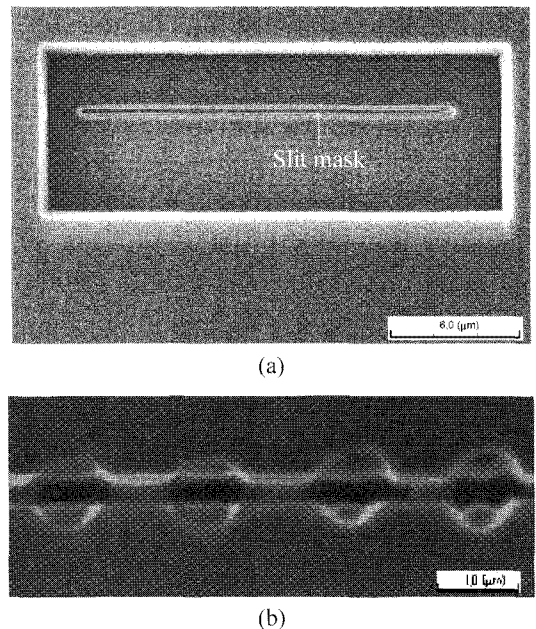


Fig. 7 FIB image of fabricated slit mask. Whole image of slit mask (a) and damaged slit mask after blocking ion beam (b)

그림 8 과 그림 9 는 슬릿 마스크 없이 가공한 결과와 슬릿 마스크를 통하여 이온 빔을 차단하여 가공한 결과를 SPM 으로 각각 측정한 결과이다. 슬릿 마스크 없이 가공하였을 때의 가공 폭은 약 600 nm 이며, 빔을 차단 후 가공 폭이 약 300 nm 로 감소하였다. 250 nm 슬릿 폭에 입사되는 600 nm 전체 빔 크기 중 350 nm 가 슬릿을 통해 차단되고 250 nm 크기의 빔이 통과되었지만 슬릿에 부딪힌

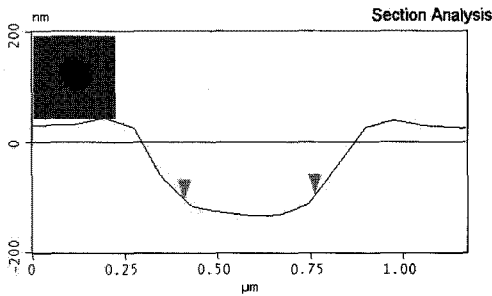


Fig. 8 Cross section image of spot beam without blocking

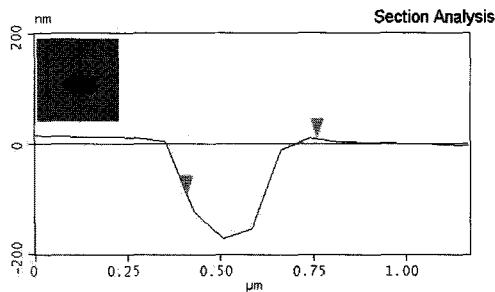


Fig. 9 Cross section image of spot beam after blocking using slit mask

일부 이온이 50 nm 정도 산란되어 300 nm 의 폭으로 가공된 것으로 예상된다. 그림 8 과 그림 9 를 비교해 볼 때, 슬릿 마스크를 사용하면 가공된 폭의 일부를 줄일 수 있고, 가공되는 벽면의 형상 모습도 가파른 기울기를 가지며 가공됨을 확인 하였다. 만약 직각형태의 가공을 하게 될 때, 이온 빔의 강도 분포가 더 가파른 기울기를 갖게 되면 보다 정밀하게 가공을 할 수 있게 된다. 이를 이용해서 직각 형태의 포켓 가공을 하고자 할 때 옛지 부분에서 둥근 곡선을 가지며 제거되는 문제점을 보완할 수 있을 것으로 예상된다. 3 장에서는 직각 형태의 포켓 가공에서 슬릿 마스크를 이용하여 벽면의 직각도를 향상시킨 결과를 설명하겠다.

### 3. 슬릿 마스크를 이용한 가공 방법에 따른 가공 벽면(Sidewall)의 직각도 향상

그림 10 은 FIB 밀링을 이용하여 포켓형상을 가공할 때 이온 빔 차단 여부에 따라 가공 벽면의 형상이 어떻게 달라지는지 알아보는 실험을 하기 위한 마스크와 빔 조사영역을 보여준다. 두께 20 μm, 폭 150 μm 인 슬릿 마스크 위에 그림 10 에 표시된 영역에 이온빔을 조사하였다.

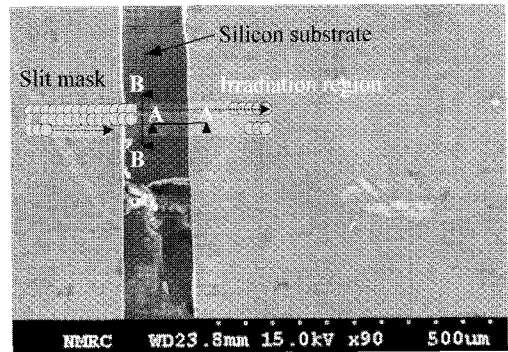


Fig. 10 Manufacturing region and measuring direction for comparing blocking effect of slit mask

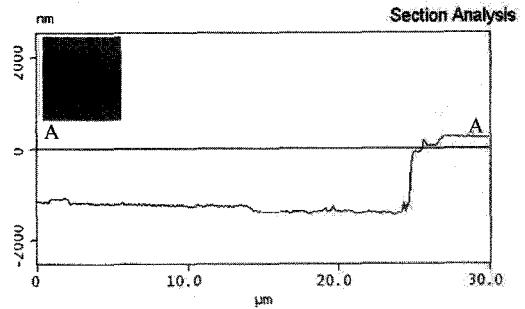


Fig. 11 Cross section of A-A of Fig. 10

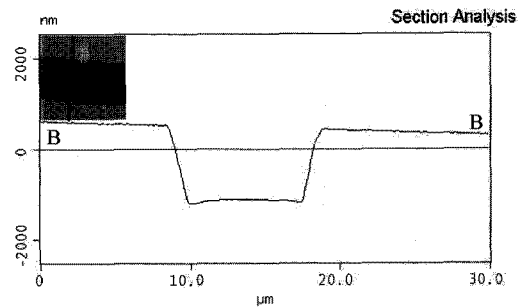


Fig. 12 Cross section of B-B of Fig. 10

그림 11 과 그림 12 는 가공 후 시편을 측정 한 결과이다. 그림 11 은 시편에서 그림 10 에 표시된 측정 영역 A-A 를 SPM 을 이용하여 측정 한 그래프이며, 그림 12 는 B-B 의 SPM 측정 결과이다. 즉, 그림 11 은 마스크를 이용하여 이온빔의 일부를 차단하였을 때의 가공결과이며, 그림 12 는 이온빔의 모든 영역을 이용하여 가공한 형상이다. 그림 11 과 같이 이온 빔의 주변부를 마스크를 통해 차단 하면 가공된 벽면의 기울기가 수직에 가깝게 되는 것을 볼 수 있다. 반면, 그림 12 에서는 본래의 이

온빔 분포 특성에 따라 가공 되어 가공 벽면의 기울기가 수직으로 나타나지 못하는 것을 볼 수 있다. 가공 벽면의 기울기는 이온빔의 일부가 차단된 A 측정영역에서  $89^\circ$ , 이온빔이 차단되지 않는 B 측정영역에서  $47^\circ$  이다. 따라서 슬릿 마스크가 이온빔의 일부를 차단하여 이온빔 분포를 보정하면 가공 형상의 직각도가 향상되는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구는 슬릿 마스크를 통해 이온빔의 일부를 차단하여 집속이온빔의 강도 분포를 조절하였다. 본 연구에서 제시한 연구 방법을 통해 실험한 결과, 슬릿 마스크를 이용하여 단일빔의 일부를 차단한 경우에서 슬릿 마스크를 이용하지 않은 가공 결과와 비교하였을 때, 가공벽면의 기울기가  $48^\circ$  에서  $76^\circ$  로 향상되는 결과를 얻었다. 이것은 이온빔의 가우시안 분포 중 약한 끝부분이 슬릿에 의해 차단되었기 때문이다.

단일빔의 이온빔 분포를 변화시켜 주었을 때 가공 벽면의 각도가 향상되는 결과를 이용하여, 사각형태의 포켓 가공을 하게 될 때 가공 벽면의 기울기를 수직으로 가공할 수 있었다. 이온빔을 이용한 가공에서 가공 벽면의 기울기가 수직으로 나타나지 못하는 원인 중 하나는 이온빔 분포가 가우시안 분포를 갖기 때문인데 가우시안 분포를 변화시켜줄 수 있는 본 연구의 실험 방법을 통해 이온빔 분포를 보정해 주었고, 이로 인해 가공 벽면의 기울기를  $47^\circ$  에서  $89^\circ$  로 향상시켰다.

또한 본 연구에서 제안한 방법을 이용할 경우 빔 직경을 크게 선택하고 선택적으로 빔 차단을 하여 작은 영역을 가공하게 될 경우 전류의 세기가 커서 가공 속도를 증가시킬 수 있다. 따라서 슬릿 마스크를 이용하여 집속이온빔 장치로 미세 가공을 할 경우 정밀도 및 가공 효율성을 증가시킬 수 있을 것이다.

#### 후 기

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

#### 참고문헌

1. Kitslaara, P., Strassner, M., Sagnes, I., Bourhis, E., Lafosse, X., Ulysse, C., David, C., Jede, R., Bruchhaus, L. and Gierak, J., “Towards the creation of quantum dots using FIB technology,” *Microelectronic Engineering*, Vol. 83, No. 4-9, pp. 811-814, 2006.
2. Han J., Lee H., Min B.-K. and Lee S. J., “Prediction of nanopattern topography using two-dimensional focused ion beam milling with beam irradiation intervals,” *Microelectronic Engineering*, Vol. 87 No. 1, pp. 1-9, 2010.
3. Arshak, K., Mihov, M., Nakahara, S., Arshak, A. and McDonagh, D., “The mechanism of the ion beam inhibited etching formation in Gallium-FIB implanted resist films,” *Microelectronic Engineering*, Vol. 78-79, No. 1-4, pp. 39-46, 2005.
4. Zhou, J. and Yang, G., “Nanohole Fabrication using FIB, EB and AFM for Biomedical Applications,” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 7, No. 4, pp. 18-22, 2006.
5. Kang, E. G., Choi, B. Y., Hong, W. P., Lee, S. W. and Choi, H. Z., “FIB Sputtering Process Technology and Its Application,” *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 25, No. 3, pp. 23-31, 2008.
6. Bischoff, L., Teichert, J. and Heera, V., “Focused ion beam sputtering investigations on SiC,” *Applied Surface Science*, Vol. 184, No. 1-4, pp. 372-376, 2001.
7. Han, J., Kim, J.-W., Lee, H., Min, B.-K. and Lee, S. J., “Microfabrication method using a combination of local ion implantation and magnetorheological finishing,” *Applied Physics Express*, Vol. 2, No. 2, Paper No. 026503, 2009.
8. Volkert, C. A. and Minor, A. M., “Focused ion beam microscopy and micromachining,” *MRS Bulletin*, Vol. 32, No. 5, pp. 389-395, 2007.
9. Nakamatsua, K.-I., Kanda, K., Haruyama, Y., Ichihashi, T., Kaito, T. and Matsui, S., “Mechanical property evaluation of Au-coated nanospring fabricated by combination of focused-ion-beam chemical vapor deposition and sputter coating,” *Journal of Vacuum Society Technology B*, Vol. 24.,

- No. 6, pp. 3169-3172, 2006.
10. Tseng, A. A., "Recent developments in micromilling using focused ion beam technology," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 14, No. 4, pp. R15-R34, 2004.
  11. 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 Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 25, No. 3, pp. 44-49, 2008.
  12. Rauscher, M., Marianowski, K., Degel, B. and Plies, E., "Limitations to low-voltage focused ion beam operation," *Microelectronic Engineering*, Vol. 83 No. 4-9, pp. 815-818, 2006.