

## 집속이온빔에 의한 미세가공 특성

이종항\*, 박철우(한국산업기술대학교), 이상조(연세대학교)

### Micro-machining Characteristics using Focused Ion Beam

J. H. Lee, C. W. Park(Mech. Eng. Dept., KPU), S. J. Lee(Mech. Eng. Dept., YSU)

#### ABSTRACT

It is difficult to machine below 10 micrometers by conventional machining methods, such as micro-EDM. However, ultra micro machining using focused ion beam(FIB) is able to machine to 50 nanometers. In addition, 3 dimensional structures can be made by a combination of FIB and CVD to the level of 10 nanometers. Die & moulds techniques are better than one-to-one machining techniques in the mass production of ultra size structures, in regards to production costs. In this case, the machining precision of die & moulds affects produced parts. Also, it is advantageous to machine die & moulds to the 10 micrometer level by FIB technique rather than other techniques.

In this paper, the grooving characteristics for die & mould materials by FIB were carried out experimentally in order to compare the machining characteristics of FIB with conventional machining methods. The results showed that the machining parameters and the scanning path of FIB affects the precision. The machined width and depth of the groove varied depending on the required depth due to the redeposition of the sputtered ion material accumulating on both the bottom and the side of the wall.

**Key Words** : Focused Ion Beam(집속이온빔), Grooving(홈가공), Machining Characteristics(가공특성), Machining Parameter(가공파라미터), Emission Path(조사경로), Nano Machining(나노가공)

#### 1. 서론

방전가공 등과 같은 전통적인 기계가공에 의한 미세가공은 수십 마이크로 이하의 가공이 불가능하다. 그러나, 집속이온빔에 의한 초미세가공은 가공 사이즈가 수십 나노까지 가능하다. 또한, 집속이온빔과 CVD의 조합에 의하여 수십 나노급의 3차원 미소 구조물을 만들 수 있다.

미소 구조물의 대량 생산은 부품을 한 개씩 가공하는 것 보다는 금형에 의하여 대량으로 만드는 것이 생산성과 비용면에서 유리하다. 이와 같은 경우에는 금형의 가공정도가 생산되는 제품에 영향을 준다. 수십 마이크로 크기의 금형을 나노급의 가공정도로 가공할 수 있는 방법은 집속이온빔에 의한 가공이 훨씬 더 유리하다.

집속이온빔을 이용한 미세가공은 Sandia Lab의 미세 가공용 공구형성에 관한 연구<sup>(1)</sup>가 있으며, 실리콘 소재의 3차원 마이크로 가공과 Dwell time에 따른 가공특성에 대한 Yongqi<sup>(2),(3)</sup>의 연구가 있다.

본 연구에서는 집속이온빔에 의한 가공특성과 전통적인 기계가공특성을 비교하기 위하여 금형소재를

대상으로 집속 이온빔에 의한 홈 가공특성을 실험적으로 파악하고자 한다.

#### 2. 집속이온빔의 기초이론

##### 2.1 집속이온빔 장치

Fig. 1은 액체 금속원(Liquid Metal Ion Source, LMIS)으로서 전류를 흘려 이온을 발생시킨다. 액체 금속원은 앞쪽에 Extractor가 설치되어 5kV 정도의 전위차를 주면 약 10 $\mu$ m의 텅스텐 니들 앞단에 강한 전기장이 형성되고, 전기력에 의하여 텅스텐 니들의 표면에 붙어있던 원자로 부터 전자를 분리하여 이온을 방출시킨다. 이러한 이온원은 장치 및 가공 특성상 갈륨이 널리 이용된다.

액체 금속원 앞단에 방출된 이온들을 집속시키거나 원하지 않은 이온들은 제거하는 장치를 경통(Ion Beam Column)이라한다. Fig. 2와 같이 방출된 이온들이 공간상으로 퍼지므로 이들을 제어하기 위한 Aperture가 있으며, 이온량을 측정하기 위한 패러데이 컵(Faraday Cup), 이온들을 가속시켜 운동량을 증가시키기 위한 정전렌즈(Electrostatic Lens)가

있다.

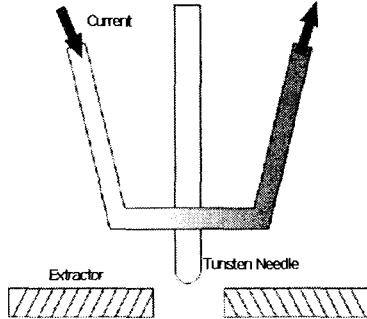


Fig. 1 L MIS structure

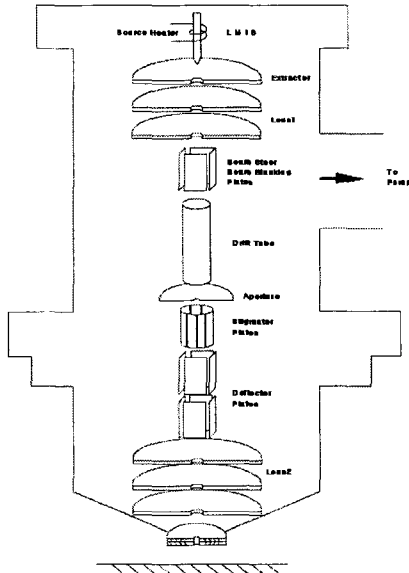


Fig. 2 Structure of focused ion beam column

이온원으로 사용되는 합금재료들에서 필요없는 이온을 제거하기 위한 Magnetic Mass Filter, 이온광학계의 수차보정을 위한 Octopole Stigmator 및 이온빔축의 기계적인 조정을 위한 Alignment System들이 설치되어 이온의 집속도를 향상시켜 준다.

이온원과 경통의 하단에 시료대가 설치되어 있으며, 온라인측정을 위한 Scanning Ion microscope(SIM)와 이온과의 화학작용에 의한 Micro Deposition 기능을 가지고 있으며, 이들 모두가  $10^{-7}$ Torr 이상의 진공 중에서 운전된다.

## 2.2 집속이온빔 가공장치의 특성

집속이온빔 장치의 특성은 전기적 특성, 에너지 분포특성, 빔의 공간분포특성을 들 수가 있다.

집속 이온빔 장치의 특성중 가장 중요한 것은 전기적 특성이다. 이 전기적 특성은 가속전압에 따른 이온흐름량(전류) 특성을 나타내 준다. 이 특성은 주로 이온원의 니들 특성과 밀접한 관계를 가지

고 있다. 니들의 끝단 반경이 작으면 과도한 전계강도에 의하여 약간의 가속전압만으로도 과도한 이온이 방출되어 소기의 목적을 거두기가 어렵게 되는 경우도 있다.

에너지 분포특성이란 가속전압의 변화에 따른 이온빔의 분포특성으로서 집속이온빔장치의 집속도(Degree of Focusing) 또는 분해능이 결정된다. 빔의 집속특성은 가우시안 분포를 하기 때문에 미세가공에서는 분산이 적은 쪽이 유리하다.

이온빔의 공간분포 특성이란 포물선 형상의 텅스텐 니들로 부터 방출된 이온이 공간적으로 방출강도가 달라질 수 있음을 보여 준다.

## 3. 실험장치 및 실험방법

### 3.1 실험장치

Fig. 3은 집속이온빔 가공장치이며, 그 성능은 다음과 같다.

- 이온원 : Ga 액체 금속
- 가속전압 : 10 - 40 kV
- 이온 빔의 직경 : 50 nm
- 최대전류밀도 : 15 A/cm<sup>2</sup>

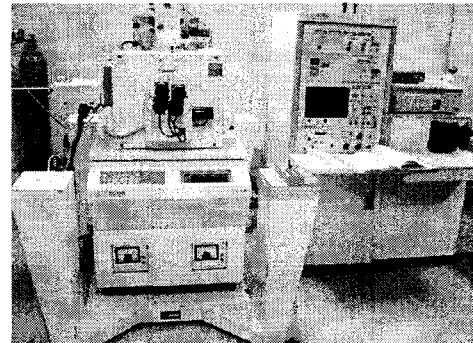


Fig. 3 Photograph of focused ion beam system

### 3.2 실험방법

집속이온빔에 의한 금속재료의 가공특성을 파악하기 위한 실험조건은 다음과 같다. 공작물의 재료는 열처리하지 않은 SKD11이며, 가공부의 크기, Aperture Size, 이온빔의 전류, 드웰타임은 Table 1과 같다.

Table 1. Experimental conditions

Parameter	1st Fab	2nd Fab	3rd Fab
Dimension( $\mu$ m)	0.5*25	0.5*25	0.5*25
Machining depth( $\mu$ m)	0.5	1.0	1.5
Accelerating voltage(kV)	40	40	40
Aperture size( $\mu$ m)	40	40	40
Beam current(pA)	80	80	80
Dwell time(μsec)	3	3	3
Magnitude of SIM	5000	5000	5000

Fig. 4는 이온빔의 스캐닝 경로로서,  $0.5 \times 25 \mu\text{m}$ 의 홈을 순차적으로 벡터스캐닝(Vector Scanning)에 의하여 주사함으로써 가공이 수행된다.

실험용 공작물은 밀링가공, 연삭가공, 래핑가공, 폴리싱가공으로 표면거칠기(Ra)를  $0.078 \mu\text{m}$  이하로 하였다.

가공결과는 히타치계 SEM에서 15,000배의 배율로 측정하였다.

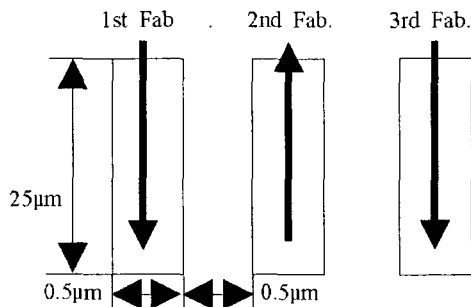


Fig. 4 Ion beam path by vector scanning

#### 4. 실험결과 및 토론

이온밀링에 의한 그루브 가공결과를 측정하기 위하여 가공된 단면을 Fig. 5(a)와 같이  $14 \times 14 \mu\text{m}$ 의 넓이와  $15 \mu\text{m}$ 의 깊이로 절단하고, SEM에서 시료대들 45도 경사시켜 단면을 측정하였다. Fig. 5(b)는  $0.5 \mu\text{m}$  가공깊이에서의 단면측정결과로서 가공후의 깊이가  $0.523 \mu\text{m}$ 이었다.

단면부의 관찰은 그 크기가 매우 작기 때문에 미세한 그루브들이 무너지지 않기 위하여 미세 그루브의 위에 다음과 같은 조건으로 Deposition한 후 이온밀링으로 절단하였다.

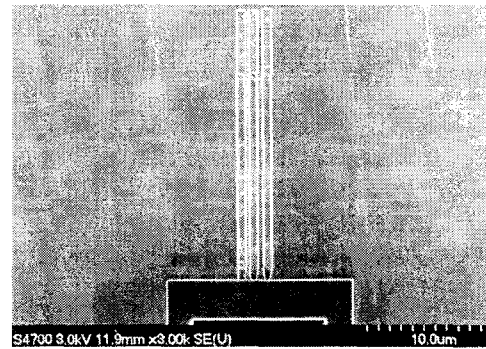
- Deposition material : Carbon
- Deposition size :  $15 \times 3.0 \mu\text{m}$
- Accelerating voltage of ion beam : 40kV
- Aperture size of ion beam:  $40 \mu\text{m}$
- Ion beam current : 80pA
- Dwell time :  $0.5 \mu\text{sec}$
- Deposition and ion emission time : 10min

Fig. 6은 가공깊이 지령을  $1.0 \mu\text{m}$ 로 할 경우에 대한 이온밀링 결과로서 Fig. 5와는 달리 가공깊이가 1st Path와 3rd Path의 깊이가 다른 것을 볼 수 있다. 1st Path와 2nd Path는  $0.767 \mu\text{m}$ 이며, 3rd Path는 최대깊이가  $1.096 \mu\text{m}$ 임을 볼 수 있다.

Fig. 7은 가공깊이 지령을  $1.5 \mu\text{m}$ 로 할 경우에 대한 이온밀링 결과로서 1st Path는  $1.464 \mu\text{m}$ , 2nd Path는  $1.360 \mu\text{m}$ 이며, 3rd Path는 최대깊이가  $1.778 \mu\text{m}$ 임을 볼 수 있다. 이와 같이 가공깊이가 1st Path, 2nd Path, 3rd Path 모두 다르고 바닥의 형태도 평편한 형태가 아니라 V형 홈형태임을 볼 수 있다.

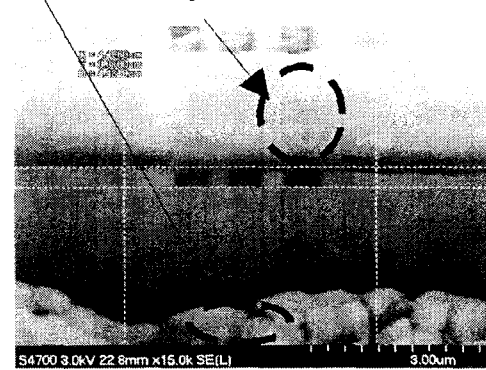
Fig. 7과 같은 바닥가공특성은 이온의 스퍼터링

에 의한 재부착(Redeposition)현상과 이온의 스캐닝 경로 때문이다. 특히 갈륨이온이 바닥의 원자와 충돌하여 스퍼터링된 입자가 1st Path 가공시 2nd 및 3rd Path 가공할 표면에 쌓여 가공높이가 달라지게 된 것으로 생각된다.



(a) Selected machining area

Bottom of ion milling and redeposition  
Deposition thickness



(b) Machining result

Fig. 5 Result of grooving by FIB at  $0.5 \mu\text{m}$  depth

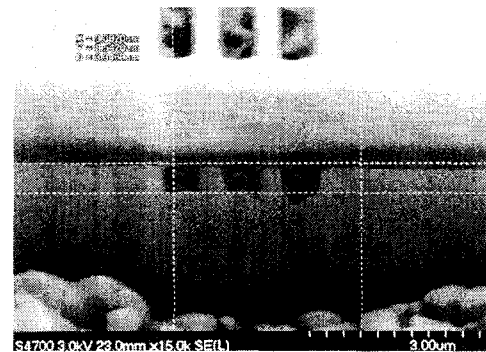


Fig. 6 Result of grooving by FIB at  $1.0 \mu\text{m}$  depth

3rd Path 가공에서 발생한 스퍼터링된 입자가 1st Path의 바닥부에 쌓이므로 가공깊이가 달라질 수 밖에 없다. 또한 가공깊이가 깊어 질 수록 스퍼

터링된 입자는 그루브안에서 탈출하지 못하고 주변의 바닥과 측면에 쌓이게 되면 가공폭과 깊이가 달라질 수 밖에 없다.

Aperture size 등을 조정하여 이온빔의 전류치를 줄이면 가공력은 감소되지만, 미세가공에서 반드시 필요한 이온빔의 집속직경은 작아지게 된다.

이러한 집속도를 파악하기 위하여 패러데이컵을 통해 이온빔의 전류치와 집속직경을 측정한 결과가 Fig. 8과 Fig. 9이다. Fig. 8과 Fig. 9에서 볼 수 있듯이 가속전압을 증가시키면 빔의 전류가 증가하고, 빔의 전류값이 감소하면 이온빔의 집속직경도 감소함을 알 수 있다.

V type configuration by redeposited ion

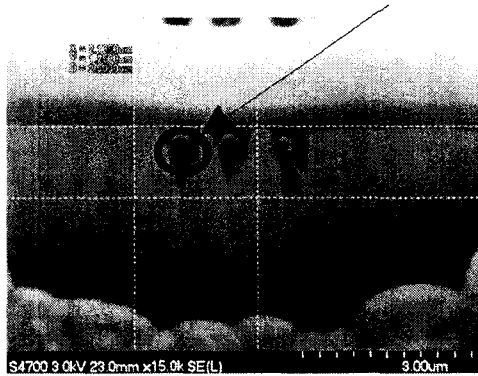


Fig. 7 Result of grooving by FIB at 1.5μm depth

### 5. 결론

집속이온빔 장치를 이용하여 금속재료의 홈을 가공한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 가공 파라미터에 의한 영향이 있었으며, 집속 이온빔의 조사경로가 가공정도에 큰 영향을 주었다.
- (2) 이온빔의 전류가 작을 수록 집속 이온빔의 직경이 감소하는 경향을 가지고 있었다.
- (3) 가공깊이가 깊어 질 수록 스퍼터링된 입자가 공작물의 측면과 바닥에 쌓이기 때문에 가공된 폭과 깊이가 달라질 수 밖에 없었다.

### 후기

본 연구는 한국산업기술대학교와 연세대학교의 “마이크로-나노 점선가공 기반구축센터” 사업으로 부터의 지원과 Hitach Seiki Instrument의 협조로 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

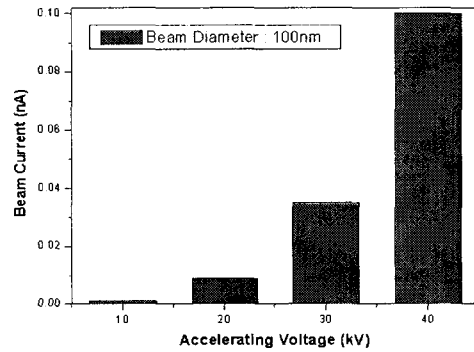


Fig. 8 Characteristics of ion beam current according to the accelerating voltage

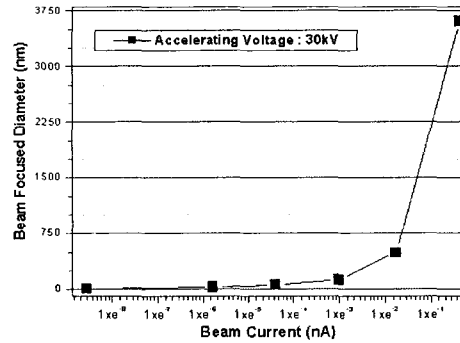


Fig. 9 Focusing characteristics according to the ion beam current

### 참고문헌

1. D. P. Adams, M. J. Vasile, G. Benavides, and A. N. Campbell, "Micromilling of metal alloys with focused ion beam-fabricated tools," Precision Engineering, Vol. 25, pp. 107-113, 2001.
2. F. Yongqi, and N. K. A. Bryan, "Investigation of 3D Microfabrication Characteristics by Focused Ion Beam Technology in Silicon," Journal of MPT, Vol. 104, pp. 44-47, 2000.
3. F. Yongqi, N. K. A. Bryan, O. N. Shing, and H. N. P. Wyan, "Influence Analysis of Dwell Time on Focused Ion Beam Micromachining in Silicon," Sensors and actuators, Vol. 79, pp. 230-234, 2000.
4. Hitachi Seiki Instrument, Operating Manual.