

집속 이온빔에 의한 3차원 가공 시스템

박철우*, 이종항⁺

3 Dimensional Machining System using Focused Ion Beam

Cheol Woo Park*, Jong Hang Lee⁺

Abstract

There is great difficulty in 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. Die & moulds techniques are better than one-to-one machining techniques in regards to production costs in the mass production of ultra size structures. Also, it is advantageous to machine die & moulds to the 10 micrometers level by FIB technique rather than other techniques. It is difficult to machine the three dimensional machining, such as micro lens, using FIB system because of their machining characteristics.

In this paper, three dimensional machining techniques were properly introduced, and also experiments showed effectiveness of their techniques.

Key Words : Focused Ion Beam, 3-Dimensional Machining, Machining Characteristics, Dwell Time, Overlapping, Micro Lens

1. 서론

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. 특히, 수십 마이크로 크기의 금형을 나노급의 가공정도로 가공할 수 있는 방법으로는 방전가공 및 레이저가공 등과 같은 특수가공 방법이 시도되었으나 수십 마이크로 이하의 3차원 형상을 정밀하게 가공하는 것은 불가능하고 FIB에 의하여 수십 나노까지 초미세가공이 가능하다.

FIB를 이용한 미세가공 연구로는 Sandia Lab의 미세 가공용 공구성형에 관한 연구⁽¹⁾가 있으며, 실리콘 소재의 3차원 마이크로 가공과 Dwell Time에 따른 가공특성에

대한 Yongqi^{(2),(3)}의 연구가 있다. 이 연구들은 주로 시행착오에 의한 수작업 결과들이므로 3차원 형상가공의 경우는 가공정도를 향상시키기가 곤란하다.

나노가공장치는 외국의 경우 이미 20년 전에 상용화시켰다. 특히, 최근에는 5nm의 집속도^{(4),(5)}에 이르는 장치들이 개발되고 있으며, 사용이 편리한 운용소프트웨어 및 최적의 3차원 가공 소프트웨어들도 개발되고 있다.

국내의 경우에는 약 200nm 수준의 실험실용 2차원 가공장치가 개발되어진 사례는 있으나 3차원 가공을 시도한 사례를 없는 실정이다.

본 연구에서는 국내에서 아직 개발경험이 없는 FIB를 이용한 3차원 형상가공장치의 가능성을 제시하고자 한다. 즉, FIB를 이용한 3차원 형상가공 방법을 제시하고, 실험을 통하여 가공방법의 유효성을 검증하고자 한다.

* 발표자, 한국산업기술대학교 기계공학(cwpark@kpu.ac.kr)

주소: 429-793 경기도 시흥시 정왕동 2121

⁺ 한국산업기술대학교 기계공학과

2. FIB에 의한 가공장치의 구성

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

LMIS 앞단에 방출된 이온들을 집속시키거나 원하지 않는 이온들은 제거하는 장치를 경통(Ion Beam Column)이라한다. Fig. 2와 같이 방출된 이온들은 공간상으로 퍼지므로 이들을 제어하기 위한 Aperture가 설치되어 있으며, 이온량을 측정하기 위한 패러데이 컵(Faraday Cup), 이온들을 가속시켜 운동량을 증가시키기 위한 정전렌즈(Electro static Lens)들이 설치되어 있다.

이온원으로 사용되는 합금재료들에서 필요 없는 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, 온라인 측정을 위한 Scanning Ion microscope(SIM)와 이온과의 화학작용에 의한 Micro Deposition 기능을 가지고 있으며, 이들 모두가 10⁻⁷Torr 이상의 진공 중에서 운전된다.

FIB에 의한 가공은 전통적인 기계가공과는 그 특성이 다르기 때문에 가공기구 및 가공방법이 다르게 적용되어야 한다.

일반적으로 FIB에 의한 가공은 레이저와 같이 집속된 고에너지 빔에 의하여 공작물의 재료표면을 제거하는 것이다. 즉 집적된 이온 에너지의 충격력에 의하여 이온이 표면에 충돌하여 표면원자를 제거(스퍼터링)하는 것이다.

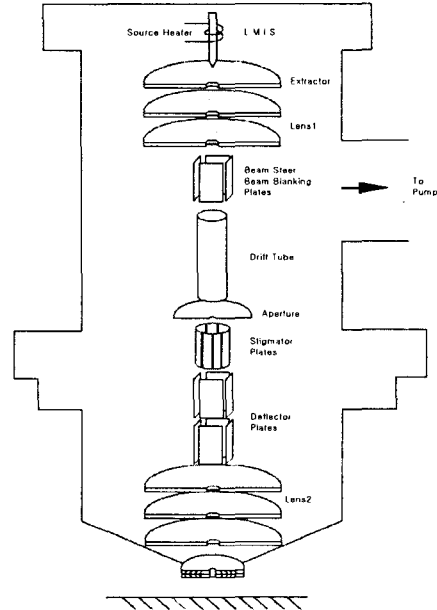


Fig. 2 Ion Beam Column의 구조

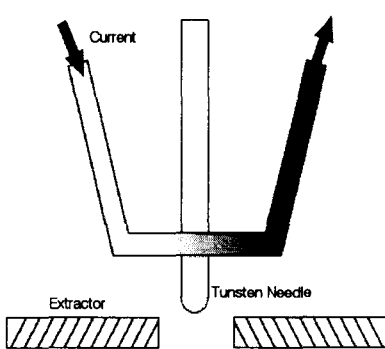


Fig. 1 LMIS 구조

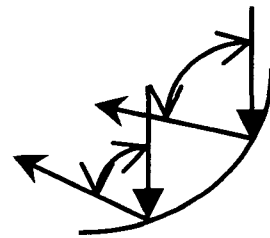


Fig. 3 충돌각도의 차이에 따른 제거량의 변화 및 제거된 재료의 비산 방향

FIB에 의한 가공은 다음과 같은 특성을 가지고 있기 때문에 3차원 윤곽가공시 그 치수정밀도를 맞추기가 어렵다.

-FIB의 직경이 크면 에너지가 크기 때문에 가공량이 크며, 직경이 작으면 가공량이 적은 특징을 가지고 있다.

-Fig. 3과 같이 가공시 집속이온빔과 표면과의 충돌각도에 따라 가공량이 달라지는 특성을 가지고 있다.

3. 3차원 형상가공

3.1 3차원 형상가공 방법

-Fig. 4와 같이 이온빔의 축방향 에너지(충돌되는 방향)가 공간적으로 Gaussian 분포를 하기 때문에 가공된 표면은 가우시안 형상의 윤곽을 나타내게 된다. 그러므로 이러한 특성으로 인하여 미세 그루브와 같이 직각의 형상가공에서는 직각도와 같은 형상공차를 맞추기가 어려워진다. 또한 이 특성으로 인하여 3차원 형상의 가공도 정확한 형상 및 치수가공이 곤란하게 된다.

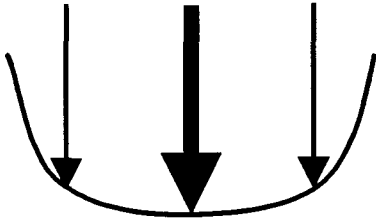


Fig. 4 공간상에서 FIB의 에너지 분포 변화로 인한 가공면의 윤곽 특성

이와 같은 가공특성과 가공원리로 인하여 FIB에 의한 3차원의 형상의 미세가공은 상당히 어렵다.

따라서 상기의 특성을 고려하여 다음과 같은 기계구조를 적용하였다.

-공작물을 설치할 수 있는 테이블 아래에 틸팅(Tilting) 및 스윙블링(Swiveling)축을 설치하고, 그 아래에는 X-Y 스테이지를 설치하여 제어기와 연결시킨다. 이와 같은 기계장치의 구성으로 FIB의 충돌각도를 일정하게 제어하는 것이 가능하다.

-이때 기계구조는 Fig. 5와 같이 가공시 일정한 충돌각도를 유지하지만 하면 되기 때문에 틸팅 및 스윙블링 축을 조합하여 2축을 제어하는 방식과, 틸팅 또는 스윙블링축 중 어느 한가지와 X-Y 스테이지의 수직 축에 대하여 회전이 가능한 Rotation축 조합방식이 가능하다.

또한, 집속이온빔의 가우시안 분포 특성으로 인한 가공영역의 가공량 차이는 다음과 같은 방식을 이용한다. 재료마다 가공 프로파일을 사전실험을 통하여 구한다. 이 실험결과를 바탕으로 가공조건에 따른 가공 윤곽에 대한 데이터베이스를 구축하여 최종가공(Finishing Machining)시 필요한 데이터를 이용하여 정확한 가공제어를 할 수 있다.

한편, FIB에 의한 가공에서는 가공량이 매우 작으므로 Dwell Time을 이용하여 가공량을 제어한다. 즉 가공위치에 따라 Dwell Time과 PIXEL의 크기를 제어하며, 특히 가공깊이가 달라지면 Weight Factor(WF)를 제어((a) WF1.0 -> (b) WF2.0 -> (c) WF3.0)하여 가공량을 정확하게 제어한다.

다.

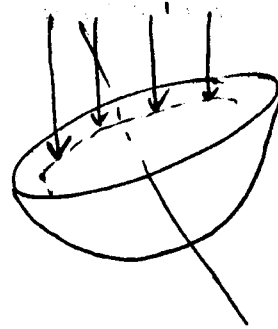
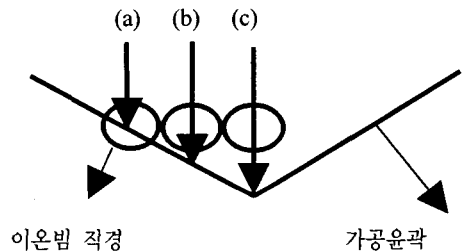


Fig. 5 Rotation과 틸팅(또는 스윙블링)각도 제어의 조합에 의한 이온과 공작물의 충돌각도를 일정하게 유지하면서 가공하는 방식

한편, 미세가공은 다음과 같은 방법으로 정확한 가공이 가능하게 된다. Fig. 7은 목표로 하는 가공영역에 대하여 먼저 가공에 필요한 FIB의 직경을 결정한다.

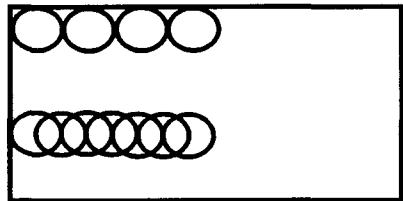


이온빔 직경

가공윤곽

Fig. 6 Dwell Time 제어에 의한 가공깊이 제어

0% 중첩가공



50% 중첩가공

Fig. 7 FIB 직경의 결정과 중첩가공

이때의 직경은 가공량이 많은 경우(황삭가공)는 가공량을 증가시키기 위하여 FIB의 직경을 크게 한다. 그러나 최종 마무리 가공을 할 경우에는 FIB의 직경을 작게 하여 가공한다. 즉, 다음 식을 이용하여 PIXEL 수를 계산한다.

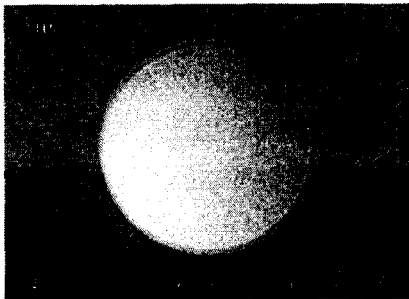
Beam Diameter=Machining Area/No. of PIXEL

Fig. 7과 같이 필요한 가공영역을 PIXEL 수와 PIXEL들을 중첩(Overlapping)시켜 가공한다. 이 중첩가공을 이용하면 가우시안 분포를 갖는 가공표면을 개선시킬 수 있다.

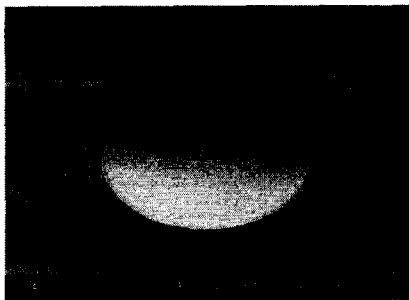
3.2 3차원 형상가공 실험결과

앞 절에서 설명한 바와 같이, FIB에 의한 3차원 형상가공방법의 유효성을 확인하기 위하여 대표적인 3차원 형상인 구형렌즈를 가공한 것이 Fig. 8이다. Fig. 8을 보면 상기의 가공방법들을 적용하면 구형곡면의 가공이 가능함을 알 수 있다.

Fig. 8은 기존의 FIB 가공장치에 3차원 가공용 소프트웨어를 적용하여 가공한 결과이다.



(a) 0도 Tilting 촬영



(b) 45도 Tilting 촬영

Fig. 8 FIB에 의한 구형렌즈 가공결과

4. 결론

집속이온빔, 이와 관련된 기구물, 그리고 형상

가공용 소프트웨어를 이용한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 집속이온빔의 가공특성을 보정할 수 있도록 킬링 및 스윙블링 축을 이용한 가공기구를 제안하였다.

(2) 집속이온빔에 의한 가공특성에 적합한 가공방법을 제안하였다.

(3) 가공기구와 가공용 소프트웨어를 적용하여 구형렌즈를 가공한 결과, 상기의 가공방법이 충분히 적용 가능함을 알 수 있었다.

후기

본 연구는 산업자원부에서 지원하는 “마이크로-나노 점선가공 기반구축”사업과 차세대신기술개발 과제인 “이온빔 이용 나노가공용 장비 개발” 사업으로부터 지원을 받아 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) D. P. Adams, M. J. Vasile, G. Benavides, and A. N. Campbell, 2001, "Micromilling of metal alloys with focused ion beam-fabricated tools," Precision Engineering, Vol. 25, pp. 107~113.
- (2) F. Yongqi, and N. K. A. Bryan, 2000, "Investigation of 3D Microfabrication Characteristics by Focused Ion Beam Technology in Silicon," Journal of MPT, Vol. 104, pp. 44~47.
- (3) F. Yongqi, N. K. A. Bryan, O. N. Shing, and H. N. P. Wyan, 2000, "Influence Analysis of Dwell Time on Focused Ion Beam Micromachining in Silicon," Sensors and actuators, Vol. 79, pp. 230~234.
- (4) Seiko Instruments Inc., 2003, Operation Manual.
- (5) Hitachi Seiki Instruments Co., 2003, Operation Manual.