

## 초정밀 가공기 제작을 통한 미세가공에 관한 연구

김석원\*, 김상기, 정우섭((주)테크맥), 이재문, 이득우(부산대)

### A Study of Micro Machining Using Ultra Precision Machine

S. W. Kim, S. K. Kim, W. S. Jung(Techmac), C. M. Lee, D. W. Lee(Mech. Eng. Dept., PNU)

#### ABSTRACT

In recent years, a demand for micro-structure machining is increasing by the development of information and optics industries. Micro machining technology is in general well known in the field of lithography. However, the requirement of producing micro machine and/or micro mechanism with metal materials will be increased since a variety of workpiece configurations can be easily made.

In this paper, ultra precision machine is developed to obtain micro groove and mirror surface using single crystal diamond tool. According to the cutting experiment, no burr was found at the edge of V-grooves, and the surface roughness of copper is about 1~3nm Ra. It is verified that ultra precision machine is effective to high precision machining.

**Key Words** : ultra precision machine(초정밀 미세가공기), air guide(공기정압 베어링), micro groove(미세 그루브), high precision machining(초정밀 가공), mirror surface(경면 가공)

#### 1. 서론

최근 정보 통신 산업의 발달과 더불어 전기, 전자, 광학, display 관련 기기 등의 발달로 소형화, 미세화에 관련된 기술 개발의 수요가 꾸준히 증가하고 있다. 미세 가공에 의해 제작되는 부품으로는 모바일 폰의 도광판(BLU, FLU), 컴퓨터 등의 LCD 모니터, PDP, 자기 디스크, 프레넬 렌즈, 홀로그램 렌즈, 고휘도·초고휘도 반사 필름 등이 있다. 이러한 부품들은 기계부품보다 정밀도가 훨씬 높아 초정밀가공 기술 없이는 생산할 수 없다. 제작하는 수단으로 종래에는 에칭, 폴리싱, MEMS, LIGA 등의 미세가공 기술이 많이 사용되어 왔으나, 최근에는 나노급의 위치 정밀도를 갖는 초정밀 가공기의 출현으로 기계적인 가공법으로도 마이크로 형상 부품을 제작할 수 있는 미세가공 기술 및 가공기 개발에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.(1)(2)

이러한 미세한 프리즘 또는 홈 형상의 집합으로 이루어지는 3차원 형상부품은 주로 단결정 다이아몬드 공구로 가공이 이루어지고 있다. 다이아몬드 공구는 미세절삭을 통해 비교적 쉽게 경면의 가공면을

얻을 수 있다. 그리고, 인선반경을 극히 작게 만드는 것이 가능하며, 미세 절입에 대한 절삭성과 공구 형상의 가공물에 대한 전사성이 비교적 우수하다.

마이크로 가공 공정에서 요구되는 핵심기술은 부품의 형상에 따라 얼마나 미세한 패턴을 어느 정도의 정밀도 및 가공품위를 유지하면서 가공할 수 있는지로 집약된다. 가공기의 고정도 및 고강성, 공구와 재료의 특성, 가공 방법, 가공 조건 등의 제반 기술이 완벽하게 갖추어져야 한다.(3)(4)(5)

본 연구에서는 위치결정 분해능이 나노오더의 초정밀 미세가공기를 설계·제작하여 평가하였으며, 단결정 다이아몬드 공구로 셰이핑(shaping) 가공으로 미세 홈 가공 및 경면가공을 수행하여 형상 정밀도, 버의 발생, 가공면의 표면거칠기 등의 특성을 분석하였다.

#### 2. 초정밀 가공기 제작

##### 2.1 초정밀 가공기 구조

미세 그루브 형상을 가공하기 위한 초정밀 가공기는 정밀 석정반 위에 문형(bridge type)으로 제작되

있으며, 진동 등의 외란을 방지하기 위하여 공기 스프링을 설치하였다. 가공기는 X, Y, Z의 3축과 회전 테이블로 구성되었으며, 세이핑 가공에 적합하게 각 축의 이송기구 및 특성을 다르게 구성하였다. 가공축인 X축은 공기 정압 베어링(air guide)에 Linear Motor로 구동되며, 최대 속도는 300mm/s이고 위치결정 축인 Y, Z축은 100,000pulse/rev인 마이크로 스텝핑 모터에 리드가 1mm인 볼 스크류로 구동하였다. 회전 테이블에는 직경이 180mm인 크로스 플러 베어링에 웨기어를 장착하여 구동하였다. Table 1에는 초정밀 가공기의 주요사양을 나타내었으며, Fig. 1은 제작된 초정밀 가공기의 형태를 보여 주고 있다.

	X	Y	Z	Rotary table
Driving	Linear Motor	Micro Stepping Motor + Ball screw	Micro Stepping Motor + Ball screw	Micro Stepping Motor + Worm gear
Guide	Air guide	Needle Roller	Needle Roller	Cross Roller
Max. Velocity	300mm/s	10mm/s	10mm/s	20mm/s
Resolution	100nm	10nm	10nm	0.00018°
Stroke	250mm	250mm	80mm	360°

Table 1 Specification of ultra precision machine

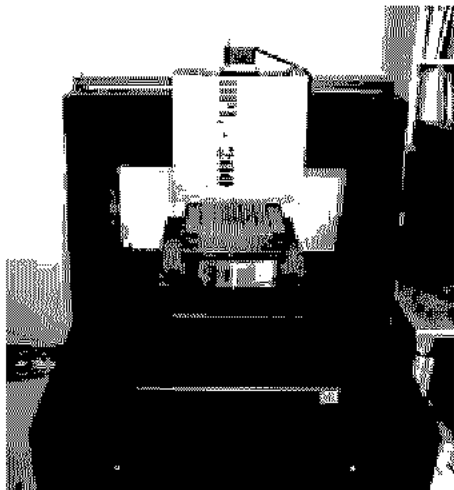


Fig. 1 Photograph of the machine

가공 시스템의 미소 위치결정 정밀도가 요구되는 Y, Z축에는 10nm의 glass 스케일을 부착하여 피드백 제어를 하였으며, 가공축인 X축에는 0.1μm인 스케일을 부착하여 고속화시켰다. 회전테이블은 grating이

10,000개인 로타리 스케일을 4체배 하여 0.00018°의 회전 분해능을 가진다. 그리고, 공작물은 진공척을 이용하여 고정시켜 기존의 바이스를 사용할 때 발생할 수 있는 공작물의 변형 등의 현상을 완화시켰다.

## 2.2 에어 가이드

공기정압베어링은 가이드와의 비접촉 운동과 유막의 평균화 효과에 의해서 높은 운동정밀도를 얻을 수 있으면서도 발열과 마찰이 없어 영구적인 수명을 가질 뿐만 아니라 습동유 등이 사용되지 않기 때문에 환경 문제에 있어서도 우수한 특성을 가진다.

에어베어링은 리스트릭터(restrictor) 방식에 따라 자기보상형, 표면보상형, 다공질보상형의 3가지로 분류할 수 있다. 본 시스템에서는 급기구가 미세 홀의 일정한 배열로 구성되는 자기보상형으로 설계하여 박스 타입으로 제작하였다.

공기정압 스투스트 베어링의 설계는 급기계수와 무차원 부하용량과 무차원 강성, 무차원 유량의 실험적 상관관계에 의존하게 되는데 다음의 식들에 의해 각각의 설계변수들이 결정된다.(6)(7)

$$F = \frac{6 \mu n d^2 \sqrt{\mu R T_0}}{\rho_s h^2} \quad (1)$$

$$W = A \bar{W} \quad (2)$$

$$k_s = \frac{1}{h} \pi A (\rho_s - \rho_a) \bar{k}_s \quad (3)$$

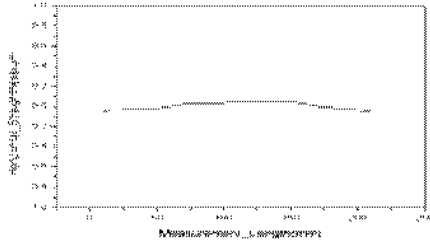
여기서,  $F$ 는 급기계수,  $\mu$ 는 점성계수,  $n$ 은 급기 미세공의 개수,  $d$ 는 급기 미세공의 직경,  $g$ 는 중력 가속도,  $R$ 은 기체상수,  $T_0$ 는 기체온도,  $\rho_s$ 는 급기압,  $\rho_a$ 는 대기압,  $h$ 는 베어링 클리어런스,  $A$ 는 베어링의 면적,  $\bar{W}$ 는 무차원 부하용량,  $\bar{k}_s$ 는 무차원 베어링 강성이다. 결정된 베어링 설계변수들을 적용하여 제작된 공기 정압 베어링의 사양을 Table 2에 나타내었다.

Restrictor type	Inherently Compensated Type	
Pad Size	Horizontal	100×250
	Vertical	150×250
Stiffness	Horizontal	15.3kN/μm
	Vertical	11.7kN/μm
Clearance	Horizontal	12μm
	Vertical	12μm

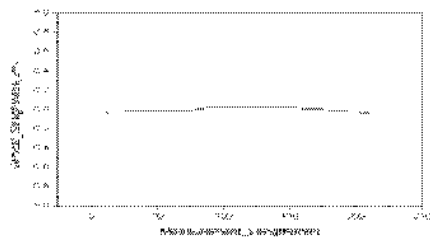
Table 2 Specification of air guide

에어의 공급압력은 4.5~5bar이며, 에어 패드는 박스 타입으로 설계 및 제작하였다. Fig. 3에는 Laser interferometer를 이용하여 에어 가이드의 수평 및 수직 방향의 진직도를 측정한 결과를 보여주어 주고 있다. Horizontal straightness은 -43nm에서 56nm로 약

100nm의 운동오차를 가지며 Vertical straightness은 -24nm에서 27nm로 약 50nm 정도로 진직성이 매우 우수하였다.



(a) Horizontal Straightness



(b) Vertical Straightness

Fig. 3 Straightness of air guide

### 3. 미세가공 실험

제작된 초정밀 미세 가공기를 이용하여 미세 세이핑 가공 실험을 수행하였다. 공구는 단결정 다이아몬드 공구로 경면과 V-groove를 가공하기 위하여 사각과 90° 형상공구를 사용하였다. Fig. 4에 공구 형상을 나타내었다.

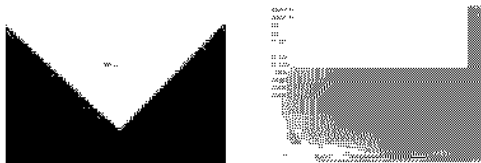


Fig. 4 Photo of diamond tip

반사경 및 prism sheet용 금형 등으로 사용되는 연질재료에 대하여 실험을 수행하였으며, 실험 조건은 Table 3에 나타내었다. 미세 가공된 시편의 형상 정밀도, 표면거칠기 등을 SEM과 AFM을 이용하여 측정하였다. 채귀반사시트(retroreflective sheet)등에 사용되는 마이크로 프리즘 구조물 형상을 회전 테이블을 이용하여 가공하였다.

Material	Copper
Cutting Speed	250mm/sec
Cutting Environment	Dry
Depth of cut( $\mu\text{m}$ )	1, 5, 25

Table 3 Summary of cutting parameters

### 3.1 미세 구조물 형상 가공

가공면의 표면거칠기를 측정하기 위하여 깊이가  $5\mu\text{m}$ , 폭이  $10\mu\text{m}$ 인 groove를 가공하여 AFM으로 측정한 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

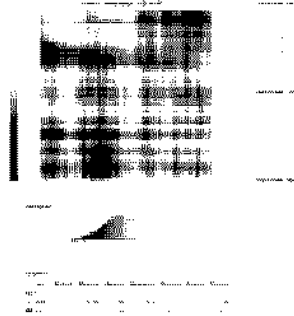
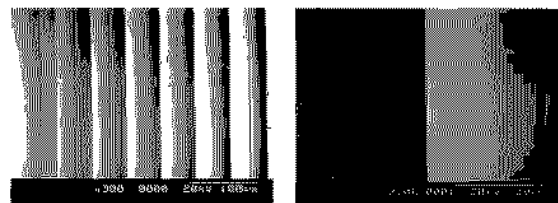


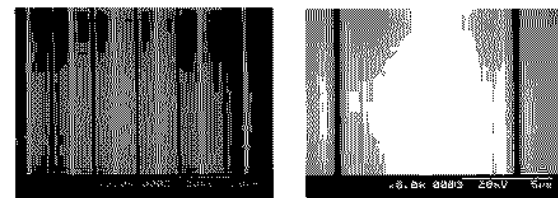
Fig. 5 Surface roughness of V-groove

전체 측정 영역에서 2~3nm Ra의 아주 우수한 결과를 얻었다. 이것은 LCD 도광판 등에서 요구되는 초정밀 광학적 요구정밀도 10nm Ra 수준을 충분히 만족하고 있다.

Fig. 6의 (a)와 (b)에 각각 피치가  $50\mu\text{m}$ , 깊이  $25\mu\text{m}$ 와 피치가  $10\mu\text{m}$ , 깊이  $5\mu\text{m}$ 로 가공된 V-groove의 형상과 확대한 형상을 보여주고 있다.



(a) Pitch  $50\mu\text{m}$



(b) Pitch  $25\mu\text{m}$

Fig. 6 SEM of machined V-groove

Groove의 산과 골이 명확하게 생성되어 가공 표면에도 스크래치 등과 같은 것이 발생하지 않았다. 특히 산 부분에서는 버(burr) 등이 거의 발생하지 않았다.

채귀반사시트 등에는 삼각형 베이스와 사각형 베이스 피라미드형의 마이크로 구조물이 사용되고 있는데, 여기서는 회전시켜 2방향 가공에 의해 생성되는 사각형 베이스의 프리즘 형상을 Fig. 7에 보여주고 있다.

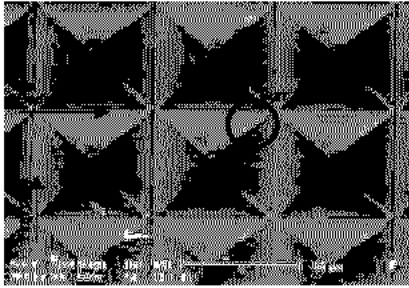


Fig. 7 Micro prism structure

한방향 가공에서는 Fig. 6에 보인 바와 같이 버 (burr) 등의 발생없이 아주 양호한 형상이 생성되었으나, 90° 회전한 두 번째 가공에서는 에치부에 미소 버가 발생하였다. 두 번째 가공에서는 반대방향으로 미치는 힘이 작용하여 에치부에 버가 발생한 것으로 보인다.

### 3.2 경면 가공

Fig. 4에서 보인 사각바이트를 이용하여 경면 가공한 시편의 표면거칠기를 AFM에서 측정한 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

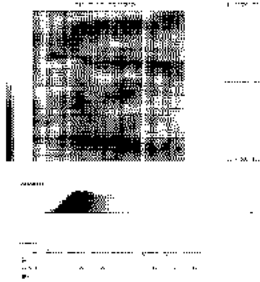


Fig. 8 Surface roughness of planar

가공 조건은 피치 0.8mm, 최종 절입깊이 1<sub>μ</sub>m 절삭속도 250mm/sec로 가공하였다. 전체 측정 영역에서 약 1nm Ra, 6~8nm Rmax로 경면이 생성되었다.

Fig. 9에 가공된 경면의 상태를 보여 주고 있다.



Fig. 9 Photograph of mirror surface

Fig. 10에는 사각 바이트로 0.2<sub>μ</sub>m의 단차 가공한 모습을 AFM으로 측정한 결과를 나타내었다.

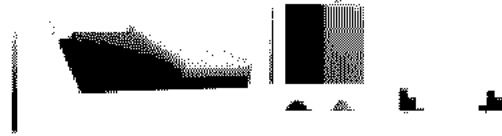


Fig. 10 Structure of 0.2<sub>μ</sub>m step

## 4. 결론

본 연구에서는 미세홀의 고정도 가공을 목적으로 고정밀, 고강성을 갖는 초정밀 미세 가공기를 설계 및 제작한 후 단결정 다이아몬드 바이트로 미세 그루브 및 경면 가공을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 고강성 및 직진도가 우수한 공기 정압 베어링의 설계 및 제작 기술을 확보하였다.
- (2) 우수한 V-groove 형상을 생성하였고, 표면거칠기 도 2~3nm Ra 수준의 균일한 가공면을 얻었다.
- (3) 사각형 베이스 피라미드형의 마이크로 구조물 가공시 미세 버가 발생하였다.
- (4) 경면 가공시 표면거칠기가 약 1nm Ra, 6~8nm Rmax로 아주 우수한 경면이 생성하였다.

## 참고문헌

1. F. Z. Fang and V. C. Venkatesh, "Diamond Cutting of Silicon with Nanometric Finish," Annals of the CIRP, Vol. 47, pp. 45-49, 1998.
2. Kiyoshi SAWADA, Keisuke IMAI, Yoshimi TAKEUCHI and Toshio SATA, "Development of Ultra-precision Machining Center with Closed-loop Structure and its Control," Annals of the CIRP, Vol. 44/1, pp. 369-372, 1995.
3. 채태진, "마이크로 부품제조를 위한 미세 절삭공정 연구," 박사학위논문, 2004.
4. 원중호, 김주환, 박순섭, 김건희, 김삼석, "무산소동의 초정밀 절삭 특성을 이용한 아노드 및 캐비티의 가공," 한국정밀공학회 2002년도 춘계학술대회논문집, pp. 922-925.
5. Kiyoshi SAWADA, Yoshimi TAKEUCHI and Toshio SATA, "Improvement of Ultraprecision Micromachining Accuracy by Means of High Precision Tool Chucking System," Proc. of the Int. Seminar on Improving Machine Tool Performance, San Sebastian, pp. 599-606, Spain, July 6-8, 1998.
6. J. W. Lund, "Design of Gas Bearing," 1967.
7. 上台晋 - "気體軸受 設計法" 東京 1981. 公立出版株式會社 300 頁