

◆특집◆ 초정밀가공기술

급속이송공구대를 이용한 마이크로렌즈어레이 가공 기술

양순철*, 국명호*, 원증호**

Machining Technology of Micro Lens Array using Fast Tool Servo

Sun Choel Yang*, Myung Ho Kook* and Jong Ho Won**

Key Words : Fast tool servo (급속이송공구대), Micro lens array (마이크로렌즈어레이), Ultra precision machining (초정밀가공), Piezo electric actuator (압전액츄에이터)

1. 서론

현대 산업의 발전을 주도하고 있는 반도체 및 정보통신관련 산업은 초정밀(ultra-precision)이라는 기계적 특성을 기반으로 성장하고 있다. 초정밀이 적용되는 예로 반도체의 고직접화, 광자기메모리의 고용량화, 광섬유 활용 다채널 고속 통신망, 그리고 고 분해능 레이저 프린터 등이다. 이에 따라 국내의 여러 연구기관과 산업계는 초정밀을 향한 정밀 핵심기술을 축적해 왔으며, 그 기반 시설을 구축해 왔다.

초정밀 가공 기술 중 하나인 단결정 다이아몬드 선삭기술은 일반적으로 회전 대칭인 경우에 사용된다. 그러나 최근의 광학 및 반도체 산업에서는 회전 비대칭 표면 가공을 요구하고 있으며, 가공기술 또한 다이아몬드 선삭 기술의 발전으로 가능해져 해당 산업에 큰 변화를 일으키고 있다. 선삭 가공에서 회전 비대칭면을 가공하기 위한 방법은 크게 STS(slow tool servo)와 FTS(fast tool servo) 2가지로 볼 수 있다.^{1,2}

STS는 초정밀 가공기의 스피들축의 제어와 Z축 이동을 동시에 제어하며 가공하는 기술이고, FTS는 압전소자 액츄에이터(piezo electric actuator)를 이용하거나 리니어 모터를 이용하는 방법을 사용하여 공구대를 구동시킴으로써 공구 끝단의 Z축 위치를 빠르게 제어하여 높은 정밀도의 회전 비대칭 가공물을 얻는다.

FTS는 미국, 유럽, 일본에서 활발하게 연구되고 있다. 특히 미국의 Precitech사의 경우 FTS를 양산용 가공기의 선택사양으로 채택하고 있으며, 이에 따라 다양한 형태의 회전 비대칭 가공물을 생산하고 있다.

국내에서도 FTS를 활용한 가공법에 대하여 여러 기관에서 연구를 하고 있다. 특히 고등기술연구원에서 압전소자 액츄에이터를 활용한 FTS를 개발하고 있으며, 대구경 반사경 가공과 같은 여러 분야에서 활용하고 있다.^{3,5} 그러나 압전소자를 이용하는 경우에는 장거리 구동이 어려워, 이를 극복하기 위하여 리니어 모터를 채택한 FTS도 국내에서 연구 중이다.⁶

본 논문에서는 한국기초과학지원연구원의 초정밀가공팀이 보유하고 있는 초정밀가공기(Freeform 700A)와 FTS를 소개한다. 그리고 구축된 장비를 활용하여 광 커넥터와 같은 부분에 사용되는 마이크로렌즈어레이의 초정밀가공법 및 측정에 관하여 기술한다.

* 한국기초과학지원연구원 연구장비개발부/초정밀가공팀

Tel. 042-865-3462, Fax. 042-865-3469

Email md941057@kbsi.re.kr

생산 시스템 특히, 초정밀 가공과 측정, 폴리싱 가공 분야에 관심을 두고 연구 활동을 하고 있다.

** 충남대학교 기계공학과

2. 급속이송공구대(FTS)

FTS(Fast Tool Servo)를 이용하여 회전 비대칭면을 가공하기 위해서는 기본적으로 초정밀가공기와 FTS가 동시에 필요하다. 그러므로 2장에서는 본원이 보유하고 있는 초정밀가공기와 FTS에 대하여 소개한다.

2.1 초정밀가공기 (Freeform700A)

2006년 8월 설치된 Freeform 700A는 세 개의 유정압 안내면과 공작물을 고정시키는 공기정압 베어링 스피들과 유정압 B축 회전테이블로 구성되어 있다. 두 축 안내면은 각각 X축과 Z축으로 'T' 형태의 직교를 이루어 구동되며, X축의 중심부에 해당하는 안내면에 주축스핀들이 고정되어 회전한다. 안내면의 구동방향과 평행을 이루며 회전한다. Z축 구동 안내면 위에는 공구대가 고정되어 바이트나 연삭휠을 설치할 수 있으며, 스피들 구동 방향과 수직 방향으로 구동된다. C축 회전에 대한 위치제어와 X축 위에 Y축 안내면이 추가되어, 동시 4축 제어가 가능한 구조의 초정밀 자유곡면 가공기이다. 추가적으로 FTS를 설치하여, C축과 동시제어를 통하여 광 커넥터 등에 사용되는 Lens Array와 같은 초미세 Grid가공이 가능하다.

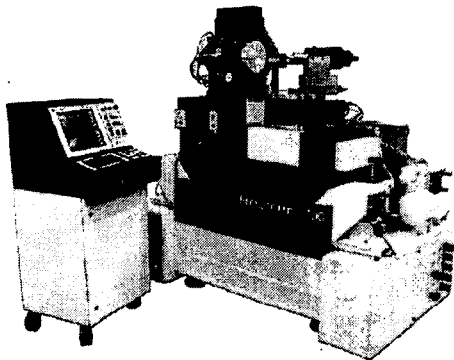


Fig. 1 The figure of Ultra precision machining

2.2 급속이송공구대 (Fast Tool Servo)

본 절에서는 본원에서 보유하고 있는 급속이송공구대에 대하여 기술한다. Fig. 2는 바이트가 장착된 FTS로서 Freeform 700A의 공구대에 부착하여 초정밀가공을 한다. FTS는 전소자에 의하여 Z축 방향으로 실시간 제어되며, 그 기준면에서 $\pm 35 \mu\text{m}$

이동 가능하기 때문에 기준면을 오프셋 시키는 경우 대략 $70 \mu\text{m}$ 까지 가능하다.

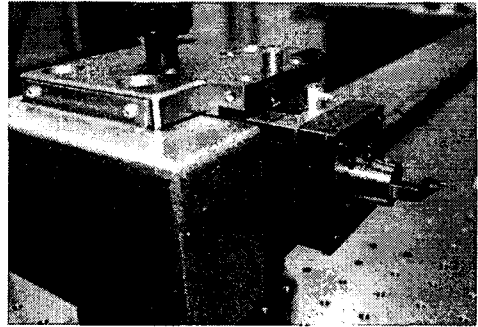


Fig. 2 The figure of Fast Tool Servo

Fig. 3은 XZC 제어를 통하여 회전 비대칭 구조를 가공하는 시스템의 개략도를 보여주고 있다. 그 리에서 스피들축인 C축이 일반 선반처럼 단순히 회전만 하는 것이 아닌 고정밀도로 제어되며, Z축 위의 FTS가 실시간으로 회전각의 정보를 피드백 받아 제어되어 원하는 3차원 형상을 가공할 수 있다. 이와 같은 시스템에서 가장 중요한 점은 C축의 회전각에 따라 Z축의 위치를 시간 지연 없이 실시간으로 제어하는 것이다.

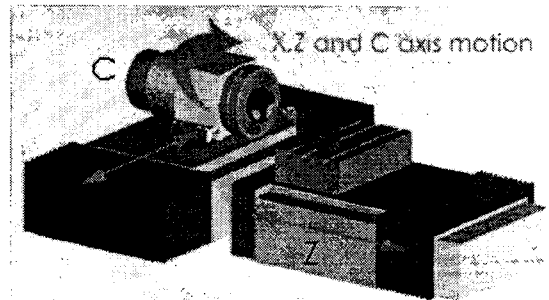


Fig. 3 Fabrication of Non-Rotationally Symmetric, Optical Surfaces Using XZC Positioning

회전 비대칭 구조를 가공하는 시그널의 흐름도는 Fig. 4와 같다. 초정밀가공기의 센서는 기본적으로 X축의 위치 정보를 기반으로 제어되며, 동시에 스피들 축의 회전각 엔코더 값과 X축 엔코더 값을 FTS의 모션컨트롤러에게 제공한다. 모션컨트롤러는 엔코더 값을 회전각도와 X축 위치로 변환하여 DSP 커널로 전송하며, DSP는 실시간으로 Z digital

값을 연산하여 모션컨트롤러로 재전송한다. 최종적으로 모션컨트롤러는 FTS로 아날로그 신호를 주어 원하는 위치로 제어한다.

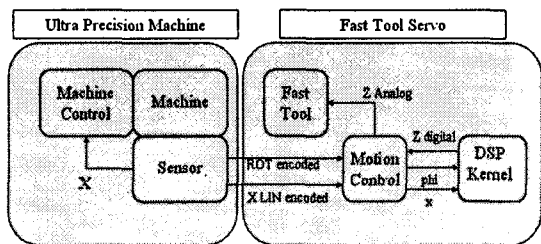


Fig. 4 Block diagram of fast tool servo system

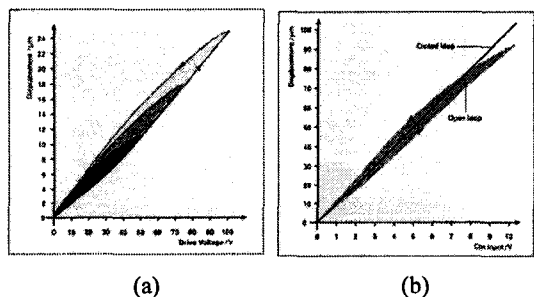


Fig. 5 (a) Typical Hysteresis Loop of Piezoelectric Materials, (b) Open and closed loop controlled graph of piezoelectric actuator

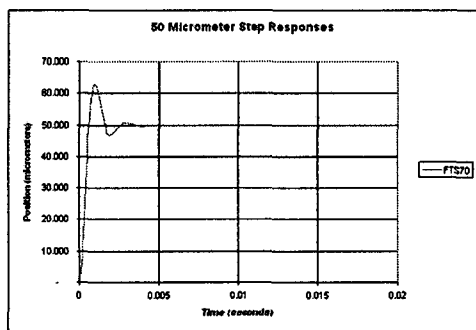


Fig. 6 Step response of piezoelectric actuator

FTS에 사용되는 피에조 액츄에이터는 기본적으로 히스테리시스 특성을 가지고 있다. 그러므로 Fig. 5의 (a)와 같은 이동변위 그래프를 가진다. 그러나 실제 시스템에서 사용하기 위하여 open-loop 그리고 closed loop으로 제어를 하게 되면 그림 4의

(b)처럼 선형적인 이동변위를 얻을 수 있다. closed loop으로 제어되는 시스템의 step-response는 Fig.6과 같다.

3. 마이크로렌즈어레이 가공 기술

3.1 마이크로렌즈어레이

현대 광학계에서 보다 높은 효율을 얻기 위하여 디스플레이 산업, 조명 광학계, 의료용용 기기분야에서 마이크로렌즈어레이를 사용하고 있는데 특히 본 논문에서는 의료분야인 부분 박피 레이저 시술기에 사용되어지는 광학계에 적용하였다.

국내시장에서 부분 박피 레이저는 고가 트렌드인 렌즈 방식의 기술 한계를 극복하지 못하고 저가 트렌드인 진동 방식만 모방하고 있으며, 제품의 핵심 부분을 외국에서 수입하고 있는 실정이다. 이에 렌즈 방식의 핵심 기술인 마이크로렌즈어레이 배열의 금형을 초정밀 5축 가공기에 적용함으로써 국산화를 목표로 삼고 있다.

부분 박피 레이저는 1540nm의 Erbium Glass Laser 빔을 이용하여 피부 표면에 육안으로는 잘 보이지 않는 미세한 구멍을 마이크로 어레이 렌즈를 이용하여 1cm² 당 91개의 구멍을 뚫어서 새로운 조직이 차오르게 하여 여드름 흉터와 모공을 함께 치료할 수 있으며 또한 손톱자국을 비롯한 성형 외과적 수술로서 해결하기 힘든 여러 종류의 흉터를 복원시킨다.

Fig. 7과 같이 한쪽 면은 평면이며 반대 면은 91개의 구면 형상을 가진 마이크로렌즈어레이의 3D 모형을 보여주고 있다.

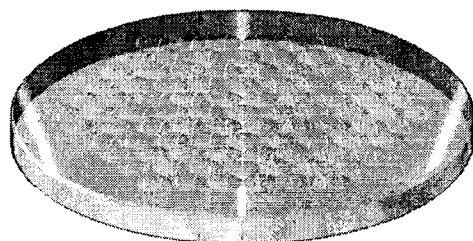


Fig. 7 3D model of Micro array lens

3.2 마이크로렌즈어레이 가공

마이크로렌즈어레이를 사출해내기 위하여 금형 설계, 제작을 하며 금형 코어의 소재는 Stavax 상면

위에 무전해 니켈을 도금해서 사용하며 마이크로 어레이를 가공하기 전에 지그 바닥면과 상면의 평행도를 유지한 후 어레이 패턴을 가공하게 된다. 가공시에 사용되어지는 공구는 천연다이아몬드 바이트 이며 이때 바이트 노우즈 반경은 작을수록 유리하다. 본 연구에서 사용되어진 바이트 노우즈 반경은 R0.1mm를 사용하였으며 바이트 날 끝 형상정도(Waviness)는 0.1 μ m를 갖는다.

Fig. 8은 금형코어를 FTS를 이용하여 가공하고 있는 사진이다. 그림에서와 같이 바이트 날 끝에 미스트(Mist)를 사용하여 칩 배출을 용이하게 하며 절삭성을 좋게 하여 높은 표면 조도를 얻을 수 있다.

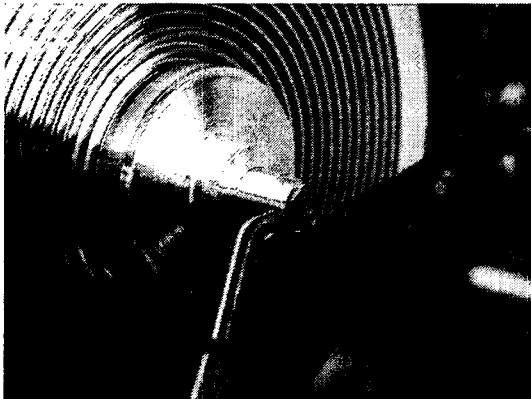


Fig. 8 Machining micro lens array using FTS

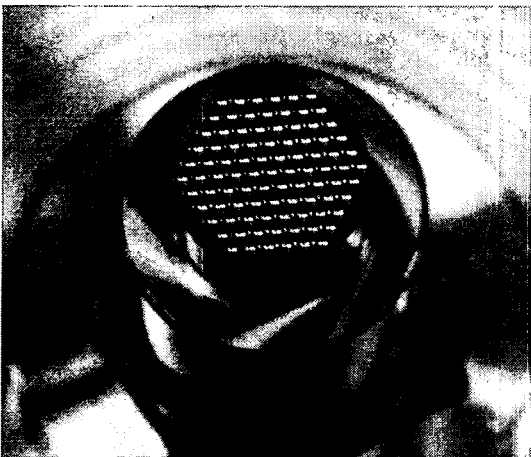


Fig. 9 The figure of finished FTS machining

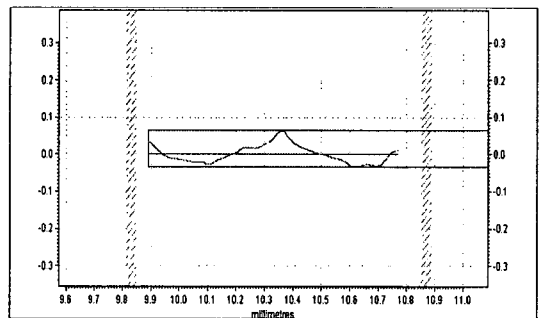
마이크로렌즈어레이 가공 조건에서 주축 회전

속도와 이송속도의 관계에 따라 표면조도와 형상정도의 차이가 나게 되므로 많은 주의가 요구가 된다. 보통 주축 회전속도는 100rpm 이하로 설정하여야 하며 이송속도는 10mm/min을 넘지 않아야 한다. 본 실험에서는 황삭가공으로 주축회전속도 100rpm, 이송속도 5mm/min이었으며, 정삭가공은 추축회전속도 50rpm, 이송속도 0.1mm/min로 가공하였다. 마이크로 어레이 렌즈의 SAG가 깊을수록 주축회전속도와 이송속도는 저하 시켜야 한다.

Fig. 9는 초정밀 가공 후의 금형코어의 사진을 보여주고 있다.

3.3 마이크로렌즈어레이 가공 완료 후 코어 측정 결과

마이크로렌즈어레이 코어 가공 후 접촉식 비구면 형상측정기 Form Talysurf Series 2를 이용하여 코어의 어레이 형상정도를 측정하였다. 광학계에서 중요시 되어지는 코어 어레이 형상의 곡률 R (Radius)와 형상정도 Rt를 측정하게 된다. 형상측정시 하나의 어레이 패턴을 측정한 후 NT2000(Veeco 사)장비를 이용하여 Form Talysurf Series 2의 스타 일러스가 패턴 형상 중심부를 지나갔는지 확인을 해서 반복 측정함으로써 측정 오차를 줄였다.



Radius 1.8967mm Rt 0.095 μ m

Fig. 10 The measurement result by form talysurf series 2

Fig. 10에서와 같이 코어 형상 곡률 R을 측정한 결과 렌즈 설계에서의 곡률과 4 μ m의 오차가 발생하였으나 광학계 성능에는 충분히 허용되는 오차범위이다. 또한 형상정도 Rt 0.095 μ m로서 아주 양호한 형상정도를 얻을 수 있었다.

Fig. 11은 표면 조도 측정기 NT2000을 이용하여

코어의 표면 조도를 측정하였다. 그림에서와 같이 Ra 4.65nm, Rq 5.80nm를 얻을 수 있었다.

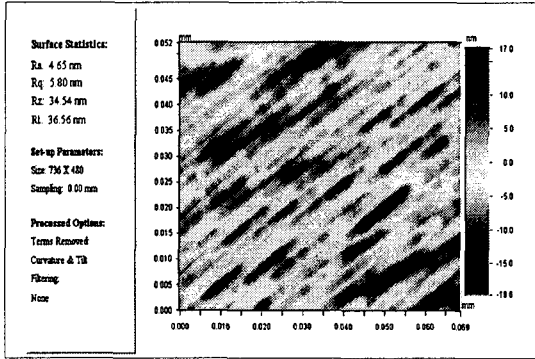


Fig. 11 The measurement result by NT2000

3.4 사출 후 사진 및 측정 결과

사출 성형기를 이용하여 렌즈를 사출 후 렌즈의 패턴 형상 곡률 R값 과 형상 정밀도를 측정한 결과 Fig. 13과 같이 곡률 R 1.8784mm, 표면 형상 정도 Rt 0.101 μ m를 얻었다. 코어의 형상정도와 비교해보면 곡률은 작아졌는데 이는 사출 후 렌즈 수축에 의한 것으로 사료되며 광학설계에서 요구되어지는 형상 정도 Rt 0.2 μ m에 만족하는 결과 값을 얻을 수 있었다.

Fig. 12는 사출 후 마이크로렌즈어레이의 사진이며, Fig. 13은 사출 후 어레이 패턴 형상 곡률과 형상정도를 나타낸다. Fig. 14는 NT2000을 이용하여 측정한 결과 Ra 5.27nm, Rq 6.63nm이다.

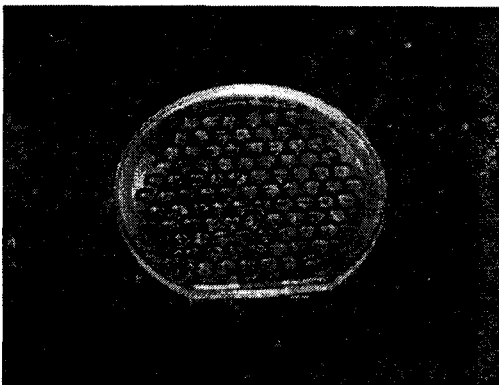


Fig. 12 The figure of micro lens array after injection molding

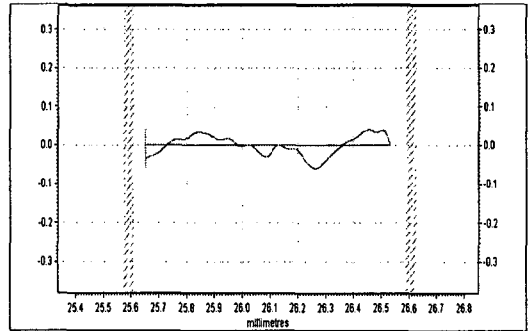


Fig. 13 The measurement result by form talysurf series 2

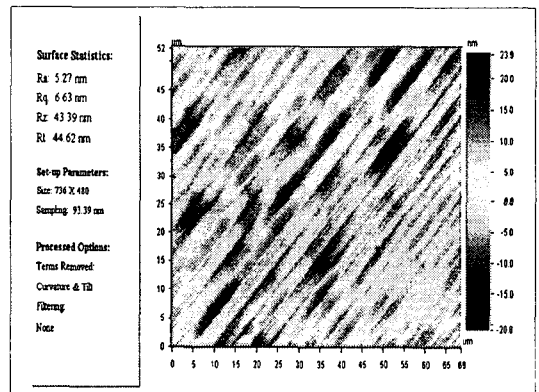


Fig. 14 The measurement result by NT2000

향후 본 연구를 통해서 얻어진 광학계를 이용하여 임상테스트를 거쳐 국산화를 실현할 것이며, 다른 여러 응용분야에 사용되어지는 마이크로렌즈어레이의 가공 공정 기술개발에 기여 하고자 한다.

4. 결론

초정밀 5축 가공기와 FTS(Fast Tool Servo)를 이용하여 마이크로렌즈어레이 코어의 초정밀 가공공정 기술개발과 렌즈 사출 성형을 통한 형상 정도를 검증함으로써 국내 마이크로 어레이 렌즈 국산화를 실현 시킬 수 있었다.

1. 본 연구에서 FTS를 활용하여 마이크로 렌즈 어레이의 초정밀가공기술을 확보할 수 있었다.

2. FTS를 이용하여 마이크로렌즈어레이 코어를 가공조건으로 주축 회전속도와 이송속도는 비례관계를 가지고 있으며 주축회전속도 100rpm, 이송속도 10mm/min 가 가공의 한계 조건임을 알 수 있었다.
3. 마이크로렌즈어레이 사출 결과 렌즈 수축에 의하여 어레이 패턴 형상 곡률이 약 1% 수축하였다.
4. 부분 박피 시술기 광학계에서 마이크로 어레이 렌즈 성능에 요구되어지는 형상정밀도 Rt 0.2 μ m이하인 Rt 0.101 μ m로써 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

참고문헌

1. Yi, A. Y. and Li, L., "Design and fabrication of a microlens array by use of a slow tool servo," Optics letters, Vol. 30, No. 13, pp. 1707-1709, 2005.
2. Ku, S. S., Larsen, G. and Cetinkunt, S., "Fast tool servo control for ultra-precision machining at extremely low feed rates," Mechatronics: mechanics, electronics, control, Vol. 8, No. 4, pp. 381-393, 1998.
3. Kim, H. S., Jung, B. C., Ahn, H. S. and Song, S. H., "Accurate Positioning of Piezoelectric Actuator for Fast Tool Servo in Ultraprecision Machine," Proceedings of the KSPE Autumn Conference, pp. 446-449, 1997.
4. Song, J. W., Kim, S. H., Song, H. S. and Kim, H. S., "Precision Position Control of a Fast Tool Servo Using Piezoelectric Actuators," J. of KSPE, Vol. 14, No. 10, pp. 50-57, 1997.
5. Kim, E. J., Song, S. H., Kim, M. G. and Kim, T. H., "Ultra-Precision Machining Using Fast Tool Servo and On-Machine Form Measurement of Large aspheric Mirrors," J. of KSPE, Vol. 17, No. 4, pp. 129-134, 2000.
6. Lee, S. H., Lee, C. H. and Kim, G. S., "A study on the optimal control of Long Stroke Fast Tool Servo Systems," Proceedings of the KSPE Autumn Conference, pp. 818-821, 2004.