

NC 선반에서 동시에 3축을 이용한 구면 렌즈 가공 연구

이민기† · 이응석* · 안동율**

A Study on the Spherical Lens Manufacturing by Simultaneous 3-Axis for NC Lathe

Lee Min Ki† , Lee Eung Suk*, An Dong Youl**

Key Words: DTM(Diamond Turing Machine, 나이아몬드 선반), NC(Numerical control, 수치제어)

Abstract

This paper proposes a study on the spherical lens manufacturing by simultaneous 3 axis for NC lathe. We use friction drive system for moving system in experimental diamond turing machine.

The diamond turning machine use manufacturing for high quality lens, mirror and many optics products. Especially, the high tech industry require a lot of lens. For example, optical engineering, medical science, space engineering and material engineering etc.

The friction drive system is very simple and quiet, compared to ball screw system. We find a problem at the simultaneous 3 axis and suggest a solution. Also, when we manufactured a micro lens, find a problem and solution.

기호설명

1. 서 론

세계적으로 범용 공작기계용 CNC의 고급화와 함께 Diamond Turning Machine, Jig Boring Machine / Profiler 등 초정밀 위치제어를 필요로 하는 전용 CNC 제어기의 요구가 증가하고 있으며, 향후 고기능화로 되는 NC 공작기계는 상대적으로 가격이 상승되고 또한 사용자의 지역적인 장애를 극복하기 위하여, STEP NC에 의한 가공코드의 표준화와 함께 원거리 가공, 즉 IT 기반에 의한 가공 기술 영역이 확대될 것으로 예상된다. 또한 의학, 재료, 군사 등 다방면에서 요구되

는 NT 기술은 현재의 Lithograph 기법으로는 보다 염밀한 정밀도 구현을 위하여 Micro Drilling 등 후가공을 필수목적으로 한계가 있으며, 따라서 Micro-Factory에 의한 초소형 가공 기술 등은 Nano 기술의 활성화와 함께 향후 활발히 추진 될 것으로 보인다. 현재 정밀금형 및 광학부품의 연마 등에 사용되는 초정밀 가공기는 Nano 급의 이송 제어 정밀도를 필요로하며, 따라서 현재 이러한 전용 NC는 향후 일반화된 기술로 정착 될 것이 세계적 추세이다.

NC 제어기는 차세대 정밀 가공을 위한 초정밀 가공기의 필수요소이며, 초정밀 가공기 시스템에서, 30% 이상의 제조원가를 차지하는 고부가 가치의 기계요소이다. Lithography 또는 MEMS 가공방법을 제외한 초정밀 기계가공 부품은 최종적으로 Lapping 후 연마(Polishing) 단계를 거쳐 초정밀 가공면을 제작한다. 이러한 목적으로 현재 사용 중인 초정밀 가공기로서 Diamond Turning Machine (DTM)이 있으며, DTM의 특징은 Lapping 및 Polishing 단계를 별도로 거치지 않

† 충북대학교 기계공학과 대학원

E-mail : eminki@chungbuk.ac.kr

TEL : (043)263-5789

FAX :

* 충북대학교 기계공학부

** 충북대학교 기계공학과 대학원

고도 Sub-micro급의 형상 정밀도를 가지며, 수 Nano급의 표면조도를 얻을수 있는 대표적인 초정밀 가공기이다^[1].

현재 선진국에서 고가로 수입되는 DTM (Diamond Turning Machine), Jig Grinding machine 등 Nano 급 초정밀 가공기의 전용 NC는 일반적인 NC 설계 범주에서 크게 벗어나지 않으며, 일본 도시바 등 선진국에서도 Feed Back 신호를 위한 Linear Scale 또는 Laser Interferometer, 가이드의 내마모성 위한 열처리 기술, 초정밀 회전 스팬들 (Air Bearing 사용) 설계 및 제작 기술 등을 이용하여 경제성 있는 시스템 개발에 있는 것으로 알려지고 있으며, 따라서 이러한 요소기술들은 국내에서도 충분히 경쟁력이 있는 것으로 예상된다. 본 연구에서는 설계된 실험용 DTM을 제작하여 광학 렌즈인 구면렌즈를 가공하고, 가공시 문제점과 최적의 절삭 조건 연구를 수행하는데 목적을 둔다.

2. 실험용 DTM 구성

2.1 Friction Drive system 설계 및 제작

Friction Drive system^[2]은 피치가공이 필요 없어 구조가 간단하고, 설계 및 제작이 용이하다. 또한 회전 운동의 마찰력으로 이송 마찰이 적어 고속 운전시에도 소음이 적으며, 부하용량 또한 적다. 그리고 이송 마찰이 적어 고속 운전에서도 소음이 적고, 초정밀 이송 분해능을 구현할 수 있다. 그리고 가장 큰 장점으로는 광대역의 이송 스트로크를 가질 수 있다^{[3][4]}.

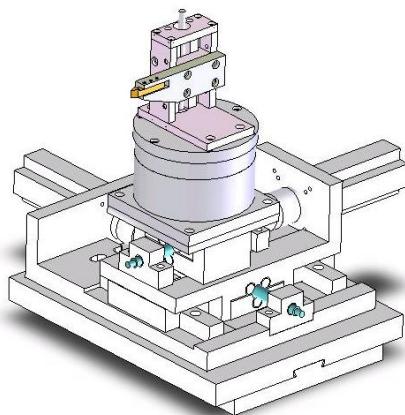


Fig. 1 Design of experimental DTM using CATIA 그러나 Friction Drive system의 기하학적 정밀도에 의한 이송 오차와 가감속시 발생하는 과대한 이송추력에 의해 슬립이 발생하는 단점이 있다.

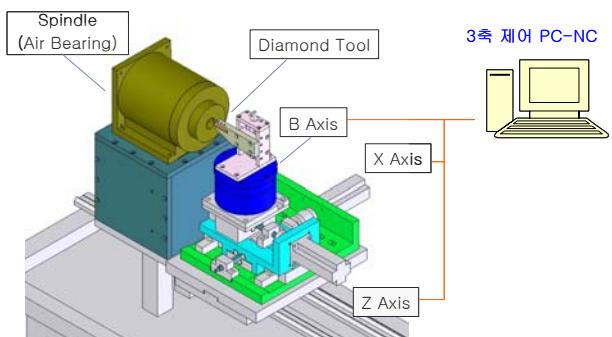
Fig. 1은 실험용 설계한 DTM으로써, 기계뿐 아니라 전기 / 전자설계에 많이 사용되는 CAD 상용프로그램 CATIA를 사용하였다.

Fig 2는 실제 DTM에서 렌즈를 가공하는 대표적인 방법으로 X축과 Z축, 그리고 air spindle을 사용한다.

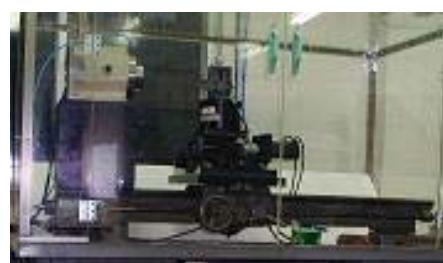


Fig. 2 Lens Polishing / Lapping in DTM using Air Spindle (X, Z axis)

Fig 3은 실험용 DTM을 구성한 장치도(a)이며, (b)는 실제 실험실에 설치되어 있다.



(a) Testing equipment in laboratory



(b) DTM in laboratory

Fig. 3 Design and system configuration of an

experimental laboratory DTM using a high accuracy spindle

	plus / rev	Maker
X axis	8192	Mitsubishi
Z axis	8000	LG
B axis	507904	Parker

Table 1. Motor and driver specification.

제어기는 국내 Turbo Teck사의 HX 시리즈 중 하나인 PC-NC를 사용하였으며, 최소 분해능은 1 μm 다.

Fig 3은 설계된 Friction Drive system으로써 모터를 회전시켜 drive shaft를 회전시키면 drive roller에 연결된 moving block이 직선 이송운동을 하게 된다. 이때 drive roller는 moving block의 이송량과는 관계가 없다. Friction Drive system의 위치 정밀도는 모터의 회전각 분해능과 drive shaft의 직경 그리고 drive roller의 설치 각도에 의해 결정된다. 위치 정밀도를 높이는 방법은 고성능의 피드백 제어용 엔코더가 장착된 모터를 사용하여 구동축의 회전각 분해능을 높이는 방법과 drive shaft의 직경을 줄임으로써 drive shaft의 1회 전당 이송량을 줄일 수 있으나 너무 작으면 구동 토크에 의한 추력이 커지므로 슬립이 발생할 수 있다.

Pre-load는 drive shaft와 drive roller에 마찰이 일정할 수 있도록 외력을 부여한다. 외력이 너무 커지면 마찰 계수가 증가하여 구동축에 많은 부하가 걸려 이송량이 감소하고, 오히려 외력이 너무 작으면 마찰 계수가 감소하여 슬립으로 인한 위치 오차가 커지게 된다.

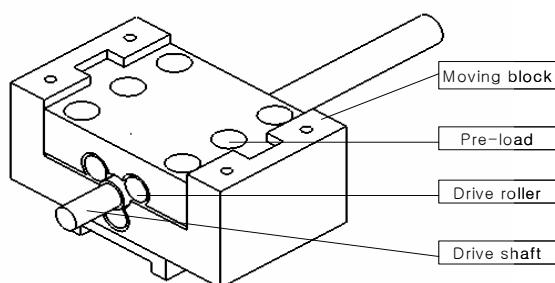


Fig 4. Design of the friction drive system

Fig. 5는 설계된 Friction Drive system의 이론으로써 drive Shaft가 1회전 할 때 이송거리(L)를 아래 식으로 나타내면,

$$L = \pi \times D \times 6 \quad (1)$$

L : 이송거리

D : drive shaft 직경

θ : drive roller 기울기

과 같다.

설계된 Drive Shaft의 직경 $D=15\text{mm}$, Drive roller의 기울기 $\theta=1^\circ$ 라 하고, Drive Shaft가 1회전 했을 때 이송거리는 $822.5\mu\text{m}$ 의 정밀도를 가진다.

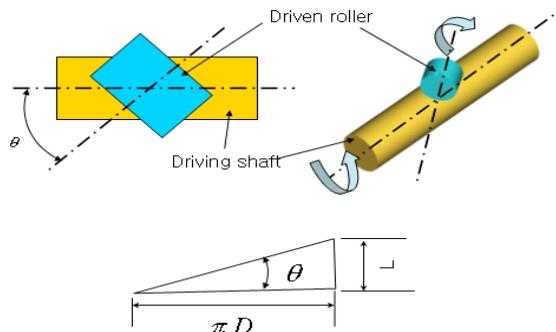
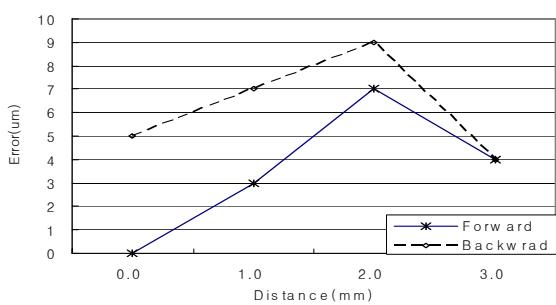


Fig. 5 Moving principle of friction driver using a twist roller

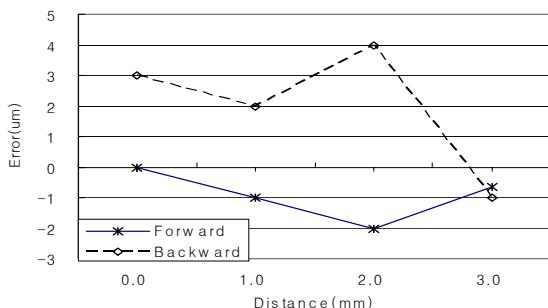
2.2 이송축의 위치 오차 측정

제작된 friction drive system의 이송 분해능을 검증하기 위하여 모터 1회전시 이송 블록의 이송량을 반복측정하였다. Drive shaft와 drive roller의 트위스트각은 1° 로 설정하였으며 설계상 계산된 모터 1회전당 이송 블록의 이송량은 $822.5\mu\text{m}$ 이다. 그러나 실제 측정된 이송량은 X축이 $854.2\mu\text{m}$, Z축이 $886.3\mu\text{m}$ 로 설계값과는 큰 차이를 나타내고 있으나 측정된 평균 이송량은 평균값을 기준으로 X축은 $2\mu\text{m}$ 을 보이고 Z축은 $3\mu\text{m}$ 을 보인다. 이송량이 큰 오차를 보이면서도 우수한 반복 정밀도를 나타내고 있는 것은 가공 오차 및 조립 오차에 의한 drive shaft와 drive roller에 있는 트위스트각에 의한 요인으로 분석된다. 또한 friction drive system의 중요한 이송오차 요인으로 drive shaft의 가속 구간에서 발생하는 슬립(slip) 현상이다. 슬립은 모터의 회전 가속도와 friction drive system에 가해진 pre-load의 크기에 의해 달라진

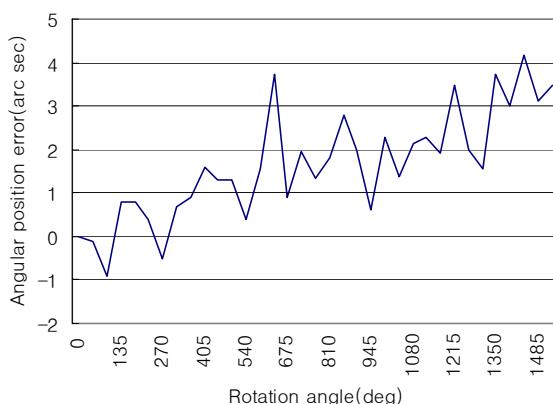
다. 앞에서의 설명처럼 pre-load가 너무 적다면 drive shaft에 가해지는 외력이 작아 슬립이 크게 발생하고, 반대로 외력이 너무 크면 슬립은 작아 질 수 있을지 모르나, drive shaft에 작용하는 과대한 외력으로 오히려 이송량이 감소한다.



(a) Accumulation error for X axis



(b) Accumulation error for Z axis



(c) B axis indexing error

Fig. 6 Accumulation error measurement of linear moving system

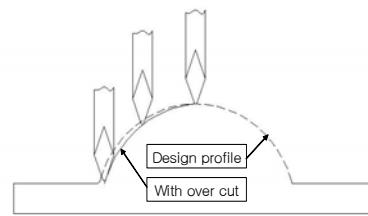
Fig. 6은 X축과 Z축의 이송 위치 누적 오차를

측정하였다. 이송블록이 전진과 후진할 때 X축은 최대 $6\mu\text{m}$, Z축은 $4\mu\text{m}$ 의 오차를 나타낸다. 오차가 일정하게 나타나지 않는 원인은 drive shaft의 가속 구간에서 발생하는 슬립(slip) 현상으로 분석된다. B축의 최대 회전각 오차는 $\pm 3 \text{ arc sec}$ 다.

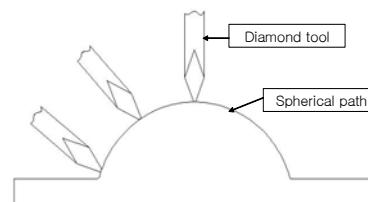
3. 구면 렌즈의 가공

3.1 3축 동시 제어 알고리즘

렌즈의 표면을 가공할 때 공구의 노즈 R보다 렌즈의 profile이 크면 Fig 7 (a)처럼 과절삭이 되어 렌즈의 크기가 변하게 된다. 그러나 (b)처럼 공구를 렌즈의 profile에 항상 직각이 되도록 별도로 각도를 회전시켜 가공하게 되면 과절삭 및 미절삭 부분을 제거할 수 있다.



(a) Without B axis indexing



(b) With B axis indexing

Fig. 7. Tool path for spherical profile using X, Z and B axes

B축의 이송속도를 결정하는 방법으로 Fig 8과 같이 X, Z축의 단위 이송 펄스에 대한 값으로 아래 식과 같다.

$$f = \sqrt{a+b} \quad (2)$$

f : B 축 이송속도

a, b : X, Z축 이송속도

공구의 방향은 구면의 법선 방향에 대하여 항상 직각이 되어야 하므로 B축의 이송속도는 X, Z축의 이송속도에 의해서 결정된다. 비구면 렌즈의 경우도 같다.

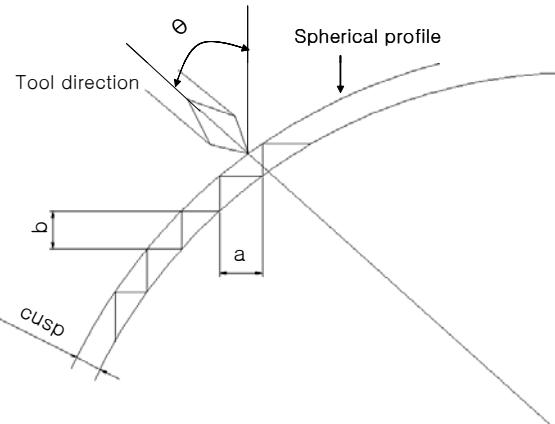
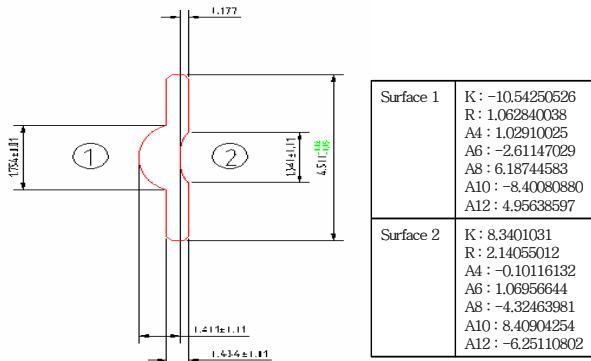


Fig. 8 Discontinues tool path profile with out X, Z and B axes

3.2 비구면 렌즈의 가공 및 분석

Fig 8은 실험용 DTM을 사용하여 실제 가공할 도면으로 렌즈의 profile 정밀도는 0.2mm다.

렌즈는 스픈들의 회전 속도는 1500rpm, 이송속도는 5mm/min 이하에서 가공된다.



Aspherical Equation

$$Z = \frac{CX^2}{1 + \sqrt{1 - (1+K)C^2X^2}} + A_4X^4 + A_6X^6 + A_8X^8 + A_{10}X^{10} + A_{12}X^{12} + \dots$$

where, K : Conic Constant

C : Curvature (1/R , R: Radius of curvature)

A4 ~ A12 : Aspherical coefficient

Fig. 11 Machining example of micro lens and target accuracy, Material : Optical Plastic, Profile Accuracy : p-v 0.2mm (1/3λ)

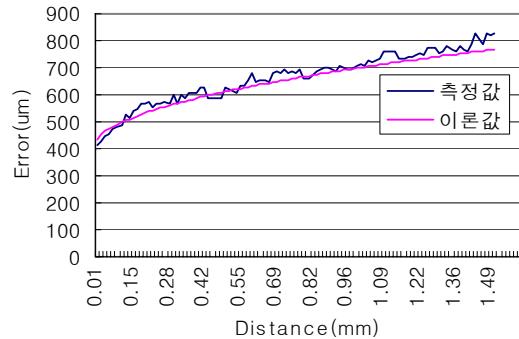


Fig. 9. Lens profile measurement

Fig. 9는 비구면 렌즈를 가공하기 전 구면렌즈를 측정한 결과로 최고 0.1mm의 오차를 가지고 있다.

3. 결론 및 향후 연구

렌즈 표면의 profile이 일정하지 못한 가장 큰 원인은 스픈들이 회전하면서 진동하는 문제가 가장 크다고 할 수 있다. 특히 스픈들이 회전하면서 진동하는 원인은 회전속도와 토크가 서로 완벽하게 조화되지 못했을 것으로 예상된다. 또한 가공 중 발생할 수 있는 이송오차 문제도 있을 수 있을 것이다. 이송장치를 측정하는 경우, 무부하 상태에서 측정을 하지만, 가공 중에는 부하가 걸린 상태에서 가공을 하기 때문에 가공 중 friction drive system의 오차요인인 슬립문제가 발생할 수도 있다. 이런 문제로 인하여 렌즈 표면의 profile 오차값이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 향후의 계획은 현재 가장 큰 문제점으로 제기된 스픈들의 진동 억제와 friction drive의 위치오차를 줄이는 연구가 선행되어야 할 것이며, 그것이 가능할 때 비로소 렌즈 표면의 profile이 고품질로 발전할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 최현종 “광 부품 가공기술의 현황과 가공”, 월간공작기계, pp. 100 – 110, 2002
- [2] Jiro OTSUKA, Michio TAKAHASHI, takashi USUDA, Makoto TOFUKU, "Study of Precision Positioning by Friction driver", Japan Soc , Prec. Eng., Vol. 26, No. 4, pp.

315-320 1992

- [3] 신영재, 최대봉, 이득우, “마찰구동기구에 의 한초정밀위치 결정”, 한국기계연구원논문 B-8, pp. 159-162. 1995
- [4] 송창규, 신영재, 이후상, “마찰구동기구로 구동되는 초정밀 가공기 이송계의 특성평가”, 한국정밀공학회지 제 19권 제7호, pp. 64-70, 2002, July 1993
- [5] 송우근, 이웅석, 최우천, 조동우, “정밀 이송장치의 모델링 및 제어, 마찰구동 장치를 이용한 초정밀 위치 이송” 한국자동제어 학회논문집, pp. 236-240, 1995
- [6] Shigeru Futami, Akihiro Furutani, Shoichiro Yoshida, "Nanometer positioning and its micro-dynamics", Nanotechnology, pp. 31-37, 1990.
- [7] 박준호, 정밀 측정시스템 공학, 약정 출판사, 1999.
- [8] 김화영, “모터전류신호를 이용한 드릴공정의 가공상태 감시”, 부산대학교, 석사논문 1995
- [9] 김종원, “칼만필터와 이송모터의 전류 감지를 이용한 밀링 공정시의 절삭력 간접측정”, 서울대학교, 석사논문 1995
- [10] 이찬홍, 박천홍, 노승국, 이후상, “볼스크류의 축-비틀림 복합 강성을 고려한 이송계 모델링”, 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 387-390, 2002
- [11] 한성익, , “비선형 동적마찰을 갖는XY 볼-스크류 구동계에 대한 위치 추종제어”, 한국정밀공학회지 제 19권 6호, pp. 51-61, 2002
- [12] 박천홍, 이후상, “볼스크류를 이용한 정밀위치 결정기술”, 한국정밀공학회지 제 17권 12호, pp. 26-33., 2000
- [13] 박천홍, 정재훈, 김수태, 이후상, “서브미크론 진직도 측정장치개발”
- [14] 김재열, 곽이구, 한재호, 김향우, “마이크로 스테이지의 유한요소 해석”, 한국정밀공학회지 제 19권 10호, pp. 60-65, 2002.
- [15] 안동율, “초정밀 위치 제어를 위한 마찰구동 장치 특성 연구”, 충북대학교, 석사논문, 2003.