

최소 이송 기구를 갖는 PC-NC 기반의 비구면 렌즈 연마 장치에 관한 연구

양민양 *, 이호철 **

A Study on PC-NC Based Aspherical Lens Polishing System with Minimum Translation Mechanism

Min Yang Yang*, Ho Cheol Lee **

ABSTRACT

The development process of the polishing system for the aspherical lens mold for opto-electronics industry is described. The system uses the method that polishing tool is scanned on the surface under PC-NC control for the aspherical lens mold. The two axes interpolation of the minimum translation mechanism is applied to give uniform working condition by motion analysis. An aspherical surface is divided into multiple sections and each dwell time is calculated from the polishing rate model based on the Preston equation. As result of form error compensation experiment, initial form error is decreased about 25% while an average value of surface roughness is also reduced successfully from 180nm to 19 nm.

Key Words : Aspherical Lens Mold (비구면 렌즈 금형), Polishing System (연마 장치), PC-NC (컴퓨터 수치제어), Dwell time (체제시간), Form error (형상오차)

1. 서론

비구면(aspherical surface) 렌즈는 다수의 구면 렌즈를 한 때로 대체할 수가 있는 장점이 있어서, 광 응용 산업 분야에 필수적인 부품이 되어 왔고, 그 수요가 지속적으로 증대되고 있다. 또한, 정밀한 비구면 렌즈를 낮은 가격으로 양산하기 위해서는 금형을 이용한 성형 방법이 널리 활용되어 오고 있다. 일반적으로, 초정밀 가공기와 다이아몬드 공구 또는 연삭 공구에 의해 비구면 형상이 창성되지만, 진동, 이송 정밀도, 공구의 형상오차와 공구 경로는 비구면 렌즈 금형에서 잔류 공구마크

(tool mark)를 불가피하게 남기게 된다^(1,2). 또한, 렌즈 크기의 소형화에 따라 연삭 공구가 급속하게 마멸되어 정밀한 비구면 형상을 만들기 어려운 경우도 있다. 따라서, 비구면 렌즈 금형의 가공에 있어서, 연마 공정은 표면 형상 및 거칠기를 개선해야 하는 주요한 역할을 하고 있다⁽³⁾. 그러나, 구면에 적용되던 연마공정은 표면 거칠기를 좋게 함에도 불구하고, 비구면의 곡률 효과 때문에 형상정밀도를 오히려 악화시킬 수가 있다. 특히, 비구면 렌즈 같은 광학 표면에서의 형상 오차는 파면 수차(wave aberration)에 직결되어 광학적 성능을 감소시키므로, 연마 공정에서의 형상 변화는 필수적

2000년 11월 15일 접수

* 한국과학기술원 기계공학과

** 삼성전자 디지털총괄 디지털미디어 연구소

으로 고려되어야 한다. 따라서, 비구면 렌즈에 적합한 연마기구(polishing mechanism)를 가지는 연마장치가 무엇보다 중요해지고 있다.

한편, 소형 비구면의 경우, 렌즈 기본 곡률 반경이 작고, 심한 비구면 경사도(slope)를 가지고 있어서, 공구의 크기와 형상, 공구의 운동을 제약하는 요건이 되고 있다⁽⁴⁾. 따라서, 가공물과 공구의 동시 회전만으로 연마 입자운동을 부여하는 연구가 있어 왔다^(5,6). 그러나, 대체로 개방형이 아닌 전용의 제어장치를 사용하고 있어서, 공구의 연마 경로와 연마 진행 과정이 사용자에게 드러나 있지 않고, 비구면 형상 측정자료의 입출력, 전후 공정과의 자료 호환성과 다양한 연마조건을 부여하고 관리하는데 문제가 있어 왔다.

본 논문에서는, 비구면 형상 입력과 연마공구 경로의 생성과 제어를 PC-NC 기반 위에서 이루어 지도록 하는 비구면 렌즈 금형 연마 장치를 개발하는 과정을 기술하였다. 연마의 특성을 고려하여 2 축 선형 보간 이송만으로 안정적인 연마조건 부여가 가능한 비구면 렌즈 연마장치를 먼저 구성하였다. 또한, 연마장치의 유효성을 검증하는 실험으로서, 열처리된 비구면 렌즈 형상에 대해서, 렌즈 표면의 형상과 표면 거칠기를 동시에 개선하는 효과를 얻는 연마를 수행하였다.

2. PC-NC 기반 연마 장치

2.1 비구면 렌즈

일반적인 회전 대칭의 비구면 렌즈의 표면 형상은 다음 식(1)과 같이 주어진다.

$$z = \frac{cx^2}{1 + \sqrt{1 - (K+1)c^2x^2}} + A_4x^4 + A_6x^6 + A_8x^8 + A_{10}x^{10} \quad (1)$$

z 축은 회전의 중심 축으로서 광 축을 나타내는 방향이며, 그 값은 x - y 평면에서 회전 대칭이다. c 는 정점에서의 기본 곡률이고, K 는 원추상수(conic constant)로서 원추면에 따라서 달라진다. 그리고, A_4, A_6, A_8, A_{10} 등은 구면을 포함한 단순 원추면을 비구면으로 수정하는 비구면 계수 값이다.

2.2 최소 이송 기구

연마공구와 공작물사이에서의 상대 운동하는

연마입자에 의한 연마 제거율은 프레스턴(Preston) 식을 사용하여 다음과 같이 표현되어 왔다⁽⁷⁾.

$$\begin{aligned} h(x, y)/t &= K_{wear} P(x, y) \cdot V(x, y) \\ &= K_{wear} \cdot F/A(x, y) \cdot V(x, y) \end{aligned} \quad (2)$$

즉, 연마 공구가 공작물과 접촉하는 영역의 연마 제거율을 함수 $h(x, y)/t$ 으로 들 때, 연마 제거율은 접촉영역의 압력 P , 상대 속도 V , 프레스턴(Preston) 계수인 K_{wear} 에 의해 결정된다. 일반적으로, 평면이나 대형의 광학부품의 연마에서는 접촉영역에서의 균일한 하중에 의해 연마압력과 속도를 일정하게 두면서, 연마시간으로 그 연마량을 조절해 왔다⁽⁸⁾.

따라서, 본 연구에서는, 국부(local) 위치에서 필요한 연마 제거량을 제어하는 연마 시스템을 Fig. 1 과 같이 구성하고, 연마조건을 가능한 균일하게 유지하면서, 연마 공구의 체제시간에 의해 연마량을 결정하는 체제시간 연마방식을 채택한다.

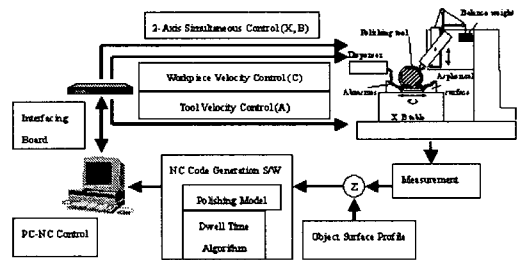


Fig. 1 Configuration of the PC-NC polishing system

한편, 소형의 비구면 렌즈 등에서는 연속적으로 변하는 비구면의 심한 곡률변화에 적응하기 위해서 비구면 렌즈의 곡률반경보다 작은 크기의 구(spherical) 형태의 연마공구를 사용한다. PC-NC 제어기는 공작물 이송에 의해서 공구가 비구면 형상을 추종 제어하고, 공작물과 공구를 정속으로 회전 제어하는 역할을 한다. 비구면 표면 형상은 측정되어, 설계 비구면 식과 비교되어져서 그 오차가 컴퓨터의 수치 제어 코드(numerical control code) 생성 부분에 입력된다. 수치 제어 코드 생성 소프트웨어는 크게 식(1)의 프레스턴 식에 근거한 연마 제거율 모델과 체제시간 계산 알고리즘으로 나

누어진다. 연마 장치는 크게 이송기구 모듈(module)과 공작물 모듈, 연마 공구 모듈 부분으로 구성 된다. 디스펜서(dispenser)는 회전하는 공작물 위에 연마입자를 도포 또는 첨가하는 기능을 한다. 이송기구 모듈은 공작물과 공구의 상대 위치를 결정해주는 역할을 하고, 공작물 모듈은 회전 스펀들을 이용해서 공작물을 회전시키는 구실을 한다. 특히, 연마 공구 모듈에서, 연마를 위한 가압력은 와이어(wire)에 의해 연결된 균형 추(balance weight)에 의해 조정된다. 연마공구의 위치 제어를 일반적인 3 축이 아닌 2 축 제어(X, B)만으로 연마 위치를 결정하고, 일정 연마압력 조절은 균형 추에 연결된 회전공구가 수직방향으로는 자유롭게 이동하는 방식의 최소 이송 기구 구조를 적용한다. 최소 이송기구 방식의 적정 여부를 Fig. 2 와 같이 공구의 운동 분석(motion analysis)을 통해 먼저 검토한다.

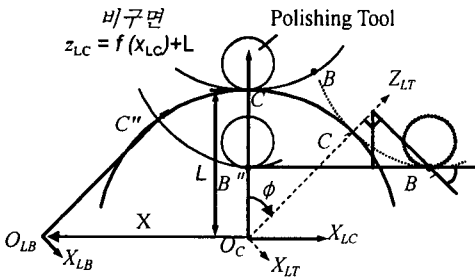


Fig. 2 Motion analysis between tilting angle and horizontal position

Fig. 2 에서 보는 바와 같이, 비구면 렌즈 표면은 경사회전기구(tilting mechanism) 회전 중심 O_C 으로부터 일정 높이 L 만큼 위에 장착되어 있고, 임의의 비구면 $f(x)$ 는 중심 O_C 를 기준으로 y 축 방향에 대해 경사회전(tilting)을 하며, 식(3)과 같이 표현될 수가 있다.

$$z_{LC} = f(x_{LC}) + L \quad (3)$$

초기의 국부 좌표계 (X_{LC}, Z_{LC}) 에서, $x = 0$ 인 연마공구의 접촉점 C 에서는, 경사기구의 회전각 $\phi = 0$ 이고, 이송 기구의 수평 이동량은 $X = 0$ 이다. 비구면에서의 연마하는 연마 접촉점이 C 로부터 B 로 변하더라도, 연마공구를 아래위로 미끄러

지면서 최초의 수직선 위에서만 이동하게 하고자 한다. 만일, 이송기구의 수평 이동 없이 경사회전 기구만 각도 ϕ 만큼 회전한다면, 접촉점은 C 에서 점 B' 으로 바뀌게 되고, 그 회전각은 다음 식과 같이 표현될 수가 있다.

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{df(x)}{dx}\right) \text{ at } x=B \quad (4)$$

따라서, ϕ 만큼 경사회전기구가 회전하는 동안, 동시에 수평의 이송기구를 Fig. 2 의 X 만큼 보정 이동시키므로써, 초기의 접촉점 C 와 동일한 수직선 위의 점 B'' 에서 연마하도록 할 수가 있다. 결국, 이동량 X 는 ϕ 와 좌표 x_B 의 함수로 표현된다

$$X = x_B \cos \phi + (f(x_B) + L) \sin \phi \quad (5)$$

결과적으로 연마공구가 수직 방향으로 이동에 대해서 구속없이 미끄러지는 구조를 채택하면, 회전대칭의 비구면은 (X, ϕ)의 2 축 만으로 충분한 위치 제어가 구현됨을 알 수가 있다.

기구 설계 소프트웨어로 Unigraphics™ 을 이용한 장치의 개념설계 구조 모델은 Fig. 3 과 같다.

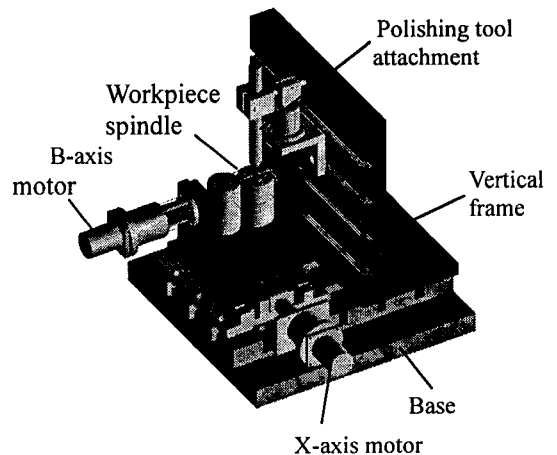


Fig. 3 Conceptual design using Unigraphics™

수평 이송(X) 기구 위에 경사회전(B) 기구가 탑재되어 있고, 또한 경사회전기구 내에 공작물 회전 스펀들(spindle)이 장착되어 있다. 연마공구는 분리된 별도의 수직 구조물에 장착되어 있다.

X 축 방향의 이송기구의 분해능은 0.001 mm이고 이송범위는 80 mm, B 축 경사회전기구의 분해능은 0.001°, 회전범위 ± 60°이다. 공작물을 지지하는 스펀들의 회전속도 범위는 30-300 rpm 으로 제작되었고, 연마 공구를 위한 에어모터는 감속기를 사용하여, 회전속도 200-1000rpm 범위에서 사용 가능하게 하였으며, 제작된 연마장치는 Fig. 4 와 같다.

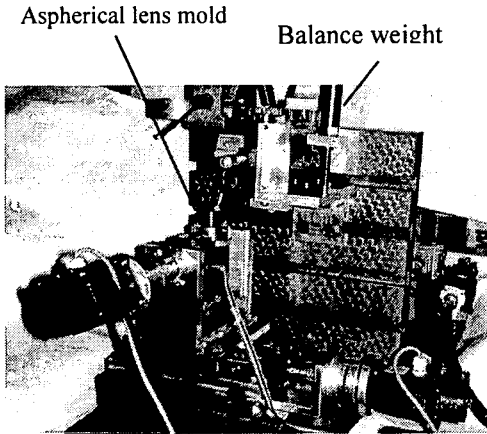


Fig. 4 Photo of the prototype equipment

2.3 연마경로 생성과 제어

회전 대칭의 비구면에 대해서 연마공구는 Fig. 5 와 같이 회전하는 공작물의 직경 축에 대해서 왕복 운동을 한다. 각 반경 위치에 따라 속도, 곡률 등이 달라지므로 원하는 연마 가공량을 조절하기 위해서, 공구의 체재 시간을 다르게 한다. 회전의 대칭성을 고려하여 각각 체재 위치에서 공작물 회전주기의 정수배만큼 머물게 한다. 각각의 연마 시간은 식(6)에서와 같이 회전주기의 정수배 형태로 표현된다. 공구가 X₁ 의 위치에서 T₁ 시간 체재하면, Fig. 5 에서 보는 바와 같이 X₁ 의 연마영역에서 연마량 H₁ 은 연마 제거율 R₁ 과 체재시간 T₁ 의 중첩의 형태로 표현된다. 다음 X₂ 의 위치에서 T₂ 시간 체재하면, 연마량은 H₂ 가 된다. 그 결과, 중첩된 연마영역은 두 위치의 가공량인 H₁ 과 H₂ 의 더해진 결과가 된다. 한편, 연마 제거율 R₁ 과 R₂ 는 프레스턴(Preston) 식이나 실험으로부터 미리 구해진 값들이다. 따라서, 공구 체재하는 위치에서의 국부 연마 가공량의 합의 효과로 이루어지는

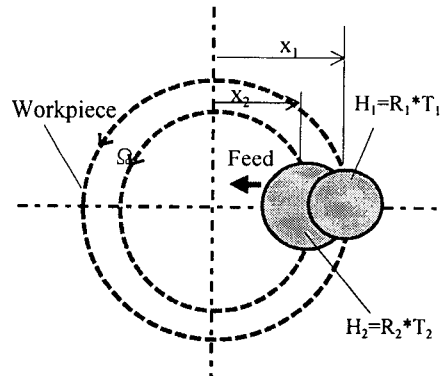
가공량 분포 H 는 식(7)과 같이 각 단위 회전 당 가공량의 제거 행렬 R 과 회전수 분포 N 의 선형적인 곱의 형태로 유도되어진다.

$$H_i(x) = R_i(x, \theta) * T_i(x) = \frac{1}{\Omega} N_i(x) \int_{\theta_1}^{\theta_2} R_i(x, \theta) d\theta \quad (6)$$

$$R_i(x) = \frac{1}{\Omega} \int_{\theta_1}^{\theta_2} R_i(x, \theta) d\theta$$

$$H = RN \quad (7)$$

따라서, 비구면의 형상오차가 가공량 분포로서 주어지면 제거행렬로부터 공구 위치에서의 최적의 회전수를 계산함으로써, 체재시간을 구할 수가 있다.



H : 가공량 R : 제거율 함수
T : 체재시간 Ω : 공작물 회전속도

Fig. 5 Dwell time control using integer times revolution at each discrete annular grid

분할된 각각의 공구 위치와 계산된 체재시간으로부터 구해진 수치제어 코드(numerical control code) 파일(file)의 예는 다음과 같다.

```
N10 G01 X1 B1 F200 ; (X1,B1) 위치 급속이동
N20 G04 T1 ; T1 시간 체재
N30 G01 X2 B2 ; (X2,B2) 위치 급속이동
.....
```

Fig. 6 은 PC 모니터에 보여진 제어 화면이다. 사용되는 X, B 축의 제어 위치 그리고 이송 속도를 표시하였다. 키보드(keyboard) 입력으로 조그(Jog) 동작하도록 하여, 공구의 원점 설정에 이용하도록 하였다.

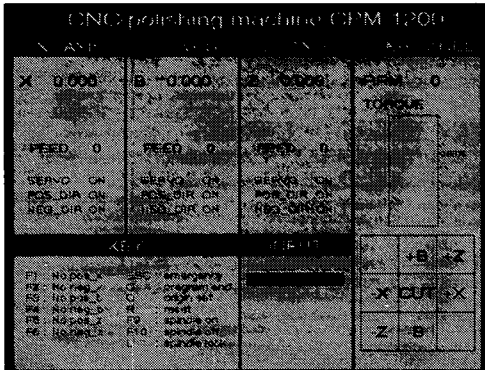


Fig. 6 Controller panel on PC monitor

한편, PC-NC 모듈 흐름도는 Fig. 7 과 같다. 수치제어 코드(code)는 각각의 블럭(block) 별로 해석되고, 위치 제어를 위해서는 선형 보간이 이용된다. 기준 펄스 테크닉(reference pulse technique)에 근거한 소프트웨어 보간 방법을 사용하였다⁽⁹⁾. 위치 신호를 각 축의 서보 드라이버(servo driver)에 전달하기 위한 인터페이스(interfacing) 보드를 제작하였고, 8255 병렬 인터페이스 (PPI, programmable peripheral interface) IC 와 8253 타이머 (PIT, programmable interval timer) IC 를 중심으로 구성하였다.

3. 연마 실험

비구면 렌즈 금형의 수정연마 실험을 스테인레스(stainless) 고경도 금형에 적용하였다. 정밀 선반과 CBN 공구를 이용하여서 먼저 비구면 형상을 창성하였다. 비구면의 곡률 반경 R 은 -14.16 mm, K 는 -7.492529 이었다. 비구면 계수는 $A4 = 0.1501186e-3$, $A6 = -0.995686e-6$, $A8 = 0.5116531e-8$ 였다. 또한, 비구면 렌즈 부분의 유효 직경은 16 mm 이었다.

최초의 창성된 비구면의 형상오차는 Fig. 8 과 같다. 형상오차의 피크투밸리(peak-to-valley) R_{max} 는 $13.62 \mu\text{m}$, 형상도(figure)는 $6.74 \mu\text{m}$ 이었다. 그리고,

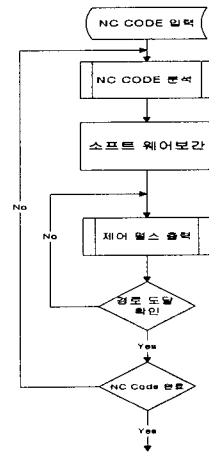


Fig. 7 Flow chart of the PC-NC control

평균 표면 거칠기 R_a 는 180nm 의 비교적 거친 면을 가지고 있었다.

먼저, 연마 제거율을 구하기 위한 예비 실험을 실시하였다. 공구의 반경은 5 mm 로 폴리우레탄을 사용하였고, 연마 입자는 다이아몬드(diamond) $3 \mu\text{m}$ 을 산포 하였다.

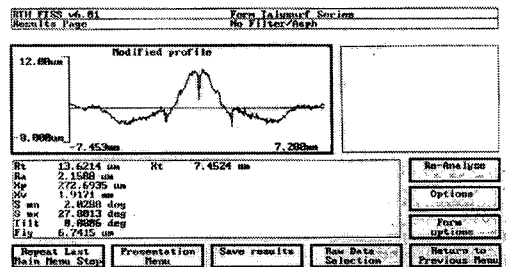


Fig. 8 Form error profile of STAVAX aspherical lens mold before polishing

공구의 회전속도는 250 rpm 으로 설정하였다. 공구에 가해진 힘은 0.48 kgf 으로 설정되었고, 공구는 y 축 방향으로만 60° 기울어지게 하였다. 주어진 연마 조건에 의한 연마영역의 중심에서의 연마 제거율을 평가한 결과, $1.81 \mu\text{m}/\text{min}$ 으로 나타났다. 연마공구의 체재 위치는 40 으로, 연마면을 분할하여 각각의 연마위치와 체재시간을 구하였다. 체재회전수 계산과 형상오차 분포를 설정하는 과

정을 나타내는 소프트웨어(software)를 Fig. 9 에 나타내었다. Fig. 8 의 형상오차 분포가 Fig. 9 의 잔류오차(residual error) 분포 부분에 표시되었고, 1 회 최대 제거 깊이 1.2 μm 로 연마 한 후에는 줄어든 잔류형상 오차 분포를 예측 표현하였다. 1 회의 연마제거 깊이 분포는 Fig.9 의 제거 대상(removal target) 분포 부분에 나타내었다. 1 회의 연마 제거 깊이 분포를 달성하기 위한 체재회전수(dwell revolution number) 가 Fig. 9 의 체재회전수 분포 부분에 표시되었다.

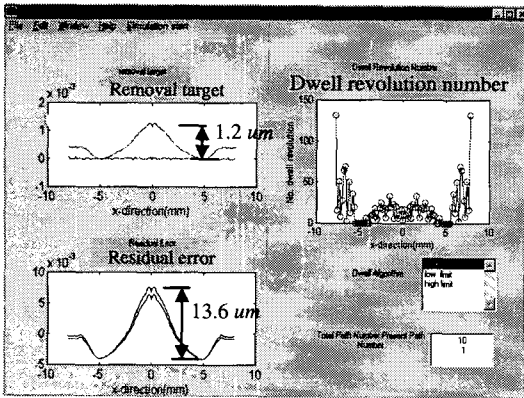


Fig. 9 Form error distribution and calculation process of dwell revolution number

따라서, 초기의 형상오차 13.6 μm 에 대해서, 1 회 제거깊이 1.2 μm 으로 5 회에 걸쳐서, 연마와 측정의 반복단계를 거쳐서 Fig. 10 의 결과를 얻었다. 피크 투밸리(peak-to-valley) 오차 R_{max} 는 8.6514 μm 으로 약 25%의 형상오차를 수정할 수가 있었다.

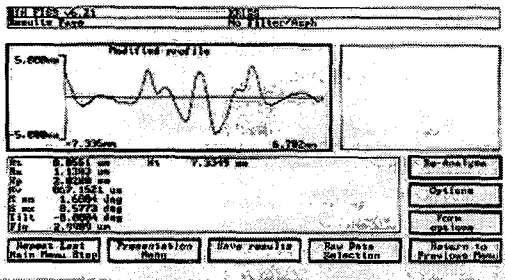
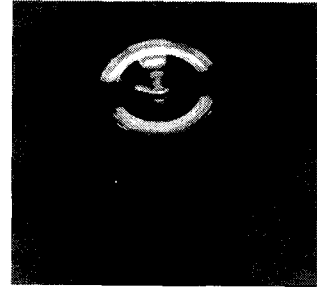
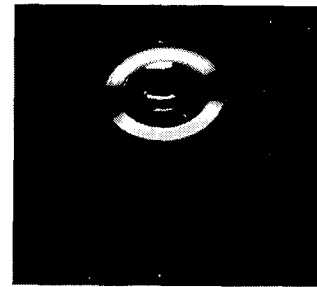


Fig. 10 Form error profile of STAVAX aspherical lens

또한, 평균 표면 거칠기 R_a 는 19 nm 으로 크게 개선되었고, 연마 전후의 금형 표면에 대한 사진이 Fig. 11 에 보여진다. 절삭 가공에 의해 형성된 거친 표면이 연마에 의해 개선된 효과가 렌즈면의 반사율의 개선으로 나타나는 것을 알 수 있다.



(a) Before polishing



(b) After polishing

Fig. 11 Photo of aspherical lens mold

4. 결론

소형의 회전대칭 비구면 렌즈 금형에 대한 PC-NC 연마장치를 제작하고, 연마실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 비구면 렌즈 금형 연마장치는 공작물의 회전, 공구 회전, 이송 (X,B)의 4 개의 제어 축으로 구성되었다. 공구의 상대 운동을 분석한 결과, 공구를 수직방향으로 구속 없이 미끄러지게 움직이게 하고, 이송하기 위한 서보(servo) 제어는 2 축만으로 구성 하여도, 접촉하는 연마영역에서 일정한 가압력을 부여할 수 있음을 알 수가 있었다.

2. 형상오차의 입력 및 연마 경로 생성, 연마 장치 제어를 통합환경에서 구현하기 위해, PC-NC

연마 장치를 구현하였다. 수치제어 코드(NC Code) 형식의 입력 파일(file)을 이용하여서, 연마 공정 전후와 상호 자료를 공유하는 개방성을 가지도록 하였다.

3. 스테인레스 재료의 비구면 렌즈 금형을 절삭 가공한 후 수정연마(form error correction) 하는 실험을 수행하였다. 실험 결과, 비구면의 형상오차에 대해서는 25%의 감소 효과를 얻었고, 특히 비구면의 표면 거칠기는 1/10 로 낮아지고, 렌즈면의 반사율이 높아짐을 알 수가 있었다

후 기

본 연구는 한국 과학 재단의 특정기초연구 과제 97-02200-08-01-3 의 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. M. Y. Yang, T. M. Lee, " New biarc interpolation for ultra-precision aspheric surface machining," Proc. ASPE Annual Meeting, pp. 195-198, 1997.
2. J. B. Arnold, P. J. Steger, and T.T. Saito, "Tool feed influence on the machinability of CO₂ laser optics," Applied Optics, Vol. 14, pp. 1777-1782, 1975.
3. M. Y. Yang, H. C. Lee, " Polishing of an electroless Nickel-plated aspherical lens mold," in Precision Science and Technology for Perfect Surfaces, Proc. 9th ICPE, pp. 138-143, 1999.
4. J. W. Foreman, Jr., "Simple numerical measure of the manufacturability of aspheric optical surfaces," Applied Optics, Vol. 25, pp. 826-827, 1986.
5. G. Doughty, J. Smith, "Microcomputer-controlled polishing machine for very smooth and deep aspherical surfaces," Applied Optics, Vol. 26, pp. 2421-2426, 1987.
6. H. Suzuki, S. Kodera, T. Nakasuji, et al., "Study on aspherical surface polishing of single crystal silicon lens," JSPE, Vol. 63, pp. 1280-1284, 1997.
7. F. W. Preston, "The theory and design of plate glass polishing machines," J. Soc. Glass Technol., Vol. 11, pp. 214-256, 1927.
8. R. Aspden, R. McDonough, and F. R. Nitchie, Jr., "Computer assisted optical surfacing," Applied

Optics, Vol. 11, pp. 2739-2747, 1972.

9. 홍원표, Reference-Pulse 방식에서 소프트웨어 보간에 관한 연구, 한국과학기술원 석사학위논문, 1995.