

에어백 공구에 의한 비구면 유리 렌즈 금형의 전면 접촉 연마

이호철*, 김종억†

(논문접수일 2008. 5. 19, 심사완료일 2008. 7. 12)

Full Contact Polishing Method of Aspherical Glass Lens Mold by Airbag Polishing Tool

Hocheol Lee*, Junguk Kim†

Abstract

Conventional aspherical lens polishing methods by the small tool polishing use aspherical profile and the trajectory of the polishing tool is also controlled. In this paper, new full contact polishing mechanism is suggested to polish aspherical glass lens mold by both airbag polishing tool and eccentric motion. Full contact concept by airbag polishing tool and no position control make the easy polishing setup and do not need aspherical design profile. An aspherical lens polishing machine was made for this study and a verification experiment was performed for surface roughness improvements.

Key Words : polishing machine(연마장치), aspherical lens mold(비구면 렌즈 금형), airbag tool(에어백 공구), full contact polishing (전면접촉연마)

1. 서론

비구면 유리렌즈는 플라스틱 렌즈에 비해서 열적 안정성과 고해상도에 적합한 광학적 특성을 가지고 있어서 휴대폰 카메라, HD-DVD 등의 고화질화에 필수적인 광학부품이다. 이에 따라서 국내의 관련 기업을 중심으로 비구면 유리렌즈의 생산기술을 확보하기 위한 노력을 가속화하고 있다. 광전자기기에 사용되는 비구면 유리렌즈는 금형을 이용한 압축

성형 방법에 의해서 렌즈를 양산하고 있어 초정밀 비구면 형상의 금형 가공기술이 필요하다. 고경도의 초경 금형은 초정밀 연삭 가공기에 의해 비구면 형상이 만들어지나 후속 연마 작업으로 잔류 스크래치나 나선형 공구마크를 제거하는 것이 필요하다. 연마방법으로서 수작업에 의한 비구면 연마방법이 시도되고 있으나, 작업자의 숙련도에 의존하고, 초정밀 가공된 형상이 과도하게 훼손될 수가 있다. 본 논문에서는 자동화된 비구면 연마기를 개발하여 비구면 형상을 연마하

* 한밭대학교 기계공학부 (hcleee@hanbat.ac.kr)
주소: 305-719 대전시 유성구 덕명동 산16-1

† 한밭대학교 기계공학부 기계공학전공

는 방법에 대한 연구를 수행하였다. 개발된 비구면 연마 기계는 소형의 에어백 연마공구와 편심운동방식의 연마메카니즘(mechanism)을 사용하였다. 에어백 공구는 고무의 적응성 때문에 비구면 형상에 항상 밀착 가능하고 편심운동은 연마면 전체에 균일한 연마량을 줄 수 있는 것으로 제안되었다. 황삭 연삭된 비구면 렌즈 금형에 대해서 에어백 공구와 편심운동 연마 메카니즘(mechanism)으로 비구면 형상을 전면 접촉 연마하여 비구면 렌즈 금형의 표면상태를 개선하는 실험 연구를 수행하고 그 결과를 분석하였다.

2. 비구면 연마 장치 설계 및 제작

2.1 전면 접촉 비구면 연마의 기술적 배경

전통적으로 구면렌즈 또는 구면 렌즈 금형은 렌즈의 곡률반경과 같은 연마공구에 연마패드를 붙여서 연마입자와 함께 적절한 상대운동을 부여해서 연마를 수행하여 왔다. 연마공구의 상대운동은 오스카방식이 주로 이용되어왔는데, Fig. 1에서 보는 바와 같이 오스카 방식은 연마패드가 하부에 장착되고, 가공물이 오버암 아래 장착된다. 이 경우에 가공물은 항상 패드 전면과 접촉된 상태에서 연마작용을 받는 구조이다. 상부의 가공물을 누르는 오버암(overarm)과 하부 테이블(table)의 상대적인 운동이 가공물에 마찰의 연마 운동을 발생시킨다. 부드러운 연마패드(polishing pad)가 회전 테이블에 부착되어서 연마입자와 함께 연마작용(polishing)을 한다. 연마입자는 가공물과 연마패드 사이에 공급된다. 오버암 피벗(pivot)에는 가공물이 장착되어 있고, 회전하는 테이블 위에서 좌우로 왕복 가능하게 하고, 마찰에 의해 가공물 또한 자체 회전하도록 볼조인트(ball joint)구조를 가진다. 우수한 표면거칠기는 연마입자 등의 조건에 의해 주로

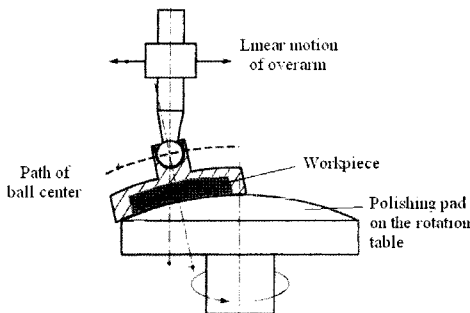


Fig. 1 Schematic diagram of polishing kinematics based on the sweep motion of overarm⁽¹⁾

결정된다, 최종의 구면 형상정밀도는 연마 공구와 상대운동 속도 등에 의해 좌우된다.

결과적으로 오스카 방식은 3가지 방향의 상대운동으로 가공물을 항상 전면 접촉 연마하여 가공물의 불균일도 또는 잔류 스크래치를 제거 가능하는 장점이 있는 반면에, 가공물의 곡률반경과 회전하는 연마공구의 곡률반경이 일치하는 구면의 렌즈 형상 연마에만 가능하다. 그러나 비구면 형상의 렌즈 표면은 단일 곡률이 아닌 연속적으로 변하는 곡률반경으로 이루어져 있어 오스카 방식을 적용하면 비구면의 형상이 연마과정이 진행될수록 표면거칠기는 좋아져도 그 형상정밀도는 구면화 되어 훼손될 수 밖에 없는 구조이다. 이러한 비구면 형상 연마 문제점을 극복하기 위해서 Fig. 2와 같이 렌즈의 표면을 소형의 연마공구로 이동해 가며 공구 위치에 따라 공구 체재시간(dwell time)을 조절하여 연마하는 방법으로 소형공구연마(small tool polishing) 방식이 제안되어 왔다^(2,3). 비구면 형상 연마에 있어서 공구 체재시간에 의한 연마량 제어 방법은 1960년대 이후 대구경 광학소자(large optics)에서 사용되어 왔던 컴퓨터제어광학연마(computer-controlled optical polishing)방법을 소형의 비구면 광학 연마에 응용한 것이다⁽⁴⁾.

Fig. 2에서 X, B축은 비구면의 경로에 따른 경로제어에 사용되는 축이며 C축은 가공물의 회전을 나타낸다. 연마공구는 자체 회전 가능하며, 이동 경로에 따라 수직방향으로 자유 하중으로 가압하고 있다. 소형의 연마 공구는 폴리우레탄 등으로 형성되어져 연마패드 역할을 한다. 비구면의 연마 경로에 따른 연마량이 달라지는 것은 이동위치에 따른 체재 시간을 조절하여 연마작업을 수행하며 Fig. 3에 연마 체재 시간을 조절하여 연마하는 연마경로 생성방법을 나타내었다.

렌즈의 반경위치 r에서 일정한 시간 동안 연마공구가 가공물이 회전하는 동안 체재하며, 1회전 시간의 N_1 정수배만큼 회전해서 회전대칭성을 최대한 확보하면서 연마량을 조절한다. 이 경우 연마영역은 가공물과 공구의 접촉상태에 따라서 A_1 로 다르게 나타날 수도 있다. A_1 영역에서의 1회전

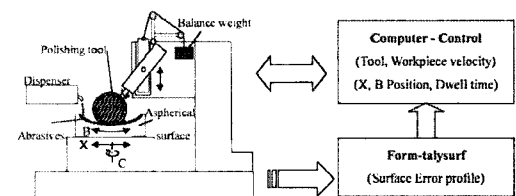


Fig. 2 Schematic diagram of aspherical lens polishing based on the small tool polishing process^(2,3)

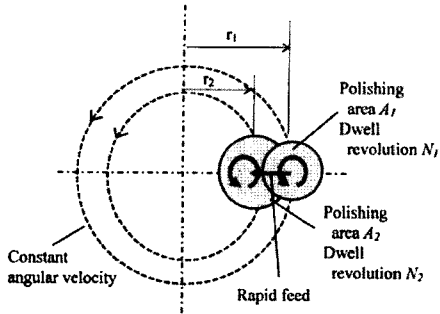


Fig. 3 Discrete annular tool path strategy using the integer revolution numbers⁽⁵⁾

당 연마제거량을 R_1 이라 정의하면 국부적인 연마량 h_1 은 1 회전당 연마제거량 R_1 과 회전수 N_1 의 곱에 의해 결정된다. 특정위치 r_1 에서 체재한 후 연마공구는 다음 위치 r_2 로 이동하여 반복적으로 일정시간 N_2 만큼 체재하여 연마작업을 수행한다. 결과적으로 가공물전체 면에 걸친 연마량 h 는 연마량 h_1, h_2 등의 중첩(superposition)에 의해 정해진다⁽⁵⁾.

$$\begin{aligned}
 h &= h_1 + h_2 + h_3 + \dots \\
 &= R_1 N_1 + R_2 N_2 + R_3 N_3 + \dots
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

그러나 연마 공구가 소형의 비구면 형상 표면을 이동하는 방식의 소형공구 제어 연마는 비구면의 형상을 고려하여 연마를 반드시 수행해야 한다. 따라서 렌즈 금형에 대한 공구의 원점 설정이 반드시 필요하고, 비구면 렌즈 직경이 점차 소형화되는 경우 공구 소형화에도 한계를 가지고 있다. 또한, 비구면 형상 입력 및 공구 경로의 계산 등의 작업자가 사용하기 어려운 점도 있었다⁽⁶⁾. 비구면 렌즈 직경의 초소형화에 대응하기 위해서는 초음파를 이용한 최소의 연마운동을 이용한 비구면 연마 방법도 시도되고 있다⁽⁷⁾.

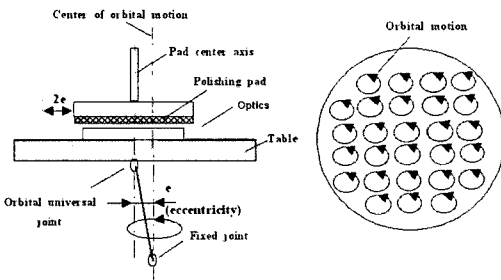


Fig. 4 Schematic diagram of polishing kinematics based on the eccentric motion⁽⁸⁾

한편, 편심운동에 의한 광학연마 방법은 구면의 안경 렌즈 금형 연마에 전통적으로 적용해왔던 방법으로서 오스카방법에서의 왕복운동을 편심운동으로 대체한 것으로 Fig. 4와 같이 편심운동 또는 궤도운동(orbital motion)에 의해 편심량 e 만큼 편심 회전하면 결과적으로 3개의 방향성을 가지는 편심운동연마 방식이 이루어진다.

편심회전, 공구회전, 가공물 회전의 연마 메카니즘과 연마 패드를 에어백 공구로 대체하여 직경 80mm의 구면 안경 렌즈 금형에 대해 연마한 결과 구면 형상 개선과 균일한 표면거칠기를 확보하는 연마작업이 선행 연구결과 가능하였다⁽⁶⁾. 본 논문에서는 소형의 에어백공구와 편심운동의 연마기구를 이용하여 초경 소재의 비구면 유리 렌즈 금형의 표면거칠기를 형상 훼손 없이 개선하는 방법을 연구하였다. 전면 접촉 연마에 의한 비구면 렌즈 연마 실험을 위하여 소형의 에어백 공구와 편심 연마 운동하는 비구면 렌즈 연마 장치를 개발하였다.

2.2 소형 에어백 공구 및 비구면 연마 장치

소형의 비구면의 곡물에 적응하도록 에어백 연마 공구를 Fig. 5와 같이 제작하였다. 에어백 연마 공구는 중공(through-hole)의 스펀들을 이용하여 공구가 회전하면서도 공압에 의해 고무패드를 팽창 가능한 구조로 설계되었다.

중공스펀들을 감싸는 고무 패드는 연마입자를 기공 내에 보유하는 역할을 하면서도 팽창 가능한 기공의 흡을 가지는

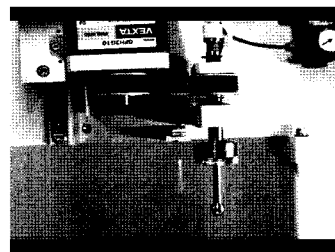


Fig. 5 Spindle for airbag polishing tool

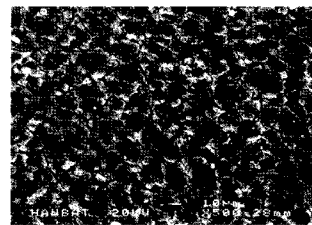


Fig. 6 Expandable polishing pad for airbag polishing tool



Fig. 7 Polishing machine with airbag tool



Fig. 8 G-coded PC-NC polishing process

구조이어야 한다. 사용된 우레탄 계열의 고무 연마패드의 주사전자현미경(SEM) 사진은 Fig. 6과 같다.

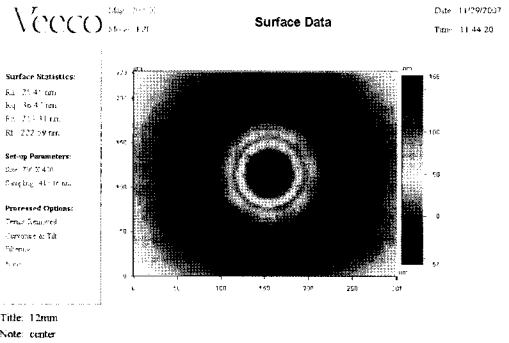
편심회전, 가공물 테이블 회전과 공구 회전이 부가되어 3개 방향(3-way) 운동이 생성되어 전면에 균일 연마가 이루어지도록 하는 장치를 제작하였다. 편심운동은 x-y 서보모터(servo motor)의 원호 보간 운동으로 구현되고, 수직 하중은 자중의 균형추 방식으로 설계되었다. 연마공구의 회전수는 10~100rpm, 하부 테이블 회전수는 10~200rpm의 범위를 가지도록 Fig. 7과 같이 설계 제작 되었다.

또한 연마장치의 공구회전, 가공물회전, 편심회전 등의 운동 제어를 위해서는 델타타우(미, Deltatau)의 모션컨트롤러(motion controller) UMAC을 사용하여 운동제어를 구현하였다. 또한 연마하중 확인을 위해서 가공물 하부에 로드셀(load cell)을 장착하였다. G-code 방식 명령어로 편심 연마 기능을 반복 수행 가능하며, 편심량 설정도 원호 보간의 크기로 쉽게 조정이 가능하였다. Fig. 8은 에어백 공구를 G-code 방식으로 실험하고 있는 모습이다.

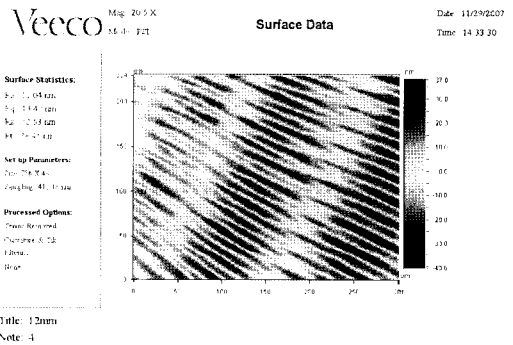
3. 전면 접촉 비구면 연마 실험 및 결과분석

3.1 연삭 후의 비구면 렌즈 금형 표면

실험에 사용된 비구면 렌즈 금형은 초정밀 연삭 가공기에서 연삭 가공된 것으로 최종 마무리 연삭을 남겨둔 초경 금형이다. 백색광 간섭계(white light interferometer)로 측정된 표면 상태는 부분적 스크래치가 남아 있고, Fig. 8 (a)의



(a) center



(b) Outer area

Fig. 9 Tool mark from grinding process

렌즈 금형의 중심부 오차와 Fig. 8 (b)의 외곽영역에 공구마크가 있다. 중심부 형상오차는 주로 원점 세팅(setting) 오차에 따라 직경 120μm의 환형 봉우리 형태로 나타나고 있다. 공구 마크는 주로 연삭 휠(wheel)의 나선형 공구 경로에 의해 발생된 것으로 중심부 측정 영역에서는 Ra 25nm, 외곽 측정 영역에서는 Ra 11nm의 수준이다. 측정 영역 크기는 301μm×229μm으로 하였다. 따라서 본 연구에서는 제안된 전면 접촉 연마 방법으로 연마에 따른 형상의 변동성을 최소화 하면서 공구 마크를 제거한다.

3.2 제안된 공구마크 연마 방법

연삭과정에서 잔류된 공구마크를 제거하는 방법으로 에어백 공구를 이용한 전면접촉 연마 방법을 Fig. 10과 같이 제안하였다.

연마시간에 따른 연마율은 일반적으로 프레스턴(Preston) 식에 의해 식 (2)와 같이 연마압력과 상대속도 분포의 곱으로 표현 된다⁽⁹⁾. 본 연구에서 제안된 전면접촉연마에서의

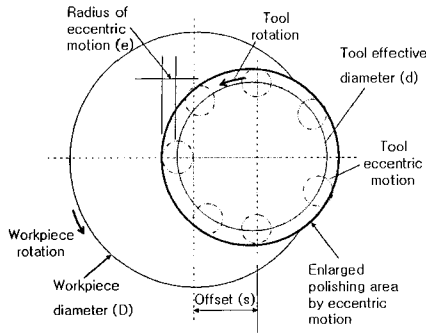


Fig. 10 A suggested tool mark removal method by full contact polishing process

상대속도 분포는 식 (3)과 같이 연마 영역 내에서 에어백 공구의 회전수(ω)와 렌즈 금형의 회전수(Ω)의 차이에 의해 주로 결정되며 편심연마운동에 의한 등가 회전수도 포함된다. 에어백 공구와 비구면 렌즈 금형의 회전수를 동일하게 유지하면, 두 회전수에 의한 상대속도 분포는 연마영역에서는 동일하게 유지되며 연마율은 식 (4)와 같다. 공구회전과 편심운동이 일정 연마 시간 범위에서는 독립적으로 연마작업을 수행한다고 가정하였다.

$$\frac{dh}{dt} = kPV \quad (2)$$

$$V = r\omega - (r - s)\Omega + ef \quad (3)$$

$$\frac{dh}{dt} = kP(s\omega + ef) \quad (4)$$

Table 1 Experimental conditions for tool mark removal

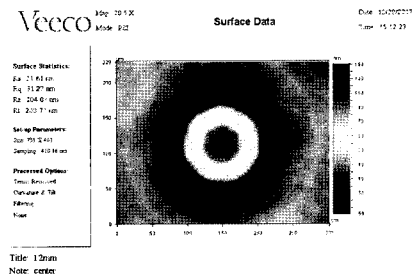
Parameter		Working condition
Polishing load		250gf
Tool eccentric motion (rotation)	Radius(e)	0.5mm
	feedrate(f)	300mm/min(96rpm)
	offset(s)	2.25mm
Air pressure		0.1MPa
Tool effective diameter		6mm
Workpiece diameter		9mm
Tool rotation speed(ω)		80rpm
Workpiece rotation speed(Ω)		80rpm
Abrasives		diamond 1 μ m
Polishing time(t)		10 min

연마영역내의 연마입자는 두개의 회전과 편심 운동에 의해 이동하여 일정 연마시간 후에는 특정 연마 패턴(pattern)이 나타나지 않는다. 결과적으로 렌즈 금형은 전면 접촉연마에 의한 압력분포와 연마율 상수 k 에 의해 연마율 분포가 결정될 것으로 기대된다. 에어백 공구가 연마 중에 지속적으로 금형에 밀착된다면 연마압력 또한 거의 균일한 분포를 보일 것으로 추측된다. 실험에 사용된 에어백 고무에 의한 공구 유효직경은 6mm이고, 가공대상의 금형의 내경은 9mm이다. 공구를 일정 위치만큼 오프셋(offset) 상태에서 편심운동을 하도록 하여 결과적으로 회전하는 가공물의 전 영역을 연마 영역으로 포함하게 하였다. 사용된 구체적 연마조건은 Table 1과 같다.

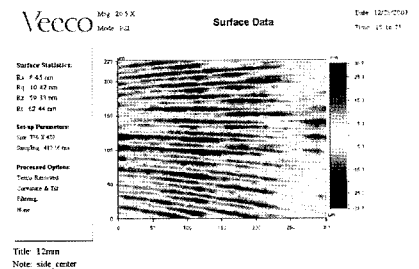
3.3 비구면 연마 실험 결과

측정된 금형 표면의 공구마크는 연마 실험 후 Fig. 8과 같이 완화되어졌고, 중심부 측정 영역에서는 Ra 22nm, 외곽 측정 영역에서는 Ra 8nm의 수준이다.

또한 접촉식 측정기(Talyor hopson, Formtaly surf)로 평가한 표면거칠기도 Ra 기준으로 11.3nm에서 5.4nm으로 53% 대폭 개선되었다.



(a) Center



(b) Outer area

Fig. 11 Tool mark reduction by polishing process

Table 2 Surface roughness improvement by polishing process

	Rt (peak-to-valley)	Ra (average)	Rrms (root-mean-square)
Before polishing (nm)	98.3	11.3	13.9
After polishing (nm)	71.3	5.4	7.0
Improvement (%)	26.4	53	50.3

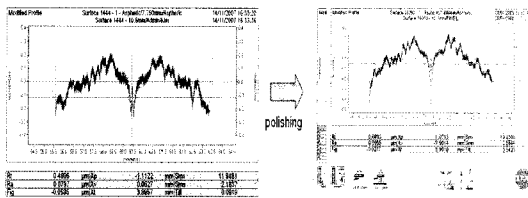


Fig. 12 Form accuracy profile by polishing process

Table 3 Form accuracy variation of aspherical lens mold

	Rt (peak-to-valley)	Ra (average)	Figure
Before polishing (μm)	0.50	0.080	-0.059
After polishing (μm)	0.68	0.096	-0.028
Variation	μm	- 0.18	+ 0.031
	(%)	-36	+53

한편 비구면 형상의 변동성을 파악하기 위하여 접촉식 측정기로 연마된 금형 형상을 측정할 결과, Fig. 12와 같이 형상오차 프로파일(profile)은 유사하였다.

측정된 연마 전후의 형상오차 수치 변화는 Rt(peak-to valley) 기준으로 0.5 μm 에서 0.68 μm 으로 약 36% 악화되어 변동하였으나, 비구면 형상의 정점곡률반경(basic radius)의 오차인 figure는 오히려 53% 개선되었다.

또한 구면 렌즈 금형에 대해 동일한 연삭가공 및 전면 접촉연마 실험을 수행한 결과 표면거칠기 뿐만 아니라 형상오차 자체도 Rt(peak-to valley) 기준으로 0.31 μm 에서 0.25 μm

Table 4 Form accuracy variation of a spherical lens mold

	Rt (peak-to-valley)	Ra (average)	R
Before polishing (μm)	0.31	0.054	26.0180
After polishing (μm)	0.25	0.043	26.0180
Variation (μm)	0.06	0.011	-

으로 다소 개선되었다.

4. 결론

본 논문에서는 소형의 비구면 유리렌즈 금형의 공구마크를 제거하는 연마방법으로 3개의 연마운동으로서 연마과정중에 전 연마영역이 항상 접촉하는 전면 접촉연마방법을 제안하였다. 비구면 연마 실험 연구를 위하여 모션컨트롤러와 G-code에 의해서 연마운동을 제어하는 전용의 비구면 연마장치를 개발하였다. 비구면 렌즈 금형의 공구마크 제거 연마 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 비구면 렌즈 금형의 원점설정 및 연마 경로 입력이 필요 없는 비구면 렌즈 금형 연마방법으로서 에어백 공구와 편심운동 기반의 전면 접촉 연마 방법을 제안하였고 이에 대한 검증 실험을 수행하였다.
- (2) 황삭 연삭된 비구면 렌즈금형의 경우 연마에 의해 공구마크가 크게 완화되었고, 접촉식 측정기로 평가된 표면 거칠기는 Ra 기준으로 11.3nm에서 5.4nm으로 53% 대폭 개선되었다.
- (3) 본 연구에서의 전면 접촉 연마 실험 결과 비구면 렌즈 금형의 경우 형상오차 변동은 약 36% 수준으로 나타났으며, 비구면 정점곡률반경의 오차 figure는 오히려 개선되었다. 또한 구면렌즈 금형의 경우 형상오차가 Rt(peak-to valley) 기준으로 0.31 μm 에서 0.25 μm 으로 다소 개선되었다.
- (4) 비구면 연마 실험 결과 곡률 반경 측면에서는 설계 곡률 반경 형상으로 개선되는 효과를 가지나 형상오차는 국부적으로 증가하였다. 비구면 연마에 의한 형상변동성을 더 낮은 수준으로 억제하기 위한 연마영역 내의 연마율 분포에 대한 후속 실험 연구가 필요하다.

후 기

본 논문은 산업자원부 “부품소재개발사업”의 과제명 “Progressive방식의 GMP(Glass Molding Press) 공정을 위한 다수 Cavity 금형·성형 기술개발”의 위탁과제인 “곡률 적응형 비구면 연마공정에 의한 고품위 비구면 유리렌즈 금형기술 개발”의 지원에 의하여 수행되었습니다(과제번호 0501DA1003).

참 고 문 헌

- (1) Karow, H. H., 2004, *Fabrication Methods for Precision Optics*, John Wiley & Sones, Inc., New Jersey, pp. 342~351.
- (2) Lee, H. and Yang, M., 2001, “A study on PC-NC based aspherical lens polishing system with minimum translation system,” *Journal of Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 18, No. 7, pp. 65~71.
- (3) Suzuki, H., Kodera, T., and Nakasuji, T., 1997, “Study on aspherical surface polishing of single crystal silicon lens,” *Journal of Japanese Society of Precision Engineering*, Vol. 63, pp. 1280~1284.
- (4) Jones, R. A., 1986, “Computer-controlled optical surfacing with orbital tool motion,” *Optical Engineering*, Vol. 25, pp. 785~790.
- (5) Lee, H. and Yang, M., 2001, “Dwell time algorithm for computer controlled polishing of small axis-symmetrical aspherical lens mold,” *Optical Engineering*, Vol. 40, No. 9, pp. 1936~1943.
- (6) Suzuki, H. and Komiyama, T., 1999, “Precision grinding of molding die and glass molding in micro optical components,” *Proceedings of 9th International Conference for Production Engineering*, pp. 126~131.
- (7) Suzuki, H. and Kawamori, R., 2005, “Ultra-precision finishing of micro aspherical surface by ultrasonic vibration assisted polishing,” *Key Engineering Materials*, Vols. 291-292, pp. 349~354.
- (8) Lee, H., 2007, “A study on optics polishing technology by adaptive tool and eccentric motion mechanism,” *Transaction of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 16, No. 6, pp. 133~139.
- (9) Yang, M. and Lee, H., 2001, “Local material removal mechanism considering curvature effect in the polishing process of the small aspherical lens die,” *Journal of Materials processing technology*, Vol. 116, pp. 298~304.