

적응형 공구 및 편심 운동 방식의 광학 연마 기술에 관한 연구

이호철*

(논문접수일 2007. 6. 20, 심사완료일 2007. 9. 11)

A Study on Optics Polishing Technology by Adaptive Tool and Eccentric Motion Mechanism

Hocheol Lee*

Abstract

In this paper, optics polishing technology using adaptive tool and eccentric motion mechanism was suggested. Optics polishing can make high reflective and accurate surface. The optics polishing process based on the eccentric motion mechanism has been used to manufacture the ophthalmic lens mold. Also ophthalmic lens mold factory hold conventionally a lot of the curved polishing tools for the versatile mold curves of eye diopters and want to reduce tool numbers. Therefore, a polishing machine with adaptive airbag tool was developed and experimentally verified in view of surface roughness and form accuracy.

Key Words : optics polishing(광학연마), ophthalmic lens(안경렌즈), mold(금형), airbag polishing tool(에어백 연마공구), eccentric motion mechanism(편심운동기구)

1. 서론

최근 반도체산업 및 디스플레이 산업의 웨이퍼(wafer), 인공위성 및 천체망원경의 대형광학계(large optics), 디지털 카메라렌즈(digital camera lens)의 소형광학계에 있어서 광학 부품들은 높은 형상정밀도(form accuracy)와 고광택의 표면거칠기(surface roughness)를 필요하고 있다. 이러한 요건을 만족하기 위한 제조공정으로서 광학연마의 역할은 날로 증대되고 있다. 한편 전통적인 안경광학(ophthalmic optics)

분야에서 안경렌즈는 소비자의 시력교정(eye correction)을 위해 다양한 구면 반경의 렌즈 형상을 필요하고 있다. 안경렌즈몰드 공장에서는 이를 반영하여 다양한 곡률의 안경렌즈 몰드를 광학연마에 의해서 제작하고 있다. 따라서 하나의 몰드 구면 반경에 대응한 각각의 연마공구(polishing tool)를 구비해야 하며, 수많은 양의 연마공구를 창고에 보관하고 있는 실정이다.

따라서 본 논문의 연구에서는 안경몰드의 연마에 적용되어 왔던 편심연마방식에 부가해서 새로운 개념의 에어백

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

(airbag) 방식의 연마공구를 제안하였으며, 안경렌즈 몰드에 따른 별도의 연마공구 준비 없이 연마 공정을 수행할 수가 있어서 연마공정을 개선하는데 효과적이다. 또한 연마공구의 제작된 반경의 오차에서 발생하는 공정오차 없이 전 공정에서 연삭된 반경을 그대로 적용하는 효과가 있어서 연삭공정에서 반경형상을 오차내 범위로 가공하면 거의 동일한 반경을 얻을 수 있는 장점이 있다. 따라서 구면 몰드의 반경에 맞추는 연마 공구가 아닌 적응형 에어백공구와 편심운동에 의한 광학 연마 공정을 수행하는 연마 장치를 먼저 제작하였다. 개발된 장치를 이용하여 에어백 연마 공구의 검증을 구면몰드(spherical mold)를 이용하여 연마 실험을 수행하였고, 표면거칠기가 확보된 공정조건에서 그 결과를 기존의 상용화 수준의 구면 몰드의 형상정밀도와 비교하였다.

2. 적응형 편심 운동 연마 장치

2.1 광학연마 운동 방식 비교

광학연마에는 적용되는 광학부품의 형상에 따라서 여러 방식의 연마기구(polishing mechanism)가 있어왔다. 가장 대표적인 것은 왕복회전방식(sweep motion type)으로서 Fig. 1과 같은 운동기구를 가지며 오스카방식(oscar type)이라고도 알려져 있다.

이와 같은 방식의 장치 구조는 상부의 연마공구를 누르는 오버암(overarm)과 하부 테이블(table)의 상대적인 운동이 가공물에 마찰과 연마운동을 발생시킨다. 부드러운 연마패드(pad)가 오버암 아래의 연마공구에 부착되어서 연마입자와 함께 연마작용(polishing)을 한다. 연마입자는 연마공구의 패드와 테이블사이에서 공급된다. 오버암 피벗(pivot)은 가공물이 장착된 회전하는 테이블위에서 연마패드를 좌우로 왕복 가능하게하고, 마찰에 의해 연마패드가 자체 회전하도록 볼조인트(ball joint) 구조를 가진다. 오스카 방식은 경우에 따라서 연마패드가 하부에 장착되고, 가공물이 오버암 아래 장착된다. 이 경우에 가공물은 항상 패드 전면과 접촉된 상태에서 연마작용을 받는 구조이다. 우수한 표면거칠기는 연마입자 등의 조건에 의해 주로 결정되고, 최종의 형상정밀도는 패드가 접촉된 연마공구에 의해 좌우된다. 특히, 형상이 이미 연삭 등에 얻어진 후의 연마공정이기 때문에, 연마공구의 구면 반경이 연삭면과 다를 경우, 연마패드의 신축성을 고려하더라도 초기의 부분적인 과도한 국부적인 연마가 문제를 발생한다.

한편, 비구면렌즈(aspherical lens) 연마 등에는 가공물 구면과 연마공구 구면이 접촉하면서 단순 왕복 운동하는 것으

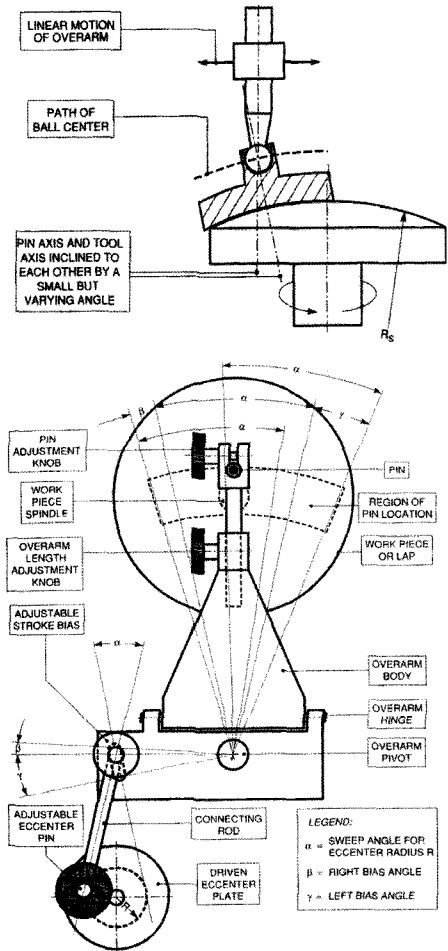


Fig. 1 Schematic diagram of polishing kinematics based on the sweep motion of overarm⁽¹⁾

로는 비구면 형상이 연마에 의해 오히려 나빠진다. 따라서 비구면 연마에 제안되는 방식은 소형의 연마공구가 가공물위를 왕복하면서 연마하는 Fig. 2와 같은 소형공구연마(small tool polishing)이다. 이 방식은 소형연마공구가 가공물 면을 연마하는 것에서는 오스카방식과 유사하지만, 비구면 위의 연마경로에 따라서 소형공구의 이송속도나 이동하는 시간을 조절하여 원하는 연마량을 얻는다.

소형공구연마에 의해 비구면 광학 등을 연마하는 방식은 대형광학계의 수정연마(corrective polishing)에도 현재 적용되고 있으며⁽³⁾, Fig. 2는 주로 소형의 비구면렌즈 금형에 적용되고 있다. X, B축은 비구면의 경로에 따른 경로제어에 사용되는 축이며 C축은 가공물의 회전을 나타낸다. 연마공

구는 자체회전하며, 이동경로에 따라 수직방향으로 자유하중으로 가압하고 있다. 소형의 공구는 폴리우레탄 등으로 형성되어져 연마패드 역할을 한다. 비구면의 연마경로에 따른 연마량이 달라지는 것은 이동위치에 따른 연마시간을 조절하여 연마작업을 수행하며 Fig. 3에 연마시간을 조절하여 연마하는 연마경로 생성방법의 예를 나타내었다.

렌즈의 반경위치 r_1 에서 일정한 시간 동안 연마공구가 가공물이 회전하는 동안 체재하며, 1회전 시간의 N_1 정수배만

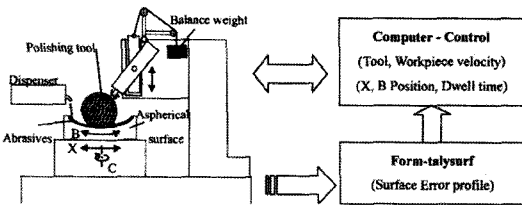


Fig. 2 Schematic diagram of polishing kinematics based on the computer-controlled optical polishing for the small aspherical optics⁽²⁾

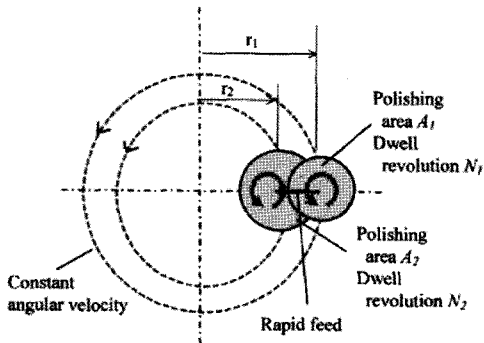


Fig. 3 Discrete annular tool path strategy using the integer revolution numbers⁽⁴⁾

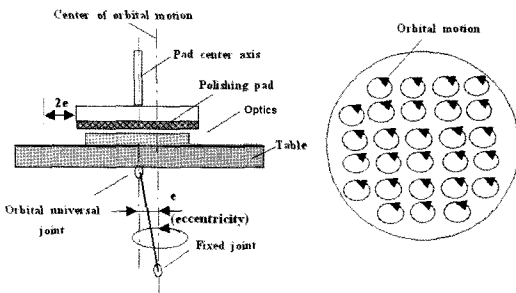


Fig. 4 Schematic diagram of polishing kinematics based on the eccentric motion⁽⁵⁾

큼 회전해서 회전대칭성을 최대한 확보하면서 연마량을 조절한다. 이 경우 연마영역은 가공물과 공구의 접촉상태에 따라서 A_1 로 다르게 나타날 수도 있다. A_1 영역에서의 1회전당 연마제거량을 R_1 이라 정의하면 국부적인 연마량 h_1 은 1회전당 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 각각의 공구위치에서의 연마량 h_1, h_2 등의 중첩(superposition)에 의해 정해진다.

$$h = h_1 + h_2 + h_3 + \dots$$

$$= R_1 N_1 + R_2 N_2 + R_3 N_3 + \dots \quad (1)$$

한편, 편심운동(eccentric motion) 연마방식은 광학부품의 전면이 접촉한 상태로 연마하며 그 구조는 Fig. 4와 같다. 주로 소형의 광학부품의 전면연마에 활용되며, 대표적인 응용분야로 안경광학(optthalmic optics)의 안경렌즈나 안경렌즈 몰드(mold)의 연마에 사용되어 오던 방식이다. 광학부품은 가공물 테이블에(table) 고정되고 테이블은 일정 각속도로 회전한다. 또한 연마공구나 패드는 오스카 방식에서 언급된 것과 같이 볼조인트로 눌러지게 된다. 편심운동연마방식은 오스카방식과는 달리 공구가 왕복운동 하는 것이 아닌 테이블 또는 연마공구가 편심의 운동을 유발하는 구조를 부가적으로 가진다. 편심운동 또는 궤도운동(orbital motion)에 의해 편심량 e 만큼 편심 회전하면 결과적으로 3개의 방향성을 가지는 편심운동연마 방식이 이루어진다. 편심회전, 가공물회전, 연마공구 즉 패드의 회전에 의해 가공물 전면에 걸쳐 균일한 표면거칠기를 확보하는 연마작업이 가능하다.

2.2 편심운동 연마 장치 제작

실험을 위한 편심운동 연마 장치를 Fig. 5와 같이 제작하였다. 편심운동 및 연마공구 위치제어를 위해 x, y, z 3축

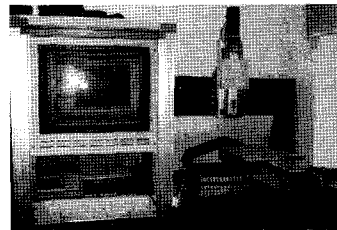


Fig. 5 Polishing machine based on the eccentric motion

AC 서보제어가 가능한 연마 장치이다.

적응형 에어백 공구와 회전테이블이 장착되지 않은 구조의 상태이다. 편심운동은 x, y축의 원호 보간 운동에 의해 구현하며, PC(personal computer)에 모션컨트롤러(motion controller)를 장착하여 제어되도록 한다. 모션컨트롤러 보드는 (주)커미조아(comioza Co.) COMI-LX508이다. 연마 압력의 확인과 조절을 위해 로드셀(load cell)을 장착하였다. 연마공구 및 테이블이 장착되어 테이블회전과 공구회전이 부가되어 3개 방향(3-way) 운동이 생성되어 전면에 균일 연마가 이루어진다.

2.3 적응형 에어백 연마공구

안경몰드의 제작과정은 3단계로 이루어지며, 1단계로 연삭에 의한 구면 연삭가공, 2단계는 래핑(lapping) 또는 스무싱(smoothing)이고 마지막 단계로서 잔류된 스크래치를 제거하거나 광택을 확보하기 위한 최종연마인 폴리싱(polishing) 작업을 한다.

최종연마(polishing)에서는 연마되는 가공물의 구면반경과 일치되는 지그(jig)를 준비하고 그 위에 연마패드를 부착하는 형태로 연마공구를 준비한다. 따라서 구면의 렌즈나 구면의 몰드의 연마를 위해 다양한 종류의 연마공구를 미리 준비해서 보관한다. 특히, 안경렌즈 제조공장에서는 렌즈나 몰드의 연마를 위해서는 Fig. 6과 같은 많은 연마공구를 보

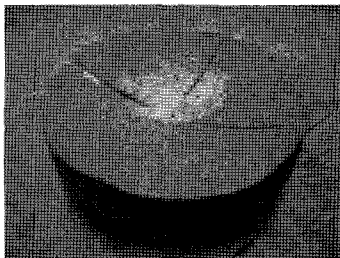


Fig. 6 Conventional polishing tool with polishing pad

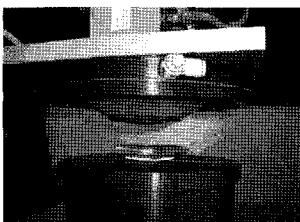


Fig. 7 Airbag polishing tool to adapt mold surface

유하고 있으며, 이는 시력교정 디옵터(diopter)에 맞는 구면반경을 가진 연마공구가 필요하기 때문이다.

따라서 제조 비용을 절감하기 위해서라도 별도의 지그가 없는 연마방식이 필요하다.

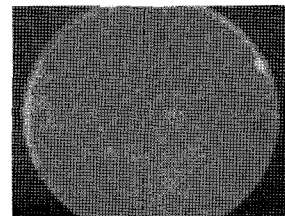
본 연구에서 제안된 에어백(airbag) 공구는 고무형태로 에어백을 만들어서 에어백이 형상 가공된 면에 밀착되어 연마작용을 한다. 제작된 에어백공구는 Fig. 7과 같고 연마패드는 에어백 공구에 덧붙여서 사용한다.

3. 실험 및 결과 분석

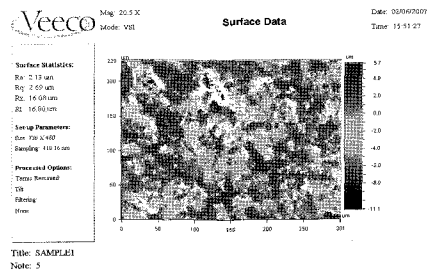
적응형 에어백공구를 가진 편심운동 연마장치의 검증을 위한 실험을 구면 안경렌즈몰드(ophthalmic lens mold)를 이용하여 수행하였다. 실험에 의해 특성의 구면반경의 안경렌즈 몰드를 대상으로 표면거칠기 및 형상정밀도를 확보하는 실험을 수행하였고 그 결과를 분석한다.

3.1 표면거칠기(surface roughness)

실험을 위한 연삭시편의 준비는 몰드 제작업체에 의뢰하여 진행하였고, 연삭공구는 다이아몬드펠릿(diamond pellet)이나 컵휠(cub wheel)을 사용하고, 사용된 메시(mesh) 입자크기는 #350이다. 제작된 시편의 사진과 백색광간섭계(white-light interferometer)에 의한 표면거칠기 결과는 Fig. 8과 같다.

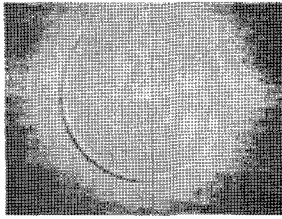


(a) Mold

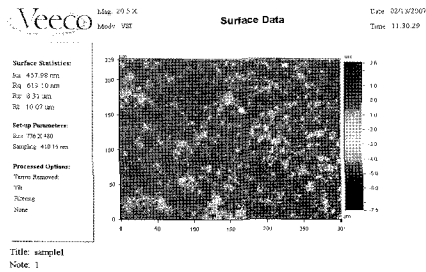


(b) Surface roughness

Fig. 8 Surface roughness of the grounded lens mold



(a) Mold



(b) Surface roughness

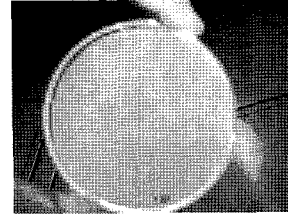
Fig. 9 Surface roughness after lapping of the lens mold

몰드의 크기는 외경이 80mm이고 구면반경은 R165mm의 기준반경(Design radius)이다. 연삭된 몰드의 표면거칠기는 Ra 2.13 μ m, Rt 16.8 μ m의 거친 면이다.

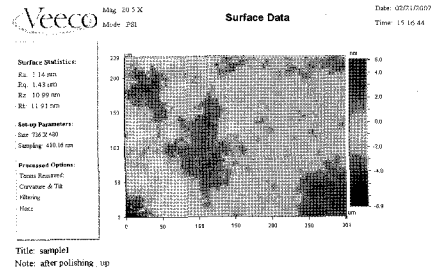
동일 구면 반경의 R 플레이트(plate)를 래핑공구로 준비하여 연삭된 몰드에 래핑작업을 수행한 결과 Fig. 9와 같은 결과를 얻었다.

래핑 입자로는 sand #1000을 사용하였다. 래핑에서 얻어진 표면거칠기는 Ra 457nm, Rt 10.1 μ m이었다. 표면의 상태는 연삭에 비해서 비교적 균일하였다. 일부 깊은 스크래치(scratch)가 있어 피크투밸리(Rt, peak-to-valley) 표면거칠기가 여전히 높은 수치를 보이고 있다. 이와 같은 상태에서 더 이상의 래핑 추가 작업 없이 최종연마인 에어백공구 연마 단계로 전환하였다. 제작된 편심운동연마장치에 에어백공구와 래핑된 몰드를 장착하였다. 연마패드는 세륨(cerium) 패드 두께 0.8mm를 에어백에 덧붙여 사용하였다. 연마재로는 세륨으로서 입자 크기 1.5 μ m를 사용하였다. 총 연마시간으로 래핑의 잔류 스크래치를 제거하기 위해 충분한 연마작업을 수행하여 1시간 이상이 소요되었고, 연마압력은 최대 5kgf까지 적용하였다. 연마작업 후의 표면거칠기 측정 결과는 Fig. 10과 같다. 표면거칠기는 Ra 1.1nm, Rt 11.9nm이었다. 연마된 몰드는 연마되지 않은 후면 때문에 뿌옇게 보인다.

실험에서 달성된 표면거칠기(Ra) 1nm의 수준은 광학적인 기능을 달성하는 데 있어서 충분한 표면거칠기이고, 최대표



(a) Mold



(b) Surface roughness

Fig. 10 Surface roughness after polishing of the lens mold

Table 1 Surface roughness comparison by processes

Process	Surface roughness		Abrasives conditions
	Rt	Ra	
Grinding	16.8 μ m	2.13 μ m	diamond #250
Lapping	10.1 μ m	457nm	sand #1000
Polishing (airbag)	11.9nm	1.1nm	cerium 1.5 μ m

면거칠기(Rt) 또한 11.9nm 수준이어서 깊은 스크래치가 없는 상태이다. 연마면을 위치별로 재 측정결과 거의 동일한 수치를 얻어서 표면거칠기 측면에서 균일한 연마면을 성공적으로 확보하였다. 따라서 Table 1에서 같이 에어백공구에 의한 최종연마 방법으로도 안경몰드로 사용가능한 수준의 표면거칠기를 충분히 달성 가능하였다.

3.2 형상정밀도(form accuracy)

연마 후에 형성된 구면반경의 형상정밀도를 파악하기 위해 고정밀 3차원측정기를 이용하여 구면 형상을 측정하였다. 3차원 측정기의 기본정밀도(base accuracy)는 2 μ m 수준으로 안경몰드의 형상파악을 위해서는 충분한 것으로 판단된다. 측정방법은 먼저 상용되는 구면몰드를 측정하여 기준 구면 반경 대비 형상오차 분포를 측정하여 그 정밀도 수준을

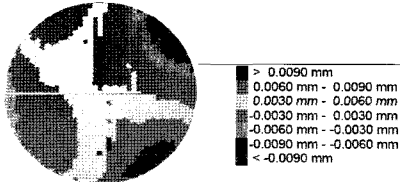


Fig. 11 Form accuracy example of the lapped lens mold

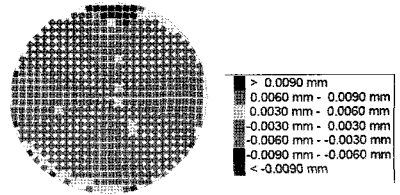
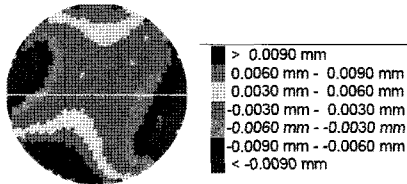
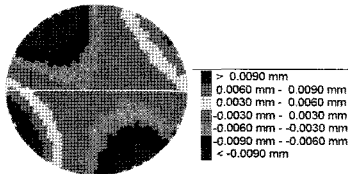


Fig. 13 Form accuracy by airbag tool polishing



(a) Mold sample of A material



(b) Mold sample of B material

Fig. 12 Form accuracy example of the commercial lens mold

파악하였다. 다음 단계로 적응형 에어백공구를 이용하여 연마된 시편에 대하여 그 형상오차 분포를 측정하였다. 상용의 래핑 작업한 후의 형상오차는 기준반경 R164.85mm에 대하여 Fig. 11의 오차분포를 보였다.

래핑된 몰드는 난시(astigmatic) 형태의 형상오차 분포를 나타내고 최대오차는 9 μ m 이상을 부분적으로 보인다. 안경 렌즈가 주로 사용되는 중심부 영역에서는 6 μ m이하로 비교적 충분한 정밀도를 확보한 것으로 보인다. 한편, 상용화되는 구면렌즈 몰드를 입수하여 형상을 측정한 결과 Fig. 12와 같은 결과를 얻었다.

사용된 몰드의 재료는 2 종류를 비교하였고 몰드제작회사에서 동일조건으로 연마한 것이다. 몰드 재료에 따라 형상오차가 달라지는 특성은 없었고, 비대칭의 난시 오차가 유사한 오차수준으로 보여진다. 최대오차는 9 μ m 이상이나 주로 가장자리에서 발생하여 렌즈 몰드로 사용하기에는 충분하다. 그러나 6 μ m 이하의 형상오차 분포가 좁은 영역에 걸쳐 있어 불안정한 모습이다.

한편, 본 연구를 위해 제작된 적응형 에어백 공구를 사용

Table 2 Form accuracy and shape characteristics

Classification		Form accuracy (Ra)	Shape characteristics
Commercial lapped mold		5.4 μ m	Astigmatic
Polished mold	Commercial method	5.6 μ m	Astigmatic + narrow range
	Airbag method	3.2 μ m	Axis-symmetric+ wide range

하여 연마된 표면의 형상오차 분포의 예는 Fig. 13과 같다.

형상오차는 일부 가장자리와 가운데 부분의 일부 래핑 잔류 스크래치를 제외하고는 거의 전 구간이 6 μ m 내의 오차 영역으로 되어 있다. 실험 결과를 table 2에 비교 정리하였다.

이와 같은 결과는 장시간의 에어백공구 연마가 수행되더라도 표면의 형상오차는 적정 오차 범위에서 형성될 뿐만 아니라 오히려 구면 변경에 대해서 스무싱(smoothing) 효과도 있어서 형상오차가 개선되었다. 이것은 상용화 몰드의 경우 래핑과 폴리싱이 동일한 연마공구를 사용하지 않기 때문에 폴리싱이 표면거칠기 개선 효과만 있고 형상측면에서 오히려 악화될 수도 있다고 추측된다.

4. 결론

본 논문에서는 적응형 에어백 공구와 편심운동 연마 장치를 제작하여 고정된 곡면의 연마공구가 아닌 에어백 공구로 안경몰드를 연마하는 방법에 대한 연구를 수행하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 연마운동 방식의 비교 결과 소형의 광학연마에 있어서 편심운동 기반의 연마 방식이 전 공정에서 제작된 형상의 훼손 없이 균일한 표면거칠기를 달성하는 방법으로 효과적이라고 판단하였고, PC 기반의 모션컨트롤러를 이용하여 편심운동연마 장치를 제작하였다.

- (2) 고정된 곡면 형상의 연마공구 아닌 다양한 곡면반경에 적응 가능한 에어백공구 연마를 개발하였다.
- (3) 래핑된 안경렌즈 몰드를 이용하여 에어백공구 연마 검증 실험을 수행하였다. 실험 결과, 표면거칠기는 안경광학에서 충분히 사용 가능한 Ra 1nm 수준을 확보하였다. 또한, 연마에 의한 형상정밀도 영향을 실험으로 측정한 결과 형상정밀도가 연마 이전에는 $5.4\mu\text{m}$ 에서 에어백 공구 연마 후에는 $3.2\mu\text{m}$ 으로 오히려 좋아졌고, 난시성분의 형상오차가 제거되어 회전 대칭성 또한 개선되었다.

후 기

본 연구는 한국학술진흥재단 지역대학우수과학자지원사업(KRF-2004-202-D00089)의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Karow, H. H., 2004, *Fabrication methods for precision optics*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 484-491.
- (2) Lee, H. C. and Yang, M. Y., 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) Jones, R. A., 1986, "Computer-controlled optical surfacing with orbital tool motion," *Optical Engineering*, Vol. 25, pp. 785-790.
- (4) Lee, H. C. and Yang, M. Y., 2001, "Dwell time algorithm for computer controlled polishing of small axis-symmetrical aspherical lens mold," *Optical Engineering*, Vol. 40, No. 9, pp. 1936-1943.
- (5) Lee, H. C., Song, C. and Lee, H. S., 2006, "Polishing kinematics comparison in the polishing processes to get high quality optical surfaces," *The 2nd International conference on positioning technology*, October 12-13, Jeju city, Korea, pp. 256-261.