

축대칭 렌즈 코어의 초정밀 보정가공에 관한 연구

강상도*, 김우순⁺, 장광호⁺⁺, 박순섭⁺⁺⁺, 김동현⁺

(논문접수일 2005. 1. 19, 심사완료일 2005. 2. 1)

A Study on the Ultra-precision Compensation Machining of Axisymmetric Lens Core

Kang, Sang-Do*, Kim, Woo-Soon⁺, Jang, Kwang-Ho⁺⁺, Park, Soon-Seob⁺⁺⁺, Kim, Dong-Hyun⁺

Abstract

Code V was used to make a plan for collimator lens with aspherical surface in the present study. The acquired optical design data were applied for ultra-precision machining. The optimum properties were determined to find ways to compensate the tool positioning error allowance during the ultra-precision machining. In ultra-precision aspheric machining, figure tolerance corrected by tool positioning error be improved by compensation cycle number.

Key Words : Aspheric(비구면), Ultra-precision machining(초정밀가공), Positioning error(위치결정오차), Compensation(보정)

1. 서론

고정밀도의 유리렌즈는 높은 형상정밀도의 금형을 제작하여 압축성형법으로 형상을 전사하는 레플리카(Re-plica)⁽¹⁾ 방법을 주로 사용하고 있다. 레플리카 방법에 사용되는 렌즈 금형 제작은 초정밀 가공기술의 발전으로 인해 초경합금과 같은 경취재료에 비구면 형상을 가공하는 것이 가능해졌다⁽²⁾. 특히, 최근에는 플라스틱 렌즈재료의 스크래치(Scratch)와 낮은 광 투과율에 의한 광확성능 저하의 단점을 보완하기 위하여 CD와 DVD등의 광 Pick-up 렌즈, LSU(Laser Scanning

Unit)의 시준렌즈(Collimator lens)등에서 구경이 작은 광학유리 렌즈를 사용하고 있다.

따라서 유리렌즈도 양산성이 요구되고 있으며 실제로 예비 성형 광학유리(Glass gob)를 질소분위기에서 600-700°C의 고온 고압으로 성형하는 유리렌즈 성형법(Glass molding press)을 이용하고 있다. 그로인해 유리렌즈도 플라스틱 렌즈와 마찬가지로 금형 코어의 초정밀가공이 핵심 기술로 요구되고 있다. 초정밀 가공에서 가공면의 형상 정밀도는 잔여 형상 오차에 의해 심각하게 영향을 받는다. 이러한 오차들은 연삭가공에서 생겨나는 공구 위치결정 오차

* 원광대학교 기계공학과
+ 원광대 기계공학부
++ (주)에이지광학
+++ 생산기술연구원
+ 교신저자, 원광대학교 기계자동차공학부 (ksdles@hanmail.net)
주소 : 507-749 전북 익산시 신용동 원광대학교

잔여 응력에 의한 것이다⁽³⁾. 잔여 응력으로부터 생겨난 오차들은 정삭 과정을 거치고 열처리를 거침으로써 최소화되거나 제거될 수도 있다⁽⁴⁾. 그러나 공구 위치결정 오차로부터의 잔여 형상 오차에 대한 보정의 경우 전통적인 시행착오 방법으로는 가공비용과 시간적으로 매우 소비적이고 만족스러운 결과들을 도출해낼 수 없었다. 본 연구에서는 설계된 유리재질의 콜리메이터렌즈 데이터를 초정밀 가공데이터로 사용하였고 초정밀 비구면 가공기계를 이용하여 공구 위치결정 오차로부터 생겨난 형상 오차를 보정하기 위해 체계적이고 신뢰할 수 있는 방법을 통하여 평가 제안하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 및 재료

Fig. 1은 본 연구에 사용된 초정밀가공기계이다. Toshiba사의 ULG100C(H³)로써 Grinder spindle을 사용하였고, X축과 Z축은 베드위에 직교되어 있고 Z축은 정압공기베어링 방식의 스피들이 슬라이드 되면서 공작물을 회전시키며 회전속도는 10-1,500min⁻¹범위내이다. Y축은 정압공기베어링 스피들 방식의 구동을 하며, 연삭공구를 회전속도로 5,000-40,000min⁻¹의 속도로 제어할 수 있다.

사용공구는 동경 Diamond에서 제작한 Tungsten bar grinder wheel을 사용하였다. 연삭숫들은 지름 7.712mm의 원추형 합성다이아몬드 휠이며, 입도1500, 결합제는 레진본드이다. 비구면형상 측정 장비로는 RTH사의 비구면 형상 측정기인 Form talysurf series2 PGI PLUS를 사용하였다. 절삭실험에 사용된 렌즈코어의 재료는 초경합금을 사용하였으며 Fuji Dies사에서 제작한 J05이다.

2.2 실험 방법

실험을 하기 전에 Grind spindle의 진원도를 동심원으로

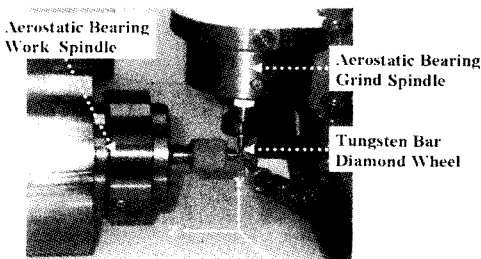


Fig. 1 Ultra-precision machine

확보하기 위하여 Balance를 0.05 μ m이하로 최소화하였다. 실제 실험은 다이아몬드 Dresser를 이용하여 28,000rpm에서 1 μ m의 연삭깊이로 Dressing하였다. 비구면 렌즈 코어를 가공하기 전에 코어 재료를 Jig에 부착시키고, Jig를 Vacuum chuck에 고정된 후 비구면 소프트웨어에 의하여 가공경로를 생성하여 비구면 형상을 1차 가공을 하였다. 1차 가공 후 비구면 형상측정기를 이용하여 형상을 측정하였고, 비구면 설계 데이터와 실제가공 형상 측정값의 오차량을 측정한다. 이때 얻은 오차량을 보정하여 피드백 데이터로 사용하였다. 피드백 데이터는 공구위치와 단위보정길이의 제입력으로 비구면형상을 보정하여 비구면을 창성하였으며 고정도 비구면 렌즈급형코어를 완성하였다.

3. 비구면의 생성 및 가공

비구면은 Fig. 2에서 보여 진 바와 같이 광축 Z위의 각기 다른 높이에서 구면과 비구면 사이의 차이로 나타내어진다. 구면의 만곡점에서 비구면 사이의 거리는 광축으로부터 각기 다른 거리에서의 표면인 Sagittal 또는 "Sag"로 표현한다.

회전대칭 비구면 렌즈의 가공서는 가공좌표를 X, Z 2축을 사용하여 가공경로를 따라 직선과 원호 보간을 한다. 본 논문에서는 가공경로 X, Z를 생성하기 위한 비구면 설계 변수 R, K, C, a, b, c, d값은 광학 설계 소프트웨어인 Code V 상에 설계된 콜리메이터렌즈 데이터를 이용하였다.

$$z = \frac{x^2}{R + \sqrt{R^2 - (K+1)x^2}} + \sum_{i=1}^{16} C x^i \quad (1)$$

식 (1)은 비구면 설계에 적용된 비구면 다항식이다. R은 구

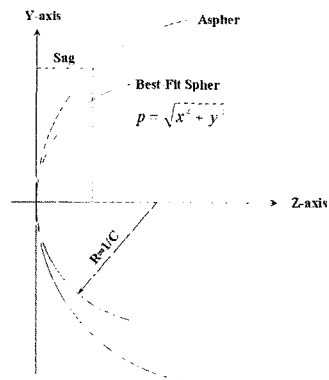


Fig. 2 Sag and aspheric

표면(Sphere Surface) 굴곡 반지름이고 $p = x^2 + y^2$ 인 $C = 1/R$ 이 광축 Z로부터의 거리라면, 원뿔 구면의 이심률에 대한 매개변수인 K는 원뿔 상수이고, C_1 의 짝수 값을 본 논문에서는 비구면 변형 상수인 비구면 계수로 가공 상에서 사용될 가공좌표를 생성하는 인자로서 활용한다. 비구면의 가공은 Code V에서 광학 설계된 데이터에 의해 가공데이터로 변환된 Sag 값을 이용하여 CNC에 의해 가공되었으며, Table 1은 가공데이터로 변환을 하기 위한 설계 정보를 나타낸다.

Table 1. Aspheric information

Information	Spheric	Aspheric
Aperture diameter	6.4mm	
Best-fit radius [R]	43.33720mm	6.50900mm
Conic constant [K]	-	-0.505164
Aspheric coefficient [A ₄]	-	0.107223E-02
Aspheric coefficient [A ₆]	-	0.214017E-04
Aspheric coefficient [A ₈]	-	0.249061E-06
Aspheric coefficient [A ₁₀]	-	0.116324E-08

4. 보정가공

축대칭비구면의 연삭에 있어서 원추형의 스톨을 사용하여 X, Z의 2축을 동시 제어 구동시키는 방법에 의해 비구면형상이 생성된다. 가공면의 좌표를 (X, Z) 가공 점의 경사각을 θ , 다이아몬드 휠 반경을 R이라 하면, 휠 원은 다이아몬드 R 바이트로 절삭하는 경우의 인선원에 상당하고, 중심좌표(X_c, Z_c)는 식 (2)와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} X_c &= X - R \cdot \sin \theta \\ Z_c &= Z - R \cdot (1 - \cos \theta) \end{aligned} \quad (2)$$

공작물의 가공오차($\Delta X, \Delta Z$)는 식 (3)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} \Delta X &= \Delta X_c + \Delta R \cdot \sin \theta \\ \Delta Z &= \Delta Z_c + \Delta R \cdot (1 - \cos \theta) \end{aligned} \quad (3)$$

따라서 휠이 고속 회전하므로 공구형상은 진원으로 취급하면 원호의 진원도 오차가 $\Delta R = 0$ 이므로, 식 (4)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta X &= \Delta X_c \\ \Delta Z &= \Delta Z_c \end{aligned} \quad (4)$$

즉, 공작물의 가공오차는 연삭 휠의 위치결정오차($\Delta X_c,$

ΔZ_c)에 크게 의존함을 알 수 있다⁽⁵⁾.

Fig. 3은 공구인선의 형상과 공구의 위치결정에 따른 오차발생 모델을 도식화 한 것이다. 초정밀 가공에서는 공구인선 형상이 그대로 공작물에 전사되는 원리를 이용하여 가공하는데, 공구인선의 형상이 완벽한 곡률 반경을 갖지 않았을 경우에는 가공 접촉점이 일치하지 않아 실제의 가공면은 가공형상오차가 발생한다.

본 연구에서는 위치결정 오차($\Delta X_c, \Delta Z_c$)를 최소화하기 위한 보정으로 공구에 의한 위치결정을 하고 보정사이클 (Compensation cycle)을 반복하여 사용함으로써 비구면의 형상정도를 개선시키고자 하였다. 초정밀 비구면 연삭기에서 공구 경로 생성 소프트웨어에 의해 발생된 CNC기계코드를 수정하기 위해 폼 테일러서프 시스템 (Form talysurf system)으로부터 형상 측정 데이터를 사용하여 비구면 보정 가공법과 일련의 연삭 실험에 의해 평가하였다. 공구는 공구위치결정 오차가 발생하는 경우에 이상적인 공구경로를 지나지 않고 오차발생량 만큼의 궤적을 그리게 된다. 이러한 이유로 실제 가공면의 형상은 오차가 그대로 전사하게 된다. 따라서 위치결정오차에 의해 생성된 형상은 공구의 위치결정 오차 방향에 따라 형상오차로 발생되며 그 형상은 측정프로파일 형태에 의해 구분될 수 있다.

Fig. 4와 Fig. 5는 위치오차에 따른 형상오차의 측정 프로파일 형태이다. 이로써 측정 프로파일의 각각의 형상에 의한 공구의 위치 결정오차 방향을 알 수 있으며, 그 방향량 만큼을 보정하여 설계 비구면과 가까운 면을 가공할 수 있다. 본 논문에서는 공구 위치결정오차에 의해 생겨난 잔여형상 오차를 보정 가공 방법을 사용함으로써 형상정도가 현저하게 감소될 수 있음을 고찰하고, 보정 사이클을 사용하면 더 좋은 결과⁽⁵⁾들이 얻어질 수 있음을 연구 고찰하였다.

Z, X-axis좌표로 생성된 비구면은 CAM소프트웨어에 의해 가공 프로그램화되고 이 프로그램을 사용하여 황삭 가공된

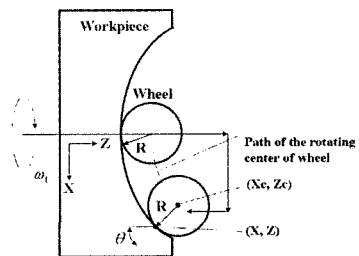


Fig. 3 Concept of tool's positioning error

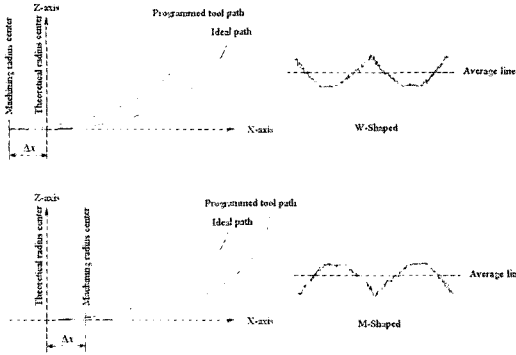


Fig. 4 Measured profile due to different types of position error(Concave)

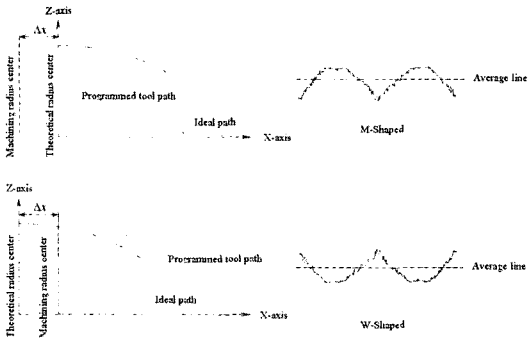


Fig. 5 Measured profile due to different types of position error(Convex)

공작물을 1차 정삭 가공한다. 가공된 표면은 Form talysurf system으로 측정된다.

측정된 데이터는 위치결정오차를 보정하기 위한 수정맵 플릿을 만들기 위해 사용된다. Fig. 6은 실험에 사용된 잔여 형상 오차보정처리 구성도를 나타내었다.

공구위치결정오차에 의한 보정가공은 비구면 형상 측정 기인 Form talysurf의 측정데이터를 기반으로 실시되므로 실험의 신뢰성을 확보하기 위하여 1/4의 캘리브레이션 마스터를 이용하여 캘리브레이션(Calibration)을 Rt 0.0885 μm로 실시하였다. Fig. 7은 Form talysurf의 캘리브레이션 데이터이다.

Fig. 8은 위치결정오차 보정가공 전 정삭 가공된 표면을 Form talysurf로 측정하한 형상데이터를 보여준다. 측정 프로파일 형상이 M형상 분포로써 다이아몬드 휠과 스프indle 중심과는 일치하지 않다는 것을 확인할 수 있으며, 이로 인한 형

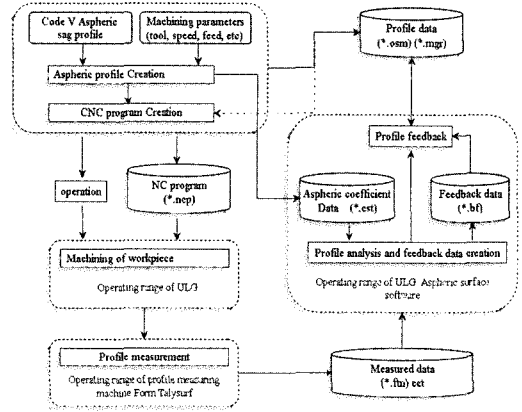


Fig. 6 Schematic diagram of ultra-precision machining and compensation process

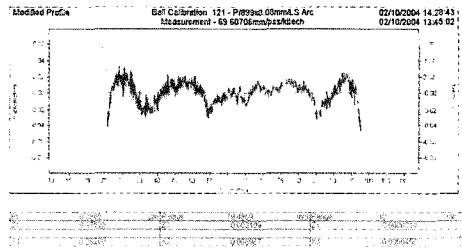
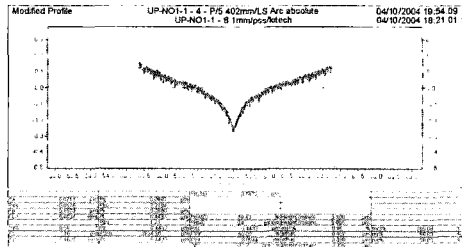
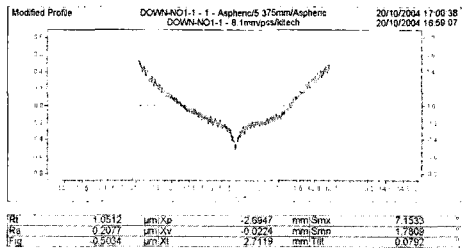


Fig. 7 Calibration data of form talysurf



(a) spherical surface (Concave)



(b) Aspheric surface (Concave)

Fig. 8 Measured data before compensation

상 잔여 오차가 구면은 Pt 0.4433 μ m, 비구면은 Rt 1.0512 μ m임을 알 수 있다.

위치결정오차에 의한 잔여형상 오차를 보정하기 위해서 Form talysurf에 의해 측정된 형상데이터는 ULG100(H³)의 비구면 생성기에 의해 보정 템플릿이 만들어지고, 발생된 형상 데이터는 가공 조건과 CNC 코드에 의해서 공구 경로 위치가 수정되어 위치 결정에 의한 보정가공이 이루어 졌다.

Fig. 9는 1차 보정가공 후 수정된 형상 데이터이며, 형상 오차 분포를 관찰하여 위치결정오차가 완전히 제거되지 않았음을 발견하였다. 보정된 잔여 형상 오차는 구면에서 Pt 0.3358 μ m, 비구면에서 Rt 0.3613 μ m까지 감소되었고 첫 번째 보정 사이클에서 형상오차가 구면 Pt 0.1075 μ m, 비구면 Rt 0.6899 μ m만큼 형상 오차가 감소하였다. 발견된 위치결정 오차는 보정 전 형상 데이터와 비교하고 위치결정에 의한 오차를 완전히 제거하기 위하여 보정 싸이클을 반복 사용하여야 한다. 이러한 보정가공 실험 결과는 초정밀 비구면 가공에서 공구의 위치결정 오차를 보정 가공함으로써 잔여 형상오차를 감소시키는 방법으로 효과적임을 알 수 있다.

초정밀 비구면 가공에서 공구의 위치결정오차는 보정 가공을 함으로써 효과적으로 잔여 형상오차를 보정할 수 있으므로, 반복적인 보정가공을 사용하면 더욱더 좋은 결과를

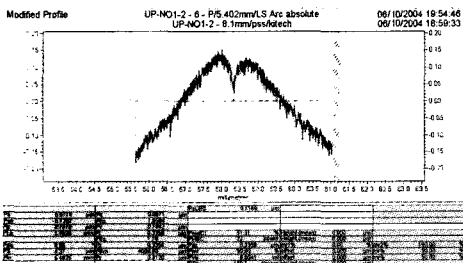
얻을 수 있을 것이다.

따라서 Fig. 10과 Fig. 11과 같이 반복적 보정 가공방법을 사용하여 위치결정에 의한 형상오차를 보정가공 하였다. Fig. 12는 반복적 보정 가공의 개략도를 나타낸다.

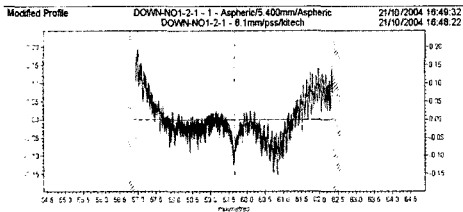
잔여 형상오차는 보정가공의 모든 사이클에 대해 실제로 감소되는 것이 관찰되어지므로 보정 싸이클에 대한 보정 효율로 나타낼 수 있다. Table 2는 보정 가공을 할 때 보정 싸이클에 대한 보정 효율을 나타내었다.

형상 보정은 최대 65%이상의 잔여 형상오차가 보정사이클에 의해 제거되었다. 하지만 형상오차가 약 0.1 μ m내로는 보정되지 않았고 위치결정에 의한 보정법의 수행이 제한되는 것을 알 수가 있었다. 또한 구면 코어의 가공에서는 위치결정에 의한 형상오차의 보정이 선형적으로 일정하게 보정되었고 형상오차가 약 0.1 μ m정도에서는 더 이상 좋은 결과가 형성되지 않았다.

비구면 가공에서는 1차 보정으로 형상정도를 65.63% 감소시켰으며 2, 3차 보정가공에서는 미소한 향상을 보였으며, 0.1889 μ m에서부터는 보정가공으로 인한 형상정도의 향상이 더 이상 효과를 발휘 할 수 없었다. 이유는 보정 전 정삭가공 시 다이아몬드 휠이 장착된 X축 정렬 과정에서 야기되는 위치결정오차(ΔX_c , ΔZ_c)에 의한 형상오차를 보정하

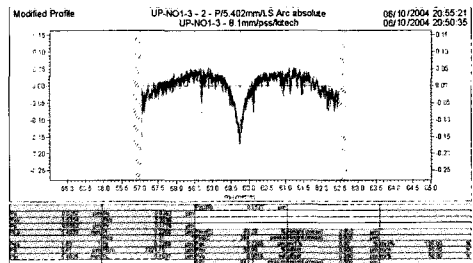


(a) Spheric surface (Concave)

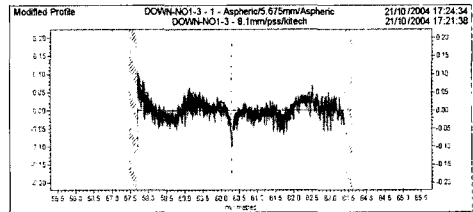


Rt	0.3613	μ m/2 σ	2.8721	mm/5 σ mx	6.5877
Ra	0.0457	μ m/2 σ	1.0581	mm/5 σ mn	1.7927
Pq	0.0025	μ m/2	2.7104	mm/1 σ	0.1045

(b) Aspheric surface (Concave)



(a) Spheric surface (Concave)

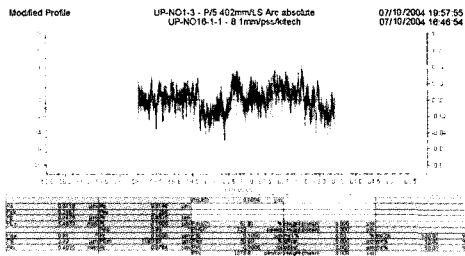


Rt	0.2317	μ m/2 σ	2.8018	mm/5 σ mx	7.2733
Ra	0.0213	μ m/2 σ	0.0298	mm/5 σ mn	1.8258
Pq	-0.0382	μ m/2	2.8018	mm/1 σ	0.1052

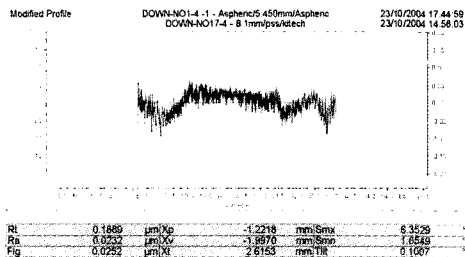
(b) Aspheric surface (Concave)

Fig. 9 Measured data 1st compensation

Fig. 10 Measured data 2nd compensation



(a) Spheric surface (Concave)



(b) Aspheric surface (Concave)

Fig. 11 Measured data 3rd compensation

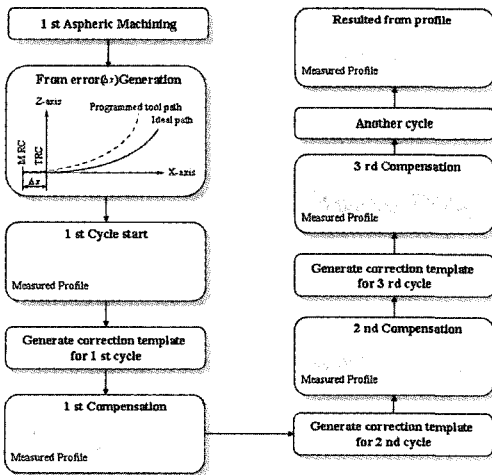


Fig. 12 Multi compensation cycle

였기 때문에 형상오차는 구면 $0.1\mu\text{m}$, 비구면 $0.2\mu\text{m}$ 이내로 보정되면 더 이상 형상오차가 향상되지 않는 것으로 판단된다. 실험적으로 $0.1 \sim 0.2\mu\text{m}$ 이하의 잔여 형상 오차는 스핀들 축과 공작물의 정렬불량과 형상의 측정에서 만곡점을 정확히 일치시키지 못해 야기되는 비체계적인 오차들로 인해 발생하는 것으로 판단된다. 이런 유형의 오차는 공구 경로

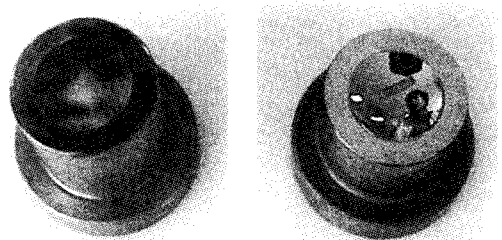
Table 2. Result of compensation cycle

Compensation cycle	From error (μm)		Efficiency(%)	
	Spheric surface	Aspheric surface	Spheric surface	Aspheric surface
Before compensation	0.4433	1.0512	24.25	65.63
1st compensation	0.3358	0.3613	32.46	35.88
2nd compensation	0.2268	0.2317	55.91	14.48
3rd compensation	0.1000	0.1889	-	-

보정에 의한 보정가공으로 제거될 수 없었다. 이로써 초정밀비구면 연삭 기계를 이용하여 초경합금을 보정 싸이클에 의해 비구면 가공한 결과 형상 정도 구면은 $0.100\mu\text{m}$, 비구면은 $0.1889\mu\text{m}$ 인 콜리메이터 렌즈 금형 코어를 가공하였다. Fig. 13은 보정가공에 의해 가공되어진 콜리메이터 렌즈 금형 코어의 실제 사진이다.

4. 결 론

- (1) 초정밀 비구면 연삭가공기계를 이용하는 가공에서 공구 위치결정오차($\Delta Xc, \Delta Zc$)에 의해 발생된 잔여 형상 오차는 보정가공 싸이클의 반복수행에 따라 형상오차를 구면 $0.1\mu\text{m}$, 비구면 $0.2\mu\text{m}$ 이내로 보정하였으며, 그 이상은 위치결정오차에 의한 보정 가공으로 형상정밀도가 향상되지 않았다.
- (2) 초정밀비구면 연삭 기계를 이용하여 초경합금을 보정 싸이클에 의해 비구면 가공한 결과 형상정밀도가 구면은 $0.100\mu\text{m}$, 비구면은 $0.1889\mu\text{m}$ 인 콜리메이터 렌즈 금형 코어를 가공하였다.



(a) Spheric core

(b) Aspheric core

Fig. 13 Photograph of Mold core

후 기

본 논문은 2002년도 원광대학교 교내연구비에 의해 연구 되었음.

참 고 문 헌

- (1) Visser, D., Grigsbers, T. G., and Jorna, R. A. M., 1985, "Molds and Measurements for Replicated Aspheric Lenses for Optical Recoding," *Applied Optics*, Vol. 24, pp. 1848~1852.
- (2) Kim, J. D., 1993, "Design and Ultra-precision Machining of Aspheric lens(2)," *KSPE*, Vol. 26, No. 5, pp. 36-41.
- (3) Lee, W. B., FCheung, C., Chiu, W. M., and Leung, T. P., 2000, "An investigation of residual from error compensation in the ultra-precision machining of aspheric surface," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 99, pp.129~134.
- (4) Kim, W. S., 2003, *A Study on the Aspheric Surface Machining of Optical Elements Using Ultra-Precision Diamond Turning*, Ph. D. Thesis, Wonkwang University.
- (5) Taniguchi, N., 1983, "Current Status in, and Future Trends of, Ultra-Precision Machining and Ultra-Fine Material Processing," *Annals of the CIRP*, Vol. 32, pp. 573~582.
- (6) Kim, W. S., Kim, D. H., and Namba, Y., 2002, "A Study of the Mirror Design and the Fabrication for an X-ray Microscope," *Proceedings of the KSMTE spring conference*, pp. 59~63.