

보정 프로그램을 이용한 Plastic 렌즈 Core의 보정에 관한 연구

우선희*, 이동주⁺

(논문접수일 2008. 5. 6, 심사완료일 2008. 6. 5)

A Study on the Improvement of the Shape Accuracy of Plastic Lens by Compensation Program

Sun-Hee, Woo*, Dong-Joo, Lee⁺

Abstract

In order to meet the optical performance in the process of the micro lens manufacturing with plastics, it is important to embody accuracy in shape and surface roughness to the intended design. Since it is difficult to machine exactly the mold core of lens fit to the designed shape, in this paper, a simple program using MATLAB is developed for shape correction of the mold core after first machining it. This program evaluates correction parameters(aspheric coefficients and curvature) and generates aspheric NC data for compensating the core surface in prior machining process. The program provides the way to manufacture plastic injection molding lens with aspheric shape of high precision, and is expected to be effective for correction and to shorten the processing time.

Key Words : Aspheric Surface(비구면), Compensation program(보정 프로그램), Injection Molding Lens(사출성형 렌즈), Shape accuracy(형상정도), Core Correction(코어 보정)

1. 서론

초정밀 플라스틱 비구면 사출성형 렌즈의 경우 광기록 저장매체 및 이미지 영상구현을 위한 광학소자로 주로 이용되고 있으며 이의 대량생산을 위해 비구면 렌즈 금형의 코어

생산기술과 측정기술은 고정밀도가 요구되는 초정밀가공 산업의 첨단기술로써 부각되고 있다⁽¹⁾. 비구면으로 구성된 광학계는 넓은 시야와 고해상력의 양질의 상(image)을 가능하게 하고, 또한 광학전장의 축소에 의한 소형화, 렌즈 매수 감소를 통한 경량화⁽²⁻⁴⁾ 등의 많은 장점을 가지고 있다. 이

* 한국항공우주연구원 통신해양기상위성사업단 탑재체팀 (HL3ZW@kari.re.kr)
주소: 305-333 대전광역시 유성구 어은동 45번지
⁺ 충남대학교 기계·기계설계·메카트로닉스 공학부

러한 비구면 소자를 얻기 위해서는 무엇보다도 렌즈 코어의 초정밀 NC 가공에 의한 비구면 형상 구현이 중요하다. 고정밀 광학제품에는 형상정밀도와 표면정밀도에서 현존하는 가공 중 최고의 수준 정밀도가 요구되며, 자유곡면의 비구면 형상을 포함하는 가공물의 표면형상 때문에, 가공 시 공구간섭 및 미세 형상보정⁽⁵⁻⁷⁾이라는 난제를 해결해야 한다.

또한 표면거칠기와 형상정밀도의 두 가지 조건을 만족시키는 것은 매우 어려운 일이다. 이를 위해 본 연구에서는 첫째, 가공조건에 따른 표면거칠기 변화를 관찰하였고, 공구의 이송속도(mm/min), 피삭재의 회전속도(rpm), 1회 절입량(μm) 등의 조건으로 실험하였다. 실험을 통해 산출된 최적조건을 토대로 비구면 형상의 보정가공^(8,9)을 실시하였다. 이는 CAD/CAM에 의해 가공된 비구면 형상을 보다 높은 정밀도의 형상으로 보상해 주는 가공으로써 형상정밀도가 목표치에 이를 때까지 반복하였다.

그러므로 본 연구에서는 보정프로그램을 이용해 마이크로 이하의 형상정밀도와 표면조도를 얻을 수 있는 비구면 형상보정에 관한 연구⁽¹⁰⁻¹²⁾에 목적이 있다. 이를 위해 비구면의 형상을 이해하고 초정밀선반의 특성을 파악하여 가공된 측정 데이터로부터 보정 프로그램을 제작하였으며 본 실험을 통해 2회의 NC 보정가공으로 마이크로 이하의 형상정밀도를 얻을 수 있었다.

2. 초정밀 가공 및 측정용 장치

본 연구에 사용된 초정밀 비구면 가공기는 동시 3축 제어에 의해 초정밀 광학 부품을 평면, 구면 및 비구면 형상을 가공할 수 있다.

광학설계에서 얻은 렌즈 설계 데이터를 이용하여 형상에 대한 공구좌표(NC code)로 변환 후 코어(core)를 가공한다. 가공품에 대한 측정평가 후, 형상오차가 $0.5\mu\text{m}$ 이하가 나올 때까지 가공 보정 후 가공을 완료한다.

가공기는 X, Y축과 Z축이 상호 직교되게 장착되어 있고 1mm의 분해능이 가능하다. Y축에는 공기 정압 연삭 휠 스피들이 장착되어 5000~40,000rpm으로 회전되고 공작물 스피들은 공기 정압 스피들에 의해 회전속도는 10~1,500rpm 범위 내에서 가공한다.

초정밀 비구면 가공기는 Fig. 1과 같이 도시바(Toshiba)사의 ULG-100C(H³) 초정밀 가공기계를 사용하였으며, 이의 사양은 Table 1과 같다.

비구면 가공품의 형상 및 표면 측정 장비로는 원자간력 프로브(AFP : Atomic Force Probe) 시스템을 사용하였다.

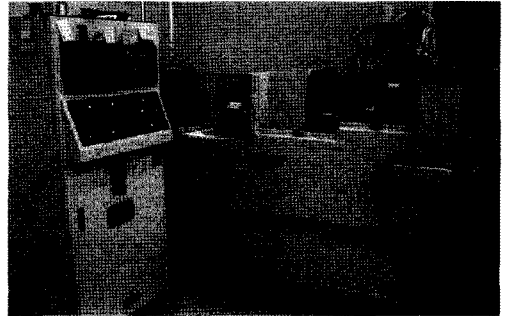


Fig. 1 Diamond turning machine(ULG-100C H³)

Table 1 Specification of ULG-100C(H³)

Description	Axis	Stroke	Specification	Resolution
Linear guide	X axis	300mm	450mm/min	0.000001mm
	Y axis	75mm	450mm/min	0.000001mm
	Z axis	150mm	450mm/min	0.000001mm
Work spindle	C axis	-	10~1,500min ⁻¹	0.0001deg
Grind Spindle	-	-	5,000~40,000min ⁻¹	-

측정면에 대하여 프로브(probe)를 원자간력이 작용하는 영역까지 근접을 시켜서 이 원자간력을 항상 일정하게 유지하면서 최대 60도까지의 경사면의 측정을 할 수가 있다. 원자간력은 극도로 미소하므로 측정면에 손상을 주지 않고 또 측정면의 경사각에도 좌우되지 않으므로 비교적 넓은 범위를 나노단위의 정밀도로 측정할 수가 있다.

Z축 이동대에 탑재되어 있는 AFP의 구조는 XY방향이고 강성을 가진 마이크로 슬라이드(micro slide)의 하단에 촉침(stylus)이 부착되어 있고, 이것은 마이크로 스프링(micro spring(판 spring))으로 지지되어 있다. 촉침과 측정면의 사이에 작용하는 측정 압력을 마이크로 스프링의 변위로 검출한다. 변위의 검출은 마이크로 슬라이드 상면에 부착되어 있는 거울(mirror(위치 검출 mirror))에 레이저(laser) 광을 반사시켜서 얻는다. 변위가 일정하게 되도록 Z축 이동대를 피드백(feedback) 제어하는 것으로 측정 압력이 항상 일정하게 되도록 하고 있다. 비구면 가공품의 형상 및 표면 측정 장비로는 Panasonic 사의 비구면형상측정기인 UA3P를 사

용하였다. Fig. 2는 비구면형상 측정기의 외관을 보여주고, Table 2는 이 측정기의 사양을 보여준다.

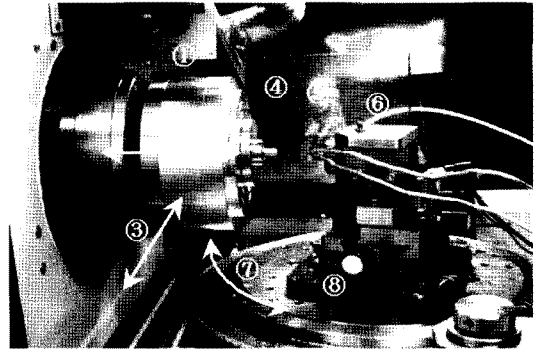
3. 초정밀가공 및 측정

비구면 렌즈의 성능은 크게 표면조도와 형상정도에 의해 광학적 특성이 좌우된다. 이를 위해 가공조건에 따른 표면조도의 변화를 통해 최적가공조건을 산출하여 산출된 조건을 바탕으로 형상보정에 들어간다. Fig. 3은 표면조도의 최적조건을 산출하기 위한 실험으로, 렌즈 사출용 비구면 코어(core) 가공을 위한 공구이송속도(feedrate, mm/min) 주축 회전속도(rpm), 1회 절입량(cutting depth, μm)의 조건별 표면 거칠기의 변화를 실험한다.

선삭가공에서 가공 주요인자인 공구이송속도의 조건변화에 따른 표면 거칠기를 실험하였다. 조건은 1mm/min에서 7mm/min의 범위에서 진행하였으며 Fig. 4에서와 같이 최적조건인 이송속도는 3mm/min 정도임을 알 수 있다.

주축 회전속도에 따른 표면 거칠기의 변화량을 알아보기 위해 주축의 회전속도를 300rpm에서 2100rpm까지 변화시켜가며 실험 한 결과 Fig. 5와 같이 900~1100rpm의 조건에서 표면조도가 낮은 값을 갖게 되었다. 또한 절입량의 변화에 따른 피삭재의 표면거칠기 변화량을 알아보기 위해 1회

절입량을 1~6 μm 으로 변화시켜 가며 실험 한 결과 Fig. 6과 같이 3 μm 의 가공 조건에서 표면거칠기 값이 낮게 나왔다. 그러나 다른 가공조건 변수들의 값에 비해 영향력은 적은 것으로 나타났다. 측정은 FTS(Form Taly Surface)를 이용하였으며, 10회 선삭가공을 진행해 최대값과 최소값을 제거



① Main spindle ② Z-axis ③ X-axis ④ workpiece ⑤ Tool ⑥ Tool holder ⑦ B-axis ⑧ B-axis turn table

Fig. 3 Precision lens core machining by diamond turning machine

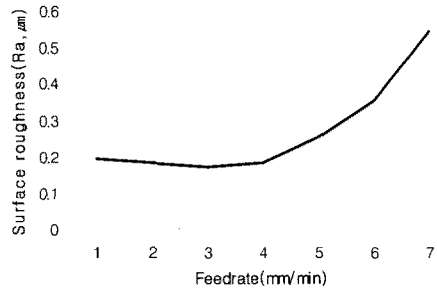


Fig. 4 Surface roughness for feedrate (Spindle speed : 1,000rpm, Cutting depth : 4 μm)

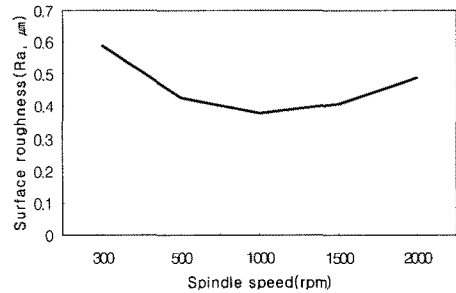


Fig. 5 Surface roughness for spindle speed (Feedrate : 5mm/min, Cutting depth : 4 μm)

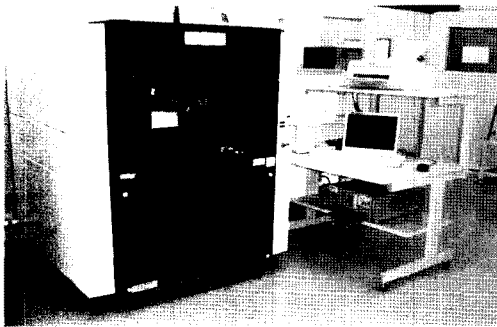


Fig. 2 Measurement system (AFP)

Table 2 Specification of AFP(UA3P)

Description	Specification	
Stroke(X, Y, Z)	200 X 200 X 45mm	
Probe	Measuring force : 0.3mN(30mgf)	
Resolution	0.000003mm(Z Axis)	
Stylus	Material	Diamond
	Curvature	0.00280mm

한 표면거칠기의 평균값(Z_a)을 산출하여 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

상기의 산출된 표면 거칠기 최적조건을 이용하여 비구면 형상을 보정하는 작업을 실시하였다.

4. 보정 가공 및 프로그램 개발

본 연구에 사용되는 렌즈의 형상정밀도는 $0.5\mu m$ 이하를 목표값으로 설정하였으며 1차 가공을 통하여 얻어진 렌즈의 형상을 보정하기 위해 AFP를 이용한 측정결과를 토대로 보정가공의 가공치를 부여 하였다.

형상의 각 위치마다 보상가중치를 부여하는데 있어서 측정결과를 작업자가 임의로 판단해서 가공치를 부여하기 어렵기 때문에 측정결과를 보정프로그램을 통하여 정확하고 신뢰성 있는 보상치를 부여할 수 있도록 기존의 형상보정 방법에 대한 문제점을 파악하고 비선형최소자승법(nonlinear least square method)을 사용하여 상용 S/W인 MATLAB 으로 작업자가 간단하며 쉽게 다룰 수 있는 프로그램을 작성하였다.

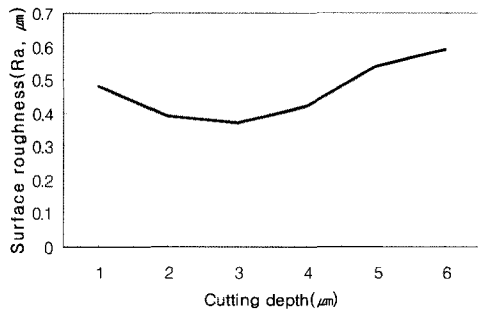


Fig. 6 Surface roughness for cutting depth (Feedrate : 5mm/min, Spindle speed : 1,000rpm)

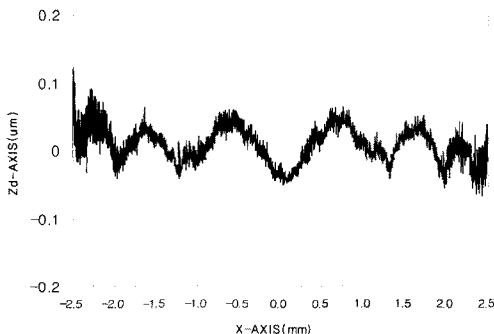


Fig. 7 Average measuring data of surface roughness

4.1 보정가공

최초 1차 가공에 의해 발생한 형상오차는 내향 또는 외향 축 이동에 의해 형상 보정을 하고 이에 의한 비구면 형상 해석은 Fig. 8과 같이 선형적인 곡선을 갖게 된다. 이와 같은 선형적인 비구면형상은 2차 보정가공을 원활히 진행할 수 있다. 즉, Fig. 8의 중심부 형상은 가공량을 감소시키며 외곽부의 형상은 가공량을 증가시켜 진행한다. 이를 통해 형상오차 값은 크게 감소되며 2차 보정을 2~3회 정도 반복하여 높은 형상정밀도를 얻을 수 있다. 광학설계에서 나온 비구면 수치 데이터를 이용하여 1차 코어(core) 설계에 동일한 계수값으로 공구좌표(NC-code)를 생성하고 비구면의 코어를 가공하게 된다. 1차 시 사출을 통해 얻어진 렌즈는 측정된 비구면 형상 값과 광학설계의 데이터를 비교하게 된다. 또한 사출 성형의 특성상 고온의 수지(Resin)가 응고될 때 사출물이 수축을 하게 된다. 이러한 수축에 의한 변형은 1차 측정 데이터에서 수축을 산출하고, 2차 가공 시 수축량을 고려하여 오버가공(over cutting)을 행한다. Fig. 9는 보정의 과정에 대한 흐름도를 보여준다⁽¹³⁾.

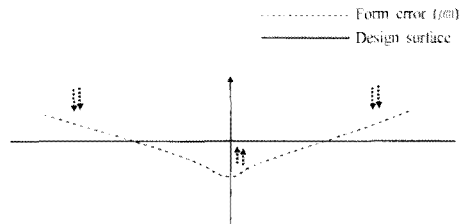


Fig. 8 Form error correction

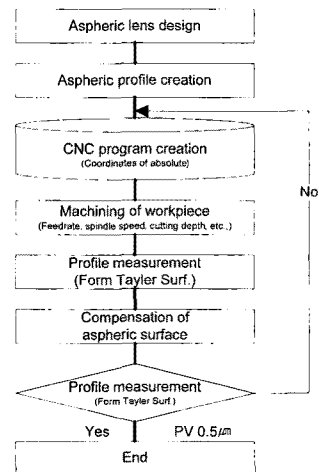


Fig. 9 Flow chart of the compensation for molding core

4.2 보정 프로그램

MATLAB 프로그램을 이용하여 보정 작업을 위한 데이터를 산출하는 프로그램을 개발하였다. 비구면 NC 프로그램을 작성하기 위한 프로그램으로써 비구면 식에 따라 적용되는 변수는 공작물의 직경과 곡률반경(R), 원추계수 K, 비구면 계수 A, B, C, ... 등의 계수가 기본 변수로 입력된다. 초정밀 가공기의 공구경로는 일반 선삭가공의 경로와 마찬가지로 X축의 이동에 따른 Z축의 상대변위로 결정된다. 따라서 X축에 대한 공구의 이송 간격을 X Interval로 설정하여 해당하는 구간에 대한 공구경로를 생성하였다. 또한 가공부의 경사를 예측하여 공구와의 간섭을 사전에 확인하여 가공을 실시하였으며 보정을 위하여 코닉 구간(conic section)과 비구면 구간(aspheric section)의 당초 설계치들을 측정치와 비교하여 근사 커브 피팅을 이용하여 산출하였다.

비구면의 형상은 Fig. 10에서와 같이 크게 코닉 구간과 비구면 구간의 조합으로 표현되어 진다. 비구면식에서의 곡률과 비구면 계수를 자체 제작한 프로그램(Fig. 11, 12, 13)을 이용하여 전체형상과 미세한 비구면 형상을 원 설계값에 최대한 근접하기 위한 새로운 곡률과 비구면 계수를 선정하여 최종적인 보정 데이터를 산출하였다. 따라서 최종 사출물의

측정값과 설계값과의 오차를 보정함에 있어 비구면 구간에서 보정좌표를 고려한 비구면 계수를 역 추적하고 곡률에 의한 코닉 구간에서 수축변형과 관련하여 원래 설계값에 가까운 형상을 얻기 위한 최적 곡률(R) 값을 선정하여 새로운 가공좌표를 산출하여 보정 가공을 실시하였다.

1) 비구면 구간(Aspheric section)의 보정

비구면식에서 비구면 구간에서의 비구면 계수를 자체 제작한 프로그램을 이용하여 역산출하여 새로운 좌표값을 생성하여 플로팅 해본 결과, 비구면 구간에서의 보정은 Fig. 11과 같이 비구면 형상에 미세하게 보정에 관여하였음을 알 수 있다. 그러나 전체적인 기본 곡률에 대한 오차는 크게 개선되지 않음을 알 수 있었다.

2) 코닉 구간(Conic section)의 보정

앞의 경우와 반대로 비구면식에서 비구면 구간을 제외하고 코닉 구간의 곡률(R)값을 자체 제작한 프로그램을 이용하여 역산출하여 새로운 좌표값을 생성하였으며, Fig. 12에서와 같이 기본적인 전체 형상은 개선이 되었으나 비구면 부분의 미세한 형상은 크게 개선되지 않았음을 알 수 있었다.

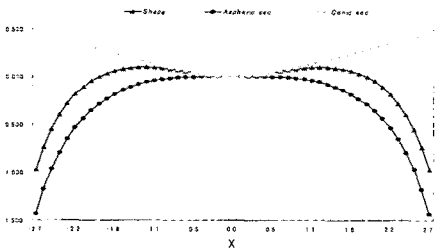


Fig. 10 Interaction effect between aspheric section and conic section

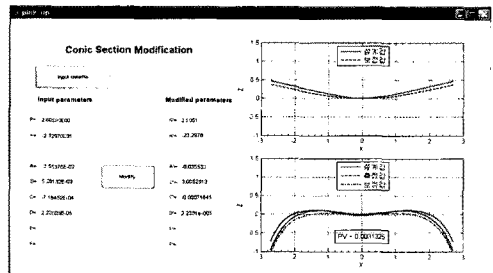


Fig. 12 Evaluation of parameters for at conic section by compensation program

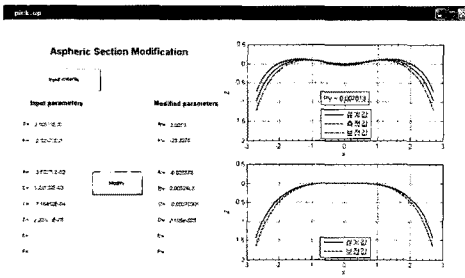


Fig. 11 Evaluation of parameters for at Aspheric section by compensation program

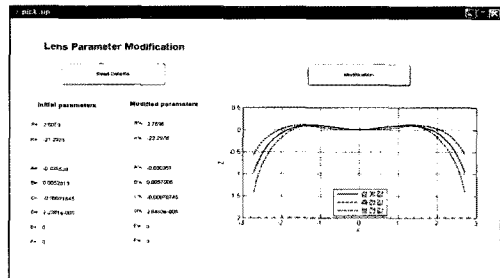
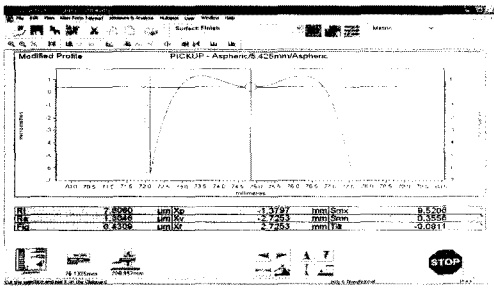
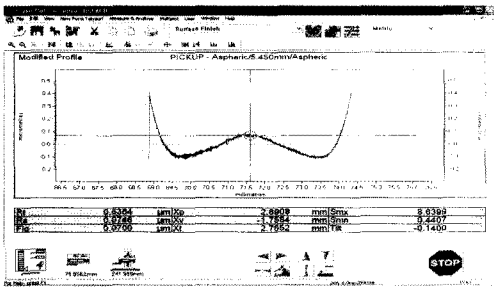


Fig. 13 Calculation of final compensation data by compensation program



P-V = 7.8060 (μm)

Fig. 14 Lens shape measuring data before compensation



P-V = 0.5364 (μm)

Fig. 15 Lens shape measuring data after compensation

3) 비구면 구간과 코닉 구간의 동시 보정

Fig. 13과 같이 상기의 두 경우를 종합하여 전체형상과 미세한 비구면 형상을 원 설계치에 최대한 근접하기 위한 새로운 곡률(R) 값과 비구면 계수를 선정하여 최종적인 보정 데이터를 산출하였다.

4.3 보정 가공 후의 측정결과

보정 프로그램을 통하여 얻어진 가공 데이터를 이용하여 보정 가공을 실시하여 본 결과, 보정 전의 형상정도는 Fig. 14에서와 같이 PV 7.8060μm이었으나 보정 프로그램에 의해 산출되어진 가공데이터를 이용하여 2차에 걸친 보정 가공을 실시 한 후의 렌즈의 형상 정도는 Fig. 15에서와 같이 PV 0.5364μm으로 크게 개선되어 졌음을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 비구면 광학렌즈를 제작하는데 있어 광학적 성능에 영향을 미치는 형상정밀도의 향상을 위해 요구되는 보정작업을 수행하였다. 비구면 구간의 비구면 계수와 코

닉 구간의 곡률(R)값을 역 추적하여 보정을 실시하였으며 보정가공을 실시하기 전에 먼저 표면조도를 최적화 시키는 가공조건을 선정하여 보정가공을 실시함으로써 공정의 단축과 신뢰도를 높이는 효과를 꾀할 수 있었다.

- (1) 비구면 가공 프로그램으로 초정밀 가공된 렌즈를 측정 후 측정데이터를 보정프로그램에 적용하여 재가공하였다. 이 때 비구면식의 비구면 구간(aspheric section)의 비구면 계수와 코닉 구간(conic section)의 곡률(R) 값을 역 추적하여 보정치를 산출한 후, 보정가공을 실행한 코어를 이용하여 제작되어진 비구면 렌즈의 형상측정 결과 보정가공 전 PV 7.8060μm에서 보정가공 후 PV 0.5364μm으로 형상정밀도가 향상되었음을 확인하였다.
- (2) 표면거칠기에 대한 최적 절삭 조건을 선정을 위해 이송 속도, 주축회전속도, 절입량등을 변화시켜가며 실시하여 보정가공의 공정을 단축하였다.
- (3) 사용자 환경에 맞는 형상보정공정을 시스템화 하는데 있어 보정 프로그램을 제작함으로써 초정밀 가공 후 얻어진 결과로부터 보정 공정을 연동시켜 실시한 결과 보다 높은 정밀도 향상과 공정단축을 꾀할 수 있었다.

참고 문헌

- (1) Ikawa, N., 1991, "Ultraprecision Metal Cutting The Past, the Present and Future," *Annals of the CIRP*, Vol. 40, No. 2, pp. 587~594.
- (2) Seong, C. H., Han, B. S., Kim, H. C., Kim, K. S., and Namgung, S., 1997, "A Study on the Turning System for Ultra-precision Machining," *Trans. of the KJIE*, Vol. 22, No. 2, pp. 116~124.
- (3) Warren J. Smith, 2001, *Modern Optical Engineering*, 3rd, McGraw-Hill, New York.
- (4) Rim, C. S., and Jo, J. H., 2001, "Design and Evaluation for the Ultra-Compact Camera Lens," *J. Sci. Res. Inst. Han Nam Univ.*, Vol. 31, pp. 85~97.
- (5) William, M., Elaine, C., Russell, F., and Peter, S., "Practical Ray Tracing of Trimmed NURBS Surface," Computer Science Department, 1999.
- (6) Park, J. S., Kim, D. S., Lee, J. S., Jung, Y. H., Jun, C. S., Lee, T. K., Lee, H. G., and Ryee, K. T., 2001, "Development of a Dedicated CAD/CAM System for Aspheric Lens (II) : Module for Surface Fairing

- and CAM,” *Proceeding of KORMA & KIIE spring conference*, pp. 473~476.
- (7) Parkinson, D. B. and Moreton, D. N., 1991, “Optimal biarc-curve fitting,” *Computer Aided Design*, Vol. 23, No. 6, pp. 411~419.
- (8) Kang, S. D., Kim, W. S., Jang, K. H., and Kim, D. H., 2004, “A Study on the Compensation of Ultra-precision Aspheric Lens Mold,” *Proceeding of KSPE spring conference*, pp. 237~238.
- (9) Kang, S. D., 2005, “A Study on the Aspheric Design and Ultra-precision Compensation Machining of Optical Pick-up Mold Core,” Master Dissertation, Wonkwang Univ., Republic of KOREA.
- (10) Park, Y. C., Yang, S. C., Kim, G. H., and Lee, Y. H., 2005, “The Performance Improvement of The Aspheric Form Accuracy by Compensation Machining Program,” *Journal of KSMPE*, Vol. 4, No. 2, pp. 10~15.
- (11) Lee, S. J. and Hyun, D. H., 2007, “A Study on Influence of Parameter and Characteristics in the Injection Process on the Birefringence and Refractive Index for Pickup lens,” *Trans. of KSMTE*, Vol. 16, No. 6, pp. 21~28.
- (12) Eugene, H., 2002, *Optics*, Addison Wesley, New York.
- (13) Woo, S. H. and Lee, D. J., 2007, “A Study on Key Parameters and Characteristics in the Manufacturing Process of the Dual Pickup Objective Lens,” *Trans. of KSMTE*, Vol. 16, No. 3, pp. 117~124.