

## 보정 가공 프로그램을 활용한 비구면 형상정밀도 향상에 관한 연구

박요창<sup>#</sup>, 양순철\*, 김건희\*, 이영호\*\*

### The Performance Improvement of the Aspheric Form Accuracy by Compensation Machining Program

Yo-Chang Park<sup>#</sup>, Sun-Choel Yang\*, Geon-Hee Kim\*, Young-Ho Lee\*\*

#### ABSTRACT

For the development of compensation machining program, ultra precision grinding used in ultra precision machine and corrective machining was studied. We explored a new rough grinding technique on optical material such as zerodur. The facility used is a polishing machine with a custom grinding module and a range of diamond resin bond wheel. Surface roughness and form accuracy are measured by surface measurement equipment(Form Talysurf series2). Our compensation machining program has complied with a target of producing surface roughness better than  $0.05\mu\text{m}$  Ra and form accuracy of around  $0.5\mu\text{m}$  Rt and has been unveiled as a work-hour model.

**Key Words** : Compensation Machining Program(보정 가공 프로그램), Ultra Precision Grinding(초정밀 연삭), Optical Material(광학재료), Surface Roughness(표면거칠기)

#### 1. 서 론

21세기 들어서 BT, IT, NT, ST 관련 첨단산업이 우리나라의 미래를 선도할 산업으로 새롭게 부각되고 있는데, 이들 산업의 핵심 부품 가공에도 다이아몬드 선반을 이용한 초정밀 가공 기술은 계속해서 더 많이 활용될 뿐만 아니라 현재보다 한 단계 더 높은 가공 정도 즉 마이크로 이하 나노 단위의 초정밀가공기술

이 요구될 것이다. 따라서 우리나라의 초정밀 가공 기술 분야에서 국가적인 기술요구에 부응하고 선진국에 대한 기술경쟁력을 확보하기 위해서는 초정밀 가공의 기초 기술에 대한 보다 많은 연구가 요구되고, 최근에는 국내에서도 많은 연구가 행하여지고 있다<sup>1-5)</sup>. 특히 과학위성용 비구면 반사경, 카메라의 휴대폰, 디지털 카메라 등 광학부품의 시장이 활발하게 움직이고 있다. 이러한 광학부품들은 고화질의 사양이 요구되고 있어, 평면, 구면, 비구면 렌즈나 렌즈 금형 제작의 최종 공정으로 고정밀도의 폴리싱 과정을 필요불가결하게 되었다. 폴리싱이란, 기본적으로 폴리싱용 툴을 연마제와 동

# 교신저자 : 충남대학교 대학원 기계공학과

E-mail : byc2816@hanmail.net

\* 한국기초과학지원연구원 초정밀 가공팀

\*\* 충남대학교 기계공학과

시에 가공물에 가압하여, 회전 또는 요동을 가하여 연마한 방법으로서, 최근 컴퓨터의 급속한 발달과 더불어 평면, 구면, 비구면의 연마기술을 완전자동화한 컴퓨터 제어가 가능한 장치 등이 등장하는 등 활발한 연구가 이루어지고 있다<sup>6-10)</sup>. 그러나 아직까지도 사용자의 경험과 노하우에 상당부분 의존하고 있고, 사용자 환경에 맞는 폴리싱 공정의 DB화를 구축하는 등의 많은 해결해야하는 과제들이 남아 있는 실정이다. 이러한 상황 하에서 본 논문은 사용자 환경에 맞는 폴리싱 공정의 DB화를 구축하는 하나의 과정으로서 초정밀 연삭 후 얻어진 결과로부터 폴리싱 공정을 연동시켜 가공물의 보다 높은 정밀도와 공정 시간의 단축을 위하여 보정프로그램을 개발하는 것을 목적으로 한다.

## 2. 초정밀 가공 및 측정 장치

본 연구의 연삭가공에 있어서는 나노미터급의 형상정밀도를 갖는 초정밀 제품을 가공하기 위해 이송 테이블의 운동정밀도가  $0.2\mu\text{m}/300\text{mm}$ 를 갖고 있는 영국 테일러 홉슨의 계열사인 미국 프리시텍사에서 개발한 초정밀 비구면 가공기인 Nanoform 600을 사용하였다. Fig. 1은 Nano form 600 diamond turning machine의 사진을 나타낸다. 그리고 Table 1은 Nano form 600의 사양을 나타내고 있다.

폴리싱 가공에 있어서는 폴리싱 기술을 컴퓨터 소프트웨어에 탑재시킨 장치로, 평면, 구면, 비구면의 폴리싱을 자동화로 할 수 있고, 가공하중을 제어, 추종 경사제어, 체제 시간 제어를 작업자가 제어 할 수 있는 장점을 가지고 있는 KURODA KRP-2200F를 사용하였다. Fig. 2은 micro head와 2축 tilt table을 사용하여 가공하고 있는 사진을 나타내고 있으며, Table 2는 사양을 나타내고 있다.

측정 장치로서는 팁이 측정하고자 하는 대상물의 표면을 직접 접촉한 상태에서 선형으로 이동하면서 측정된 값을 컴퓨터로 전송하는 장치인 Rank Taylor hobson 사의 Form Talysurf Series 2를 사용하였다. Fig. 3과 Table 3은 각각 Form Talysurf Series 2의 전경과 사양을 나타내고 있다.



Fig. 1 Nanoform 600 diamond turning machine

Table 1 Specification of Nanoform 600

Control system		IBH macro series CNC with DOS compatible operator interface
Position feedback system		Zygo axiom 2/20 differential plane mirror interferometer with refractometer
Feedback system resolution		1.25nm
Slideways (X&Z axes)	Design	Hydrostatic oil bearings
	Travel (X)	300mm
	Travel (Z)	300mm
Work spindle	Design	A thermalized air bearing
	Speed range	100 to 3000 rpm
	Swing capacity (diameter)	600mm
	Runout (axial & radial)	$\leq 0.05\mu\text{m}$
Utilities	Electrical power	230 V / 1Ø / 6 kVA / 50/60Hz
	Air supply	10 bar / 4.7 l/s/ clean & dry
	Required floor space	3250mmW×3325mmD [w/temp. control 4575W]



Fig. 2 KURODA KRP-2200F

Table 2 Specification of KURODA KRP-2200F

Table diameter		300mm
Max workpiece size(D×H)		400 × 200mm
Table revolution speed		0.5 ~ 6 rpm
Longitudinal feed of table (X-axis)	stroke	400mm
	feed rate	0.1 ~3 m/min
	least input increment	0.001mm(resolution)
Cross feed of table (Y-axis)	stroke	300mm
	feed rate	0.1 ~3 m/min
	least input increment	0.001mm(resolution)
Vertical stroke of head (Z-axis)		100mm



Fig. 3 Form Talysurf Series 2

Table 3 Specification of Form Talysurf Series 2

Horizontal performance	Traverse length X Max/Min	120mm/0.1mm
	Straightness uncertainty (Pt)	0.5 $\mu$ m/100mm range
Vertical Performance	Normal measuring range (Z)	10mm
	Resolution(Z)	12.8nm/10mm range
System Performance	Calibration uncertainty (Pt)	0.2 $\mu$ m
	System noise(Rq)	8nm
Standard stylus (radius)		2 $\mu$ m

### 3. 초정밀 연삭 가공 및 측정

#### 3.1 초정밀 연삭 가공

제품은 직경 30mm인 Zerodur이며 연삭 휠 스톱입자가 #300인 연삭 휠로 연삭깊이 10 $\mu$ m, 이송속도 15mm/min으로 황삭 가공을 하였으며, 휠 스톱입자가 #2000 연삭 휠로 연삭깊이 0.2 $\mu$ m, 이송속도 2mm/min으로 정삭가공을 하였다. 연삭과정에 증류수와 냉각수를 혼합한 연마액을 공급해 줌으로써 연삭시 일어나는 열 변형을 최소화할 수 있고 칩 배출을 원활하게 시킬 수 있었다. 또한 실험에 사용한 휠은 메탈소재 휠로써 휠의 마모가 적어서 드레싱 작업의 횟수를 줄일 수 있었다. Fig. 4는 Nano form 600에서 초정밀 연삭하는 사진을 보여준다.

#### 3.2 측정결과

초정밀 연삭공정을 거친 후 Form Talysurf Series 2를 이용하여 공작물의 표면을 측정 하였고, 측정 방법으로는 먼저 측정기의 stylus가 공작물의 중심부에 정확히 올 수 있도록 하며 8번의 반복측정을 거쳐서 평균값이 나오는 측정결과를 최종 결과값 으로 사용 하였다. Fig. 5는 Form Talysurf Series 2를 이용한 결과값으로 Rt 1.4645 $\mu$ m, Ra 0.0910 $\mu$ m 이다.



Fig. 4 Grinding for ultra-precision aspheric surface

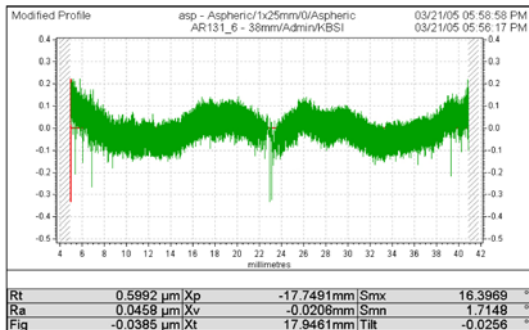


Fig. 5 Measurement Profile of After compensation grinding

## 4. 비구면 가공 프로그램 개발

### 4.1 보정 가공 프로그램

본 연구에 사용되는 렌즈의 형상정밀도 Rt 0.5 $\mu\text{m}$ 를 얻기 위하여 폴리싱 공정을 거치게 되는데 렌즈 형상 보정을 하기 위하여 Form Talysurf Series2를 이용한 측정결과를 토대로 폴리싱 보상치를 부여하였다. 이 과정에서 형상의 각위치마다 보상가중치를 부여하게 되는데 측정결과를 작업자가 임의로 판단해서 가중치를 부여하기 어렵기 때문에 측정결과를 보정프로그램을 통하여 정확한 보상값을 부여 할 수 있도록 프로그램을 개발하였다. 일반적으로 작업자가 간단히 그리고 쉽게 다룰 수 있는 프로그램인 MATLAB을 사용하여 수행하였다.

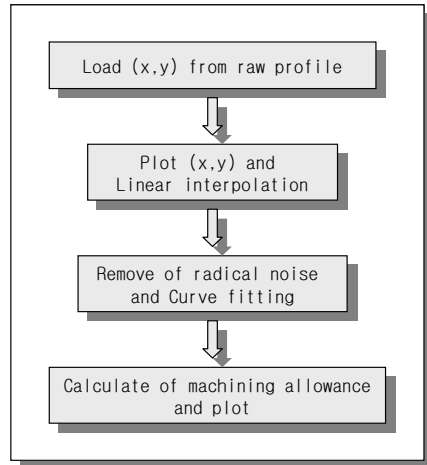


Fig. 6 Flow chart for compensation program

Fig. 6은 보정 프로그램 개발을 위한 일련의 과정을 플로우 차트를 통하여 설명하고 있다. 이제 보정가공 프로그램의 개발 순서에 대하여 설명하기로 한다.

첫째, Form Talysurf Series 2를 이용하여 측정한 결과로서, Fig. 5에서 나타낸 것과 같이 데이터 수(x축 간격)와 y축의 측정결과가 기술되어 있는 PRF (raw profile)화일이 생성되고, 이 PRF화일에서 수치데이터만을 읽어 들인다.

둘째, 읽어 들인 수치데이터를 플롯하고, 측정시 선형적으로 변화되는 일정 기울기에 대한 보정을 위해서 선형보간(linear interpolation)을 한다.

셋째, 급격한 노이즈가 보정 가공시 큰 형상오차를 발생시킬 수 있으므로 급격한 노이즈를 제거하고, 불규칙한 데이터로부터 일정한 가공오차를 수식으로서 얻기 위하여 커브피팅(curve fitting)을 한다.

넷째, x축을 일정한 간격으로 분할하고, 분할한 x축에 대한 각각의 y축 값, 즉 취대량(machining allowance)을 도출한다.

본 프로그램에서는 보다 정밀한 보상치를 부여하고 가공 시간의 단축을 위하여 폴리싱 마이크로 헤드 가 공작물의 중심축 이동방향(x방향)으로 0.1, 0.5, 1.0 mm 단위로 선택하여 분할가능 하도록 설계 하였다. 또한, 보정량을 나타내는 y축은 1~400%로 설정 가능하게 하였다. 즉, 가공보정을 하지 않을 때를 취대량(machining allowance)을 100%로 하고, 100%보다 작은 값은 취대량이 작아지고, 100%로 보다 큰 값은 취

대량이 커진다.

Fig. 7은 Form Talysurf Series 2에 의해 측정된 결과로부터 측정시작점과 끝점사이의 데이터수와 이에 따른 y축 값이 생성되는데, 이를 읽어 들여 잘못하고 측정시 가공물의 tilting에 의해 선형적으로 변화하는 일정 기울기에 대하여 선형보간을 하고, 급격한 노이즈가 보정 가공시 큰 형상오차를 발생시킬 수 있으므로 급격한 노이즈를 제거하고 커브피팅한 상태를 나타내고 있다.

Fig. 8은 대칭가공이 가능하므로 대칭면의 왼쪽부분만을 취하여 x축을 0.5mm 단위(22개로 분할)로 분할하고 각각의 지점에 대한 취대량(%)을 나타내고 있다.

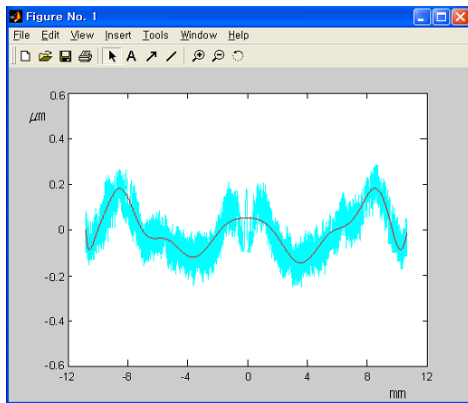


Fig. 7 Smooth data for measurement of  $\phi 22$  Zerodur aspheric lens

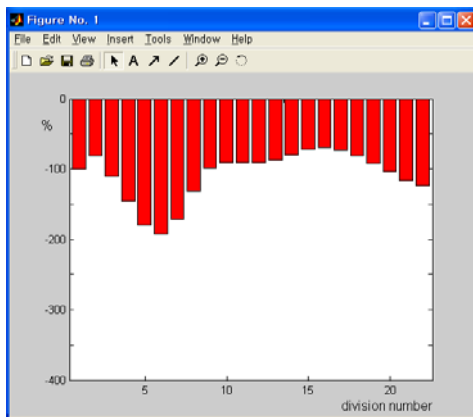


Fig. 8 Compensation program for polishing

### 3.3 보정 가공후의 측정결과

보정 프로그램을 통하여 얻어진 데이터(Fig. 8)를 Fig. 9와 같이 폴리싱머신(KRP-2200F)에 대입하여 가공하였다. 이때 폴리셔 헤드에 사용된 패드는 Ce패드를 사용하였으며 연마재로는 CeO<sub>2</sub>를 사용하였고 헤드 압력은 0.7zkgf/cm<sup>2</sup> 이었다. 이렇게 보정프로그램을 이용하여 가공한 후 측정된 결과는 Fig. 10과 같다. 최종 공정을 거친 후 요구정밀도 Rt 0.5 $\mu$ m 이하인 Ra 0.0448 $\mu$ m, Rt 0.4123 $\mu$ m를 얻을 수 있었다. 초정밀 가공기로 보정가공을 한 결과 Ra 0.0910 $\mu$ m, Rt 1.4645 $\mu$ m 보다도 가공정밀도가 현저히 높아 졌다는 것을 알 수 있다.

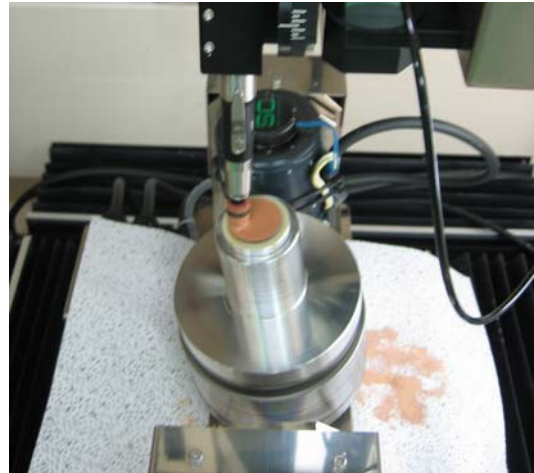


Fig. 9 polishing of aspheric lens

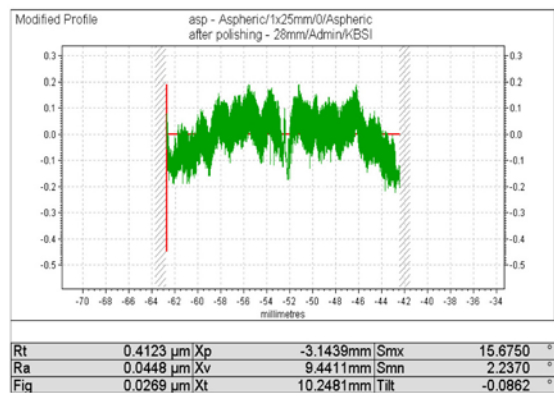


Fig. 10 Measurement profile of After Polishing

## 4. 결 론

본 연구에서 사용자 환경에 맞는 폴리싱 공정의 DB화를 구축하는 하나의 과정으로서 초정밀 연삭 후 얻어진 결과로부터 폴리싱 공정을 연동시켜 가공을 연구 수행한 결과는 다음과 같다.

1. nanoform 600을 이용하여 #2000 연삭휠로 연삭한 결과 Ra 0.0910 $\mu\text{m}$ , Rt 1.4645 $\mu\text{m}$ 를 얻을 수 있었고, 폴리싱 보정 공정 후 결과 Ra 0.0448 $\mu\text{m}$ , Rt 0.4123 $\mu\text{m}$ 로 가공정밀도가 현저히 높아 졌다는 것을 알 수 있었다.
2. 사용자 환경에 맞는 폴리싱 공정의 DB화를 구축 하는데 있어서, 초정밀 연삭 후 얻어진 결과로부터 폴리싱 공정을 연동시켜 가공한 결과 보다 높은 정밀도와 공정 시간의 단축 경제적 능력을 향상시켰다.

따라서, 위에서 언급한 실험적 결과로부터 본 보정 프로그램의 타당성을 확인하였다.

## 참고문헌

1. 김정두, "천연 다이아몬드 인선형태에 의한 AI 합금의 경면질삭에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제14권, 제6호, pp. 1515-1522, 1990.
2. 이경호, 윤영식, 이상조, "다결정 다이아몬드 공구를 사용한 Al-Si합금의 선삭과정에서 질삭특성에 미치는 Si함량의 영향," 한국정밀공학학회지, 제12권, 제6호, pp. 20-26, 1995.
3. 이재경, 이응숙, 제태진, 심충진, 종동우, 고태조, "초정밀경면 질삭 가공 기술 개발," 과학기술처 최종보고서, 1992.
4. 성기형, 한복수, 김형철, 김기수, 남궁석, "초정밀 선삭 가공 시스템에 관한 연구," 대한공업교육학회지, Vol. 2, pp. 116-124, 1997.
5. 김건희, 박요창, "Zerodur의 초정밀 연삭 특성에 관한 연구," 한국기계가공학회지, Vol. 4, No. 1, pp. 13-17, 2005.
6. West, C. S., Martin, H. M., Nagel, R. H., Young,

- R. S., Davison, W. B., Trebisky, T. J., Derigne, S. T. and Hille, B. B., "Practical design and performance of the stressed-lap polishing tool," Applied Optics, Vol. 33, pp. 8094-8100, 1994.
7. Walker, D. D., Brooks, D., Freeman, R., King, A., McCavana, G., Morton, R., Riley, D. and Simms, J., "The first aspheric form and texture results from a production machine embodying the Precession process," proc. SPIE, San Diego, Vol. 4451, pp. 267-276, 2001.
8. Walker, D., Freeman, R., McCavana, G., Morton, R., Riley, D., Simms, J., Brooks, D., Kim E. and King, A., "Zeeko/UCL process for polishing large lenses and prisms," Proc. SPIE, Vol. 4411, pp. 106-111, 2002.
9. Walker, D. D., Beaucamp, A. T., Bingham, H. R. G., Brooks, D., Freeman, R., Kim, S. W., King, A., McCavana, G., Morton, R., Riley, D. and Simms, J., "The Precessions process for efficient production of aspheric optics for large telescopes and their instrumentation," Proc. SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation Meeting, Hawaii, Vol. 4842, pp. 73-84, 2002.
10. 박병규, 김성청, 문홍현, 이찬호, 강연식, "혼 해석을 통한 초음파 폴리싱 시스템의 개발 및 연마특성," 한국공작기계학회논문집, Vol. 13, pp. 53-60, 2004.