

# 비구면 Glass Rod 렌즈 금형의 초정밀 연삭가공

김우순\*, 김동현<sup>†</sup>

(논문접수일 2008. 9. 26, 심사완료일 2009. 1. 2)

## Ultra-precision Grinding Machining of Glass Rod Lens Core With Aspheric

Woo-Soon Kim\*, Dong-Hyun Kim<sup>†</sup>

### Abstract

To obtain the surface roughness with nano order, we need a ultra-precision machine, cutting condition, and materials. In this paper, the cutting condition for getting nano order smooth surface of core have been examined experimentally by the ultra-precision machine and diamond wheels. The effects of the cutting velocity, the feed rate and depth of cut on the surface roughness were studied. And also, the surface roughness was measured by the Form Talysurf series PGI 840. The champion data of developed core was surface roughness Rmax 24.6nm, figure accuracy Rmax 68.9nm.

**Key Words :** Ultra-precision machining(초정밀 가공), Surface roughness(표면거칠기), Figure accuracy(형상정밀도), Core(코어)

## 1. 서 론

최근 정보화 시대에 초고속, 대용량 전송 등의 수요를 충족시키기 위한 광통신 분야의 시스템에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 광통신 시스템이 갖는 고속 및 광대역성을 유효하게 이용하기 위하여 전송성능을 증가시키는 연구와 더불어 고속, 광대역 광통신 시스템을 구축하는데 매우 중요한 광통신용 렌즈에 대한 연구가 필요하다.

광통신용렌즈는 광통신 시스템에 사용되는 중요한 부품으로 집광 및 발산의 결상기능을 하고 광섬유의 효율을 극대화 시켜 손실을 최소화하는 기능을 하며 수요에 맞는 다양한 렌

즈들이 사용되고 있으나 광통신용 렌즈의 제조와 생산 기술은 일본 등 해외업체에 의존하고 있는 실정이다.

초정밀 비구면 글라스렌즈 생산기술은 광통신부품, 광기록매체, 화상통신기기, 디지털카메라, 폰 카메라 등 초정밀 광응용분야에 활용도가 더욱 커질 것으로 예측된다. 실제 현장에서 광통신 시스템은 부품의 소형화, 저가격화, 고 초점율화, 단일 렌즈화하는 기술 개발을 하고 있어 이러한 경향에 따라 초정밀 비구면 렌즈의 중요성은 더욱 커지고 있다.

초정밀 비구면 렌즈 콜리메이터는 SMF와 초소형 비구면 렌즈를 결합하여 기존의 콜리메이터와의 높은 호환성을 가능케 하고 더 먼 작업 거리를 가지게 된다. 또한, 자동조립

\* 원광대학교 기계자동차공학부

+ 교신저자, 원광대학교 기계자동차공학부 (kdhbhk@wonkwang.ac.kr)

주소 : 570-749 익산시 신용동 344-2

과정동안 두 부품사이에 직접적인 접촉이 없고 광 결합을 위한 정렬 시간을 단축시킬 수 있고 단순 제조 과정이 요구되는 구조에서는 커플링의 재현성 및 대량 생산이 용이하다.

초정밀 비구면 렌즈는 초정밀 가공<sup>(1,2)</sup>으로 제작된 금형을 이용하여 성형함으로서 생산되므로 금형을 매우 정밀하게 가공하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다.

렌즈의 형상정밀도와 표면 거칠기를 나노 오더로 가공하여 오차에 따른 손실을 최소화하기 위해 필요한 초정밀 금형 가공은 WC-Co 소재를 비구면 형상으로 가공하기 때문에 곡면 연마가 어렵고 많은 시간이 소요된다<sup>(3)</sup>.

따라서, 본 연구에서는 광통신용 콜리메이터에 사용될 글래스 로드 렌즈를 설계하고 글래스 로드 형상의 렌즈를 생산하는데 있어서 매우 중요한 글래스 로드 렌즈용 금형을 초정밀 가공하여 최적의 가공조건을 제안제시하였고 연구를 통해 얻어진 데이터를 산업체에서 활용함으로써 광 부품 성능 향상에 기여하고자 한다.

## 2. Glass Rod Lens 설계

Fig. 1과 Fig. 2는 등가 비구면 콜리메이터 렌즈를 이용한

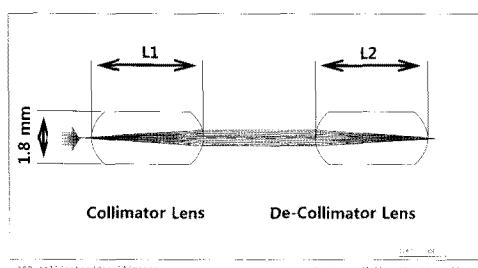


Fig. 1 Single mode fiber collimator Simulation

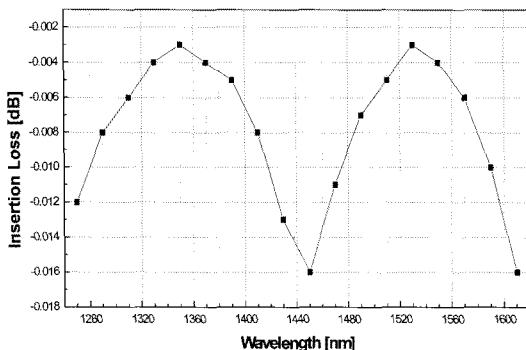


Fig. 2 Insertion loss by wavelength

단일 모드 파이버<sup>(4)</sup>를 이용한 콜리메터 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다.

광통신용 콜리메이터에 사용될 Rod 렌즈는 광통신용 CWDM Device인 2 Port, 3 Port, Isolator 등에 이용된다. 따라서 각각의 CWDM 장치에 응용되었을 때의 특성을 평가하기 위하여 Code V를 이용한 시뮬레이션을 하였다. 이 때 사용된 비구면 글래스렌즈는 동일한 비구면 곡률, 재질, 치수를 가지는 등가 렌즈이다.

입력 파이버와 출력 파이버의 입/출력 비를 이용하여 결합 효율을 평가하였을 때 커플링 효율은 -0.003[dB]로 99.94% 였다. 이때 사용된 파장은 1550nm이며, 글래스의 굴절률  $n_d=1.58913$ , 분산율  $v_d=61.2$  이다.

Fig. 3과 Fig. 4는 Dual Fiber Collimator를 이용한 커플링 효율 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다.

Dual Fiber를 이용한 Ray Tracing을 한 결과 2 Port와 3 Port 장치에 적용이 가능하다. 또한, Collimator Lens와 De-Collimator Lens는 동일한 비구면 곡률, 재질, 치수를 가지는 등가 렌즈이며, 파이버 간격(Fiber Separation)은

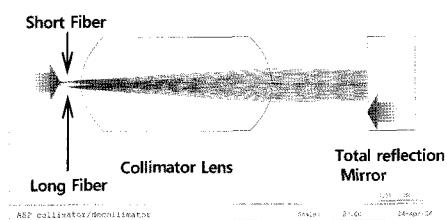


Fig. 3 Dual Fiber Collimator Simulation

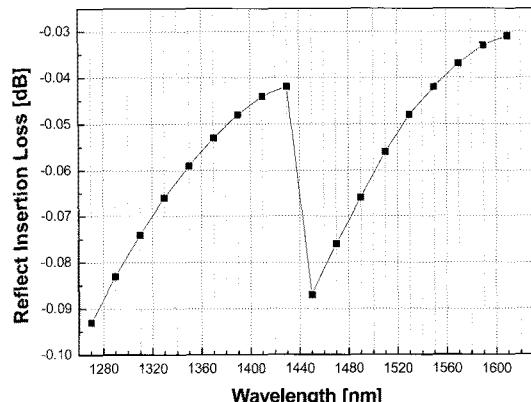


Fig. 4 Reflect insertion loss by wavelength

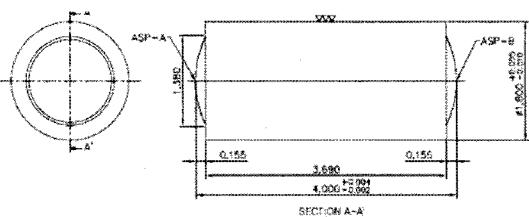


Fig. 5 Final specification of Glass Rod Lens

127 $\mu\text{m}$ 로 구성되었다. Fiber AOI(Angle Of Incidence)는 8°이며, 파장은 1550nm, 클래스의 굴절률  $nd=1.58913$ , 분산율  $vd=61.2$ 이다.

최적 광학 설계된 비구면 파이버용 렌즈는 기존 부품과의 호환성을 고려하여 로드 형상으로 설계되었다. 광학 유리는 굴절률  $1.58913 \pm 0.0005$ , 아비의 수  $61.2 \pm 0.5$ 이고 사용 가능한 파장은 1270~1610nm이다. 렌즈의 NA(Numerical aperture) 0.18이며, 작업거리 4.0±0.1mm이다.

Fig. 5는 최적 광학 설계된 비구면 파이버용 렌즈의 최종 사양을 나타내고 있다.

### 3. 실험 장치 및 방법

#### 3.1 실험 장치

Fig. 6은 초정밀 가공기계인 ULG100C(H3)와 각 축의 슬라이드 구조 및 특징을 나타내고 있으며, Table 1은 초정밀 가공기계의 특성을 보여주고 있다.

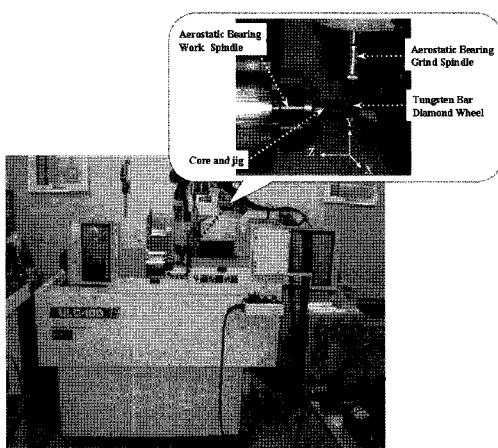


Fig. 6 Ultra-precision machine

본 연구에 사용된 초정밀 비구면 가공기계는 동시 3축 제어에 의해 초정밀 광학 부품을 평면, 구면, 비구면 형상을 가공할 수 있는 Toshiba사의 ULG100C(H3) 초정밀 가공기계를 사용하였고 온도  $21 \pm 0.2^\circ\text{C}$ , 습도 40% 이하인 항온항습의 크린룸에서 설치되었다. ULG100C(H3)는 X, Y축과 Z축이 상호 직교되게 장착되어 있고 V-V룰러 안내가이드와 10nm의 피드백 시스템의 분해능이 가능하다. Y축에는 공기 정압 연삭 휠 스피드들이 장착되어 5,000~100,000 RPM으로 회전되고 공작물 스피드들은 공기정압 스피드들에 의해 회전되며 회전속도는 10~1,500 RPM 범위 내에서 가공을 한다. 본 가공에 사용된 연삭 휠은 원통형의 다이아몬드 연삭 휠로서 콜렛착에 Shank 부분을 끼운 후 기계의 회전축에 고정하였다.

정밀한 비구면 형상가공을 위해 사용되는 공작물인 초경 합금은 다이아몬드와 친화성이 적고 열팽창계수가 100~900°C에서  $1.5 \sim 4.8 \times 10^{-6}$ 인 니켈, 크롬, 망간, 텅스텐, 몰리브덴을 첨가한 공구용 합금강, 특수용 합금만큼 작아 가공시 형상정도의 유지가 좋고, 가공 상에서 파쇄 되지 않을 정도의 충분한 경도와 인성이 높아야 한다.

가공된 초소형 비구면 로드 렌즈 금형 코어는 렌즈를 양산하기 위한 금형 코어로서 비구면 형상 가공법 중 초정밀 가공 기로 비구면을 창성하고 성형 혹은 전사하는 방법으로서 유리재료(Preform : Glass Gob)를 성형하는 레플리카(Replica) 법을 사용 하는 코어이다. 유리렌즈의 레플리카 법은 주로

Table 1 Specification of ultra-precision machine

Model	ULG 100C(H3)
Maximum machining diameter (mm)	100
Maximum tool diameter(mm)	32
Revolution speed	Work Spindle(RPM) : 10~1,500 Grind Spindle(RPM) : 5,000~100,000
Minimum resolution	x, y, z-axis( $\mu\text{m}$ ) : 0.001 C-axis( $^\circ$ ) : 0.0001 Feed rate(mm/min) : 0.1~160
Programming resolution	X, Y, Z-axis(nm) : 1 ~ 10 C-axis( $^\circ$ ) : 0.0001
CNC System	FANUC Series 15i-MA

**Table 2 Characteristics of Core Material**

Model		FB01
WC (%)		99
Co (%)		1
Hardness	(HRA)	95
	(HV GPa)	24.0
Transverse rupture strength(GPa)		1.6
Young's Modules(GPa)		660
Coefficient of Thermal( $\times 10^{-6}/K$ ) Expansion		4.5
Density		15.4

유리렌즈 성형기(Glass Molding Press)를 이용하여 성형되고 있지만 유리렌즈 성형은 20~250kgf/cm<sup>2</sup>의 성형압력과 280~700°C의 고온 등 성형 상의 악조건이 가해지므로 재료는 고온 경도, 내마모성, 압축강도, 강도 등이 큰 것을 선택하지 않으면 안 된다.

따라서 Al, Cu등과 같이 연질재료로 초정밀 연삭이 쉬운 재료는 사용할 수 없으므로 경도와 압축강도가 크고 열팽창계수가 작은 DIJET사의 FB01 초경합금을 사용하였다. FB01 초경합금은 금속결합제(Co, Ni)를 최소화시켜 기존의 초경합금보다 고정도와 높은 내마모성을 가지며, HRA 95정도의 경도를 가지고 있다. 따라서 미세 절입과 저속 연삭에서 기존의 초경합금과 고속도강 보다 우수한 연삭성능 및 높은 정밀도의 표면을 얻을 수 있다.

Table 2는 재료의 기계적 성질을 나타낸 것이다.

### 3.2 실험 방법

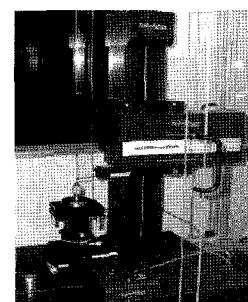
초정밀 비구면 가공은 광학설계 소프트웨어(Code V)를 이용한 광학설계데이터를 가지고 CAM소프트웨어에 의해 가공데이터 생성, 초정밀 비구면 연삭기를 사용한 비구면 가공, 비구면 형상측정데이터 평가에 의한 보정 가공 등으로 나뉘어 진다.

비구면 형상의 (X,Z)좌표는 Code V 상에서 광학 설계된 데이터를 이용하여 비구면 좌표생성기에서 생성되고, 이 데이터를 기반으로 CAM 소프트웨어에서 가공 데이터를 입력하여 직선보간 및 원호 보간을 통하여 공구의 곡률 반경에 따른 공구 경로를 생성한다. 결정된 공구 경로는 CNC 코드화되어 RS-232C 인터페이스로 전송하고, 컴퓨터로부터 전송된 데이터를 CNC의 메모리 내에 저장한다.

초정밀 가공기계는 CNC 제어를 실시하고 가공된 비구면

**Table 3 Experimental conditions**

Work spindle(RPM)	320
Grain size(Mesh)	# 2,000, #2,500, #3,000, #3,500
Feed rate(mm/min)	0.5, 0.6, 0.7, .0.9, 1.1
Depth of cut(um)	0.2, 0.6, 0.8, 1.0
Turbine speed(RPM)	20,000, 25,000, 30,000, 35,000

**Fig. 7 Photograph of measurement apparatus****Table 4 Specification of Measurement Apparatus**

Measurement distance(mm)	120
Precision(nm)	0.8
Data resolution(um)	0.25/120
Stylus Radius(um)	2

광학소자는 고정밀도의 측정기에 의해 형상 정밀도 및 표면 거칠기로 평가하여 발생한 오차를 보정 가공함으로써, 목표로 하는 형상 정밀도를 갖는 초소형 비구면 로드 렌즈 금형 코어를 가공하였다. 실험에 사용된 다이아몬드 휠은 천연 다이아몬드 입자를 소결한 원통형 모양의 NORITAKE 모델을 채용하였다.

Table 3은 비구면 글래스 로드 렌즈용 코어의 가공 특성을 위한 실험 조건을 나타낸 것이다.

비구면 가공품의 형상 및 표면 거칠기 측정은 RTH사 비구면 형상 측정기인 Form Talysurf series2 PGI 840을 사용하였으며, 이는 압전소자를 이용한 접촉식 비구면 형상측정기로 Fig. 7과 Table 4에 나타내었다.

### 4. 실험 결과 및 고찰

초정밀 연삭가공은 창성운동에 의한 가공이 이루어지므

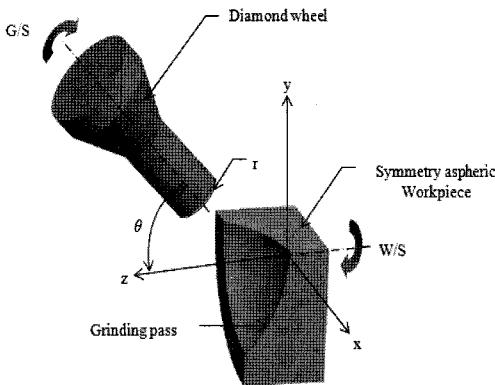


Fig. 8 Aspheric machining Mechanism

로 가공기계의 운동, 공구와 공작물의 상대운동이 가공면에 전사된다. 광학에 사용되는 부품은 대부분 수 나노부터 수십 나노 오더의 정도를 요구하고 있으므로 초정밀 가공기계에 요구되는 기능은 공구와 공작물의 상대 위치관계를 유지하면서 공구의 형상을 가공표면에 충분히 전사시켜야 한다.

Fig. 8은 비구면 초정밀 가공 매커니즘을 나타낸 것이다. 공구와 공작물간의 상대위치 움직임에 의해 높은 형상정도를 얻는다는 의미에서 기계운동의 정확성은 초정밀 가공의 기본이 되며, 가공기계의 정도, 특히 운동 정도를 가능한 높게 유지할 필요가 있다. 이를 실현하기 위해서는 기계를 구성하고 있는 각 요소의 상대위치를 정밀하게 유지하고 오차가 없는 운동을 실현하여야만 하며 표면정도, 형상 및 치수정도는 고정밀도화 하여야 한다.

따라서 가공특성은 다이아몬드 연삭 공구의 회전속도, 비구면 가공면에 따른 이송, 다이아몬드 휠의 연삭 깊이를 입자 크기(#2000, #2500, #3000, #3500)별로 실험하여 최적의 비구면 가공특성을 연구하였다.

#### 4.1 회전속도에 따른 표면 거칠기

정밀하게 통제되는 환경에서 가공이 이루어지는 상황에서도 회전속도의 증가에 따라 연삭저항이 증가하게 되어 가공 표면에 영향을 줄 것으로 예측된다. 하지만, 공구의 형상이 그대로 공작물에 전사된다고 할 때 연삭 속도가 변화하더라도 가공물에 전사되는 형상은 변화하지 않을 것으로 보는 견해도 있다.

Fig. 9는 회전속도에 따른 표면 거칠기의 관계를 나타내고 있다. 65,000~80,000 RPM 까지 터빈 회전속도를 단계적으로 변화 시켰으며, 그 실험결과 #3000과 #3500의 다이아몬

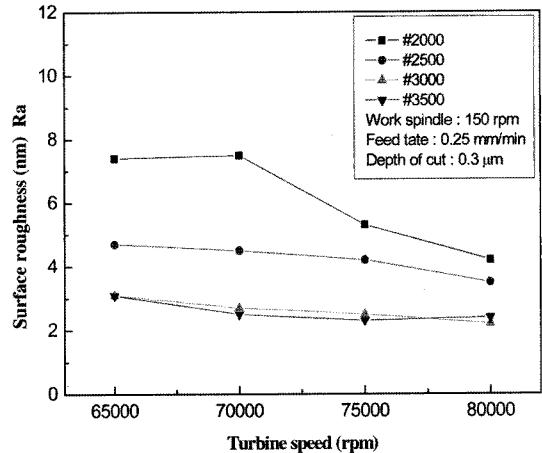


Fig. 9 Surface roughness by Turbine speed

드 휠이 RPM 80,000에서 각각 Ra 2.22nm와 2.37nm로 표면 거칠기가 가장 양호하였으며 터빈의 최대 회전수 100,000 RPM을 고려하여 80,000 RPM을 최대실험값으로 규정하였다. 실험한 결과, 회전 속도가 빨라지더라도 # 2,000을 제외한 공구를 사용한 경우를 제외하고는 표면 거칠기 값은 큰 차이를 보이지 않음을 실험적으로 확인하였다.

#### 4.2 이송에 따른 표면 거칠기

Fig. 10은 이송에 따른 표면 거칠기의 관계를 나타내고 있다. 초정밀 연삭의 경우 이송이 작은 영역에서는 표면 거칠기가 이론적으로 작게 되기 때문에 공작물의 표면 거칠기에 크게 영향을 미칠 것으로 판단된다. 이송에 따른 표면 거칠

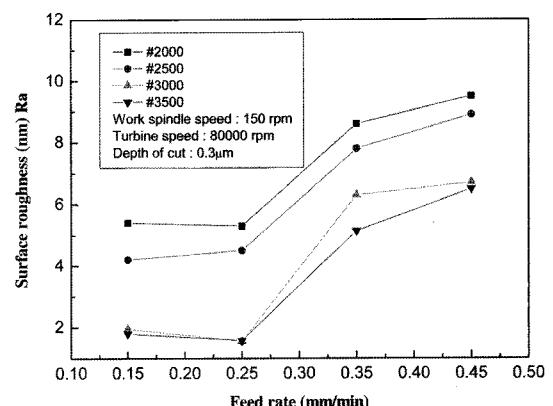


Fig. 10 Surface roughness by Feed rate

기의 관계를 실험적으로 검토해 본 결과, 이송에 의한 표면 거칠기 값은 정삭 가공에서 연삭 깊이 0.3um 주축 회전속도 150 RPM, 터빈 회전속도 80,000 RPM에 이송속도 변화에 따른 표면 거칠기 측정한 결과로 가공의 생산성의 확보를 위하여 0.25mm/min을 사용하여 Ra 1.78nm의 표면거칠기 값을 얻을 수가 있었다.

#### 4.3 연삭 깊이에 따른 표면 거칠기

초소형 비구면 로드 렌즈 금형 코어를 가공하기 위한 다이아몬드 연삭공구는 가공하고자 하는 가공물의 비구면 형상 정도 및 표면 거칠기를 얻기 위해서는 설정한 절입량 만큼 정확하게 재료를 제거하고 정밀한 형상과 면을 만들어야 한다. 그리고 10nm 오더의 정도를 유지하는 공작기계의 기능을 완벽하게 활용하기 위해서는 공구의 기능도 우수한 것이어야 한다. 광학용 금형의 경면을 가공하기 위해 보통 다이아몬드 연삭 공구로 사용하여 수 마이크로미터에서 수십 나노미터에 이르는 연삭 깊이로 가공한다.

연삭 가공에 있어서 실제 미소절삭 연삭 깊이가 변화함에 따라 공구와 공작물의 접촉 면적이 증가하고, 그것에 따라 절삭저항도 증가하여 가공면의 표면 거칠기가 변화할 것으로 예상된다.

Fig. 11은 연삭 깊이에 따른 표면 거칠기의 관계를 나타내고 있다. 연삭 깊이는 0.1~0.7um 까지 연삭 깊이를 단계적으로 변화 시켰으며, 그 결과 # 3500에서는 Ra 1.8nm 표면 거칠기 값이 나타났으며 점차적으로 증가하는 표면 거칠기가 나타났다. 여러 가지 실험 결과 최적의 연삭 조건은 가공 효율성을 고려할 때 정삭 가공에서 다이아몬드 입자 # 3000

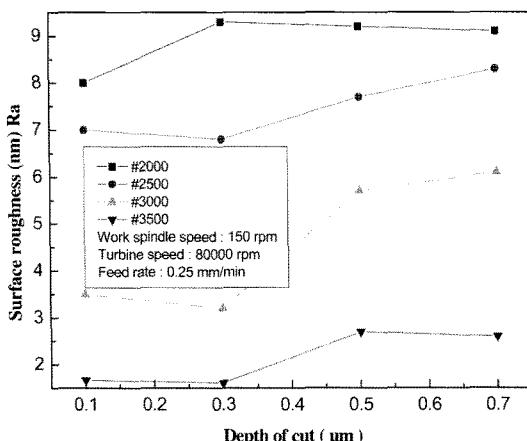
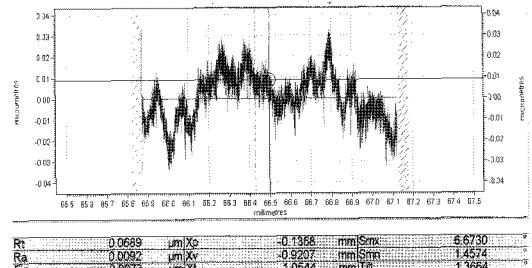


Fig. 11 Surface roughness by Depth of Cut

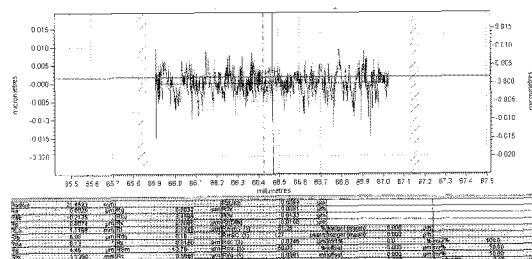
에서 주축 회전속도는 150 RPM, 이송속도는 0.25mm/min, 연삭 깊이는 0.3um 일 때 가장 양호한 표면 거칠기를 나타내었다.

Fig. 12와 Fig. 13은 초정밀 가공기에 의해 글래스 로드 렌즈용 코어의 비구면을 가공한 결과와 실제 사진을 나타낸 것이다. 초정밀 가공하여 형상정밀도 P-V 0.0689um 인 비구면을 얻었으며 표면 거칠기는 Rmax 24.6nm로 양호한 가공면을 얻었다.

Fig. 14와 Fig. 15는 개발된 초소형 비구면 로드 렌즈 금형과 금형으로 성형한 글래스 로드 렌즈를 나타낸 것이다.



(a) Figure accuracy



(b) Surface roughness

Fig. 12 Result of machined aspheric lens

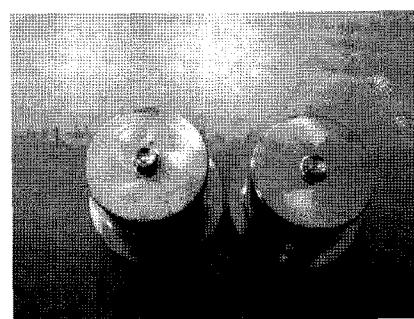


Fig. 13 machined core with aspheric

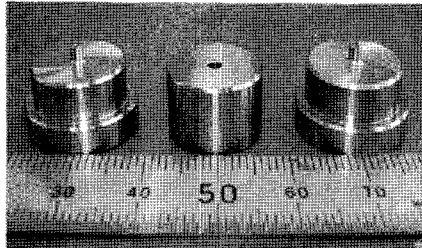


Fig. 14 Machined Glass rod lens core and sleeve

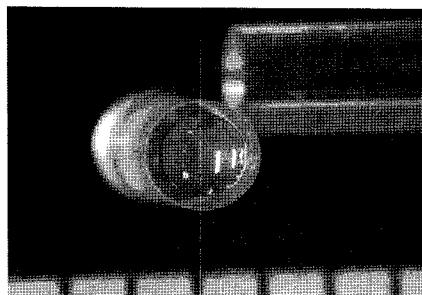


Fig. 15 Glass rod lens

기존의 글라스 렌즈 금형 방식은 Lower Core와 Upper Core 사이에 글라스 Gob을 삽입한 성형시스템으로 렌즈 성형이 이루어 진다. 하지만 개발된 금형 방식은 Lower Core 와 Upper Core 사이에 Sleeve를 사용하여 Rod 렌즈의 외경 성형하는 구조로 이루어 졌다.

## 5. 결론

본 연구에서는 광 부품의 품질을 향상시키고 기존의 광 제품과의 호환성 등을 고려하여 비구면 파이버용 렌즈를 로드 형상으로 설계하였고 초정밀 가공을 통하여 비구면을 갖는 글래스 로드 렌즈용 코어를 가공할 때 가공 조건에 따른 특성을 고찰하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 글래스 로드 렌즈용 코어의 비구면을 초정밀 가공한 결과 다이아몬드 입자 # 3000, 주축 회전속도 150 RPM, 이송속도 0.25mm/min, 연삭 깊이 0.3um일 때 형상정밀도가 P-V 68.9nm, 표면 거칠기 Rmax 24.6nm으로 가장 양호한 나노 가공면을 얻었다.
- (2) 이송속도 0.15mm/min~0.45mm/min로 변화시켜 실험한 결과 이송속도를 작게 할수록 양호한 표면 거칠기를

얻을 수 있었으며 이송이 0.25mm/min에서 표면 거칠기 Ra 1.78nm를 얻을 수 있었다.

- (3) 연삭 깊이를 0.1~0.7um까지 단계적으로 변화 시켜가며 실험하였으며 그 결과 # 3500에서는 Ra 1.8nm 표면 거칠기 값이 나타났으며 점차적으로 표면 거칠기가 증가하는 양상을 보였다.
- (4) 65,000~80,000 RPM 까지 터빈 회전속도를 단계적으로 변화 실험한 결과 # 3,000과 # 3,500의 다이아몬드 휠이 80,000 RPM에서 각각 Ra 2.22nm와 2.37nm의 표면거칠기 값을 얻었다.
- (5) 파이버 콜리메이터용 렌즈를 로드 형상으로 설계하였고 로드 렌즈용 금형코어를 초정밀 가공하여, 파이버 콜리메터용 Glass rod lens를 제작하였다.

## 후기

위 논문은 원광대학교 2007년 교내연구비지원으로 연구하였습니다.

## 참고문헌

- (1) Kim, W. S, Kim, D. H, and Yoshiharu, N., 2002, "A Study of the Mirror Design and the Fabrication for an X-ray Microscope," *Proc. of the KSMTE*, pp. 59~63.
- (2) Brinksmeirer, E. and Riemer, O., 1993, "Tools and Setting for Improved Surface Finish in Diamond Turning," *Proc. of Int. Precision Engineering*, pp. 125~133.
- (3) Furukawa, M., 1988, "Effect of Material Properties on Ultra-Precision Cutting Processes," *CIRP*, Vol. 37, pp. 113.
- (4) Wagner, R. E. and Tomlinson, W. J., 1982, "Coupling efficiency of optics in single-mode fiber components," *Appl. Opt.* 21, 2671.
- (5) Côté, M. and Shannon, R., 1996, "Optimization of waveguide coupling lenses with optical design software," *Appl. Opt.* 35, 6179.
- (6) Goodman, J. W., 1996, *Introduction to Fourier Optics*, Mc-Graw Hill, New York.