한국정밀공학회지 제 24 권 제 10 호 (2007년 10월)
Journal of the Korean Society for Precision Engineering Vol. 24, No. 10, October 2007

◆특집◆ 초정밀가공기술

광학 유리의 초정밀 연삭특성에 관한 연구

박순섭*, 이기용*, 김형모*, 원종호**

Ultra-Precision Grinding Characteristics in Optical Glass

Soon Sub Park*, Ki Young Lee*, Hyoung Mo Kim* and Jong Ho Won**

Key Words : Brittleness mode (취성 모드), Ductile mode (연성 모드), Surface Roughness (표면 거칠기), Optics Glass (광학유리), P-V (peak-to-valley), Ultra-precision grinding (초정밀연삭)

1. 서론

최근 광학기기의 소형화, 고화질화의 추세에 따라서 광학계의 중요한 부분인 비구면 렌즈의 정도 향상이 강하게 요구되고 있으며, 특히 현재 사용되어지고 있는 비구면 렌즈의 대다수는 플라스틱 성형품이어서, 정도향상의 관점에서 보면 비구면 글라스 렌즈로의 전환이 바람직하다.

비구면 글라스 렌즈의 제조법은 양산이 가능한 글라스 몰드 프레스법과 단품 제작으로 연삭에 의한 직접가공법 두 가지로 크게 분류된다.[1]

광학 유리는 단단하고 깨지기 쉬운 성질을 가진 재료로써, 탄성 변형 후에 소성 변형 없이 파괴되는 취성 파괴를 일으킨다. 광학 유리의 가공은 금속재료와는 달리 파괴기구가 현저하게 다르므로 가공하기가 어렵다.[2]

취성 재료가 연성 영역에서 가공되기 위해서는 공작물과 지립 절인 간섭량의 비가 충분히 작아야 하며, 그러기 위해서는 대단히 작은 운동 분해능으로 공작물 및 절인의 운동이 제어되어야만 한다.

* 한국생산기술연구원 광주연구센터 마이크로금형팀
Tel. 062-600-6151, Fax. 062-600-6159
Email pss4633@kitech.re.kr
초정밀가공과 측정, 광학 렌즈 및 미러 분야에 관심을 두고 연구 활동을 하고 있다.
** 충남대학교 기계공학과

즉, 연삭 기계의 강성 및 연삭숫돌의 접촉 강성이 충분하게 설계하여야 하고 기존의 연삭기계보다 한 단계 위의 정도로 개선되어야 한다.

한편, KB7은 취성재료이면서 광학적 특성상 표면 거칠기는 0.02㎛ Ra, 형상정밀도는 약 0.2㎛ P. V 이하의 수치를 가져야한다.

본 연구에서는 비구면 글라스 렌즈를 양산하기 전 비구면 Mock-up 렌즈를 연삭에 의한 직접가공법으로 광학 유리를 초정밀 연삭가공을 수행 하였다. 초정밀 연삭 시스템을 이용한 BK7의 연삭가공 특성을 파악하여 소재에 대한 데이터베이스를 확보하고, 소재 가공을 위한 최적 연삭 조건을 DB화하는 것을 목적으로 한다. 향후 비구면 글라스 렌즈의 Mock-up 가공에 적용하여 시간 및 공구의 수명을 향상시키는 데이터로 활용하고, 생산성 확보에 기여할 것으로 예상된다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

2.1.1 마이크로 연삭기

본 연구에 사용된 초정밀가공기는 도시바社의 ULG-100C(H^3)로 초정밀 마이크로 그라인딩 머신이다. 초정밀 마이크로 그라인딩 머신은 V-V 롤러가이드와 리니어 모터 구동(X, Z축)과 공작물을 고정시키는 공기정압 베어링 스핀들과 고속 고정도

공기정압 베어링 스핀들로 구성되어 있다. 두 안내면은 각각 X축과 Z축의 직교형태를 이루며 구동한다. Z축의 중심부에 해당하는 안내면에 워크스핀들이 고정되어 회전하며, 안내면의 구동방향과 평행을 이루며 회전한다. X축 구동안내면 위에는 고속 고정도 공구 스핀들이 고정되어 연삭 휠을 설치할 수 있으며, 스핀들 구동방향과 수직방향으로 구동한다.

안내면의 위치결정정도는 0.25㎛/300㎜, 분해능은 1㎚의 성능을 가지고 있으며, 선삭, 연삭의 경우 최대 Ø120㎜까지 가공이 가능하다.

Fig. 1은 초정밀 연삭시스템을 나타낸다. 초정밀 가공실은 온도 20±1℃ 습도 40±10%, Clean Room class 10,000인 항온항습의 클린룸이며, 장비의 진동방지를 위한 독립지반 구조로써 하부는 4Point Air Bag으로 지지된다.

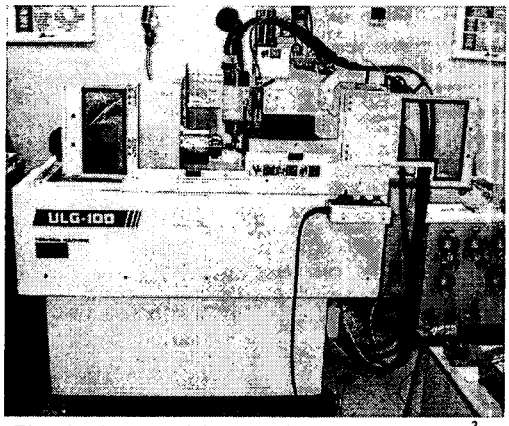

Fig. 1 ultra precision machine(ULG-100C(H^3))

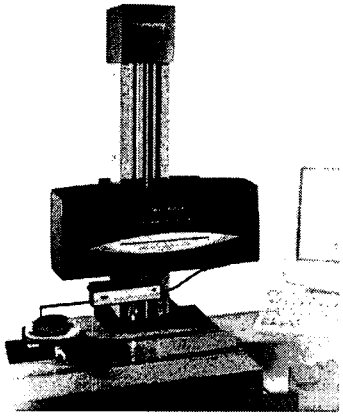

Fig. 2 Form talysurf 2+ measuring instrument

2.1.2 초정밀 측정기

Fig. 2는 비구면 형상 측정 장비로는 Talyer Hobson사의 비구면 측정기인 Form Talysurf series 2를 사용하였다. 접촉식 표면 거칠기 측정기인 Form Talysurf series 2의 측정범위는 120㎜이며, 정밀도는 0.5㎛/120㎜, 0.2㎛/20㎜이고 분해능은 0.86㎚이다.

2.1.3 광학유리와 다이아몬드 휠

연삭실험에 사용된 재료는 광학소재로 사용 되는 BK7이며, Ø22㎜인 국산 신광사 제품을 사용하였다. 또한 가공에 사용된 공구는 Table 1처럼 황삭, 중황삭 중삭, 정삭의 조건에 맞는 Fig. 3과 같은 형태를 갖는 레진본드 결합제의 다이아몬드 휠을 사용 하였다.

Table 1 Grinding Wheel

구분		Rough1	Rough2	Re-Rough	Finish
Tool	Maker	Tokyo	Tokyo	Noritake	Noritake
	Grain(#)	400	800	2000	4000
	Dia(mm)	8	8	15	15
	Grade(%)	100	100	125	150

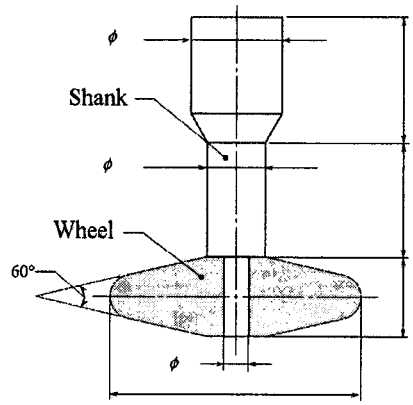

Fig. 3 Shape of diamond wheel(Cross grinding)

2.1.4 렌즈 사양

CODE V는 세계적으로 가장 포괄적인 광학 설계 및 분석 프로그램이다.

일반적인 공축 회전대칭 비구면 방정식은 식(1)과 같다.

$$Z(r) = \frac{cr^2}{1+\sqrt{1-(1+k)c^2r^2}} + Ar^4 + Br^6 + Cr^8 + Dr^{10} + \cdots \quad (1)$$

where r2 = x2 + y2
c = 정점의 곡률
k = conic constant
A, B, C, D, … : 비구면(변형) 계수

Code V를 이용하여 제록스 복사기에 사용되는 Collimator Lens를 설계한 결과는 Table 2와 Fig. 4와 같다.

Table 2 Collimator Lens Design Data

구분		ASP	SHP	비고
Radius		29.19715	204.9	렌즈 외경
비구면 데이터	K	-0.985612	-	: Ø21㎜
	A	0.478727e-06	-	렌즈
	B	0.206917e-07	-	중심두께
	C	-0.362050e-09	-	: 3㎜
	D	0.213301e-11	-	양볼록 렌즈

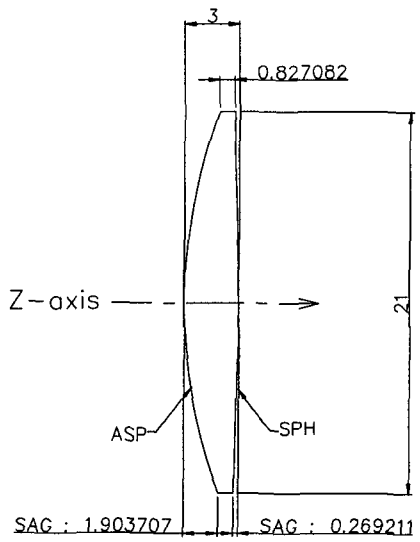

Fig. 4 Collimator Lens Design

2.2 실험 방법

현재 많이 행하여지고 있는 축대칭 비구면의 대표적인 수직축(Cross) 연삭법을 사용하였다.

미소한 오목면의 가공을 가능케 하기 위해 휠의 축과 공작물의 축이 사축구성으로 되어있는 경우도 있으나, 대다수의 경우는 Fig. 5처럼 휠 축과 공작물의 축이 직교하는 종형구성으로, X, Z축의 2축 동시제어에 의한 연삭 경로 $\overline{AO}$ 에 따라 가공되어진다. 연삭점에 있어서 공작물의 회전방향과 휠의 주속 벡터가 직교하는 것이 이 방식의 특징이다.

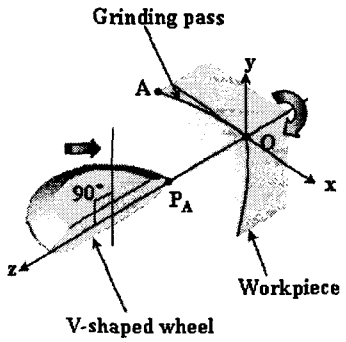

Fig. 5 Cross grinding method

Glass 재료의 초정밀 연삭가공을 비구면 및 구면 가공에 적용하기 위하여 아래와 같은 조건에서 가공을 실시하였다. 이때 주어지는 가공환경과 가공에 필요한 각각의 가공조건(Work spindle, Grind spindle, Feedrate, Depth of cut, Tool 등)에 대하여 얻어지는 가공결과(From error, Surface Roughness 등)를 초정밀 연삭 가공조건 관점에서 종합적으로 분석하였다.

3. 실험 결과

글라스재의 초정밀 연삭 특성은 Fig. 6과 8과 같이 다이아몬드 휠의 입도와 이송속도, 절삭 깊이에 따라 임계하중 이하의 연성모드로 연삭가공이 되었을 때 양호한 표면 거칠기와 형상을 얻을 수 있었다.

Fig. 6은 각각의 다이아몬드 휠 입도 #400, 800, 2000, 4000에 대한 Feedrate에 대한 표면 거칠기 특성을 나타내고 있다. 입도 #400, 800에서 Feedrate 5, 2.5 mm/min에서 연삭 가공 되었을 때 표면 거칠기는 300nm에서 150nm로 매우 거친 표면이 나타났으면 이는 실제 현미경으로 표면을 관찰한 결과 글라스재의 높은 취성으로 인한 취성모드 가공 시 나타나는 취성파괴로 인한 것으로 판단된다. 이것은

이송속도가 클 때 글라스의 표면에 가해지는 하중이 임계하중 이상이 될 때 나타나는 현상으로 판단된다. 따라서 글라스재의 정삭가공은 이송속도 1.5 mm/min 이하, 다이아몬드 휠의 입도 #4000에서 가장 양호한 표면 거칠기를 얻을 수 있음을 알 수 있다. Fig. 7은 취성모드로 연삭가공이 될 때 나타나는 표면의 사진이다.

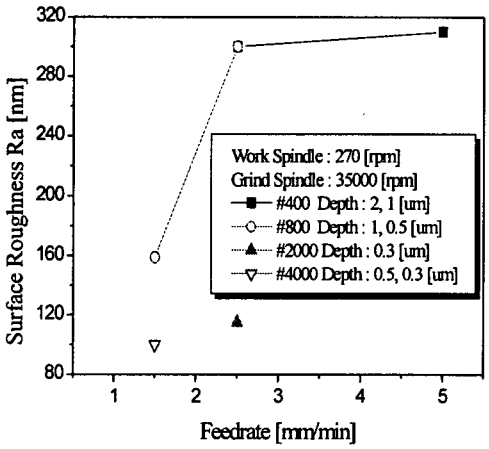

Fig. 6 Surface roughness versus Feedrate (Grinding Spindle : 3500rpm, Work Spindle : 270rpm, Wheel : #400, #800, #2000, #4000)

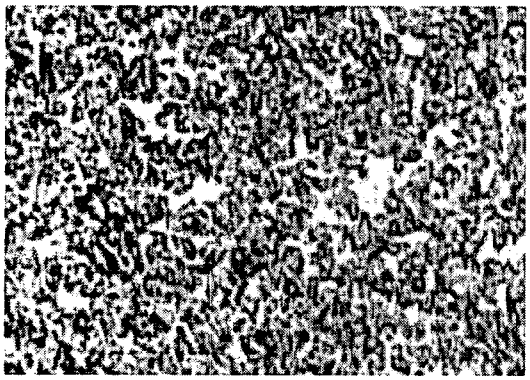

Fig. 7 Surface by Brittleness mode processing(×680)

Fig. 8은 각각의 다이아몬드 휠 입도 #400, 800, 2000, 4000에 대한 절삭 깊이에 대한 형상오차 특성을 나타내고 있다. 입도#2000, 4000에서 절삭 깊이 0.5 이하에서 연삭 가공 되었을 때 형상오차는 P-V 0.4㎛이하로 매우 양호한 형상을 얻을 수 있었다. 또한, 실제 현미경으로 표면을 관찰한 결과 글라스재가 연성모드에서 연삭되어 취성으로 인한 표면 결함이 나타나지 않았음을 알 수 있다. 따라서 글라스재의 정삭가공은 절삭 깊이 0.3 ㎛ 이하, 다이아몬드 휠의 입도 #4000에서 가장 양호한 형상을 얻을 수 있음을 알 수 있었으며, Fig. 9는 연성모드로 연삭가공이 될 때 나타나는 표면의 사진이다.

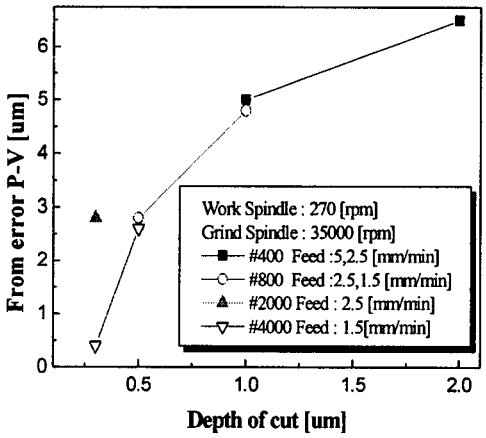

Fig. 8 Surface roughness versus Depth of cut (Grinding Spindle : 3500rpm, Work Spindle : 270rpm, Wheel : #400, #800, #2000, #4000)

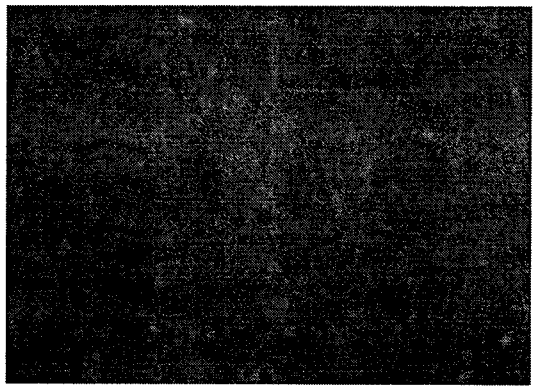

Fig. 9 Surface by Ductile mode processing(×680)

각각의 다이아몬드 숫돌의 연삭 특성은 Table 3과 같다.

다이아몬드 숫돌 #400, #800은 취성모드 연삭가공이 되며, #2000은 취성모드와 연성모드 연삭이

같이 발생하였다.

다이아몬드 숫돌 #4000만이 연성모드 연삭이 행하여 졌으나, 연삭흔은 존재하였다.

Table 3 Processing result of each diamond Wheel

Grain (#)	400	800	2000	4000
Work spindle (rpm)	270	270	270	270
Grind spindle (rpm)	3500	3500	3500	3500
Feedrate (mm/min)	5→2.5	2.5→1.5	1.5	1.0
Depth (um)	2→1	1→0.5	0.5→0.3	0.5→0.3
Form error (um)	6.5	3.0	0.8	0.3
Roughness (nm)	310	150	10	4

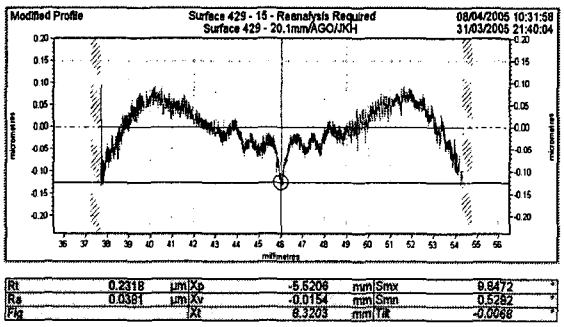

Fig. 10 Measure of Aspheric lens by Form Talysurf (P-V= 0.2318um)

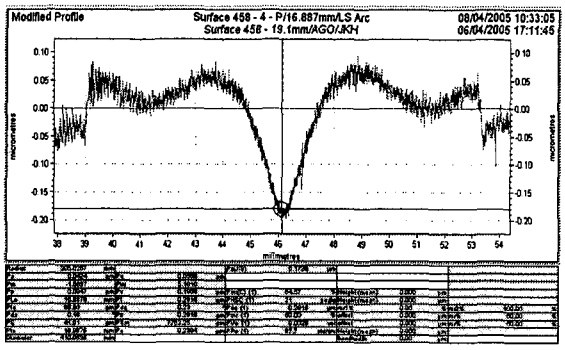

Fig. 11 Measure of spheric lens by Form Talysurf (P-V=0.2916um)

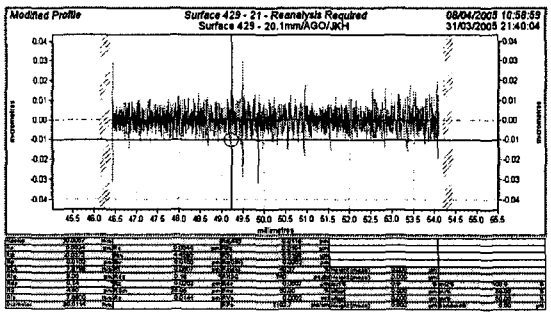

Fig. 12 Measure of Collimator lens surface (Ra = 3.4nm, Rmax = 60.7nm)

Fig. 10과 11은 다이아몬드 숫돌 #4000로 최종 정삭 가공된 비구면 글라스 렌즈에 표면을 측정한 결과로 형상정도가 구면은 P-V : 0.2916㎛, 비구면은 Rt : 0.2318㎛이며, Fig. 12와 같이 표면 거칠기는 Ra : 3.4nm, Rmax : 60.7nm의 값을 얻었다.

4. 결론

글라스 材의 초정밀 연삭에 의한 Mock-up 가공을 실시하여 Fig. 13과 같이 비구면 글라스 렌즈를 가공할 수 있었다. 하지만 초정밀 연삭 가공 후 현미경으로 표면을 관찰할 결과 Fig. 14와 같이 렌즈 만곡부위의 연삭흔이 발생하였다. 또한, Fig. 15와 같은 렌즈 표면의 연삭 휠과 렌즈에 상대운동에 의한 Tool mark가 발생하였다. 이와 같은 연삭흔에 에 의한 표면 결함들을 연삭가공에 의한 Mock-up가공에서 피할 수 없는 결함으로 판단되며, 후처리 공정인 폴리싱 가공으로 이러한 표면 결함들을 제거할 수 있다. 따라서 Mock-up가공에서는 후처리 공정인 폴리싱 가공의 중요성이 상대적으로 높다고 판단된다.

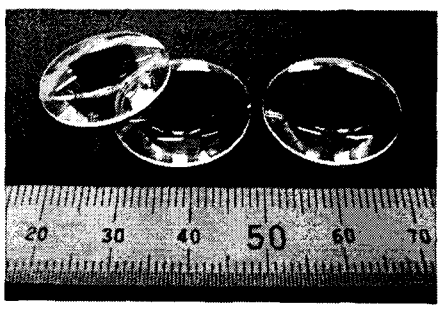

Fig. 13 Collimator Mock-up Aspheric Lens

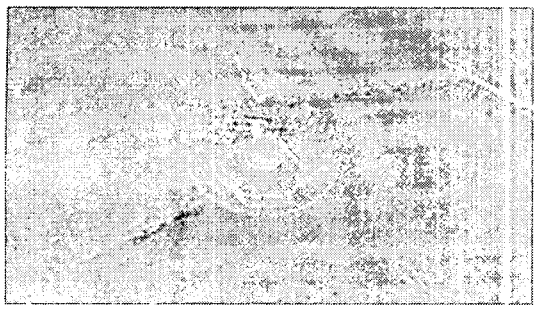

Fig. 14 Grinding traces of the lens center (×100)

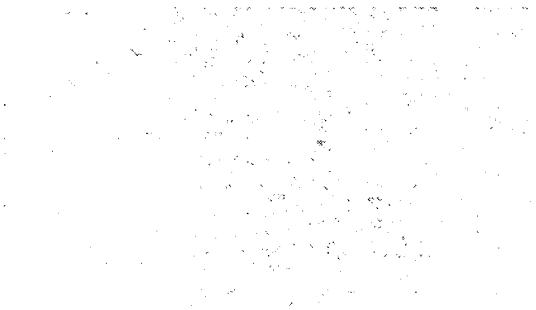

Fig. 15 Tool mark of diamond wheel (×100)

후 기

추후 광학 유리의 초정밀 연삭 후 연삭흔을 제거하는 초정밀 폴리싱에 관한 연구가 진행될 것이다.

참고문헌

1. Visser, D., Grjsbers, T. G. and Jorna, R. A. M., "Molds and Measurements for Replicated Aspheric Lenses for Optical Recoding," Apphed Optics, Vol. 24, Issue 12, pp. 1848-1852, 1985.
2. Suzuki, H., Kodera, S., Maekawa, S., Morita, N., Sakurai, E., Tanaka, K., Takada, H., Kuriyagawa, T. and Syoji, K., "Study on precision grinding of micro aspherical surface(Feasibility Study of Micro Aspherical Surface by Inclined Rotational Grinding)," Journal of Japan Society of Precision Engineering, Vol. 64, No. 4, pp. 619-623, 1998.
3. Kuriyagawa, T., Syoji, K. and Zhou, L., "Precision Form Truing and Dressing for Aspheric Ceramic Mirror Grinding Machining of Advanced Materials," NIST Special Publication, Vol. 847, No. 6, pp. 325-331, 1993.
4. Kuriyagawa, T., Zahmaty, M. S. S. and Syoji, K., "A new grinding method for aspheric ceramic mirrors," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 62, No. 4, pp. 387-392, 1996.
5. Sepasy Zahmaty, M. S., Kuriyagawa, T., Syoji, K. and Tachibana, T., "Ultra Precision Arc Truing and Dressing of Diamond Wheels for Aspheric Mirror Grinding," International Journal of Japan Society for Precision Engineering, Vol. 31, No. 4, pp. 263-268, 1997.