

◆ 특집 ◆ 렌즈/미러 가공 및 소재기술

렌즈 성형용 유리탄소 금형의 초정밀연삭

Ultraprecision Grinding of Glassy Carbon Core for Mold Press Lens

황연¹, 차두환¹, 김정호¹, 김혜정^{1,✉}
Yeon Hwang¹, Du-Hwan Cha¹, Jeong-Ho Kim¹ and Hye-Jeong Kim^{1,✉}

¹ 한국광기술원 초정밀광학연구센터 (Ultra-precision Optics Research Center, Korea Photonics Technology Institute)
✉ Corresponding author: kimhj@kopti.re.kr, Tel: 062-605-9262

Manuscript received: 2012.1.17 / Accepted: 2012.1.31

In this study, glassy carbon was ground for lens core of glass mold press. Ultraprecision grinding process was applied for machining of core surfaces. During the process, brittle crack occurred because of hard-brittleness of glassy carbon. Author investigated optimized grinding conditions from the viewpoint of ductile mode grinding. Geometrical undeformed chip thickness was adopted for critical chip thickness that enables crack free surface. Machined cores are utilized for bi-axpheric glass lens fabrication and surfaces of lens were compared for verification of ground surface.

Key Words: Glassy Carbon (유리탄소), Ultraprecision Machining (초정밀가공), Mold Press Lens (성형렌즈)

1. 서론

Glassy carbon (유리탄소)은 고온 온도 저항, 고경도, 저밀도, 낮은 전기저항, 낮은 마찰, 낮은 열저항, 화학적 안정성 및 낮은 투과율 등 유리 및 세라믹의 장점을 갖는 재료이다.¹ 이러한 특성으로 Glassy carbon은 다양한 전기 재료 및 고온 용기로 사용되며, 대표적인 고용점 재료인 Quartz glass의 성형용 몰드로 사용되고 있다. 특히 Glassy carbon은 유리와의 반응성이 낮아, 기존의 초경 및 SiC 등의 유리 성형용 금형코어 재료에서 렌즈와 금형의 원활한 분리를 위해 필수적인 이형막이 필요 없어 광학 유리렌즈 성형(Glass Mold Press, GMP) 공정에 적용될 경우 많은 장점을 갖게 된다.

Glassy carbon의 가공에 관련한 연구는 밀링가공 등의 기계가공과 함께 집속이온빔, 레이저 등

의 특수가공 방식 등이 적용된다.² 기계적 가공의 적용시 재료의 취성파괴에 의한 내부 균열(Crack)의 발생과 이를 제거하기 위한 폴리싱 및 화학적 에칭 등의 과정에서 필연적으로 형상오차와 표면조도가 악화된다. 이러한 공정상의 문제로 기존의 기계적 가공방식은 광학렌즈에 요구되는 형상오차와 표면조도의 동시 달성이 어렵다.³ 반면 특수가공 방식은 가공면의 취성파괴는 피할 수 있으나, 형상정도 등의 기하학적인 오차의 범위가 커서 광학 부품의 제조에 적용하기에는 한계를 갖게 된다.

본 연구에서는 이러한 기존 기계적 가공방식의 한계를 극복하고, 고정밀도의 성형렌즈 제조를 위한 금형코어 제작을 위해 Glassy carbon의 연성모드 연삭조건(Ductile mode grinding)에 대한 연구를 수행하였다.

2. 렌즈성형

2.1 금형 코어 재료 및 이형막

일반적인 성형용 유리는 굴곡점(A₁) 500~600℃ 근처에서 성형이 이루어지며, 성형용 금형코어의 재료로는 결합제인 Co 함량이 1%이하인 초경소재가 주로 사용된다. 초경은 고강도와 함께 유리와의 유사한 낮은 열팽창률을 갖고 있어, 고온 렌즈 성형시에도 재료의 열팽창에 의한 광학면의 형상오차를 최소화 할 수 있다.⁴ 이외에도 고경도로 인하여 금형 수명이 길다는 장점이 있다. 반면 초경소재는 비교적 고가이며, 가공성이 좋지 않아 다이아몬드 휠에 의한 연삭으로 가공된다. 또한 초경소재면과 성형용 유리재료의 이형성이 좋지 않아 금형코어의 장수명화를 위해 초경 가공면에 이형막으로 전이금속계 박막(Ir-Re)이나 탄소계 증착막(Diamond Like Carbon, DLC) 이 사용된다.⁵ 전이금속계 박막은 비교적 고온 안정성이 좋고, 강도 역시 우수하나 반복적인 성형공정에 의해 박막의 밀착력이 약화되어 박리가 발생하게 되며, 박막의 미세손상에 의한 유리소재의 융착이 발생하기도 한다. DLC 이형막은 탄소 분자의 SP², SP³ 구조가 주를 이루며, 융착이 적고, 예칭공정에 의한 박막의 재증착이 가능하다. 그러나 DLC 막은 고온 안정성이 낮아 박막 수명이 짧고, 600℃ 이상의 고온 성형 재료의 성형에는 적용이 어렵다.

2.2 렌즈성형용 Glassy carbon

Glassy carbon은 Fig. 1 과 같이 검정색의 투명한 용화 탄소재료로 고온 안정성과 낮은 열팽창계수, 고강도, 내부식성 등의 특성을 갖고 있다. 제품화된 Glassy carbon은 3,000℃의 고온에도 동일한 특성을 유지하여 다양한 전기전자 및 화학 재료로 사용된다.



Fig. 1 Glassy carbon (Tokai Carbon, Japan)

Table 1 Property of GC-20(Tokai Carbon)

specific gravity	1.42 g/cm ³
porosity	0 %
hardness	230 HV1
thermal conductivity	6.3 W/m.k
coefficient of thermal expansion	2.6X10 ⁻⁶ /k
heat-resistant temp.	850~3300 ℃

3. 연성모드 연삭 조건

3.1 초정밀 연삭 가공

Glassy carbon의 가공 공정에는 레진 결합제 다이아몬드 스톨(resin bond diamond wheel)이 사용되며, 본 연구에서는 초경소재의 정삭가공 조건에 준하는 조건으로 가공이 수행 되었다. 가공방식으로는 공작물과 공구가 동일 방향으로 회전하는 평행축 연삭(parallel grinding) 방식이 적용되어 초정밀 가공기(ASP01, Nachi-Fujikoshi. Co.)를 통해 수행 되었으며, 가공면 관찰은 현미경(STM6, Olympus Co.)과 형상측정기(UA3P, Panasonic Co.)을 사용하였다. 가공된 금형코어의 렌즈면 전사성은 광학현미경으로 관찰하였다.

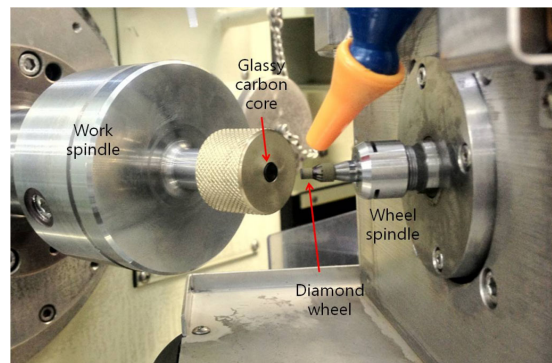


Fig. 2 Experimental setup for Glassy carbon grinding

Table 2 Machining conditions

wheel(diamond, ALMT Co.)	resin bond, SD2000
work spindle(rpm)	150~700
turbine spindle(rpm)	30,000~47,000
feed rate(mm/min)	0.25~2.0
depth of cut(um/cycle)	0.1~1.0

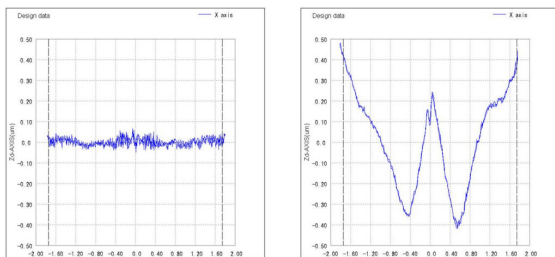
3.2 취성 파괴

초기 연삭가공 실험결과, 가공면에는 휠의 궤적을 따라 취성 파괴에 의한 균열(Crack)이 발생함을 확인할 수 있었으며, 이를 피하기 위한 Glassy carbon 의 연성모드 가공조건에 대한 이론 및 실험적 접근이 요구된다.

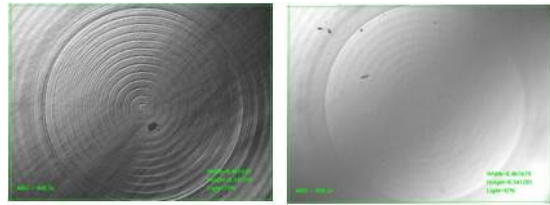
경취성 재료(Hard brittle material)의 가공시 연성모드 가공의 가장 중요한 조건은 미변형 칩두께(Undeformed chip thickness)이다. 즉 연삭 가공시 가공에 참여하는 각각의 연삭입자에 의해 제거되는 피삭재의 칩두께가 임계두께(Critical thickness) 이상 이 되면, 수평 및 수직방향 취성파괴(Median and lateral crack)이 가공면에 남게 되어 가공면이 취성 크랙면이 된다. 이러한 취성 가공면은 렌즈면의 경우 표면조도를 악화시켜 광학성능 저하를 가져 오고, 제품화 후에도 취성균열이 확산되어 투과율이 현저하게 떨어지게 되며, 이러한 렌즈는 외관상 뿌옇게 보이게 된다. 이러한 현상을 피하기 위해서는 연성모드 가공조건을 통해 초기 가공면의 상태를 내부 변질층에 균열이 없는 연성 모드 상태로 가공을 수행하여야 한다. 본 연구에서는 연성모드 가공조건의 최적화를 위해 휠의 회전방향과 이송방향의 관점에 따라 각각 임계 두께에 대한 기하학적 형상을 고려하여 임계두께 값을 실험적으로 산출하였다.^{3,6}

3.3 가공면 폴리싱

연삭가공후 가공면은 다이아몬드 연마제에 의한 폴리싱 공정을 거치게 된다. Fig. 3 은 폴리싱 전후의 가공면의 형상오차로 폴리싱에 의해 PV 0.12um 에서 PV 0.83um 로 형상정도가 악화되었다. 이는 가공과정이 가공변질층 내부의 취성 균열부가 폴리싱공정에서 제거되어 형상오차가 크게 증가한 것으로 생각된다.



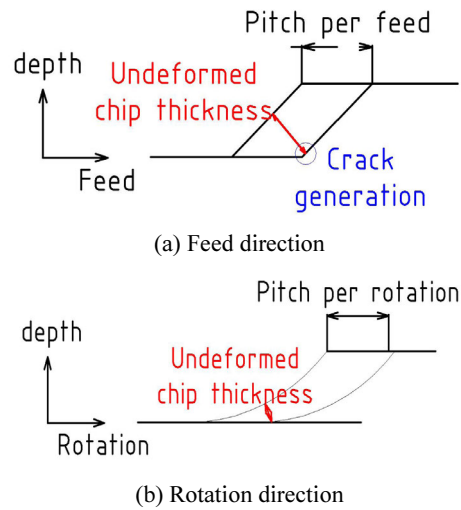
(a)Ground surface (b) Polished surface
Fig. 3 Profile change by polishing (brittle mode)



(a) Ground surface (b) Polished surface
Fig. 4 Surface profile (before and after polishing, brittle)

3.4 연성모드 연삭

연삭실험은 회전대칭 비구면에 대한 평행축 연삭이 적용되어, 내경부와 외경부의 미변형 칩두께가 서로 다르게 된다. Fig. 5 와 같이 이송방향(feed direction)의 칩두께는 가공 전영역에서 동일하게 되며, 이는 절입깊이, 이송속도, 휠 및 공작물의 이송속도에 의해 결정된다. 반면 회전방향(rotation direction)의 미변형 칩두께는 내경부에 비해 외경부의 공작물 상대속도가 중심으로부터의 거리에 계속해서 증가하게 되므로, 절입깊이, 휠 및 공작물의 회전수, 가공중심으로부터의 거리에 의해 결정된다.



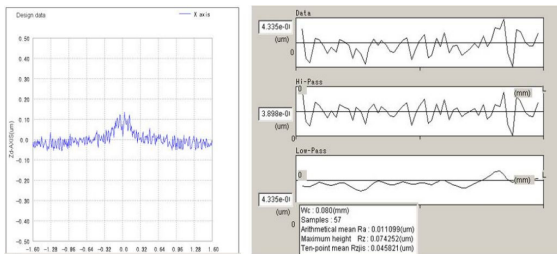
(a) Feed direction (b) Rotation direction
Fig. 5 Undeformed chip thickness

Fig. 5 에서와 같이 회전대칭 초정밀 연삭가공에서는 렌즈 직경에 비해 휠의 회전속도가 빠르고, 휠의 절입깊이가 0.2~1 um/cycle 로 작아 이송방향이 회전방향에 비해 미변형 칩두께에 대한 영향이 지배적이다. 이러한 가정은 실제 가공면의 취성균열이 가공면의 공구궤적을 따라 발생하는 것을 통

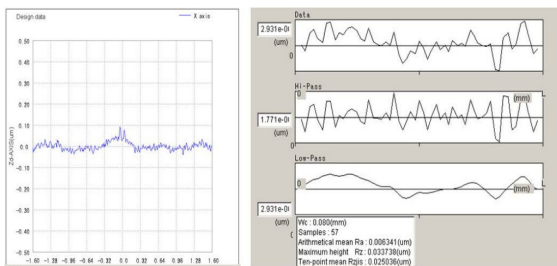
해 확인할 수 있다. 즉 공작물의 연성모드 연삭을 위한 미변형 칩두께는 피치 방향의 두께가 주요 변수가 된다. 실험결과를 통해 확인된 임계 조건은 가공조건하에서 휠의 궤적사이의 거리에 민감하게 반응하며, 이송속도(Feed rate) 1mm/min, 절입 깊이(Depth of cut) 0.2um, 공작물 회전속도(Work speed) 700rpm, 스톨 회전속도(Wheel speed) 47000rpm 의 가공 조건에서 $D_{critical} \approx 0.3um$ 을 얻을 수 있었다. 이송방향의 미변형 칩두께가 동일하게 되는 조건은 취성 균열이 휠 궤적면의 외경부에서 동일하게 나타나는 현상을 설명해주는데, 이는 취성 균열의 발생이 가공 측면에서 전체적으로 발생하나, 실제로는 가공과정에서 제거되고 공구궤적의 외경 하단부(Crack generation)에서 발생되기 때문으로 생각된다.



Fig. 6 Glassy carbon core for GMP lens



(a) Ground surface



(b) Polished surface

Fig. 7 Surface profile (before and after polishing, ductile)

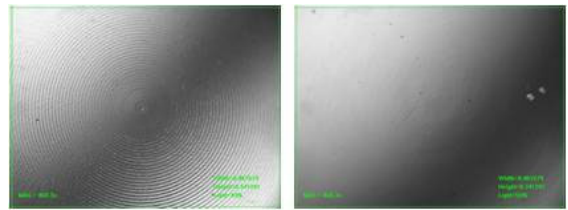
4. 비구면렌즈 성형

4.1 Glassy carbon 금형 코어

Fig. 6 은 렌즈 성형을 위한 Glassy carbon 상하 금형코어로 연성모드가공면의 검증을 위해 유리 렌즈성형에 적용되었다. Fig. 7(a)는 가공 완료된 금형코어의 연성모드 연삭면으로 형상정도 0.19um PV 와 표면조도 11nm Ra 를 보이며, 폴리싱후 (b) 와 같이 형상정도 0.13um PV, 표면조도 6nm Ra 로 향상되었다. 이러한 결과는 앞의 Fig. 3 의 취성모드 연삭면이 폴리싱 공정에서 취성 균열이 이탈되어 형상정도가 악화되는 경우와 비교할 수 있다.

4.2 렌즈 성형면

성형 렌즈면은 Fig. 8(a)에서와 같이 취성가공 금형을 적용한 성형면의 경우 휠궤적에 따라 취성 균열부가 탈락하고, 탈락부의 형상정도 및 표면조도가 렌즈면에 전사된다. 이러한 렌즈면의 경우 전면에 뿌연 외관을 보이며 광학적 성능이 악화된다. 반면 (b)의 연성모드 연삭면의 전사면의 경우 궤적면에서 탈락이 발생하지 않는다.



(a) Brittle crack lens

(b) Ductile mode lens

Fig. 8 Surface image of GMP lens

5. 결론

본 연구는 Glassy carbon 을 적용한 렌즈성형용 금형코어의 개발을 위해 연성모드 연삭조건에 관한 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Glassy carbon 은 경취성 재료로 미변형 칩두께에 의해 연성모드와 취성모드의 가공결과를 보였다.
- 2) 취성균열은 주로 이송방향의 칩두께가 주요 변수이며, 회전방향 칩두께는 거의 영향을 미치지 않았다.
- 3) 연성모드로 가공된 Glassy carbon 금형코어를 사용하여 이형막없이 렌즈를 성형한 결과 전사성이 양호한 광학면을 얻었다.

참고문헌

1. http://en.wikipedia.org/wiki/Glassy_carbon
2. Jang, K. I., Lee, M. K., Seok, J. and Min, B. K., "A Study of Mechanical and Chemical machining characteristics of glassy carbon," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 91-92, 2009.
3. Brinksmeier, E., Mutlugünes, Y., Klocke, F., Aurich, J. C., Shore, P. and Ohmori, H., "Ultra-precision grinding," CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 59, No. 2, pp. 652-671, 2010.
4. Lee, D. K., Kim, H. U., Cha, D. H., Lee, H. S., Kim, H.-J. and Kim, J.-H., "A Study on Thermal Deformation Compensation in the Molding of Aspheric Glass Lenses," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 27 No. 5, pp. 22-26, 2010.
5. Kim, H. U., Cha, D. H., Lee, D. K., Kim, S. S., Kim, H.-J. and Kim, J.-H., "Coating Effect of Molding Core Surface by DLC and Re-Ir Coating," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 26 No. 1, pp. 51-56, 2009
6. Lee, S. K., Miyamoto, Y., Kuriyaga-wa, T. and Syoji, K., "Effects of minimizing hydrodynamic pressure in ultra-precision mirror grinding," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 44, No. 10, pp. 1031-1036, 2004.