

## BK7의 평행축 연성모드 연삭가공

이현성\*, 김민재<sup>+</sup>, 구할본<sup>++</sup>, 황 연<sup>+++</sup>, 김혜정<sup>+++</sup>, 김정호<sup>+++</sup>  
(논문접수일 2011. 05. 07, 수정일 2011. 09. 26, 심사완료일 2011. 09. 27)

### Dutile Regime Parallel Grinding of BK7

Hyeon sung Lee\*, Min Jae Kim<sup>+</sup>, Hal Bon Koo<sup>++</sup>, Yeon Hwang<sup>+++</sup>, Hye Jeong Kim<sup>+++</sup>, Jeong Ho Kim<sup>+++</sup>

#### Abstract

Conventional grinding of BK7 glass will normally result in brittle fracture at the surface, generating severe sub-surface damage and poor surface finish. The precision grinding of BK7 glass in parallel grinding modes has been investigated. Grinding process, maximum chip thickness, ductile/brittle regime, surface roughness and sub-surface damage have been addressed. Special attention has been given to the condition for generating a ductile mode response on the ground surface. Experiments reveal that the level of surface roughness and depth of sub-surface damage vary differently for different condition. This study gives an indication of the strategy to follow to achieve high quality ground surfaces on brittle materials.

**Key Words** : Optics(광학), BK7(Borosilicate crown glass, 붕규산염유리), Parallel grinding(평행축 연삭가공)

## 1. 서론

최근 광학기기의 소형화, 고화질화의 추세에 따라서 광학계의 중요한 부분인 렌즈의 광학특성 향상을 위한 비구면 렌즈 개발이 요구되고 있다. 소재 측면에서는 플라스틱 소재의 광학적 한계를 극복하기 위해 굴절율, 색수차, 투과율 등이 좋은 유리 소재의 사용이 점차 증가하고 있다. 이러한 광학유리는 화소 수가 증대함에 따라 기존의 플라스틱 소재를 이용한 렌즈에서 유리렌즈로 대체되고 있는데 그 경제성과 광학 모듈의 경박단소로 구면렌즈에서 비구면 렌즈로 변화하고 있다.

비구면 유리 렌즈의 제조법은 크게 양산형 몰드성형법과 단품 제작을 위한 직접 가공법의 두 가지로 분류된다. 몰드성형법의 경우, 초경소재등의 금형을 이용해 대량으로 렌즈를 성형하는 방식

이며, 대부분의 상용렌즈 제조에 적용된다. 또한 고정도의 대형 렌즈의 경우에는 직가공에 의해 렌즈를 가공하게 되며, 레이저용 광학부품과 적외선 광학계의 제조 등에 활용된다. 특히 Ge나 BK7 등의 광학 유리소재는 취성재료로서 재료의 물성을 고려한 가공 조건이 요구된다. 이는 연삭가공 중에 발생하는 경취성 재료의 거동으로 설명되며, 이러한 경우 가공이 연성 모드에서 가공되어야 내부크랙을 최소화 할 수 있으며, 가공변질층을 줄일 수 있다.

본 연구에서는 방송용 카메라 비구면 Mock-up 렌즈의 제조를 위해 BK7에 대한 초정밀 평행축 연삭가공의 가공조건에 대한 실험을 수행하였고, 실험의 진행은 40mm의 BK7에 대하여 이상의 렌즈가공경에서 취성 크랙을 최소화 하기 위하여 공작물 이송속도, 공구스핀들의 회전속도, 휠의 입자크기, 연삭액 등의 가공 조건을 최적화 하는 방향으로 진행되었다.

\* 전남대학교 전기공학과 (carryhs23@kopti.re.kr)  
주소: 500-757 광주시 용봉로 77

+ 전남대학교 광공학협동과정

++ 전남대학교 전기공학과

+++ 한국광기술원

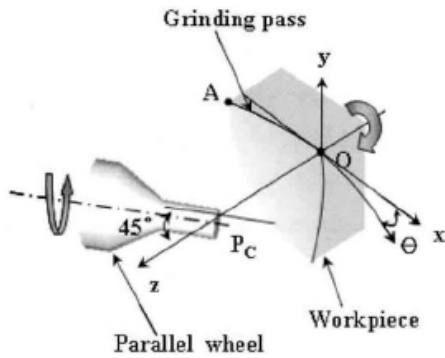


Fig. 1 Parallel grinding method

## 2. 이론

### 2.1 평행축 연삭(Parallel grinding)

비구면 가공은 종래의 구면 가공과는 달리 공구의 운동궤적의 정밀한 전사에 의존할 수밖에 없다. 연마가공은 운동궤적의 전사성이 나쁘므로 가능한 연마량을 적게 하며, 연마 렌즈에서 정면가공이 가능하다면 형상정도가 높은 비구면 가공이 가능해진다.

축대칭 비구면 연삭법으로서 평행축(Parallel) 연삭법이 있다. Fig. 1은 평행축 연삭법을 도식화한 그림으로 수직상방 즉, Y축 방향에서 본 그림으로 평행축 휠을 사용하여 공작물과의 간섭을 피하기 위해 휠 축을 X축 방향에 대해서 교차각  $\alpha$ 만큼 기울여져 있다. 이 방법은 수직축과 경사축 연삭방법에 비해 다음과 같은 특징을 가진다.

- (1) 연삭점에 있어서 공작물의 회전방향과 휠의 주축 벡터 방향이 평행이 되므로 마무리가공 면조도가 좋다.
- (2) 실제 가공 시 접촉 영역이 휠 선단부에 국한된다.
- (3) 특히 오목면의 경우 휠, 공작물 간의 상대곡률을 작게 할 수 있기 때문에 양호한 마무리가공 표면 거칠기를 기대할 수 있다.
- (4) 동일한 휠의 영역으로 전체구간을 가공한다.

특히 (4)는, 휠 마모가 최소화되면, 형상 구현이 유리하기 때문이다. 평행축 연삭법에서는 경사축 연삭 방식에 비해 휠의 연삭 유효폭이 비약적으로 증대한다. 따라서 휠의 마모는 현저히 감소하는 것을 기대할 수 있다. 또한, 종래의 경사축 연삭에서 토러스형상의 원호단면 휠을 사용할 경우는 공구궤적의 계산이 다소 복잡해지나 평행축 연삭에서는 연삭점은 휠 축 방향에 2차원적으로 이동 할 뿐이므로 계산은 용이하다.

### 2.2 최대미변형칩두께( $h_{max}$ )

기존의 연구에 따르면 Fig. 2는 균일형상 및 균일분포의 연삭 슛들에 의한 평면하향연삭공정에서 공작물이 이송하는 것을

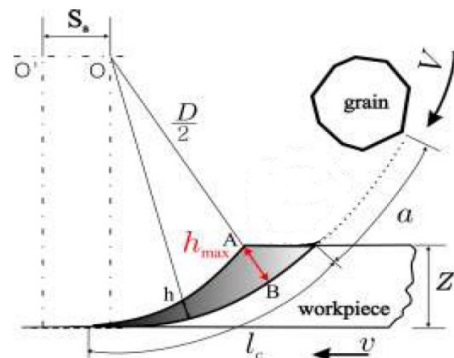


Fig. 2 Cutting path of grain in down-surface grinding process

대신 하여 연삭스튐이 입자 당  $S_a$ 만큼 이송하면서 회전할 때 연삭입자의 절삭궤적을 나타낸 것이다. 그림에서  $l_c$ 는 연삭스튐과 공작물의 접촉길이를 나타내며,  $a$ 는 연속절삭날간격을 나타낸 것이다. 또한 그림에서 연삭입자의 최대미변형칩두께  $h_{max}$ 는  $\overline{AB}$ 로 표시되며 근사적으로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다<sup>(2)</sup>.

$$h_{max} = 2a \frac{v}{V} \left( \frac{Z}{D} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

식 (1)에서  $a$ 는 연삭스튐의 연속절삭날간격(Successive cutting point spacing)이며,  $v$ 는 공작물 속도,  $V$ 는 연삭스튐의 원주속도,  $Z$ 는 절입깊이, 그리고  $D$ 는 연삭스튐의 직경을 나타낸다. 이들 인자 중  $v$ ,  $V$  및  $Z$ 는 연삭조건(Grinding conditions)을 구성하는 인자이며,  $D$ 는 슛돌형상을 나타내는 인자로서 이들의 값은 연삭가공 전에 미리 설정 하여주는 값이다. 한편, 연삭 특성을 나타내는 기본적인 파라미터인 연속절삭날간격  $a$ 는 연삭방향으로 정렬하고 있는 인접입자 간의 간격으로 통상 실험에 의한 측정으로 구하여 왔다. 그러나 실험의 여러 문제점으로 의해 최대미 변형칩두께  $h_{max}$ 는 연삭공정에서 중요한 파라미터임에도 불구하고 실용적인 활용에 한계가 있어왔다. 본 논문에서는 평면하향연삭 가공공정에서 평균입자 연삭모델을 이용하여 이론적인 연속절삭날간격  $a$ 와 이를 근거로 최대미변형칩두께  $h_{max}$ 를 예측하였다.

## 3. 실험방법 및 결과

### 3.1 실험 장치

실험에는 고속구심 연마기를 적용하여 초기상태가 Crack이 없는 상태로 만들었고, 초정밀가공기(일본, Nachi社, ASP01)의 연삭모드 가공을 수행하였으며, 공구 현미경을 통해 가공면을 관찰하였다.

광학 유리(BK7)는 붕규산염 유리(Borosilicate crown glass)로 물성은 아래 Table 1과 같으며, Table 2는 가공에 사용된

**Table 1 BK7 Properties**

$n_d$	1.517
$V_d$	64.2
Thermal Conductivity( $\text{cm}^2\text{sec}^\circ\text{C}$ )	0.0026
Coefficient of Thermal Expansion( $\text{cm}/\text{cm}^\circ\text{C}$ )	83
Knoop Hardness	520
Young's Modulus( $\text{Kh}/\text{cm}^2$ )	$8.63 \times 10^6$
Poisson's Ration	0.208

**Table 2 Grinding Wheel**

Grain(#)	8000	4000	2000
Abrasive Grit	SD	SD	SD
Dia(mm)	10	10	10
Grade	Resin	Resin	Resin
Maker	ALMT	ALMT	Noritake



**Fig. 3 Spherical center polishing machine**

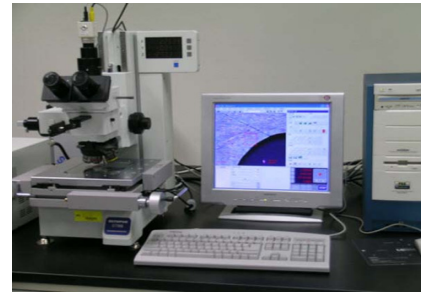


**Fig. 4 Ultra precision machine(ASP01)**

획을 나타낸다.

본 연구에서 사용한 고속 구심연마기는 Fig. 3과 같이 가공기 상축(가압축)의 가압방향을 곡률중심의 회전선상에 설정하고 하축(주축)이 곡률중심을 축에서 요동한다.

유리 렌즈 직가공을 위해 초정밀 연삭가공이 가능한 초정밀가공기를 사용하였다. 본 가공기는 2개의 유정압 슬라이드가 직교 형태로 구동하는 3축 가공기로서 유정압 베어링에 의해 구동되는 B축 Rotary Table에 공기 터빈 스피들이 장착되어 비구면 가공이 가능한 초정밀가공기이다. 안내면의 위치정밀도는



**Fig. 5 Optical microscope(STM6)**



**Fig. 6 Surface roughness measuring instrument(Newview5000)**

1nm의 정도를 가지며, 최대 가공 직경 150mm의 공작물 가공이 가능하다. 안내면의 구동은 AC Servo Motor에 의해 구동된다. 초정밀가공기는 Clean room class 10,000의 항온실에 설치되어 주변온도  $22 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지하고, 진동에 의한 영향을 피하기 위하여 특수 설계된 제진대 위에 설치하였다.

가공렌즈의 표면을 관찰하기 위해서 Fig. 5의 광학 현미경(STM6 Olympus社, Japan)을 이용하여 연삭 후 공작물의 표면을 살펴보고, Fig. 6의 표면거칠기 측정기기(Newview5000, Zygo社, USA)를 이용하여 표면 조도를 살펴 보았다.

### 3.2 실험방법

연삭가공의 연성모드 가공조건을 찾기 위해, 주축회전 속도(Work Spindle), 이송속도(Feed Rate), 연삭 깊이(Depth of Cut), 터빈 회전속도(Turbin Spindle), 입도(Mesh)를 실험 변수로 사용하였으며, 실험 결과는 아래 Table 2,3,4,5과 같다.

### 3.3 실험결과

Table 3과 같이 Work Spindle에는 Fig. 4와 같이 Wheel 형상보정이 불가능할 정도의 마모량이 심하게 나타났고, Table 4, Table 5에서와 같이 이송속도가 클 경우 표면에 가해지는 하중이 임계하중 이상이 되어서 취성모드 연삭이 되는 것으로 판단된다. Fig. 8(a)에서는 중심으로부터 약 3mm와 8.3mm 회전경에서 연성모드와 취성모드가 전환되는 영역을 발견하였다. 이 영역은 취성모드에 의한 취성 크랙이 발생하는 임계조건으로 판단된다. 또한 초기에 취성 크랙이 발생한 경우 연성모드 조건

**Table 3 Experiments Condition(Work Spindle)**

No	Work Spindle	Feed Rate	Depth of Cut	Turbin Spindle	Mesh	Mode
1	150rpm	4mm/min	0.5um	47000rpm	#2000	Brittle
2	350rpm	4mm/min	0.5um	47000rpm	#2000	Brittle
3	500rpm	4mm/min	0.5um	47000rpm	#2000	Brittle

**Table 4 Experiments Condition(Feed Rate)**

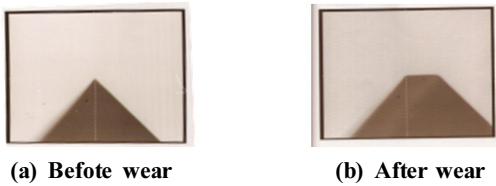
No	Work Spindle	Feed Rate	Depth of Cut	Turbin Spindle	Mesh	Mode
4	350rpm	4mm/min	0.5um	47000rpm	#2000	Brittle
5	350rpm	1mm/min	0.5um	47000rpm	#2000	Brittle
6	350rpm	0.3mm/min	0.5um	47000rpm	#2000	Brittle

**Table 5 Experiments Condition(Depth of Cut)**

No	Work Spindle	Feed Rate	Depth of Cut	Turbin Spindle	Mesh	Mode
7	350rpm	4mm/min	0.1um	47000rpm	#2000	Brittle
8	350rpm	4mm/min	0.2um	47000rpm	#2000	Brittle
9	350rpm	4mm/min	0.3um	47000rpm	#2000	Brittle

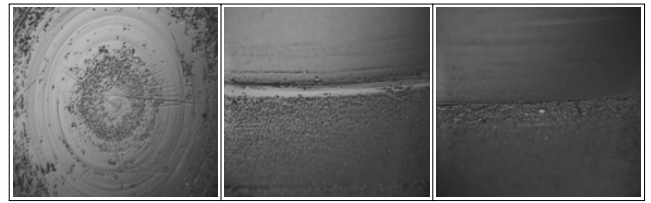
**Table 6 Experiments Condition(Mesh)**

No	Work Spindle	Feed Rate	Depth of Cut	Turbin Spindle	Mesh	Mode
10	500rpm	5mm/min	0.3um	47000rpm	#2000	Brittle
11	500rpm	5mm/min	0.3um	47000rpm	#4000	Partial Ductile
12	500rpm	5mm/min	0.3um	47000rpm	#8000	Ductile



**Fig. 7 Wheel wear**

으로 연삭을 수행하여도 내부로 전이됨을 확인 하였다. Table 6 에서는 가공변수도 휠의 입도를 변화 시켜 진행하였으며, 실험 조건 11과 12에서와 같이 입도 조건이 #4000 이상일 경우 Fig. 8(b)와 같이 연성모드 연삭면이 생성되는 것을 확인하였으나, 일부구간에서는 공구진동 등에 의해 툴 마크가 발생하였다. Fig. 9의 표면분석결과 표면거칠기는 3mm를 관찰하였고, 이 결과 실험조건 9번에서 연성에서 취성으로 바뀌는 경계조건에 높이 차가 관찰 되었다. Fig. 10에서 SEM측정 결과 렌즈 중앙면에서 취성 크랙이 발생한 것을 확인할 수 있었다.

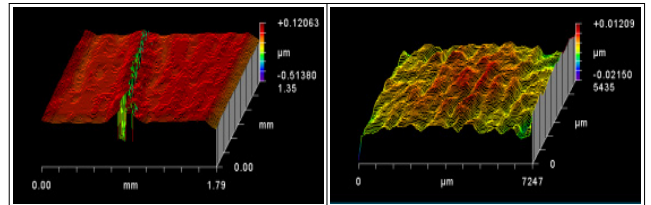


**(a) Measurement result of No. 9**



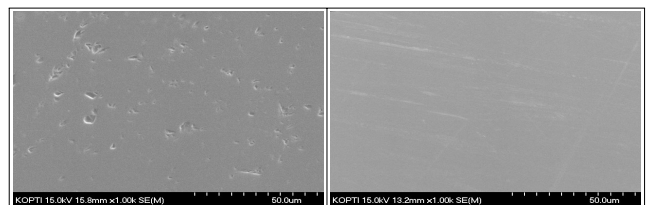
**(b) Measurement result of No. 12**

**Fig. 8 Measurement Result of Optical Microscope**



**No. 9 No. 12**

**Fig. 9 Measurement Result of Surface Roughness**



**No. 9 No. 12**

**Fig. 10 Measurement Result of Crack**

## 4. 결론

본 연구에서는 BK7에 대한 평행축 연삭의 연성모드 가공조건을 위한 실험을 수행하였으며, 결론은 다음과 같다.

- (1) 연성 모드 가공 조건중 가장 민감한 요소는 연마입자의 크기이며, 해당 실험의 경우 입도 #4000이상. Depth of Cut 0.3um 이하일 경우 연성모드 연삭이 약 3mm 이하의 가공 영역에서 관찰되었다.
- (2) 취성크랙은 일단 발생하면 내부로 확산되어 전영역으로 확산되므로 가공 초기부터 연성모드 연삭이 요구된다.
- (3) 연성모드 연삭부에서는 툴마크의 발생이 가능하므로 이를 해결하기 위한 접근이 요구된다.

## 참 고 문 헌

- (1) Sun, X., 2006, "An Investigation into Parallel and Cross Grinding of BK7 Glass," *Precision Engineering*, Vol. 30, No. 2, pp. 145~153.
- (2) Kuriyagawa, T., Syoji, K., and Zhou, L., 1996, "Precision Form Truing and Dressing for Aspheric Ceramic Mirrors," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 62, No. 4, pp. 387~392.
- (3) Bifano, T., Dow, T., and Scattergood, R., 1988, "Ductile Regime Grinding of Brittle Materials: Experimental Results and the Development of a Model," *SPIE*, Vol. 966, No. 32, pp. 108~115.
- (4) Blake, P. N., Scattergood, R. O., 1990, "Ductile Regime Machining of Germanium and Silicon," *Journal of the American Ceramic*, Vol. 73, No. 4, pp. 949~957.
- (5) Golini, D., 1990, "Transition Between Brittle and ductile Mode in Loose Abrasive Grinding," *SPIE*, Vol. 1333, No. 80, pp. 80~91.
- (6) Ahn, B. W., 2006, "Characteristic of Ductile Regime AFM Machining Using Acoustic Emission," *Journal of Korean Society of Manufacturing Tool Engineers*, Vol. 15, No. 4, pp. 15~21.
- (7) Kim, D. W., 2010, "Analysis of Material Removal Rate of Glass in MR Polishing Using Multiple Regression Design," *The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 19, No. 2, pp. 184~190.
- (8) Kwac, L. K., 2006, "Real-time Motion Error Time and the Thermal Error Compensation of Ultra Precision Lathe," *Journal of Korean Society of Manufacturing Tool Engineers*, Vol. 15, No. 4, pp. 44~48.