

# 초정밀가공기를 이용한 Zerodur의 연삭 특성에 관한 연구

김주환\*, 김건희+, 한정열++, 김석환+++, 원종호++++

## A Study on the Characteristics of Zerodur Grinding using Ultra-Precision Machine

Ju-Hwan Kim\*, Geon-Hee Kim+, Jeong-Yeol Han++, Sug-Whan Kim+++, Jong-Ho Won++++

### Abstract

We explored a new rough grinding technique on optics materials such as Zerodur. The facility used is a NANOFORM-600 diamond turning machine with a custom grinding module and a range of diamond resin bond wheel. The grinding parameters such as workpiece rotation speed, depth of cut and feed rate were altered while grinding the workpiece surfaces of 20mm in diameter. Surface roughness is measured by Form Talysurf series2. Our target is to define grinding conditions producing the surface roughness better than  $0.02\mu\text{m}$  Ra and the form accuracy of around  $0.2\mu\text{m}$  PV.

**Key Words :** Grinding (연삭), Surface roughness (표면거칠기), Optics material (광학 재료), PV(peak-to-valley)

## 1. 서론

인공위성은 자원탐사, 해양, 기상, 환경, 통신, 방송, 정찰 등에 활용되고 있으며, 그 활용도는 재난, 구조, 원격진료, 신소재 및 신의약품 개발 등으로 갈수록 증가하고 있다. 우주기술이 핵심기술의 하나로서 주도하는 21세기에 들어와서, 우리나라도 우주개발에 적극적으로 참여하고 있다. 1992년에 발사된 우리별 1호를 시작으로 과학 위성들이 개발되었으며, 1995년부터 통신 방송위성인 무궁화 위성들

이 발사되어 상업적으로 이용되고 있다.<sup>(1)</sup>

현재 우리나라는 세계 18위의 인공위성 보유국이 되었으며, 앞으로도 독자적인 우주개발능력을 확보하기 위하여 많은 노력을 경주하고 있다. 이러한 노력의 일환으로 인공위성의 광학계를 구성하고있는 우주광학 소재 즉, Zerodur의 초정밀 가공에 관한 연구의 필요성이 대두되고 있다.

우주광학소재로 사용되는 Zerodur 소재는 인공위성체의 제작, 조립 및 시험 단계, 발사 시 진동, 가속도, 대기열,

\* 충남대학교 대학원 기계공학과 (kjh@kbsi.re.kr)  
주소: 305-764 대전광역시 유성구 궁동 220  
+ 한국기초과학지원연구원  
++ 연세대학교 대학원  
+++ 연세대학교 천문우주학과  
++++ 충남대학교 기계공학과

소음 등의 발사단계와 우주환경에서의 복사, 열, 진공, 미세중력, 우주파편, 지구자기장, 위성체 대전 등 위성운용단계에서의 극한환경에서도 원래의 사용목적에 부합하도록 작동해야하므로 물리적 특성 특히, 열적 특성이 강하도록 물질을 합성하여 만든 소재이다.

현재 국내에서 Zerodur 소재의 초정밀 연삭은 시도된바가 없으며, 해외에서는 연삭 실험이 이루어 졌으나 그 자료가 공개되지 않아 독자적인 우주개발 능력을 확보하기 위해서는 소재 가공에 관한 데이터베이스화는 매우 중요하고 시급한 과제이며, 나아가 연삭 특성을 이해하는데 매우 중요한 의미가 있다고 하겠다.

현재 사용되고 있는 Glass의 가공은 주로 광학 망원경의 소재로서 사용되는 것이 일반적인데, 주로 자외선, 가시광선, 적외선 영역에서의 관측을 목표로 하고 있다. Zerodur 소재는 광학 영역중 특히 자외선 영역의 관측을 위하여 사용되는 소재로서 상대적으로 큰 에너지를 감지해야하므로 열팽창 계수가 극히 작아서 열에 대한 변형에 우수한 성능을 발휘해야하며, 광학적 특성상 표면거칠기는  $0.02\mu\text{m Ra}$ , 형상정밀도는 약  $0.2\mu\text{m PV}$  이하의 수치를 가져야한다.<sup>(2),(3)</sup>

본 연구에서는 초정밀 연삭 시스템을 이용한 Zerodur의 연삭가공 특성을 파악하여 소재에 대한 데이터베이스를 확보하고, 자외선 영역에서의 성능을 충분히 발휘하도록 소재 가공을 위한 최적 연삭 조건을 DB화하는 것을 목적으로 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

본 연구에 사용된 초정밀가공기는 RTH사의 Nanoform 600 다이아몬드 터닝머신(DTM)이다.

다이아몬드 터닝머신은 두 개의 유정압 안내면과 공작물을 고정시키는 공기정압 베어링 스피들로 구성되어 있다. 두 안내면은 각각 X축과 Z축으로 "T" 형태의 직교를 이루며 구동한다. X축의 중심부에 해당하는 안내면에 주축 스피들이 고정되어 회전하며, 안내면의 구동방향과 평행을 이루며 회전한다. Z축 구동안내면 위에는 공구대가 고정되어 연삭휠을 설치 할 수 있으며, 스피들 구동 방향과 수직방향으로 구동한다.

안내면의 위치결정정도는  $0.25\mu\text{m}/300\text{mm}$ , 분해능은 1.25nm의 성능을 가지고 있으며, 선삭의 경우 최대  $\varnothing 600\text{mm}$ (125kg), 연삭의 경우  $\varnothing 300\text{mm}$ 까지 가공이 가능하다.

Fig.1은 초정밀 가공 시스템을 나타낸다.

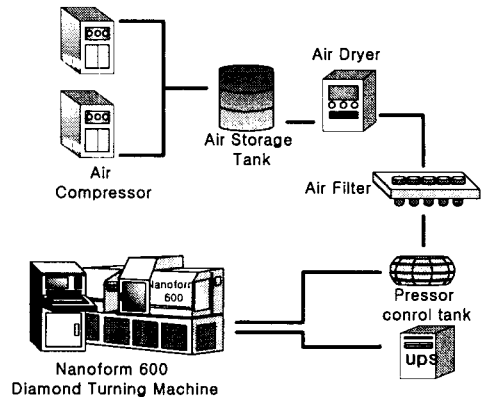


Fig. 1. The system of ultra precision lathe

초정밀 가공실은 온도  $20\pm 1^\circ\text{C}$ , 습도  $30\pm 5\%$ , Clean Room class 10,000인 항온항습의 크린룸이며, 장비의 진동방지를 위한 독립지반구조로서 장비 하부는 3Point Air Bag으로 지지된다.

표면거칠기 측정장비로는 Talyer Hobson사의 비구면 측정기인 Form Talysurf series2를 사용하였다.

Fig. 2는 가공된 Zerodur의 표면거칠기를 측정하는 모습이다.

접촉식 표면거칠기 측정기인 Form Talysurf series2의 측정범위는 120mm이며, 정밀도는  $0.5\mu\text{m}/120\text{mm}$ ,  $0.2\mu\text{m}/20\text{mm}$ 이고 분해능은  $0.25\mu\text{m}$ 이다.

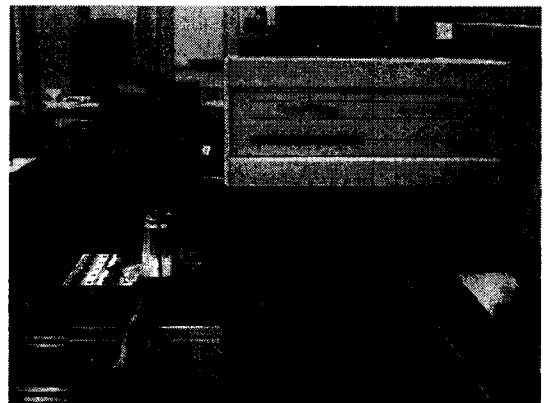


Fig. 2. Measurement of workpiece

연삭 실험에 사용된 재료는 우주광학 소재로 사용되는 Zerodur이며, 소재의 물리적 특성은 Table 1과 같다. 또한 가공에 사용된 공구는 외경 10mm, 두께는 5mm, #300 레진 본드 결합제의 다이아몬드 휠을 사용하였다.

**Table 1 Physical properties of Zerodur**

Property	Value	Units
Density	2.53	gm/cc
Hardness	620	Knoop
Modulus of Elasticity	$13 \times 10^6$	psi
Poisson's Ratio	0.243	
Coefficient of Thermal Expansion	$0.0 \pm 0.1$	$\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Thermal Conductivity	1.46	W/m $^{\circ}\text{k}$
Max. Working Temp.	600	$^{\circ}\text{C}$

## 2.2 실험방법

Zerodur의 초정밀 최적 연삭 조건을 찾기 위하여 연삭 깊이, 이송속도와 공작물 회전속도에 대한 표면거칠기를 측정하여 최적 가공조건을 찾았다.

**Table 2 Grinding conditions**

Item	Grinding conditions
Feed rate (mm/min)	4, 8, 16, 24, 32
Depth of cut ( $\mu\text{m}$ )	1, 2, 4, 8, 16
Speed of workpiece (rpm)	240, 320, 400
Speed of wheel (rpm)	24750
Grit of wheel (#)	300

Table 2는 본 실험에 선정된 연삭 조건들을 나타낸 것이다. 다이아몬드 휠의 그리트는 #300을 사용하였으며, 다이아몬드 휠의 회전속도를 24750rpm, 공작물의 회전속도를 400rpm으로 고정시키고, 이송속도를 4~32mm/min범위에서 이송속도 변화에 따른 표면거칠기의 변화를 확인하여 최적 이송 속도를 구하였다. 또한 같은 조건으로 연삭 깊이를 1~16 $\mu\text{m}$ 까지 다양하게 변화시키면서 연삭 깊이에 따른 표면거칠기를 측정하였으며, 드레싱에 따른 연삭 특성을 파

악하기 위하여 드레싱 전과 후의 표면거칠기를 연삭깊이를 변화시키면서 관찰하였다.

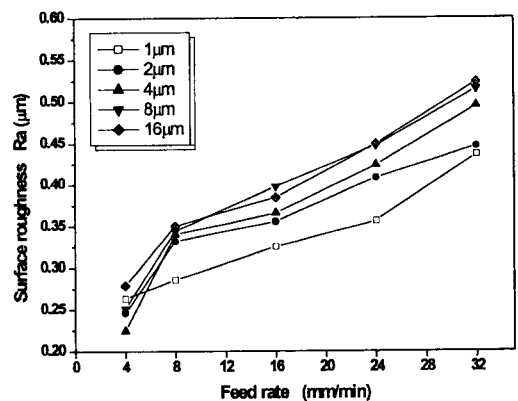
Form Talysurf series2에 의한 표면거칠기의 측정은 가공된 Zerodur의 외측과 내측을 여러 번 측정하여 평균한 값을 사용하였으며, 중심선 평균거칠기인 Ra에 대한 고찰을 통하여 시편의 연삭 가공 특성을 파악하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 이송속도에 따른 표면거칠기의 평가

Fig. 3은 공작물 회전속도 400rpm, 다이아몬드 휠 회전속도를 24750rpm으로 고정하고, 이송속도 변화에 따른 표면거칠기를 측정된 결과이다.

이송속도에 따른 표면 거칠기는 터닝에서 일반적으로 비례관계에 있다. 본 연삭 가공에서는 Fig. 3과 같이 각각의 연삭 깊이에 대하여 연삭 이송속도에 따른 표면 거칠기 값이 증가하는 경향을 살펴볼 수 있다. 또한, 연삭 깊이가 증가함에 따라 대체적으로 표면 거칠기도 함께 증가한다는 것을 알 수 있다. 즉, 본 연삭 가공을 통하여 측정된 표면 거칠기와 이송속도의 관계는 터닝에서의 일반적인 경향과 일치하는 것을 볼 수 있다. 여기서, 연삭 이송속도가 약 10mm/min 증가할 때마다 표면 거칠기는 0.0745nm의 비율로 증가하는 경향을 살펴볼 수 있었으며, 이는 연삭 가공 시 이송속도에 따라 전체 연삭 시간이 결정되어 연삭 가공에서의 진행시간을 가능해볼 수 있는 중요한 의미가 있다고 하겠다.



**Fig. 3. Relationship between feed rate and surface roughness(Ra)**

(Workpiece speed : 400rpm, Wheel speed : 24750rpm)

### 3.2 연삭 깊이에 따른 표면거칠기의 평가

연삭 깊이에 따른 표면 거칠기는 터닝에서 일반적으로 비례관계에 있다. 본 연삭 가공에서는 다음 Fig. 4와 같이 연삭 깊이에 따른 표면거칠기를 살펴보았다. 연삭 이송속도가 8mm/min보다 큰 영역에서의 연삭 깊이에 따른 표면거칠기 값은 연삭 깊이가 4 $\mu$ m 이상에서는 거의 변화가 없는 경향을 나타내고 있다. 즉, 4 $\mu$ m 이상의 연삭 깊이에 대해서는 연삭 속도의 영향을 거의 받지 않는 것을 볼 수 있는데, 이는 연삭 휠이 현재 황삭용이며, 다이아몬드 연삭 스톨 입자가 #300으로 약 85 $\mu$ m의 크기를 갖기 때문에 4 $\mu$ m 이상의 연삭깊이의 가공은 연삭 휠이 소재표면을 닦을 때의 힘이 거의 일정하여 소재 연삭에 따라 표면 거칠기가 일정한 것으로 해석해볼 수 있다. 이는 다이아몬드 연삭 스톨 입자가 작은 큰 연삭 휠을 사용한 향후 실험을 통해 좀 더 살펴볼 예정이다.

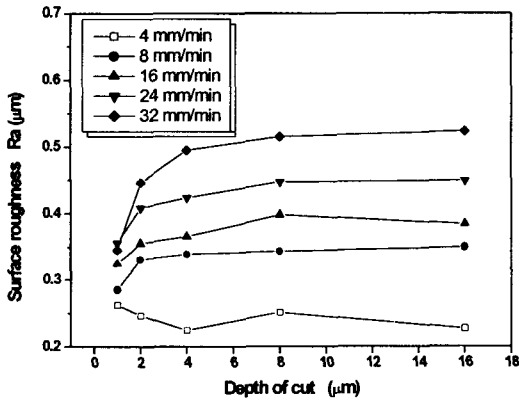


Fig. 4. Relationship between depth of cut and surface roughness(Ra)  
(Workpiece speed : 400rpm, Wheel speed : 24750rpm)

### 3.3 공작물의 회전속도에 따른 표면거칠기의 평가

Fig. 5는 연삭깊이를 1 $\mu$ m, 다이아몬드 휠의 회전속도를 24750rpm으로 고정하고 공작물의 회전속도를 240rpm~400rpm까지 변화시키면서 공작물 회전속도변화에 따른 표면거칠기의 영향을 살펴보았다.

이송속도 변화에 대한 각각의 공작물 회전속도에 따른 표면거칠기의 변화는 이송속도가 증가함에 따라 비례적으로 증가하는 것을 볼 수 있으며, 각각의 공작물 회전 속도에 따른 차이는 크게 나타나지 않았지만 이송속도 16mm/min이하에서 공작물 회전 속도 320rpm의 경우 양호한 결과를 얻

을 수 있었다. 반면 그 이상의 이송속도에서는 오히려 표면 거칠기가 증가하는 것을 볼 수 있다. 향후 다양한 회전속도에 대한 표면거칠기 평가를 계획하고 있다.

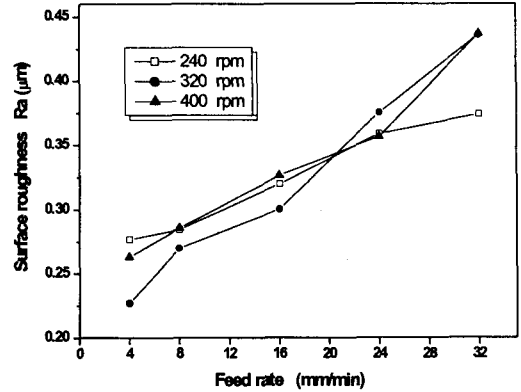


Fig. 5. Relationship between speed of workpiece and surface roughness(Ra)  
(Depth of cut : 1 $\mu$ m, Wheel speed : 24750rpm)

### 3.4 연삭휠의 드레싱에 따른 평가

각각의 연삭실험 조건에 따른 정량적인 표면거칠기 값을 얻기 위해서는 드레싱 후 일정량의 연삭이 이루어진 후에 일관성 있는 측정값을 얻을 수 있었다.

연삭휠을 드레싱한 후 곧바로 연삭한 실험 데이터의 경우 연삭 이후 약 10회 정도의 연삭이 이루어지고난 후에 측정된 실험데이터와 그 경향이 달라지는 것을 본 연삭 실험을 통하여 확인 할 수 있었다. 이러한 경향에 대해 좀 더 살펴보고자 일정한 연삭 이송속도에 대하여 연삭 깊이에 따른 표면 거칠기 값을 측정해 보았다. 이전의 연삭 결과에서 살펴본 바와 같이 연삭 깊이에 따른 표면 거칠기 값은 거의 일정함을 Fig. 6을 통하여 볼 수 있는데, 드레싱 이후 측정된 표면 거칠기 값은 연삭 깊이가 증가함에 따라 급격히 감소하는 경향을 볼 수 있었으며, 약 5회의 연삭실험 이후 2 $\mu$ m의 연삭 깊이에 대하여 재 실험을 수행한 결과 동일한 연삭 조건에 대하여 그 값이 다음 Fig. 6과 같이 0.065nm 정도의 차이가 나타나는 것을 볼 수 있었다. 이러한 수치는 연삭가공의 경향성을 살펴보는 데 있어 상당한 혼동의 여지가 있게 된다. 그러므로 본 연삭 가공에서 의미 있는 표면 거칠기 값을 얻고자 한다면 일정한 연삭가공이 선행되어야 한다는 결론을 얻을 수 있다. 이러한 해석을 뒷받침할 수 있도록 향후에는 각각의 연삭 공정사이에 연삭 휠을 직접 측정해나가며 실험할 계획을 가지고 있다.

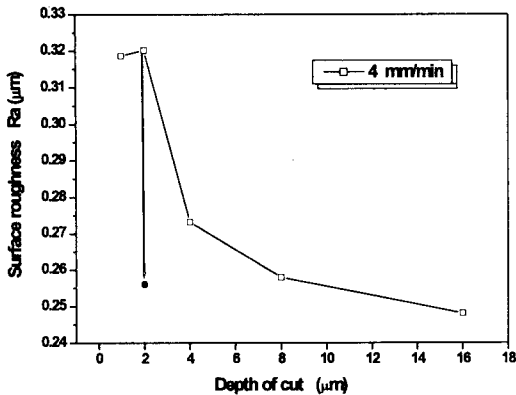


Fig. 6. Experimental result for dressing  
(Workpiece speed : 400rpm, Wheel speed : 24750rpm)

#### 4. 결론

본 연구는 우주광학소재로 사용되는 Zerodur 소재를 다 이아몬드 연삭 입자 #300의 연삭 휠을 사용하여 연삭가공 하였다. 각각의 연삭 조건에 있어 연삭 이송속도와 연삭 깊이 에 따른 표면 거칠기는 터닝에서의 경향과 일반적으로 일치하는 경향을 살펴볼 수 있었다.

1. 본 실험에서의 최적 연삭 조건은 휠의 이송속도 4mm/min, 연삭 깊이 1μm, 공작물 회전속도 320rpm, 휠의 회전속도 27450rpm 일 때 표면거칠기 0.227μm를 나타내었다.

2. 연삭 휠의 드레싱에 따른 경향을 살펴보면 드레싱 이후 곧바로 연삭을 수행하였을 때 측정된 표면 거칠기값이 전체적인 연삭의 경향성과 일치하지 않고, 또한 동일한 조건에서의 연삭을 수행하였을 때에도 다른 수치를 나타내는 것을 볼 수 있었다.

3. 연삭 휠이 회전함에 따른 효과가 연삭가공에서 고려되어야 하며, 드레싱 이후의 연삭 경향에 대해 알려진 바가 없으므로 이에 대한 연구는 향후로도 계속하여 연구되어야 할 것이다.

#### 참고문헌

(1) Yeung-Su Kim and Hong-Yeul Baek, 2002, "Electro-Optical Camera of Korea Multi-Purpose SATellite", *Optical Science and Technology*, Vol. 6,

No. 4, pp. 17~22.

(2) Y. Li, S. M. Gracewski, P. D. Funkenbusch, J. Ruckman, 2002, "Analysis of chatter in contour grinding of optical materials," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 42, pp. 1095~1103.

(3) Z. J. Pei, Alan Strasbaugh, 2002, "Fine grinding of silicon wafers: designed experiments," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 42, pp. 395~404.