

## ◆특집◆ 초정밀가공기술

## 초정밀 연삭 방법에 관한 연구

박순섭\*, 이호재\*\*

## Research on Ultra-Precision Grinding Method

Soon Sub Park\* and Ho Jae Lee\*\*

**Key Words** : Ultra precision grinding(초정밀연삭), cross grinding(수직축 연삭), slanted axis grinding(경사축 연삭), parallel grinding(수평축 연삭)

## 1. 서론

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

비구면 글라스 렌즈의 제조법은 글라스 몰드 프레스법과 연삭 연마에 의한 직접가공법 두 가지로 크게 분류된다. 플라스틱 성형에서는 일반적으로 Stavax에 무전해 Ni 도금한 금형소재가 사용되므로, 단결정 다이아몬드 바이트로 초정밀 절삭이 가능하다. 그러나 글라스 몰드 프레스법에서는 초경합금 소재의 금형이 사용되므로 비구면 글라스 렌즈의 제조과정에서는 연삭이 가공의 승패를 좌우하는 중요한 기술이 된다. 종래의 구면가공과는 달리 비구면 가공은 공구의 운동궤적의 정밀한 전사에 의존할 수밖에 없다. 연마가공은 운동궤적의 전사성이 나쁘므로 가능한 연마량을 적게 하며, 연마 렌즈에서 경면가공이 가능하다면 형상정도가 높은 비구면 가공이 가능해진다.

이러한 상황에서 초정밀 연삭 방법이 수직축 연삭법, 경사축 연삭법, 수평축 연삭법 3가지 정도로 대두되고 있는데 본 논문에서는 3가지 방법의 연삭 방법을 가지고 글라스 몰드 프레스법에 사용되는 초경합금의 소재를 가공함으로써 각각의 연삭방법에 대한 장점과 단점을 고찰하려한다.

## 2. 연삭 방법

## 2.1 수직축 연삭 방법

현재 많이 행하여지고 있는 축대칭 비구면의 대표적인 수직축 연삭법을 Fig. 1에 나타냈다.

미소한 오목면의 가공을 가능케 하기위해 휠의 축과 공작물의 축이 사축구성으로 되어 있는 경우도 있으나, 대다수의 경우는 Fig. 1처럼 휠 축과 공작물의 축이 직교하는 중형구성으로, XZ축의 2축 동시제어에 의한 연삭 경로  $\overline{AO}$ 에 따라 가공되어진다. 연삭점에 있어서 공작물의 회전방향과 휠의 주축 벡터가 직교하는 것이 이 방식의 특징이다.

그러나 휠의 마모나 휠의 연삭미가 무디어지는 것이 한곳에 집중된다고 하는 결점이 있어, 드레싱을 적용함으로써 이러한 영향을 억제하는 방법이 제안되고 있다. 또한 공작물 중심에 있는 가공잔류를 피하기 위해서는 휠 상의 연삭점과 축의 높이를 정밀하게 맞추는 것이 필요하다.

\* 한국생산기술연구원 광주연구센터  
E-mail p4633@hanmail.net Tel. 010-6204-4633

\*\* 한국생산기술연구원 광주연구센터

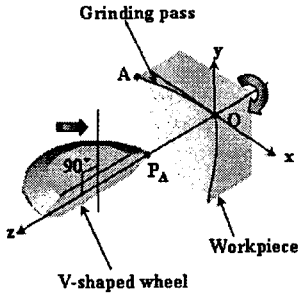


Fig. 1 Cross grinding method

## 2.2 경사축 연삭 방법

Fig. 2는 사축 연삭 방법을 나타내는 것으로 연삭점이 휠 단면의 한점에 집중되는 것을 피하기 위해 휠 축을 수직방향에서 30 ~ 45° 기울여 휠 외주를 원호단면으로 성형한 휠을 사용한 것이다. 이 연삭법도 기본적으로는 크로스 연삭이나, 연삭 경로는 Fig. 2에서  $\overline{BO}$ 로 되어서 연삭작용점 PB가 휠 단면 위를 이동하여 휠의 유효 폭이 증대하므로 종래법에 비해 휠의 수명이 향상된다. 또한, V형 휠에 비해 연삭점에 있어서 휠, 공작물간의 상대곡률이 작아지므로 마무리가공의 면조도가 좋아진다. 한편, 휠 외주의 원호단면 위를 연삭점이 이동하기 때문에 휠 단면의 형상오차가 형상가공 정도에 영향을 미친다. 따라서 고정도의 트루잉이 필요하다.

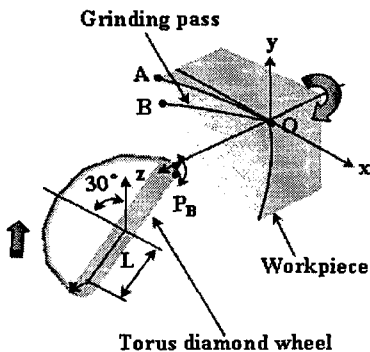


Fig. 2 Slanted tool axis grinding method

## 2.3 수평축 연삭 방법

새로운 축대칭 비구면 연삭법으로서 수평축(parallel) 연삭법이 있다. Fig. 3은 수평축 연삭법을 도식화한 그림으로 수직상방 즉, Y축 방향에서 본 그림으로 수평축 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.

첫 번째, 연삭점에 있어서 공작물의 회전방향과 휠의 주축 벡터방향이 평행이되므로 마무리가공 면조도가 좋다.

두 번째, 휠의 연삭 유효폭을 매우 적게 할 수 있다.

세 번째, 특히 오목면의 경우 휠, 공작물간의 상대곡률을 작게 할 수 있기 때문에 양호한 마무리가공 표면 거칠기를 기대할 수 있다.

네 번째, Fig. 3에서 XZ단면 위를 휠과 공작물의 연삭점이 1대1로 대응한다.

특히 네 번째는, 다음공정에서 가공면의 형상오차를 기상 계측하여 보정하고자 할 때 매우 유리하다. 수평축 연삭법에서는 경사축 연삭방식에 비해 휠의 연삭 유효폭이 비약적으로 증대한다. 따라서 휠의 마모는 현저히 감소하는 것을 기대할 수 있다. 또한, 종래의 경사축 연삭에서 토러스형상의 원호단면 휠을 사용할 경우는 공구레계의 계산이 다소 복잡해지나 수평축 연삭에서는 연삭점은 휠 축 방향에 2차원적으로 이동할 뿐이므로 계산은 용이하다.

그러나 수평축 역시 결점을 가지고 있다. 연삭점의 이동량이 크므로 휠 단면의 형상정도를 높일 필요가 있으며, 휠 전범위의 연삭 작업면을 균일하게 드레싱 할 필요가 있다. 특히 오목면의 경우, 휠과 공작물간의 상대곡률이 작게 되므로 연삭저항이 증대한다.

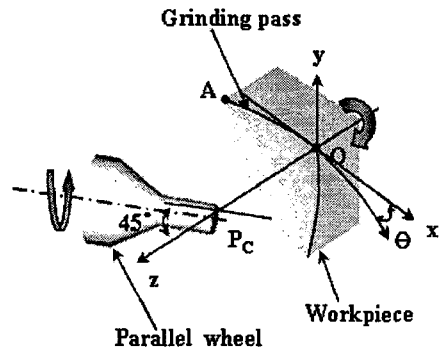


Fig. 3 Parallel grinding method

## 3. 실험장치 및 방법

### 3.1 실험 장치

실험장치에 사용된 장비로 초정밀 가공기, 초정밀 측정기이다. 실험 내용으로 초정밀 연삭실험 조건으로 주축의 회전 속도, 터빈 회전 속도, 이송속도, 연삭깊이에 따른 표면 거칠기 특성연구를 통한 최적 가공조건을 찾아내고 초정밀 가공기에서 공구 경로 생성소프트웨어에 의해 발생된 CNC기계코드를 수정하기 위해 Form talysurf로부터의 형상 측정 데이터를 사용하여 비구면 보정가공법에 적용하였다.

실험장비는 Fig. 4는 수평축 연삭법을 수행하기 위하여 Nhi-fujikoshi사에서 개발한 ASP-01X 자유곡면가공기와 Fig. 5는 수직축 연삭법과 경사축 연삭법을 수행하기 위하여 Toshiba社의 ULG-100C(H3)를 사용하였으며 Fig. 6과 7은 표면 거칠기 측정을 위하여 NanoScan사의 비접촉식 표면측정기 E-1000 및 Zygo사 GPI-XP(HR)을 사용하였다. 또한 Fig. 8은 RTH사의 접촉식 비구면 측정기인 Form talysurf PGI +를 사용하여 제품의 형상을 측정하였다.

실제 현미경으로는 연삭 후 공작물의 표면을 살펴보았다.

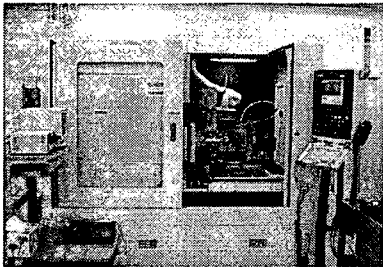


Fig. 4 Photo of ultra precision machine (ASP-01X)

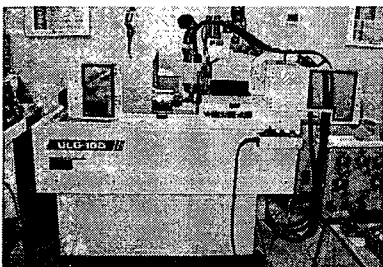


Fig. 5 Photo of ultra precision machine (ULG-100)

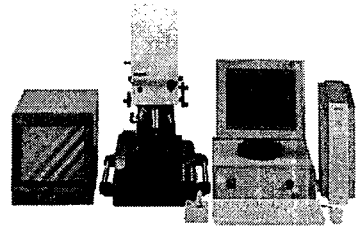


Fig. 6 Photo of NanoScan E-1000 measuring instrument



Fig. 7 Photo of GPI-XP(HR) measuring instrument

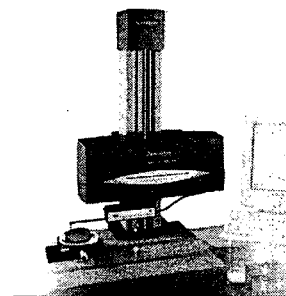


Fig. 8 Photo of Form talysurf + measuring instrument

### 3.2 시편과 공구

본 실험에 사용된 시편의 재료는 DIJET사에 FB01 초경합금이며, 초경합금 중에서 금속결합체인 연질재료(Co, Ni)를 최소화 시키고 종래의 초경합금보다 고정도, 뛰어난 내마모성을 가지고 있으며, 높은 경도를 갖는다. 때문에 미소한 절입량 저속 연삭에서 일반 초경, 고속도강 보다 확실하게 우수한 특성을 발휘한다. FB01은 아르곤 가스등의 불활성 가스를 98 MPa이상의 압력과 온도 1300 °C의 상승효과를 이용해서 가압처리를 하는 것인데 내부의 미소 기포를 제거되는 효과에 의해서 항전력, 압축강도, 인장강도 등의 기계적 성질이 대폭으로

개선되고 보다 안정된 높은 품질을 얻을 수 있다. 이러한 FB01은 렌즈성형 금형 및 부품, 분말 성형 다이, 각종노즐에 사용된다. Fig. 9는 시편의 3차원 형상을 나타내고 있다. 재료의 성분 특성 결과는 Table 1과 같다.

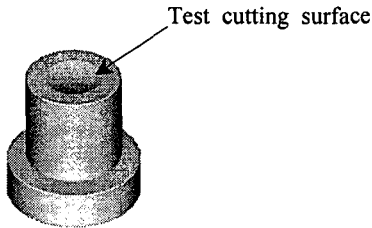


Fig. 9 3-dimensional shape of test workpiece

본 실험에 사용한 다이아몬드 휠은 메시 2000이며 결합제는 레진 본드를 사용하였고, 집중도는 125인 다이아몬드 휠을 사용하였다. Fig. 10은 경사축 연삭법과 수평축 연삭법에 사용된 다이아몬드 휠의 형상을 나타내고 Fig. 11은 수직축 연삭법에 사용된 다이아몬드 휠의 형상을 나타낸다.

Table 1 Characteristics of WC

	FB01
WC(%)	99
Co(%)	1
Hardness(HRA GPa)	95
Transverse rupture strength(GPa)	1.6
Fracture Toughness(MPa $\sqrt{m}$ )	5.0
Density	15.4
Young's Modulus(GPa)	660
Coefficient of Thermal Expansion( $\times 10^{-6}/K$ )	4.5

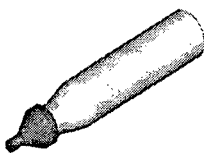


Fig. 10 3-Dimensional shape of diamond wheel (Slanted tool axis grinding, Parallel grinding)

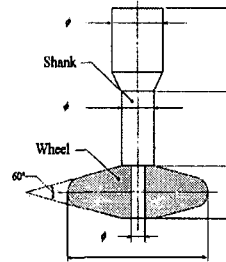


Fig. 11 Shape of diamond wheel(Cross grinding)

### 3.3 실험 방법

광학소자 초경합금의 초정밀 3가지 연삭법으로 가공하기 위해 Fig. 12와 같이 지그를 제작하였다. 초정밀 가공 실험 대상부위는  $\varnothing 6$  mm부분의 센터를 연삭 실험을 하였으며, 가공 표면의 거칠기 측정에는 네 지점을 중심으로 동일한 부위를 반복 측정된 결과의 평균값으로 표면 거칠기를 산출하였다. 동일한 부위를 측정하기 위하여 지그의 측면에 표시를 하여 항상 같은 부위를 측정하였다.

시작품 재료인 초경합금의 초정밀 3가지 연삭법으로 가공하여  $\varnothing 10$  mm, 전장 13.797 mm의 시편을 제작하여 주축 회전 속도, 터빈 회전 속도, 이송 속도, 연삭깊이에 대하여 표면 거칠기를 측정하였다.

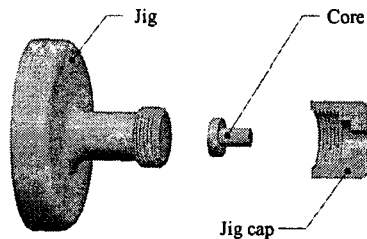


Fig. 12 Core jig and Dimension of the workpiece

이때 사용되는 연삭액의 급유방식은 물 70 %, 연삭액 20 %, 방청유 10 %를 혼합하여 노즐분사방식을 사용하였다. 또한 연삭 후 측정 방법은 시편의  $\varnothing 6$  mm되는 부분을 선정하여 항상 같은 위치에서 5번을 측정하여 매번 총 16~20회 측정을 통하여 오차 범위가 큰 값을 제외하고 나머지 18개의 값을 평균 산출하여 측정값의 오차를 줄이고자 했다.

각각의 연삭법의 실험조건은 Table 2와 같다.

Table 2 Experimental conditions

	Cross	Slanted tool axis	Parallel
Work piece	WC		
Wheel mesh	#2000		
Wheel diameter(mm)	Ø6	Ø1.5	
Turbine speed(rpm)	28000	60000	30000
	30000		35000
	32000		40000
	34000		45000
Cutting speed(rpm)	200, 250, 300, 350, 400		
Feed rate(mm/min)	0.25, 0.5, 1, 1.5		
Depth of cut(µm)	0.1, 0.25, 0.5, 1		
Grinding fluid	Water 70 %+ Syntilo 25D 20 % + rust preventive oil 10 %		

### 3.4 실험 결과 및 고찰

#### 3.4.1 주축회전속도 변화에 따른 표면거칠기

Fig. 13은 수직축 연삭법, 경사축 연삭법과 수평축 연삭법에서 주축 회전속도 변화에 따른 표면 거칠기를 측정 한 결과이다.

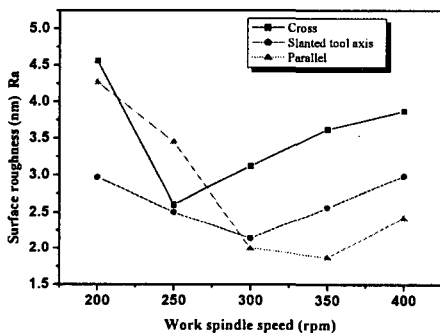


Fig. 13 Surface roughness versus work spindle speed

수직축 연삭법은 터빈 회전속도 32000rpm, 경사축 연삭법은 터빈 회전속도 70000rpm, 수평축 연삭법에서는 터빈 회전속도 40000rpm으로 고정하고 이송속도 0.5 mm/min, 연삭깊이 0.5 µm에서 주축 회전속도를 변화시키면서 표면 거칠기를 측정하였다.

200~400 rpm까지 주축 회전속도를 단계적으로 변화 시켰으며, 그 결과 수직축 연삭법에서는 250 rpm에서부터 300 rpm까지는 주축 회전속도에 변화에 따른 표면 거칠기가 양호해지며, 주축 회전속도 250 rpm일 때 표면 거칠기는 Ra 2.6 nm로 매우 양호하게 나타났다. 경사축 연삭법에서는 250 rpm에서부터 350 rpm까지는 주축 회전속도에 변화에 따른 표면 거칠기가 양호해지며, 주축 회전속도 300 rpm일 때 표면 거칠기는 Ra 2.14 nm로 매우 양호하게 나타났다. 수평축 연삭법에서는 300 rpm에서부터 350 rpm까지는 주축 회전속도에 변화에 따른 표면 거칠기가 양호해지며, 주축 회전속도 350 rpm일 때 표면 거칠기는 Ra 1.87 nm로 매우 양호하게 나타났다. 실험 결과에서 보듯이 3가지 연삭법은 주축 회전속도 350 rpm이후에는 표면 거칠기가 악화되는 것을 알 수 있었다. 또한 주축 회전속도 250 rpm미만에서 표면 거칠기 급격하게 악화되는 것은 재료 제거에 필요한 연삭에너지가 감소하기 때문으로 사료된다.

이런 실험 결과로 초경합금의 연삭에서 어떠한 연삭법으로 연삭을 할 경우 주축 회전속도는 250 rpm ~ 350 rpm으로 공작물을 가공하는 것이 제품의 정밀도 향상에 도움을 주며 가장 적합한 것으로 사료된다.

#### 3.4.2 터빈 회전속도 변화에 따른 표면거칠기

Fig. 14는 수직축 연삭법, 경사축 연삭법과 수평축 연삭법에서의 터빈 회전속도 변화에 따른 표면 거칠기를 측정 한 결과이다.

수직축 연삭법과 경사축 연삭법은 위항에서 가장 좋은 결과를 나타낸 주축 회전속도를 채택하여 각각 주축 회전속도를 250rpm, 300rpm으로 고정하고 수평축 연삭법은 고속의 주축 회전속도를 선택하여 400 rpm으로 고정하고 이송속도 0.5 mm/min, 연삭깊이 0.5 µm에서 터빈 회전속도를 변화시키면서 표면 거칠기를 측정하였다.

수직축 연삭법의 최대 터빈 회전속도가 40000 rpm이고, 경사축 연삭법은 100000 rpm, 수평축 연삭법은 50000 rpm이다.

28000 rpm에서 80000 rpm까지 터빈 회전속도를 단계적으로 변화 시켰으며, 그 결과 수직축 연삭법에서는 30000 rpm에서부터 32000 rpm까지는 터빈

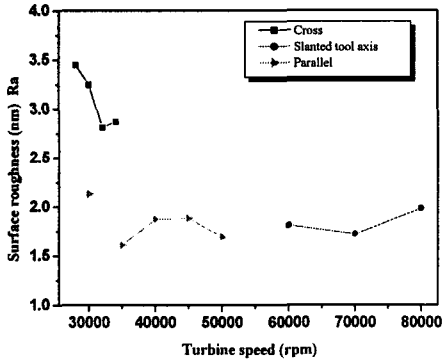


Fig. 14 Surface roughness versus turbine speed

회전속도에 변화에 따른 표면 거칠기가 양호해지며 32000 rpm 미만에는 표면 거칠기가 악화 되는 것을 알 수 있다. 터빈 회전속도 32000 rpm 일 때 표면 거칠기는 Ra 2.6 nm로 매우 양호하게 나타났다. 경사축 연삭법에서는 터빈 회전속도 70000 rpm 일 때 표면 거칠기는 Ra 1.72 nm로 매우 양호하게 나타났다. 수평축 연삭법에서는 터빈 회전속도 35000 rpm 일 때 표면 거칠기는 Ra 1.607 nm로 매우 양호하게 나타났다.

### 3.4.3 이송속도 변화에 따른 표면 거칠기

Fig. 15는 수직축 연삭법, 경사축 연삭법과 수평축 연삭법에서의 이송속도 변화에 따른 표면 거칠기를 측정 한 결과이다.

수직축 연삭법에서 주축 회전속도 250rpm, 터빈 회전속도 32000 rpm, 연삭깊이 0.5 μm에서 이송속도를 변화시키면서 표면 거칠기를 측정하였고, 경사축 연삭법에서는 주축 회전속도 300rpm, 터빈 회전속도 70000 rpm, 연삭깊이 0.5 μm에서 이송속도를 변화시키면서 표면 거칠기를 측정하였으며, 수평축 연삭법에서는 주축 회전속도 400rpm, 터빈 회전속도 40000 rpm, 연삭깊이 0.5 μm에서 이송속도를 변화시키면서 표면 거칠기를 측정하였다.

이송속도에 따른 표면 거칠기는 터닝에서 일반적으로 비례관계에 있다. 모든 연삭 방법의 연삭 가공에서는 Fig. 15와 같이 각각의 연삭깊이에 대하여 연삭 이송속도에 따른 표면 거칠기 값이 증가하는 경향을 볼 수 있으며, 수직축 연삭법은 이송속도 0.25mm/min에서 점차적으로 감소하여 0.5mm/min에서 Ra 2.60 nm 가장 양호한 표면 거칠기 나타

고 점차적으로 증가하여 이송속도 1.5mm/min에서는 Ra 5.8 nm 가장 표면 거칠기가 크게 나타났다.

경사축 연삭법은 이송속도 0.25mm/min에서 점차적으로 감소하여 0.5mm/min에서 Ra 1.93 nm 가장 양호한 표면 거칠기 나타내고 점차적으로 증가하여 이송속도 1.5mm/min에서는 Ra 3.45 nm로 가장 표면 거칠기가 크게 나타났다.

수평축 연삭법은 이송속도 0.25mm/min에서 점차적으로 감소하였으며 0.7mm/min에서는 수직축 연삭 방법과 경사축 연삭법보다 표면 거칠기가 크게 나타났다. 그 이유는 휠 작업면 상의 연삭날이 칩 포켓의 크기가 작기 때문에 원활한 칩 배출이 되지 않아 연삭 성능이 저하 되어 표면 거칠기가 크게 나타나는 것으로 사료된다. 또한 0.5mm/min에서 Ra 1.65 nm 가장 양호한 표면 거칠기를 나타내고 점차적으로 증가하여 이송속도 1.5mm/min에서는 Ra 6.5 nm로 가장 표면 거칠기가 크게 나타났다.

정량적인 실제 가공면의 거칠기는 불확정인자인 진동이나 처짐 등의 동적 현상, 공구에 따른 특성 등에 의하여 영향을 받으므로 실제의 표면 거칠기 예측치 보다 크게 된다.

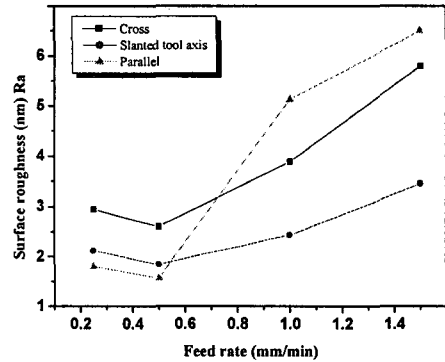


Fig. 15 Surface roughness versus feed rate

초정밀 가공기의 진동과 외부 환경 변수들이 연삭과정에 미치는 영향은 이송이 작은 범위에서 크게 작용하게 되며 0.7 mm/min을 초과하면서부터 이러한 영향보다는 이송의 영향이 가공면의 표면 거칠기에 더 크게 작용하고 있음을 볼 수 있다. 따라서 초경합금의 경우 각각의 연삭 방법에서는 0.5 mm/min 정도의 이송속도로 가공을 할 경우 양호한 표면 거칠기 얻을 수 있을 수 있다.

### 3.4.4 연삭깊이 변화에 따른 표면거칠기

Fig. 16은 수직축 연삭법, 경사축 연삭법과 수평축 연삭법에서의 연삭깊이 변화에 따른 표면 거칠기를 측정 한 결과이다.

수직축 연삭법에서 주축 회전속도 250rpm, 터빈 회전속도 32000 rpm, 이송속도 0.5 mm/min에서 연삭 깊이를 변화시키면서 표면 거칠기를 측정하였고, 경사축 연삭법에서는 주축 회전속도 300rpm, 터빈 회전속도 70000 rpm, 이송속도 0.5 mm/min에서 연삭 깊이를 변화시키면서 표면 거칠기를 측정하였으며, 수평축 연삭법에서는 주축 회전속도 400rpm, 터빈 회전속도 40000 rpm, 이송속도 0.5 mm/min에서 연삭 깊이를 변화시키면서 표면 거칠기를 측정하였다.

0.1 μm에서 1 μm까지 연삭깊이를 단계적으로 변화 시켰으며, 그 결과 수직축 연삭법에서는 초기 0.1 μm에서는 Ra 4.22 nm 표면 거칠기가 크게 나타났으며 점차적으로 감소하여 0.5 μm에서 Ra 2.6 nm 표면 거칠기가 양호하였다. 0.5 μm 이후에는 점차적으로 표면 거칠기가 크게 나타났다. 경사축 연삭법에서는 0.1 μm에서는 Ra 2.6 nm 표면 거칠기가 나타났으며, 0.25 μm에는 Ra 1.61 nm 표면 거칠기가 양호하게 나타나고 0.5 μm에서부터 1 μm까지는 비교적 일정한 값을 유지 하였다. 수평축 연삭법은 0.5 μm에서 표면 거칠기가 양호하게 나타났으며 0.1 μm에서 1 μm까지 비교적 일정한 값을 유지하였다.

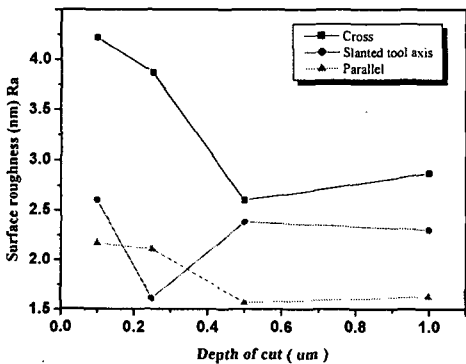


Fig. 16 Surface roughness versus depth of cut

## 4. 결론

### 4.1 수직축 연삭방법

수직축 연삭법으로 위의 조건으로 실험한 결과 터빈 회전속도 32000RPM, 주축 회전속도 250

RPM, Feed rate 0.5mm/min, Depth of cut 0.5μm 일 때 Fig. 17과 같이 가장 좋은 표면 조도 Ra 2.60 nm를 나타내었다.

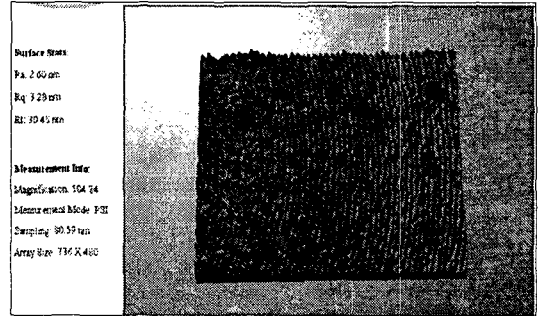


Fig. 17 Surface measurement of Cross grinding

Fig. 18은 수직축 연삭법으로 초경합금 코어를 가공한 표면을 나타내며, 공작물 반경방향의 방사선이 형성되는 것을 볼 수 있다.

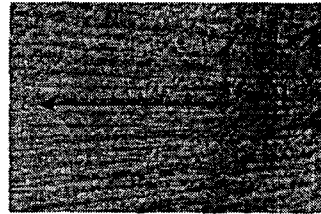


Fig. 18 Ground surface by cross grinding method

### 4.2 경사축 연삭방법

경사축 연삭법으로 위의 조건으로 실험한 결과 터빈 회전속도 70000RPM, 주축 회전속도 300RPM, Feed rate 0.5mm/min, Depth of cut 0.25μm 일 때 Fig. 19와 같이 가장 좋은 표면 조도 Ra 1.61 nm를 나타내었다.

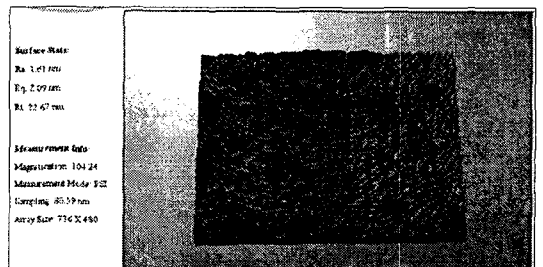


Fig. 19 Surface measurement of Slanted tool axis grinding

Fig. 20은 사축 연삭법으로 초경합금을 가공한 표면을 나타내며 공작물 반경방향의 연삭조흔이 형성되는 것을 볼 수 있다.

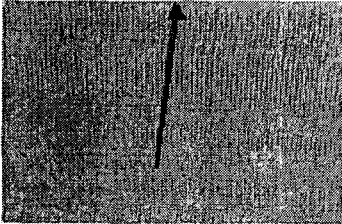


Fig. 20 Ground surface by the Slanted tool axis grinding method

#### 4.3 수평축 연삭방법

수평축 연삭법으로 위의 조건으로 실험한 결과 터빈 회전속도 35000RPM, 주축 회전속도 350RPM, Feed rate 0.5mm/min, Depth of cut 0.5 $\mu$ m 일 때 Fig. 21과 같이 가장 좋은 표면 조도 Ra 1.53 nm를 나타내었다.

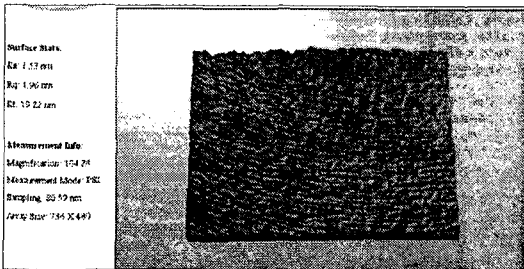


Fig. 21 Surface measurement of parallel grinding

Fig. 22는 수평축 연삭법으로 가공 후 표면에 나타나는 조흔으로 공작물 원주방향의 똑같은 연삭조흔이 형성된다.

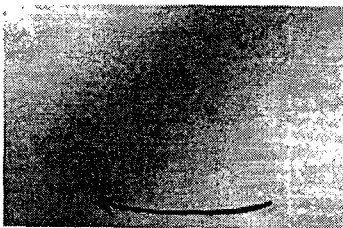


Fig. 22 Ground surface by the parallel grinding method

초정밀 가공에서 일반적으로 적용되는 세 가지 가공방식의 비교를 통해 각각의 특성을 파악하는 실험을 수행하였다. 본 연구를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

1. 가공효율(재료 제거율, 가공시간)의 관점에서는 수직축 연삭법이 가장 효율적이나 표면조도는 다른 두 가지 방식에 비하여 비교적 높은 표면조도를 보였다.
2. 경사축과 수평축 연삭법은 비교적 유사한 표면조도를 보이나 가공효율(재료 제거율)의 관점에서 수평축의 경우가 양호한 성능을 보였다.
3. 표면정도의 관점에서는 수평축 연삭면이 가장 양호한 결과를 보였다.

본 논문에서는 다루지 않았으나 연삭휠의 마모에 의한 형상정도의 변화에 관련된 연구가 추가적으로 진행되어야 할 것으로 생각된다.

#### 참고문헌

1. 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," J. Japan Soc, Prec. Eng., Vol.62, No. 4, pp.619-623, 1998.
2. Kuriyagawa, T., Syoji, K. and Zhou, L., "Precision Form Truing and Dressing for Aspheric Ceramic Mirror Grinding Machining of Advanced Materials," NIST Special Publication, pp.325-331, 1993.
3. Kuriyagawa, T., Sepasy, M. S. and Syoji, K., "A new grinding method for aspheric ceramic mirrors Journal of Materials Processing Technology," Vol. 62, pp.387-392, 1996.
4. Sepasy, 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 Precision Engineering, Vol. 31, No. 4, pp.263-268, 1997.