

## ◆특집◆ 초정밀가공기술

## PMMA를 이용한 HMD 광학계의 초정밀가공 특성

양진석\*, 양순철\*, 김건희\*, 김효식\*, 김명상\*, 원종호\*\*

## Ultra Precision Machining Characteristics of HMD Optics System used PMMA

Jin Seok Yang\*, Sun Shoel Yang\*, Gun Hee Kim\*, Hyo Sik Kim\*, Myung Sang Kim\* and Jong Ho Won\*\*

**Key Words** : SPDTM(간결정 다이아몬드 터닝머신), PMMA(Poly Methyl Methacrylate), HMD(Head Mounted Display), MQL(극미량 급유, Minimum Quantity Lubrication)

## 1. 서론

현대 산업사회의 첨단 제품의 발전을 주도하고 있는 반도체, 컴퓨터, 레이저, 영상, 정보 기기, 계측기, 전자 계산기의 주변 기기, 광학 기기 및 각종 제어 기기 관련 산업의 비약적인 발달로 인해 정밀기계부품의 가공은 고 부가가치 기술로서 매우 중요하게 인식되고 있으며, 특히 이러한 제품에 대한 요구 정밀도가 크게 증가하면서 미소 절삭에 의한 초정밀 가공의 필요성이 증대되고 있다.<sup>1</sup> 초정밀 가공에 있어 대표적인 기술은 단결정 다이아몬드공구를 사용하여 초정밀 부품을 가공하는 다이아몬드 터닝머신을 이용한 초정밀 절삭 가공 기술을 말할 수 있다. 초정밀 가공기술은 광학 부품 가공에 있어서, 이 기술은 많은 생산비용의 절감과 가공부분의 정밀도를 향상시켜 왔다. 다이아몬드 터닝의 중요한 연구 과제는 가공면의 표면 거칠기와 원하는 치수형상의 정밀도를 향상시키고 가공물의 새로운 재질에 응용하는 기술을 개발하는 것이다.<sup>2,3</sup>

디스플레이 장치와 영상, 통신기술의 진보가 급속히 이루어지면서 Wearable Computer 개념이 제시되었고 그에 대한 연구가 본격화 되었으며, 그에 따라 필수적으로 필요한 Wearable Monitor 로써 필요성과 가능성이 인정되어 연구가 시작되었으며, HMD System 은 머리에 장착하거나 안경처럼 사용하여 초대형 화면을 보는 듯한 효과를 낼 수 있는 휴대용 디스플레이 장치로서 구현할 수 있는 화면의 크기는 점차 확대되어 2 m 앞에서 45 인치 정도의 대화면을 볼 수 있으며, 또한 양안의 시차를 이용하여 고화질의 3 차원 입체 영상을 표현하는 개인용 디스플레이 장치로 발전하고 있다. 한편, 비구면 렌즈는 HMD 광학계를 구성하는 핵심 부품으로서, 비구면 접안렌즈와 비구면 반사경을 이용하여 영상물의 크기와 선명도를 결정하는 주요 역할을 하고 있다.

이제까지 광학 부품의 렌즈에는 구 또는 구면 형상의 렌즈가 이용되었으나 현재에는 성능향상과 고정밀도를 높이기 위하여 렌즈의 비구면화가 진행되고 있으며 이것은 초정밀 경면가공 기술에 의하여 실현되고 있으며, 비구면 렌즈는 다수의 구면 렌즈를 하나의 비구면 렌즈로 대체할 수가 있어서 HMD 광학계를 경량화, 고정도화에 이르는 주요 역할을 하고 있다.<sup>4,5</sup>

대표적인 광학재료로는 광투과성, 광학 특성이 우수한 PMMA, PC 등이 광학부품의 제작으로 널리

\* 한국기초과학지원연구원 연구장비개발부 초정밀가공팀

Tel. 042-865-3464, Fax. 042-865-3469

Email : yjs79@kbsi.re.kr

\*\* 충남대학교 기계공학과 042-821-5649

Email : jhwon@cnu.ac.kr

리 사용되고 있다. 플라스틱계 광학부품은 일반적으로 초정밀 금형을 사용한 성형가공에 의해 제조되어지며, 이 금형은 다이아몬드절삭, 연삭, 연마 등의 가공법에 의해 제작되어진다. 이러한 가공공정은 금형제작에 많은 비용이 소요되며, 특히 시작품을 제작할 경우와 같이 소량의 제품을 생산할 경우에는 극히 비효율적이다. 또한 크기가 대형이거나 형상이 복잡한 경우에는 금형제작 자체가 곤란하다. 이러한 관점에서 초정밀 다이아몬드 절삭법에 의해 플라스틱을 직접 가공하는 기술을 확립하는 것은 중요하다. 또한 HMD 광학계의 상의 떨림 및 크기, 선명도 개선 등을 필요로 하고 있다. 따라서 본 연구에서는 HMD 광학렌즈로 사용된 PMMA 의 최적 초정밀 가공 조건을 찾기 위해서 초정밀 가공에 사용되는 공구의 노우즈 반경과 절삭유 공급 방식에 따라 절삭속도, 이송속도, 절삭 깊이 등의 가공 변화를 주어 초정밀 가공특성을 파악하고, HMD System 에 사용되는 PMMA 비구면 광학부품에 대한 초정밀 가공에 관한 연구를 수행하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

본 연구에 사용된 초정밀 가공기는 영국 Taylor Hobson 계열사인 Precitec co.에서 개발한 Nanoform 600 다이아몬드 터닝머신이다.

Table 1 Specification of precision stage(Nanoform600)

Feedback system resolution		1.25 nm (0.05 μ")
Slideways (X & Z axes)	Design	Hydrostatic oil bearings
	Travel	(X-axis): 300 mm (12") (Y-axis): 300 mm (12")
	Horizontal straightness	≤ 0.2 μm (8 μ") full travel & ≤ 0.025 μm / 25 mm(1 μ"/inch)
	Squareness	≤ 0.5 arc seconds
	Velocity	0.25 to 250 mm/min (0.01" to 10" /min)

다이아몬드 터닝 머신은 X 축과 Z 축 두개의 안내면은 이송정도와 위치 결정 정밀도가 좋아야

하며, 이송축에 대한 정밀도는 진동 발생이 없고 충분한 강성을 요구하므로 유정압 안내면을 사용하였으며, 안내면의 위치결정 정도는 0.5 μm/250 mm 이내가 되어야 하며, 0.03 μm/100 mm가 최고의 운동정도라고 할 수 있으며,<sup>6</sup> Nanoform600 의 이송축 정밀도는 Table 1 의 사양을 가진다.

Fig. 1 은 본 연구에 사용된 초정밀 가공기를 보여주고 있다.

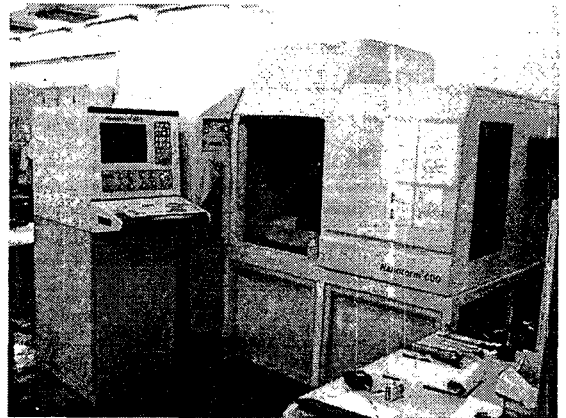


Fig. 1 Nanoform 600 diamond turning machine

표면 거칠기 측정 장비로는 압전소자를 이용한 접촉식 비구면 형상 측정기 Form Talysurf Series2 와 광학식 측정원리를 이용한 비접촉식 측정기 WYKO 사의 NT2000 을 사용하였다.

본 연구는 HMD System 의 광학렌즈의 시작품 제작용으로 PMMA 를 사용하여 실험을 수행하였다.

### 2.2 실험방법

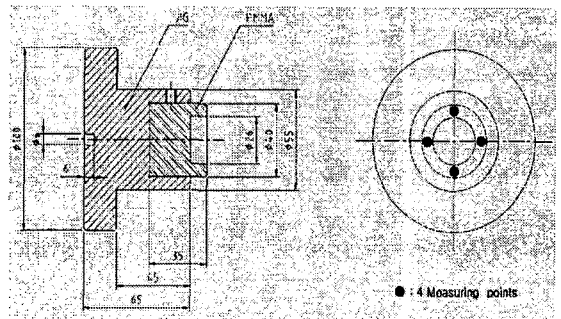


Fig. 2 Test Workpiece

광투과성이 우수한 광학 소자인 PMMA 의 초 정밀 최적의 절삭 조건을 찾기 위해 Fig. 2 와 같 이 시편을 제작하였다. 제작된 시편에 단면 절삭 실험을 시행하였으며, 가공된 표면 거칠기 측정은 Fig. 2 에서 보여 주듯이 네 지점을 중심으로 동일 한 부위를 반복 측정한 결과의 평균값으로 표면 거칠기를 산출하였다. 동일한 부위를 측정하기 위 하여 지그의 측면에 표시를 하여 항상 같은 부위 를 측정하였다.

시작품 재료인 PMMA 의 최적의 절삭 조건을 찾기 위해  $\varnothing 40$  mm, 두께 40 mm 의 시편을 제작하 여 공구 노우즈 반경 변화에 대한 절삭속도와 절삭깊이, 이송속도, 절삭유의 급유방식 변화에 따른 표면 거칠기를 측정하였다. 이때 절삭유의 급유 방식은 압축공기만을 사용하는 건식(DRY)커팅방 식과 압축공기와 절삭유인 방전유를 혼합하여 분 사하는 극미량(MQL)커팅방식을 사용하였으며, 동 일한 표면 조건에서 실험을 시행하기 위하여 실험 가공전에 절삭깊이 50  $\mu$ m로 가공하여 일정한 표면 을 유지하여 실험을 진행하고자 했다. 또한 절삭 후 측정 방법은 시편의  $\varnothing 30$  mm되는 부분을 선 정하여 항상 같은 위치에서 4 번을 측정하여 매번 총 20 회 이상 측정을 통하여 오차 범위가 큰 값 을 제외하고 나머지 10 개의 값을 평균 산출하여 측정값의 오차를 줄이고자 했다. 실험을 통하여 광학 수지 PMMA 의 최적 가공조건을 구할 수 있 었으며, 가공조건을 이용하여 HMD 광학계를 제 작하였다. Fig. 3 은 PMMA 최적절삭조건을 찾기 위해 실제 가공하고 있는 모습이다.

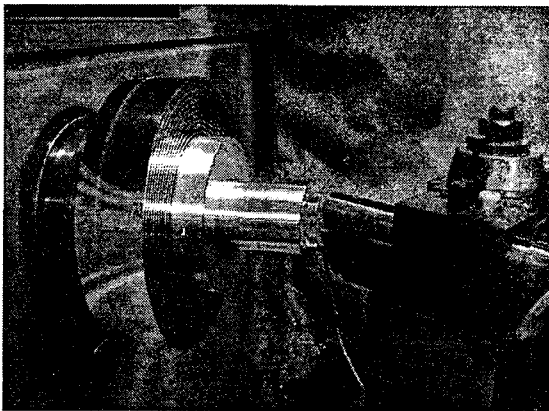


Fig. 3 Workpiece of cutting sample(PMMA)

본 연구는 공구의 노우즈 반경, 절삭속도, 절삭깊이, 이송속도, 절삭유 급유 방식을 주요 변수 로 하여, 표면 거칠기 측정, 초정밀 절삭 특성을 고찰함으로써 HMD 광학렌즈의 소재인 PMMA 의 최적 절삭조건을 찾아내기 위한 것이다. Table 2 는 실험 조건을 나타낸다.

Table 2 Experimental conditions

Item	Cutting condition
Work piece	PMMA
Tool nose radius (mm)	0.2, 0.5, 1.0
Cutting speed (m/min)	130, 150, 170, 190, 210
Feed rate (mm/min)	1, 2, 4, 8, 10
Depth of cut ( $\mu$ m)	1, 2, 4, 8, 10
Vacuum pressure (in.Hg)	-21
Cutting fluid	DRY, MQL

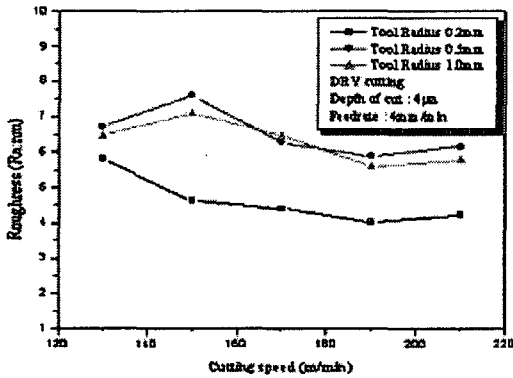
### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 절삭속도 변화에 따른 표면거칠기

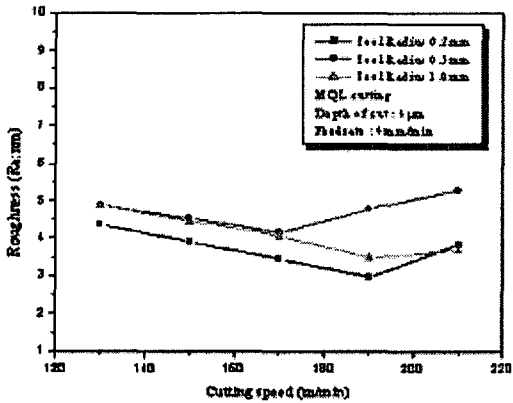
본 실험에서 절삭깊이 0.4  $\mu$ m, 이송속도 4 mm/min 로 하여 각각의 노우즈 반경 0.2 mm, 0.5 mm, 1.0 mm 에 대한 절삭유 급유 방식인 DRY 커팅방식 과 MQL 커팅방식에 따른 표면 거칠기를 측정한 결과이다.

Fig. 4(a)는 방전유를 제거하고 Air 만 공급해주 는 건식(DRY)커팅방식을 사용하여 공구의 노우즈 반경에 대하여 절삭속도를 단계적으로 130~210 m/min 까지의 변화에 대한 측정결과이다. Fig. 4(b)는 Air 와 방전유를 혼합하여 분사하는 극미량 (MQL)커팅방식을 적용하여 130~210 m/min 까지의 절삭속도 변화에 대한 측정결과를 나타낸다. 그 결과 DRY 커팅방식에서는 대체적으로 절삭속도가 170 m/min 에서부터 표면 거칠기가 양호해지며 210 m/min 까지는 유사한 표면 거칠기를 얻을 수 있다. 반면 MQL 커팅방식의 공구 노우즈 반경 0.2 mm, 0.5 mm에서는 절삭속도 170~190 m/min 까지 표면 거칠기가 양호해 지다가 절삭속도가 높

아질수록 표면 거칠기가 악화 되는 것을 알 수 있는 반면, 공구 노우즈 반경 1.0 mm에서는 210 m/min 에서 가장 양호한 표면 거칠기를 얻을 수 있었다.



a) DRY cutting



b) MQL cutting

Fig. 4 Surface roughness versus cutting speed

실험 결과로 PMMA 의 초정밀 절삭에서 절삭 속도는 170 m/min 이상으로 공작물을 가공하는 것이 제품의 정밀도 향상에 도움을 주며, Fig. 5에서 보여 지듯이 MQL 커팅방식으로 노우즈 반경 R0.2 mm, 절삭속도 190 m/min, 이송속도 4 mm/min, 절삭깊이 4 μm일 때 2.39 nm Ra로 가장 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

본 실험결과에서는 절삭 공구의 선정에 있어서 가공물의 특성, 형상에 따라 적용하는 공구의

형상과 노우즈 반경의 차이가 있음을 나타내고 있으며, 노우즈 반경이 작은 공구에서 양호한 표면 거칠기를 얻을 수 있었다.

PMMA 의 초정밀 가공 특성 실험 결과 Fig. 5와 같이 실린더형의 노우즈 반경 R0.2 mm인 천연 다이아몬드 바이트, 절삭속도 190 m/min, 이송속도 4 mm/min, 절삭깊이 4 μm에서 MQL 방식 일때 Ra 2.39 nm로 가장 양호한 표면 거칠기 값을 얻을 수 있었다.

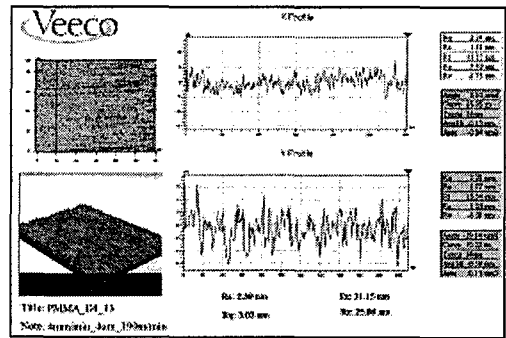


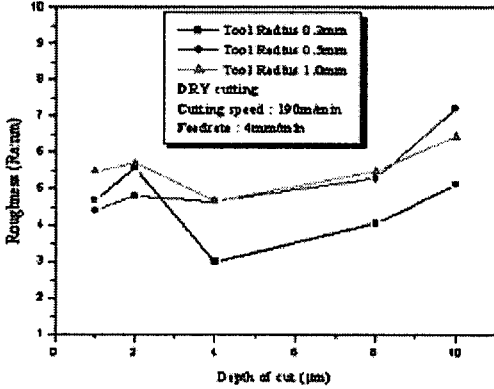
Fig.5 Measurement of surface roughness by NT2000

### 3.2 절삭깊이 변화에 따른 표면거칠기

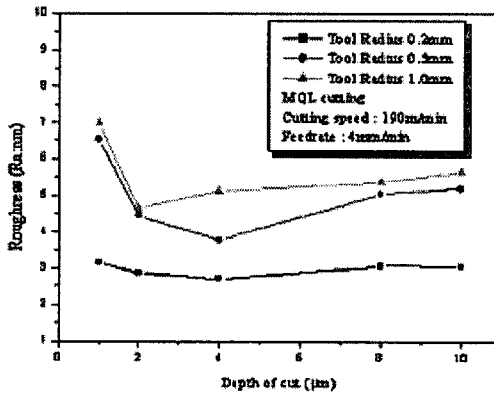
Fig. 6은 DRY 커팅방식과 MQL 커팅방식에서의 각각 절삭깊이의 변화를 주어 표면 거칠기를 측정한 결과값이다. Fig. 6(a)는 DRY 커팅방식에서의 공구반경 R0.2 mm, R0.5 mm, R1.0 mm, 절삭속도 190 m/min, 이송속도 4 mm/min의 조건에서 절삭깊이 1~10 μm까지 변화를 주었으며, 절삭깊이 4 μm에서 가장 양호한 표면 거칠기 값을 얻을 수 있었다. Fig. 6(b)는 MQL 커팅방식에서 절삭깊이의 변화를 주었으며 공구 반경 0.2 mm의 공구에서는 균등한 값을 갖는 반면, 공구 R 값이 크고 절삭깊이가 작을 수록 표면 거칠기 값이 악화됨을 알수가 있었다.

일반적인 절삭가공에 있어서 이론적 표면 거칠기 값은 절삭깊이에 영향을 받지 않는다. 그러나 실제 미소절삭에서는 Fig. 6의 결과로 볼 때 절삭깊이가 작을 때 표면 거칠기가 떨어지는 경향을 볼 수 있다. 이러한 현상은 절삭깊이가 아주 작을 경우의 칩 배출은 주로 러빙(rubbing)이나 버니싱(burnishing)같은 소성변형에 의해 원활하게 이루어지지 못하며, 소성 변형을 일으킨 표면에서는

큰 잔류 응력이 형성되어 표면의 질에 악영향을 끼치기 때문이다.



a) DRY cutting



b) MQL cutting

Fig. 6 Measurement roughness versus depth of cut

절삭날은 완전하게 날카롭지 못하므로 절삭날 날끝 부분을 확대하여 모델화하면 실린더형으로 가정할 수 있다. 이 때 실린더 부분에 작용하는 힘을 플로잉 힘(plowing force)이라고 한다. 일반적인 절삭가공에 있어서는 절삭깊이가 절삭날끝 반경에 비하여 상당히 크기 때문에 플로잉 힘이 전체 절삭력에 미치는 영향은 거의 없어 무시할 수 있지만, 절삭깊이가 감소할수록 플로잉 힘은 비례적으로 커져 무시될 수 없게 된다. 이러한 힘의 존재로 절삭깊이가 감소할수록 비절삭 에너지(specific cutting energy)가 증가하는 치수 효과가 나타난다. 초정밀가공에서는 이러한 치수 효과를 잘

보여준다.

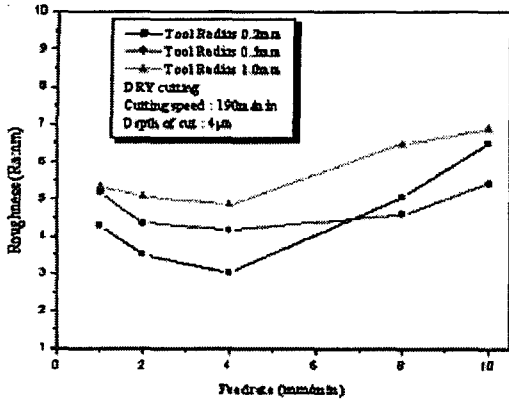
이러한 결과로부터 미소 절삭시 표면 거칠기는 절삭 깊이의 증가와 관련이 있다고 할 수 있다. 또한 절삭유 급유 방식에 따른 표면 거칠기는 DRY 커팅방식 보다는 MQL 커팅방식이 좀 더 정적인 데이터 값을 얻을 수 있음을 보여준다. 또한 공구의 노우즈 반경에 따른 표면 거칠기는 절삭속도와 동일하게 이론적인 표면 거칠기와는 다르게 반경 R1.0 mm, R0.5 mm보다 R0.2 mm공구가 양호한 표면 거칠기를 나타내고 있다.

### 3.3 이송속도 변화에 따른 표면거칠기

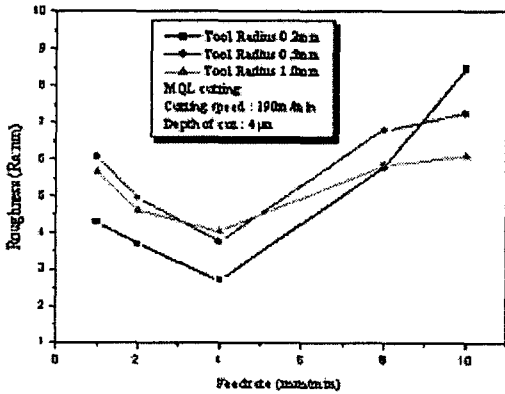
Fig. 7 은 절삭유 급유방식에 따른 이송속도의 변화를 주어 표면 거칠기를 측정된 결과값이다. Fig. 7(a)는 DRY 커팅방식에서의 공구반경 R0.2 mm, R0.5 mm, R1.0 mm, 절삭속도 190 m/min, 절삭깊이 4 µm의 조건에서 이송속도 1~10 mm/min 까지 변화를 주었으며, 이송속도 4 mm/min 에서 가장 양호한 표면 거칠기 값을 얻을 수 있었다.

Fig. 7 (b)는 MQL 커팅방식에서 이송속도의 변화를 주었으며, DRY 커팅방식과 유사한 그래프 형상을 보여주고 있으며, 절삭속도, 절삭깊이의 변화보다 이송속도의 변화의 따라 표면 거칠기 값이 크게 결정됨을 볼 수 있다.

평균적으로 이송속도가 증가하면서 표면 거칠기가 나빠지는 경향을 볼 수 있으며, 이러한 실험 결과는 이송방향의 표면 거칠기는 인선반경과 공작물의 1 분당 이송량의 관계에 의하여 기하학적으로 결정되는 이론적 표면 거칠기와 유사한 경향을 나타내고 있다. 가장 양호한 표면 거칠기를 나타내는 공구는 노우즈 반경 R 0.2 mm의 공구이며, 실험결과는 일반적으로 노우즈 반경이 커짐에 따라 표면 거칠기는 양호하게 나타나는 이론적인 거칠기와는 다른 경향의 측정결과를 나타내었다. 가공시 PMMA 의 칩 배출은 노우즈 반경이 작을수록 용이한 현상을 나타내었고 노우즈 반경이 커질수록 일부의 칩이 공구의 절삭부에 붙어 재료의 표면에 스크래치를 일으키는 현상을 보였으며 이로 인하여 이론적인 거칠기와는 다른 경향이 보이는 것으로 사료된다.



a) DRY cutting



b) MQL cutting

Fig. 7 Surface roughness versus feed rate

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

공작 기계의 진동과 외부 환경 변수들이 절삭 과정에 미치는 영향은 이송이 작은 범위에서 크게 작용하게 되며 평균적으로 4 mm/min 을 초과하면 서부터 이러한 영향보다 이송의 영향이 가공면의 표면 거칠기에 더 크게 작용하고 있음을 볼 수 있다. 따라서 PMMA 의 경우, 노우즈 반경 0.2 mm, 이송속도 4 mm/min 정도로 가공할 경우 양호한 표면 거칠기를 얻을 수 있었다.

### 3.4 HMD System 용 광학계의 초정밀 가공

HMD 용 광학 렌즈 제작은 밀링을 이용하여 폭

22 mm, 길이 16 mm, 두께 7 mm의 직육면체의 시편을 일차 가공 후 지그를 이용하여 제품을 고정하여 가공시에 발생한 변질층 제거를 위하여 다이아몬드공구로 시편 표면을 0.5 mm 정도 가공하고 공구는 실린더형 천연다이아몬드 공구를 사용하였으며, 1 차 황삭 가공에는 공구형상정도(Tool form accuracy) 1 μm인 공구를 사용하여 PMMA 의 초정밀 가공 특성 실험을 바탕으로 HMD 광학계의 접안렌즈의 초정밀 가공을 수행하였으며, Table 2 는 HMD 광학렌즈의 PMMA 시편의 최적가공 조건을 나타낸다.

Table 3 Cutting conditions of PMMA

Material	PMMA
Cutting speed (m/min)	190
Depth of cut (μm)	4
Feed rate (mm/min)	4
Nose radius of tool (mm)	0.2
Cutting fluid	Air+EDM oil (MQL)

PMMA 의 초정밀 가공 특성 실험을 바탕으로 HMD 광학계의 접안렌즈의 초정밀 가공을 수행하였다. 접안렌즈는 양면 모두 비구면으로 이루어져 있으며, 각각의 S1(R25.188)과 S2(R65.2)의 값을 갖는다. 또한 S2 의 비구면부는 2° Tilt 된 형상을 가지므로 지그 설계시 주의를 필요로 하였다.

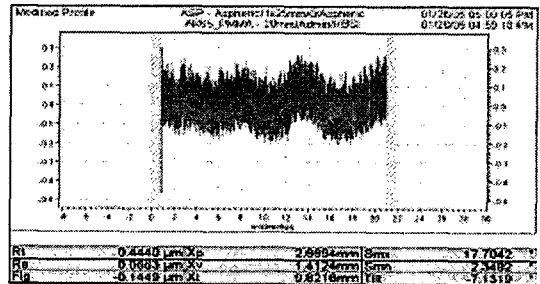


Fig. 8 Measure of aspheric optical lens by form talysurf series2

가공요구형상정밀도 1.0 μm Rt 값을 얻기 위하여 황삭, 중삭가공을 하고 최적 절삭조건인 절삭속도 190 m/min, 절삭깊이 4 μm, 이송속도 4 mm/min, 로 정삭가공을 하였고 Form talysurf series2 를 이용

하여 측정된 결과 S1 에서는 비구면 형상정밀도 0.5755  $\mu\text{m}$  Rt, S2 에서는 0.444  $\mu\text{m}$  Rt 값을 얻을 수 있었으며, Fig. 8 은 측정 결과를 나타낸다.

Fig. 9 는 HMD system 용 접안 렌즈를 가공하는 모습과 가공된 접안렌즈와 삼각프리즘을 나타내고 있으며, Fig. 10 은 초정밀 가공을 마친 HMD system 의 조립된 상태와 실제 보여지는 영상물을 보여주고 있다.



Fig. 9 Cutting of HMD optical lens & Photograph after cutting



Fig. 10 Photograph of HMD System

#### 4. 결론

본 연구에서는 PMMA 의 초정밀 가공 특성을 파악하기 위하여 Nanoform 600 다이아몬드 터닝 머신에서 천연 다이아몬드공구를 사용하였으며, 노우즈 반경, 절삭속도, 이송속도, 절삭깊이, 및 절삭유 급유 조건에 따른 표면 거칠기를 측정하였다. 이러한 PMMA 의 초정밀 가공 특성을 바탕으로 HMD 광학계에 사용되는 비구면 접안 렌즈의 초정밀 가공을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. PMMA 의 소재 가공에 관한 초정밀 절삭특

성을 통하여 PMMA 의 표면 거칠기에 대한 최적 가공 조건은 노우즈 반경 R0.2 mm, 절삭속도는 190 m/min, 이송속도는 4 mm/min, 절삭깊이는 4  $\mu\text{m}$ , 절삭유 급유 방식은 MQL cutting 일 때 가장 양호한 표면 거칠기 2.39 nm Ra 를 얻을 수 있었다.

2. 동일한 절삭조건에서 절삭유 급유 방식에 따른 표면 거칠기 평균을 평가한 결과로서 DRY cutting 에 비해 MQL cutting 에서의 표면 거칠기가 양호하게 나타났다.

3. 다이아몬드 터닝 머신을 이용한 실험에서 천연다이아몬드 공구의 노우즈 반경에 따른 표면 거칠기 평가에서는 공구의 노우즈 반경 R0.5 mm, R1.0 mm보다 작은 R0.2 mm에서 양호한 표면 거칠기를 얻을 수 있었다.

4. 초정밀 가공기를 이용하여 HMD system 의 주요 부품인 비구면 광학 렌즈의 표면에 요구되는 비구면 형상 정밀도에 만족하는 0.5755  $\mu\text{m}$  Rt 와 0.444  $\mu\text{m}$  Rt 의 결과를 얻을 수 있었다.

#### 참고문헌

1. Sugano, T., Ihara, Y., Nnkatsu, Y. and Shinohara, A., "Diamond Turning of an Aluminum Alloy for Mirror," Annals of the CIRP, Vol.36, No.1, pp.17~20, 1987.
2. 이재경, 이응숙, 제태진, 심충건, 조동우, 고태조, "초정밀 경면 절삭 가공 기술 개발," 과학기술처 최종보고서, 1992.
3. Altmann, J., Egle, W. J., Hafner, W., Derst, G., Matthes, A. and Doehring, T., "Fabrication of a demonstration mandrel for ESA's XEUS mirror development program," SPIE, pp. 559-566, 2000.
4. Suzuki, H., Hara, S. and Matsunaga, H., "study on Aspherical Surface Polishing Using a Small Rotating Tool," Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol. 59, No. 10, pp. 1713~1718, 1993.
5. Itoh, S., "Study on Measurement of Axi-Symmetrical Form Generated by Ultra-Precision Machining(3rd Report)," Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol. 61, No. 3, pp. 391~395, 1995.
6. Kim, J. D. and Kim, D. S., "On the size effect of Micro-Cutting Force in Ultraprecision Machining," JSME, Vol. 39, No. 1, pp. 164~169, 1986.