

HMD 광학계용 PMMA 의 초정밀 가공 특성

양진석*(충남대 대학원 기계공학과), 김건희, 양순철, 이인제, 김명상(한국기초과학지원연구원), 이동주(충남대 기계공학과)

Ultra Precision Machining Characteristics of PMMA in HMD optical system

J. S. Yang(Mech. Eng. Dept., CNU), G. H. Kim, S. C. Yang, I. J. Lee, M. S. Kim(Korea Basic Science Institute, KBSI), D. J. Lee(Mech. Eng. Dept., CNU)

ABSTRACT

The aspherical lenses are used as optical lens of HMD optical system. The optimum cutting condition of PMMA lens sample with ultra precision SPDT, the diamond tool nose radius, the cutting speed, the feed rate, the depth of cut, and cutting fluid type are found. The demanded surface roughness $10 \mu\text{m}$ Ra, aspherical form error $1.0 \mu\text{m}$ P-V for aspherical lens of optical data storage device are satisfied.

Key Words : SPDT(단결정 다이아몬드 선반), aspherics(비구면), HMD(Head Mount Display), PMMA(Poly Methyl Methacrylate), MQL(Minimum Quantity Lubrication, 극미량 윤활)

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 정밀 기계부품의 가공은 고 부가가치 기술로서 매우 중요하게 인식되고 있으며, 특히 이러한 제품에 대한 요구 정밀도가 크게 증가하면서 미소 절삭에 의한 초정밀 가공의 필요성이 증대되고 있다.⁽¹⁾ 초정밀 가공에 있어 대표적인 기술은 단결정 다이아몬드공구를 사용하여 초정밀 부품을 가공하는 다이아몬드 터닝머신을 이용한 초정밀 절삭 가공 기술을 말할 수 있다. 초정밀 가공기술은 광학부품 가공에 있어서, 이 기술은 많은 생산비용의 절감과 가공부품의 정밀도를 향상시켜 왔다. 다이아몬드 터닝의 중요한 연구 과제는 가공면의 표면 거칠기와 원하는 치수형상의 정밀도를 향상시키고 가공물의 새로운 재질에 응용하는 기술을 개발하는 것이다.^{(2),(3)} 디스플레이 장치와 영상, 통신기술의 진보가

급속히 이루어지면서 Wearable Computer 개념이 제시되었고 그에 대한 연구가 본격화 되었으며, 그에 따라 필수적으로 필요한 Wearable Monitor로써 필요성과 가능성이 인정되어 연구가 시작되었으며, HMD system은 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 45인치 정도의 대화면을 볼 수 있으며, 또한 양안의 시차를 이용하여 고화질의 3차원 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.

비구면 렌즈는 다수의 구면 렌즈를 하나의 비구면 렌즈로 대체할 수가 있어서 HMD 광학계를 경량화, 고정도화에 이르는 주요 역할을 하고 있다. 대표적인 광학재료로는 광투과성, 광학 특성이 우수한 PMMA, PC등이 광학부품의 제작으로 널리 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 PMMA의 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 System에 사용되는 PMMA비구면 광학렌즈에 대한 초정밀 가공에 관한 연구를 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 연구에 사용된 초정밀 가공기는 프리시텍사의 Nanoform 600 다이아몬드 터닝머신이다.

다이아몬드 터닝 머신은 X축과 Z축 두개의 안내면은 이송정도와 위치 결정 정밀도가 좋아야하며, 진동 발생이 없고 충분한 강성을 요구하므로 유점압 안내면을 사용하였으며, 안내면의 위치결정 정도는 $0.5 \mu\text{m}/250 \text{ mm}$ 이내가 되어야 하며, $0.03 \mu\text{m}/100 \text{ mm}$ 가 최고의 운동정도라고 할 수 있으며,⁽⁴⁾ Nanoform 600의 이송 정도는 $0.25 \mu\text{m}/300 \text{ mm}$, 분해능은 1.25 nm 의 성능을 가진다. 공작물을 고정시키는 스펀들은 발열이 적어 고속 회전이 가능하고 회전 정밀도가 우수하며 수명이 긴 특성을 가진 공기정압 스펀들로 구성되어 있다. X축의 중심부에 위치하는 안내면에 주축 스펀들이 고정되어 안내면의 구동방향과 평행을 이루며, $100\sim 3,000 \text{ RPM}$ 까지 회전한다. Z축 안내면 위에는 공구대가 위치하고 있으며, 스펀들 구동 방향과 수직으로 구동한다. X축과 Z축은 'T'형태의 직교를 이루고 있다. 가공 범위는 선삭의 경우 $\varnothing 600 \text{ mm}$ (125kg), 연삭의 경우 $\varnothing 300 \text{ mm}$ 까지 가공이 가능하다. Fig. 1은 본 연구에 사용된 초정밀 가공기를 보여주고 있다.

초정밀 가공실은 온도 $20\pm 1^\circ\text{C}$, 습도 $30\pm 5\%$, Clean Room class 10,000인 항온항습의 크린룸이며, 외부 인자에 의한 진동을 방지하고 차단하기 위한 독립지반구조로써 장비 하부는 3Point Air Bag으로 지지된다.

표면 거칠기 측정 장비로는 접촉식 표면 측정기인 Form Talysurf series2 및 WYKO사의 비접촉 광학식 표면 형상 측정기인 NT2000을 사용하였다.

본 연구는 HMD System의 광학렌즈의 제작용으로 PMMA를 사용하여 실험을 수행하였다.

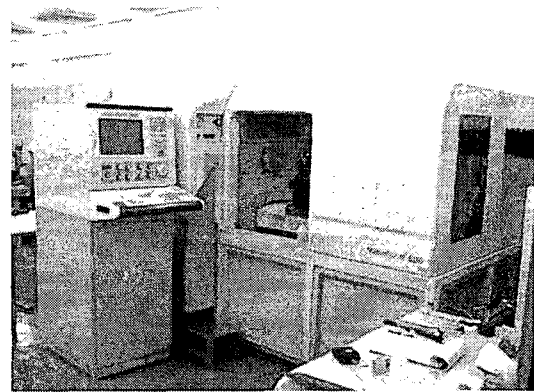


Fig. 1 Nanoform 600 diamond turning machine

2.1 실험 방법

광투과성이 우수한 PMMA의 초정밀 최적가공 조건을 찾기 위하여 Fig. 2와 같이 시편을 제작하여 다이아몬드공구의 노우즈 반경과 절삭유 공급 방식에 따라 절삭속도와 절삭깊이, 이송속도에 대하여 표면 거칠기를 측정하였다. 이때 사용되는 공구의 노우즈 반경은 $R0.2 \text{ mm}$, $R0.5 \text{ mm}$, $R1.0 \text{ mm}$ 로 변화를 주었고, 절삭유의 공급방식은 압축공기만을 사용하는 건식(DRY)과 압축공기와 방전유를 혼합하여 분사하는 극미량(MQL)분사방식을 사용하였다. 이때 절삭속도 $130\sim 210 \text{ m/min}$, 절삭깊이 $1\sim 10 \mu\text{m}$, 이송속도 $1\sim 10 \text{ mm/min}$ 의 조건 변화를 주어 실험을 진행하였다. Table 1은 실험 조건을 나타낸다.

본 실험을 통하여 광학렌즈 소재인 PMMA의 최적의 초정밀 가공조건을 찾아내었으며, 그 가공 조건을 이용하여 HMD 광학계의 비구면 집안렌즈를 제작하였다.

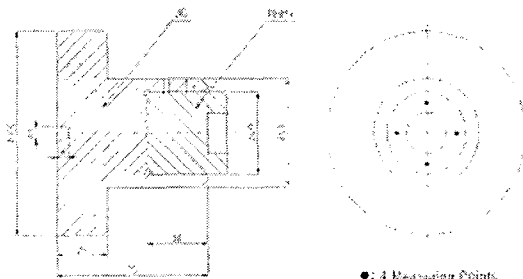


Fig. 2 Test workpiece

Table 1 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 (μm)	1, 2, 4, 8, 10
Vacuum pressure (in.Hg)	-20
Cutting fluid	DRY, MQL

시제품 제작은 선반과 밀링에서 일차 외각을 가공 후 제품 형상 특성에 맞는 지그를 제작 이용하여 제품을 고정하고, 비구면 계수 수식을 적용하여 Tool Path Program 을 사용하여 비구면 가공 경로 Data 를 생성하였으며 요구 정밀도 이내로 가공하였다. 사용된 공구는 천연다이아몬드 공구로써 1 차 황삭 가공에는 공구형상정도(Tool form accuracy) 1 μm 인 공구를 사용하였으며, 정삭 가공시에는 0.05 μm 의 형상정밀도를 갖는 공구를 사용하여 공구형상 정밀도에 따른 가공형상오차를 분석하였으며, HMD 광학계의 비구면 렌즈를 제작하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 절삭속도 변화에 따른 표면 거칠기

Fig. 3 은 절삭깊이 0.4 μm , 이송속도 4 mm/min 로 하여 각각의 노우즈 반경 0.2 mm, 0.5 mm, 1.0 mm 에 대한 절삭유 급유 방식인 DRY 와 MQL 방식에 따른 표면 거칠기를 측정된 결과이다. Fig. 3(a) 는 방전유를 제거하고 Air 만 공급해주는 건식(DRY)방식을 사용하여 공구의 노우즈 반경에 대하여 절삭속도를 단계적으로 130~210 m/min 까지의 변화에 대한 측정결과이다. Fig. 3(b)는 Air 와 방전유를 혼합하여 분사하는 극미량(MQL)방식 이용하여 130~210 m/min 까지의 절삭속도 변화에 대한 측정결과를 나타낸다. 절삭 속도 변화에 대한 실험 결과로 PMMA 의 초정밀 절삭에서 절삭속도는 170 m/min 이상으로 공작물을 가공하는 것이 제품의 정밀도 향상에 도움을 주며, Fig 4 에서 보여 주듯이 MQL cutting 방식으로 노우즈 반경 R0.2 mm, 절삭속도 190 m/min, 이송속도 4 mm/min, 절삭깊이 4 μm 일 때 2.39 nm Ra 로 가장 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

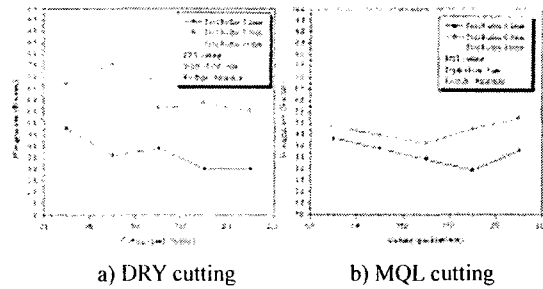


Fig. 3 Surface roughness versus cutting speed

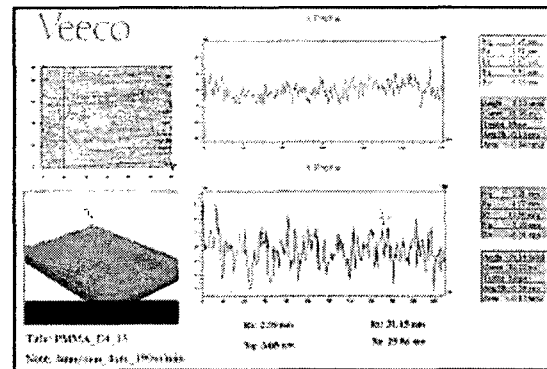


Fig. 4 Measurement of surface roughness by NT2000

3.2 절삭깊이 변화에 따른 표면 거칠기

절삭깊이 변화에 따른 실험은 Fig. 5(a)와 같이 공구 반경 R0.2 mm, R0.5 mm, R1.0 mm에 대한 절삭유 DRY 방식, 절삭속도 170 m/min, 이송속도 4 mm/min 에서, Fig. 5(b)는 노우즈 반경 R0.2 mm, R0.5 mm, R1.0 mm에 대한 절삭유 MQL 방식, 절삭속도 170 m/min, 이송속도 4 mm/min 에서 각각의 절삭 깊이 1~10 μm 에 따른 표면 거칠기를 측정된 결과이며, 미소절삭에서는 절삭깊이가 작을 경우 표면 거칠기가 떨어지는 경향을 볼 수 있다.

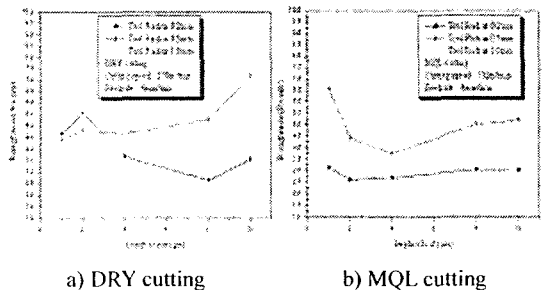
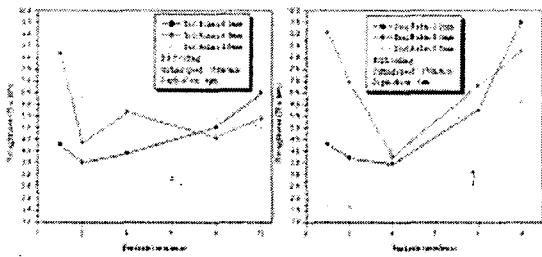


Fig. 5 Measurement roughness versus depth of cut

3.3 이송속도 변화에 따른 표면 거칠기

이송속도 변화에 따른 실험은 Fig. 6(a)와 같이 DRY cutting 에서의 공구 노우즈 반경 R0.2 mm,

R0.5 mm, R1.0 mm, 절삭속도 170 m/min, 절삭깊이 4 μm 에서, Fig. 6(b)는 MQL cutting에서의 공구 노우즈 반경 R0.2 mm, R0.5 mm, R1.0 mm, 절삭속도 170 m/min, 절삭깊이 4 μm 에서 각각 이송속도 1~10 mm/min에 따른 표면 거칠기를 측정하는 결과이다. 평균적으로 이송속도가 일정속도를 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.



a) DRY cutting b) MQL cutting
Fig. 6 Surface roughness versus feed rate

3.4 HMD 광학렌즈가공을 위한 최적가공조건

PMMA의 초정밀 가공 특성 실험을 바탕으로 HMD 광학계의 접안렌즈의 초정밀 가공을 수행하였으며, Table 2는 PMMA 시편의 최적가공 조건을 나타낸다.

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

Table 2 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)

3.5 HMD 광학계의 PMMA 렌즈 가공

본 실험에서는 PMMA의 최적의 초정밀 가공 특성을 이용하여 HMD 광학계에 사용되는 비구면 접안 렌즈를 가공하였다. 가공은 우선 시편을 선반과

밀링을 이용하여 제작하였으며, 각 형상 특성에 맞추어 설계된 지그를 이용하여 제품을 고정하고, 비구면 계수 수식을 적용하여 비구면 가공 경로의 프로그램 Tool path program을 이용하여 가공 경로 Data를 생성하였으며, 초정밀 가공시 절삭속도는 190 m/min으로 선정하였고, 황삭은 이송속도 20 mm/min, 절삭깊이 0.1 mm로, 중삭은 이송속도 10 mm/min, 절삭깊이 10 μm 로 가공하였으며, 정삭 가공은 Table 2와 같이 PMMA의 최적절삭조건인 공구 노이즈 반경 R0.2 mm, 절삭속도 190 m/min, 절삭깊이 4 μm , 이송속도 4 mm/min, MQL cutting 방식으로 가공을 하였다.

3.5.1 접안 렌즈

PMMA의 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 S2의 비구면부는 2° Tilt된 형상을 가지므로 지그 설계시 주의를 필요로 하였다.

Fig. 7은 다이아몬드 공구를 이용하여 렌즈를 가공하고 있는 사진을 나타낸다.

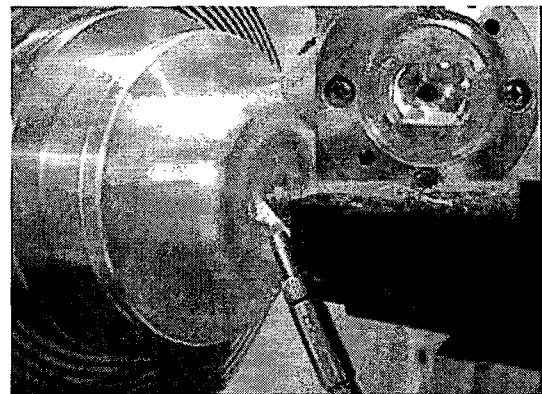
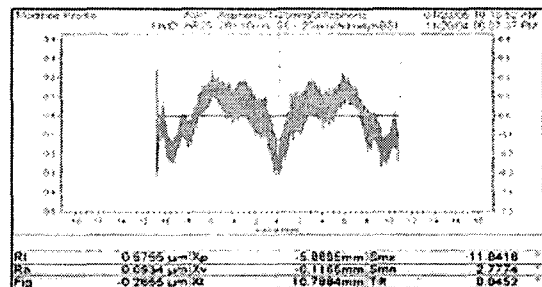
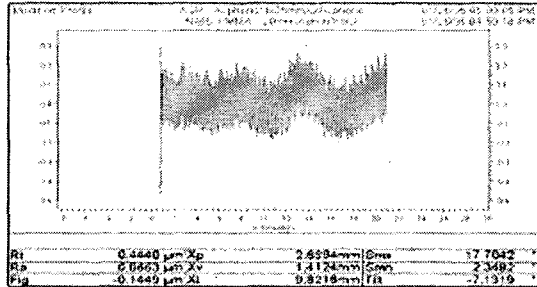


Fig. 7 Photograph of machining PMMA optical lens



a) Measure surface of S1



b) Measure surface of S2

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 이용하여 측정된 결과 S1 에서는 비구면 Rt 값은 0.5755 μm 이며 S2 에서는 0.444 μm 를 얻을 수 있었으며, Fig. 8 은 측정 결과를 나타낸다.

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 절삭특성을 통하여 PMMA 의 표면 거칠기에 대한 최적 가공 조건은 노우즈 반경 R0.2 mm, 절삭속도는 190 m/min, 이송속도는 4 mm/min, 절삭깊이는 4 μm , 절삭유 급유 방식은 MQL cutting 일 때 가장 양호한 표면 거칠기 2.39 μm 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 μm Rt 와 0.444 μm Rt 의 결과를 얻을 수 있었다.

참고문헌

1. T. Sugano, Y. Ihara, Y.Nnkatsu, A.Shinohara, "Diamond Turning of an Aluminum Alloy for Mirror", Annals of the CIRP, Vol.36, No.1, pp.17~20, 1987.
2. 이재경, 이응숙, 채태진, 심충건, 종동우, 고태조, 초정밀 경면 절삭 가공 기술 개발, 과학기술처 최종보고서, 1992
3. Altmann, J., Egle, W. J., et al, Proc. SPIE, pp.559-566, (2000)
4. J. D. Kim, D. S. Kim, "On the size effect of Micro-Cutting Force in Ultraprecision Machining" JSME, Vol. 39, No. 1, pp. 164~169, 1986