

◆특집◆ 나노테크놀로지와 정밀공학

초정밀가공시스템을 이용한 나노가공기술

김건희\*, 홍권희\*, 김상석\*, 원종호\*\*

Nano-turning Technology Using Ultraprecision Machining System

Geon-Hee Kim\*, Kwon-Hee Hong\*, Sang-Suk Kim\* Jong-Ho Won\*\*

Key Words : Diamond turning machine(다이아몬드 터닝머신), NCD(천연다이아몬드), electroless-Ni coated(무전해 니켈도금), aspherical form error (비구면 형상오차), PMMA(poly methly meth acrylate)

1. 서론

다이아몬드 터닝머신은 단결정 다이아몬드 공구를 사용하여 초정밀 부품을 가공하는 공작기계이다. 다이아몬드 터닝 머신은 주로 초정밀 광학렌즈 가공이나 초정밀 방위산업 관련부품을 가공하는데 이용된다. 또한 컴퓨터 디스크용 알루미늄이나 레이저 장비용 구리와 같은 비철금속 부품을 가공하는데 이용된다.<sup>(1)</sup> 70년대 중반이후에 다이아몬드 터닝은 중요한 가공기술로 등장했다. 특히 광학장치 가공에 있어서, 이 기술은 많은 생산비용의 절감과 가공부분의 정밀도를 향상시켜왔다. 미국과 일본등 선진국에서는 이미 초정밀 가공분야에 상당한 연구가 진행되었으며, 우리나라에서는 95년도에 삼성전자에서 렌즈가공을 하기 위해, 98년에는 한국기초과학지원연구원에서 기초과학 연구지원에 필요한 초정밀 부품을 지원하기 위해 다이아몬드 터닝머신을 도입하였고, 앞으로 이 분야에 많은 연구가 요구되고 있다.

다이아몬드 터닝의 중요한 연구과제는 가공면의 표면거칠기와 원하는 치수형상의 정밀도를 향상시키고 가공물의 새로운 재질에 응용하는 기술을 개발하는 것이다.

현재까지 다이아몬드 터닝 가공의 정밀도를 높이기 위해 설계와 재질적인 면, 초정밀한 면의 측정기술, 초정밀 제어 등의 분야에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 새로운 주축의 설계, 미끄럼장치, 베어링, 동력전달계 등의 연구가 수년동안 초정밀가공능력을 향상시키기 위하여 수행되고 있다.

이 글에서는 한국기초과학지원연구원 초정밀가공실의 초정밀가공시스템을 소개하고, 다이아몬드 터닝머신을 이용한 초정밀 가공사례를 소개하고자 한다.

처음에 소개될 내용은 지상관측용 위성카메라 미러 가공이다. 본 가공실에서는 Nanoform 600 다이아몬드 터닝머신을 이용하여 직경 110mm 지상관측용 위성 카메라 비구면 미러를 제작하였다. 본 연구를 통해 비구면 알루미늄 반사경의 가공 특성과 무전해 니켈도금표면의 초정밀 절삭특성을 고찰하였으며, 폴리싱 처리 없이 표면거칠기 Ra1.9nm, 표면형상오차 0.0214μm이하의 금속 비구면 반사경 제작이 가능하였다.

또한 선형가속기에 사용되고 있는 대출력 클라

\* 한국기초과학지원연구원 기계제작팀 초정밀가공실  
Tel. 042-865-3590, Fax. 042-865-3619  
Email kgh@comp.kbsi.re.kr  
\*\* 충남대학교 기계공학과

이스트론 증폭관(작동 주파수 = 2.856 GHz, 침투 출력 = 80 MW, 이하 클라이스트론이라 함) 제작을 수행하였다. 클라이스트론 아노드 및 캐비티의 재료는 항공우주 광학부품, 레이저 미러 등에 이용되는 부산소동을 사용하였으며, 대출력 클라이스트론 증폭관 초정밀가공결과 표면 거칠기 Ra5nm이하, 치수정밀도±0.01mm 이내로 가공하였다.

그 다음으로는 광 정보저장용 비구면 렌즈 가공에 대한 연구이다. 이 연구에서는 고밀도화와 경량화 진전에 따른 광학픽업(Pickup)의 대물렌즈(Objective Lens)로서 비구면 렌즈의 사출에 사용되는 금형을 제작하기 전에 비구면 렌즈 여러 가지 설계변수를 검증하기 위하여 시작품을 제작하였다.

이상과 같은 초정밀 가공의 계속적인 연구는 초정밀 산업들에 아주 필요한 광학적, 기계공학적, 전자부품 요소들의 가공공정 등 넓은 영역에 걸쳐 많은 활용가능성과 함께 지대한 영향을 미칠 것으로 사료된다.

## 2. 초정밀 가공시스템 구축

### 2.1 Nanoform 600 Diamond Turning Machine

여기에 제시된 모든 사례는 Rank Pneumo사의 Nanoform 600 다이아몬드 터닝머신을 이용하여 수행되어졌다. 다이아몬드 터닝머신은 두 개의 유정압 안내면과 공작물을 고정시키는 공기정압 베어링 스펀들로 구성되어있다. 두 안내면은 각각 X축과 Z축으로 T' 형태의 직교를 이루며 구동된다. X축의 중심부에 해당하는 안내면에 주축스핀들이 고정되어 회전하며, 안내면의 구동방향과 평행을 이루며 회전한다. Z축 구동 안내면 위에는 공구대가 고정되어 바이트나 연삭 휠을 설치할 수 있으며, 스펀들 구동 방향과 수직방향으로 구동된다. 안내면의 위치결정정도는 0.25 $\mu$ m/300mm, 분해능은 1.25nm의 성능을 가지며, 최대 가공  $\Phi$ 600 $\times$ 300mm(125kg)까지의 공작물 가공이 가능하다. 안내면의 구동은 DC 모터에 의해 구동되는 정밀 볼 스크루에 의해 이루어지며, 안내면의 위치검출을 위한 피드백 시스템은 ZYGO Laser interferometer system에 의해 측정 제어된다. 안내면 구동 제어는 다이아몬드 터닝 머신을 작동하기 위해 구성된 IBH macro series controller에 의해 이루어진다. Fig. 1은 Nanoform 600 다이아몬드 터닝 머신을 나타낸 것이다.

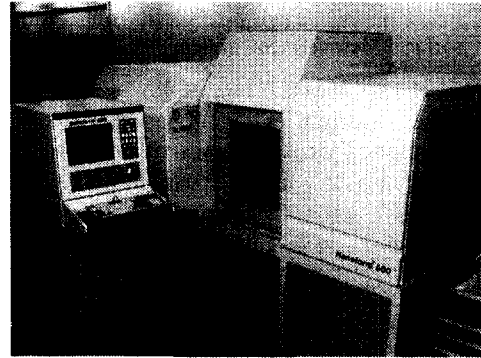


Fig. 1 Nanoform 600 diamond turning machine

### 2.2 Data Aquisition and Analysis System

한국기초과학지원연구원 초정밀 가공실에서는 연구를 수행하는데 있어 효율적인 데이터 획득과 분석을 위해 Fig. 2와 같은 시스템 구축을 수행하였다.

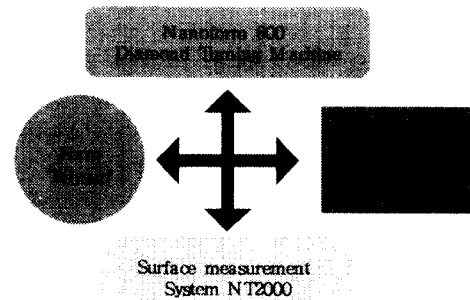


Fig. 2 Data Acquisition and Analysis System

Fig. 2에 나타난 NT2000은 초정밀 가공부품의 미세한 표면 형상을 비접촉식으로 광간섭의 원리를 이용, 확대해서 표면 거칠기 및 국부 현상을 측정하는 장비로써 표면 거칠기 측정에 이용된다. Form Talysurf 접촉식 표면거칠기 측정기는 일반 표면 거칠기 측정 및 초정밀 가공부품의 비구면 형상 정도를 측정하는 장비이며, Laser Interferometer WYKO 6000은 초정밀 가공부품의 표면 형상 정도를 측정하는 장비이다. 위 시스템의 사양은 Table. 1에 나타내었다.

Table 1 Comparison of measured roughness data

Surface Measurement system NT2000
- Vertical resolution : 0.1nm 이하 - 측정원리 : 광학계를 이용한 비접촉 방식 - 최대측정범위 : 100mm * 100mm - 수직방향 측정 폭 : 0.1nm - 150um - 반복정확도 : 0.1nm - 측정이송방식 : 자동
Laser Interferometer WYKO 6000
- Wave length : 632.8nm - 정밀도 : $\lambda / 100$ PV at 632.8 nm - Resolution : $\lambda / 1,000,000$ - Transmission sphere : f/0.75, f/3.2 f/7.0
Form Talysurf 접촉식 표면거칠기 측정기
- 측정 범위 : 120mm - 정밀도 : 0.5um/120mm, 0.2um/20mm - Data resolution : 0.25um - Standard stylus : 1.5-2.5um radius

### 3. 초정밀가공사례

#### 3.1 지상 관측용 위성카메라 비구면 경면가공

최근 국내에서도 개발중인 위성 카메라는 생태계 변화나 환경오염 등의 일반적인 지구관측 뿐만 아니라 정밀한 지도제작 등에도 사용될 수 있는 고해상도 광학계이므로 미국 등의 선진국에서도 기술이전을 매우 기피하는 첨단기술이다.<sup>(3)</sup> 하지만 독자적인 위성영상의 자율적인 획득 및 관리를 위해서는 고해상도 위성카메라의 자체개발이 필수적이며 광학설계, 제작 및 평가기술의 확보가 절대적으로 필요하다. 본 연구에서는 다이아몬드 터닝 머신을 이용하여 지상관측용 위성 카메라 미러에 사용되는 직경 110mm의 금속 비구면 반사경을 제작하였다. 반사경의 초정밀가공특성 연구를 위해 두 가지 공정으로 제작하였다. 첫 번째 공정은 알루미늄 합금(Al6061-T651)을 열처리 후 초정밀가공 하였으며, 두 번째 방법은 첫 번째 공정으로 초정밀 가공된 제품의 표면에 100 $\mu$ m의 두께로 무전해 니켈도금 후 비구면 형상을 가공하였다.<sup>(4)</sup>

알루미늄과 무전해 니켈도금의 초정밀 최적가공 조건을 찾기 위하여 시편을 제작하여 주축회전속도, 이송속도, 절삭깊이에 대한 표면거칠기를 측정

하여 최적가공조건을 찾아내었으며, 그 가공조건을 이용하여 비구면 반사경을 제작하였다.<sup>(5)</sup> Table 2에 Al6061-T651과 무전해 니켈의 가공 조건을 나타내었으며, Fig. 3은 실제 반사경 가공 모습을 보여준 것이다.

Table 2 Basic set of cutting conditions

Material	Al6061-T651	Electroless-Ni coated
Spindle speed	1600rpm	1200rpm
Cutting Depth( $\mu$ m)	2, 3, 5, 10	0.5, 1, 2, 4
Tool Radius	0.5mm	0.5mm
Feedrate(mm/min)	3, 6, 12, 30	1, 2, 4, 8
Diameter of workpiece	110mm	110mm

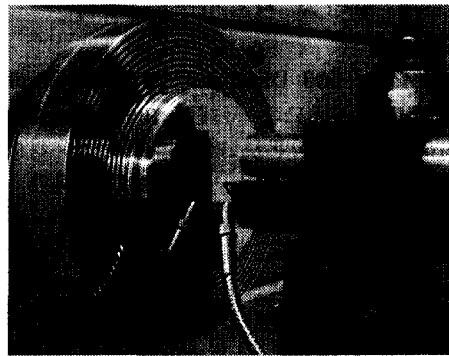
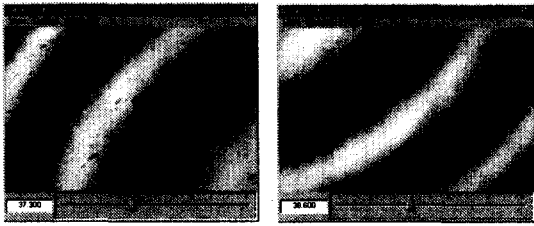


Fig. 3 Manufacturing of aspheric Ni-coated mirror

Fig. 4 (a)는 알루미늄 합금의 초정밀 가공표면, (b)는 니켈도금의 초정밀가공 후의 표면을 나타낸 것으로 (a) 알루미늄합금 표면에는 재료 자체에 많은 불순물이 함유되어 가공표면이 무전해 니켈도금 표면에 비하여 매우 좋지 않은 결과가 나타남을 알 수 있다. 비접촉식 표면거칠기 측정기로 국부적인 표면의 측정결과 순수알루미늄의 경우 Ra6.5nm정도이며, 무전해 니켈도금표면의 경우는 Ra1.9nm의 결과 값을 얻었다.



(a) Bear Al6061                      b) Ni-coated  
 Fig. 4 State of reflector cutting surface by NT2000

또한 위성용 카메라의 시스템성능에 절대적으로 영향을 미치는 형상오차는 Rank Talysurf Hobson사의 Form Talysurf를 이용하여 측정하였다. Fig. 5은 산화 방지막을 입힌 면의 최종 형상오차로써 중심선을 따라 형상을 측정한 후 설계에서 요구되는 표면방정식을 뺀 나머지를 보여주는 반사경의 비구면 형상 측정결과이다. 직경 $\phi$ 110mm에 대하여 Ra0.0298 $\mu$ m이며, 표면형상오차 0.0214 $\mu$ m로써 위성용 반사경의 요구정밀도 이내로 제작하였다.

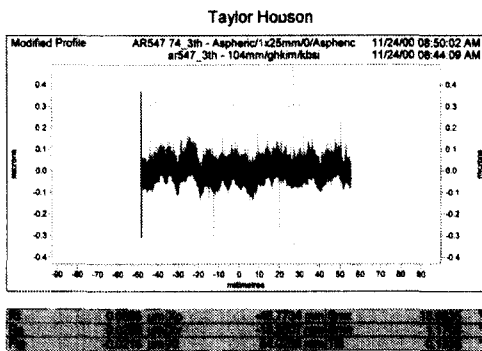


Fig. 5 Measure of Aspheric Ni reflector by Form Talysurf

### 3.2 대출력 클라이스트론 증폭관 초정밀가공

선형가속기에 사용되고 있는 대출력 클라이스트론 증폭관(작동 주파수 = 2.856 GHz, 침투 출력 = 80 MW, 이하 클라이스트론이라 함.)의 내면(아노드 및 캐비티)은 전자 및 마이크로파가 진행되는 동안 표면의 요철에 의한 아크 발생의 유무가 그 성능을 좌우한다. 또한 내면의 거칠기는 표면적과 직접적인 상관관계가 있어 내부 진공도에 중요한

변수가 된다. 특히 아노드면은 전자총에서 발생된 전자의 집속을 결정하는 부품으로서 그 형상 및 표면의 거칠기에 따라 아노드 주변에 형성되는 자장의 품질이 결정된다. 따라서 아노드 및 캐비티의 내면은 엄격한 형상 규제와 함께 표면 거칠기 정도를 Rmax 0.03S 이하로 규제하고 있다.

클라이스트론 아노드 및 캐비티의 재료로는 항공우주 광학부품, 레이저 미러 등에 이용되는 무산소동을 사용하였으며, 재료의 외경은  $\Phi$ 100mm이며, 가공내경은  $\Phi$ 30~33mm정도로 7개의 부품을 가공하여 조립 후 용접하는 제품이다. Fig. 6은 클라이스트론 캐비티 및 아노드의 3차원 모델링을 나타낸다.

사용된 NCD 공구는 코너 반경 노즈 R=0.3mm, 경사각 0°로 여유각 10°로 예리하게 완성된 R바이트를 이용하였다. 또한, 가공액으로서 방전유를 압축공기와 혼합하여 분사하는 세미드라이 방법을 취하였다.

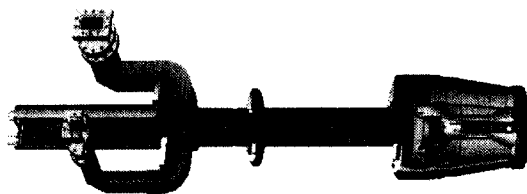


Fig. 6 3D assemble modeling of klystron anode and cavity

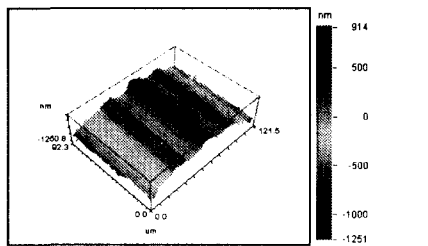
무산소동의 최적가공조건을 얻기 위한 실험결과 주축 회전수 1500rpm, 이송속도 3mm/min, 절삭깊이 2 $\mu$ m에서 Ra3nm의 표면거칠기를 얻었다. 이 결과를 기초로 본 연구에서는 Table 3과 같은 가공조건으로 가공을 수행하였다.

Table. 3 Basic set of cutting conditions

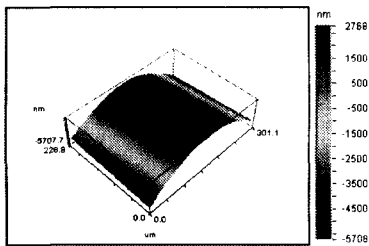
Material	OFHC
Spindle speed (rpm)	1500
Cutting Depth( $\mu$ m)	2, 4, 8, 15
Tool Radius	0.3mm
Feedrate(mm/min)	3, 6, 15, 30

Fig. 7은 곡률 R1.75의 부분을 (a)는 CNC 선반에서 가공한 표면형상이며, (b)는 다이아몬드 터닝 머신을 이용하여 가공한 형상을 나타낸다. Fig. 8은 아노드부분의 가공사진이다.

대출력 클라이스트론 증폭관 초정밀가공결과 표면거칠기 Ra5nm이하, 치수정밀도±0.01mm이내로 가공하였다. 선형가속기에 사용되고 있는 대출력 클라이스트론 증폭관의 내면 초정밀 가공을 통하여 초정밀 가공용 치공구 설계·제작기술 향상과 무산소동 부품의 초정밀 최적가공조건에 대한 DB구축으로 국내 초정밀 가공기술의 향상에 기여할 것이다.

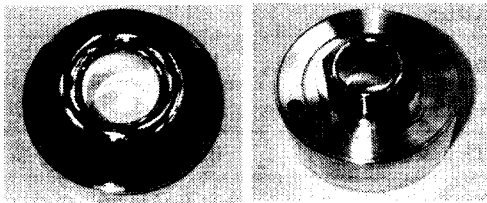


a) Surface measurement 3D analysis of CNC lathe



b) Surface measurement 3D analysis of DTM

Fig. 7 Curve radius measure of cavity by NT2000



a) Anode                      b) Cavity

Fig. 8 Photo of klystron anode and cavity

### 3.3 광 정보저장용 렌즈 가공

고밀도화와 경량화 진전에 따라 광학 픽업(Pickup)의 대물 렌즈(Objective Lens)로서 비구면 렌즈의 사출에 사용되는 금형을 제작하기 전에 비구면 렌즈 여러 가지 설계변수를 검증하기 위한 시제품을 제작하였다. 따라서 사출 재료인 PMMA의 가공특성을 고찰하기 위해 최적가공조건을 찾아내었으며, 비구면 렌즈의 시제품 가공을 통하여 광 픽업 렌즈의 초정밀가공기술 연구를 수행하였다.<sup>(6)</sup>

실험을 통하여 PMMA의 초정밀 최적가공조건은 주축회전수 1800rpm, 이송속도 4mm/min, 절삭깊이 4μm일 경우 Ra3.22nm 정도의 표면거칠기를 얻을 수 있었다.

이 가공조건을 이용하여 비구면 광학 픽업 렌즈의 시제품을 제작하였다. 시제품 제작은 선반에서 일차 외각을 가공 후 지그를 이용하여 제품을 고정한다. 이때 지그의 요구정밀도는 동심도 1μm, 내경여유치수 0~2μm이내로써 실제 가공부품의 정밀도를 좌우하는 매우 중요한 요소이다. 따라서 지그 제작은 1차 범용장비에서 선삭 후 초정밀가공기를 이용하여 초경 바이트를 사용하여 제작하였다.

공구는 NCD 바이트로써 1차 황삭 가공에는 공구형상정밀도 2μm인 공구를 사용하였으며, 정삭 가공시에는 0.05μm의 형상정밀도를 갖는 공구를 사용하여 광 정보저장용 비구면 렌즈를 제작하였다.

광 저장용 비구면 렌즈의 규격은 두께 2mm, 직경 2.5mm 곡률 반경은 약 R0.9mm의 비구면 렌즈로, 가공 요구정밀도는 표면거칠기 Ra10nm, 형상정도 P-V 0.5μm이하의 정밀도를 요구한다.

비구면 렌즈의 형상가공은 일차적으로는 비구면 가공프로그램을 이용하여 NC 프로그램을 작성하고, 최적곡률 반경을 찾아 구면 가공한다. 곡률 반경과 형상정도를 측정하여 바이트의 높이와 X축의 위치 수정으로 공구를 단면부 곡면 중심부분에 발생하는 센터마크의 크기를 2μm 이내로 최소화하여 공구를 설치한다. 공구의 설치정밀도에 따라 제품의 가공형상정밀도가 결정된다. Table. 4는 광 픽업용 PMMA 렌즈의 초정밀 가공조건이며, Fig. 9는 광 정보저장용 비구면 렌즈의 초정밀가공 사진을 나타낸다.

Fig. 10은 Form talysurf를 이용하여 비구면 형상을 측정한 결과로써, (a)는 형상정밀도 2μm를 갖는 NCD 바이트로 가공한 결과이며, (b)는 형상정밀도 0.05μm를 갖는 NCD 바이트로 가공한 결과를

나타낸다. 비구면 측정에서 나타나는 결과와 같이 공구의 형상정밀도에 따라 제품의 가공형상 결과 값이 그대로 제품에 전사되어 나타나는 것을 볼 수 있다.

Table. 4 Basic set of cutting conditions

Material	PMMA
Spindle speed (rpm)	1800
Cutting Depth( $\mu\text{m}$ )	4, 8, 12
Tool Radius(mm)	0.2
Feedrate(mm/min)	4, 8, 12

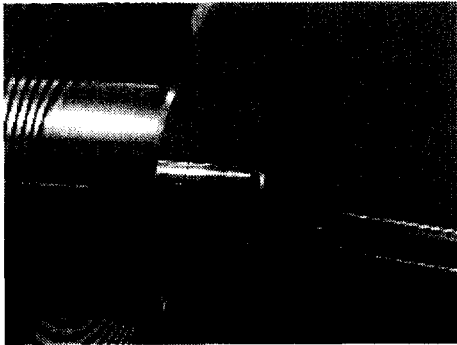
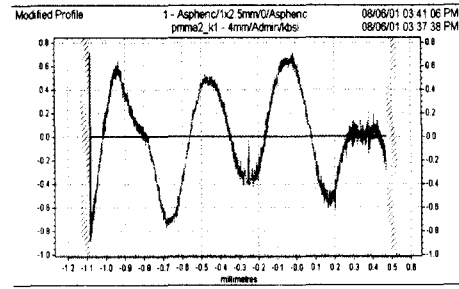


Fig. 9 Manufacture of Laser pickup lens

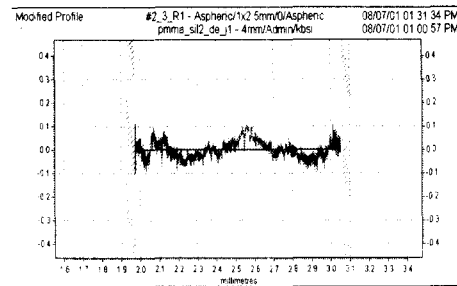
공구의 형상정밀도에 따른 비구면 형상정밀도는  $2\mu\text{m}$ 일 때  $Rt1.5962\mu\text{m}$ ,  $0.05\mu\text{m}$ 일 때  $Rt0.2119\mu\text{m}$ 의 결과 값을 얻을 수 있었다. 이는 초정밀 가공기의 기구학적 메카니즘이 X축과 Z축의 2축 제어만으로 곡면을 가공하게 되어 공구의 형상정밀도가 제품에 전사되는 원리를 나타낸다. 여기서 제품의 형상정밀도에 크게 영향을 주는 요소 중의 하나가 공구의 형상정밀도임을 알 수 있다.

Fig. 11은 광 정보저장용 비구면 렌즈의 시험절삭과 실제 가공 제품을 나타낸다. 광 정보저장용 비구면 렌즈의 가공결과 요구되는 정밀도인 표면 조도  $Ra10\text{nm}$ 는  $Ra3.5\text{nm}$ , 형상정도  $P-V0.5\mu\text{m}$ 이하는  $P-V0.2119\mu\text{m}$ 로 가공을 완료하였다.



Rt	1.5962 $\mu\text{m}$ Xp	0.2119mm Smv	8.2181 $^{\circ}$
Ra	0.3071 $\mu\text{m}$ Xv	0.3422mm Smn	1.5889 $^{\circ}$
Fig	0.5883 $\mu\text{m}$ Xl	0.5833mm TrR	0.2461 $^{\circ}$

a) Form accuracy  $2\mu\text{m}$



Rt	0.2119 $\mu\text{m}$ Xp	0.0095mm Smv	8.2181 $^{\circ}$
Ra	0.0310 $\mu\text{m}$ Xv	0.3422mm Smn	1.5889 $^{\circ}$
Fig	0.0880 $\mu\text{m}$ Xl	0.5833mm TrR	0.0377 $^{\circ}$

b) Form accuracy  $0.05\mu\text{m}$

Fig. 10 Measure of Pickup lens by Form Talysurf

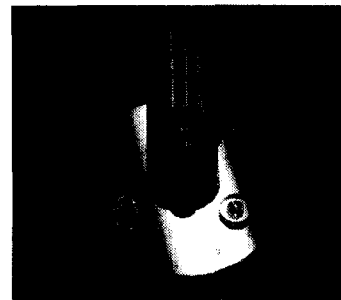


Fig. 11 Photo of aspherical lens

#### 4. 결론

이 글에서는 초정밀가공시스템 구축을 위하여 초정밀가공에 필요한 주요장비 및 공구 특성에 관하여 기술하고, 단결정 천연다이아몬드 공구를 이용한 각종 재질에 따른 나노가공사례에 대하여 기술하였다.

1. 다이아몬드 터닝 머신을 이용하여 직경 110 mm 지상관측용 위성 카메라 비구면 미러 제작 과정을 소개하였다. 또한 비구면 알루미늄 반사경의 가공과 무전해 니켈도금표면을 초정밀 절삭하여 보았으며, 폴리싱 처리 없이 표면거칠기 Ra1.9nm, 표면형상오차 0.0214 $\mu$ m이하의 금속 비구면 반사경을 제작하였다.

2. 선형가속기에 사용되고 있는 대출력 클라이스트론 증폭관 내면의 초정밀가공을 소개하였다. 클라이스트론 아노드 및 캐비티의 재료는 항공우주 광학부품, 레이저 미러 등에 이용되는 무산소동을 사용하였으며, 대출력 클라이스트론 증폭관 초정밀 가공결과 표면 거칠기 Ra 5nm이하, 치수정밀도  $\pm 0.01$ mm 이내로 가공하였다.

3. 광 정보저장용 비구면 렌즈 가공에 관한 연구를 소개하였다. 고밀도화와 경량화 진전에 따라 광학 픽업의 대물 렌즈로서 비구면 렌즈의 사출에 사용되는 금형을 제작하기 전에 비구면 렌즈 여러 가지 설계변수를 검증하기 위하여 시작품을 제작하였다. 가공표면거칠기는 Ra3.5nm, 표면형상정도 P-V 0.2119  $\mu$ m로 가공을 완료하였다.

앞으로 나노단위의 초정밀가공을 위해서는 재질에 따른 가공조건의 데이터 축척 및 선삭 후의 폴리싱 공정에 대한 기술력 축적과 대구경 비구면 형상 측정기술 개발이 요구된다.

#### 참고문헌

1. Moriwakint, T., and Shamoto, E., " Ultraprecision Diamond Turning of Stainless Steel by Applying Ultra Sonic Vibration" Annals of the CIRP, Vol. 40, pp. 559-562, 1991.
2. Tlusty, J., Smith, S., and Zamudia, C., "Operation Planning Based on Cutting Process Model," Annals

of the CIRP, Vol. 39, pp. 517-521, 1990.

3. 이윤우, "고해상도 위성카메라 평가 기술," 측정 표준, 제22권, 제2호, pp. 29-41.
4. Sugano, T., and K. Takeuchi, "Diamond Turning of an Alluminum Alloy for Mirror" Annals CIRP, Vol. 35, pp. 17-20, 1987.
5. 김건희 외5인, "초정밀 가공기를 이용한 알루미늄 반사경의 절삭특성," 한국정밀공학회 2001년도 춘계학술대회논문집 pp. 1125-1128, 2001.
6. 김건희 외6인, "초정밀가공기를 이용한 광 저장용 렌즈의 절삭특성," 한국정밀공학회 2001년도 추계학술대회논문집 pp. 891-894, 2001.