

다이아몬드 터닝머신을 이용한 금속 비구면 초정밀 절삭특성

김건희*, 도철진*, 홍권희*, 유병주*, 원종호**, 김상석***

A study of metal aspheric reflector manufacturing in diamond turning machine

G. H. Kim, C. J. Do, K. H. Hong, B. J. Rui, J. H. Won, S. S. KIM

Key Words: aspheric(비구면), SPDT(단결정 다이아몬드 선반), secondary mirror(부반사경), electroless-Ni coated(무전해 니켈도금), Surface roughness(표면 거칠기)

Abstract

A 110 mm diameter aspheric metal secondary mirror for a test model of an earth observation satellite camera was fabricated by ultra-precision single point diamond turning (SPDT). Aluminum alloy for mirror substrates is known to be easily machinable, but not polishable due to its ductility. A harder material, Ni, is usually electrolessly coated on an Al substrate to increase the surface hardness for optical polishing. Aspheric metal secondary mirror without a conventional polishing process, the surface roughness of $R_a=10\text{nm}$, and the form error of $R_a=\lambda/12$ ($\lambda=632\text{nm}$) has been required. The purpose of this research is to find the optimum machining conditions for reflector cutting of electroless-Ni coated Al alloy and apply the SPDT technique to the manufacturing of ultra precision optical components of metal aspheric reflector.

1. 서론

다이아몬드 터닝 머시인은 단 결정 다이아몬드 공구를 사용하여 초정밀 부품을 가공하는 공작기계이다. 초정밀 가공기술은 광학장치 가공에 있어서, 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.^{(1),(2),(3)}

지상관측용 망원경에 이용되는 렌즈 반사경은 낮은 열팽창계수를 가지는 세라믹 렌즈 개발 혹은 경량의 렌즈 개발이 가능함에 따라 획기적인 전환점을 맞이하고 있다. 기존에는 열팽창이 평형에 빨리 도달할 수 있는 재료를 얻는 것보다는 열팽창계수를 감소시키는 것이 훨씬 낫다고 믿어왔다. 그러나 점차 알루미늄 합금 미러가 우수한 열 확산성, 균질성과 가격이 저렴한 점으로 볼 때 기존의 재료에 비해 매력을 끄는 재료로 고려되어지고 있고, 또한 쉽게 구할 수 있다는 점에 그 장점이 있다.^{(4),(5)}

일반적인 금속을 이용하여 망원경을 디자인한 경우, 확산성 있는 열 특성은 망원경 내에 보다는 균질 온도를 산출해 낼 수 있으며, 훨씬 빠르게 대기온도에 도달하고, 열 증감이나 광학

* 한국기초과학지원연구원

** 충남대 기계공학과

*** 조선대 기계공학과 대학원

설계변화에 대한 위험을 제거할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 알루미늄 소재의 표면에 무전해 니켈도금 된 비구면 반사경의 경면가공을 위하여 초정밀가공기를 이용하여 알루미늄합금의 비구면 반사경을 가공하였으며, 무전해 니켈도금 표면의 초정밀 가공 최적조건을 찾아내었으며, 니켈도금처리 된 지상관측 위성 카메라용 비구면 반사경을 요구 표면정밀도 Ra10nm, 형상오차 Ra $\lambda/12$ 이하의 금속 비구면 반사경으로 제작하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 및 재료

본 연구에 사용된 초정밀 가공장비는 RTH사의 Nanoform 600 다이아몬드 터닝머시인(DTM)을 이용하였다. 사용 공구는 R0.5의 NCD bite를 사용하였으며, 측정장비로는 WYKO사의 비접촉 광학식 측정기(NT2000)와 Laser interferometer WYKO6000 및 RTH사의 비구면 측정기인 Form Talysurf series2를 사용하였다. Fig. 1은 초정밀 가공 시스템을 나타낸다.

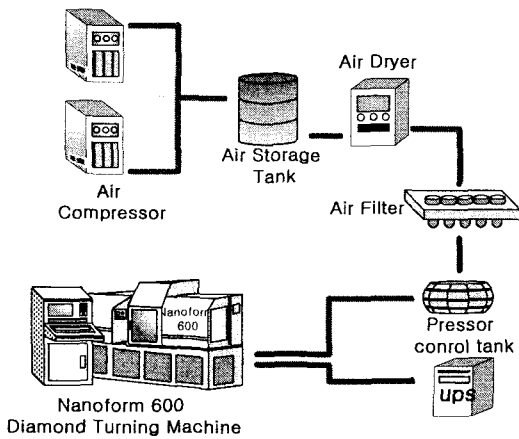


Fig. 1 The system Ultra precision lathe

사용재료는 Table 1과 같은 화학조성을 갖는 AL6061-T651을 사용하였으며, 비구면 형상으로 가공된 알루미늄 반사경 표면 위에 100 μ m의 두께로 무전해 니켈도금을 실시하였다. 무전해 니켈

도금의, 화학조성은 Ni 90-91% , P 8-10%이며, 정도는 HRc49 정도이다. Fig. 2는 무전해 니켈도금표면의 최적가공조건을 찾기 위한 시편으로 실제 가공제품과 동일한 조건으로 니켈도금의 절삭 시험용 시편의 형상 및 측정위치를 나타낸다

Table 1 Compositions of work piece used in experiment

	Mg	Al	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn
AL6061	0.867	97.86	0.50	0.02	0.07	0.014	0.078	0.25	0.021

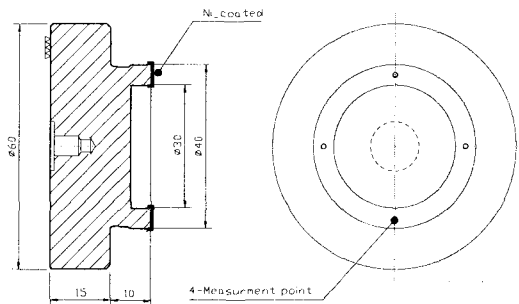


Fig. 2 Shape of test workpiece

2.2 실험방법

무전해 니켈도금의 초정밀 최적가공조건을 찾기 위하여 Fig. 2와 같이 시편을 제작하여 이송속도와 절삭깊이에 대한 표면거칠기를 측정하여 최적초정밀 가공조건을 찾아내었으며, 그 가공조건을 이용하여 금속 비구면 반사경을 제작하였다.

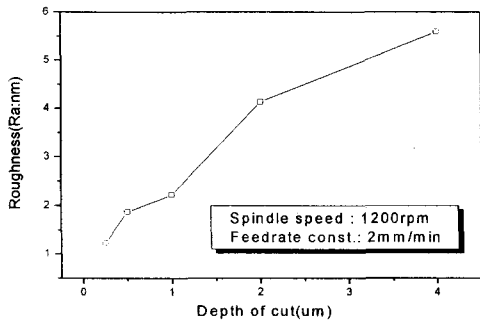
비구면 반사경의 초정밀가공을 위하여 알루미늄합금을 최적 곡률반경으로 가공하여 Laser interferometer WYKO6000로 표면의 전체형상을 측정하여 정확한 위치에 공구를 설치하였다.

그 후 비구면 프로그램을 이용하여 비구면 알루미늄 반사경을 가공하였으며, 소재에 무전해 니켈도금을 처리하여 비구면 니켈도금 알루미늄 반사경을 제작하였다. 비구면 형상의 측정은 RTH(Rank Taylor Hobson)사의 Form Talysurf series2를 이용하여 측정하였다.

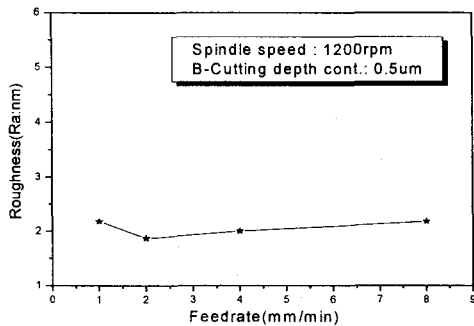
3. 실험결과 및 고찰

3.1 니켈도금 표면의 표면 거칠기

Fig. 3은 절삭조건에 따른 무전해 니켈도금 표면 거칠기를 나타낸다. 절삭조건을 주축회전수 1200rpm에서, (a)는 이송속도 2mm/min의 절삭조건으로 절삭깊이 변화에 따른 표면 거칠기를 나타내고, (b)는 절삭깊이 0.5 μ m의 조건에서 이송속도 변화에 따른 표면 거칠기를 나타낸다. 이송속도보다는 절삭깊이 변화에 따라 표면 거칠기의 변화가 크게 나타나며, 절삭깊이를 작게 할수록 양호한 표면 거칠기를 얻을 수 있으며, 이송속도는 2mm/min에서 가장 양호한 거칠기의 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 4는 비접촉식 표면 거칠기로 니켈도금 표면을 주축속도 1200rpm, 이송속도 2mm/min, 절삭깊이 0.5 μ m일 때의 표면 거칠기 측정결과를 나타낸다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 위의 절삭조건에 따라 가공한 결과 1.22nm 정도의 Ra값을 얻어 낼 수 있다.



(a) Depth of cut



(b) Feedrate

Fig. 3 Roughness(Ra:nm) versus of cutting condition

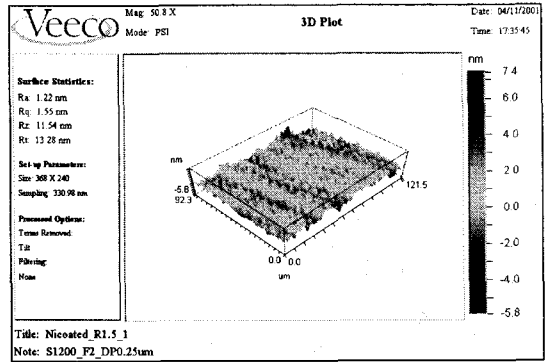


Fig. 4 Roughness(Ra:nm) of Ni₂coated

3.2 비구면 반사경의 제작특성

비구면 알루미늄 반사경의 규격은 두께 23mm, 직경 ϕ 110mm, 곡률 반경은 약 600mm의 비구면 반사경으로, 가공 정밀도는 표면조도가 직경 ϕ 110mm에 대하여 RMS 값이 $\lambda/12$ ($\lambda=632$ nm) 이하이며, 평균 표면 거칠기는 Ra10nm 이하의 정밀도를 요구한다.

비구면 반사경의 형상가공은 일차적으로는 비구면 가공프로그램을 이용하여 최적곡률 반경 (Best Radius)을 찾아 구면 가공한다. 곡률 반경과 형상정도를 측정하여 공구 설치 후 비구면 프로그램을 작성하여 가공한다. Table 2는 초정밀 절삭조건이며, Fig. 5는 비구면 니켈도금 알루미늄 반사경의 초정밀가공 사진을 나타낸다.

Table 2 Basic set of cutting conditions

Material	Electroless-Ni coated
Spindle speed	1200rpm
Cutting Depth	0.5, 1, 2, 4(μ m)
Tool Radius	0.5mm
Feedrate	1, 2, 4, 8 (mm/min)
Diameter of workpiece	110mm

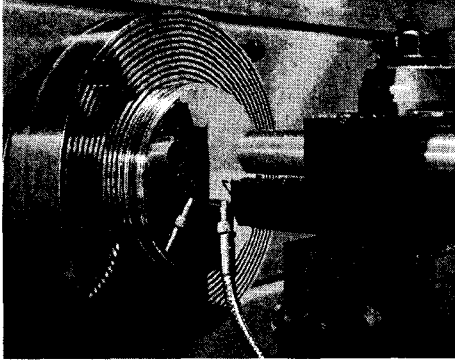
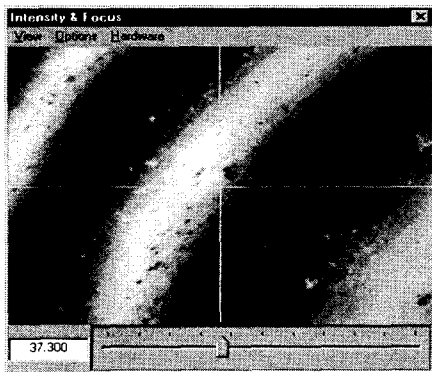


Fig. 5 Manufacture of Aspheric Ni_coated mirror

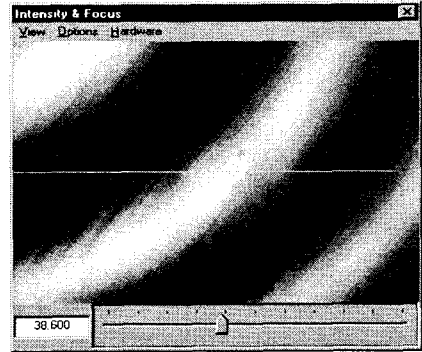
3. 3 비구면 반사경의 표면 평가

직경 $\phi 110\text{mm}$ 의 비구면 반사경의 표면형상의 측정은 비구면 표면 측정기인 영국 RTH사의 Form Talysurf와 미국 WYKO사의 비접촉식 표면 거칠기인 NT2000을 이용하여 측정하였다.

Fig. 6과 Fig. 7은 알루미늄합금과 니켈도금의 초정밀 가공 후 표면 거칠기 측정기인 WYKO사의 레이저 간섭에 의한 비접촉식 표면조도 측정기인 NT2000으로 측정한 결과이다. Fig. 6 (a)는 알루미늄 합금의 초정밀 가공표면, (b)는 니켈도금의 초정밀가공 후의 표면을 나타낸다. 알루미늄합금 표면에는 재료 자체에 많은 불순물이 함유되어 가공표면이 무전해 니켈도금표면에 비하여 매우 좋지 않은 결과가 나타남을 알 수 있다. Fig. 7의 측정 결과에서 국부적인 표면의 측정결과 순수알루미늄의 경우 $Ra 6.5\text{nm}$ 정도이며, 무전해 니켈도금표면의 경우는 $Ra 1.9\text{nm}$ 의 결과 값을 얻었다.



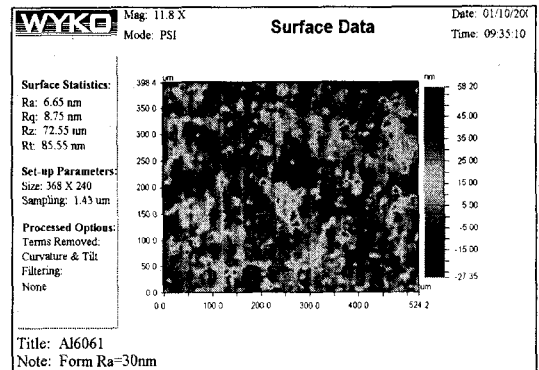
(a)



(b)

Fig. 6 State of surface (a)cutting surface of Al, (b)cutting surface of Ni_coated

위성용 카메라의 시스템성능에 절대적으로 영향을 미치는 form error는 Rank Talyor Hobson사의 Form Talysurf를 이용하여 측정하였다. Fig. 8은 산화 방지막을 입힌 면의 최종 form error로서 중심선을 따라 형상을 측정한 후 설계에서 요구되는 Surface equation을 뺀 나머지를 보여주는 반사경의 비구면 형상 측정결과이다. 직경 $\phi 110\text{mm}$ 에 대하여 RMS $0.0298\mu\text{m}$ 이며, 표면형상오차(Fig error) $0.0214\mu\text{m}$, 표면 거칠기 $Ra 0.0298\mu\text{m}$ 로써 위성용 반사경의 요구정밀도 이내로 제작하였다. Fig. 9 비구면 니켈도금 알루미늄반사경의 제품을 나타낸다.



(a) Bear Al6061

4. 결론

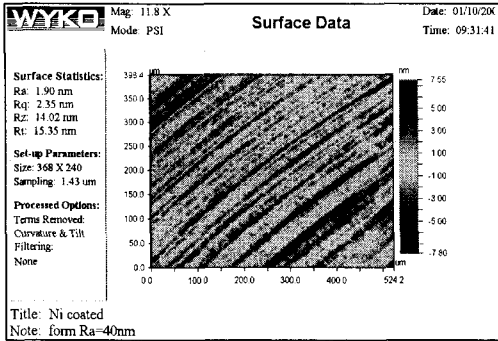
본 연구에서는 초정밀가공기(Nanoform600)로 천연다이아몬드 공구를 사용하여 알루미늄합금의 비구면 반사경을 가공하고, 그 표면에 무전해 니켈도금처리 후 지상관측용 위성 카메라에 사용되는 비구면 니켈도금 알루미늄 반사경의 초정밀 절삭 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 무전해 니켈도금표면의 초정밀 최적가공조건은 주축속도 1200rpm, 이송속도 2mm/min, 절삭깊이 0.5 μ m일 때 Ra1.22nm 정도의 표면거칠기를 얻을 수 있었다.
- (2) 금속반사경의 국부적인 표면측정결과 Al6061반사경은 Ra6.5nm, 무전해 니켈도금은 Ra1.9nm의 표면 거칠기를 얻었다.
- (3) 기준곡면 ϕ 110mm에 대한 표면조도 Ra0.03 μ m, 형상오차 Ra0.05 λ 이하의 초정밀 비구면 니켈도금 알루미늄 반사경을 제작하였다.

본 연구과제 수행으로 무전해 니켈도금기술 및 초정밀 가공기술 축적 효과를 얻었으며, 향후 직경 ϕ 300mm의 위성용 반사경 초정밀가공 기술에 기여 할 것이다.

참고문헌

1. Schrama R.J.P., Franse J., 1988, "The precision cutting process as a non-linear closed loop system" PE, Vol 10, pp.199-207
2. Kazuaki, Toshimich., 1987 Society of Manfg. Engineers
3. 이재경, 이응숙, 제태진, 심충진, 종동우, 고태조, 1992, 초정밀 경면 절삭 가공 기술 개발, 과학기술처 최종보고서
4. Rozelot, J. P., 1995, Proc. Int. Workshop on Mirror Substrate Alternatives, pp. 3-17
5. Altmann, J., Egle, W. J., et al, 2000, Proc. SPIE, pp.559-566



b) Ni coated

Fig. 7 Measure of reflector mirror by NT2000

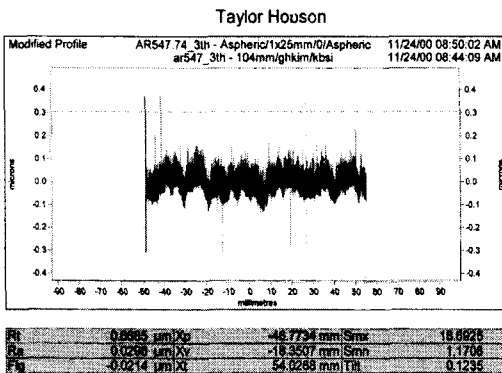


Fig. 8 Measure of Aspheric Ni reflector by Form Talysurf

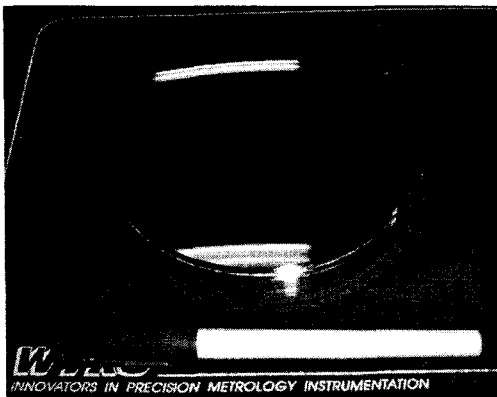


Fig. 9 Photo of aspheric Ni_coated reflector