

SPDT 를 이용한 대구경 Collimation Reflector 가공 연구

김건희*, 홍권희, 김효식, 박지영(한국기초과학지원연구원),
박순섭(충남대 대학원), 원종호(충남대 기계공학과)

A study on the manufacture of Large Collimation Reflector using SPDT

G. H. Kim*, K. H. Hong, H. S. Kim, J. Y. Park(Korea Basic Science Institute),
S. S. Park(CNU), J. H. Won(Mech. Eng. Dept., CNU)

ABSTRACT

The collimation mirror will be used for thermal vacuum testing of spacecraft. The reflection mirror system to generate parallel beam inside the thermal vacuum chamber. A 600mm diameter aspheric Collimation mirror was fabricated by ultra-precision single point diamond turning (SPDT). Aluminum alloy for mirror substrates is known to be easily machining, but not polishable due to its ductility. Aspheric large collimation reflector without a conventional polishing process, the surface roughness of 10nmRa, and the form error of $\lambda/2 \sim \lambda/4$ ($\lambda=632.8 \text{ nm}$) for reference curved surface $\phi 600 \text{ mm}$ has been required. The purpose of this research is to find the optimum machining conditions for reflector cutting of Al6061-T651 and apply the SPDT technique to the manufacturing of ultra precision optical components of metal aspheric reflector.

Key Words : Aspheric(비구면), SPDT(단일점 다이아몬드 선삭), collimation reflector(평행광 반사경), NCD(천연 결정 다이아몬드), Surface roughness(표면 거칠기)

1. 서론

다이아몬드 터닝 머신은 단결정 다이아몬드 공구를 사용하여 초정밀 부품을 가공하는 공작기계이다. 알루미늄 합금을 다이아몬드 공구를 이용하여 초정밀 경면절삭하는 기술이 발표된 것은, 1966년이 최초라고 말해지고 있다. 그 이후의 가공기계·재료·공구나 그 주변 기술 등의 정밀화와 진보에 따라 초정밀 가공기술이 급속하게 보급되어 왔다. 국내에서의 연구는 90년대에 이르러 초정밀가공기의 개발을 선두로 초정밀 절삭가공에 대한 관심이 증가하고 있다. (1)(2) 종래의 한정된 가공법으로밖에 얻을 수 없었던 동, 알루미늄 합금 등의 연질금속이나 플라스틱의 경면은, 초정밀 가공기술에 의해 쉽고 저렴하게 얻어지게 되었으며, 더욱 그 용도가 확대되어, 여러 분야에서 사용되게 되었다. (3)

항공우주에 사용되는 위성 카메라는 생태계 변화나 환경오염 등의 일반적인 지구관측 뿐만 아니라 정밀한 지도제작 등에도 사용될 수 있는 고해상도 광학계이므로 미국 등의 선진국에서도 기술이전을 매우 기피하는 첨단 기술이다. (4) 하지만 독자적

인 위성영상의 자율적인 획득 및 관리를 위해서는 고해상도 위성카메라의 자체개발이 필수적이며 광학설계, 제작 및 평가기술의 확보가 절대적으로 필요하다.

따라서 본 연구에서는 인공위성 연구 부품을 국산화하고, 열 진공 챔버의 효율적 활용을 위한 초정밀 부품 개발과 위성체의 열적 변형 제어 실험에 사용되는 Solar Simulator의 발산광을 태양광과 같은 평행광으로 변환시키는 대형 초정밀 비구면 반사경을 제작하고자 한다. 대구경 Collimation reflector에 사용되는 알루미늄합금의 표면정밀도에 영향을 주는 주축 회전수, 절삭깊이, 이송속도에 대한 초정밀 최적가공조건을 찾아내었으며, 이를 이용하여 직경 600 mm의 평행광 반사경제작에 관한 연구를 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 및 재료

본 연구에 사용된 초정밀 가공장비는 RTH (Rank Taylor Hobson)사에서 제작된 Nanoform 600

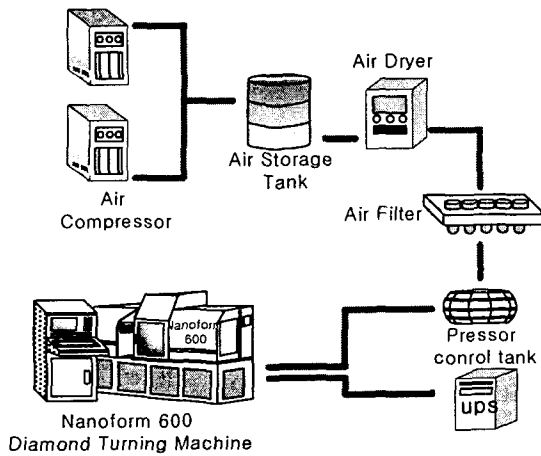


Fig. 1 The system Ultra precision lathe

다이아몬드 터닝 머신을 사용하였다. Fig. 1 은 본 연구 수행에 사용된 초정밀 가공시스템의 다이어그램을 나타낸다. 공구는 R0.5 mm 의 NCD 바이트를 사용하였으며, 측정장비로는 미국 WYKO 사의 광학원리를 이용한 비접촉식 측정기인 NT2000 와 Laser interferometer WYKO6000 및 RTH 사의 비구면 측정기인 Form Talysurf series2 를 사용하였다.

본 연구에 사용된 초정밀 Collimation mirror 의 재료는 알루미늄 합금인 AL6061-T651 의 재료를 열처리 후 가공하였다. 제품의 규격은 직경 600 mm, 두께 80 mm 이고, 곡률 반경은 약 R6500 mm 이다. 요구되는 표면정도는 단면 직경 600 mm 에 대하여 $\lambda/4 \sim \lambda/2$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)이며, 알루미늄반사경의 진공 증착 코팅 후 요구되는 반사율은 600 nm 파장 영역에서 87% 이상이다.

2.2 실험방법

알루미늄 합금인 AL6061-T651 의 초정밀 최적 가공 조건을 찾기 위하여 주축 회전수, 절삭깊이와 이송속도에 대한 표면 거칠기를 측정하여 최적 초정밀 가공조건을 찾아내었으며, 그 가공조건을 이용하여 대구경 평행광 반사경을 제작하였다.

대구경 비구면 Collimation mirror 는 직경이 600 mm 이며, 비구면의 형상이므로 비구면의 형상측정이 불가능하여, 10 배 축소된 직경 60 mm 의 비구면 반사경을 제작 후 공구의 형상정밀도 등을 점검 후 대구경 비구면 반사경을 제작하였다. 10 배 축소 비구면 반사경의 제작방법은 알루미늄합금을 최적 곡률 반경으로 가공하여 Laser interferometer WYKO6000 로 표면의 전체형상을 측정하여 정확한 공구위치를 설정하였다.

그 후 비구면 프로그램을 이용하여 비구면 알루미늄 반사경을 가공하였다. 비구면 형상의 측정은

RTH 사의 Form Talysurf series2 를 이용하여 측정하였다.

Table 1. Cutting condition

Item	Cutting condition
Cutting speed(rpm)	600, 800, 1000, 1200, 1400, 1600
Feed rate(mm/min)	1, 2, 4, 6, 8, 10
Depth of cut(μm)	1, 2, 4, 6, 8, 10
Chucking pressure	20 kg/cm ²
Cutting fluid	Air + EDM oil

3. 실험결과 및 고찰

3.1 거칠기 특성

3.2.1 절삭속도에 따른 표면 거칠기

Fig. 2 는 단결정 다이아몬드 바이트를 사용하여 AL6061-T651 을 이송속도 10 mm/min, 절삭깊이 10 μm 로 고정하고, 절삭 조건에서 주축 회전수 변화에 따른 표면 거칠기를 측정한 결과이다. 600~1600 rpm 까지 회전수를 단계적으로 변화 시켰으며, 그 결과 600 rpm 에서 점점 회전수를 증가시킴에 따라 표면 거칠기가 향상되고 1200 rpm 이상의 속도에서는 표면 거칠기의 변화가 거의 나타나지 않음을 확인하였다. 따라서 알루미늄합금의 미소절삭에서는 주축회전수 1200 rpm 이상으로 공작물을 가공하는 것이 제품의 정밀도 향상에 유리한 특성을 알 수 있다.

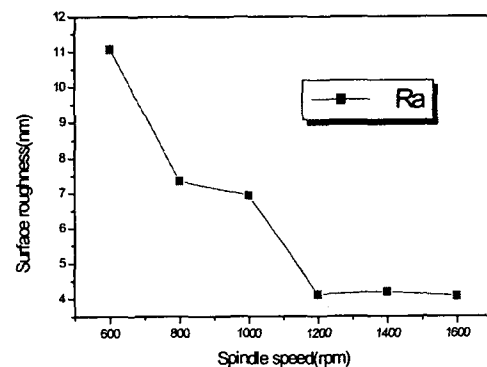


Fig. 2. Surface roughness versus spindle speed (Feed: 10 mm/min, Depth of cut: 10 μm)

3.1.2 절삭깊이에 따른 표면 거칠기

Fig. 3 는 AL6061-T651 을 단결정 다이아몬드 바이트로 주축 회전수 1200 rpm, 이송속도를 10

mm/min 으로 고정하고, 절삭 깊이 변화에 따른 표면 거칠기를 측정된 결과이다. 절삭가공에 있어서 이론적 표면 거칠기 값은 절삭깊이에 영향을 받지 않는다. 그러나 실제 미소절삭에서는 Fig. 3의 결과를 볼 때 4 μm 까지 표면 거칠기가 급격히 좋아지는 것을 볼 수 있고, 4 μm 이상에서는 표면 거칠기가 거의 일정하나 조금씩 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 이는 재료 내부의 불순물과 외부환경조건에 기인한 것으로 판단된다. 4 μm 이하의 절삭깊이에서 거칠기가 나쁘게 나타나는 이유는 공구의 절삭날 끝 인선반경 정도의 작은 절삭 깊이로 가공을 하는 경우는 Negative rake angle 에 의해 절삭이 이루어진다. 이 경우의 칩 배출 과정은 주로 러빙(rubbing)이나 버니싱 같은 소성변형에 의해 원활하게 이루어지지 못하며, 소성변형을 일으킨 표면에서는 큰 잔류 응력 층이 생성되어 표면의 질에 많은 영향을 미치고 있다.⁽⁵⁾

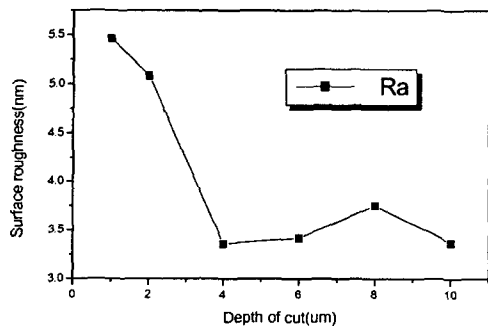


Fig. 3. Surface roughness versus Dept of cut(Spindle speed: 1200 rpm, Feedrate: 10 mm/min)

3.1.3 이송속도에 따른 표면 거칠기

Al6061-T651 의 최적표면을 얻기 위해 Fig. 4 는 표면 거칠기가 가장 좋은 1200 rpm 의 주축 회전수, 절삭깊이 4 μm 로 고정하고 1~10 mm/min 까지의 이송속도 변화에 대한 표면 거칠기 실험결과를 나타낸다. 그 결과 본 초정밀 가공에 있어서 가공 표면의 형상은 공작물의 회전과 공구의 이송으로 인한 미세한 나선형의 표면을 형성시키고, 2 차원적으로 이송방향을 따라 공구의 형상이 이송를 만큼 간격을 두고 반복적으로 이루어진다. 이송속도는 동일한 절삭깊이에서 이송률의 증가에 비례하여 표면 거칠기가 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 표면 거칠기 결과는 이송방향의 표면 거칠기는 인선반경과 공작물의 1 회전당 이송량의 관계에 의하여 기하학적으로 결정되는 이론적 표면 거칠기 ($R_{max} = f^2 / 8R$)⁽⁶⁾와 유사한 경향을 나타내고 있다. 그러나 실험결과와 이론적 표면 거칠기 값과는 차이가 있는데, 이와 같은 이유는 실험에 사용된 알루미늄

미늄합금이 연성이고, 미소한 재료의 용착이 발생하기 때문에 가공면의 표면 거칠기에 나쁜 영향을 미치는 것으로 판단된다.

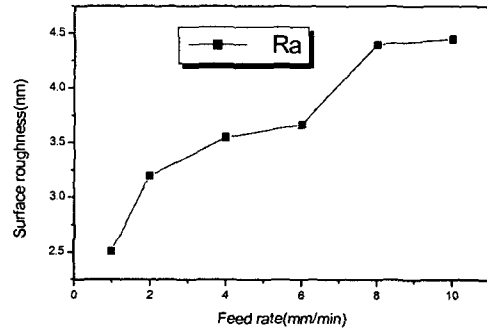


Fig. 4. Surface roughness versus feed(Spindle speed: 1200 rpm, Depth of cut: 4 μm)

3.2 대구경 Collimation mirror 제작 특성

초정밀 Collimation mirror 는 알루미늄 합금으로 직경이 600 mm, 두께 80 mm 의 대형 제품으로 기존의 초정밀가공기에 장착되어 있는 직경 200 mm 의 진공척으로는 원심력에 의한 고정미 불확실하여 직경 420 mm 의 진공척을 설계 제작하였다. 초정밀 Collimation mirror 의 일차가공은 CNC 선반에서 가공하였으며, 이때의 초정밀 가공 여유량은 단면부의 곡률 부분을 0.1 mm 정도로 하였다.

초정밀 절삭조건은 CNC 선반가공 후 제품의 동심도가 0.1 mm 정도 오차가 발생하여 1 차 황삭 가공시에는 주축 회전수를 600 rpm 으로 하였으며, 전체적인 단면이 가공된 후에는 1200 rpm 으로 가공하였다. 초정밀 황삭 가공 후 최종적인 정삭 가공은 이송속도 2 mm/min, 절삭깊이 4 μm 로 하였다.

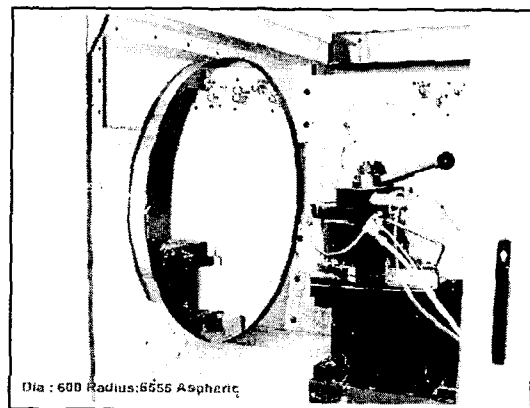


Fig. 5 Manufacture of Aspheric collimation mirror

초정밀 가공기에서 가공완료 후에는 제품이 초정밀 가공기에 장착된 상태에서 알코올을 흘려서 절삭 칩을 제거하였다. 정상 가공시간이 약 2 시간 정도로 소요되어 가공도중 절삭면이 부식되는 현상이 발생되었다. Fig 5는 비구면 Collimation mirror의 최종가공 후의 사진이다.

초정밀 Collimation mirror의 표면처리는 순수 알루미늄 진공 증착 코팅처리를 하였다.

3.3 초정밀 Collimation mirror 평가

직경 600 mm의 비구면 Collimation mirror의 직접적인 형상측정은 현재 보유하고있는 형상측정기로는 불가능하여 10 배 축소로 가공한 직경 60mm의 비구면 Collimation mirror를 비교 측정하였다. Fig. 6은 10 배 축소로 가공한 직경 60 mm의 비구면 Collimation mirror의 형상을 Form Talysurf series2로 측정한 결과이다. 알루미늄을 열처리나 코팅처리를 하지 않았기 때문에 조직이 균일하지 않아서 형상정도 값이 크게 나타나고 있다.

직경 600 mm의 비구면 반사경에 대한 전체면의 측정이 불가능하여 비구면 측정기인 Form Talysurf를 이용하여 외곽 100 mm에 부분적인 표면형상을 측정하였다. 표면 거칠기의 측정결과 30nm Ra, 150 nm Rt 이하로 측정되었다. Fig. 7은 직경 600 mm의 초정밀 Collimation mirror와 10 배 축소하여 가공한 제품의 사진이다.

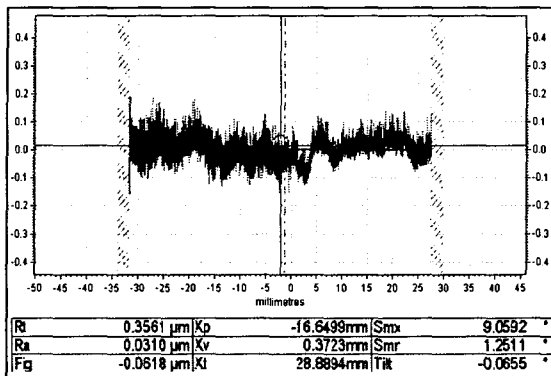


Fig. 6 Modify profile of Aspheric collimation mirror (φ60 mm) by Form Talysurf series2

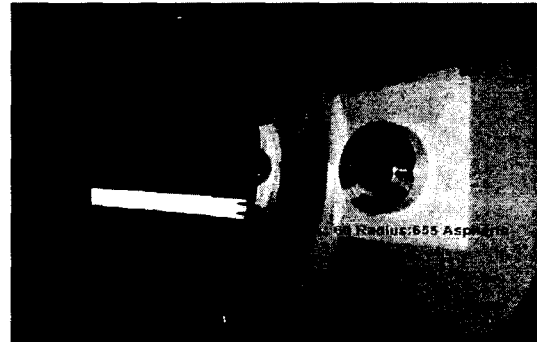


Fig. 7 Photo of aspheric collimation mirror

4. 결론

본 연구에서는 직경 600 mm의 비구면 Collimation mirror 제작에 관한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 초정밀가공기(Nanoform600)에서 Al6061-T651의 최적절삭조건은 주축 회전수 1200 rpm, 절삭깊이 4 µm, 이송속도 2 mm/min에서 6nm Ra 이하의 표면거칠기를 얻었다.
2. 대구경 비구면 Collimation mirror를 가공 후 부분적인 측정결과 기준길이 100 mm에 대한 표면 거칠기의 측정결과 값은 30 nm Ra, 150 nm Rt 이하이며, 기준곡면 φ 600 mm에 대한 Surface Accuracy λ/2~λ/4로 제작되었다.

참고문헌

1. 김정두, "천연 다이아몬드 인선형태에 의한 Al 합금의 경면절삭에 관한 연구." 大韓機械學會論文集, 제 14卷, 제 6號. PP.1515-1522. 1990
2. 이경호, 윤영식, 이상조. "다결정 다이아몬드 공구를 사용한 Al-Si 합금의 선삭과정에서 절삭특성에 미치는 Si 함량의 영향." 韓國精密工學會誌, 제 12卷, 제 6號. pp. 20-26, 1995
3. 성기형, 한복수, 김형철, 김기수, 남궁석, (초정밀 선삭 가공 시스템에 관한 연구, 대한공업교육학회지, Vol. 22, No 2, pp. 116-124. 1997
4. 이운우, "고해상도 위성카메라 평가 기술", 측정 표준, 제 22권, 제 2호, pp. 29-41, 1999.
5. T. Moriwaki, K. Okuda, "Machinability of Copper in Ultra-Precision Micro Diamond Cutting." ann CIRP, Vol.38, pp115~118, 1989
6. Donaldson, D. D. Thompson, "Design and Performance of Small Precision CNC Turning Machine." ann. CIRP, Vol.35, pp.373~376, 1986.