

# 주축 회전제어를 이용한 자유곡면 반사경의 초정밀가공기술에 관한 연구

## The Study on The Ultra Precision Machining Technology of Freeform Reflector Controlling Spindle

김건희<sup>1</sup>, 김효식<sup>1</sup>, 양순철<sup>1</sup>, 국명호<sup>1</sup>, 김명상<sup>1</sup>, 이인제<sup>1</sup>, 이상용<sup>1</sup>, 길준덕<sup>1</sup>, 박수종<sup>2</sup>, 복민갑<sup>3</sup>  
 \*#G. H. Kim(kgh@kbsi.re.kr)<sup>1</sup>, H. S. Kim<sup>1</sup>, S. C. Yang<sup>1</sup>, M. H. Kook<sup>1</sup>, M. S. Kim<sup>1</sup>, I. J. Lee<sup>1</sup>, S. Y. Lee<sup>1</sup>,  
 J. D. Kil<sup>1</sup>, S. J. Park<sup>2</sup>, M.G. Bog<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 한국기초과학지원연구원 초정밀가공팀, <sup>2</sup>경희대학교 우주과학과, <sup>3</sup>국가핵융합연구소

Key words : Freeform reflector, Ultra precision machining, Surface roughness

### 1. 서론

단결정 다이아몬드 화이트를 이용한 금속 반사경의 초정밀 가공은 1960년대 미국에서 공기 베어링을 사용한 초정밀 선반의 개발과 더불어 시작되었다. 그 이후의 가공기계, 재료, 공구나 주변 기술 등의 정밀화와 진보에 따라 초정밀 가공기술이 급속하게 보급되어 왔다. 비구면 반사경은 주로 숙련된 작업자의 수작업에 의존하여 제작되었으나, 1980년대에는 컴퓨터를 이용한 기계 제어 기술의 발달로 다이아몬드 선삭이 가능한 연질 금속을 초정밀 선반에서 가공하는 기술이 개발되었다. 또한 고기능의 항공우주용 관측시스템에 대한 요구와 더불어 반사경의 대구경화가 이루어져 최근에는 이러한 대구경 반사경 가공에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.<sup>1-2)</sup>

기존에는 축대칭(on-axis) 형태의 반사망원경을 주로 개발하여 사용하였으며 이에 따라 사용되는 반사경 역시 제작이 가능한 구면 또는 비구면의 형태로 제작되었다. 하지만 on-axis와는 다르게 개발의 난해성이 있는 축비대칭(off-axis)에 사용되는 반사경 제작이 가능할 경우 off-axis 망원경은 on-axis 망원경에 비해 여러 가지 장점이 있다. 우선 부경과 그 지지구조의 주경차폐로 인한 광량손실을 막을 수 있으며, 부경의 회절현상에 의한 콘트라스트 저하가 없다. 그리고 상에 부경지지구조의 회절에 의해 발생하는 십자현상이 나타나지 않는다. 마지막으로 주경차폐의 제약이 없기 때문에 단초점의 다중 미러 망원경이 가능하다. 이처럼 최근에는 망원경의 성능을 한층 향상시킬 수 있는 off-axis 형태의 반사 망원경개발이 필요하며 이에 따라 자유곡면과 같은 반사경 개발이 대두되고 있다.

현재는 컴퓨터와 결합된 연마 또는 다이아몬드 선삭기술의 발달로 off-axis 반사경의 개발이 가능해 지고 있으며, 대형의 반사식 안테나와 전파망원경에서는 이미 off-axis 광학계가 일반화 되었으며 미국의 NRAO(100-m Green Bank telescope) 등에 사용되었다.

국내에서도 off-axis 형태의 반사망원경 설계와 제작이 이루어지고 있는데 기존에는 off-axis 형태의 망원경에 사용되는 반사경은 대형의 미러를 제작하고 이의 일부를 잘라 사용하는 방법을 사용하였다. 하지만 optical path length 개념을 활용하여 off-axis 반사경의 기하학적 수차이론을 유도하여 새로운 개념의 반사망원경을 설계하고 있다.<sup>3)</sup> 설계되는 망원경에 사용되는 반사경은 기존에는 제작이 어려웠던 자유곡면의 형태를 이루고 있다. 그래서 적외선 파장대에 사용되어지는 천체망원경 광학계에 off-axis 반사경을 적용하고자 본 연구를 수행하게 되었다.

본 논문에서는 우선 개발하고자 하는 자유곡면 반사경을 다항식의 형태로 설계한다. 첫 번째로 시뮬레이션을 통해 자유곡면의 형상을 분석하고 최적 가공 방법을 모색한다. 그리고 자유곡면을 가공하기 위한 장비로는 Freeform700A(Precitech 사)를 활용하며 가공하는 방법으로서 일반적인 구면 또는 비구면 초정밀가공과는 다르게 주축을 제어하며 동시에 X축과 Z축을 제어하는 자유곡면의 초정밀가공에 대하여 다룬다. 마지막으로 가공완료 후 형상 정밀도와 표면거칠기를 측정하여 개발된 자유곡면 반사경의 초정밀가공 결과를 확인한다.

### 2. 자유곡면 반사경의 설계

일반적으로 광학계의 반사경은 가공이 가능한 축대칭의 구조로 구면 또는 비구면 형태로 개발 된다. 그러나 본 논문에서 가공할 경면은 축대칭이 성립되지 않는 자유곡면이므로 식(1)과 같이 정의된다.

$$z(x, y) = a_0x + a_1y + a_2x^2 + a_3xy + y^2 + \dots + a_{64}y^{10} \quad (1)$$

상기 식은 x, y에 대한 10차 다항식으로, 다항식의 계수값에 따라 임의의 자유곡면을 정의할 수 있다. 그림 1은 설계된 계수값에 따라 본 연구에서 가공할 자유곡면으로서 3차원 형상으로 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 가공물의 크기는 직경 70 mm이며, 중심 높이가 2.458 mm이다.

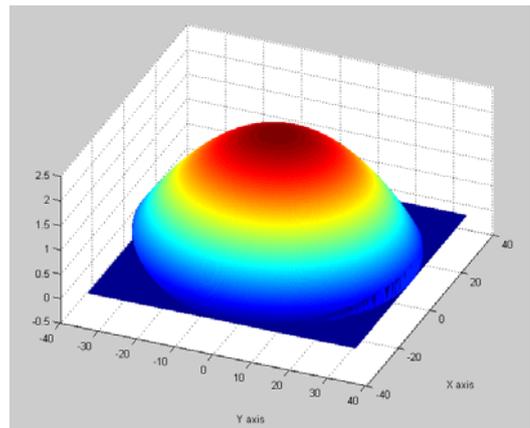


Fig. 1 3D figure of freeform surface designed on polynomial equation.

Fig. 1에서 3차원 모형을 보면 X축에 대하여 대칭이나 Y축에 대하여는 비대칭인 자유곡면임을 확인하기가 어렵다. 그러므로 이와 같은 비대칭 구조를 확인하기 위하여, Fig. 2에서 X축에 대한 단면과 Y축에 대한 단면을 구분해서 나타내었다. 이처럼 X축에 대하여 대칭이나, Y축에 대하여 비대칭인 구조를 갖는 이유는 다음과 같다. 수식 1에서 설계 데이터가 y에 대해서는 짝수차항과 홀수차항에 모두 존재하지만, x에 대해서는 짝수차항에만 존재하기 때문이다.

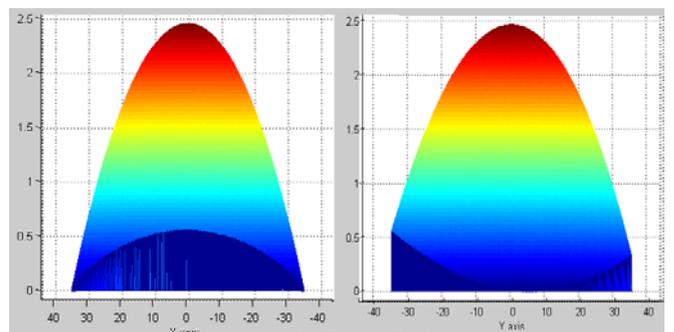


Fig. 2 Section view for X axis and Y axis.

### 3. 자유곡면 반사경의 초정밀 가공

본 연구에서 자유곡면을 초정밀가공하기 위하여 본원이 보유하고 있는 5축 제어 초정밀가공기(Freeform 700A, Precitech 사)를 사용하였다. Fig. 3은 X, Z, C의 3축을 동시에 제어하여 자유곡면을 가공하는 개념의 개략도로서, 핵심은 주축의 회전과 다이아몬드 바이트의 위치를 동기화시켜 실시간으로 제어하는 것이다.

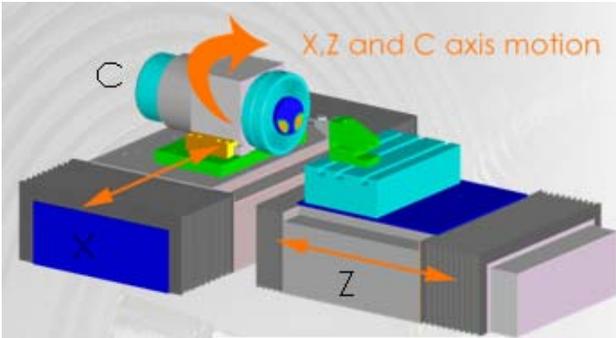


Fig. 3 The concept of machining by controlling XZC position.

자유곡면 가공시 주축이 회전하며 동시에 XZ축이 제어되기 때문에 초정밀 가공기의 주축 회전수는 기존의 가공 회전수에 비하여 월등히 낮은 대략 50 RPM으로 해야 한다. Fig. 4는 초정밀 가공기를 사용하여 자유곡면을 초정밀 가공하고 있는 사진이다. 가공품의 재료는 반사경에 주로 사용되어지는 Al6061-T651이다. 그리고 평면에서부터 최종의 자유곡면을 가공하기에는 많은 시간이 소요된다. 그러므로 가공시간을 단축하기 위하여 시뮬레이션을 통해 구해진 최적 구면으로 가공한 이후에 자유곡면 가공을 수행하였다. Fig. 4에서와 같이 최적 구면 가공이후에 초정밀 가공하는 사진으로 가공되는 면을 보면 가공품의 일부 외곽 영역만이 가공되는 것을 확인할 수 있다. 가공되는 영역은 자유곡면의 가장 낮은 부분으로 Fig. 2를 참조하면 X축의 가장자리 영역에 해당하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 바이트 날 끝에 미스트를 사용하여 칩 배출을 용이함에 따라 절삭성이 향상 되어 높은 표면 조도를 얻을 수 있었다.



Fig. 4 Machining freeform surface on the lathe(Freeform700A).

초정밀 가공을 완료한 결과 개발된 자유곡면 가공품은 Fig. 5와 같다. 비록 자유곡면의 형상이 구의 형태와 0.553 mm 밖에 차이가 나지 않아 구면경과 유사하게 보이며, 또한 경면이 잘 가공되어 바닥의 글씨가 반사되는 것을 확인할 수 있다. 자유곡면 초정밀가공을 마친 이후에 형상정밀도와 표면 거칠기를 측정하였다. 형상정밀도 측정에 사용된 장비는 UA3P (Panasonic 사)이며, 표면 거칠기를 측정할 장비는 NT2000(Veeco 사)이다. 우선 국부영역 표면 거칠기를 측정하여 Ra 5.27 nm로 결과를 얻을 수 있었다. 그리고 초고정도 3차원 측정기인 UA3P로 측정할 결과는 Fig. 6과 같다. 측정 방법은 X축과 평행하게 5 mm의 간격으로 지그재그로 측정하였다. Fig 6은 설계 데이터와 측정 데이

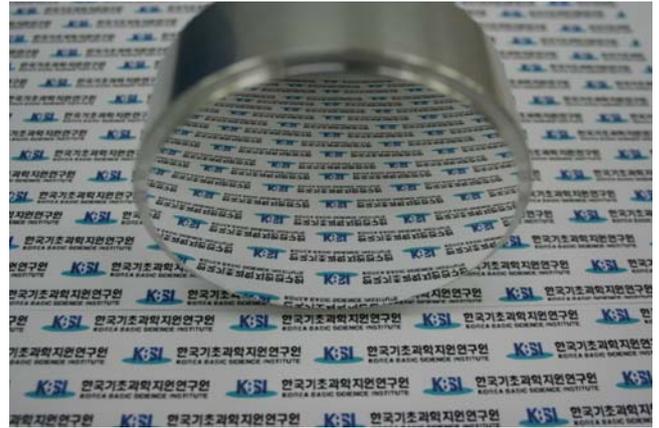


Fig. 5 The figure of freeform surface after machining.

터의 차이를 나타내는 그래프이며, 결과는 PV 0.598  $\mu\text{m}$  와 RMS 0.122  $\mu\text{m}$ 의 결과를 얻을 수 있었다. 오차는 회전 중심에서 멀어질수록 커지는 경향을 가지고 있으며, 이러한 이유는 회전 선속도가 중심에서 멀어질수록 비례하며 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

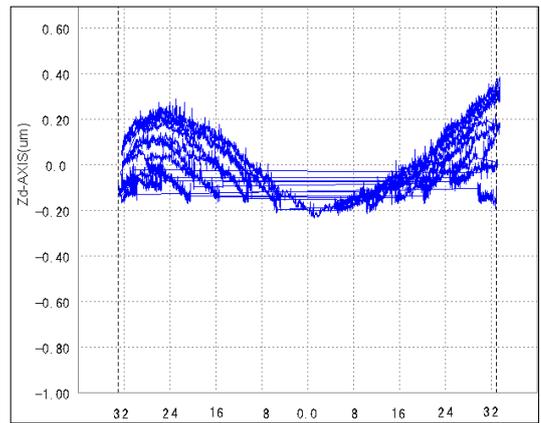


Fig. 6 The measurement result of freeform surface by UA3P..

### 4. 결론

본 논문에서는 최근 새로운 광학계에 적용되는 자유곡면 반사경을 개발하기 위하여 초정밀 5축 가공기를 이용하여 자유곡면 초정밀가공기술을 개발하였다. 자유곡면은 X, Y에 대하여 10차항의 다항식으로 정의하였으며, 자유곡면이지만 Y축 대칭의 형상을 가지고 있었다. 그리고 C축의 회전과 X, Z의 위치를 동기화 시켜 제어하여 가공을 수행하였으며, 가공 완료 후 형상정밀도를 측정할 결과로서 PV 0.598  $\mu\text{m}$ , RMS 0.122  $\mu\text{m}$ 과 국부영역 거칠기로서 Ra 5.27 nm를 얻었다. 향후에는 개발된 자유곡면 반사경을 활용하여 새로운 망원경을 개발할 계획이다.

### 참고문헌

1. Kim, E. J., Song, S. H., Kim, M. G. and Kim, T. H., "Ultra-Precision Machining Using Fast Tool Servo and On-Machine Form Measurement of Large aspheric Mirrors," J. KSPE, Vol. 17, No. 4, pp. 129-134, 2000.
2. 양순철, 김건희, 김효식, 이상용, 김명상, 원종호, "항공우주용 적외선 광학계 초정밀가공기술," 한국정밀공학회지, Vol. No 2, pp. 19-24, 2007.
3. Chang, S., "Off-axis reflecting telescope with axially-symmetric optical property and its applications," Proceedings of SPIE--the international society for optical engineering, Vol. 6265 No.2, pp. 626548-, 2006.