

## Fast Tool Servo를 이용한 대구경 반사경의 초정밀 가공 및 기상 형상 측정

김의중\*, 송승훈\*, 김민기\*\*, 김태형\*\*

### Ultra-Precision Machining Using Fast Tool Servo and On-Machine Form Measurement of Large Aspheric Mirrors

Eui Jung Kim\*, Seung Hoon Song\*, Min Gi Kim\*\* and Tae Hyoung Kim\*\*

#### ABSTRACT

This paper presents the development of ultra-precision machining process of large aspheric aluminum mirrors with a maximum diameter of 620 mm. An ultra-precision machine, "Nanoturn60", developed by Daewoo Heavy Industries Ltd. is used for machining and motion errors of the machine are compensated by using the FTS developed by IAE(Institute for Advanced Engineering) during the machining process. To check the form accuracy of machined aspheric surfaces, on-machine form measurement system is developed. This measurement system consists of air bearing touch probe, straight edge, and laser sensor. With in-process error compensation by FTS(Fast Tool Servo), aspheric mirrors with the form accuracy of submicron order are obtained.

**Key Words** : Ultra-precision machining (초정밀 가공), Aspheric mirror (비구면 반사경), Fast tool servo (미소이송 공구대), On-machine form measurement (기상 형상 측정)

#### 1. 서론

단결정 다이아몬드 바이트를 이용한 금속 반사경의 초정밀 가공은 1960년대 미국에서 공기 베어링을 사용한 초정밀 선반의 개발과 더불어 시작되었다. 비구면 반사경은 주로 숙련된 작업자의 수작업에 의존하여 제작되었으나, 1980년대에는 컴퓨터를 이용한 기계제어 기술의 발달로 다이아몬드 선삭이 가능한 연질 금속을 초정밀 선반에서 가공하는 기술이 개발되었다.<sup>(1,2)</sup> 또한, 고기능의 우주항공용 관측시스템에 대한 요구와 더불어 반사경의 대

구경화가 이루어져 최근에는 이러한 대구경 반사경의 가공에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.<sup>(3)</sup>

본 논문에서는 EOC(Electro-Optic Camera)의 광학계를 구성하는 Al6061-T6 소재의 직경 620 mm급 off-axis 비구면 반사경을 초정밀 가공하고, 가공면의 형상정밀도를 기상에서 측정한 결과를 기술하였다. 가공기로는 대우중공업에서 개발한 초정밀 비구면 가공기 "Nanoturn 60"을 사용하였으며, 가공기에 미소이송 공구대(Fast Tool Servo; 이하 FTS)를 장착하여 기계의 운동오차를 실시간으로 보상하였다. 가공 중 가공물의 변형을 최소화하기 위하여

\* 고등기술연구원 생산기술연구소

\*\* 대우중공업 공기자동화사업부 연구개발실

가공물의 척킹에 의한 체결력과 가공 중의 원심력에 의한 반사경의 변형을 해석하였다. 가공된 비구면 형상의 측정을 위해 초정밀가공기의 각 축을 활용하여 기상에서 형상정밀도를 측정할 수 있는 공기 베어링식 접촉 프로브를 이용한 기상 형상측정 시스템을 구성하였다.

가공기의 운동오차를 실시간으로 보상하면서 반사경을 가공한 후 기상 측정된 결과 형상정밀도를 서브미크론 오더로 향상시킬 수 있었다.

## 2. 반사경의 가공공정 설계

### 2.1 FTS를 이용한 오차보상시스템

먼저 예비실험을 통하여 반사경의 가공정밀도에 영향을 줄 수 있는 기계의 운동오차를 분석하고 가공기의 성능을 개선하였다. 분석 결과 가공면의 형상정밀도에 가장 큰 영향을 주는 Z축 방향 운동 오차 성분으로는 스피ن들의 회전에 의한 Z축 방향 오차성분이 약  $0.7 \mu\text{m}$ , 주축 구동모터의 발열 및 온도제어의 주기적인 작동으로 인한 스피ن들의 Z축 방향 열팽창이 약  $1.0 \mu\text{m}$ , X축 슬라이드의 진직도 오차가  $0.4 \mu\text{m}/320 \text{ mm}$ 로 나타났다. 따라서 Z축 방향 오차성분의 총합은 최소  $2.0 \mu\text{m}$ 로 추정되며, 재현성 있는 오차성분(systematic errors)과 비교하여 불규칙적인 오차성분(random errors)이 무시할 수 없을 만큼 큰 것으로 나타났다. 이와 같은 성능으로는 반사경의 목표가공정밀도를 달성할 수 없을 것으로 판단되어, FTS를 이용하여 가공기의 운동오차를 실시간으로 보상하기 위한 운동오차 보상시스템을 Fig. 1에 도시한 바와 같이 구성하였다.

운동오차 보상시스템에서 X축 슬라이드의 진직도 오차는 기계의 베드 상에 X축 슬라이드와 평행하게 설치된 길이 320 mm의 straight edge(Zerodur, 평면도  $0.03 \mu\text{m p-v}$ )를 기준으로 레이저 센서에 의해 측정된다. 주축의 Z축 방향 운동오차는 측정을 위해 척 뒷면에 특별히 마련된 기준면을 X축 슬라이드 위에 설치된 정전용량형 센서로 측정한다. 이 두 가지 운동오차의 합을 FTS를 이용하여 실시간으로 보상한다. 기타 스피ن들 회전축과 X축 슬라이드의 직각도오차와 같이 재현성 있는 오차성분은 가공면을 기상 측정하여 기울기를 계산한 다음 FTS를 이용하여 off-line으로 제거한다.

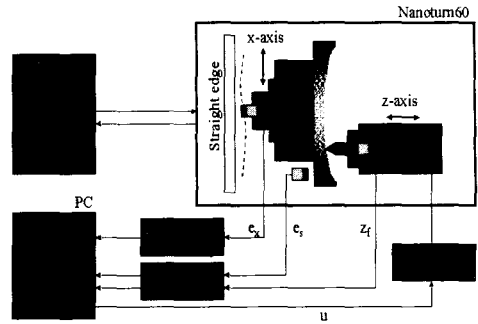


Fig. 1 Schematic diagram of error compensation system using FTS

사용된 FTS의 H/W는 고등기술연구원에서 이미 개발된 것을 그대로 사용하였으나, 제어기는 극점 배치법(pole placement technique)을 이용하여 -3dB cut-off bandwidth 200 Hz, 감쇠계수 0.707을 갖도록 재설계하여 사용하였다.<sup>(4,5,6)</sup>

또한 가공기 내부의 가공영역에 대한 온도변화를 측정된 결과 항온항습조건에서 기계가동 후 3시간이 경과하면 온도구배가 정상상태로 안정화되며, 이 때의 온도변화는  $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  내에 있음을 확인하였다.

### 2.2 반사경의 척킹

반사경의 구조는 반사경을 EOC 시스템에 장착하였을 때 중력 등에 의해 반사면에 변형이 전파되지 않도록 Fig. 2와 같이 반사경 후면의 조립부가 힌지(hinge) 구조를 갖는 일체형으로 설계되어 있다.

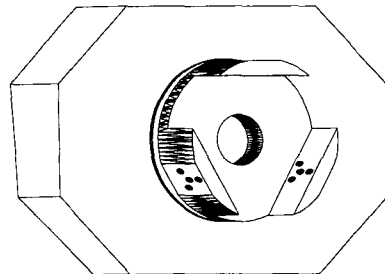


Fig. 2 Rear view of mirror

이 반사경을 가공을 위한 fixture에 조립하는 개념도를 Fig. 3에 나타내었다. 가공 중 밸런싱을 위해 2개의 동일한 반사경을 대칭적으로 fixture에 조립한다. 이 때 가공 중에 반사경의 반사면에서 변형을 최소화하고 가공 후 fixture에서 분리했을 때 변형이 발생하지 않도록 광학부품 가공시에 사용되는 피치(pitch)를 이용하여 반사경의 뒷면을 fixture 면에 접착하였다. 또한 반사경의 위치 조정과 가공시의 안전을 고려하여 반사경을 조립링을 사용하여 fixture에 볼트 결합하였다.

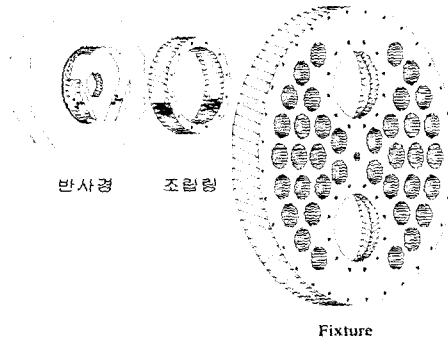


Fig. 3 Assembling of mirrors into fixture for machining

### 2.3 반사경의 변형해석

반사면에 변형이 발생하지 않도록 결합력을 최소한으로 제한하기 위하여 반사경의 변형해석을 하였다. 단위하중 1 N의 결합력을 가했을 때의 변형해석 결과를 Fig. 4에 도시하였다. 해석 결과 반사면에서의 변형은 중앙부에서 최대가 되며, 이 때의 변형량은 1.4 nm로 나타났다. 반사면에서의 변형을

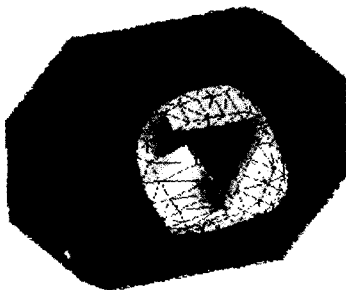


Fig. 4 Deformation of mirror by unit bolting force

목표로 하는 40 nm 이하로 제한하기 위해서는 28 N 이하의 작은 결합력을 가해야 한다.

반사경이 off-axis 형태이므로 가공 중 원심력에 의한 fixture의 변형이 예상되어 척킹시스템의 원심력에 따른 변형을 해석하였다. 스피ن들의 회전속도 200 rpm에서의 원심력에 의한 척킹시스템의 변형해석 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

해석 결과 fixture 면에 돌출 되어 대칭적으로 설치된 2개의 반사경에 작용하는 원심력으로 인하여 fixture에 변형이 발생하고, 이로 인하여 반사면이 최대 26  $\mu\text{m}$  정도 기울어지는 것으로 나타났다. 한편, 반사경과 척킹시스템의 중량에 비하여 스피인들의 하중지지용량이 충분치 못하기 때문에 척킹시스템의 강성을 보강하여 변형량을 줄이는데는 한계가 있다. 따라서 반사경의 가공정밀도를 확보하기 위해서는 가공된 반사경의 형상정밀도를 기상에서 측정된 후 이를 분석하여 기울기오차의 직선성분을 반사경 장착시의 각도조정 범위 이내로 제한하고 순수한 형상오차 성분만을 FTS로 보정가공하는 것이 필요하다.

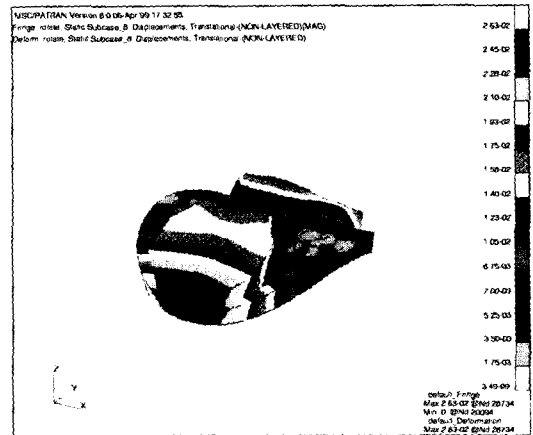


Fig. 5 Deformation of mirror and fixture assembly by centrifugal force

### 3. 기상 형상측정시스템

비구면 형상의 기상 측정시스템의 개략도를 Fig. 6에 나타내었다. 기계의 축을 측정축으로 그대로 사용하고 가공시 사용한 오차보상시스템을 측정시에도 그대로 사용하였다. 공구대에 FTS 대신 집축력이 수 그램인 공기 배어링식 접촉 프로브를 설

치하여 형상을 측정하였다.

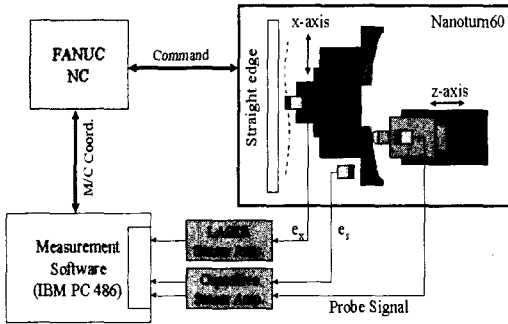


Fig. 6 Schematic diagram of on-machine form measurement system

형상측정에 사용된 프로브는 직경 4 mm, 진구도 0.15  $\mu\text{m}$ 의 루비가 끝에 달려 있으며, 센싱부에는 분해능 10 nm의 정전용량형 센서가 설치되어 있다. 접촉력이 매우 작아 접촉점에서의 반사경의 국부적인 변형은 Hertz 접촉식으로 계산했을 때 무시할 만하다.

#### 4. 반사경 가공 및 측정

##### 4.1 반사경 가공

구축된 오차보상시스템으로 스피들의 회전오차와 열팽창은 보상하지 않고 X축 슬라이드의 진직도오차만을 보상하면서 반사경을 가공한 후 기상에서 반경 방향으로 반사경의 형상정밀도를 측정하여 분석하였다.

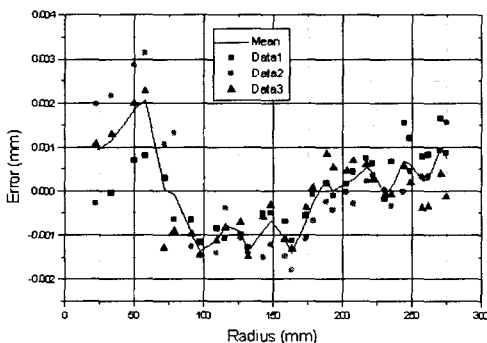


Fig. 7 Form error of the machined mirror surface

원심력 의한 척킹시스템의 변형으로 반사면이 거의 직선적으로 기울었으며, 최대값은 약 15  $\mu\text{m}$  정도로 나타났다. Fig. 7은 이 기울기오차를 보상한 결과로서 비구면 반사면의 순수한 형상오차는 평균 3.5  $\mu\text{m}$  p-v로 판단된다. 접촉식 표면거칠기에 의한 표면거칠기 측정값은 10 nmRa로 매우 양호한 것으로 나타났다.

##### 4.2 오차보상 가공

형상오차를 서브미크론 오더로 낮추기 위해 FTS로 X축 슬라이드의 진직도오차와 스피들의 Z축 방향 열팽창 및 회전오차를 동시에 보상하면서 반사경을 가공하였다.

Fig. 8에 가공 중 측정된 X축 슬라이드의 진직도오차와 주축 구동모터의 발열 및 온도제어기의 주기적인 작동으로 인한 스피들의 Z축 방향 열팽창을 나타내었다. 진직도오차는 300 mm 전구간에 걸쳐 약 0.3  $\mu\text{m}$  정도이고, 추축의 운동오차는 주축 구동모터의 냉각기의 작동주기와 일치하는 400초 정도의 주기를 갖는 약 1  $\mu\text{m}$  p-v의 오차를 보이는 것으로 나타났다.

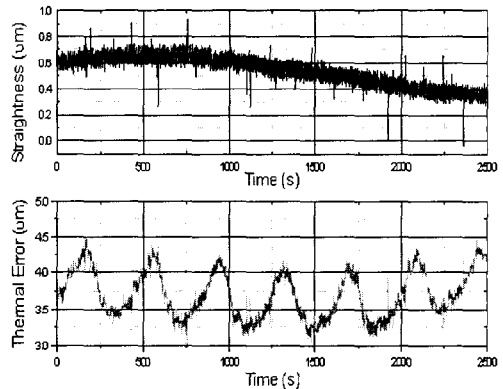


Fig. 8 Straightness error of X-axis slide and thermal error of spindle

위의 오차들을 FTS를 이용하여 보상한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 FTS의 오차보상 신호는 Fig. 8에 나타난 오차들의 합의 정확한 역상을 보이고 있다. 이로부터 오차보상시스템이 X축 슬라이드와 스피들의 운동오차를 매우 효과적으로 보상해 주고 있음을 알 수 있다.

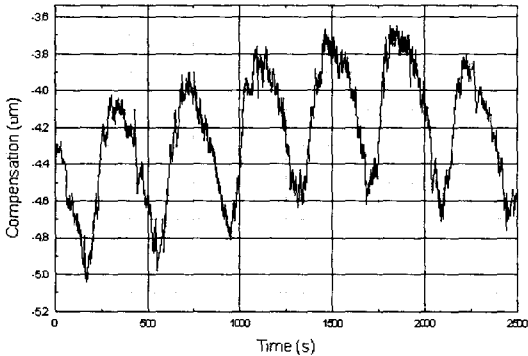


Fig. 9 Compensation of machine errors by FTS

위와 같이 두 가지 오차를 모두 실시간으로 보상하면서 반사경을 가공한 후 최종적으로 가공면의 형상을 측정된 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 형상 오차가 보상전의 3.5  $\mu\text{m}$  p-v에서 0.8  $\mu\text{m}$  p-v로 크게 향상되었음을 알 수 있다. 이는 가공기의 오차 중 상대적으로 진폭이 큰 스핀들의 Z축 방향 열팽창을 포함한 주축의 운동오차가 FTS에 의해 가공 중에 보상되었기 때문으로 생각된다. 또한 스핀들의 오차를 측정하기 위해 fixture 후면에 측정용 링을 추가로 설치하였는데, 이것이 결과적으로 fixture의 변형을 제한하는 효과를 가져와 원심력에 의한 반사면의 기울기의 최대값이 약 4  $\mu\text{m}$ 로 크게 개선되었다. 이 때 측정된 운동오차 중 측정용 링 자체의 형상오차는 저주파 통과 필터를 사용하여 제거하였다.

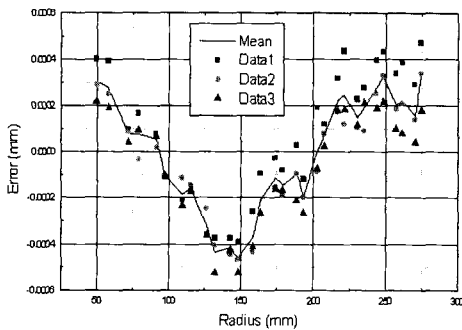


Fig. 10 Form error of the machined mirror surface corrected by error compensation system

최종 가공된 비구면 반사경을 Fig. 11에 나타내었다.

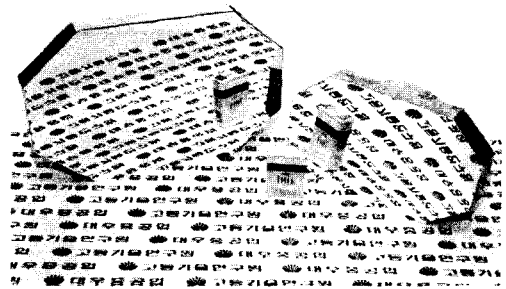


Fig.11 Machined aspheric mirrors

## 5. 결론

EOC의 광학계에 사용되는 Al6061-T6 소재의 직경 620 mm급 비구면 반사경을 초정밀 가공하였다. 가공기의 운동오차를 실시간으로 보상하기 위하여 FTS를 이용한 오차보상시스템을 설치하였다. 척킹력에 의한 반사경의 변형과 가공 중 원심력에 의한 척킹시스템의 변형을 해석하여 가공면의 변형을 최소화하였다. 또한 가공면의 형상오차를 효과적으로 측정하고 이를 보상가공하기 위하여 공기 베어링식 접촉 프로브를 이용한 기상 형상측정시스템을 구축하였다.

기계의 오차보상시스템을 사용하여 반사경을 가공하고 가공면을 기상 형상측정시스템으로 측정된 결과 형상오차가 오차보상 전의 3.5  $\mu\text{m}$  p-v에서 보상가공 후 0.8  $\mu\text{m}$  p-v로 크게 개선되었다.

## 참고문헌

1. Donaldson, R. R., Patterson, S. R., Design and Construction of a Large, Vertical Axis Diamond Turning Machine, Proc. SPIE, Vol. 433, pp. 62-67, 1983.
2. Lubarsky, S. V., Sobolev, V. G., Shevtsov, S. E., Optical Surface Fabrication on Ultra Precision Machines, SPIE, Vol. 1266, pp. 226-236, 1990.
3. Geyl, R. Design and Fabrication of a Three Mirror Flat Field Anastigmat for High Resolution Earth Observation, SPIE, Vol. 2210, pp. 739-745,

1994.

4. 송재욱, 김승한, 송하성, 김호상, 압전 구동기를 이용한 미소절삭 공구대의 정밀위치제어, 한국정밀공학회지, 제14권, 제10호, pp. 50-57, 1997.
5. 김호상, 정병철, 안현식, 송승훈, 김의중, 김태형, 초정밀 가공기용 FTS를 위한 압전 액츄에이터의 위치제어, 한국정밀공학회 '97년도 추계학술대회논문집, pp. 446-449, 1997.
6. 김의중, 오창진, 송승훈, 김민기, 김태형, FTS를 이용한 대구경 반사경의 초정밀 가공 및 기상형상 측정, 한국정밀공학회 '99년도 춘계학술대회 논문집, pp. 867-870, 1999.