

## 반사경 가공변형의 해석적 접근

유충현\*, 김건희, 양순철, 이상용(한국기초과학지원연구원), 원종호(충남대학교)

A Study on the Deformation of a Reflector with Machining

C. H. Ryu, G. H. Kim, S. C. Yang, S. Y. Lee(KBSI), J. H. Won(CNU)

### ABSTRACT

An aspheric mirror, which requires less than  $\lambda/2$  ( $\lambda=632.8\text{nm}$ ) of form error for the  $\varnothing 200\text{mm}$  reference curved surface, has been manufactured with an ultra-precision turning machine. We have known through several tests that the deformation patterns of the reflecting surface is related with bolting positions. In this paper the effect of main factors on deformation of a reflector is studied with a FE code. The considered factors are angular velocity, natural frequencies for a mirror, temperature increment during machining. The obtained test results are similar to the deformation shape due to the assumed temperature increment.

**Key Words :** Aspheric mirror (반사경), Reflector (반사경), Ultra-precision turning machine (초정밀 가공기), FE code (유한요소 해석코드)

### 1. 서론

다이아몬드 터닝 머신은 단결정 다이아몬드 공구를 사용하여 초정밀의 부품들을 가공할 수 있는 공작기계이다. 이것은 초정밀의 가공 정밀도를 요구하는 광학계 제작에 활용되고 있다.

본 연구에서는 형상정밀도가  $\lambda/2$  ( $\lambda=632.8\text{nm}$ ) 이하를 요구하는 반사경의 가공에 있어서 형상변형을 유발할 수 있는 인자들을 가정하고 그에 대한 영향을 유한요소해석 코드를 이용하여 밝히고자 한다. 각 인자에 대한 고찰은 각각 독립적으로 수행되었으며 초정밀 가공기는 이상적인 조건으로 운전되는 것으로 가정하였다. 본 연구에서 고려한 인자들은 스픈들의 회전수, 반사경이 가공기에 장착되었을 때의 고유진동수, 가공물의 온도상승이다.

반사경의 재질은 Al6061-T651이며 해석에서 사용한 재료의 물성은 Table I에 나타내었다.

### 2. 반사경의 가공

반사경 가공시 사용된 초정밀 가공기는 RTH 사의 Nanoform 600 다이아몬드 터닝 머신(DTM)이다. 안내면의 위치결정정도는  $0.25 \mu\text{m}/300 \text{mm}$ , 분해능은

$1.25\text{nm}$ 의 성능을 가지고 있으며, 선삭의 경우 최대  $\varnothing 00\text{mm}(125\text{kg})$ , 연삭의 경우  $\varnothing 00\text{mm}$  까지 가공이 가능하다.

초정밀 가공실은 온도가  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 이며 습도  $40 \pm 5\%$ 인 항온항습장비를 구축하고 있다.

반사경의 표면을 측정하기 위한 장비는 Laser

Table I Material properties for Al6061-T651

E (GPa)	v	$\rho (\text{kg}/\text{m}^3)$	$a (\text{m}/\text{m}^\circ\text{C})$
68.9	0.33	2700	23.6e-6

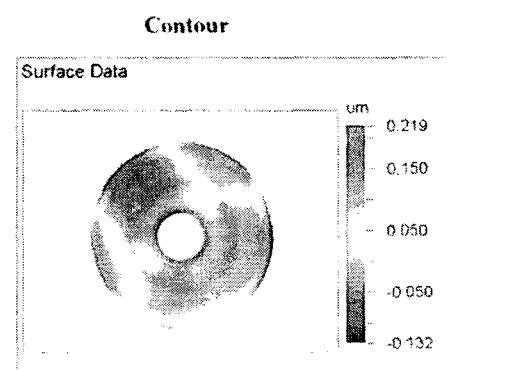


Fig. 1 Surface measurement for a reflector

Interferometer WYKO6000을 사용하였다. Fig. 1은 초정밀 가공 후 측정한 반사경의 표면 측정결과를 보인다. RMS의 값이 65nm, PV 값이 351nm이며 원주 방향을 따라 3 개의 sine 모드를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 변형형상은 반사경의 볼트결합부 위치와 일치하는 것이다.

### 3. 가공변형 인자 고찰

#### 3.1 유한요소해석 모델

Fig. 2는 반사경에 대한 대칭인 유한요소 해석 모델을 보인다. 사용된 요소는 8 절점의 3 차원 solid 요소이다. 볼트 체결부를 제외하면 축대칭 모델을 활용할 수 있으나 반사면의 반대면에 체결판을 형성하여 3 개의 볼트로 구속조건을 부여하므로 3 차원 대칭 모델을 사용하였다.

#### 3.2 스픈들의 회전속도에 따른 영향

가공률은 스픈들의 회전속도에 따라 변형정도가 달라진다. Fig. 3(a)는 스픈들의 회전속도가 1200rpm 일 경우에 대한 축방향 변위를 보인다. 반경방향으로 반사면의 안쪽면은 양의 방향 변위를 보이나 바깥쪽면은 음의 방향 변위를 보인다. 이와 같은 축방향 변위형태는 회전속도에 따라 모두 동일하나 그 값이 다르다. Fig. 3(b)는 스픈들의 회전속도가 1000rpm에서 2000rpm 까지에 대하여 반경에 따른 축방향변위를 보인 것이다. 회전속도에 따라 축방향 변위의 최대값이 비례하는 것을 확인할 수 있으며 반경 49mm를 기준으로 이보다 작은 반경영역에서는 양의 변위를 이보다 큰 반경영역에서는 음의 변위를 보인다. 회전속도가 2000rpm의 경우 축방향 최대변위는  $1.24 \mu\text{m}$ 로 약  $2\lambda$ 의 값을 보인다.

#### 3.3 반사경의 고유진동수

일반적으로 회전구조물은 여러 가지 요인에 의하여 조화하중을 받게 된다. 따라서 구조물의 고유진동해석을 수행하였다. Fig. 4는 반사경의 볼트부를 완전고정하였을 경우에 대한 고유진동해석 결과의 일부를 보인다. 반사경의 기본 고유진동수는 1741Hz로 운전회전속도에 비해 매우 높은 값을 보이므로 공진의 가능성은 전혀 없는 것으로 판단된다. 반사경의 변형형상과 유사한 모드는 5561Hz에서 보인다.

#### 3.4 온도변화에 따른 영향

초정밀 가공은 항온항습실에서 이루어지므로 정상상태에서는 온도차가 발생하지 않으나 절삭가공시에는 국부적으로나 전체적으로 작은 온도변화가 발생된다.

#### 3.4.1 국부적 온도변화

가공률에는 절삭시 온도증가를 방지하기 위하여 절삭유나 공기를 공급되지만 국부적으로 온도상승을 초래할 수 있다. Fig. 5는 반사경의 반사면이 절삭되는 것을 모사하기 위하여 일부 절점에 임의의 온도인  $5^\circ\text{C}$ 를 가하여 열해석을 수행한 결과와 이 결과를 이용한 축방향 변위를 보인다. 반사경의 안쪽면에 국부적 온도상승은 절삭되는 부분의 축방향 양의 변형을 보이나 바깥쪽으로 절삭부가 이동하게 되면 절삭부가 음의 방향 변형을 보이는 것을 볼 수 있다.

#### 3.4.2 균등한 온도변화

절삭기산이 오래 지속되어 반사경 전체가 균등한 온도인  $5^\circ\text{C}$ 의 온도상승을 가질 경우의 축방향 변형을 Fig. 6에 나타내었다. 변형형상은 실제가공률의 변형형상인 Fig. 1과 매우 유사한 것을 확인할 수 있다. 해석에서 구한 PV 값은 약  $8.509 \mu\text{m}$ 이므로 온도와 PV 값이 선형적이라 가정하면  $1^\circ\text{C}$ 의 온도변화에 대하여 약  $1.702 \mu\text{m}$ 의 PV 값을 예측할 수 있다. 이 값은 주어진 요구조건에 비해 매우 큰 값으로 가공률의 작은 온도상승이라도 반사경의 성능에 큰 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

### 4. 결론

비구면 반사경의 가공변형에 영향을 미칠 수 있는 인자들에 대하여 해석적 방법으로 검토하였다. 결론적으로 가공변형에 가장 큰 영향을 주는 인자는 온도상승에 따른 변형에서 유발되는 것으로 평가된다. 이것은 적용된 소재가 열팽창계수가 상대적으로 높은 AI 이기 때문이다. 그리고, 이외에 고려된 인자들도 가공변형에 독립적으로 또는 연성적으로 역할을 하는 것으로 평가된다.

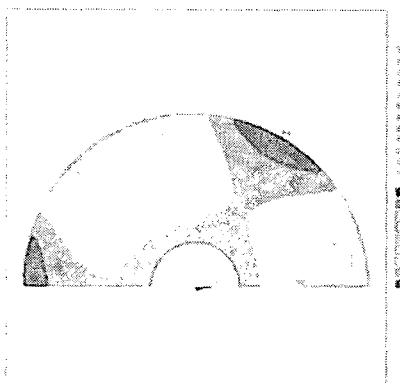


Fig. 6 Axial deformation by the uniform temperature increment

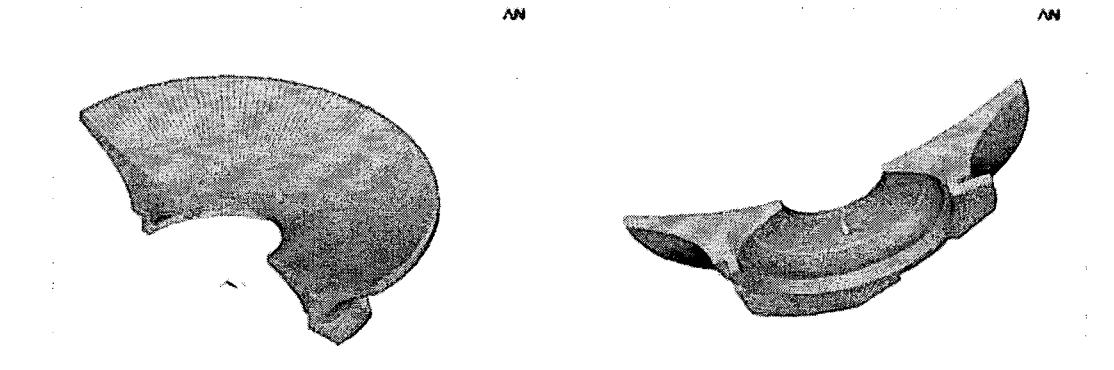


Fig. 2 Symmetric FE model for the reflector

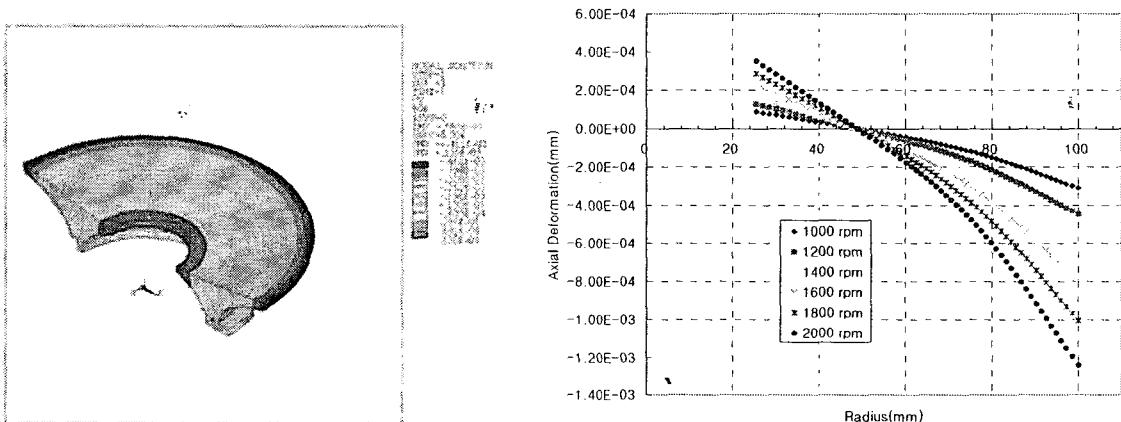


Fig. 3 Axial deformation of the reflecting surface for various revolution velocities

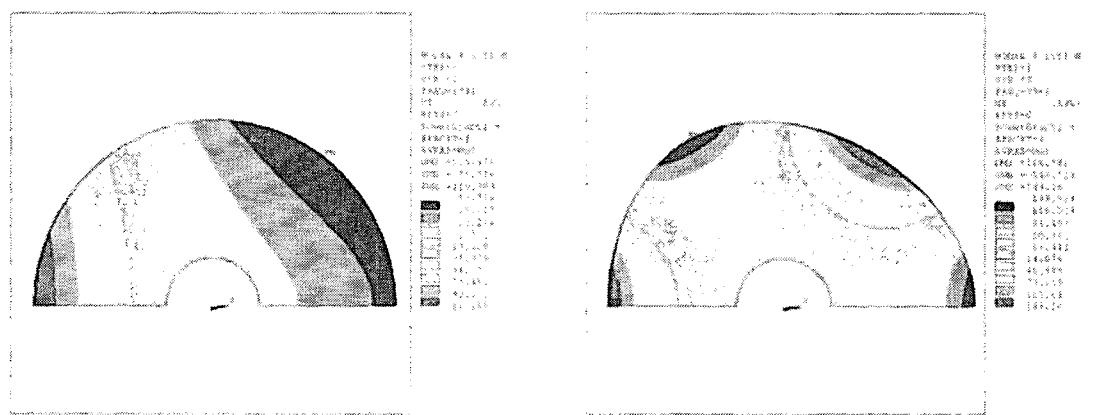


Fig. 4 Fundamental and 3 sine wave mode shape in the axial direction

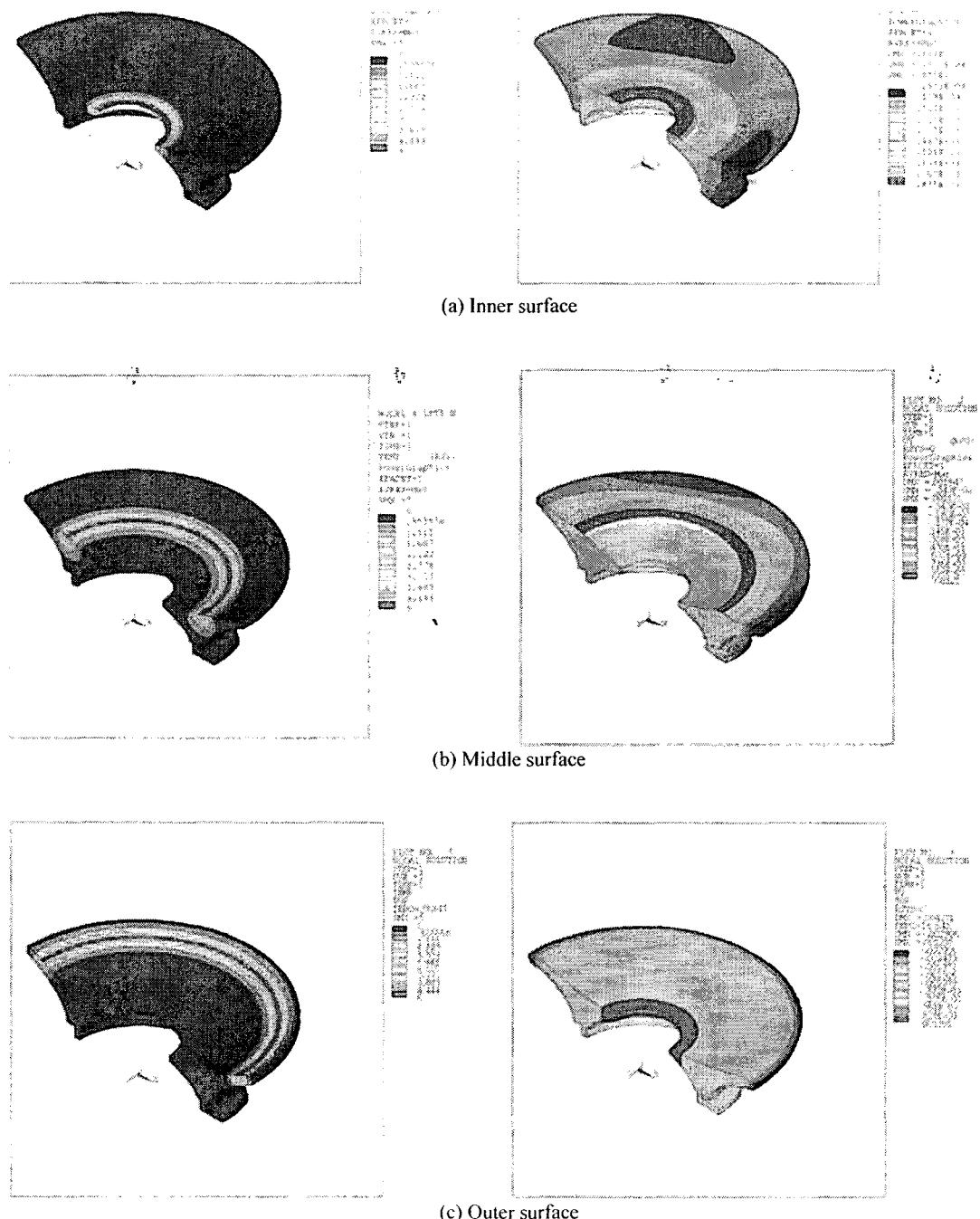


Fig. 5 Temperature distribution and axial deformation contours for local temperature increment cases