

금형가공을 위한 초정밀 나노가공기의 구조해석

백승엽[†] · 김선용

유한대학 금형설계학과

(2007. 6. 30. 접수 / 2007. 10. 31. 채택)

Structure analysis of ultra precision nano-scale machine for mold processing

Seung-Yub Baek[†] · Seon-Yong Kim

Department of Tool & Mold Engineering, Yuhan College

(Received June 30, 2007 / Accepted October 31, 2007)

Abstract : As various manufacturing technology of optical glass is developed, the aspheric lenses are supplied to many fields. Electronic or measuring instruments equipped with aspheric lens have recently been used since aspheric lens is more effective than spheric one. However, it is still difficult manufacture glass lens because of high cost and the short life of core.

The demands of the aspheric glass lenses increase since it is difficult to obtain the desirable performance in the plastic lens. For the mass production of aspheric lens, specific molds with precisely machined cores should be prepared. In order to obtain competitiveness in the field of industrial manufacturing, a reduction in the development period for the batch machining of products is required.

It is essential to analyze the stress distribution and deformations of machining system which is used for manufacturing the aspheric lens using FEM software ANSYS. Finite element simulations have been performed in order to study the influence of machining system which is developed in this study on structures. It is very important to understand the structural behavior of machining system. This paper investigated the static analysis and dynamic analysis of machining system for aspheric lens to predict the damage due to loading.

Key Words : FE analysis, Natural frequency, Position accuracy, Dynamic analysis

1. 서 론

현재, 산업 발달에 따라 비디오 캠코더, 디지털 카메라 등이 생활에 급속하게 보급되고 있으며 이러한 기기의 성능 향상에 소비자들의 관심이 높아지고 있다. 따라서 광학 부품의 고정밀도화, 소형화, 경량화 그리고 고기능화가 필수적으로 요구되고 있다. 렌즈의 성능 향상은 이러한 요구를 만족시키는 가장 중요한 요소 중의 하나이다. 오늘날의 광학계는 구면 렌즈 광학계로부터 비구면 렌즈 광학계로 변하고 있다^{1,2)}. 구면 렌즈는 원리적으로 수차를 포함하고 있으며 이것을 제거하기 위하여 렌즈의 조합수를 늘리고 다층막 코팅 등을 통하여 성능 향상을 실현시켜왔다. 비구면 렌즈는 구면 렌즈에 비해

서 장점이 많으며 이러한 비구면 렌즈는 소형화, 경량화 그리고 고성능화를 위하여 필수적이다. 비구면 렌즈의 장점이 있지만 설계 및 제조상의 어려움 때문에 오랜 기간의 경험에 따른 근사해를 갖는 구면 렌즈를 사용해왔다. 하지만 지금은 절삭, 연삭에 의한 비구면 가공법과 초정밀 비구면 가공기의 개발에 따라 기계 가공에 의하여 비구면 렌즈의 가공이 가능하게 되었다³⁻⁵⁾.

현재까지는 비구면 렌즈의 제작 방법에는 여러 가지 있지만 초경, 고경도강, 무진헤 니켈강 등을 재료로 하여 금형을 제작하고 렌즈를 성형하는 사출성형법과 내열성을 갖는 세라믹 또는 초경 금형에 렌즈 소재를 연화온도까지 가열한 후 프레스 성형하는 방법 그리고 플라스틱, 유리렌즈 등을 절삭과 연삭을 통하여 직접 가공하는 방법이 있다.

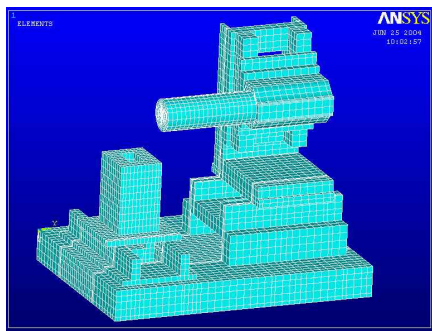
금형을 제작해서 비구면 렌즈를 성형가공을 할

[†] To whom correspondence should be addressed.
yub777@empal.com

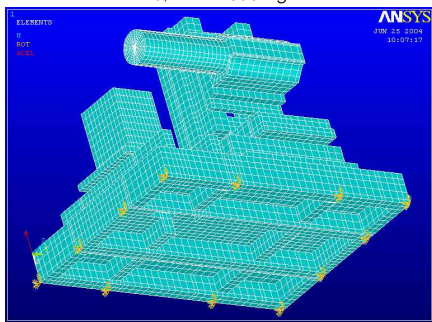
경우 고비용과 시간이 많이 소비된다. 하지만 비구면 렌즈를 개발하는 단계에서는 금형을 제작하여 개발하는 것보다는 렌즈를 직접 절삭이나 연삭으로 가공을 해서 개발할 경우 시간과 비용을 줄일 수 있기 때문에 경제적으로 유리하다. 비구면 렌즈를 직접가공 할 경우 가공 정밀도가 우수한 초정밀 가공기가 필수적이다. 초정밀 동작기계의 성능과 외형에 기반이 되는 구조물의 설계에는 정적, 동적 특성에 대한 해석 및 평가를 수행한 연구 사례가 많다^{6,8)}.

따라서 본 연구에서는 높은 정밀도의 금형가공을 위한 초정밀 나노가공기를 개발하기 위해서 설계 단계에서 기계의 구조적 특성을 고찰하였고 향후 시스템 설계 시 강성과 내진동성 향상을 위한 방법을 제시하였다.

유한요소 패키지인 ANSYS S/W를 이용하여 가공기의 자중에 의한 변형, 연삭력에 의한 변형등을 고찰하였고 이러한 변형들이 렌즈 가공기의 형상 정밀도에 미치는 영향에 관하여 연구하였다. 또한 동해석으로 모드해석을 통한 고유진동수를 구하여 대상구조물의 취약부를 분석하였고 구조물의 질량과 강성의 분포를 예측하여 원하지 않는 진동 현상을 예측하였다.



a) FE modeling



b) Boundary condition

Fig. 1 FE modeling of 1st ultra precision nano-scale machine

2. 나노가공기 1차 설계 모델의 구조해석

2.1. 유한요소 모델

나노가공기 1차 설계 모델은 FRAME/COVER Unit의 Bed, X-axis Unit의 X-Rail Base, X-Moving Plate, Y-axis Unit의 Y-Rail Base, Y-Moving Plate, Z-axis Unit의 Z-Main Body, Z-Rail Base, Z-Moving Plate, Spindle Housing, Spindle, Turn-axis Unit의 Turn Table Body 등으로 이루어져 있으며, 각 파트를 SOLID45 요소를 사용하여 모델링하였다.

Fig. 1(a)는 나노가공기 1차 설계 모델의 유한요소 모델 형상으로, 15,567개의 요소와 21,567개의 절점으로 이루어져 있다.

2.2. 모델의 물성치 및 경계조건

경계 조건은 Fig. 1(b)과 같이 Bed와 지면이 만나는 지점에 있는 12개 절점의 자유도를 모두 고정시켰다. 나노가공기 1차 설계 모델의 유한요소 모델을 구성하는 주요 파트의 재질 및 물성치는 Table 1과 같다.

Table 1 Material properties of 1st nano-scale machine model

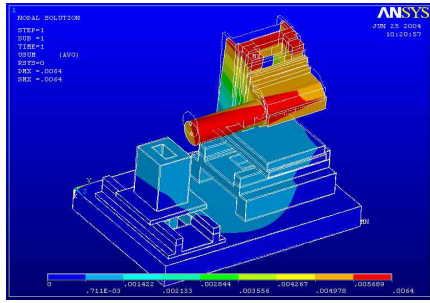
Materials	E(GPa)	Poisson's ratio	Density(kg/m3)
FC20, FC25	186	0.28	7,450
S45C	207	0.30	7,870
A6061	70	0.35	2,700

3. 나노가공기 1차 설계 모델의 해석결과

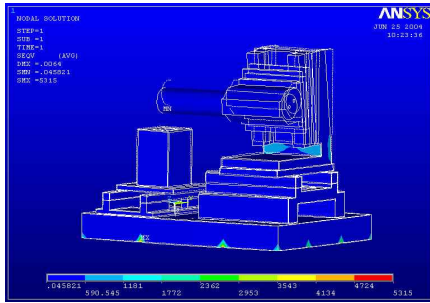
3.1. 정적해석 결과

나노가공기 1차 모델의 정해석 결과 자중에 의한 변형 형상은 Fig. 2(a)와 같고, Z-Main Body의 상단부와 Spindle 파트에서 최대 처짐이 나타나며, 그 값은 6.4 μ m이다.

응력분포는 Fig. 2(b)와 같고, Bed와 지면의 연결부에서 최대 응력이 나타났으며, 그 값은 5.3MPa이다. Bed와 지면 연결부 다음으로는 Z-axis Unit의 Z-Main Body에서 비교적 큰 응력이 나타났으며, 그 값은 1.1MPa이다.



a) Deformation



b) Distribution of equivalent stress

Fig. 2 Static analysis results of 1st ultra precision nano-scale machine model

3.2. 동적해석 결과

나노가공기는 주축이 최대 100,000rpm으로 회전하기 때문에 공진에 의한 기계의 진동이 발생하면 형상정밀도에 큰 영향을 미치게 되므로, 동적으로 안정된 구조를 가져야 한다. 만일 진동에 의하여 연삭숫돌과 공작물 사이에 chattering이 발생하면 표면 거칠기는 나빠지게 된다. 동적 안정성을 판별하기 위하여 3차까지의 공진 주파수를 살펴보았다.

Fig. 3은 나노가공기 1차 설계 모델의 1차, 2차, 3차 모드형상이고, 그 값은 각각 127.9Hz, 303.2Hz, 523.4Hz이다. 1차 모드형상은 전, 후로 진동하는 모습이고, 2차 모드형상은 좌, 우로 진동하는 모습이며, 3차 모드형상은 비틀림 형상이다.

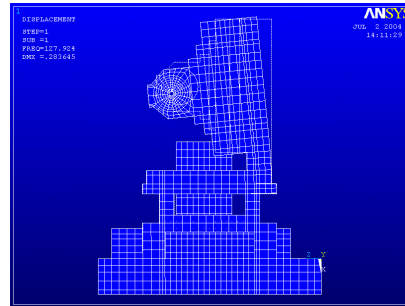
4. 나노가공기 2차 설계 모델의 구조해석

4.1. 유한요소 모델

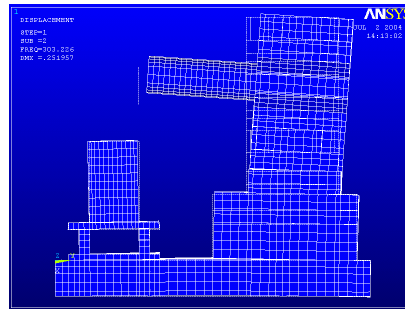
나노가공기 2차 설계 모델은 Frame Unit의 Main BED, X-Table Unit, Y-Table Unit, Z-Table Unit 등으로 이루어져 있으며, 각 파트를 SOLID45 요소를 사용하여 모델링하였다.

Fig. 4(a)는 나노가공기 2차 설계 모델의 유한요소

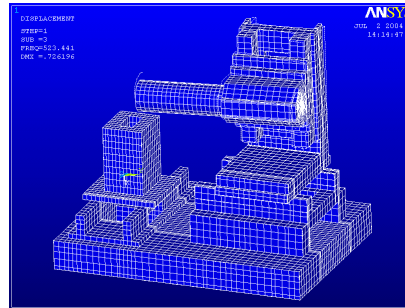
모델 형상으로, 10,502개의 요소와 15,404개의 절점으로 이루어져 있다.



a) 1st mode



b) 2nd mode

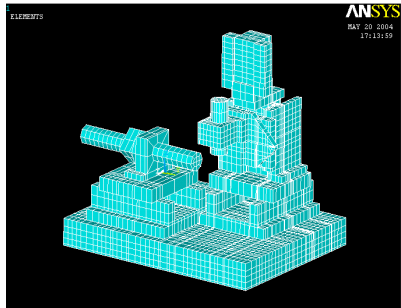


c) 3rd mode

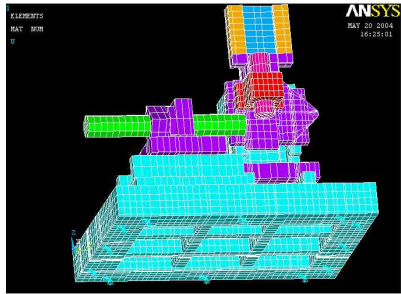
Fig. 3 Dynamic analysis results of 1st ultra precision nano-scale machine model

4.2. 모델의 물성치 및 경계조건

경계 조건은 Fig. 4(b)과 같이 Bed와 지면이 만나는 지점에 있는 12개 절점의 자유도를 모두 고정시켰다. 나노가공기 2차 설계 모델의 유한요소 모델을 구성하는 주요 파트의 재질 및 물성치는 Table 2와 같다.



a) FE modeling



b) Boundary condition

Fig. 4 FE modeling of 2nd ultra precision nano-scale machine

Table 2 Material properties of 2nd nano-scale machine model

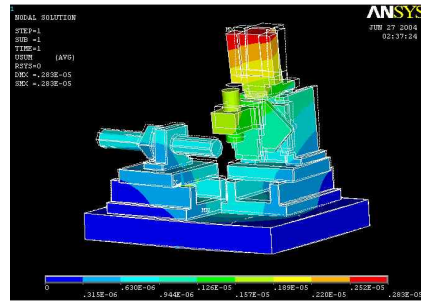
Materials	E(GPa)	Poisson's ratio	Density(kg/m3)
FC20, FC25	186	0.28	7,450
S45C	207	0.30	7,870
A6061	70	0.35	2,700

5. 나노가공기 1차 설계 모델의 해석결과

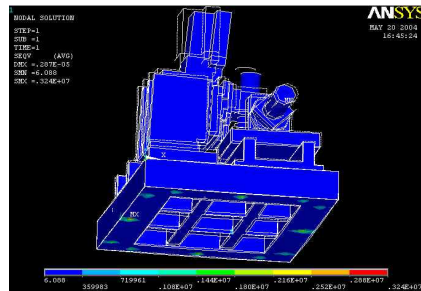
5.1. 정적해석 결과

나노가공기 2차 모델의 정해석 결과 자중에 의한 변형 형상은 Fig. 5(a)와 같고, Y-Table Unit에서 최대 처짐이 나타나며, 그 값은 2.83 μ m이다. 응력분포는 Fig. 5(b)와 같고, Bed와 지면의 연결부에서 최대 응력이 나타났으며, 그 값은 3.2MPa이다. 나노가공기 2차 모델의 연삭 시 강성을 알아보기 위하여 Fig. 6과 같이 Spindle 끝 부분(Node 14,844)에 X, Y, Z 방향으로 각각 1N의 하중을 주었을 때의 정해석을 수행하여, Spindle 끝부분의 처짐량을 알아보았다. Table 3은 해석결과를 정리한 것이다. X 방향 강성은 X 방향으로 1N의 힘을 적용하였을 때의 X 방향 변위에서 자중에 의한 X 방향 변위를 뺀 값으로, 5.64 \times 10⁻³ μ m/N이고, Y 방향 강성은 9.24 \times 10⁻³ μ m/N, Z

방향 강성은 0.64 \times 10⁻³ μ m/N이다.



a) Deformation



b) Distribution of equivalent stress

Fig. 5 Static analysis results of 2nd ultra precision nano-scale machine model

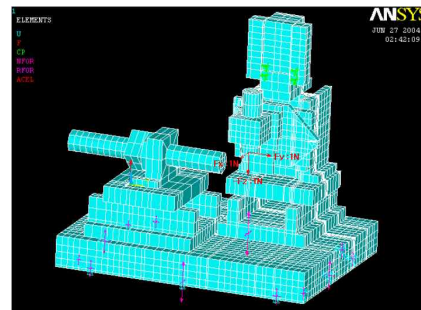


Fig. 6. 1N applied to end of spindle

Table 3 Results of four cases

	Displacement (X-direction)	Displacement (Y-direction)	Displacement (Z-direction)
Case1 (self-load)	0.54645 μ m	-0.30543 μ m	-1.2717 μ m
Case2 (FX=1N)	0.55209 μ m	-0.30518 μ m	-1.2717 μ m
Case3 (FY=1N)	0.54670 μ m	-0.29619 μ m	-1.2717 μ m
Case4 (FZ=1N)	0.54648 μ m	-0.30539 μ m	-1.2781 μ m

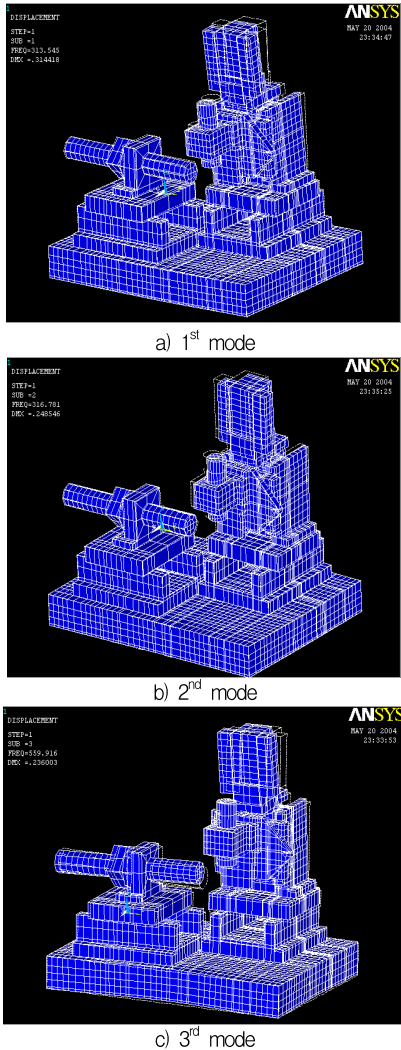


Fig. 7 Dynamic analysis results of 2nd ultra precision nano-scale machine model

6. 결론

본 연구에서는 금형가공을 위한 초정밀 나노가공기의 개발을 위해 설계 단계에서 유한 요소 패키징인 ANSYS S/W를 이용하여 가공기의 자중에 의한 변형, 연삭 시의 변형 등을 고찰하여 강성값을 구하였고, 고유진동수를 구하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

(1) 금형가공을 위한 초정밀 나노가공기의 1차 설계 모델과 2차 설계 모델의 정, 동해석을 각각 수행

하여 비교한 결과, 설계 변경을 통하여 구조적인 성능이 크게 향상되었으므로, 2차 설계 모델을 채택하는 것이 바람직하다.

(2) 자중에 의해서 발생하는 초정밀 나노가공기의 1차 설계 모델과 2차 설계 모델의 최대 처짐은 $6.4\mu\text{m}$ 와 $2.83\mu\text{m}$ 으로 스펀들 상단부분과 Y-Table Unit의 상단부분에서 발생하였다.

(3) 초정밀 나노가공기의 1차 설계 모델과 2차 설계 모델의 최대 등가 응력이 나타나는 부위는 모두 베드와 지면의 연결부이며, 최대 등가 응력은 각각 5.3MPa과 3.2MPa이다.

(4) 각각의 초정밀 나노가공기의 공작물 가공시의 강성을 알아보기 위해서, 스펀들 끝 부분에 각 방향으로 1N의 하중을 주어 정해석을 수행한 후 강성 값을 계산하였다.

(5) 초정밀 나노가공기의 1차 설계 모델과 2차 설계 모델의 1, 2, 3차 고유진동수는 127.9Hz, 303.2Hz, 523.4Hz와 313.5Hz, 316.7Hz, 559.9Hz이다.

참고문헌

- 1) Suzuki, H., Hara, S., and Matsunaga, H, "Study on Aspherical Surface Polishing Using a Small Rotating Tool", JSPE, Vol. 59, No. 10, pp. 1713-1718, 1993
- 2) Itoh, S, "Study on Measurement of Axi-Symmetrical Form Generated by Ultra-Precision Machining(3rd Report)", JSPE, Vol. 61, No. 3, pp. 391-395, 1995.
- 3) Suzuki, H., Kodera, S., Nakasuji, M., and et al, "Study on the aspherical surface polishing of single crystal silicon lens", JSPE, Vol. 63, pp. 1280-1284, 1997.
- 4) Suzuki, H., Kitajima, T., and Okuyama, s, "study on Precision cutting of Axi-Symmetric Aspherical Surface", JSPE, Vol. 65, NO. 3, pp. 401-405, 1999.
- 5) T. Nakasuji et al, "Diamond Turning of Brittle Material for Optical Components", Annals of the CIRP, Vol. 39, No. 1, pp. 89, 1990.
- 6) ANSYS, Engineering Analysis System User's Manual Vol. I and III, Swanson Analysis System, Inc., USA, 1995.
- 7) O.C.Zienkiewicz, R.L.Taylor, "The finite element method", 4th Edition, Vol. 1, McGraw-Hill

International Edition, pp. 21-43, 1989.

- 8) Robert D. Cook, "Finite element modeling for stress analysis", John Wiley & Sons, Inc., pp. 17-67, 1995.