

비구면 가공용 지능형 연삭 시스템 개발

백승엽^{†*}·이해동*·김성철*·이은상**

Development of intelligent grinding system for aspherical surface machining

Seung Yub Baek, Hea Dong Lee, Sung Chul Kim and Eun Sang Lee

Key Words: Aspherical surface lens(비구면렌즈), Aerostatic spindle(공압 스피들), Intelligent grinding system(지능형 연삭 시스템)

Abstract

As consumer in optics, electronics, aerospace and electronics industry grow, the demand for ultra precision aspherical surface lens increases higher. To enhance the precision and productivity of ultra precision aspherical surface micro lens, the following specification of ultra precision grinding system is required: the highest rotational speed of the grinder is 100,000rpm and its turning accuracy is $0.1\mu\text{m}$, positioning accuracy is $0.1\mu\text{m}$. The development process of the grinding system for the ultra precision aspherical surface micro lens for optoelectronics industry is introduced. In the work reported in this paper, an intelligent grinding system for ultra precision aspherical surface machining was designed by considering the factors affecting the surface roughness and profiles accuracy. An aerostatic form was adopted to build the spindle of the workpiece and the spindle of grinder and ultra precision LM guide way was adopted in this system.

1. 서 론

비구면의 반사경이나 렌즈는 광학적인 수차를 보정 할 수 있기 때문에 최근 그 사용이 비약적으로 늘어나고 있다. 또한 렌즈의 매수를 줄여 경박 단소한 제품 제작이 가능하기 때문에 광학, 정보 기기 디바이스에 탑재되고 있는 여러 종류의 광학렌즈에는 비구면 형상화 및 고정도화가 행해지고 있다.⁽¹⁾ 또한 정밀한 비구면 렌즈를 낮은 가격으로 양산하기 위해서는 금형을 이용한

성형 방법이 널리 활용되어 오고 있다.

구면 렌즈는 원리적으로 수차를 포함하고 있으며 이것을 제거하기 위하여 렌즈의 조합수를 늘리고 다층막 코팅 등을 통하여 성능 향상을 실현시켜 왔다. 그러나 비구면 렌즈 광학계는 초점 집광 성능을 향상시켜 구면 수차를 제거하고 복잡한 렌즈조합을 필요로 하지 않으며 높은 투과율이 얻어지는 등 많은 장점이 있다. 지금까지 비구면 광학부품에 대한 연구는 비교적 직경이 큰 렌즈를 대상으로 진행되어 왔으나 광학계의 마이크로화에 따른 마이크로 비구면 광학 부품의 연구 및 개발의 중요성이 대두되고 있다.⁽²⁾ 현재 비구면 렌즈를 양산하는 방법은 여러 가지로 개발이 되어있으나, 초경, 고경도강, 무전해 니켈강 등을 재료로 하여 금형을 제작하고 렌즈를 성형하는 사출성형법과 내열성을 갖는 세라믹스 또는 초경 금형에 렌즈 소재를 연화 온도까지 가열한

[†] 인하대학교 대학원

E-mail : g2031533@inhavision.inha.ac.kr

TEL : (032)860-8778 FAX : (032)868-1716

* 에이엠테크놀로지(주)

** 인하대학교

후 프레스 성형하는 방법 그리고 플라스틱, 유리 렌즈 등을 절삭과 연삭을 통하여 직접 가공하는 방법등이 알려져 있다. 저가인 플라스틱렌즈의 경우 렌즈 성형부 코어를 초정밀하게 가공하여 사출성형 금형에 조립 후 정밀 사출기에서 사출하는 방법이 있다. 그러나 플라스틱 재질 특성상 고온이 발생하는 고정밀 렌즈나 고신뢰도를 요구하는 제품에는 적용에 제약이 따른다. 이러한 문제점을 해결할 수 있는 유리렌즈의 경우 고가의 성형 금형을 제작하여야 하며 또한 고가의 고온 성형기를 이용하여 렌즈를 성형해야 한다. 대표적인 유리성형기인 glass molding press는 유리렌즈를 가공하는데 소요되는 시간이 약 20분정도이다. 그리고 약 800℃의 고온에서 금형에 의해 유리렌즈를 성형하기 때문에 금형의 수명이 문제가 되며 성형용 유리재질이 몇 가지로 한정되어 광학계 설계에 제약이 따르는 단점이 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해서 경쟁력 있는 비구면 유리 렌즈 가공 시스템 개발이 매우 높게 요구되어 왔다. 일반적으로 초정밀 가공기와 다이아몬드 공구 또는 연삭 공구에 의해 비구면 형상이 만들어 진다. 하지만 진동, 이송 정밀도, 공구의 형상 오차와 공구 경로는 비구면 렌즈 금형에서 잔류 공구마크가 남게 된다. 또한 렌즈의 소형화에 따라 연삭 공구가 급속하게 마멸되어 정밀 비구면 형상을 만들기 어려운 경우도 있다.

Table 1 Trends of aspherical surface lens

Optical component	Material	Form Accuracy ($\mu\text{mP-V}$)	Surface Accuracy (nmR_{max})	Machining Method
CD, Camera lens	Plastic	0.1~1	10~30	Injection molding
Laser Mirror	Cu, Al	1~5	30~100	Cutting
Infrared Lens	Si, Ge, ZnS	0.3~1	20~30	Cutting, Grinding
CD, Camera Lens	Glass	0.1~1	10~30	Glass Pressing
Telescope Mirror	Glass	5~50	10~30	Grinding→Polishing
Lithography Lens	Glass	0.1~0.2	5~10	Grinding→Polishing

따라서 고정밀급의 비구면 형상 렌즈를 가공하는 경우 구면렌즈와는 다르게 공구를 비구면 궤적에 따라 운동시켜 가공할 수 있는 CNC 비구면 연삭기가 필요하며, 요구되는 렌즈의 정밀도에 따라서 가공기가 초정밀화 되어야만 표면 형상 및 거칠기를 개선시킬 수 있다.^(3,4) Table 1은 일반적인 비구면 광학부품의 동향과 가공 방법 및 정밀도에 대해서 보여주고 있다.

마이크로 비구면의 경우, 렌즈 기본 곡률 반경이 작고, 비구면 경사도가 크기 때문에 공구의 크기와 형상, 공구의 운동을 제약하는 요건이 되고 있다.⁽⁵⁾ 그리고 비구면 렌즈를 가공 한 후 폴리싱 공정을 통해서 높은 정밀도의 제품을 얻을 수 있고 가공물과 연마 공구의 동시 회전을 통해서 폴리싱 공정이 이루어지는 연구가 진행되고 있다.^(6,7)

따라서 본 연구에서는 초정밀 비구면 마이크로 렌즈를 얻기 위해서 비구면 렌즈에 관한 전반적인 메커니즘을 언급하고 각각의 구성요소 기술을 고려하여 비구면 가공용 지능형 연삭시스템을 설계하고자 한다.

2. 비구면 가공용 연삭 시스템

2.1 비구면 렌즈

비구면 렌즈의 설계는 렌즈의 각 반경 위치에 따라서 렌즈의 굴절율과 입사각을 고려하여 최소자승법에 의하여 비구면 다항식으로 근사하는 것이다. 일반적으로 사용되고 있는 회전 대칭의 비구면 렌즈의 표면 형상은 다음과 같다.

$$Z(X) = \frac{C \cdot X^2}{1 + \sqrt{1 - (k+1)C^2 \cdot X^2}} + \sum_{i=1}^m C_i \cdot X^i \quad (1)$$

Z축은 회전의 중심축으로서 비구면 축방향의 위치이고 X는 비구면 축으로부터의 수평 방향 거리이다. 첫 번째 항은 구면 항이고 두 번째 항은 구면 항에 대한 수정량 즉, 비구면 항에 해당된다. 여기서 k는 원추상수(conic constant)로서 원추면에 따라서 달라지고, C는 비구면의 곡률 기준 반경을 나타내는 계수이다. C_i 는 구면을 포함한 단순 원추면을 비구면으로 수정하는 비구면 계수이다.

2.2 비구면 렌즈 가공 메커니즘

비구면 렌즈의 가공 프로세스는 공구 좌표 생성, 비구면 가공, 보정 후 가공, 비구면 형상 측정 등으로 나뉠 수 있다. 먼저 비구면 렌즈 형상의 좌표를 식(1)에 의해서 구하고 숫돌의 곡률 반경에 따른 공구 경로를 구한다. 구해진 공구 경로를 NC 데이터로 변환을 해서 CNC 컨트롤러에 전송을 한다. 비구면 렌즈 가공기는 CNC 제어로 연삭 가공을 수행하고 가공된 비구면 렌즈는 형상 측정을 통해서 데이터를 보정하여 수차례 가공을 한 후 형상 정밀도 및 표면 거칠기를 측정한다. Fig. 1은 비구면 렌즈의 초정밀 연삭 가공 공정 개략도이다.

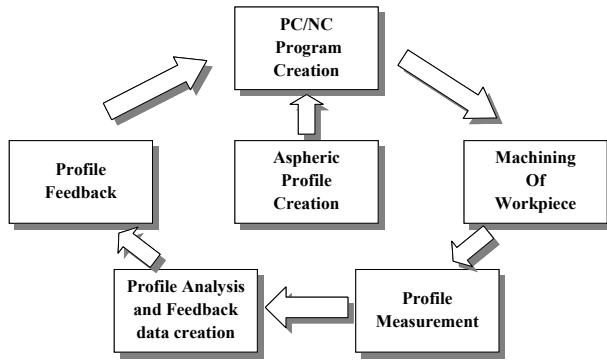


Fig. 1 Grinding process of aspherical lens

2.3 비구면 렌즈 가공용 연삭 시스템 개요

본 연구에서는 외경 5mm 비구면 마이크로 렌즈를 가공하기 위한 연삭 시스템 개발이 목적이다. Fig. 2는 비구면 렌즈의 가공용 연삭 시스템의 개략도이다. 주축에 진공으로 비구면 공작물을 고정한 후 공구대에 연삭숫돌을 설치한다. 공작물을 잡아주는 주축과 공구대 이송축을 동시 제어하여 비구면 형상을 가공할 수 있다. 공구대의 상하운동으로 축 제어를 하여 연삭숫돌의 센터를 맞추며, CCD카메라를 이용하여 연삭숫돌과 공작물의 정확한 센터 작업을 할 수 있게 된다.

비구면 형상 가공을 위해서 NC 컨트롤러를 통해서 비구면 NC 데이터를 입력하게 되고 가공을 하게 된다.

가공 후 기상측정(On-Machine Measurement) 시스템을 통해서 형상 측정을 하고 동시에 측정 데이터를 분석해서 보정가공을 자동으로 할 수 있는 지능형 연삭 시스템을 설계하였다.

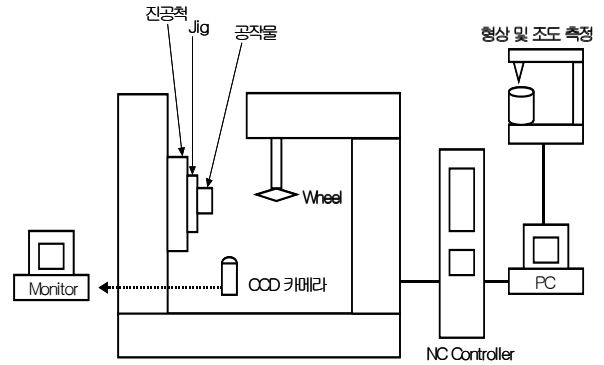


Fig. 2 Schematic diagram of grinding system for aspherical lens

3. 비구면 가공용 연삭 시스템 설계

3.1 연삭 시스템 요구 사양

구면렌즈는 총형 연삭으로 근사 형상을 만든 후 폴리싱 공정을 거쳐 가공하지만, 비구면 렌즈는 초정밀 비구면 연삭기로 비구면의 근사형상과 최종형상을 만들므로 매우 높은 수준의 주축정밀도와 안정성이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 광학 유리를 이용하여 $\phi 5\text{mm}$ 인 마이크로 비구면 렌즈 가공용 연삭 시스템을 설계하였다. 직진운동을 위한 안내면은 회전운동을 위한 주축과 함께 연삭 시스템의 운동정도를 좌우하는 중요한 기계요소로서 불연속한 작동이 없어야 하고 직진 정도 및 진동이 없어야 정밀한 제어가 가능하다.

Table 2 Specification of grinding system

	Unit	Specification
Workpiece	Size	$\phi 5\text{mm}$ Convex
	Material	Optical glass
Travel	Position Accuracy	$0.1\mu\text{m}$
	Straightness	$0.1\mu\text{m}/40\text{mm}$
	Stiffness(H/V)	$200/400\text{N}/\mu\text{m}$
Workpiece Spindle	Rotational Error	$0.1\mu\text{m}$
	Rotational Speed	$\sim 1,500\text{rpm}$
	Stiffness(R/Axial)	$30/100\text{N}/\mu\text{m}$
Grinding Spindle	Rotational Speed	$100,000\text{rpm}$

Table. 2는 본 연구에서 개발하기 위한 지능형 연삭 시스템을 설계 사양을 보여 주고 있다.

3.2 연삭 시스템 LAYOUT

비구면 연삭 시스템은 크게 연삭주축 부분, 공작물 주축, 이송 안내면으로 구분해서 설계 되었다. 연삭 주축과 공작물 주축은 에어 스피들을 적용하였고, 이송 안내면은 초정밀 L/M가이드를 적용하여 설계하였다. 연삭 시스템은 공작물 주축을 X축 위에 수직으로 설치하고, 연삭 주축은 X축과 동시제어로 원하는 궤적을 생성하는 Z축과 공구와 공작물간의 중심 위치를 맞추는데 사용 되는 Y축에 장착되어 있는 구조이다. Fig. 3은 초기에 설계된 연삭 시스템의 layout을 보여주고 있다.

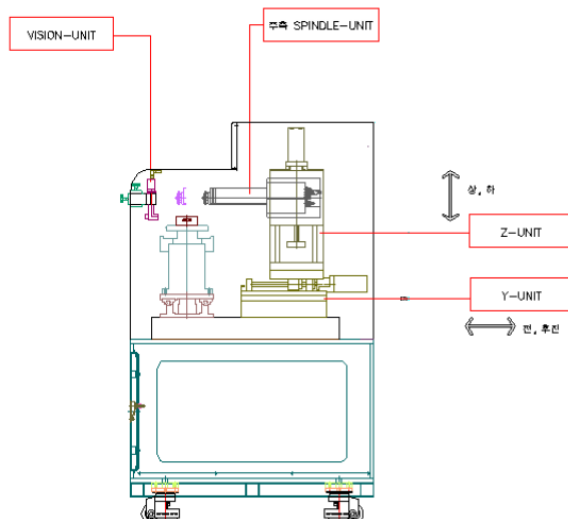


Fig. 3 Layout of grinding system for aspherical surface lens

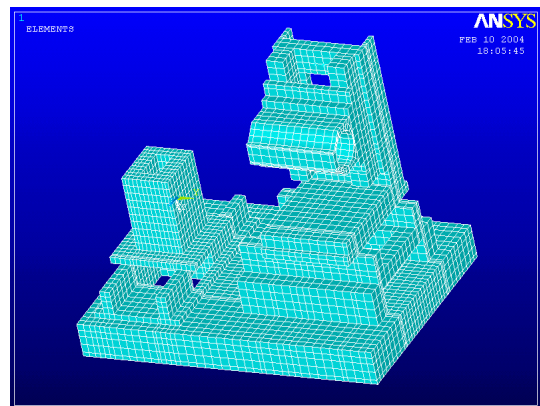
3.3 초기 연삭 시스템에 대한 유한요소해석

비구면 연삭 시스템에 대한 구조물의 변형 형상과 응력 분포 상태를 알기 위해서 구조해석을 수행하였다. 또한 구조물의 안정성 및 취약한 부분을 분석을 하여 설계 수정 및 보완을 하는데 그 목적이 있다. 비구면 연삭 시스템의 응력 해석에 이용한 해석 프로그램은 상용 구조 해석용 프로그램인 ANSYS를 사용하였다.

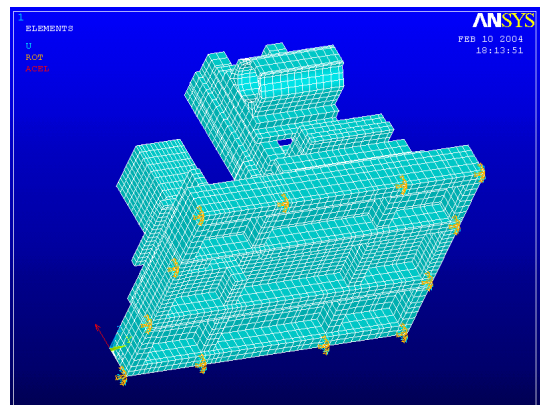
솔리드요소(SOLID45)를 사용하여 모델링한 응력 해석 대상 부품으로는 연삭기 시스템 전체를 해석을 하되 연삭 주축과 공작물 주축을 제외한

X, Y, Z축 유닛의 rail base, moving plate와 Z축의 main body와 spindle housing에 대해서 모델링하였고, 집중질량요소(MASS21)로 모델링한 부분은 모터 2kg, 볼 스크류 2kg이다.

Fig. 4는 구조물을 해석하기 위한 모델링 형상과 경계조건을 보여주고 있다. Fi. 4(a)는 유한요소 모델 형상으로서 솔리드 요소(SOLID45)와 집중질량요소(MASS21)를 사용하여, 10,637의 솔리드요소와 2개의 집중질량요소 그리고 16,045개의 절점수로 이루어져있다. Fig. 4(b)는 해석을 하기 위한 경계조건으로서 지면과 베드 부분의 일부 절점 12 자유도 모두를 구속하는 조건이다.



(a) FE Modeling shape



(b) Boundary condition

Fig. 4 FE modeling of grinding system for aspherical surface lens

Fig. 5는 각각의 유닛에 따른 해석 물성치를 구분하기 위한 모델링 그림을 나타내고, Table. 3에 해석에 사용된 연삭 시스템의 물성치를 나타내었다. 해석을 위한 가정으로는 부품간의 열 접촉저항은 무시하였으며 복사에 의한 열전달은 무시하였다.

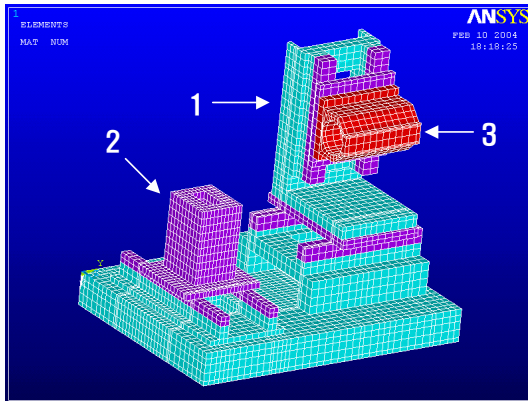


Fig. 5 FE Modeling of material properties for each unit

Table 3 Material properties of grinding system

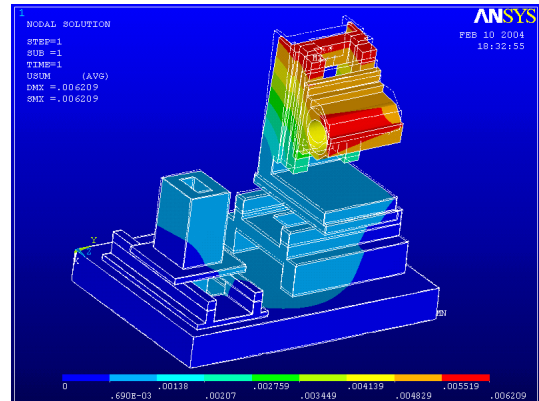
	Material	Elasticity Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Density (kg/m ³)
1	FC20 FC25	186	0.18	7,420
2	S45C	207	0.3	7,870
3	A6061	70	0.34	2,700

3.4 초기 연삭 시스템의 해석결과

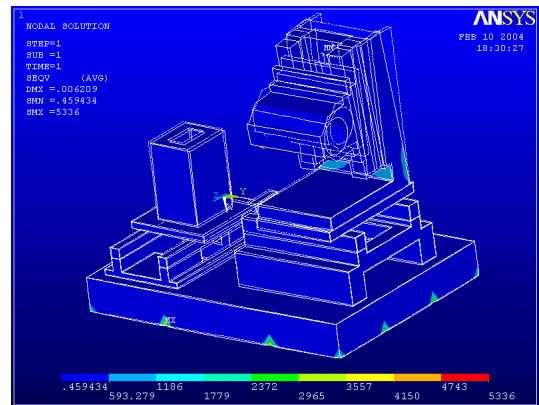
각각의 유닛들이 결합된 연삭 시스템을 구조 해석하였으며, 그 결과는 다음과 같다. Fig. 6은 비구면 연삭 시스템에 대한 구조물의 변형 형상 및 응력 분포에 대한 해석을 수행한 결과를 나타내고 있다.

Fig. 6(a)은 연삭 시스템의 변형 형상을 보여주고 있다. 본 구조물에 대한 해석결과 Z축 유닛의 상부 및 스피들 하우징에서 6.21 μ m의 최대 처짐량을 보였다. 이는 스피들은 포함하지 않고 해석한 것이며, 전방으로 돌출한 스피들 하우징의 자중 때문에 발생한 것으로 사료된다.

Fig. 6(b)은 구조물의 등가응력 분포 형상을 보여주고 있다. 연삭 시스템의 지면 연결부에서 최대 등가응력을 보였으며, 그 값은 5.3MPa이다. 그리고 Z축 유닛의 중앙부위와 시스템 전체의 중앙부위에서 약 0.89MPa의 등가응력값을 보였다.



(a) Deformation of grinding system



(b) Distribution of equivalent stress

Fig. 6 FE analysis results of grinding system

3.5 연삭 시스템 수정 및 재설계

초기 연삭 시스템에 대한 구조 해석 후 보다 더 정밀한 지능형 연삭 시스템을 개발하기 위해서 몇 개의 구동 메커니즘을 변경하여 설계를 하였다.

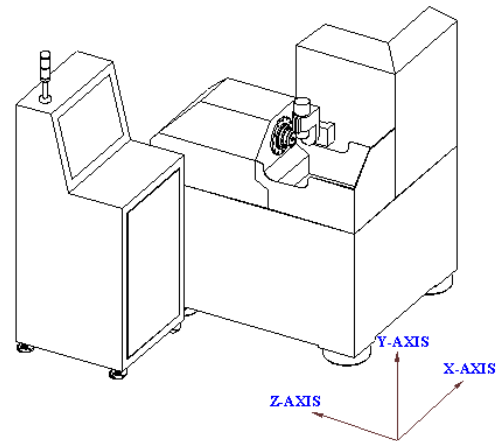


Fig. 7 Schematic diagram of redesign for grinding system

Fig. 7은 재설계된 연삭 시스템을 보여주는 개략도이다. 본 연삭 시스템은 초기 시스템과 다르게 Z축은 공작물의 주축으로서 회전 및 전후이송이 가능하게 하였고, X축 이송 안내면으로서 연삭 주축이 고정되어 있다. Y축은 연삭 주축이 상하 이송할 수 있는 동시에 가공 성능을 좋게 하기 위해서 연삭 주축 헤드 부분이 틸팅(tiling)이 되도록 설계하였다.

3.6 비구면 렌즈 가공용 연삭숫돌 설계

Fig. 8은 비구면 렌즈 가공용 연삭숫돌의 사이즈 및 형상을 보여주고 있다. Fig. 8(a)은 황삭용 휠로서 600, 800, 1200 메시의 입도를 가지며 메탈 본드를 사용하도록 설계하였다. Fig. 8(b)는 정삭용 휠로서 1200, 1500, 2200 메시의 입도를 가지며 입자의 탈락이 잘 되도록 하기 위해서 레진 본드를 사용하도록 설계하였다.

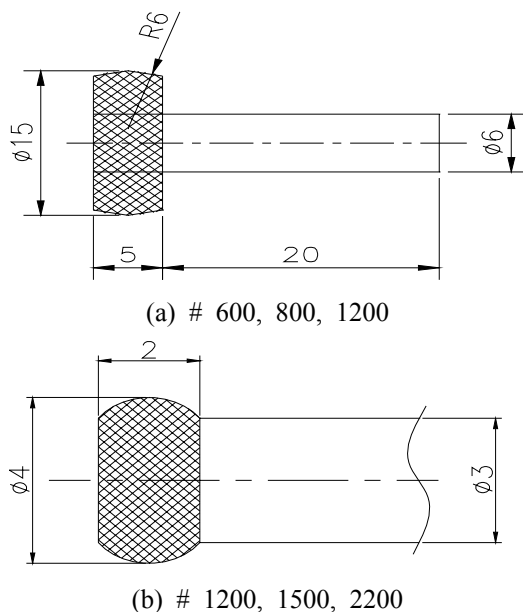


Fig. 8 Wheel model for aspherical surface lens

4. 결 론

본 연구에서는 설계, 구조해석, 시스템의 사양, 연삭 공구 등 전반적인 마이크로 비구면 가공용 지능형 연삭 시스템에 대해서 살펴보았다. 초기 연삭 시스템에 대한 구조 해석을 통해서 Z축 유닛의 상부 및 스핀들 하우징에서 6.21 μ m의 최대 처짐량과 연삭 시스템의 지면 연결부에서 5.3MPa의 최대 등가응력을 보였다. 이송 안내면은 초정 밀급의 L/M 가이드와 연삭 주축은 100,000rpm의

에어 스핀들을 적용하여 설계하였다. 향후 설계된 데이터를 이용하여 비구면 가공용 지능형 연삭 시스템 제작하여 실제로 비구면 렌즈를 가공해서 성능 평가에 대한 연구를 진행할 예정이다.

후 기

본 연구는 산업 자원부가 주관하는 “고기능성 부품 가공용 지능형 연삭시스템”의 지원에 의해 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Shida, H., 1998, "Development of Machining Technology on High Precision Plastic Opto-Element," *Rich Technical Rept*, No. 24, pp. 99~105.
- (2) Suzuki, H., Kodera, S., Maekawa, S., Morita, N., Sakurai, E., Tanaka, T., Takeda, H., Kuriyagawa, T., and Shoji, K., 1998, "Study on precision Grinding of Micro Aspherical Surface," *Journal of the Japan society for precision engineering*, Vol. 64, No. 4, pp. 619~623.
- (3) Yang, M. Y. and Lee, T. M., 1997, "Nwe biarc interpolation for ultra-precision aspheric surface machining," *Proc. ASPE Annual Meeting*, pp. 195~198.
- (4) Arnold, J. B., Steger, P. J., and Saito, T. T., 1975, "Tool feed influence on the machinability of CO₂ laser optics," *Applied Optics*, Vol. 14, pp. 1777~1782.
- (5) Foreman, J. W and Jr., 1986, "Simple numerical measure of the manufacturability of aspheric optical surfaces," *Applied Optics*, Vol. 25, pp. 826~827.
- (6) Doughty, G. and Smith, J., 1987, "Microcomputer-controlled polishing machine for very smooth and deep aspherical surfaces," *Applied Optics*, Vol. 26, pp. 2421~2426.
- (7) Suzuki, H., Kodera, S., Nakasuji, M., and et al., 1997, "Study on the aspherical surface polishing of single crystal silicon lens," *JSPE*, Vol. 63, pp. 1280~1284.