

광학소자용 초정밀 비구면 가공프로그램 개발

김우순*, 김동현+, 난바의치**

The Development of Ultra-precision Aspheric Program for Optical

W. S. Kim*, D.H.Kim+, Y.Namba**

Abstract

In this paper, we will present the Aspheric Surface Program for optical element. X-ray optical element designed to give a high resolution and reflectivity in order to observe the living cell in the range of the water window.

According to optical design, we developed the Aspheric Surface Program using the visual basic. Using the Aspheric Surface Program, we directly machined the electroless nickel bulk.

Key Words : Aspheric(비구면), Optical element(광학소자), Electroless nickel(무전해니켈)

기호설명

- K : 형상계수
- C_0 : 정점에서의 곡률
- C : 정수항
- C_j : 고차의 비구면계수
- a_3, a_4 : semi-major axis
- b_3, b_4 : semi-minor axis
- $c_3 : \sqrt{a_3^2 - b_3^2}$
- $c_4 : \sqrt{a_4^2 + b_4^2}$
- R : 곡률반경
- r : 공구 노우즈 반경

1. 서론

최근에 광기술의 진보가 현저하게 발달함에 따라 그것에 상응하는 광학부품에 요구되는 정도도 높아지고 있는 추세이다. 특히, 광학계에 있어서 구면광학부품에서 발생하는 구면수차가 없게 하기 위하여 비구면광학부품의 수요가 높아지고 있다.

비구면 광학소자들의 가공에는 요구된 정도 달성이 힘들고, 최종마무리에 있어서 숙련자의 수정이 필요하지만, 현재에는 초정밀 가공기에 의한 가공이 주로 이루어지고 있으며, 효율이 보다 높은 형상정도가 얻어지고 있는 상태이다. 특히, 축대칭비구면의 창성에 있어서 일반적인 초정밀 가공기술은 수치제어가공기계의 궤적제어를 통한 가공이 이루어지고 있다.

* 김우순, 원광대학교 기계시스템디자인공학부 (knamba@wonkwang.ac.kr)
주소: 570-749 익산시 신용동 344-2
+ 원광대 기계시스템디자인공학부
++ 일본 중부대 기계공학부

광학소자인 반사미러나 렌즈는 따라 약간의 차이는 있지만 대부분 수치제어가공기계의 궤적제어로 가공하여 형상정도 1um 이하, 표면거칠기 0.01um 이하를 만족하기 위해서는 공작기계의 높은 운동정도, 공구인선의 높은 형상정도, 엄밀한 온도제어등이 뒷받침되어야 한다.

본 연구에서는 비구면을 갖는 X선현미경용 미러를 초정밀 절삭가공하기 위하여 각 가공점 데이터를 생성하는 프로그램을 개발하였고, 개발한 프로그램을 이용하여 구한 가공점 데이터를 초정밀가공기계에 전송하여 X선현미경용 미러의 비구면 가공을 구현하고자 한다.

2. 이론적배경

2.1 비구면다항식(1)(2)

광학분야에 있어서 사용되는 비구면으로서는 비구면다항식으로 표현되는 축대칭의 비구면이 대부분이다.

$$z = \frac{C_0 \cdot x^2}{1 + \sqrt{1 - (K+1) \cdot x^2 C_0^2}} + C + \sum_{i=1}^{16} C_i x^i \quad (1)$$

각 계수의 차이에 따라 (1)식의 회전체로 얻는 가공형상이 결정되는데, 축대칭비구면형상은 비구면 계수들로 표현되어지고 비구면 식을 이용한 쌍곡면, 타원면이 있다.⁽³⁾ 이러한 형상들에 대한 방정식과 입력계수들은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Equation & input parameter for ultra-precision aspheric

Surface	Equation	Parameter
Ellipse	$\frac{Z^2}{A^2} + \frac{X^2}{B^2} = 1$	A, B
Hyperbola	$\frac{Z^2}{A^2} - \frac{X^2}{B^2} = 1$	A, B

현재 축대칭비구면의 창성은 수치제어가공기계의 궤적제어에 의한 가공이 이루어지고 있다. 비구면을 창성하는 제어방식으로는 Fig.1과 같이 2가지 방식이 있다.

Fig.1(a)는 공작물을 Z축을 중심으로 회전시켜 인선이 R형상인 공구를 요구하는 비구면형상곡선을 따라 운동시키는 것이다. 즉, X, Z축 동시 2축제어의 CNC 가공기계라면 가능하다. 그러나, Fig. 1(a)에서 보는 바와 같이 동시 2축제어는 공구의 가공점이 가공위치에 따라 각각 변화하기 때문에, 공구인선이 완전한 R형태가 아니면 공작물에 형상오차가 발생한다. 최근의 공구연마기술의 향상에 따라 단결정

다이아몬드 공구인선의 R형상정도가 0.1um 이하로 성형가능하게 되었지만, R부는 다이아몬드의 결정방위가 다르므로 편마모에 의한 형상변화를 고려하여 가공을 하는 것이 필요하다.

Fig.1(b)는 공구인선의 가공점이 가공운동중 변화하지 않도록 B축에 의한 공구 또는 공작물을 회전시키는 것이다. 이 경우는 동시 3축제어가 되기 때문에 B축이 추가됨에 따른 제어상의 오차와 강성의 저하에 의한 기계적인 오차를 최소한으로 하는 것이 중요하다.

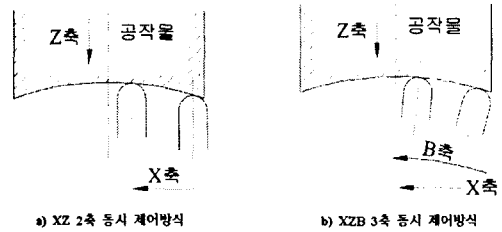


Fig. 1 The control patterns for aspheric machining

2.2 초정밀절삭에서의 가공오차

비구면을 가공하는 것은 (1)식으로 표현되는 곡선을 반경방향으로 등분할하고 그 구간을 직선으로 근사시켜 가공을 행한다. 구면이나 비구면의 가공에서는 반경방향으로 등분할한 최소구간을 직선으로 근사하여 가공하기 때문에 실제의 설계의 형상과 공구의 궤적에서는 차이가 발생하게 된다. 이 오차량이 마무리면조도와 동일한 정도가 되도록 분할수를 설정하여야만 한다. 이때, 최소분할구간에 있어서 실제의 직선이동거리가 더욱 길게 되고, 설계형상과 가장 크게 차이가 발생하는 외주부에 있어서 계산하여야만 한다.

Fig. 2는 공구의 궤적과 설계한 형상사이에서 발생하는 오차를 나타내고 있다.

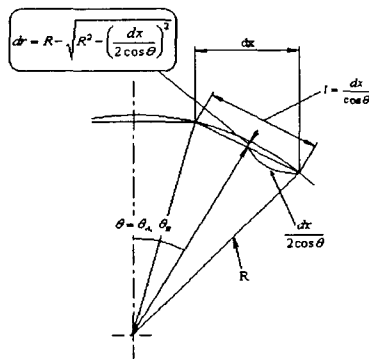


Fig. 2 The relation between tool trace and design form

Fig. 2로부터 단선분길이를 dx , 곡률반경을 R , 회전축과 외주부에서의 법선과 이루는 각도를 θ (오목면 미러, B의 경우에는 각각 θ_A, θ_B)라 하면 최소분할구간에 있어서의 실제의 이동거리 l 는,

$$l = \frac{dx}{\cos \theta} \quad (2)$$

이다. 또한, 가공형상이 구면이므로 Fig. 2에서 오차량 dr 이 가장 크게되는 곳은 거리 l 의 중심부이며, 오차량 dr 은 다음식과같다.

$$dr = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{dx}{2\cos \theta}\right)^2} \quad (3)$$

이와 같이 실제의 동작은 점과 점사이에서 비구면곡선이기 때문에 약간 차이가 나는 궤적을 나타내므로, 이송방향의 분해능이 미세하여야 한다. 최소분할 개수를 많이 취하면 정도는 향상되지만, NC장치의 메모리 용량이나 연산처리속도에 제한이 있기 때문에 허용형상오차의 범위 내에서 최소한도로 하는 것이 효율적이다.

2.3 공구의 노우즈반경 보정

실제의 궤적의 가공점좌표는 (1)식의 비구면 다항식에 의해 얻어진 가공점들에 대하여 공구의 노우즈반경만큼 보정할 필요가 있다. Fig. 3은 공구의 노우즈반경 보정의 개념을 나타내고 있다.

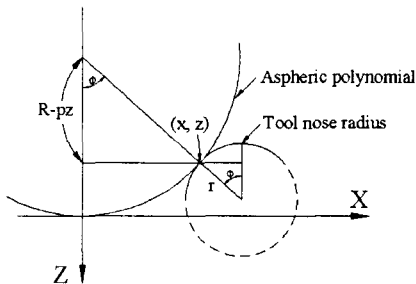


Fig. 3 Compensation of tool nose radius

비구면 다항식으로부터 구한 가공점들의 좌표를 (x, z) , 공구인선반경의 보정을 행한 공구중심의 좌표를 (x', z') 라 하면,

$$\begin{aligned} x' &= x \pm r \sin \phi \\ z' &= z + r \cos \phi \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{단, } \phi = \tan^{-1} \left(\frac{x}{R - pz} \right)$$

이며, 좌표 (x', z') 가 실제의 공구의 궤적의 가공점 좌표가 된다.

2.4 가공데이터의 처리

비구면의 가공에는 구하고자 하는 형상의 가공데이터를 (1)식으로 계산하고, 공작기계에서 그 가공점사이를 직선보간운동시켜 행한다. 일반적으로 가공데이터는 대단히 용량이 크므로 그것들의 계산은 소프트웨어상에서 행하는 것이 유리하다. 작성한 가공데이터는 컴퓨터와 NC기계를 RS-232C 인터페이스로 연결한 후, 컴퓨터로부터 데이터를 수렴하여 그것들을 순차 실행시켜 가공한다.

3. 사입사형 X선 현미경의 형상설계

X선 현미경은 빛의 전반사를 이용한 사입사광학계를 주로 이용한다. 사입사광학계는 Fig. 4에 보여주는 것과 같이, Wolter I 형 사입사광학계가 대표적이다.⁽⁴⁾⁽⁵⁾

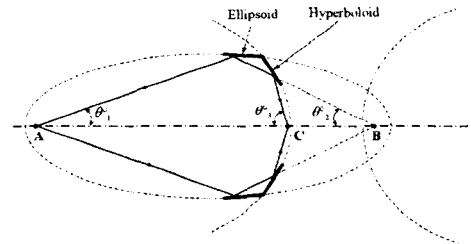


Fig.4 Geometry of the Wolter type I mirror

이 광학계는 회전타원면과 회전쌍곡면을 이용하여 입사 X 선을 2회반사시켜, 초점에 X선을 집광 및 결상시키는 방식이다. 회전타원면의 초점B와 회전쌍곡면의 초점B를 공통초점이 되도록 조합시켜, 회전쌍곡면의 다른쪽의 초점C에 측정시료가 위치하도록 한다. 시료를 통과한 X선은 회전쌍곡면에서 반사되고, 회전타원면에서 반사되어 회전타원면의 또다른 초점A에 상을 맺게 하는 광학계로서 다음과 같은 방정식으로 나타낸다. Fig. 5은 X 선 현미경의 형상설계한 값들을 나타낸 것이다.

$$\frac{(x - c_3 + 2c_4 + 2c_2)^2}{a_3^2} + \frac{y^2}{b_3^2} = 1 \quad (5)$$

$$\frac{(x + c_4 + 2c_2)^2}{a_4^2} - \frac{y^2}{b_4^2} = 1 \quad (6)$$

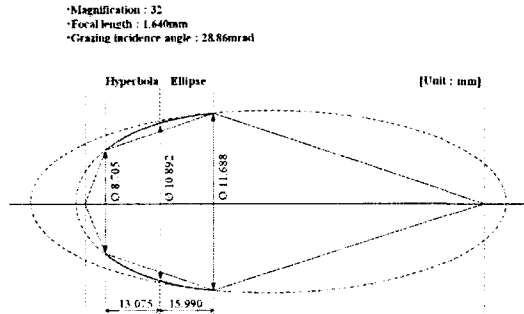


Fig. 5 The parameters of the Wolter type I object mirror

4. 프로그램 구현

Fig. 6는 X선 현미경용 미러의 형상을 가공하기 위한 전체메뉴를 나타낸다.

X선 현미경용 형상 변수들과 NC가공을 위한 변수들을 결정하고 비구면형상에 따른 방정식을 구현하였다. X선 현미경은 타원면과 쌍곡면의 조합이므로 앞에서 언급한 방정식을 이용하였다.

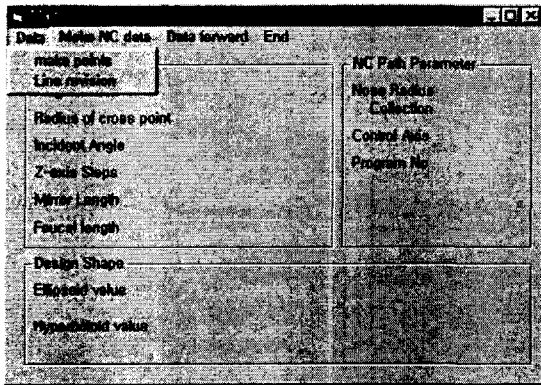


Fig. 6 Main window in developed aspheric surface program

Fig.7은 가공데이터를 생성하는 작업창을 보여준다.

이 작업창에서는 X선 현미경용 비구면을 가공하기 위한 각각의 변수를 입력하면 계산식에 의한 데이터가 생성되도록 하였다. 타원면과 쌍곡면의 변수와 변곡점에서의 X위치,

타원면의 길이, 쌍곡면의 길이, Z축방향의 분할값을 입력하고, 가공방향을 결정하여 고찰하면 가공데이터가 생성된다.

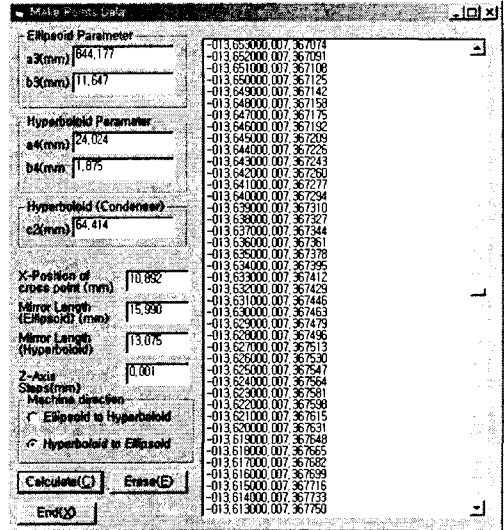


Fig. 7 Full-down menu window in developed aspheric surface program

전술한 X선 현미경용 광학소자의 비구면 가공프로그램을 이용하여 Fig. 8과 같은 타원면과 쌍곡면으로 구성된 비구면을 가공하였다. 가공실험은 토요타공업(주)의 초정밀 가공기계 AHN10와 단결정 다이아몬드 공구를 이용하여 가공하였다.

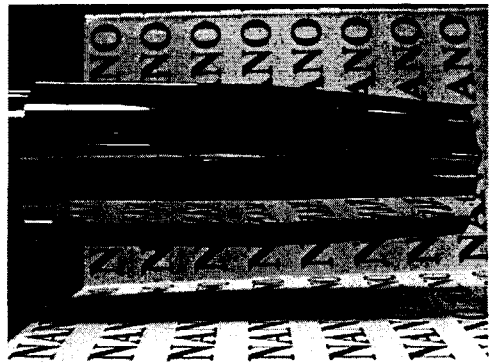


Fig. 8 Machined aspheric surface for X-ray microscope

5. 결론

본 연구에서는 비구면 가공이 행해지는 시스템을 이해하여 X선 현미경용 미러의 초정밀절삭가공에 필요한 비구면

가공프로그램을 개발하고 실제로 비구면 형상가공에 적용하였다. 제안된 X 선 현미경용 비구면 가공프로그램은 초정밀 광학소자의 비구면 가공의 기술을 향상시키는데 기여할 것으로 사료된다.

(1) X선 현미경용 미러의 비구면을 가공할 수 있도록 타원면과 쌍곡면의 변수와 변곡점에서의 X위치, 타원면의 길이, 쌍곡면의 길이, Z축방향의 분할값의 입력기능을 구현하였다.

(2) 기존의 초정밀기계에서 사용되는 비구면 다항식에 의존하지 않고 X선 현미경용 광학소자의 비구면을 가공할 수 있는 프로그램을 개발하였고, 계산식에 의해 가공데이터를 생성케 하여 실제 비구면 절삭에 적용하였다.

참고문헌

- (1) James C. Wyant, [www. optics.arizona.edu/](http://www.optics.arizona.edu/).
- (2) CNC초정밀가공기 자동 프로그래밍장치 SPCNC 취급설명서, 도요타공업주식회사.
- (3) 양민양, 이택민, 2002, "초정밀비구면 가공용 CAM 소프트웨어 개발에 대한 연구", 한국정밀공학회 제19권 제 4호, pp.79~86.
- (4) H. Wolter, 1952, "Mirror systems with grazing incidence as image-forming optics for x-rays", *Ann. Phys.* 6th Ser., 10, pp.94~114.
- (5) Alan G. michette, 1986, *Optical systems for soft x-ray.*, pp.72~77.
- (6) W. S. Kim, D.H.Kim, Y.Namba, 2002, "A study of the mirror design and the fabrication for an X-ray microscope", 한국공작기계학회 춘계학술대회논문집, pp.59~63.
- (7) 피터노턴, 1999, 한글 비주얼베이직 6, 인포·북 SAMS.