

## 비구면 가공을 위한 공구 경로 제어 알고리즘

김형태\*(에이엠테크놀러지), 양해정(한국산업기술대학교 기계설계공학과)

### Tool Path Control Algorithm for Aspherical Surface Grinding

H. T. Kim(AM Technology), H. J. Yang(Mechanical Design Eng. Dept., KPU)

#### ABSTRACT

In this study, tool path control algorithm for aspherical surface grinding was derived and discussed. The aspherical surface actually means contact points between lens and tool. Tool positions are generally defined at the center of a tool, so there is difference between tool path and lens surface. The path was obtained from contact angle and relative position from the contact point. The angle could be calculated after differentiating an aspheric equation and complex algebraic operations. The assumption of the control algorithm was that x moves by constant velocity while z velocity varies. X was normal to the radial direction of lens, but z was tangential. The z velocities and accelerations were determined from current error and next position in each step. In the experiment, accuracy of the control algorithm was checked on a micro-precision machine. The result showed that the control error tended to be diminished when the tool diameter increased, and the error was under sub-micro level.

**Key Words** : Aspherical Lens (비구면 렌즈), Tool Path Interpolation (공구 경로 보간), Ultra-precision Grinding Polishing System (초정밀 연삭 연마 시스템), PC-Base Control (PC 기반 제어)

#### 1. 서론

비구면 렌즈는 수차 보정을 고려한 렌즈로 일반 렌즈에 비해 성능이 월등하지만 가공성이 까다로운 것으로 알려져 있다. 현재 비구면 렌즈는 디지털 카메라, DVD 등 실생활에 밀접한 관련이 있으므로 그 수요도 증가하고 있는 추세이며, 이에 관한 많은 연구가 진행되고 있다. 이러한 연구는 크게 비구면 표면에 관한 보간 알고리즘에 관한 연구와 비구면 가공 방법에 관한 방법론에 관한 연구로 나눌 수 있다.

Lee 는 비구면 가공 소프트웨어에 관한 연구를 발표하였는데, 비구면 계수와 소재의 형상, 공구의 형상을 입력하면 연속 보간을 고려한 공구 경로를 생성하였다.<sup>1)</sup> 공구 경로는 NC 코드로 표현되고, NC 머신에 다운로드시켜 비구면 보간을 하도록 되어있다. 그러나 여기서는 위치에 대한 개념은 정립하였으나, 속도에 관한 사항은 언급되어있지 않다. Chen 등에 의하면, 기하학적인 관계를 고려하여 예상 위치 오차를 계산하고, 이것을 공구 경로 생성에 반

영하는 연삭 시스템을 개발하였으나, 위치 제어 중심으로 되어 있고, 마찬가지로 속도나 가속도에 관한 사항은 찾아보기 어렵다.<sup>2)</sup>

정밀 비구면 반사경의 표면을 가공하는 분야에도 비구면 형상 추종 알고리즘에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. Kim 등은 비구면 반사경을 가공할 때 생기는 절삭력에 의한 재료와 공구간의 변형을 보상하기 위한 방법을 연구하였다.<sup>3)</sup> 공구축과 반사경에 각각 센서를 설치하여 변형량을 측정하여 PC로 실시간 모니터링하여 보상하는 방법을 제안하였다. Tsunemoto 등은 다이아몬드 휠을 이용하여 세라믹 재질의 반사경을 제작하는 방법을 개발하였다.<sup>4)</sup> 이 방법은, 연속적인 공구각을 주는 것이 아니라, 고정각으로 재료를 가공하는 방법이다. 입력은 비구면 수식과 공구식이지만, 명령어로 변환하여, 직렬 통신을 이용해 커맨드를 다운로드 하는 방식이므로, 진정한 의미의 PC 기반의 제어라고 할 수 없다. Cheng 등은 비구면 반사경 연삭시 가공량을 결정할 수 있는 수식을 제안하여 서브마이크론 레벨의 가공 정밀도를 얻었다.<sup>5)</sup>

Lei Zhang 등은 ER 유체를 이용한 비구면 연삭에 관한 연구사례를 발표하였다. 이 연구에 의하면, ER 유체가 전기장에 의해 점성이 변하는 성질을 이용하여 연마제와 ER 유체를 혼합, 전극을 가해 연삭성을 제어하였다.<sup>6)</sup> Lee 등은 엑시머 레이저를 이용하여 연속적인 가공면을 만들어내는데 성공하였다. 진정한 의미의 비구면은 아니지만, 구면과 포물선 형상을 500 μm의 크기로 가공하였으며, Ra는 2-10nm 여서 그 가능성을 확인할 수 있었다.<sup>7)</sup>

비구면 가공 뿐만 아니라, 비구면 표면을 측정하여 오차와 거칠기를 알아내는 것도 생산에서 대단히 중요한 문제이다. Rolf 등은 광학적으로 비구면의 오차를 측정할 수 있는 방법을 제안하였다.<sup>8)</sup> 이들은 Fizeau 간섭계를 이용하여 표면 오차를 계산하는 수식을 제안하였고, 45nm의 비구면 오차를 측정하였다.

비구면 렌즈의 공식은 렌즈 표면에 관한 수치 정보를 발생시켜준다. 렌즈의 가공은 연삭이나 연마 도구를 이용하므로, 공구의 접촉점은 바로 비구면 렌즈 공식상의 점이 되어야 한다. 그러나, 공구의 좌표는 공구 끝단의 렌즈와의 접촉점이 아닌, 공구상의 특정 중심이나 공구 반경상의 중심을 기준으로 위치제어가 이루어진다. 비구면 가공을 하여 비구면 표면을 생성해 내는 경우에도 접촉점과 공구 중심과의 관계를 바탕으로 공구 경로 생성 알고리즘을 만들어서 공구가 이동하는 경로를 지정해 주어야 한다.

따라서, 기존의 비구면 곡선 제어 연구들은 속도보다는 위치 중심으로 되어있고, NC 시스템 위주로 되어있다. PC 기반 시스템의 장점은 사용자가 편리한 인터페이스를 제공하는 점도 있지만, 다양한 제어 방법을 시도해볼 수 있는 장점도 있다. 따라서, 이 논문에서는 PC 기반 시스템으로 비구면 가공을 위한 공구 경로를 생성하고 곡선 경로를 추종하는 알고리즘을 제시하였다. PC를 이용한 제어에 알맞은 보간 알고리즘을 이용하였고, 비구면 공구 경로 발생 루틴을 발생시켜 그 정밀도를 측정하여 알고리즘의 우수성을 증명하였다.

## 2. 비구면과 공구 경로

### 2.1 비구면

일반적으로 비구면 공식은 렌즈 형상에 관한 공식과 수차 보정의 공식이 연결된 전형적인 비선형적인 형태를 가지고 있다. 일반적인 비구면 수식은 식(1)과 같이 표현된다. 여기서, z는 렌즈의 평면 중심으로부터 비구면의 높이, x는 렌즈의 중심을 기준으로 한쪽 끝에서 다른 쪽 끝의 위치이며, R은 렌즈의 반경, k와 A는 비구면 계수를 의미한다.

$$z = \frac{x^2}{R \left\{ 1 + \sqrt{1 - \frac{(k+1)x^2}{R^2}} \right\}} + \sum_{i=1}^{20} A_i |x|^i \quad (1)$$

Fig. 1은 실제 렌즈 설계 데이터를 위와 같은 비구면 함수에 입력하여 얻은 볼록 렌즈와 오목 렌즈의 비구면의 형상으로 실험에서 사용될 렌즈의 설계치에 의해 나타낸 형상이다.

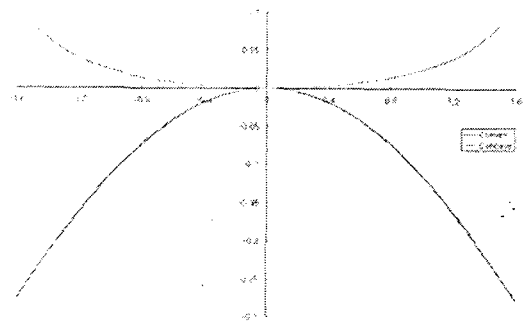


Fig. 1 An example of aspherical surface

### 2.2 공구 경로

일반적인 보간 알고리즘을 생각하면, 비구면 공식상의 제곱근과 절댓값에 관한 항 때문에 곡선 제어나 보간을 더욱 어렵게 만든다. 비구면 공구 경로는 다소 복잡한 과정을 거쳐 비구면 공식을 미분하여 얻을 수 있다. Fig. 2 같이 비구면  $z=f(x)$  상에서 원형의 공구가 접촉한다면, 접촉각  $\theta$ 는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

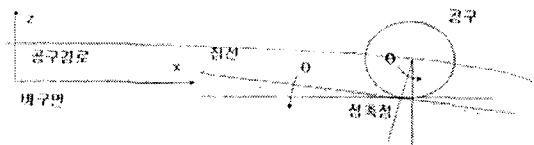


Fig. 2 Contact point and angle on an aspherical surface

$$\tan \theta = z' = f'(x) \quad (2)$$

이 수식을 (1)에 적용하여  $z'$ 을  $x$ 에 관한 함수로 전개해 내면, 다소 복잡한 연산 과정을 통해 식(3)을 얻을 수 있다.

$$z' = \frac{2x(1+g) - (k+1)x^3}{g(1+g)^2} + \sum_{i=1}^{20} \text{sgn}(x) i A_i |x|^{i-1} \quad (3)$$

단, 여기서  $g$  는 연산의 편의를 위해 아래와 같이 정의하였다.

$$g = \sqrt{1 - \frac{(k+1)x^2}{R^2}} \quad (4)$$

이와 같은 비구면의 미분치는 비구면 표면의 접촉각도를 계산해 줄 수 있게 만든다. 일반적인 비구면 가공 틀은 원형의 형상을 가지고 있으므로, 비구면 표면의 접촉각을 알면, Fig. 3 과 같이 접선을 가지고 중심까지의 거리를 계산해낼 수 있다.

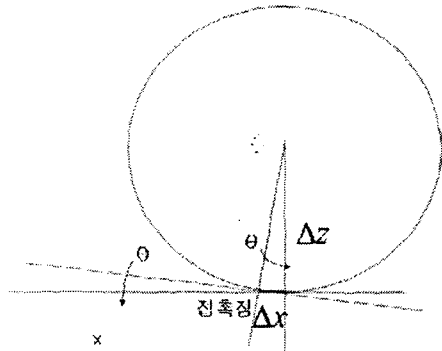


Fig. 3 Contact point and angle on an aspherical surface

즉, 접촉각과 접촉점의 정보를 이용하면 비구면 틀의 위치, 즉 공구 중심의 위치는 삼각함수에 의한 연산으로 식(5)와 (6)에 의해 계산해 낼 수 있다.

$$x_i = x + \Delta x = x + r \sin \theta \quad (5)$$

$$z_i = z - \Delta z = z - r \cos \theta \quad (6)$$

### 3. 제어 알고리즘

이렇게 계산해낸 공구의 경로는 본 연구 제 1 차년도에 제안된 비구면 전용의 속도 및 위치 제어 알고리즘을 이용하여 제어를 실시하였다. 비구면 제어 알고리즘은 비구면 위치를 가지고 현재 위치와 예측된 위치와 비교하여 오차만큼 보상속도와 가속도를 계산하여 현재 속도를 보상하면서 이동할 수 있는 알고리즘이며, 식(7)과 같이 표현된다.<sup>9)</sup>

$$v_i = \frac{-(ah + v_{i-1}) \pm \sqrt{(ah + v_{i-1})^2 - \{v_{i-1}^2 + 2af(t_i) - 2af(t_{i-1})\}}}{2a} \quad (7)$$

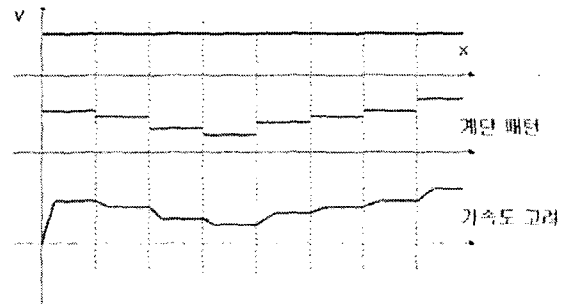


Fig. 4 Comparison between typical and proposed pattern

이 알고리즘의 기본 개념은 Fig. 4 와 같이 곡면을 일정 구간으로 나누고, 각 구간에서 가속도와 속도를 계산하여 컨트롤러에 전송한다. 그리고, 가속도와 속도는 현재의 이론상 위치와 실제 위치, 이전 속도에 의해 결정한다.

이러한 알고리즘은 연구 사례 발표에 의해 비구면 표면을 추종하는 문제에 있어서 정밀급 시스템으로 서브미크론 레벨의 위치 오차를 얻을 수 있는 것으로 나와있다. 본 연구에서는 공구경로 식(3)을 이 알고리즘에 대입하여 곡선 보간 제어를 실시하였다. 비구면 가공에서 중요한 것은 이론상의 위치와 실제의 오차이므로, 여기서 제어 오차는 공구 중심의 오차로 정의하였고, 실제 위치는 엔코더로 확인하였다.

$$E(z) = z_{encoder} - z_i(x) \quad (8)$$

## 4. 실험 및 결과

### 4.1 실험 방법

제안된 알고리즘은 NC 를 이용한 제어 방법으로는 부적절하므로 PC 기반의 제어시스템을 제작하여 곡선 보간을 실시하였다. 실험장치는 x-z 두 축을 가진 장치로써, x 축은 등속축으로 일정한 속도로 움직이며, z 축은 비구면 공구 경로를 따라 이동하게 하였다. 각 축은 정밀 서보 모터와 보울 스크류에 의해 이동하며, 등속축인 x 축에는 에어 가이드를 설치하여 마찰을 최소화 하였다. 또한, 엔코더를 이용하여 현재 실제로 이동한 위치 값을 피드백을 받아서 보상 속도를 결정하는데 이용하였다. 컨트롤러는 PC 내부 슬롯에 장착하는 타입으로, C 언어로 작성된 프로그램으로 커맨드를 발생시키면 지연이 거의 없이 실시간으로 전달된다. 제어 프로그램은 사용자가 비구면 설계치를 입력하기 쉽도록 VC++로 작성하였다.

실험 대상은 볼록 형태와 오목 형태의 비구면 렌즈 각각 Fig. 1 에 제시된 모델의 경로를 추종하는 것으로 행하여졌고, 위치 오차를 측정하여 알고리

즘의 유효성을 검증하였다. 각각 공구의 반경을 1mm 에서 5mm 까지 변경시켜가며 오차의 추세를 파악하였다.

#### 4.2 실험 결과

실험 결과, 볼록 비구면 렌즈의 경우 최대 오차는 0.5 미크론 정도, 평균 오차 0.1 미크론 정도의 정밀도를 보였으며, 공구 반경이 증가할수록, 정밀도가 증가하는 경향을 보였다. 오목인 경우 최대 오차는 1 미크론 이내였지만, 공구 반경이 증가하면 정밀도가 떨어지는 경향을 보였다. 볼록의 경우 공구 반경이 증가할수록 전체적인 곡선은 완만한 추세를 보이는데, 오목은 급격하기 때문으로 보인다.

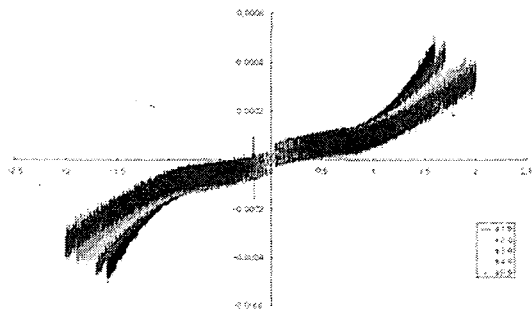


Fig. 5 Position error for convex aspherical lens

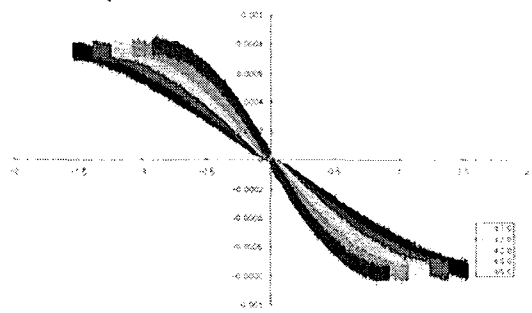


Fig. 6 Position error for concave aspherical lens

### 6. 결론

비구면 가공을 위해 비구면 식으로부터 공구의 경로를 생성하였다. 생성된 경로는 비구면 제어 알고리즘을 적용하여 곡면 제어를 수행하였다. 에어 가이드와 정밀급 부품으로 실험 장치를 제작하였다. 실험에서는 볼록과 오목의 경우에 대하여 공구의 반경을 1mm 에서 5mm 까지 변화시켜 그 추세를 관찰하였다. 그 결과 볼록의 경우 최대 오차 0.5 미크론, 볼록의 경우 1.0 미크론 이내의 정밀도를 얻을 수 있었다.

이러한 결과를 볼 때, 제안된 알고리즘은 비구면 가공에 사용할 수 있는 가능성을 가지고 있음을 알 수 있었다.

### 후 기

본 연구는 산업자원부 주관의 중기거점 신개발 사업의 일부로서 초정밀 비구면 마이크로 렌즈 연삭 연마 시스템 개발의 위탁 과제 내용임을 알립니다.

### 참고문헌

1. 이택민, "초정밀 비구면 가공용 CAM 소프트웨어 개발에 관한 연구," 한국과학기술원 석사학위 논문, pp. 5 - 27, 1996.
2. Chen, M.J., Li, D., and Dong, S., "Research on a large depth-to-diameter ratio ultra-precision aspheric grinding system," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 129, pp. 91 - 95, 2002.
3. HoSang, K., EuiJung, K., and ByungSuk, S., "Diamond turning of large off-axis aspheric mirrors using a fast tool servo with on-machine measurement," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 146 pp. 349 - 353, 2004.
4. Tsunemoto, K., Mohammad, S.S.Z., and Katsuo S., "A new grinding method for aspheric ceramic mirrors," *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 62, pp 387 - 392, 1996.
5. HaoBo, C., ZhiJing, F., Kai, C., and YingWei, W. "Design of a six-axis high precision machine tool and its application in machining aspherical optical mirrors," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 45, pp. 1085 - 1094, 2005.
6. Lei, Z., Tsunemoto, K., Tsuyoshi, K., and Ji, Z., "Investigation into electrorheological fluid-assisted polishing," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. , No. , pp. 1-7, 2005.
7. YungChung, L., ChunMing, C., and ChungYing, W., "A new excimer laser micromachining method for axially symmetric 3D microstructures with continuous surface profiles," *Sensors and Actuators A (physical)*, Vol. 117, pp. 349 - 355, 2005.
8. Rolf, F., Bernd, D., and Frank, H. "Absolute measurement of non-comatic aspheric surface errors," *Optics Communications*, Vol. 161, pp. 106 - 144, 1999
9. HyungTae, K., and HaeJeong, Y. , "Control Algorithm for Aspherical Surface Interpolation Considering with Acceleration," *IEEE Proceeding of AISTA 2004*, pp..., 2004.