

# 비구면 연삭 및 연마를 위한 공구 경로 제어에 관한 연구

김형태\*, 양해정\*\*, 김성철#

## A Study on the Control Method for the Tool Path of Aspherical Surface Grinding and Polishing

Hyung Tae Kim\* and Hae Jeong Yang\*\* and Sung Chul Kim#

### ABSTRACT

This paper proposed the control algorithm for aspheric surface grinding and was verified by the experiment. The functions of the algorithm were simultaneous control of the position and interpolation of the aspheric curve. The non-linear formula of the tool position was derived from the aspheric equations and the shape of the tool. The function was partitioned by an certain interval and the control parameters were calculated at each control section. The movement in a session was interpolated with acceleration and velocity. The position error was feed-backed by rotary encoder. The concept of feedback algorithm was correcting position error by increasing or decreasing the speed. In the experiment, two-axis machine was controlled to track the aspheric surface by the proposed algorithm. The effect of the control and process parameters was monitored. The result showed that the maximum tracking error was under sub-micro level for the concave and convex surfaces.

**Key Words** : Aspherical Lens (비구면 렌즈), Grinding Tool Path (연삭 공구 경로), Surface Polishing(표면 연마), Nonlinear Curvical Interpolation (비선형 곡선 보간), PC-Base System(PC 기반 시스템)

### 기호설명

$x$  = horizontal position of the aspherical surface (mm)

$z$  = vertical position of the aspherical surface(mm)

$x_t$  = horizontal position of a grinding tool (mm)

$z_t$  = vertical position of a grinding tool (mm)

$\Delta x, \Delta z$  = distances between a grinding tool center and contact point (mm)

$\theta$  = contact angle (rad)

$f$  = aspherical surface equation

$R$  = aspherical radius of curvature (mm)

$\kappa, A$  = aspherical coefficients

$D$  = tool diameter (mm)

$v_i$  = velocity of vertical axis at  $i$ -th step (mm/s)

$a_i$  = acceleration of vertical axis at  $i$ -th step (mm/s<sup>2</sup>)

$d_i$  = displacement of vertical axis at  $i$ -th step (mm)

$r$  = acceleration rate constant

$h$  = control step size / interval (sec)

$K_v$  = feedback gain

$E$  = position error (mm)

\* 접수일: 2005년 7월 22일; 게재승인일: 2005년 11월 10일

\* 에이엠테크놀로지 부설 기술 연구소

\*\* 한국산업기술대학교 기계설계공학과

# 에이엠테크놀로지 부설 기술 연구소

## 1. 서론

비구면 렌즈는 수차 보정을 고려한 렌즈로 일반 렌즈에 비해 단위 크기당 성능이 월등하여 제품의 경량화에 매우 유리한 것으로 알려져 있다. 현재 비구면 렌즈가 쓰이는 곳은 디지털 카메라, DVD, 핸드폰 등 일반 전자 제품에서부터, 군사용 관측 장비에 이르기까지 많은 분야에서 사용되고 있다. 그리고 점차 그 영역이 확장되고 있으므로 그 수요도 꾸준히 증가하고 있는 추세이다. 그러나, 높은 가공 정밀도가 요구되고, 비구면 형상의 비선형성 때문에, 가공 조건이 까다롭고 생산 수율도 비교적 낮은 것으로 알려져 있다.

일반적인 곡면 가공은 곡면에 대한 미분 연산 등으로 얻어진 수식을 가지고 전개한다. 그러나, 비구면 수식은 비선형이므로 일반적인 방법으로 전개하기는 다소 무리가 있고, 제어 속도를 고려하여 곡선 보간을 하기도 어려운 점이 있다.

Lee 는 비구면 가공 소프트웨어를 개발하였는데, 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 여기서의 위치 제어에 대한 개념은 서술하였으나, 속도에 관한 사항은 언급되어 있지 않다. Chen 등에 의하면, 기하학적인 관계를 고려하여 예상 위치 오차를 계산하고, 이것을 공구 경로 생성에 반영하는 연삭 시스템을 개발하였으나, 위치 제어 중심으로 되어 있고, 마찬가지로 속도나 가속도에 관한 내용은 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 PC 로 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 제어라

고 할 수 없다. Cheng 등은 비구면 반사경 연삭시 가공량을 결정할 수 있는 수식을 제안하여 서브마이크론 레벨의 가공 정밀도를 얻을 수 있었다.<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 액시머 레이저를 이용하여 연속적인 가공면을 만들어내는데 성공하였다. 진정한 의미의 비구면은 아니지만, 구면과 포물선 형상을 500 $\mu\text{m}$  의 크기로 가공하였으며, Ra 는 2 - 10nm 의 결과를 얻었다.<sup>7</sup>

Yang 은 3 차원 가공을 위한 PC-NC 밀링 머신의 3 축 동시 제어 알고리즘을 제안하였다. 머신의 위치는 분해능에 의해 일정한 간격으로 움직이지만, 곡면은 연속이므로 제어 오차가 발생한다. 이 제어오차를 최소화 하기 위해 곡면을 이산화시키는 방법이 주요 내용이다.<sup>8</sup>

기존의 비구면 가공에 관한 연구는 선형화 방법이나 가공 결과를 가지고 오차 보상 방법에 대한 것이 일반적이다. 이는 수식이 복잡한 문제도 있지만, NC 를 기반으로 하는 시스템에서 동작시키기 위한 이유도 있다. 즉, 아무리 좋은 알고리즘이라도 NC 컨트롤러의 성능을 넘어선다면 사용할 수 없기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 PC 를 기반으로 하는 시스템을 위한 비구면 경로를 생성하고 추종하는 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 비구면 함수를 근거로 하여, 위치 오차를 속도의 변화량, 즉 증속 및 감속으로 바꾸는 방법을 논하고 있다. 그 결과 수식을 상용 시스템에 적용하여 곡면 보간 제어를 수행하였으며, 서브-미크론 이하의 정밀도를 얻을 수 있었다.

## 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)과같이 표현된다. 여기서,  $z$  는 렌즈의 평면 중심으로부터 비구면의 높이,  $x$  는 렌즈의 중심을 기준으로 한쪽 끝에서 다른 쪽 끝의 위치이며,  $R$  은 비구면 렌즈의 곡률 반경,  $k$  와  $A$  는 비구면 계수를 의미한다.<sup>9</sup>

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

Fig. 1 은 실제 렌즈 설계 데이터를 (1)과 같은 비구면 함수에 입력하여 얻은 볼록 렌즈와 오목 렌즈 각각의 형상이다. 이 형상은 이후 실험에서 사용될 렌즈의 표면이기도 하다.

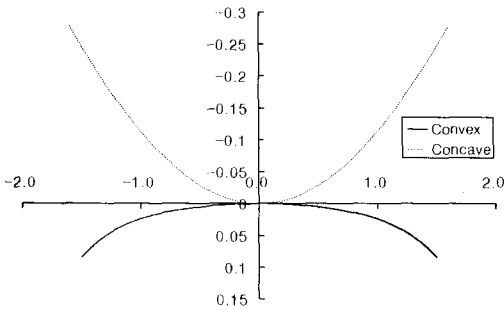


Fig. 1 An example of aspherical surface

## 2.2 공구 경로

일반적인 보간 알고리즘을 생각해보면, 비구면 공식상의 제곱근과 절대값에 관한 항들로 인해 곡선 제어나 보간을 적용하기 어렵다. 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.

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

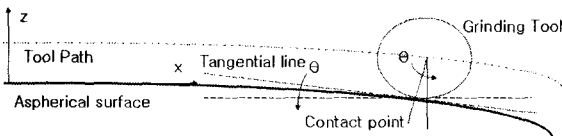


Fig. 2 Contact point and angle on an aspherical surface

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

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

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 미분값은 비구면 표면의 공구 접촉각을 계산 가능하게 만들어 준다. 일반적인 비구면 가공 툴(tool)은 원형의 형상을 가지고 있으므로, 비구면 표면의 접촉각을 알면, Fig. 3 과 같이 접선을 가지고 중심까지의 거리를 계산해 낼 수 있다.

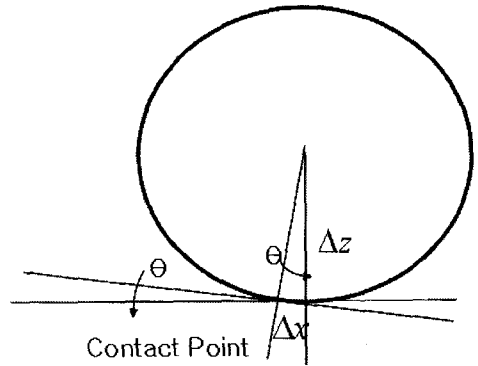


Fig. 3 Contact point and the center of a grinding tool

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

$$x_i = x + \Delta x = x + \frac{D}{2} \sin \theta \quad (5)$$

$$z_i = z - \Delta z = z - \frac{D}{2} \cos \theta \quad (6)$$

### 3. 제어 알고리즘

비구면 가공에서 일반적인 제어 개념은 초정밀 위치 제어를 기반으로 한다. 즉, 공구의 위치를 계산하여 매 스텝마다 그 위치로 정확히 이동하여 추종하는 방법이다. 이 방법은 NC 코드로 표현하기 쉬운 장점이 있으나, 연속적인 곡면을 만들기 위해서는 구간을 잘게 나누어야 하는 단점이 있다. 곡면을 연속 가공하기 위해서는 곡면의 위치와 함께 연속적인 속도 변화도 필요하다. 여기서의 제어 알고리즘이란 이상적인 속도를 계산하고, 위치 오차를 검출한 다음, 이상적인 속도보다 증속 및 감속하여 오차를 보정하는 방법이다.

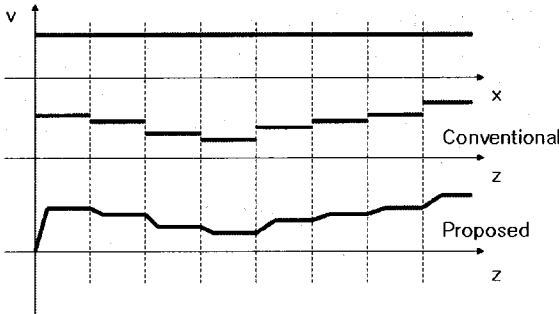


Fig. 4 Comparison of velocity profile

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 결정된다.

곡면의 한 구간  $h$  에서  $t_a$  를 가속 구간이라고 한다면, 가속구간은 구간의 폭에 가속율  $r$  을 곱하여 계산할 수 있다.

$$t_a = hr \tag{7}$$

한 구간의 곡면방향  $z$  의 이동거리를  $d_i$ , 속도와 가속도를 각각  $v_i$ ,  $a_i$  라고 할 때, 이동 거리는 시간, 속도, 가속도로 나타낼 수 있으므로, 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$d_i = \frac{1}{2} a_i t_a^2 + v_i (h - t_a) \tag{8}$$

또한, 한 구간에서 이동거리는 비구면 함수를 이용하여 다음 구간의 위치와 차이로 나타낼 수 있다.

$$d_i = f(x_{i+1}) - f(x_i) \tag{9}$$

그러므로, 한 구간에서의 가속도는 식(7), (8), (9)로부터 계산하면 식(10)과 같이 표현된다.

$$a_i = 2 \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i) - v_i h (1-r)}{h^2 r^2} \tag{10}$$

한편, 구간에서 가속 완료 후, 목표 속도는 이전 구간의 속도와 가속시간으로 나타낼 수 있다.

$$v_i = a_i hr + v_{i-1} \tag{11}$$

이상적인 경우라면 설계 데이터로부터 계산된 위치, 속도, 가속도를 입력하면 원하는 형상을 가공할 수 있지만, 실제로는 가공 부하나 축 자체의 마찰 등에 의해 오차가 발생한다. 따라서 본 연구에서는 위치 오차를 다음과 같이 속도를 계산하는 항에 입력하도록 항을 추가하였다.

$$v_i = a_i hr + v_{i-1} + K_v [f(x_i) - z] \tag{12}$$

이러한 알고리즘은 연구 사례 발표에 의해 비구면 표면을 추종하는 문제에 있어서 정밀급 시스템으로 서브-미크론 레벨의 위치 오차를 얻을 수 있는 것으로 보고되어 있다.<sup>10</sup> 본 연구에서는 공구 경로 식(3)을 이 알고리즘에 대입하여 곡선 보간 제어를 실시하였다. 비구면 가공에서 중요한 것은 이론상의 위치와 실제 가공 위치 사이의 오차이므로, 여기서 제어 오차는 공구 중심의 오차로 정의하였고, 축상의 현재 위치는 엔코더로 확인하였다.

$$E(z) = z_{encoder} - z_t(x) \tag{13}$$

### 4. 실험 및 결과

#### 4.1 실험 장치

실험장치는 x-z 두 축을 가진 장치로써, x 축은 등속축으로 가공이 시작되면 일정한 속도로 움직

이도록 PC 에서 지령을 내렸다. z 축은 변속축으로 PC 컨트롤러에서 나오는 신호에 의해 속도가 계속 해서 변하게 된다. 그리고, 두 축의 상대 운동으로 비구면 공구 경로가 나타나게 된다. 각 축은 정밀 서보 모터와 보울 스크류에 의해 이송하며, 등속축 인 x 축에는 에어 가이드를 설치하여 마찰을 최소화 하였다. 또한, 엔코더를 설치하여 실제로 이동한 위치 값을 피드백을 받아서 보상 속도를 결정 하는데 사용하였다.

비구면 가공에서 절삭 부하는 매우 적고, 실험에서 설정된 feed-rate 도 일반가공에 비해 저속이다. 가공의 방향은 x 는 단방향, z 는 1 회 왕복을 하지만 점진적인 감/가속을 하므로 감가속 충격은 거의 없다. 그리고, Ball-Screw 와 LM 도 정밀급이고 가공 거리가 최대 5mm, 실험에서는 2mm 의 작은 구간이다. 축의 이송 정밀도를 측정해본 결과도 엔코더 신호와 비교하여 꽤 신뢰할 수 있는 수준이므로 엔코더와 접촉점 간의 오차는 없는 것으로 가정하였다.

컨트롤러는 PC 내부 슬롯에 장착하는 타입으로, C 언어로 작성된 프로그램으로 커맨드를 발생시키면 지연이 거의 없이 모터로 실시간으로 전달된다. 그리고, 가속도와 속도의 변화가 제어중 적용되는 기능이 있다. 제어 프로그램은 사용자가 비구면 설계치를 입력하기 쉽도록 VC++로 작성하였다

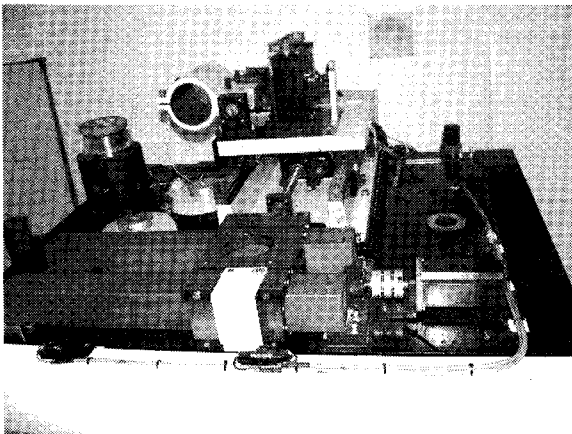


Fig. 5 Photo of the experiment system

4.2 실험 방법

구동 프로그램을 실행하여 비구면 계수를 입력 하고, 공구 직경, feed-rate, 가공 시작점 등 가공 파

라미터를 입력한다. 프로그램은 공식에 의해 각 가공점 들에 대한 이론적인 위치와 속도, 가속도를 미리 계산하여 메모리에 저장해 놓고, 가공 진행중 각각의 가공점에서 위치오차를 측정하여 알고리즘에 의해 속도를 수정하여 적용하였다.

실험 대상은 볼록 형태와 오목 형태의 비구면 렌즈 각각 Fig. 1 에 제시된 모델의 경로를 추종하는 동시에 위치 오차를 측정하여 알고리즘의 유효성을 검증하였다.

먼저, 제어 파라미터의 영향을 살펴보기 위해서 분할 구간의 길이, 가속 구간 비율, 피드 속도, 제어 상수 등을 변경시켜서 비구면 형상을 추종시켰다. 그리고, 적절한 파라미터 값을 설정한 다음, 가상 공구의 반경을 1mm 에서 5mm 까지 변경시켜가며 위치 오차의 경향을 파악하였다. 여기서 가상 공구의 반경이란 가상적으로 공구 반경을 변경한 것으로, 수치적으로 변화된 공구 경로에 대한 시스템의 제어 오차를 실험에서 관찰하였다.

실험에서 사용한 시스템의 제원 및 렌즈의 사양은 Table 1 과 같다.

Table 1 Specification of experiment

	Contents	Axis/Param	Value
machine	Resolution	X	0.2 $\mu$ m
		Z	0.1 $\mu$ m
	Accuracy	X	1.0 $\mu$ m
		Z	0.1 $\mu$ m
	Backlash	X	1.0 $\mu$ m
		Z	0 $\mu$ m
Lens	Convex	Diameter	1.5mm
		Height	84.05 $\mu$ m
		R	22.405
		k	43.098
	Concave	Diameter	1.6mm
		Height	279.19 $\mu$ m
		R	-4.254
		k	-3.359

5. 결과 및 고찰

5.1 제어 파라미터의 영향

제어 간격 h 를 0.002 에서 0.1 까지 변화시켰을

경우의 결과는 Fig. 6, Fig. 7 과 같다. 블록 및 오목의 두 결과 모두 렌즈 양단에서 오차가 증가함을 알 수 있다. 제어 간격을 줄일수록, 평균 오차가 감소하는 것을 알 수 있으나, 제어 간격을 너무 많이 줄이면, 데이터의 양이 기하급수 적으로 증가하므로 처리 속도가 저하되는 원인이 된다.

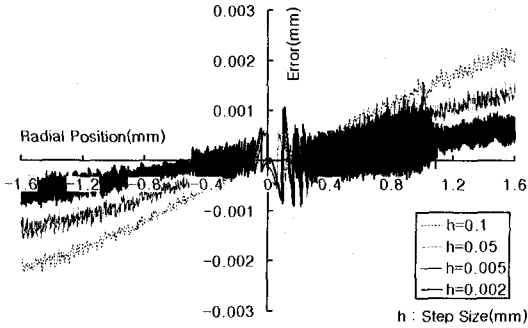


Fig. 6 Error variation by step size for the convex

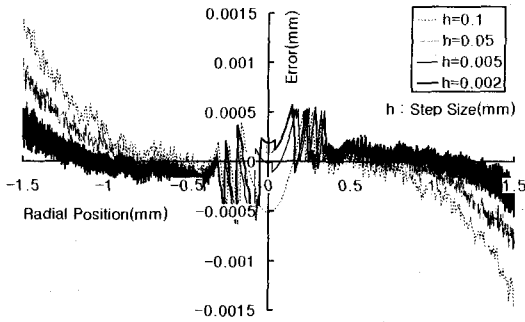


Fig. 7 Error variation by step size for the concave

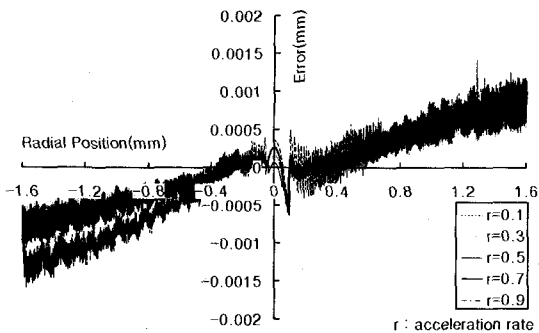


Fig. 8 Error variation by acceleration rate for the convex

Fig. 8 과 Fig. 9 는 가속율  $r$  을 0.1 에서 0.9 까지 변화시켰을 때의 결과이다. 각각 가속율이 큰 경우 오차가 커졌지만, 0.1 에서 0.7 사이에서는 거의 차이가 없었다. 그러나, 이 파라미터는 곡면의 매끄러운 정도를 정의하기 때문에 너무 작아지면 시스템의 움직임이 부자연스러워 질 수도 있다.

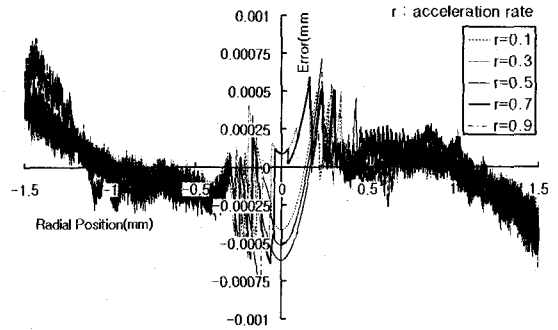


Fig. 9 Error variation by acceleration rate for the concave

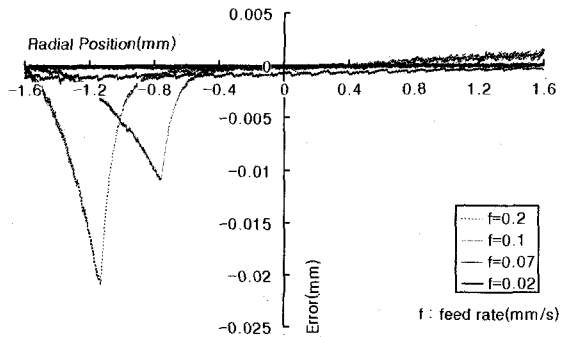


Fig. 10 Error variation by feed rate for the convex

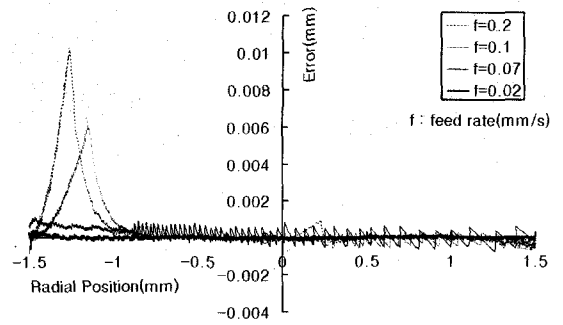


Fig. 11 Error variation by feed rate for the concave

비구면 가공에서 x 축은 등속 운동을 하지만, z 축은 x 축의 움직임을 보고 적절히 속도 조절을 하므로, 반응성이 떨어질 수 밖에 없다. 따라서, 속도를 올리면, 생산성은 올라가지만, 추종성은 떨어지게 된다. Fig. 10 과 11 에서 보이듯이 이러한 경향은 convex 와 concave 양쪽 모두 나타났다.

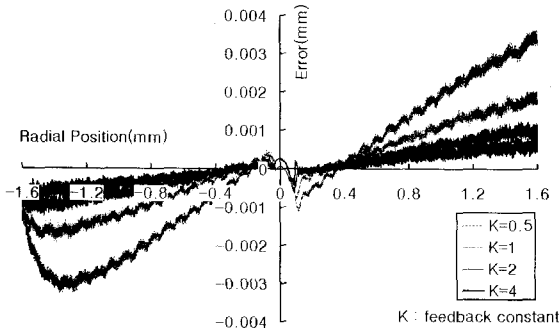


Fig. 12 Error variation by feedback const. for the convex

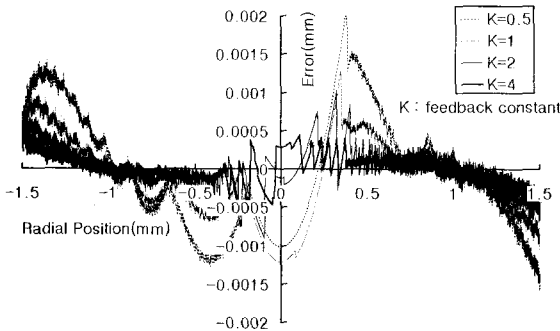


Fig. 13 Error variation by feedback const. for the concave

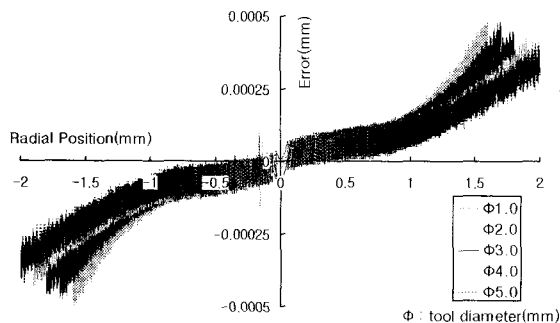


Fig. 14 Error variation of tool path for the convex

Fig. 12 와 Fig. 13 은 알고리즘의 속도 보정을 위한 제어 상수를 0.5 에서 4.0 까지 변화시켰을 때 나타나는 변화이다. 그 결과, 상수가 클수록 제어 오차가 감소하는 경향을 보였다. 그러나, 제어 상수를 너무 높이면 시스템이 불안해지거나, 조그만 외란에도 위치값이 튀는 현상을 보이게 된다.

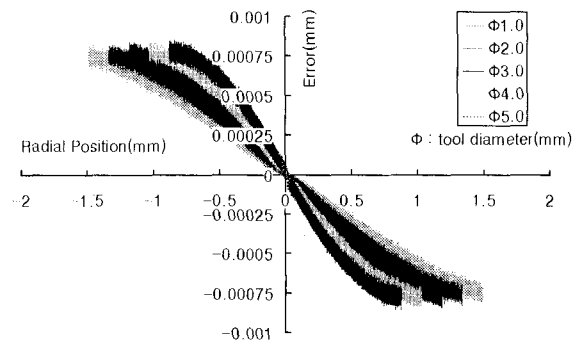


Fig. 15 Error variation of tool path for the concave

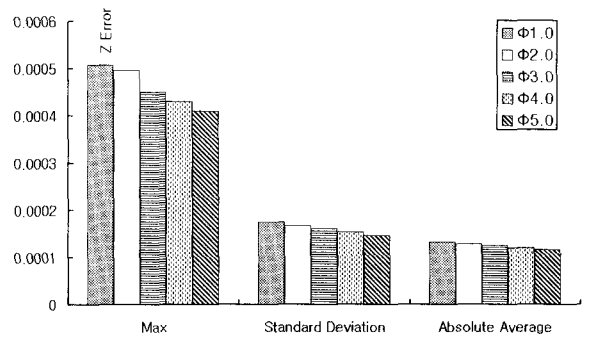


Fig. 16 Error variation by diameter for the convex

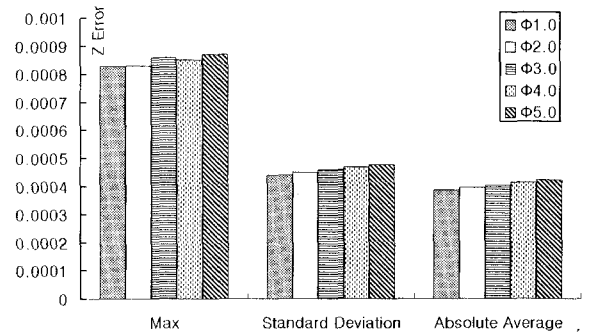


Fig. 17 Error variation by diameter for the concave

## 5.2 공구 반경의 영향

가상 공구 반경  $D$  를 1.0mm 에서 5.0mm 까지 증가시킨 경우, 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 급격해지기 때문으로 보인다.

Fig. 16 및 Fig. 17 은 비구면 가공 중 제어계의 최대 오차와 평균 오차, 표준 편차를 보여주고 있다. convex 의 경우는 공구 반경의 증가에 따라 3 개의 수치가 모두 감소함을 알 수 있다. 그러나, concave 의 경우는 반대의 경향으로 나타나고 있다. 따라서, convex 인 경우는 tool 이 클수록 유리하지만, concave 는 불리하다는 사실을 알 수 있다. 최대 오차는 두 경우 모두 1 미크론 이하로 나타났다.

## 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 근거로 제안된 알고리즘은 비구면 가공에 사용할 수 있음을 알 수 있었다.

## 참고문헌

1. Lee, T. M., "A Study on the Development of CAM Software for Ultra-precision Aspheric Surface," Thesis on M. S. degree in KAIST, 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, No. 1-3, pp. 91 - 95, 2002.
3. Kim, H. S., Kim, E. J. and Song, B. 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, No. 3, pp. 349 - 353, 2004.
4. Tsunemoto, K. G., Mohammad, S.S.Z. and Katsuo, S. J., "A new grinding method for aspheric ceramic mirrors," Journal of Material Processing Technology, Vol. 62, No. 4, pp. 387 - 392, 1996.
5. Cheng, H. B., Feng, Z. J., Cheng, K. and Wang, Y. 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, No. 9, pp. 1085 - 1094, 2005.
6. Lei, Z., Tsunemoto, K. G., Tsuyoshi, K. T. and Ji, Z., "Investigation into electrorheological fluid-assisted polishing," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 45, No. 12-13, pp. 1461-1467, 2005.
7. Lee, Y. C., Chen, C. M. and Wu, C. Y., "A new excimer laser micromachining method for axially symmetric 3D microstructures with continuous surface profiles," Sensors and Actuators A (physical), Vol. 117, No. 2, pp. 349 - 355, 2005.
8. Yang, M. Y. and Hong, W. P., "A PC-NC Milling Machine with new simultaneous 3-Axis Control Algorithm," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 41, No. 4, pp. 555-566, 2001.
9. Kim, H. T. and Yang, H. J., "Tool Path Control Algorithm for Aspherical Surface Grinding," Proceedings of the KSPE Spring Conference, pp. 52, 2005.
10. Kim, H. T. and Yang, H. J., "Control Algorithm for Aspherical Surface Interpolation Considering with Acceleration," Proceeding of AISTA'04 (Advances in Intelligent Systems - Theory and Application), 2004.