

고속의 비선형 윤곽가공을 위한 적응 교차축 연동제어

이용석*, 지성철**

Adaptive Cross-Coupling Control for High-Speed Nonlinear Contour Machining

Yongseok Lee* and Sungchul Jee**

ABSTRACT

In this paper, a new adaptive cross-coupling control (CCC) method with an improved contour error model is proposed to maintain contouring precision in high-speed nonlinear contour machining. The proposed method utilizes variable controller gains based on the instantaneous curvature of a contour and the feedrate command. The proposed method is evaluated and compared with the conventional CCC for nonlinear contouring motion through computer simulations. The simulation results show that the proposed CCC improves the contouring accuracy more effectively than the existing method.

Key Words : CNC(컴퓨터 수치제어), Machine Tool(공작기계), Contour Error(윤곽오차), Cross-Coupling Controller(교차축 연동제어기)

1. 서론

오늘날 대부분의 제조산업 현장에서는 제품의 정밀도 향상과 생산성 증가에 대한 필요성이 커지면서 공작기계의 컴퓨터 수치제어(CNC) 시스템에 대한 관심이 집중되어 왔으며, 고도의 가공정밀도를 제공하기 위해 정교한 서보제어 알고리즘이 지속적으로 개발되고 있다. 특히 교차축 연동제어기(cross-coupling controller)는 기준윤곽과 실제윤곽의 거리인 윤곽오차(contour error)를 감소시키는 데 효율적인 제어기로 인정받았다. 그러나 실제 생산공

정에서는 정밀도와 더불어 생산성 향상도 중요한 과제이다. 따라서 가공시간과 직접 관련되어 있는 이송속도 제어에도 관심을 기울이게 되었다. 그러나 정밀도와 생산성은 서로 상반된 성격을 지니고 있어서, 생산성을 향상시키려면 이송속도를 증가시켜야 하지만 그에 따른 윤곽오차의 증가로 정밀도는 저하된다.

Koren⁽¹⁾에 의해 처음 교차축 연동제어가 제안된 이래 현재까지 여러 방법들이 제시되었는데, Kulkarni와 Srinivasan⁽²⁾은 윤곽오차의 개선을 위해 성능평가지수에 윤곽오차를 반영함으로써 최적제

* 단국대학교 대학원 기계공학과

** 단국대학교 기계공학과

어 방식에 의한 윤곽오차 제어기를 설계하였다. 다양한 성능평가지수를 정의하였으며 적절하게 선택된 성능평가지수에 따라 효과적으로 제어기를 설계하기 위해 확장된 상태 방정식을 사용하였다. 그러나 현재 시점의 기준점적의 순간 기울기 정보만을 사용함으로써 실제 윤곽오차와는 다소 거리가 있는 윤곽오차 모델을 제시하였다. 기존의 윤곽오차 모델 중에서 가장 정교한 방법의 하나인 Koren 과 Lo⁽³⁾의 모델에서는 원하는 윤곽상의 순간 기준점에 접하는 원의 곡률반경을 계산하여 윤곽오차를 근사적으로 구하였다. 이 모델에서는 첫째, 윤곽오차가 원하는 공구 궤적의 각 기준점에서의 순간 접선방향으로의 추적 뒤짐오차(tracking lag error)에 비해 매우 작고, 둘째, 접선방향의 추적 뒤짐오차가 기준점에서의 순간 곡률반경에 비해 현저히 작다는 가정을 사용하였다. 그러나, 이 모델은 윤곽의 곡률이 큰 경우, 특히 고속의 이송속도에서 적합하지 않게 된다. 또한 Chuang 과 Liu⁽⁴⁾는 가공속도를 증가시키기 위해 이송속도와 윤곽오차의 관계를 선형 관계식으로 놓고 적응제어기법을 통해 이송속도를 제어하려 했으나 실제로 이들의 관계는 매우 비선형적이므로 실제 시스템에는 적용하기가 어렵다.

이로써 기존의 교차축 연동제어기 방법들은 이용 가능한 과거의 기준점적에 대한 정보를 전혀 사용하지 않고, 현재 순간의 기준점적과 실제궤적에 대한 정보만을 사용함으로써 실제 윤곽오차와는 다소 거리가 있는 근사적인 윤곽오차를 찾고자 하였다. 또한, 기존의 방법들은 여러 이송속도 조건과 가공 중에 계속적으로 변화하는 윤곽 곡률에 대해 고정된 제어기 계인을 적용함으로써 고속의 비선형 윤곽가공에서 윤곽정밀도를 유지할 수 없다.

이와 같은 단점들을 해결하기 위해 본 연구에서는 (i)개선된 윤곽오차 모델과 (ii)윤곽의 곡률 및 이송속도 변화에 따라 가변 계인을 적용하는 적응 교차축 연동제어 알고리즘을 개발하여 고속가공에서 극히 중요한 과도상태의 윤곽추적 성능을 개선하고자 한다. 본 연구에서 제시된 윤곽오차 모델에서는, 임의의 비선형 윤곽가공시 인터폴레이터(interpolator)의 출력 중 실제 공구 위치에서 가장 가까운 윤곽 위의 세 기준점을 매 샘플링 시간마다 찾아 가변 윈도우에 저장하고 이 점들을 지나는 원을 이용하여 보다 정확한 윤곽오차를 구

할 수 있다.

본 연구에서 제시된 교차축 연동제어 알고리즘은 CNC 동작기계의 XY 서보축을 대상으로 비선형 윤곽추적에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 그 타당성이 검증되었다.

2. 제시된 윤곽오차 모델링 방법

교차축 연동제어기는 정확한 윤곽오차 모델을 선택하고 제어 기법이 효율적일 때 높은 윤곽 정확도를 얻을 수 있다. 정확한 윤곽오차 계산을 위해 본 연구에서 새로이 제시된 윤곽오차 모델을 Fig. 1 에 나타내었다.

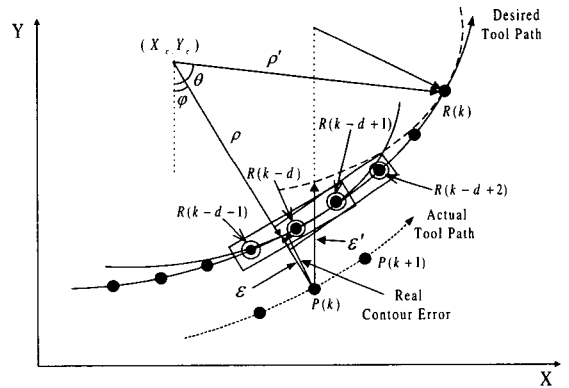


Fig. 1 The proposed contour error model

CNC 동작기계의 이송 시스템에는 위치 뒤짐(position lag)이 존재하므로, 항상 기준점적의 현재 위치인 $R(k)$ 보다 뒤진 위치인 $P(k)$ 가 현재의 실제 위치가 된다. 이때 뒤진 시간단계(time step)의 수를 d 라 하면 $P(k)$ 에서의 거리가 가장 짧은 기준점 위의 세 점은 각각 $R(k-d-1)$, $R(k-d)$ 와 $R(k-d+1)$ 이다. 따라서 제안한 윤곽오차 모델에서 윤곽오차 ϵ 은 이 세 점을 지나는 원과 $P(k)$ 사이의 거리로써 정의할 수 있다. 즉, 윤곽오차는 다음 식으로 계산되어진다.

$$\epsilon = \sqrt{(P_x - X_c)^2 + (P_y - Y_c)^2} - \rho \quad (1)$$

여기서, ρ 는 실제의 공구위치에 가장 근접한 기준윤곽의 순간 곡률반경으로서 위의 세 점을 지나는 원의 반경에 해당된다. 또한 (X_c, Y_c) 는 매 순

간 이 원의 중심좌표이며, P_x 와 P_y 는 각각 X 와 Y 축 방향의 실제 공구위치이다.

실제 공구위치에서 가장 가까운 기준좌적 위의 세 점을 계속적으로 찾아 매 샘플링 시간 마다 갱신되는 가변 윈도우 $W(k)$ 에 저장시킨다. 다음 순간의 실제 위치를 $P(k+1)$ 이라 하면, Fig. 1 에 나타낸 바와 같이 $P(k+1)$ 로부터, $W(k)$ 내의 세 점 중 가운데 점인 $R(k-d)$ 과 끝점인 $R(k-d+1)$ 각각에 이르는 거리를 비교하여 새로운 윈도우의 세 점을 결정한다. 즉, 새로이 움직여진 공구의 위치를 기준으로 하여 전 단계 윈도우의 세 점이 여전히 기준좌적 위의 최근접점인지의 여부를 판단하여 윈도우를 이동시킬 것인지를 결정하게 된다. 이와 같이 윈도우를 계속적으로 새로이 정의함으로써 계산 양을 최소화하고 실행 시간을 줄일 수 있으며, 이는 다음의 조건식으로 표현된다.

If $|P(k+1) - R(k-d+1)| < |P(k+1) - R(k-d)|$,
 then
 $W(k+1) = \{R(k-d), R(k-d+1), R(k-d+2)\}$ (2)
 else
 $W(k+1) = W(k)$

3. 제시된 교차축 연동제어기

3.1 제시된 교차축 연동제어기의 구조

산업현장에서 실제로 사용되는 CNC 공작기계의 일반적인 서보 제어기는 각각의 구동축에 대해 독립적으로 설계되어진다. 이에 비해 교차축 연동 제어기는 구동축들을 상호 연관시켜 윤곽 정밀도를 향상시킬 수 있다. 본 연구에서 제시하는 비선형 고속 윤곽가공에 적합한 새로운 형태의 적응 교차축 연동제어의 구조를 Fig. 2 에 도시하였다. Fig. 2 에서 R_x 와 R_y 는 각 축방향의 기준위치이고, K_{Px} 와 K_{Py} 는 각 축의 비례 제어기 게인이며, D_x 와 D_y 는 부하 외란을 나타낸다. 제시된 교차축 연동제어기는 전술한 윤곽오차 모델 값을 입력으로 하는 PID 제어방법을 사용하며, 다음의 식으로 표현된다.

$$W(z) = W_p + W_i \frac{Tz}{z-1} + W_d \frac{z-1}{Tz} \quad (3)$$

여기서 W_p , W_i 와 W_d 는 각각 비례, 적분, 미분

게인이다. 교차축 연동제어기의 출력인 윤곽 법선 방향의 제어명령에 다음과 같은 가변 게인이 곱해져 각각 X 와 Y 축 방향의 보정명령으로 분해된다.

$$G_x = \frac{P_x - X_c}{\rho + \varepsilon} = \sin \varphi \quad (4)$$

$$G_y = \frac{Y_c - P_y}{\rho + \varepsilon} = \cos \varphi \quad (5)$$

여기서 φ 는 Fig. 1 에서 보인 바와 같이 실제 공구위치로부터 가장 가까운 기준좌적의 세 점을 근사화 한 원의 중심점에 이르는 벡터의 각도를 의미한다.

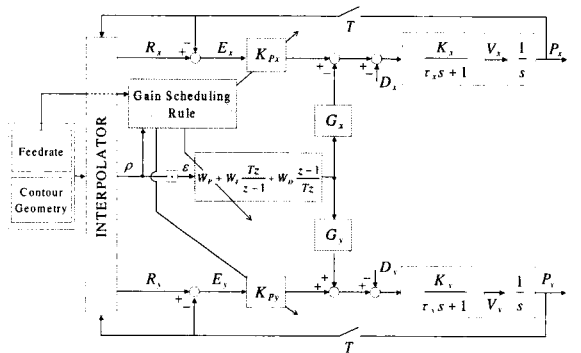


Fig. 2 The proposed adaptive cross-coupling controller

3.2 제시된 시스템의 안정성 해석 및 게인 동조법칙

제시된 윤곽오차 모델은 비선형이므로 식(1)의 윤곽오차를 Taylor 급수로 전개하여 제시된 교차축 연동제어 시스템의 안정성 해석에 적용하였으며, 이는 다음 식으로 표현된다.

$$\varepsilon = (-\cos \theta + \frac{\sin^2 \theta}{2\rho'}) E_x + (\sin \theta + \frac{\cos^2 \theta}{2\rho'}) E_y \quad (6)$$

$$+ (\rho' - \rho) + \text{H.O.T.}$$

여기서 θ 와 ρ' 은 Fig. 1 에 나타낸 바와 같다. 식 (6)에서 교차항을 무시하여 전체 시스템의 특성방정식을 구하면 다음과 같다⁽⁵⁾.

$$P(z) = [(z-1)(z-r) + K_p(h_1z + h_0)] \times [(z-1)(z-r) + \{K_p + (G_y B - G_x A)W(z)\} \times (h_1z + h_0)] = 0 \quad (7)$$

여기서,

$$\begin{aligned}
 r &= e^{-T/\tau} \\
 h_0 &= K(\tau - \tau - Tr) \\
 h_1 &= K(T - \tau + \tau r) \\
 A &= -\cos\theta + \frac{\sin^2\theta}{2\rho'} E_x \\
 B &= \sin\theta + \frac{\cos^2\theta}{2\rho'} E_y.
 \end{aligned}$$

식(7)에서 교차축 연동제어기 즉, $W(z)$ 의 적분과 미분계인을 일정한 값(본 연구에서는 $W_i = 60$, $W_D = 0.2$)으로 설정하고 시스템 파라미터 값들(본 연구에서는 $T = 0.01$, $\tau = 0.055$, $K = 28.3$)을 대입하여 Jury의 안정성 테스트⁽⁶⁾를 이용하면 제시된 시스템이 안정한 K_p 와 W_p 의 범위를 구할 수 있다. 본 연구의 경우 안정한 계인의 범위는 다음의 식과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned}
 K_p &< 7.2757 \\
 |18.1014 - W_p| &> K_p
 \end{aligned} \tag{8}$$

식(8)의 경계를 Fig. 3에 실선으로 표시하였으며, 점선은 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 얻은 윤곽오차가 수렴하는 계인의 경계를 나타낸다. 그림에서 보듯이 이론적 해석과 시뮬레이션의 결과가 유사함을 알 수 있으며, 두 경계의 차이는 안정성 해석에서 윤곽오차를 근사화 한 데 기인한다고 판단된다.

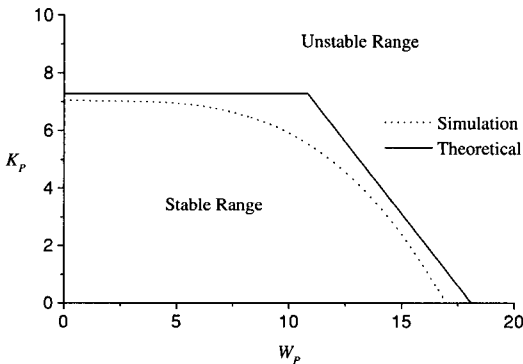


Fig. 3 Stable range for the controller gains

3.1 절에서 설명한 기본구조 위에 윤곽의 곡률과 이송속도에 따라 제어기 계인을 자동으로 조정

해 주는 적응 알고리즘을 추가하였다. 즉, 윤곽 정확도를 유지하기 위해 축방향 제어기의 게인 K_p 와 연동제어기의 비례계인 W_p 를 공구의 위치로부터 근접한 윤곽의 순간 곡률반경 ρ 와 이송속도 V 의 함수로 정의하여 이 두 변수를 바탕으로 하는 계인 동조법칙을 설정하였다.

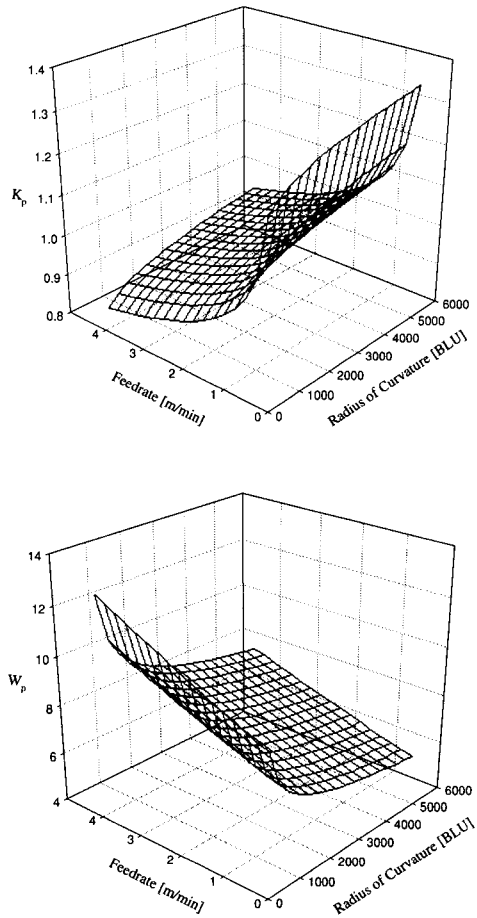


Fig. 4 Relationship between the gains for circular motion with various radii and feedrates

이 법칙은, 위에서 수행한 시스템의 안정성 해석을 통해 얻은 계인 K_p 와 W_p 의 안정한 범위 (Fig. 3의 공통범위) 내에서, 여러 가지 반경 및 이송속도를 갖는 원형 윤곽운동의 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 각각의 경우에 대해 윤곽오차를 최소로 하는 두 계인 값을 구하여 결정하였다. 이는

아래의 식(8)로 나타낼 수 있으며, Fig. 4 에 나타낸 바와 같이 곡률과 이송속도가 클수록 윤곽오차가 커지므로 이 경우에 윤곽 법선방향으로의 제어 명령을 상대적으로 키우기 위해 K_p 는 줄이고, W_p 는 증가시키는 원리로 구성되었다.

$$\begin{aligned} K_p &= 0.0052\rho^{0.403} + 0.950/V^{0.104} \\ W_p &= (1.287V^{1.110} + 16.4126)/\rho^{0.118} \end{aligned} \quad (9)$$

4. 컴퓨터 시뮬레이션

본 연구에서 제시된 윤곽오차 모델 및 적응 교차축 연동제어 방법의 타당성을 검증하기 위해 CNC 공작기계의 XY 서보축 모델을 바탕으로 인터플레이터와 제어시스템에 대한 프로그램을 C 언어로 작성하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 쓰인 파라미터들은 실제 시스템과 유사한 값을 갖도록 하였으며, 그 구체적인 값은 Table 1 과 같다. 또한 실제 시스템에 접근하기 위하여 시뮬레이션에서 각 축의 개회로 게인 K 와 시상수 τ 에 $\pm 5\%$ 의 불규칙 변동을 주었으며, 각 축의 모델에 비선형 마찰 외란⁽⁷⁾을 속도의 함수로 프로그램에 포함시켰다.

Table 1 System parameters used in the simulations

Parameters	Symbol (unit)	X-axis	Y-axis
Time Constant	τ (msec)	55	56
Open-loop Gain	K (sec ⁻¹)	28.3	28.9
Sampling Time	T (msec)	10	

우선 제시된 윤곽오차 모델의 정확성을 확인하기 위하여 실제 윤곽오차에 대한 차이를 기존의 방법과 대비하였다. 또한, 교차축 연동제어기의 게인을 고정시켰을 경우와 이송속도 및 곡률반경의 관계에 의해 연동제어기의 비례 게인(W_p)과 각 축의 제어기 게인(K_p)을 변화시키는 제시된 방법의 윤곽정밀도를 비교하였다. 윤곽오차는 기본 길이단위(basic-length unit: BLU)로 표시하였으며, 본 연구의 경우 1 BLU를 0.01 mm로 하였다.

4.1 기존 윤곽오차 모델과의 비교

Fig. 5 는 $y = 0.005x^2$ 의 포물선 윤곽을 나타낸

다. 이 윤곽에 대해 4 m/min의 이송속도로 공작기계 테이블을 움직일 경우에, 제안한 윤곽오차 모델을 기존의 방법과 비교하였다. 두 경우 모두 교차축 연동제어기 게인과 축 제어기 게인은 같은 값(즉, $W_p = 8$, $W_l = 60$, $W_D = 0.2$, $K_p = 1$)으로 설정하였다.

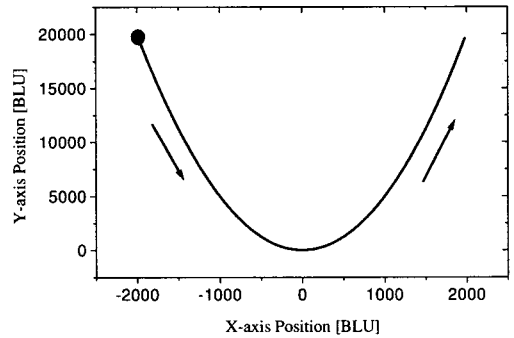
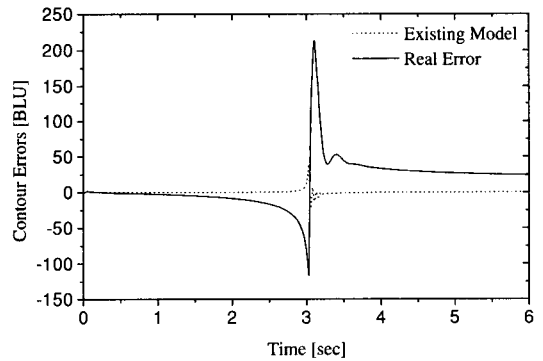
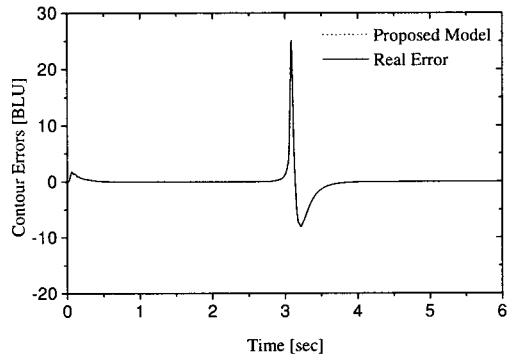


Fig. 5 Parabolic contour



(a)



(b)

Fig. 6 Comparison of contour error models:

(a) Koren and Lo's model; (b) proposed model

기존의 방법은 실제의 윤곽오차와 큰 차이를 보여서 부정확한 윤곽오차 값으로 시스템이 제어됨으로 인해 Fig. 6(a)에 나타난 바와 같이 윤곽정확도가 상당히 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 특히 포물선의 꼭지점에서는 곡률반경이 100 BLU 정도로서 매우 작기 때문에 이 부근에서 윤곽오차는 허용수준을 넘게 된다. 반면에 제안한 윤곽오차 모델은 Fig. 6(b)에서 볼 수 있듯이 실제 윤곽오차와 거의 일치함을 알 수 있다.

4.2 제시된 적응 제어기와 고정 게인 제어기 및 기존 제어기의 윤곽오차 비교

제안한 윤곽오차 모델을 기반으로 보다 향상된 윤곽정밀도에 접근하기 위해 연동제어기 및 축 제어기의 비례 게인을 식(9)와 같이 이송속도와 곡률반경의 함수로 정의하여 변화하는 가공조건에 적응하도록 하였다. 포물선 윤곽에 대해 제시된 적응 교차축 연동제어기의 윤곽추적 성능을, 제시된 윤곽오차 모델을 사용하되 고정된 게인을 갖는 교차축 연동제어기의 성능과 비교하였으며, 또한 아르키메데스 곡선(Archimedes curve)⁽⁸⁾ 윤곽에 대해 이 두 방법을 Koren 과 Lo⁽³⁾의 방법과 비교하였다.

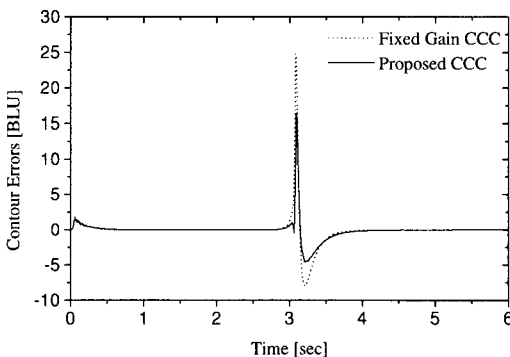


Fig. 7 Comparison of contour errors of the fixed gain and adaptive CCCs for parabolic motion

Fig. 7은 Fig. 5의 포물선 윤곽에 대한 시뮬레이션 결과로서 고정된 게인의 방법에 비해 이송속도와 곡률반경을 바탕으로 한 적응 제어기의 윤곽오차가 작음을 볼 수 있다. 또한, Fig. 8의 아르키메데스 윤곽에 대해 Fig. 9의 결과와 같이 제시된

교차축 연동제어기의 윤곽오차가 고정된 게인의 제어기에 비해 작게 되며, 실제 윤곽가공 시 절삭력 제어를 위해 이송속도를 실시간 조정하는 경우에 그 차이는 더 커질 수 있다고 판단된다. 그리고, 제시된 방법은 기존의 방법(Fig. 9(a) 참조)과 비교해 최고 40 배 이상 윤곽오차를 감소시킬 수 있음을 알 수 있다(실제로 기존의 방법으로는 오목한 부분에서 윤곽추적이 안됨). 서론에서 언급하였듯이, 이는 곡률이 큰 윤곽에 대해 고속의 이송속도에서 부정확한 기존의 윤곽오차 모델에 비해 제시된 윤곽오차 모델의 정확도가 극히 우수함에 기인한다. 그 외의 여러 비선형 윤곽과 이송속도에 대해서도 위의 방법들 중 제시된 방법의 윤곽정밀도가 가장 뛰어난을 확인하였다.

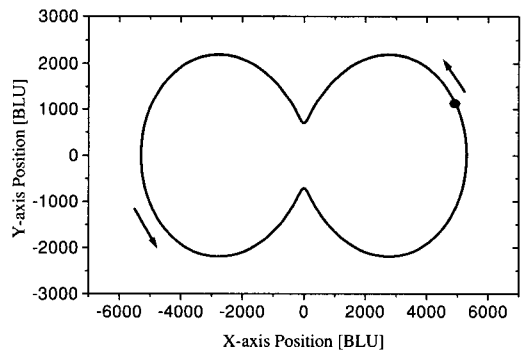


Fig. 8 Archimedes curve

5. 결론

본 연구에서는 보다 정밀한 고속의 비선형 윤곽가공을 위하여 기존의 교차축 연동제어기의 단점을 보완한 새로운 방식의 적응 교차축 연동제어기를 제안하였다. 기존의 방법은 부정확한 윤곽오차 모델과 다양한 이송속도 및 윤곽형태에 대해 고정된 게인을 사용함으로써 고속의 비선형 윤곽가공에서 충분한 정밀도를 제공하지 못하였으나, 제시된 방법은 이송속도와 윤곽의 곡률 변화에 따라 가변 게인을 효과적으로 적용함으로써 기존의 교차축 연동제어방법 보다 윤곽추적 성능이 우수함을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

참고문헌

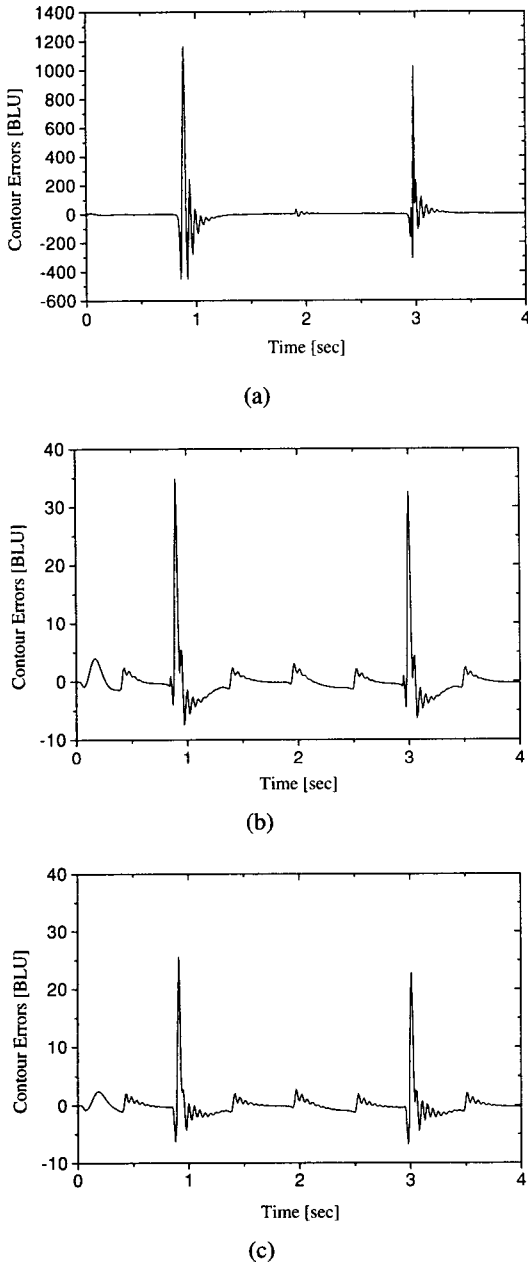


Fig. 9 Comparison of contour errors for an Archimedes curve:
 (a) Koren and Lo's method;
 (b) fixed gain CCC; (c) proposed CCC

1. Koren, Y., "Cross-Coupled Biaxial Computer Control for Manufacturing System," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 201, pp. 265-272, 1980.
2. Kulkarni, P. K. and Srinivasan, K., "Optimal Contouring Control of Multi-Axial Drive Servomechanisms," ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 111, pp. 140-148, 1989.
3. Koren, Y. and Lo, C. C., "Variable-Gain Cross-Coupling Controller for Contouring," Annals of the CIRP, Vol. 40(1), pp. 371-374, 1991.
4. Chuang, H. Y. and Liu, C. H., "Cross-Coupled Adaptive Feedrate Control for Multiaxis Machine Tools," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 113, pp. 451-457, 1991.
5. 이용석, "고속의 비선형 윤곽가공을 위한 교차축 연동제어에 관한 연구," 석사학위논문, 단국대학교 대학원, 1999.
6. Kuo, B. C., Digital Control Systems, Saunders College Publishing, 1992.
7. 지성철, "퍼지논리 제어에 의한 CNC 서보기구의 마찰보정에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제 15 권, 제 9 호, pp. 56-67, 1998.
8. Faux, I. D. and Pratt, M. J., Computational Geometry for Design and Manufacture, Ellis Horwood, 1981.