

## 절삭효과를 고려한 적응 교차축 연동제어 시스템

지 성 철<sup>†</sup> · 윤 상 필<sup>\*</sup>

(2001년 8월 1일 접수, 2002년 6월 4일 심사완료)

### Adaptive Cross-Coupling Control System Considering Cutting Effects

Sungchul Jee and Sangpil Yun

**Key Words :** CNC(컴퓨터 수치제어), Contour Machining(윤곽가공), Cross-Coupling Control(교차축 연동제어), Feedrate(이송속도), Cutting Force(절삭력)

#### Abstract

In this study, the cross-coupling control (CCC) with three new features is proposed to maintain contour precision in high-speed nonlinear contour machining. One is an improved contour error model that provides almost exact calculation of the errors. Another is the utilization of variable controller gains based on the instantaneous curvature of the contour and the feedrate command. For this scheme, a stability is analyzed. As a result, the stability region is obtained, and the variable gains are decided within that region. The other scheme in the proposed CCC is a real-time feedrate adaptation module to regulate cutting force for better surface finish through regulation of material removal rate (MRR). The simulation results show that the proposed CCC system can provide better precision than the existing method particularly in high-speed machining of nonlinear contours.

#### 1. 서 론

공작기계를 이용한 가공에 있어서 요구되는 제품의 정밀도와 생산성 증가는 서로 상반되는 관계에 있다. 정밀도의 향상을 위해서는 보통 가공시간을 늘려야 하므로 생산성이 저하되고, 반대로 생산성을 위해서 가공속도를 높인다면 원하는 정밀도를 얻기가 어려워진다. 이 모순된 요구의 동시만족을 위해 공작기계의 컴퓨터 수치제어(CNC) 시스템과 서보제어 알고리즘에 대한 관심이 집중되어져 왔다.

Koren<sup>(1)</sup>에 의해 처음 제안된 교차축 연동제어기(cross-coupling controller)는 공작기계 시스템의 윤곽정확도 향상에 효과적인 제어기로 인정 받고 있고 그 이래로 현재까지 여러 가지 방법들이 제시되어져 왔다.<sup>(2-4)</sup> 그러나, 기존의 교차축 연동제어 방법들은 기준 공구궤적상의 과거 기준점

(reference point)들을 이용하지 않고 오직 현재 순간의 기준점과 실제 공구위치에 대한 정보만을 사용함으로써 실제의 값과는 차이가 있는 근사적인 윤곽오차를 계산하게 된다. 이 차이는 윤곽의 곡률이 큰 경우, 특히 고속의 이송속도에서 상당히 커지게 되어 기존의 방법들이 효과적일 수 없다. 또한, 기존의 방법들은 여러 이송속도 조건과 가공 중에 계속적으로 변화하는 윤곽 곡률에 대해 고정된 제어기 계인을 적용함으로써 인해 고속의 비선형 윤곽가공에서 윤곽정확도를 유지할 수 없다. 더욱이, 기존의 방법들에서는 절삭효과를 전혀 고려하지 않으므로 인해 가공정밀도가 보장될 수 없다. 다시 말해, 비선형 윤곽가공에서는 곡률의 변화에 따라 달라지는 비절삭체적(MRR)(즉, 곡률효과: curvature effect)<sup>(5)</sup>과 이에 비례하는 절삭력<sup>(6)</sup>을 일정하게 유지하여 가공물의 표면 다듬질 정도와 치수의 정밀도를 확보하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 고속의 비선형 윤곽가공에 있어서 발생할 수 있는 윤곽오차를 줄이고 가공정밀도를 확보하기 위해 세 가지의 새로운 모듈을 갖춘 교차축 연동제어 시스템을 제시한다. 첫째는, 기존의 부정확한 근사모델을 개선하여 실제 오차와 차

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 단국대학교 기계공학과  
E-mail: scjee@dku.edu  
TEL: (02)709-2911 FAX: (02)709-2569

<sup>\*</sup> 단국대학교 대학원 기계공학과

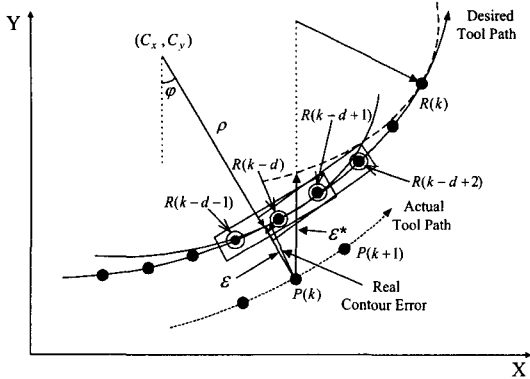


Fig. 1 Proposed contour error model

이가 거의 없는 정확한 윤곽오차 모델이다. 둘째는, 윤곽의 순간 곡률과 이송속도에 기초한 가변게인의 제어기이다. 이를 위해 새로운 윤곽오차 모델을 포함하는 교차축 연동제어 시스템의 안정성 해석을 통해 안정영역을 구하여 변화하는 곡률과 이송속도에 적합한 가변게인을 사용하였다. 셋째로, 비선형 곡선 가공시 발생하는 비절삭체적의 변화를 일정하게 유지하여 절삭력의 변화를 감소시켜 가공물의 형상정도를 향상시킬 수 있는 실시간 이송속도 조정 모듈이다.

본 논문에서 제시하는 교차축 연동제어 시스템을 검증하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였으며, 포물선과 더불어 임의의 비선형 곡선을 만들기 위해 베지어 곡선을 사용하여 기존의 방법과 비교하였다.

## 2. 제시된 교차축 연동제어 시스템

### 2.1 제시된 윤곽오차 모델링 방법

교차축 연동제어기는 윤곽오차 모델이 정확하고 제어 기법이 효과적인 때 높은 윤곽정확도를 얻을 수 있다. 정확한 윤곽오차 계산을 위해 제시된 윤곽오차 모델을 Fig. 1에 나타내었다. CNC 공작기계의 이송 시스템에는 항상 위치뒤짐(position lag)이 존재하므로, 현재의 실제 공구위치점인  $P(k)$ 는 기준궤적상의 현재 기준점인  $R(k)$ 보다 뒤에 놓이게 된다.

이때 뒤진 시간단계(time step)의 수를  $d$ 라 하면,  $P(k)$ 에 가장 근접한 기준궤적 위의 세 기준점들은 각각  $R(k-d-1)$ ,  $R(k-d)$ 와  $R(k-d+1)$ 이다. 제시된 윤곽오차 모델에서 윤곽오차  $\epsilon$ 은 이 세 점을 지나고  $P(k)$ 사이의 거리로 정의되며, 다음과 같이 나타내어진다.

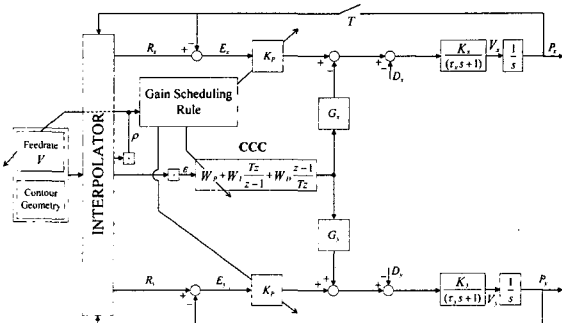


Fig. 2 Proposed adaptive cross-coupling control system

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

실제 공구위치  $P(k)$ 에서 가장 가까운 기준궤적 위의 세 점을 계속적으로 찾아 매 샘플링 주기마다 갱신하여 가변 윈도우  $\mathbf{W}(k)$ 에 저장시킨다. 실제의 공구위치가 이동함에 따라 새로운 공구위치와 근접 기준점들과의 거리비교를 통해  $\mathbf{W}(k)$ 를 계속적으로 새로이 정의함으로써 계산 양을 최소화하고 실행 시간을 줄일 수 있으며, 이는 다음의 조건식으로 표현된다.

$$\text{If } |P(k+1) - R(k-d+1)| < |P(k+1) - R(k-d)|,$$

Then

$$\mathbf{W}(k+1) = \{R(k-d), R(k-d+1), R(k-d+2)\} \quad (2)$$

$$\text{Else } \mathbf{W}(k+1) = \mathbf{W}(k)$$

### 2.2 제시된 교차축 연동제어기

CNC 공작기계의 서보 제어기는 일반적으로 각각의 구동축에 대해 독립적으로 설계되어진다. 이에 비해 교차축 연동제어기는 구동축들을 상호 연관시켜 윤곽정확도를 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 비선형 고속 윤곽가공에 적합한 새로운 형태의 적응 교차축 연동제어 시스템을 제안하며, 그 구조를 Fig. 2에 도시하였다.

Fig. 2에서  $R_x$ 와  $R_y$ 는 각 축방향의 기준위치고,  $K_x$ 는 각 축에 대한 위치제어 루프의 비례 제어기 게인이다.  $K_x$ 와  $K_y$ , 그리고  $\tau_x$ 와  $\tau_y$ 는 각각 구동축 이송 시스템의 개회로 게인과 시상수이며,  $T$ 는 샘플링 주기이다.  $D_x$ 와  $D_y$ 는 각 축의 부하 외란을 나타낸다. 교차축 연동제어기에는 PID 제어법칙이 사용되었으며, 교차축 연동제어기의 출력인 윤곽 법선방향의 제어명령에 다음과 같은 가변 게인이 곱해져 각각 X와 Y축 방향의 보정명령으로 분해된다.

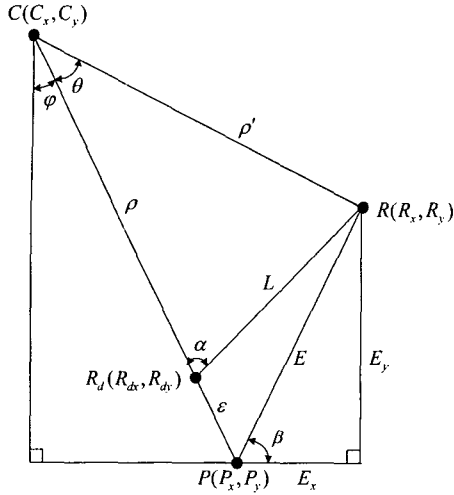


Fig. 3 Geometric diagram of the contour error model

$$G_x = \frac{P_x - X_c}{\rho + \varepsilon} = \sin \varphi \quad (3)$$

$$G_y = \frac{Y_c - P_y}{\rho + \varepsilon} = \cos \varphi \quad (4)$$

### 2.3 안정성 해석

앞에서 제시한 식 (1)의 윤곽오차 모델은 비선형으로 안정성 해석에 사용하기에는 부적합하다. 대신에 Taylor 급수와 Fig. 3에 나타난 기하학적 관계를 이용하면 비선형 윤곽오차는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\varepsilon = (P_x - R_{dx}) \sin \varphi - (P_y - R_{dy}) \cos \varphi \quad (5)$$

Fig. 3에서  $R_d$ 는 현재의 실제 공구위치  $P$ 에 가장 근접한 기준궤적상의 점이고  $R$ 은 현재의 기준점을 나타낸다.  $C$ 는  $R_d$ 에서 기준궤적에 대한 순간 접원의 중심을 나타내며, 이것의 곡률반경은  $\rho$ 이다. Fig. 3의 관계로부터 식 (5)의  $R_{dx}$ 와  $R_{dy}$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$R_{dx} = R_x - L \cos(\pi/2 + \varphi - \alpha) \quad (6)$$

$$R_{dy} = R_y - L \sin(\pi/2 + \varphi - \alpha) \quad (7)$$

또한  $L$ 은

$$L = (E_x \cos \beta + E_y \sin \beta) \cos(\varphi - \beta) / \sin \alpha \quad (8)$$

로 나타낼 수 있으므로 윤곽오차는 다음과 같이

표현될 수 있다.

$$\varepsilon = (-G_x - \mu_x)E_x + (G_y - \mu_y)E_y \quad (9)$$

여기서,  $G_x = \sin \varphi$ ,  $G_y = \cos \varphi$

$$\mu_x = \cos(\varphi - \beta) \cos \beta / \tan \alpha$$

$$\mu_y = \cos(\varphi - \beta) \sin \beta / \tan \alpha$$

$$\alpha = \sin^{-1}(\rho' \sin \theta / L), \quad \beta = \tan^{-1}(E_y / E_x)$$

$$L = \sqrt{\rho^2 + \rho'^2 - 2\rho\rho' \cos \theta}$$

각 방향 이송시스템에 대한 개회로 전달함수의 식은 ZOH(zero-order-hold)를 포함한  $z$  변환을 이용하여 다음과 같이 구해진다.

$$P_x(z) = \frac{H_{1x}(z) + H_{0x}}{(z-1)(z-r_x)} U_x(z) \quad (10)$$

$$P_y(z) = \frac{H_{1y}(z) + H_{0y}}{(z-1)(z-r_y)} U_y(z) \quad (11)$$

여기서,  $r_i = \exp(-T/\tau_i)$ ,  $i = x, y$

$$H_{1i} = K_i(T - \tau_i + \tau_i r_i)$$

$$H_{0i} = K_i(\tau_i - \tau_i r_i - T r_i)$$

$$U_x = K_p E_x - W(z) G_x \varepsilon$$

$$U_y = K_p E_y + W(z) G_y \varepsilon$$

식 (9)를 식 (10)과 (11)에 대입하여 정리하면 특성방정식이 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \Omega(z) = & (z-1)^2(z-r_x)(z-r_y) \quad (12) \\ & + [K_p + W(z)(G_x^2 + G_x \mu_x)](z-1)(z-r_x)(H_{1x}z + H_{0x}) \\ & + [K_p + W(z)(G_y^2 - G_y \mu_y)](z-1)(z-r_x)(H_{1y}z + H_{0y}) \\ & + K_p [K_p + W(z)(G_x^2 + G_y^2 + G_x \mu_x - G_y \mu_y)] \\ & \times (H_{1x}z + H_{0x})(H_{1y}z + H_{0y}) = 0 \end{aligned}$$

편의상 본 연구의 대상이 되는 2축의 시스템을 대칭 시스템(matched system)으로 가정하여 즉,  $\tau_x = \tau_y = \tau$ 이고  $K_x = K_y = K$ 로 해석하였으며, 이때의 특성 방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\Omega(z) = \Omega_1(z)\Omega_2(z) = 0 \quad (13)$$

여기서,

$$\Omega_1(z) = (z-1)(z-r) + K_p(H_{1z} + H_0)$$

$$\begin{aligned} \Omega_2(z) = & (z-1)(z-r) + [K_p + W(z) \\ & \times (G_x^2 + G_y^2 + G_x \mu_x - G_y \mu_y)](H_{1z} + H_0) \end{aligned}$$

Fig. 3의 기하학적인 관계를 이용하면  $\Omega_2(z)$ 의 내부에서  $G_x \mu_x - G_y \mu_y = -\sin^2 \theta / 2$ 이 성립된다. 여

기서  $\theta \approx v d T / \rho$ 이며,  $v$ 는 이송속도를 나타낸다. 따라서 곡률반경이 클수록  $G_x \mu_x - G_y \mu_y$ 의 값은 작아진다. 예를 들어 이송속도 4 m/min 기준으로 곡률반경이 시스템의 기본 길이단위(basic-length unit: BLU)의 3000 배 이상인 윤곽을 가공한다면 본 연구에 쓰인 시스템의 경우  $|G_x \mu_x - G_y \mu_y| < 0.05$ 가 되어  $G_x^2 + G_y^2 + G_x \mu_x - G_y \mu_y \approx 1$ 이므로 다음의 식이 성립한다.

$$\Omega_1(z) = (z-1)(z-r) + K_p(H_1 z + H_0) \quad (14)$$

$$\Omega_2(z) = (z-1)(z-r) + [K_p + W(z)](H_1 z + H_0) \quad (15)$$

여기서,  $r = e^{-T/\tau}$

$$H_1 = K(T - \tau + \tau r)$$

$$H_0 = K(\tau - \tau r - Tr)$$

식 (14)와 (15)의 두 특성방정식에 Jury의 안정도 판별식을 각각 적용하면 다음과 같은 안정성 조건을 구할 수 있다.

- (i)  $0 < K_p < 5.03$
- (ii)  $W_1 > 0$
- (iii)  $|W_D| < 0.1534$
- (iv)  $a_4 - a_3 + a_2 - a_1 + a_0 > 0$
- (v)  $|a_0^2 - a_4^2| > |a_0 a_3 - a_1 a_4|$
- (vi)  $|(a_0^2 - a_4^2)^2 - (a_0 a_3 - a_1 a_4)^2| > (a_0^2 - a_4^2)(a_0 a_2 - a_2 a_4) - (a_0 a_1 - a_3 a_4)(a_0 a_3 - a_1 a_4)$

여기서

$$\begin{aligned} a_4 &= 1 \\ a_3 &= -2 - r + K_p H_1 + H_1 W_p + H_1 T W_1 + H_1 W_D / T \\ a_2 &= 1 + 2r - K_p H_1 + K_p H_0 \\ &\quad + (-H_1 + H_0) W_p + H_0 T W_1 + (-2H_1 + H_0) W_D / T \\ a_1 &= -r - K_p H_0 - H_0 W_p + (H_1 - 2H_0) W_D / T \\ a_0 &= H_0 W_D / T \end{aligned}$$

본 연구의 경우  $K = 400 \text{ sec}^{-1}$ ,  $\tau = 0.03 \text{ sec}$ ,  $T = 0.001 \text{ sec}$ 이며,  $W_1$ 와  $W_D$ 의 값은 가능한 크게 설정하여  $W_1 = 500$ ,  $W_D = 0.1$ 로 할 때 위의 안정성 조건은 다음과 같이 된다.

$$\begin{cases} 0 < K_p < 5.03 \\ -63.27 < K_p + W_p < 42.997 \end{cases} \quad (16)$$

$K_p$ 와  $W_p$ 에 대한 안정성 영역을 Fig. 4에 도시하였다.

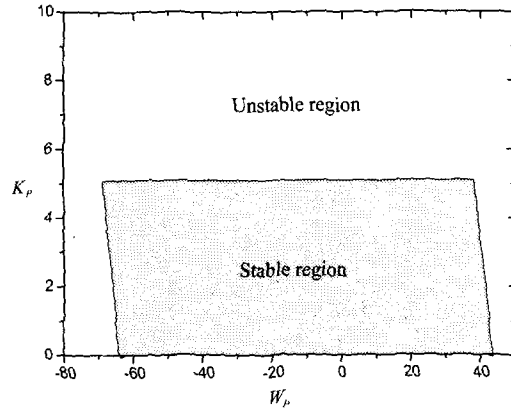


Fig. 4 Stable range for the controller gains

#### 2.4 제시된 적응제어 방법

제시된 교차축 연동제어 시스템에서는 이송속도와 계속적으로 변화하는 윤곽의 곡률에 따라 축방향 제어기와 교차축 연동 제어기의 비례 게인이 실시간으로 조정된다. 윤곽의 곡률반경이 증가해서 무한대(즉, 직선 윤곽)에 가까워질수록  $W_p$ 의 역할은 덜 중요해지며, 기준점을 빠르게 추적하기 위해  $K_p$ 를 상대적으로 증가시킬 필요가 있다. 반면에 윤곽의 곡률반경이 감소하면 윤곽오차가 커지게 되므로 윤곽오차의 감소를 위해  $K_p$ 는 상대적으로 작게 하고  $W_p$ 를 증가시켜야 한다. 이송속도에 대해서는 고속의 이송일 때 곡률반경이 작은 경우에 대해서만 윤곽추적을 위해  $K_p$ 를 감소시킨다. 다양한 이송속도  $v$  (단위: BLU/sec)와 곡률반경  $\rho$  (단위: BLU)의 조합 조건에서 원운동에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 각각의 경우에 적합한  $K_p$ 와  $W_p$ 의 값이 결정되었으며, 이를 보간한 식은 다음과 같다.

$$W_p = 20 + 20 \exp[-(\rho - 3000)^2 / 10^8] \quad (17)$$

$$K_p = 0.4 - 0.17 \exp[-(\rho - 3000)^2 / (0.4V + 6000)] \quad (18)$$

직선윤곽의 가공에서는 절삭깊이 ( $d$ )와 이송속도 ( $V_0$ )가 일정하면 비절삭체적은 일정하나, 비선형가공에서는 곡률효과에 의해 오목한 곳에서는 비절삭체적이 증가하고 반대로 볼록한 곳에서는 감소하게 된다. 즉, 비절삭체적은 직선윤곽의 가공시  $V_0 d$ 이고, 곡률반경이  $\rho$ 인 비선형 윤곽의 가공시에는  $V_0 d [1 \pm (D-d)/2\rho]$ 이다. 여기서  $D$ 는 공구지름이며,  $\pm$ 부호는 각각 오목한 경우와 볼록한 경우를 나타낸다. 따라서 이송속도를 아래 식과 같이 조절하면 비절삭체적을 일정하게 유지할 수 있다.

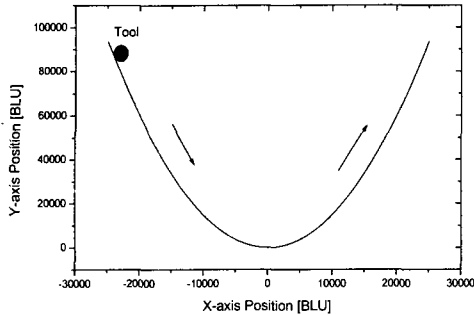


Fig. 5 Parabolic contour

$$V = \frac{V_o}{1 \pm (D-d)/2\rho} \quad (19)$$

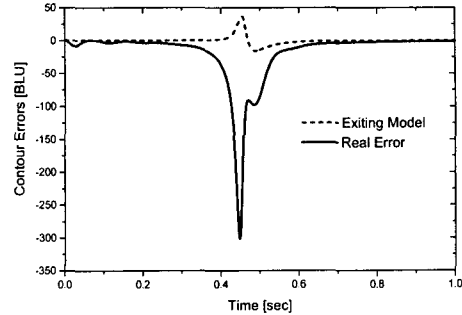
결과적으로 오목한 윤곽에 대해서는 이송속도가 원래의 이송속도(즉,  $V_o$ ) 보다 작게 조정되고 볼록한 경우에는 크게 조정된다. 절삭력이 비절삭체적에 비례하므로<sup>(6)</sup> 식 (19)의 관계를 이용하여 비선형 윤곽 가공시에 절삭력을 일정하게 할 수 있다.

### 3. 결과 및 고찰

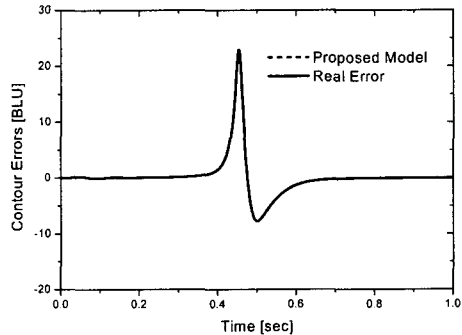
본 연구에서 제시된 교차축 연동제어 시스템을 검증하기 위해 2 축의 밀링머신 이송 드라이브 모델(Fig. 2 참조)을 포함하는 시뮬레이션 프로그램을 작성하여 비선형 윤곽가공에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 샘플주기는 1 msec이며 BLU는 0.3  $\mu$ m로 하였다.

#### 3.1 기존의 윤곽오차 모델과의 비교

Fig. 5와 같이 최소 곡률반경이 3000 BLU(즉, 0.9 mm)인 포물선 윤곽에 대해 제시된 윤곽오차 모델과 기존 모델<sup>(5)</sup>의 정확도를 비교하였다. Fig. 6(a)에 점선으로 나타낸 것이 4 m/min의 이송속도에 대한 기존 모델의 윤곽오차 계산 결과이다. 실제의 윤곽오차와 큰 차이를 보이며, 이와 같이 부정확한 윤곽오차 값으로 시스템이 제어됨으로 인해 Fig. 6(a)에 실선으로 나타낸 바와 같이 윤곽정확도가 상당히 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 반면에 제시된 윤곽오차 모델의 결과(Fig. 6(b))는 실제 윤곽오차와의 차이가 최대 0.016 BLU 정도이므로 실제 윤곽오차 값과 거의 일치한다고 볼 수 있다. 따라서 제시된 모델은 곡률이 큰 윤곽의 고속가공에 적합하다고 할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 6 Comparison of contour error models : (a) existing model; (b) proposed model

3.2 적응계인 제어기와 일정계인 제어기의 비교  
 제시된 적응 제어기와 계인이 일정한 교차축 연동제어기의 윤곽추적 성능을 비교하였다. 후자의 경우 여러 이송속도와 윤곽의 곡률 전반에 대해 양호한 성능을 나타내는 제어기 계인을 설정하였으며, 그 값은  $W_p = 20$ ,  $W_i = 500$ ,  $W_D = 0.1$  그리고  $K_p = 0.4$ 이다.  $W_p$ 을 증가시키거나  $K_p$ 를 감소시키면 윤곽오차를 더 감소시킬 수 있으나 이는 위치 추적오차를 증가시키게 된다.  $W_i$ 의 증가는 기준궤적의 방향이 바뀌는 경우 과도상태 기간을 단축시켜 윤곽오차를 빠르게 감소시켜준다. 같은 경우  $W_D$ 의 증가는 궤적상의 오버슈트를 줄일 수 있으나 윤곽오차의 응답이 다소 늦어지는 경향이 있다. 두 제어기 모두 제시된 윤곽오차 모델을 사용하였다. Fig. 5의 포물선 윤곽에 대한 응답을 Fig 7에 비교하였으며, 제어기 계인의 실시간 조정이 곡률이 큰 부분의 윤곽오차를 줄이는데 효과적임을 알 수 있다. 다른 비선형 윤곽형태인 Fig. 8의 베지어(Bézier) 곡선에 대해서도 Fig. 9에 보인 바와 같이 유사한 결과를 얻을 수 있다.

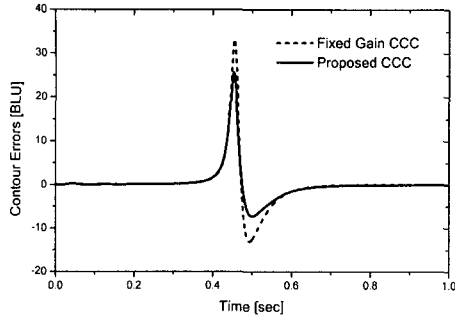


Fig. 7 Comparison of contour errors of the adaptive and fixed-gain CCCs for the parabolic contour

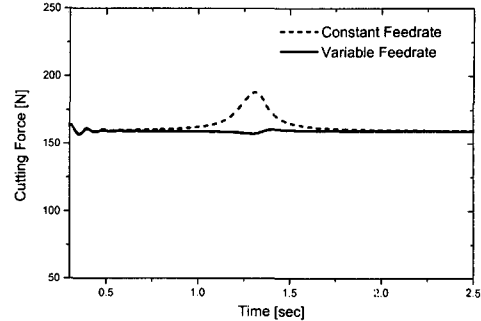


Fig. 10 Comparison of cutting forces of the variable and constant-feedrate CCCs for the parabolic contour

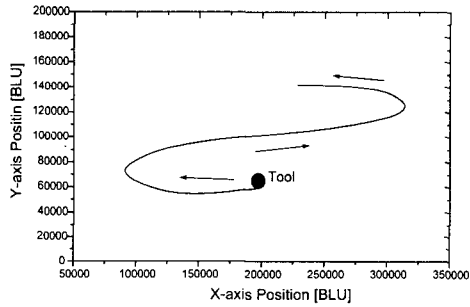


Fig. 8 Bézier curve

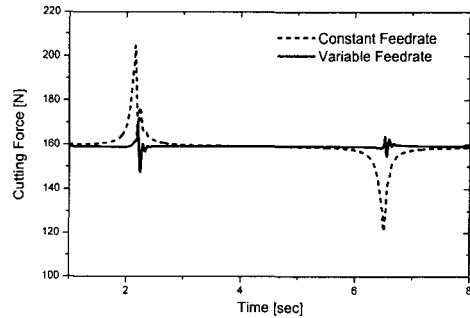


Fig. 11 Comparison of cutting forces of the variable and constant-feedrate CCCs for the Bézier curve

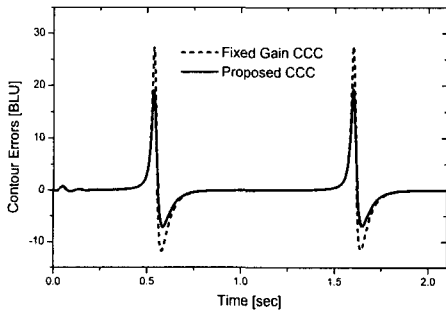


Fig. 9 Comparison of contour errors of the adaptive and fixed-gain CCCs for the Bézier curve

### 3.3 가변 및 일정 이송속도 교차축 연동제어기의 비교

시뮬레이션 프로그램에 절삭력 모델을 포함시켜 제시된 가변 이송속도 방법을 일정한 이송속도의 교차축 연동제어기와 비교하였다. 절삭 파라미터들은 직선윤곽 가공시 평균 절삭력이 159 N 정도가 되도록 설정되었다.

포물선 및 베지어 곡선을 가공하는 경우의 절삭력을 각각 Fig. 10 과 Fig. 11 에 나타내었다. 일정한 이송속도를 적용하는 교차축 연동제어기는 곡률이 큰 부분을 가공하는 동안 상당히 큰 절삭력 변화를 나타내는 반면, 가변 이송속도 방법은 효과적으로 절삭력을 일정하게 함을 알 수 있다. 따라서 비선형 윤곽 가공시 가변 이송속도 방법을 통하여 일정 이송속도 방법에 비해 향상된 형상정도를 얻을 것으로 기대할 수 있다.

## 4. 결론

본 연구에서는 비선형 윤곽의 고속 가공시 윤곽정확도 및 형상정도를 향상시키기 위해 새로운 적응 교차축 연동제어 시스템을 제시하였다. 제시된 시스템은 실제의 윤곽오차를 정확히 근사시킬 수 있는 개선된 윤곽오차 모델을 사용하였다. 일정한 제어기 계인을 적용하는 기존의 교차축 연동제어 시스템에 비해, 제시된 시스템에서는 안정성

해석을 통해 정해진 범위 내에서 이송속도와 윤곽의 곡률에 따라 제어기 계인을 실시간 조정하였다. 또한, 절삭효과를 고려하여 가공중 일정한 비절삭체적을 유지함으로써 절삭력을 일정하게 할 수 있도록 실시간 가변 이송속도 방법을 적용하였다. 2축의 윤곽가공에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하여 기존의 방법과 비교 해석하였으며, 그 결과 곡률이 큰 비선형 윤곽의 고속가공에서 제시된 적응 교차축 연동제어 시스템이 기존의 방법에 비해 윤곽추적 성능을 크게 개선시킬 수 있음을 확인하였고, 형상정도를 향상시킬 수 있는 가능성을 보였다. 제시된 시스템은 모듈화된 소프트웨어로서 구성되어 PC 기반의 CNC 시스템에 비용효율적으로 적용될 수 있으므로 공작기계 시스템의 가공정밀도를 향상시키는데 기여할 수 있다.

### 후 기

본 연구는 2000 학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음.

### 참고문헌

- (1) Koren, Y., 1980, "Cross-Coupled Biaxial Computer Control for Manufacturing System," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 201, pp. 265~272.
- (2) Kulkarni, P. K. and Srinivasan, K., 1989, "Optimal Contouring Control of Multi-Axial Drive Servomechanisms," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 111, pp. 140~148.
- (3) Koren, Y. and Lo, C. C., 1991, "Variable-Gain Cross-Coupling Controller for Contouring," *Annals of the CIRP*, Vol. 40, pp. 371~374.
- (4) Chuang, H. Y. and Liu, C. H., 1991, "Cross-Coupled Adaptive Control for Multiaxis Machine Tools," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 113, pp. 451~457.
- (5) Farouki, R. T., Manjunathaiah, J., Nicholas, D., Yuan, G.-F. and Jee, S., 1998, "Variable-feedrate CNC Interpolators for Constant Material Removal Rates along Pythagorean-hodograph Curves," *Computer-Aided Design*, Vol. 30, pp. 631~640.
- (6) Smith, S. and Tlustý, J., 1991, "An Overview of Modeling and Simulation of the Milling Process," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 113, pp. 169~175.
- (7) Faux, I. D. and Pratt, M. J., 1981, *Computational Geometry for Design and Manufacture*, Ellis Horwood.

(1) Koren, Y., 1980, "Cross-Coupled Biaxial Computer