

## 고정밀 고속 윤곽가공을 위한 3축 연동제어기

지 성 철<sup>†</sup> · 구 태 훈<sup>\*</sup>

(2003년 3월 19일 접수, 2003년 11월 20일 심사완료)

### 3-Axis Coupling Controller for High-Precision/High-Speed Contour Machining

Sungchul Jee and Taehoon Koo

**Key Words :** CNC(컴퓨터 수치제어), Contour Error(윤곽오차), Coupling Controller(연동제어기), Feed Drive System(이송 시스템), Feedrate(이송속도), Interpolator(보간기)

#### Abstract

This paper proposes a three-axis coupling controller designed to improve the contouring accuracy in machining of 3D nonlinear contours. The proposed coupling controller is based on an innovative 3D contour error model and a PID control law. The novel contour error model provides almost exact calculation of contour errors in real-time for arbitrary contours and can be integrated with any type of existing interpolator. In the proposed method, three axes of motion are coordinated by the proposed coupling controller along with a proportional controller for each axis. The proposed contour error model and coupling controller are evaluated through computer simulations. The simulation results show that the proposed 3-axis coupling controller with the new contour error model substantially can improve the contouring accuracy by order of magnitude compared with the existing uncoupled controllers in high-speed machining of nonlinear contours.

#### 1. 서 론

생산시스템에서 고정밀도 및 생산성 향상에 대한 요구가 증대되면서 CNC 공작기계 시스템의 정교한 서보제어에 대한 연구가 지속적으로 이루어져 왔다. 그 중 교차축 연동제어(cross-coupling control)는 윤곽오차가 직접 제어기에 반영되어 윤곽오차를 줄이는 방향으로 구동축들의 운동을 조정하므로 공작기계 시스템의 윤곽정확도 향상에 효과적인 방법으로 인정된다. 교차축 연동제어에서는 특히 윤곽오차 모델의 정확성이 윤곽추적 성능의 향상에 있어서 매우 중요한 요소이다.

Koren<sup>(1)</sup>에 의해 2축 연동제어가 제시된 이래 조금씩 다른 형태의 윤곽오차 모델과 제어기법을 이용한 연동제어기가 연구되어져 왔다.<sup>(2-4)</sup> 그러나, 기존 연동제어기의 윤곽오차 모델은 곡률이 큰 비

선형 윤곽에 대한 고속의 이송에서 정확도가 현저히 떨어지는 문제점이 있다. 이를 개선하기 위해 Lee 와 Jeon<sup>(5)</sup>은 실제 공구위치와 가장 가까운 기준위치와 이웃한 기준위치를 연결한 직선에 직교하는 거리를 구하는 방법을 제시하였으나, 기준 윤곽에 대해 윤곽오차가 수직하지 못할 경우에는 윤곽오차 벡터가 기준 윤곽을 향하지 못하는 문제점을 갖는다. 이것은 Erkokmaz 와 Altintas<sup>(6)</sup>에 의해 제시된 모델로 어느 정도 보완될 수 있다. 최근에 더 일반적이면서 정확한 윤곽오차 모델이 Jee 와 Yun<sup>(7)</sup>에 의해 개발되었다. 이들 모두는 2차원 제적에만 국한되어 적용될 수 있는 2차원 윤곽오차 모델로서 3차원 윤곽가공에는 쓰일 수 없다. 3차원 윤곽오차 모델은 Lo<sup>(8)</sup>에 의해 제시된 바 있으나, 기존 2차원 모델과 같이 고속의 비선형 윤곽추적시에 부정확한 단점이 있으며 윤곽오차를 구하기 위해서는 기준 윤곽에 대한 수식을 필요로 하므로 G 코드 및 기존의 다양한 보간기 모듈과의 통합이 거의 불가능하다고 볼 수 있다.

위와 같은 문제점들을 해결하기 위해 본 연구에

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 단국대학교 기계공학과

E-mail : scjee@dku.edu

TEL : (02)709-2911 FAX : (02)709-2569

\* 단국대학교 대학원 기계공학과

서는 새로운 3 차원 윤곽오차 모델에 기반을 둔 3 축 연동제어기를 제시한다. 제시된 연동제어기는 직선, 원호와 같은 기본적인 움직임 외에도 모든 3 차원 자유곡선의 궤적에 대해 적용 가능하고, 보 간기의 종류에 무관하여 기존 제어 모듈과의 결합 이 용이하며, 기존 궤적의 형상 및 이송속도에 관 계없이 윤곽오차 모델의 정확도가 매우 우수한 장 점을 갖는다. 제시된 새로운 3 차원 윤곽오차 모델 은 각 순간의 실제 공구위치로부터 가장 근접한 기준 궤적상의 기준점들을 구하고 이 점들을 이용 해 윤곽오차 벡터를 계산한다. 윤곽오차 벡터에 연동제어를 적용하여 구해진 제어명령의 각 축방 향 성분은 개별적인 3 축 제어 루프의 제어명령과 결합됨으로써, 윤곽오차가 최소화되도록 구동축들 의 운동을 동시에 조정하게 된다.

컴퓨터 시뮬레이션을 통해 본 논문에서 제시된 3 차원 윤곽오차 모델의 정확성을 입증하였으며, 다양한 윤곽에 대해 제시된 3 축 연동제어기와 현 재 CNC 공작기계에 적용되고 있는 독립축 제어 기의 성능을 비교하여 제시된 연동제어기의 실효 성을 검증하였다.

## 2. 제시된 3축 연동제어기

### 2.1 제시된 3 차원 윤곽오차 모델

윤곽가공을 위한 연동제어기는 윤곽오차 모델의 정확도에 따라 그 성능이 좌우된다고 할 수 있다. 본 연구에서 새로이 제시된 3 차원 윤곽오차 모델 에 대한 개요를 Fig. 1 에 도시하였다. 그림에서  $R(k)$  는 기준궤적상의 현재 기준점(reference point) 이고  $P(k)$  는 현재의 실제 위치를 나타낸다. 편의 상  $P(k)$  가  $R(k)$  보다  $d$  시간단계(time step) 만큼 뒤져 있고  $P(k)$  에서 가장 가까운 기준궤적 위의 세 점을 각각  $R(k-d-1)$ ,  $R(k-d)$  와  $R(k-d+1)$  라 한다. 이 세 점의 집합을 가변 윈도우  $W(k)$  로 정의한다.

먼저 이 점들이 일직선상에 있지 않다고 가정하 면, 공간상에서 이 세 점을 지나는 평면의 방정식 은 다음과 같은 형태로 표현된다.

$$px + qy + rz + s = 0 \tag{1}$$

위의 세 기준점의 좌표를 이용하여 식 (1)의 계수 를 구할 수 있다. 세 기준점을 포함하는 임의의 구면과 식 (1)의 평면이 만나서 생기는 3 차원 원 (3D circle)에 대해, 식 (1)과 아래의 구면 방정식을 연립하여 원의 중심좌표  $C(C_x, C_y, C_z)$  와 반경  $\rho$  를 구할 수 있다.

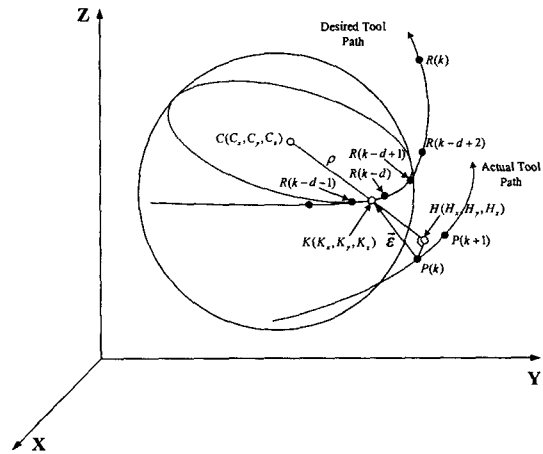


Fig. 1 Proposed 3D contour error model

$$(x - C_x)^2 + (y - C_y)^2 + (z - C_z)^2 = \rho^2 \tag{2}$$

$P(k)$ 의 좌표를  $P(P_x, P_y, P_z)$ 라 하면,  $P(k)$ 를 지나 고 식 (1)의 평면에 수직인 직선은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{x - P_x}{p} = \frac{y - P_y}{q} = \frac{z - P_z}{r} \tag{3}$$

식 (3)을 매개변수 식으로 표현하여 이 직선과 식 (1)의 평면이 수직하게 만나는 점  $H(H_x, H_y, H_z)$  의 좌표를 구할 수 있으며, 이 점과 원의 중심점  $C$ 를 지나는 공간상의 직선을 아래의 식 (4)와 같 이 나타낼 수 있다.

$$\frac{x - H_x}{C_x - H_x} = \frac{y - H_y}{C_y - H_y} = \frac{z - H_z}{C_z - H_z} \tag{4}$$

이 직선이 위에서 언급한 3 차원 원과 만나는 교 점을  $K(K_x, K_y, K_z)$ 라 하면, 점  $K$ 는 식 (4)를 만 족하는 동시에 식 (2)의 구면상의 점이기도 하므 로 일단 식 (2)와 (4)를 연립하여 다음과 같이 구 할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} K_x \\ K_y \\ K_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_x - H_x \\ C_y - H_y \\ C_z - H_z \end{pmatrix} t + \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{pmatrix} \tag{5}$$

$$t = 1 \pm \frac{\rho}{\sqrt{(H_x - C_x)^2 + (H_y - C_y)^2 + (H_z - C_z)^2}} \tag{6}$$

이 두 개의 교점 중 현재 공구위치  $P(k)$ 에 더 가 까운 점을 취하여  $K$ 의 좌표를 구한다.

한편,  $R(k-d-1)$ ,  $R(k-d)$  와  $R(k-d+1)$  가 일직선상에 있는 경우에는, 이 세 점을 지나가는 직선상에서  $P(k)$  와의 거리가 최단인 되는 점을 점  $K$  로 정의하여 구할 수 있다. 따라서 기준궤적의 형상 또는 곡률에 관계없이 현재 공구위치에서 가장 가까운 기준궤적상의 점을 찾을 수 있다.

제시된 3 차원 윤곽오차 모델에서 윤곽오차는 점  $P$ 로부터 점  $K$  에 이르는 벡터  $\bar{\epsilon}$  으로 정의되며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_x - P_x \\ K_y - P_y \\ K_z - P_z \end{pmatrix} \quad (7)$$

기존의 방법에서는 가변 원도우를 구성하기 위해 일정 개수의 뒤진 기준점들의 위치정보를 별도의 메모리에 저장하고 저장된 기준점들과 실제 위치와의 거리를 모두 비교하였다. 그리고 그 중 가장 짧은 거리에 해당하는 기준점을 중심으로 가변 원도우를 구성하였다. 그러나 제시된 방법에서는 포인터를 이용한 가변 메모리 기법을 이용하여 현재의 기준위치  $R(k)$  에서  $(d+1)$  단계 뒤진 기준점들만을 저장함으로써 최소한으로 필요한 유동적 저장공간을 확보하기 때문에 기존 이송속도의 크기에 무관하게 효율적으로 대처할 수 있는 장점이 있다. 또한 제시된 방법에서는 샘플링 주기마다 측정된 실제 공구위치  $P(k)$  에서 가장 가까운 기준궤적 위의 세 기준점을 구해 가변 원도우  $\mathbf{W}(k)$  에 저장시키고, 공구위치가 이동함에 따라, 즉 다음 시간단계에서의 위치  $P(k+1)$  에서 거리비교를 통해서  $\mathbf{W}(k)$  를 계속 업데이트(update)하는 효율적인 알고리즘을 적용하는데 이것을 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

If  $|P(k+1) - R(k-d+1)| < |P(k+1) - R(k-d)|$ ,  
 Then  
 $\mathbf{W}(k+1) = \{R(k-d), R(k-d+1), R(k-d+2)\}$  (8)  
 else  $\mathbf{W}(k+1) = \mathbf{W}(k)$ ;  $d = d+1$

결과적으로 제시된 3 차원 윤곽오차 모델에서는 보간기에 의해 이미 계산되어진 기준궤적상의 기준점들과 위치 피이드백(feedback) 정보를 이용하여 윤곽오차를 구하게 되므로, 기준궤적의 수식이 필요 없고 보간기의 형태에 무관하여 사실상 기존의 모든 서보제어 모듈과의 통합이 가능하다.

2.2 제시된 3 축 연동제어기

CNC 공작기계에서 현재 쓰이고 있는 서보 제

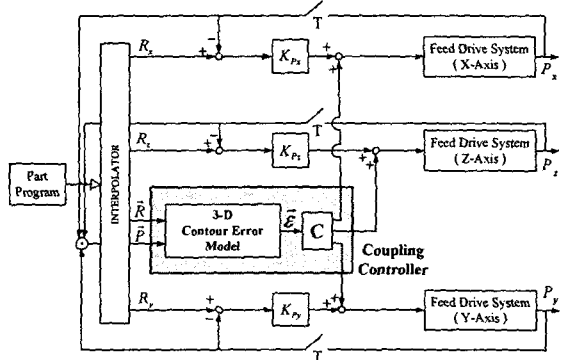


Fig. 2 Structure of the proposed 3-axis coupling control

어기는 각 구동축에 대해 개별적으로 설계되어 구동축을 독립적으로 제어한다. 반면에 연동제어기는 구동축들의 실제 위치 및 기준궤적에 대한 정보를 이용해 윤곽오차가 제거되는 방향으로 구동축들을 동시에 조정함으로써 윤곽추적의 정확도를 크게 향상시킬 수 있다.

Fig. 2 는 3 차원 고속 윤곽가공에서 윤곽정확도를 향상시키기 위해 본 연구에서 제시하는 새로운 형태의 연동제어 구조를 나타낸다. 그림에서  $\bar{R} = (R_x, R_y, R_z)^T$  는 공구의 기준위치 벡터이고  $\bar{P} = (P_x, P_y, P_z)^T$  는 공구의 실제위치 벡터를 나타낸다.  $K_{P_x}$ ,  $K_{P_y}$  와  $K_{P_z}$  는 각 축에 대한 위치제어 루프의 비례 제어기 게인이며,  $T$  는 샘플링 주기를 나타낸다. 본 연구에서는 각 구동축의 이송 시스템(feed drive system)을 1 차 시스템으로 가정하여 개회로 게인  $K_x$ ,  $K_y$ ,  $K_z$  그리고 시상수  $\tau_x$ ,  $\tau_y$ ,  $\tau_z$  로 각각 모델링하였다. 윤곽오차 모델로부터 계산된 윤곽오차 벡터  $\bar{\epsilon}$  에 다음과 같이 정의되는 연동제어기 행렬  $C$  가 곱해져 윤곽오차를 줄이기 위한 X, Y 및 Z 축 방향의 보정명령이 구해진다.

$$C = \begin{bmatrix} C(z) & 0 & 0 \\ 0 & C(z) & 0 \\ 0 & 0 & C(z) \end{bmatrix} \quad (9)$$

연동제어기  $C(z)$  는 현재의 공구위치를 기준궤적으로 향하게 하는 역할을 하며, 본 논문에서는 윤곽오차의 각 축방향 성분(즉,  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$ ,  $\epsilon_z$ )에 대한 연동제어에 PID 제어법칙을 적용하였으며 그 전달 함수는 다음과 같다.

$$C(z) = C_p + C_i \frac{Tz}{z-1} + C_d \frac{z-1}{Tz} \quad (10)$$

여기서  $C_p$ ,  $C_i$ ,  $C_d$  는 각각 연동제어기의 비례,

적분, 미분 계인을 나타낸다.

축 제어기와 연동제어기에서 생성된 제어명령은 상호 결합되어 각 축의 이송 시스템을 구동함으로써 윤곽추적 성능을 향상시키게 된다. 즉, 제시된 3축 연동제어기는 각 축의 독립적인 추적성능 향상을 통하여 윤곽오차를 줄이기 보다는 실시간으로 계산된 윤곽오차를 직접 윤곽추적 제어에 반영함으로써 높은 윤곽추적 정확도를 제공한다.

### 3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 연구에서 제시된 연동제어 방법을 검증하기 위해 3축 밀링머신의 이송 드라이브 모델을 포함하는 시뮬레이션 프로그램을 작성하여 3차원 비선형 궤적 추적에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 해석을 수행하였다. 시뮬레이션 대상이 된 시스템의 파라미터 값과 제어기 계인을 Table 1에 정리하였다.

#### 3.1 제시된 3차원 윤곽오차 모델의 성능 해석

우선 제시된 3차원 윤곽오차 모델의 정확도를 입증하기 위해, 3차원 윤곽추적에 대해 제시된 모델과 기존 윤곽오차 모델을 비교하였다. 두 모델의 성능은 동일한 조건에 대해 각 모델의 윤곽오차 절대값과 별도의 수치해석을 통해 계산된 윤곽오차 절대값과의 차이를 구해 비교할 수 있다.

아래의 매개변수 식 (11)로 정의되는 Fig. 3의 3차원 윤곽추적에서 3축을 독립적으로 비례 제어기( $K_{Px}$ ,  $K_{Py}$ ,  $K_{Pz}$ )로만 구동한 경우에 대한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 궤적은 실시간 곡선 보간기(curve interpolator)로 보간하였다. 각각 1 m/min과 4 m/min의 이송속도에서, 제시된 윤곽오차 모델과 기존 Lo<sup>(8)</sup>에 의해 제안된 모델로부터 얻은 윤곽오차의 절대값에서 각각 Newton-Rapson법을 이용해 구한 실제 윤곽오차의 절대값(Fig. 4에서 'Real Error'로 표기)을 뺀 차이를 비교하였다.

Table 1 Simulation parameters

Parameters	X and Y-axis	Z-axis
Open-loop gain	120 s <sup>-1</sup>	115 s <sup>-1</sup>
Time constant	30 ms	25 ms
Axial controller gain	0.6	
Coupling controller gain	C <sub>p</sub> = 15; C <sub>i</sub> = 300; C <sub>d</sub> = 0.3	
Basic length unit (BLU)	0.5 μm	
Sampling time	1 ms	

$$\begin{cases} x(u) = 1.5 \times 10^5 u^2 - 1.5 \times 10^5 u \\ y(u) = -2 \times 10^4 u \\ z(u) = -5 \times 10^3 u \end{cases} \quad (0 \leq u \leq 1) \quad (11)$$

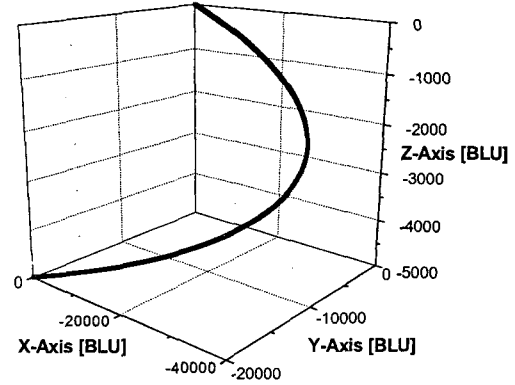
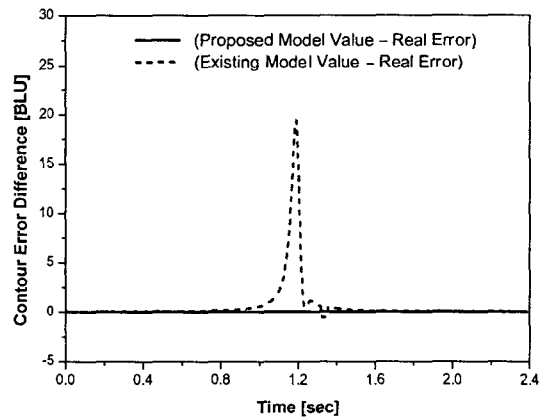
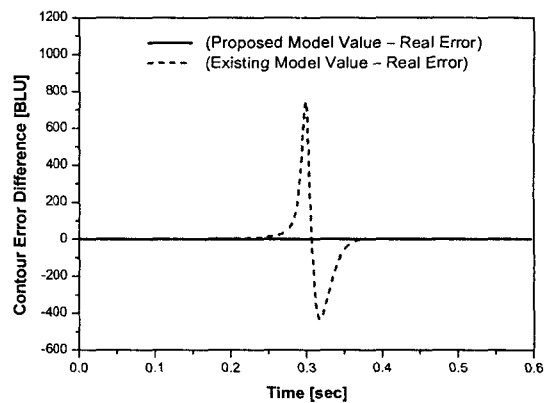


Fig. 3 Parametric curve



(a)



(b)

Fig. 4 Comparison of the proposed and existing contour error models: (a) 1 m/min; (b) 4 m/min

식 (11)의 윤곽은 꺾이는 점에서 최소 곡률반경이 약 1500 BLU(즉, 0.75 mm)이다. Fig. 4의 결과로부터 기존의 윤곽오차 모델은 윤곽의 곡률이 큰 부분에서 특히 고속 이송시에 정확도가 크게 저하되는 것을 알 수 있다. 반면에 제시된 윤곽오차 모델은 전체 윤곽에서 이송속도에 관계없이 수치해석의 결과와 거의 일치함을 볼 수 있다. 즉, 수치해석 결과와의 최대 차이가 1 m/min에서는 약  $8 \times 10^{-4}$  BLU, 4 m/min에서는 약  $5 \times 10^{-2}$  BLU 정도로서 충분한 정확도를 검증할 수 있다 따라서 제시된 윤곽오차 모델은 미세한 윤곽의 고속가공에 효과적으로 쓰일 수 있다.

### 3.2 제시된 3축 연동제어기의 윤곽추적 성능

매개변수로 표현되는 여러 가지 형상의 윤곽과 보편적으로 사용되는 G 코드로 이루어진 윤곽에 대해, CNC 공작기계에 쓰이고 있는 독립축 제어 방법과 제시된 3 차원 윤곽오차 모델을 포함하는 연동제어 방법을 적용한 컴퓨터 시뮬레이션을 각각 수행하였다. 각 경우에 대해 윤곽오차의 '절대값'으로 윤곽추적 성능을 비교하였다. 매개변수 형식의 윤곽에 대해서는 3.1 절에서와 마찬가지로 실시간 곡선 보간기를 적용하여 보간하였다. 시뮬레이션에서 이송속도는 모두 4 m/min으로 하였다. 독립축 제어 방법으로는 비례 제어와 PID 제어의 두 가지 방법을 적용하였다. PID 제어기는 Table 1과 같은 시스템의 각 축에 대해 오버슈트(overshoot)가 없고 정착시간(settling time)이 0.2 s 미만이 되도록 설계되었다. 그 결과, 비례, 미분 및 적분 게인을 X와 Y축에 대해 각각 0.69, 0.06, 0.03 으로, Z축에 대해서는 각각 0.6, 0.05, 0.02 로 설정하였다.

먼저, Fig. 3의 윤곽추적에 대한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 결과에서 제시된 연동제어기는 두 독립축 제어기와 비교해 최대 윤곽오차를 1/23 이하로 크게 줄이며 전체적인 윤곽정확도를 실질적으로 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

다음으로 아래 식 (12)로 표현되는 Fig. 6과 같이 곡률반경이 10000 BLU(즉, 5 mm)인 나선형(helical) 윤곽을 추적하는 경우에 대한 윤곽오차를 비교하면 Fig. 7과 같다.

$$\begin{cases} x = 1.0 \times 10^4 - 1.0 \times 10^4 \cos 27u \\ y = 1.0 \times 10^4 \sin 27u \\ z = -2.7 \times 10^4 u \end{cases} \quad (0 \leq u \leq 1) \quad (12)$$

결과에서 보는 바와 같이 제시된 연동제어를 적용할 경우, 독립축 제어를 하는 경우와 비교해 과도

응답 구간뿐만 아니라 정상상태에서도 윤곽성능을 크게 향상시킬 수 있음을 볼 수 있다.

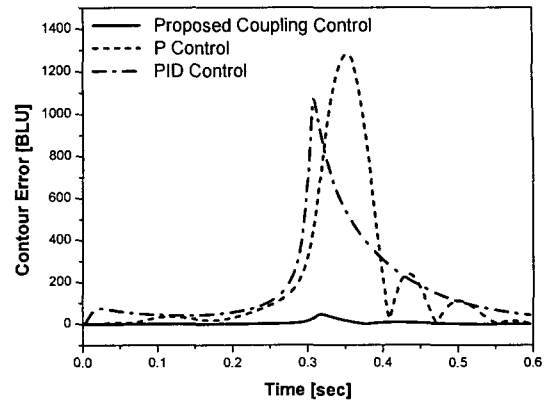


Fig. 5 Comparison of contour errors of the proposed coupling controller and the uncoupled P and PID controllers for the parametric curve in Fig. 3

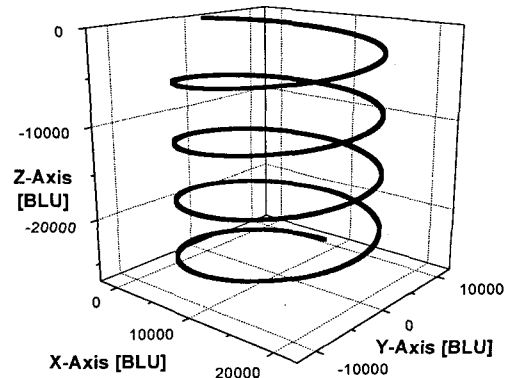


Fig. 6 Helical curve

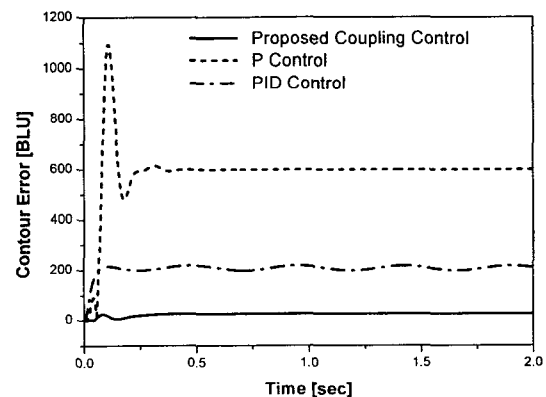


Fig. 7 Comparison of contour errors of the proposed coupling controller and the uncoupled P and PID controllers for the helical curve

세번째로 3 차원 타원형 윤곽에 대해 제시된 연동제어기법을 적용시켜 성능을 평가하였다. 식 (13)으로 정의되는 Fig. 8 의 타원형 곡선은 최소 곡률반경이 10000 BLU인 최고점과 최저점 부근에서 윤곽의 비선형성으로 인해 윤곽오차가 커질 수 있다.

$$\begin{cases} x = 2.0 \times 10^5 \cos(2u + 0.5)\pi \\ y = 4.6 \times 10^4 - 4.6 \times 10^4 \sin(2u + 0.5)\pi \\ z = 1.0 \times 10^4 \cos(2u + 0.5)\pi \end{cases} \quad (13) \quad (0 \leq u \leq 1)$$

Fig. 9 의 결과와 같이, 독립축 제어의 경우 기준궤적상의 곡률이 큰 지점에서 윤곽오차가 크게 발생하고 변동하는 것을 볼 수 있으며, 제시된 연동제어를 적용할 경우 윤곽오차의 증가를 크게 줄일 수 있음을 확인할 수 있다.

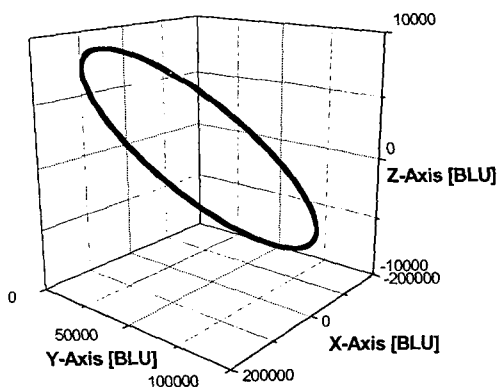


Fig. 8 Elliptic curve

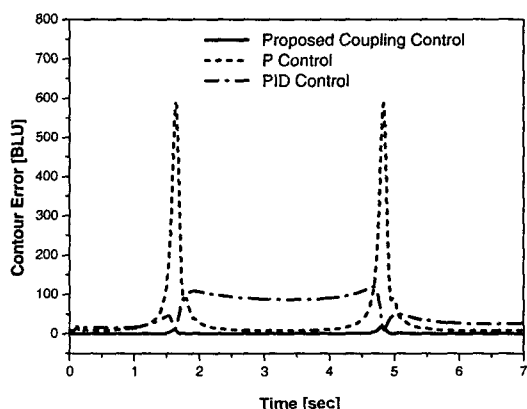


Fig. 9 Comparison of contour errors of the proposed coupling controller and the uncoupled P and PID controllers for the elliptic curve

네번째 시뮬레이션 대상은 아래 식 (14)로 표현되는 Fig. 10 의 3 차(cubic) 곡선 윤곽으로서, 꺾이는 두 부분의 곡률반경이 약 10000 BLU와 20000 BLU로서 이 부근에서 윤곽오차의 증가를 예상할 수 있다.

$$\begin{cases} x = -5.0 \times 10^4 u^3 - 2.7 \times 10^5 u \\ y = -4.5 \times 10^6 u^3 + 6.3 \times 10^6 u^2 - 2.1 \times 10^6 u \\ z = -2.0 \times 10^4 u^3 + 3.0 \times 10^4 u^2 - 3.0 \times 10^4 u \end{cases} \quad (14) \quad (0 \leq u \leq 1)$$

위의 윤곽추적에 대한 응답을 Fig. 11 에 나타내었는데 앞의 결과들과 마찬가지로 기존의 독립축 제어방식에서는 곡률반경이 작아지는 영역에서 윤곽오차가 증가함을 볼 수 있다. 비례 제어기의 경우, 꺾인 두 점에서의 값을 비교해 볼 때 곡률이 커지는 부근에서 윤곽오차가 크게 증가함을 확인할 수 있다. PID 제어기는 적분제어 작용으로 인하여 Fig.

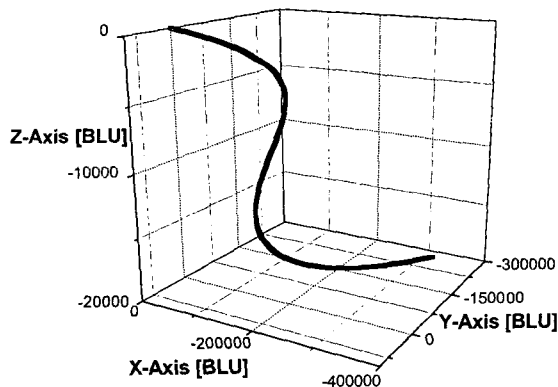


Fig. 10 Cubic curve

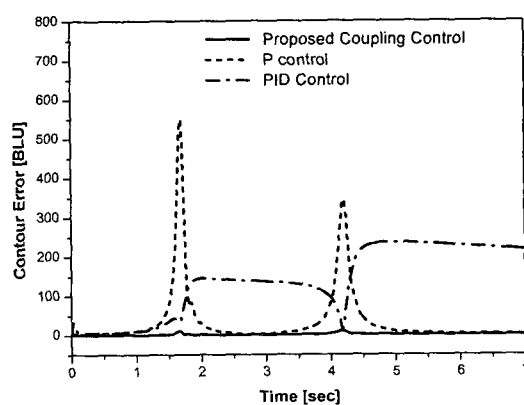


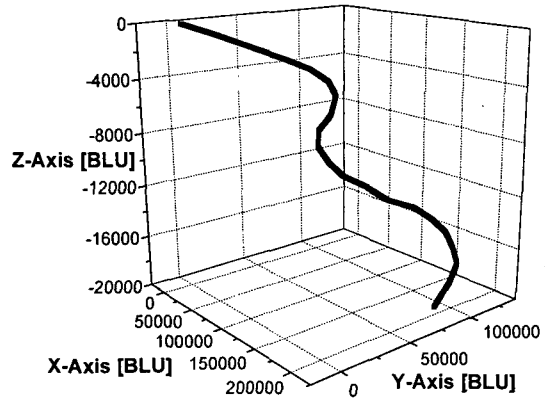
Fig. 11 Comparison of contour errors of the proposed coupling controller and the uncoupled P and PID controllers for the cubic curve

10 과 같은 비선형 또는 모서리 형태의 윤곽에 대해, 특히 고속의 이송시에 윤곽상의 큰 오버슈트를 발생시키는데 Fig. 11의 결과가 이를 보여준다. 반면에 제시된 연동제어기는 이들 영역에서의 윤곽오차를 크게 감소시킬 수 있음을 볼 수 있다.

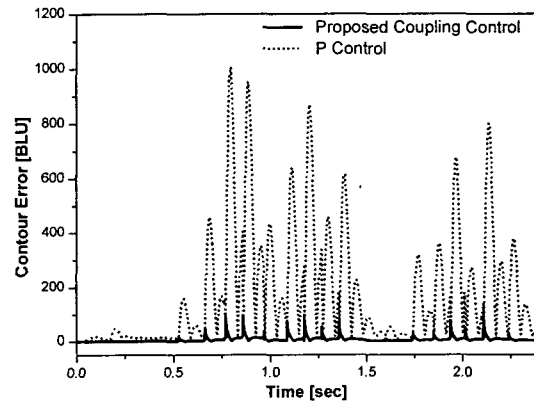
끝으로 Fig. 12는 아래 Table 2의 G 코드에 대한 선형 보간을 통해 얻은, 직선 선분의 조합으로 이루어진 3차원 궤적을 나타낸다. 이 궤적을 가감속 없이 추적하는 경우의 윤곽오차를 Fig. 13에 비교하였다. 결과에서 보듯이 제시된 연동제어기는 속도가 불연속이 되는 점들을 갖는 궤적에 대해서도 우수한 윤곽추적 성능을 보임을 알 수 있으며, 이것은 제시된 연동제어기가 기존의 범용 보간 코드와 공용될 수 있음을 입증해준다. 반면에 독립축 제어기들은 결과와 같이 고속의 이송에서 불연속 점에 대해 윤곽오차가 크게 증가하기 때문에 반드시 가감속이 필수적이다. 이것은 곧 가공시간의 증가로 귀결되므로, 제시된 연동제어기는 기존 독립축 제어기와 비교해 생산성 향상을 도모할 수 있다고 판단된다.

**Table 2** G code (dimension in mm and feedrate in m/min)

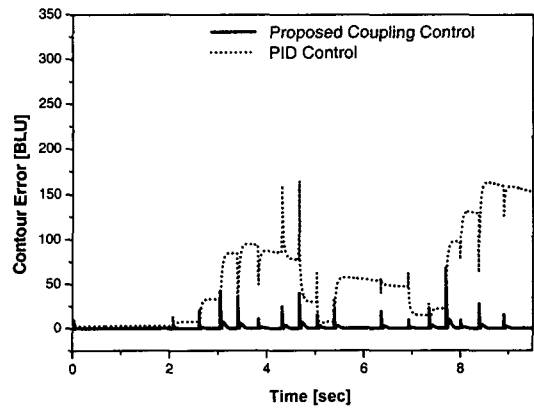
G01	X4	Y10	Z-0.45	F4.0
G01	X8	Y21	Z-1	
G01	X12	Y32	Z-1.54	
G01	X16	Y40	Z-2	
G01	X21	Y45	Z-2.52	
G01	X27	Y45	Z-3	
G01	X32	Y40	Z-3.59	
G01	X36	Y33	Z-4	
G01	X41	Y30	Z-4.49	
G01	X47	Y31	Z-5	
G01	X52	Y34	Z-5.51	
G01	X56	Y41	Z-6	
G01	X60	Y48	Z-6.598	
G01	X65	Y56	Z-7	
G01	X70	Y61	Z-7.51	
G01	X75	Y64	Z-8	
G01	X80	Y64	Z-8.52	
G01	X86	Y62	Z-9	
G01	X91	Y55	Z-9.43	
G01	X95	Y46	Z-10	



**Fig. 12** 3D contour composed of linear segments



(a)



(b)

**Fig. 13** Comparison of contour errors of the proposed coupling controller and the uncoupled (a) P and (b) PID controllers for the 3D contour of line segments

## 4. 결 론

## 후 기

본 논문에서는 3축 CNC 공작기계를 이용한 고속 윤곽가공에서 윤곽정확도를 향상시키기 위해, 새로운 3차원 윤곽오차 모델에 근거한 3축 연동제어기를 제시하였다. 기존 연동제어기의 윤곽오차 모델은 비선형 윤곽에 대한 고속의 이송에서 정확도가 현저히 떨어지는 문제점이 있으며, 대부분 2차원 윤곽에만 국한된 2차원 윤곽오차 모델로 3차원 윤곽가공에는 적용될 수 없다. 제시된 연동제어기의 3차원 윤곽오차 모델은 모든 3차원 윤곽에 적용 가능하고, 윤곽의 형상이나 이송속도에 관계없이 실제의 윤곽오차를 정확히 구할 수 있다. 또한 본 모델은 보간기의 출력과 실제 공구 위치 정보만을 필요로 하기 때문에, 제시된 연동제어기는 기존의 다양한 CNC 보간기 및 서보제어 모듈과 용이하게 통합될 수 있다.

3차원 윤곽추적에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하여 제시된 3차원 윤곽오차 모델의 정확도를 검증하였으며, 매개변수로 표현되는 여러 가지 형상의 윤곽과 보편적으로 사용되는 G 코드로 이루어진 윤곽에 대해 CNC 공작기계에 쓰이고 있는 독립축 제어 방법과 제시된 연동제어 방법의 윤곽추적 성능을 비교하였다. 시뮬레이션 결과를 통해, 윤곽오차가 크게 발생할 수 있는 여건에서, 즉 윤곽의 곡률이 크고 고속의 이송인 경우에 제시된 방법이 기존 CNC 시스템의 윤곽정확도를 크게 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 더불어, 제시된 연동제어기가 기존의 범용 보간 코드와 공용될 수 있음도 입증하였다.

앞으로 본 논문의 연동제어기를 포함하는 3축 제어시스템에 대한 시스템 해석을 통해 각 제어기의 계인을 체계적이고 효과적으로 선정하는 방법에 대한 연구가 필요하며, 제시된 연동제어기를 PC 기반의 CNC 공작기계 시스템에 구현하여 실용성 및 시스템의 정확도 개선 정도를 확인할 필요가 있다.

이 논문은 2001년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음 (KRF-2001-003-E00053).

## 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 Feedrate Control for Multiaxis Machine Tools," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 113, pp. 451~457.
- (5) Lee, H. C. and Jeon, G. J., 1999, "Real-time Compensation of Two-dimensional Contour Error in CNC Machine Tools," *Proceedings of the 1999 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 623~628.
- (6) Erkokmaz, K. and Altintas, Y., 1998, "High Speed Contouring Algorithm for CNC Machine Tools," *Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division*, DSC-Vol. 64, pp. 463~469.
- (7) Jee, S. and Yun, S., 2002, "Adaptive Cross-Coupling Control System Considering Cutting Effects," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 26, No. 8, pp. 1480~1486.
- (8) Lo, C. C., 1992, "Cross-Coupling Control of Multi-Axis Manufacturing Systems," Ph.D. Dissertation, The University of Michigan.