

다축 CNC 시스템의 통합형 제어기 설계

지성철[#], 이학철^{*}

Integrated Controller Design for Multi-Axis CNC Systems

Sungchul Jee[#] and Hakchul Lee^{*}

ABSTRACT

This paper proposes a controller design analysis for three-axis CNC systems considering both contouring and tracking performance. The proposed analysis inclusively combines axial controllers for each individual feed drive system together with cross-coupling controller at the beginning design stage as an integrated manner. These two controllers used to be separately designed and analyzed since they have different control objectives. The proposed scheme includes a stability analysis for the overall control system and a performance analysis in terms of contouring and tracking accuracy. Computer simulation is performed and the results show the validity of the proposed methodology. Further, the results can be used as a basic guideline in systematic and comprehensive controller design for multi-axis CNC systems.

Key Words : Multi-axis CNC (다축 컴퓨터수치제어), Tracking (위치추종), Axial controller (독립축 제어기), Contouring (윤곽제어), Cross-coupling controller (교차축 연동제어기), Integrated controller design (통합형 제어기 설계)

1. 서론

CNC 공작기계산업분야는 제조업의 경쟁력을 좌우하는 자본재산업 중 핵심적인 정밀설비산업으로서, 독일, 일본을 위시한 선진국들이 국가의 기간산업으로 인식하고 첨단화를 통한 국가경쟁력 제고를 위해 노력을 기울여온 중요한 분야이다. 고부가가치의 정밀한 제품을 만들어내기 위해서는 CNC 공작기계와 같은 제조시스템의 고능률화, 고정밀화가 필수적이며, 이를 위해서는 고속화, 지능화, 초정밀화 등에 관련된 생산기술의 발전이 요구

된다. 갈수록 증대되는 이와 같은 요구에 대응하여 가공시스템의 정밀도를 향상시키기 위해 정교한 CNC 에 대한 지속적인 개발이 이루어져 왔으며, 근래에는 PC 기반의 개방형 CNC 가 개발되어 보급되고 있는 상황이다.

CNC 공작기계에 대한 기존의 제어기들은 대부분 입력된 이송속도에 맞춰 개별적인 구동축의 위치추적 성능을 극대화하기 위한 독립축 제어기(axial controller)이다. 이들은 전통적인 비례제어기를 비롯한 피이드백(feedback) 제어기군¹⁻⁹ 과 피드백제어에 피이드포워드(feedforward) 신호를 추가한

☞ 접수일: 2006년 1월 31일; 게재승인일: 2006년 3월 10일

교신저자: 단국대학교 기계공학과

E-mail: scjee@dku.edu, Tel: (02) 709-2911

* 단국대학교 대학원 기계공학과

형태의 피이드포워드 제어기군¹⁰⁻¹⁷으로 대별된다. 이 중 위치 비례제어에 속도 피이드포워드 명령을 결합한 구조의 독립축 제어기는 구동축의 동적 응답을 상당 수준 개선시킴으로써 축방향의 추종오차(tracking error)를 줄일 수 있고 그 구조가 간단하여 CNC에 널리 쓰이고 있다. 이 제어기는 추종오차의 감소를 통해 직선경로에 대한 윤곽오차(contour error)를 어느 정도 감소시킬 수 있다. 그러나 공구경로가 곡선일 경우에는 추종오차를 통해 윤곽오차를 제어할 수 없는 취약점과 더불어 더 근본적으로는 추종오차의 감소가 윤곽오차의 감소를 보장해줄 수 없다는 문제점이 있다.

다른 한편으로 윤곽추적 성능을 향상시키기 위해 기준 공구경로로부터 벗어난 거리인 윤곽오차를 구해 이를 바탕으로 구동축들을 연계하여 제어하는 교차축 연동제어기(cross-coupling controller)가 제안되고 있다.¹⁸⁻³⁰ 이 제어기는 피이드백 제어기와 함께 사용되어 윤곽오차를 최소화하는 방향으로 피이드백 제어명령을 보정한다. 추종오차를 통해 윤곽오차를 간접적으로 제어하는 독립축 제어기와는 달리, 교차축 연동제어기는 윤곽오차를 직접 반영함으로써 CNC 시스템의 윤곽정확도 향상에 효과적인 것으로 인정되고 있다.

독립축 제어기와 교차축 연동제어기는 제어목적 자체가 서로 다른 만큼 분리되어 연구되어져 왔다. 교차축 연동제어기의 경우 기 설정된 독립축 제어기의 플랫폼에 두 제어기의 상호영향 등에 대한 포괄적인 해석 없이 추가되어 주로 성능검증에 대한 연구만 이루어졌다. 최근 설계적 관점에서의 연구사례가 소수 발표된 바 있으나,^{26,28,29} 2축 시스템에 국한하여 윤곽제어 성능만 해석되었으며,^{26,28} 거의 유일하게 시도된 3축 시스템에 대한 설계²⁹에서는 독립축 제어기에 대한 설계 후에 교차축 연동제어기를 설계하는 방식을 취함으로써 두 제어기의 상호작용 및 성능의 연관성을 동시에 고려한 근본적인 접근방법이 될 수 없다. 이것은 기하학적인 윤곽오차에 기반한 교차축 연동제어기의 비선형적인 특성상 체계적인 제어시스템 해석이 난해하다는 사실에 기인하며, 이는 현재까지 교차축 연동제어기가 상용화되지 못하고 있는 가장 큰 이유라고 볼 수 있다.

다축 CNC 시스템의 정밀도를 개선하기 위해서는 교차축 연동제어기가 필수적이며, 설계의 시작 단계부터 위치추종 및 윤곽제어 성능을 포괄적으

로 고려하는 통합형 제어시스템의 설계가 반드시 필요하다. 본 논문에서는 독립축의 위치제어에 비례제어기를, 윤곽제어에 PID 제어기를 적용한 3축 CNC 시스템을 대상으로, 독립축 제어기와 교차축 연동제어기의 통합형 해석 기법 및 설계 방향을 제시하여 기존 다축 CNC의 성능 향상을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 다축 통합형 제어시스템의 설계 해석

2.1 교차축 연동제어기 해석

윤곽가공 또는 궤적추적 시스템의 정확도를 나타내는 기준으로서 원하는 경로로부터 벗어난 거리인 윤곽오차가 쓰이는데, 교차축 연동제어기는 이 윤곽오차에 기반하여 전체 구동축의 운동을 조정하므로 윤곽정확도를 상당히 개선시킬 수 있다. 본 논문에서는 교차축 연동제어 시스템에서의 비선형적인 윤곽오차 모델을 추종오차의 함수로 근사화하여, 주어진 시스템에서의 윤곽오차와 추종오차의 상호 연관성을 밝히고, 이를 제어시스템의 해석 및 설계에 반영하였다. 적용할 3차원 윤곽오차 모델³⁰은 Fig. 1과 같다.

이 모델에서는 현재의 공구위치 $P(k)$ ($P(kT)$)를 간단히 표기함, T 는 샘플주기에 가장 가까운 기준점(reference point)인 $R(k-d)$ (d 는 뒤진 시간 단계)와 이 점에 이웃하는 두 기준점인 $R(k-d-1)$ 과 $R(k-d+1)$ 로 구성되는 이른바 가변원도우를 옮겨가며 이 세 기준점들을 바탕으로

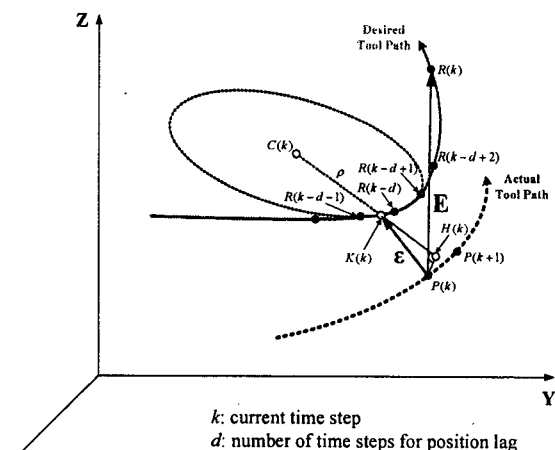


Fig. 1 3D contour error model

공간상의 원을 형성하여 $P(k)$ 로부터 이 원이 놓여 있는 평면에 수직인 교점 $H(k)$ 까지의 벡터, 그리고 $H(k)$ 로부터 원의 중심 $C(k)$ 의 방향으로 원 ($K(k)$)에 이르는 벡터의 합으로 윤곽오차가 정의되었다.

본 연구에서는 이러한 3 차원 윤곽오차를 근사 화합에 있어 해석상의 편의를 위해 상기의 윤곽오차 벡터를 각각 XY, YZ, ZX 평면 중 두 평면에 투영시키고 각 평면상에서 각 축방향으로의 윤곽오차 성분을 구하여 해석하였다. 이것은 예를 들어 XY 평면으로 투영된 윤곽오차 벡터(Fig. 2의 ϵ_1)는 3 차원상의 성분인 ϵ_x, ϵ_y 를 그대로 반영할 수 있기 때문이다. 이를 구하기 위해 Fig. 2와 같이 점 $K(k) \approx R(k-d)$ 로 간주하고, 점 $C(k)$ 와 $R(k-d)$ 를 잇는 직선과 $R(k)$ 와 $P(k)$ 를 잇는 직선의 교점을 $Q(k)$ 로 하면, 윤곽오차 벡터는 다음과 같이 정의된다.

$$\epsilon_1 = \epsilon' + \epsilon'' \quad (1)$$

따라서, 투영된 평면에서 각 선분이 이루는 기하학적인 각들과 위치추중오차로 벡터 ϵ' 와 ϵ'' 을 표현함으로써 윤곽오차와 위치추중오차의 관계를 구할 수 있다.

우선 점 $Q(k)$ 를 점 $R(k-d)$ 에 대해 Taylor 급수로 전개하고 투영된 평면의 각 선분이 이루는

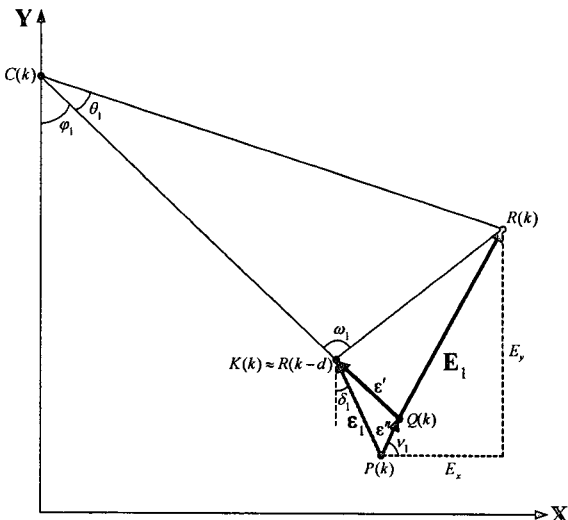


Fig. 2 Contour error vector projected on XY plane

기하학적 관계를 바탕으로 복잡한 전개과정을 거쳐 ϵ_1 의 축방향 성분은 아래 식 (2)와 (3)으로 나타내어질 수 있다.

$$\epsilon_x = (C_1 \cos v_1)E_x + (C_1 \sin v_1)E_y = A_{1x}E_x + A_{1y}E_y \quad (2)$$

$$\epsilon_y = (C_2 \cos v_1)E_x + (C_2 \sin v_1)E_y = B_{1x}E_x + B_{1y}E_y \quad (3)$$

여기서,

$$C_1 = \frac{1}{C_5} (C_3 \cos v_1 + C_4 \sin v_1) (-\sin \phi_1) + \left(\frac{1}{C_5} - 1 \right) \cos v_1$$

$$\approx (C_3 \cos v_1 + C_4 \sin v_1) (-\sin \phi_1)$$

$$C_2 = \frac{1}{C_5} (C_3 \cos v_1 + C_4 \sin v_1) \cos \phi_1 + \left(\frac{1}{C_5} - 1 \right) \sin v_1$$

$$\approx (C_3 \cos v_1 + C_4 \sin v_1) \cos \phi_1$$

$$C_3 = -\sin \phi_1 - \frac{\cos(\phi_1 - v_1)}{\sin \omega_1} \cos v_1 \cos \omega_1$$

$$C_4 = \cos \phi_1 - \frac{\cos(\phi_1 - v_1)}{\sin \omega_1} \sin v_1 \cos \omega_1$$

$$C_5 = \frac{\sqrt{1 - \cos^2(\omega_1 + \delta_1 - \phi_1)}}{\cos(\delta_1 - v_1) \sin \omega_1} \cos(\phi_1 - v_1) \approx 1$$

$$A_{1x} = C_1 \cos v_1; \quad A_{1y} = C_1 \sin v_1$$

$$B_{1x} = C_2 \cos v_1; \quad B_{1y} = C_2 \sin v_1$$

즉, 3 차원 윤곽오차 벡터를 XY 평면에 투영시켜 해석함으로써 식 (2) 및 (3)과 같이 X, Y 축 방향의 윤곽오차 성분을 기하학적인 각들과 위치추중오차 성분의 조합으로 정의하는 것이 가능하다. 또한 YZ 평면상에 역시 같은 방법을 적용함으로써 윤곽오차 벡터의 성분을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\epsilon_y = (D_1 \cos v_2)E_y + (D_1 \sin v_2)E_z = B_{2y}E_y + B_{2z}E_z \quad (4)$$

$$\epsilon_z = (D_2 \cos v_2)E_y + (D_2 \sin v_2)E_z = C_{2y}E_y + C_{2z}E_z \quad (5)$$

여기서, $v_2 = \tan^{-1}(E_z/E_y)$ 이며, D_1, D_2 는 YZ 평면의 각들을 이용하여 C_1, C_2 와 같은 형태로 정의된다. 마찬가지로, ZX 평면에 대해 다음 형태의 관계가 얻어진다.

$$\epsilon_z = C_{3z}E_z + C_{3x}E_x \quad (6)$$

$$\epsilon_x = A_{3z}E_z + A_{3x}E_x \quad (7)$$

결론적으로, 3 차원 윤곽오차를 위치추종오차의 함수로 표현할 수 있으며, 이것은 다음 설계과정에서의 여러 해석을 가능하게 한다.

2.2 다축 통합형 제어시스템의 안정성 해석

본 연구에서는 각 독립축 제어기를 위치비례 피드백 제어기로 구성하고 이를 PID 교차축 연동제어기와 결합한 Fig. 3 의 제어시스템을 대상으로 전체 시스템의 안정성 해석을 수행하였다.

Fig. 3 에서와 같이 각 구동축의 위치 피드백 제어기의 비례 게인 $K_{pi}(i=x,y,z)$ 를 원소로 하는 대각행렬을 \mathbf{K}_p 라 하고, 교차축 연동제어기 행렬을 $\mathbf{G}_c(=G_c\mathbf{I})$ 라 한다. 본 논문에서는 교차축 연동 제어에 아래의 제어법칙을 적용하였다.

$$G_c(z) = C_p + C_i \frac{Tz}{z-1} + C_d \frac{z-1}{Tz} \quad (8)$$

이송 드라이브 시스템의 전달함수 행렬을 $\mathbf{G}(z)$ 라 하면 이것의 대각원소는 각 구동축에 대한 개회로 게인 K_i 와 시상수 τ_i , 샘플주기 T 로 다음과 같이 정의된다.

$$G_i(z) = \frac{H_{vi}z + H_{oi}}{(z-1)(z-r_i)} \quad (i=x,y,z) \quad (9)$$

여기서,

$$\begin{aligned} H_{vi} &= K_i(T - \tau_i + \tau_i r_i) \\ H_{oi} &= K_i(\tau_i - \tau_i r_i - T r_i) \\ r_i &= \exp(-T/\tau_i) \end{aligned}$$

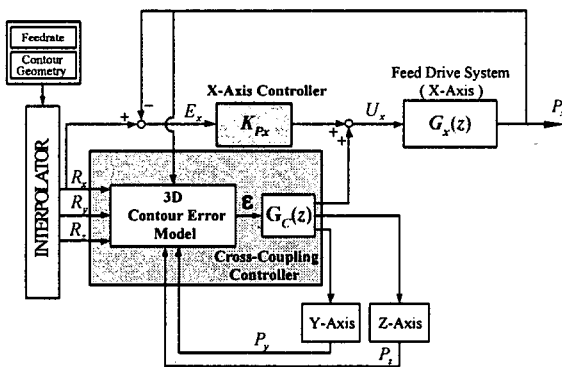


Fig. 3 Integrated control system

위와 같은 경우 각 축의 위치출력 벡터 $\mathbf{P}(z)$ 와 제어신호 벡터 $\mathbf{U}(z)$ 는 다음과 같이 나타내어 진다.

$$\mathbf{P}(z) = \mathbf{G}(z)\mathbf{U}(z) \quad (10)$$

$$\mathbf{U}(z) = \mathbf{K}_p\mathbf{E}(z) + \mathbf{G}_c\boldsymbol{\varepsilon}(z) \quad (11)$$

앞 절에서와 같이 각 축방향의 윤곽오차 성분 $\boldsymbol{\varepsilon}_i$ 를 투영된 평면상의 위치추종오차 성분의 조합으로 정의하였으므로 식 (11)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\mathbf{U}(z) = [\mathbf{K}_p + \mathbf{G}_c(z)\mathbf{M}(z)]\mathbf{E}(z) \equiv \mathbf{T}(z)\mathbf{E}(z) \quad (12)$$

여기서, $\mathbf{M}(z)$ 는 $\boldsymbol{\varepsilon}(z)$ 와 $\mathbf{E}(z)$ 사이의 변환행렬로서, 식 (2)-(7)로부터 다음과 같이 정의되며

$$\mathbf{M}(z) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} A_{1x} + A_{3x} & A_{1y} & A_{3z} \\ B_{1x} & B_{1y} + B_{2y} & B_{2z} \\ C_{3x} & C_{2y} & C_{2z} + C_{3z} \end{bmatrix} \quad (13)$$

식 (13)에서 아래첨자 1, 2, 3 은 계수들이 각각 XY, YZ, ZX 평면상에서 정의됨을 의미한다. 식 (10)과 (12)를 연립하여 정리하면 위치오차 벡터와 위치출력 벡터 사이에 다음의 관계를 구할 수 있다.

$$\mathbf{P}(z) = \mathbf{G}(z)\mathbf{T}(z)\mathbf{E}(z) \equiv \boldsymbol{\Omega}(z)\mathbf{E}(z) \quad (14)$$

해석의 편의상, 식 (14)를 XY 와 YZ(또는 ZX) 평면으로 나누어 각각에 대해 아래의 시스템 특성방정식에 적용하여 전체 제어시스템의 안정성 해석을 수행한다.

$$\det[\mathbf{I} + \boldsymbol{\Omega}_{ij}(z)] = 0 \quad (15)$$

여기서, ij 는 투영된 평면을 나타낸다. 해석 과정에서 일단 X, Y, Z 축을 동일한 시스템 파라미터를 갖는 대칭 시스템(matched system)으로 가정하면, 식 (9)에서 $H_{vi} = H_{1i}$, $H_{oi} = H_{0i}$, $r_i = r$ 이고 위치 피드백 제어기 게인 $K_{pi} = K_p$ 라 할 수 있으므로 식 (15)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\boldsymbol{\Omega}_1(z)\boldsymbol{\Omega}_2(z) = 0 \quad (16)$$

여기서,

$$\Omega_1(z) = (z-1)(z-r) + K_p(H_1z + H_0)$$

$$\Omega_2(z) = (z-1)(z-r) + [K_p + G_c(z)M](H_1z + H_0)$$

$$M = A_{1x} + B_{1y} \text{ (XY plane) or } B_{2y} + C_{2z} \text{ (YZ plane)}$$

투영된 두 평면에 정의되는 시스템에 대해 Jury 의 안정성 판별 조건³¹을 적용하며, 이 때 각기 다른 (mismatched) 이송 드라이브 시스템 파라미터 각각에 대한 안정성 해석을 반복 수행함으로써 3 축 시스템이 안정한 제어기 게인의 공통 범위를 구할 수 있다.

그 결과, $\Omega_1(z)$ 에 대한 판별 조건으로부터 다음과 같이 위치 피드백 제어기 게인에 대한 안정성 범위를 구할 수 있으며

$$K_p < \min_{i=x,y,z} [(1-r_i)/H_{0i}] \quad (17)$$

이를 $\Omega_2(z)$ 에 대한 판별식에 반영하여 교차축 연동제어기의 게인 C_p, C_l, C_d 에 대한 조건을 찾을 수 있다. 이 때 M 은 2.1 절에서 정의한 각도들로 복잡하게 정의되므로 컴퓨터 프로그램을 이용하여 그 가능한 범위를 구하고, 제어기 게인의 안정성 범위가 최소화되도록 판별 조건에 반영한다.

2.3 다축 통합형 제어기의 성능 해석

Fig. 3의 3 축 CNC 시스템에 대하여 3 차원 원호 이송에 있어 윤곽추적 및 위치추종의 두 가지 관점에서 성능 해석을 수행하였다. 본 해석에서는 편의상 3 축이 서로 대칭인 시스템으로 가정하였다.

기준 위치입력 벡터 $\mathbf{R}(z)$ 에 대해 위치추종오차와 윤곽오차 벡터는 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{\varepsilon}(z) = z^{-d}\mathbf{R}(z) - \mathbf{P}(z) \quad (18)$$

$$\mathbf{E}(z) = \mathbf{R}(z) - \mathbf{P}(z) \quad (19)$$

식 (18)에서 d 는 전술한 바와 같이 뒤진 시간단계를 나타낸다. 식 (10), (11), (18)과 (19)로부터 다음의 관계를 얻을 수 있다.

$$\mathbf{P}(z) = \mathbf{H}(z)\mathbf{R}(z) \quad (20)$$

$$\mathbf{H}(z) \equiv [\mathbf{I} + \mathbf{G}(z)\{\mathbf{K}_p + \mathbf{G}_c(z)\}]^{-1} \times \mathbf{G}(z)[\mathbf{K}_p + z^{-d}\mathbf{G}_c(z)] \quad (21)$$

이 때 3 차원 원호의 입력 벡터 $\mathbf{R}(z)$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{R}(z) = R_0\mathbf{u}C(z) + R_0\mathbf{v}S(z) \quad (22)$$

여기서, R_0 는 원의 반경을, \mathbf{u} 와 \mathbf{v} 는 원의 정규 직교기저(orthonormal basis)를, $C(z)$ 와 $S(z)$ 는 각각 $\cos \omega kT$ 와 $\sin \omega kT$ (ω : 기준입력 각속도)의 z 변환(z -transform)을 나타낸다. 따라서, 식 (20)과 (22)에 의해, 위치출력 벡터는 다음과 같이 정리된다.

$$\mathbf{P}(z) = \mathbf{U}_H(z)C(z) + \mathbf{V}_H(z)S(z) \quad (23)$$

여기서, $\mathbf{U}_H(z) = R_0\mathbf{H}(z)\mathbf{u}$, $\mathbf{V}_H(z) = R_0\mathbf{H}(z)\mathbf{v}$ 이다.

식 (23)의 이산시간 응답을 구하기 위해 다음과 같이 정의하면

$$\mathbf{L}(e^{j\omega T}) = \mathbf{U}_H(e^{j\omega T}) - j\mathbf{V}_H(e^{j\omega T}) = \mathbf{a} + j\mathbf{b} \quad (24)$$

실벡터 \mathbf{a} 와 \mathbf{b} 는 다음과 같으며

$$\mathbf{a} = \text{Re}\{\mathbf{L}(e^{j\omega T})\} \quad (25)$$

$$\mathbf{b} = \text{Im}\{\mathbf{L}(e^{j\omega T})\} \quad (26)$$

위치출력의 정상상태 응답은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(kT) &= \text{Re}\{\mathbf{L}(e^{j\omega T})e^{j\omega kT}\} \\ &= \mathbf{a} \cos \omega kT - \mathbf{b} \sin \omega kT \end{aligned} \quad (27)$$

3 차원 원호 윤곽추적에 대한 윤곽오차의 크기는 다음과 같이 정의되며

$$\begin{aligned} \varepsilon = \|\mathbf{\varepsilon}\| &= (\mathbf{P}^T\mathbf{P})^{1/2} - R_0 \\ &= \left[\frac{1}{2}(\|\mathbf{a}\|^2 + \|\mathbf{b}\|^2) + \frac{1}{2}(\|\mathbf{a}\|^2 - \|\mathbf{b}\|^2)\cos 2\omega kT \right. \\ &\quad \left. - \mathbf{a}^T\mathbf{b} \sin 2\omega kT \right]^{1/2} - R_0 \end{aligned} \quad (28)$$

식 (25)와 (26)에서 3 축이 대칭인 경우 $\|\mathbf{a}\| = \|\mathbf{b}\|$, $\mathbf{a}^T\mathbf{b} = 0$ 이므로, 윤곽오차의 크기는 아래와 같이 얻어진다.

$$\varepsilon = \|\mathbf{a}\| - R_0 = \|\operatorname{Re}\{\mathbf{L}(e^{i\omega T})\}\| - R_0 \quad (29)$$

한편, 식 (19)와 (20)으로부터 위치추종오차 벡터는 기준 위치입력 벡터에 대해 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{E}(z) = [\mathbf{I} - \mathbf{H}(z)]\mathbf{R}(z) \equiv \mathbf{J}(z)\mathbf{R}(z) \quad (30)$$

여기에 식 (22)의 입력 벡터를 대입하고 앞서 위치 출력 응답을 구하는 것과 동일한 과정을 거쳐 정상상태에서 위치추종오차의 크기를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} E &= \|\mathbf{E}\| = (\mathbf{E}^T \mathbf{E})^{1/2} \\ &= R_0 \|\operatorname{Re}\{\mathbf{J}(e^{i\omega T})\mathbf{u} - j\mathbf{J}(e^{i\omega T})\mathbf{v}\}\| \end{aligned} \quad (31)$$

위에서 유도한 식들의 결과는 모두 미지수 d 에 의해 결정된다. 윤곽오차 벡터는 점 $R(k-d)$ 에서의 속도 벡터에 수직인 조건을 나타내는 아래 식 (32)와 식 (18), (27)을 동시에 만족하는, 정상상태에서 미지의 상수인 d 를 수치해석을 통해 구할 수 있다.

$$\varepsilon(kT)^T \dot{\mathbf{R}}((k-d)T) = 0 \quad (32)$$

그 결과, 다축 제어시스템의 정상상태 윤곽추적 및 위치추종 성능을 작동조건(이송속도 및 곡률반경)과 제어기 계인들의 변화에 맞춰 정확히 예측하는 것이 가능함에 따라, 이 결과를 동시에 고려하여 다축 통합형 제어기 설계에 적용할 수 있다.

3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

3.1 안정성 해석 결과

앞에서 제시한 교차축 연동제어기의 해석을 바탕으로 하는 안정성 해석 방법의 타당성을 검증하기 위해 그 결과를 컴퓨터 시뮬레이션의 결과와 비교하였다. Table 1 과 같은 시스템에 대해 2.2 절의 안정성 해석을 수행하면 $0 < K_p < 16.64$ 의 범위와 Fig. 4 및 Fig. 5의 안정성 영역(그림에서 'Analytic'으로 표시)이 얻어진다. 이것은 $K_p = 4$ 인 경우의 결과를 나타내는데, K_p 에 따라 그 범위가 달라지게 된다. Fig. 4와 Fig. 5에는 별도의 컴퓨터 시뮬레

이션을 통해 구한 교차축 연동제어기 계인의 안정한 경계(그림에서 'Simulation'으로 표시)도 함께 도시하였다. 결과에서 볼 수 있는 바와 같이 제시된 안정성 해석 방법이 적절함을 확인할 수 있다.

Table 1 System parameters

Parameters	X-axis	Y-axis	Z-axis
Open-loop gain (s ⁻¹)	121	118	83
Time constant (s)	0.025	0.03	0.01
Basic length unit (BLU)	0.5 μm		
Sampling time (s)	0.001		

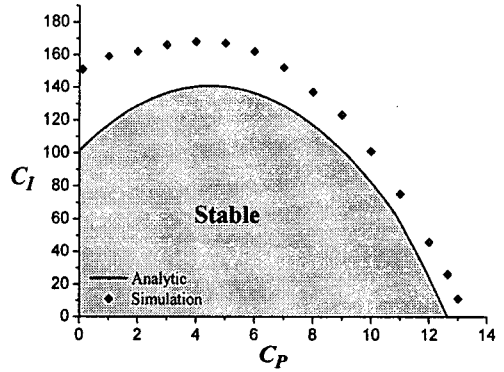


Fig. 4 Stability range for controllers gains C_p and C_i

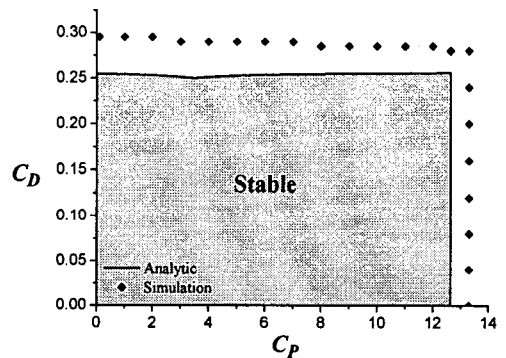


Fig. 5 Stability range for controllers gains C_p and C_d

3.2 성능 해석 및 설계 결과

2.3 절의 해석을 기반으로 피이드백 제어기 및 교차축 연동제어기 계인의 변화에 따른 윤곽추적 및 위치추종 성능을 평가하여 다축 통합형 제어기

의 기초설계 가이드라인을 제시하고 설계 예에 대한 결과를 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 3 축이 모두 Table 1 의 X 축 시스템 파라미터로 대칭이고, 반경이 5 mm 인 3 차원 원호 윤곽을 4 m/min 의 이송속도로 추적하는 경우를 가정하였다.

먼저 게인 변화에 따른 성능을 Fig. 6 과 Fig. 7 에 나타내었다. 이 그림의 결과는 식 (29)와 (31)에 의한 것이며 식 (8)의 교차축 연동제어기를 다음과 같이 설정하여 비례 게인의 변화를 고려하였다.

$$G_C(z) = C_p \left[1 + 2.615 \frac{Tz}{z-1} + 0.023 \frac{z-1}{Tz} \right] \quad (33)$$

Fig. 6 과 Fig. 7 의 결과로부터 교차축 연동제어기 게인(C_p)과 피드백 제어기 게인(K_p)의 증가에 따라 윤곽오차와 위치추종오차가 각각 감소하게 됨을 볼 수 있어 각 제어기의 역할을 확인할 수 있다. 이에 추가하여, Fig. 6 에서 일정한 C_p 에 대해 K_p 가 작은 범위(이 결과에서는 C_p 에 따라 약 0.4~1.6 이하)에서는 K_p 의 증가가 윤곽오차를 크게 하고, K_p 가 위의 범위를 넘어서게 되면 K_p 를 증가시켜 윤곽오차를 다소 줄일 수 있음을 알 수 있다. 이 때 K_p 의 증가에 따른 윤곽오차의 감소는 C_p 가 작을수록 뚜렷하고, C_p 가 커짐에 따라 그 효과가 미미하다. 또한, Fig. 7 에서는 K_p 가 아주 작은 경우에만(예를 들어 $K_p = 0.5$) 위치추종오차가 C_p 가 작은 범위에서 C_p 의 증가에 따라 감소하게 되는 사실을 알 수 있다.

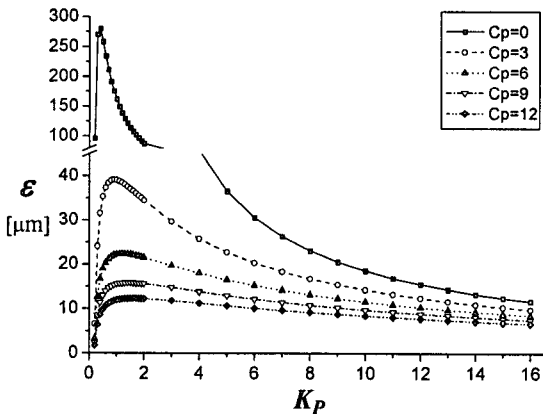


Fig. 6 Variation of contour errors with controller gains K_p and C_p

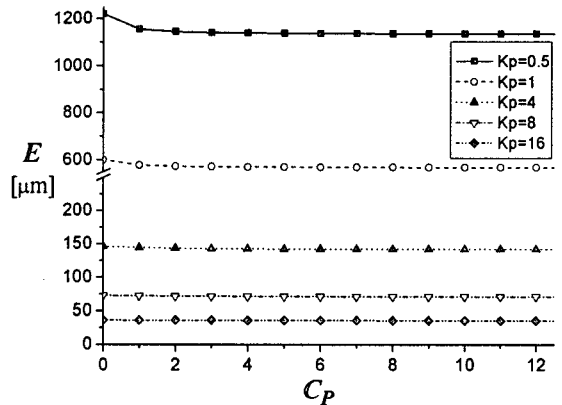


Fig. 7 Variation of tracking errors with controller gains K_p and C_p

이 결과들로부터 통합형 제어기의 설계에 있어 최고의 윤곽추적 성능은 C_p 를 크게 하고 K_p 는 가능한 작게 제한하여 얻어질 수 있는 반면 (Fig. 6 의 좌측 하단부), 위치추적 성능은 기본적으로 K_p 를 크게 하여 극대화될 수 있으며 K_p 가 작은 경우에 한해 C_p 의 조정으로 추가 개선될 수 있다고 판단된다.

위의 결과를 Fig. 8 과 Fig. 9 에 등고선으로 나타내었다. 이것은 두 제어성능이 극대화되는 제어기 게인의 조정방향이 게인의 조합에 따라 달라짐 (특히, 윤곽추적 성능)을 보여준다. 이 그림의 결과를 바탕으로 주어진 두 성능사양을 동시에 만족하는 제어기 게인의 범위를 구할 수 있으며, 그

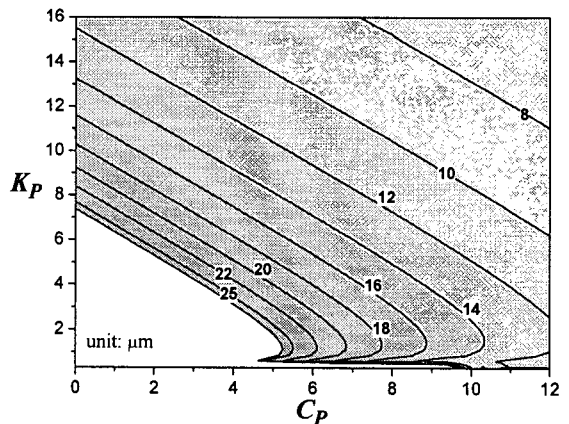


Fig. 8 Contour plot of contour error surface

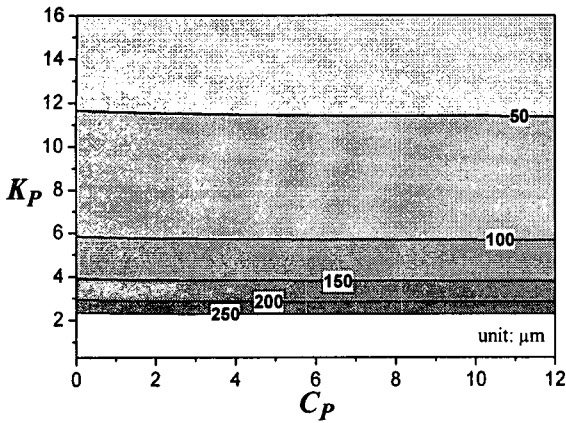


Fig. 9 Contour plot of tracking error surface

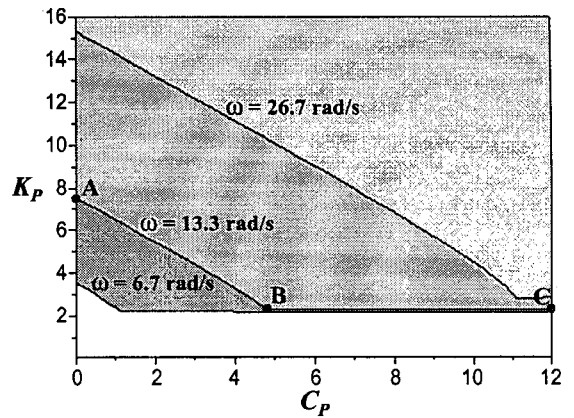


Fig. 10 Design range of controller gains for different input frequencies

설계범위의 예를 Fig. 10에 나타내었다. 성능사양은 윤곽오차가 $25 \mu\text{m}$ 이하, 위치추종오차는 $250 \mu\text{m}$ 이하로 설정되었다. 이 결과는 원호 추적에 있어 입력 각속도의 증가에 따라 제어기 게인의 설계 범위가 감소하게 됨을 보여준다. 제어기 게인의 결정은 작동조건에 따라 Fig. 10의 범위에서 이루어질 수 있다.

두 제어성능 중, 가공정밀도에 크게 영향이 없는 위치추종오차에 대해서는 주어진 사양을 최소한 만족하도록 설계범위에서 K_p 의 최소값을 취하고, 이와 같이 결정된 K_p 에 대해 윤곽추적 성능을 극대화하는 C_p 를 적합한 게인으로 본다면 Fig. 10의 설계범위 중에서 우측 하단 부분(점 C 부근)이 주어진 작동조건에 대해 적합한 게인의 조합으로 판단될 수 있다. 일례로, 기준 각속도 $\omega = 13.3 \text{ rad/s}$ 인 경우 설계범위의 경계에 있는, Fig. 10에 A, B, C로 표시된 점들의 게인을 적용한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 Fig. 11에 비교하여 나타내었다. 점 A에서는 위치추종 성능이 가장 우수하나 과도상태에서 윤곽추종 성능에 상당한 문제가 있음을 볼 수 있다. 점 C의 게인에서는 위치추종오차가 점 A의 경우에 비해 다소 크다고 볼 수 있으나, 주어진 사양을 만족하고 뒤진 시간단계(d)로 보면 점 A의 경우보다 약 2.5 단계 뒤진 것에 불과함을 감안할 때 큰 문제가 되지 않을 것으로 판단된다. 점 C는 점 B와 동일한 위치추종 성능을 보이면서 윤곽오차를 1/2로 감소시켜주므로 이로부터 위의 게인 결정방법이 타당함을 알 수 있다.

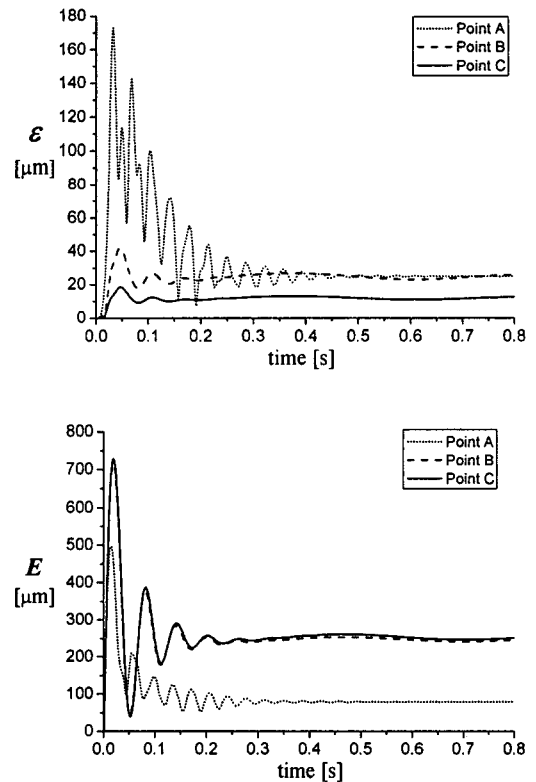


Fig. 11 Simulation results of contour and tracking errors at selected points in the design range

4. 결론

본 연구에서는 3 축 CNC 시스템을 대상으로 독립축 제어기와 교차축 연동제어기로 구성된 다축 통합형 제어시스템에 대하여, 3 차원 윤곽오차 모델의 수학적 해석을 기초로 통합형 제어시스템에 대한 안정성 해석방법을 제시하였으며, 대칭 시스템에 대해 정상상태에서의 윤곽추적 및 위치추종 성능을 정확히 결정할 수 있는 해석기법을 제시하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제시된 방법의 타당성을 검증하였으며, 작동조건과 제어기 계인의 변화에 따른 시스템 성능 변화를 분석하였다. 이를 바탕으로 다축 통합형 제어시스템에 대해 주어진 성능 사양을 만족하는 제어기 계인의 설계범위를 도출하였다. 본 연구의 결과는 기존 다축 CNC의 성능 향상을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

앞으로 다축 통합형 제어시스템의 과도응답 특성과 구동축이 비대칭인 경우를 고려하는 연구가 추가로 필요하며, 그 결과를 실제 시스템에 구현하여 시스템 제어성능의 실질적인 향상 정도를 확인할 계획이다.

후 기

본 연구는 2004 학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음.

참고문헌

- Bin, H. Z., Yamazaki, K. and De Vries, M. F., "A Microprocessor-Based Control Scheme for the Improvement of Contouring Accuracy," *Annals of the CIRP*, Vol. 32, pp. 275-279, 1983.
- Doraiswami, R. and Gulliver, A., "A Control Strategy for Computer Numerical Control Machine Exhibiting Precision and Rapidity," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 106, pp. 56-62, 1984.
- Johnson, W. C., Shrinivasan, K. and Kulkarni, P., "Digital Control Algorithms for Electrical Machine Tool Feed Drives," *Proceedings of the 12th North American Manufacturing Research Conference*, Houghton, Michigan, pp. 447-453, 1984.
- Makino, H. and Ohde, T., "Motion Control of the Direct Drive Actuator," *Annals of the CIRP*, Vol. 40; pp. 375-387, 1991.
- Ono, Y. and Kuwahara, H., "The New Design of Motor, Position Sensor and Position Control System for Direct Drive Manipulators," *Proceedings of the ASME, Robotics: Theory and Applications*, Anaheim, California, pp. 123-128, 1986.
- Pritschow, G. and Philipp, W., "Direct Drives for High-Dynamic Machine Tool Axes," *Annals of the CIRP*, Vol. 39, pp. 413-416, 1990.
- Schepper, F. and Yamazaki, K., "Application of ASIC-Technology to Mechatronics Control: Development of the Flexible Servo Peripheral Chip," *Annals of the CIRP*, Vol. 37, pp. 389-392, 1988.
- Schepper, F. and Yamazaki, K., "Development of an ASIC Performing High Speed Current Loop Processing of Servo Motor Control for Mechatronics Applications," *Annals of the CIRP*, Vol. 38, pp. 355-358, 1989.
- Yamazaki, K., "Development of Flexible Actuator Controller for Advanced Machine Tool and Robot Control," *Annals of the CIRP*, Vol. 36, pp. 285-288, 1987.
- Haack, B. and Tomizuka, M., "The Effect of Adding Zeros to Feedforward Controllers," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 113, pp. 6-10, 1991.
- Masory, O., "The Effect of a Velocity Feed Forward Loop on Contour Accuracy," *Proceedings of the 7th International Motor Conference*, pp. 418-428, 1985.
- Pak, H. A., "Adaptive Matching and Preview Controllers for Feed Drive Systems," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 113, pp. 316-320, 1991.
- Tsao, T. C. and Tomizuka, M., "Adaptive Zero Phase Error Tracking Algorithm for Digital Control," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 109, pp. 349-354, 1987.
- Tomizuka, M., Chen, M. S., Renn, S. and Tsao, T. C., "Tool Positioning for Noncircular Cutting with Lathe," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 109, pp. 176-179, 1987.

15. Tomizuka, M., "Zero Phase Error Tracking Algorithm for Digital Control," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 109, pp. 65-68, 1987.
16. Tomizuka, M., "Synchronization of Two Motion Control Axes under Adaptive Feedforward Control," Proceeding of the ASME: Adaptive and Learning Control, DSC-Vol. 21, pp. 1-8, 1990.
17. Weck, M. and Ye, G., "Sharp Corner Tracking Using the IKF Control Strategy," Annals of the CIRP, Vol. 39, pp. 437-441, 1990.
18. Koren, Y., "Cross-Coupled Biaxial Computer Control for Manufacturing Systems," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 102, pp. 265-272, 1980.
19. Kulkarni, P. K. and Srinivasan, K., "Optimal Contouring Control of Multi-Axial Feed Drive Servomechanisms," ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 111, pp. 140-148, 1989.
20. Kulkarni, P. K. and Srinivasan, K., "Cross-Coupled Control of Biaxial Feed Drive Servomechanisms," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 112, pp. 225-232, 1990.
21. 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.
22. Koren, Y. and Lo, C. C., "Variable-Gain Cross-Coupling Controller for Contouring," Annals of the CIRP, Vol. 40, pp. 371-374, 1991.
23. Erkokmaz, K. and Altintas, Y., "High Speed Contouring Algorithm for CNC Machine Tools," Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division, DSC-Vol. 64, pp. 463-469, 1998.
24. Chiu, G. T. C. and Tomizuka, M., "Coordinated Position Control of Multi-Axis Mechanical Systems," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 120, pp. 389-393, 1998.
25. Lee, H. C. and Jeon, G. J., "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, 1999.
26. Yeh, S. S. and Hsu, P. L., "Theory and Application of the Robust Cross-Coupled Control Design," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 121, pp. 524-530, 1999.
27. Lee, Y. and Jee, S., "Adaptive Cross-Coupling Control for High-Speed Nonlinear Contour Machining," Journal of the KSPE, Vol. 17, pp. 108-114, 2000.
28. Shih, Y. T., Chen, C. S. and Lee, A. C., "A Novel Cross-Coupling Control Design for Bi-Axis Motion," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 42, pp. 1539-1548, 2002.
29. Yeh, S. S. and Hsu, P. L., "Analysis and Design of Integrated Control for Multi-Axis Motion Systems," IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 11, pp. 375-382, 2003.
30. Jee, S. and Koo, T., "3-Axis Coupling Controller for High-Precision/High-Speed Contour Machining," Transactions of the KSME, A, Vol. 28, pp. 40-47, 2004.
31. Kuo, B. C., "Digital Control Systems," 2nd Edition, Oxford University Press, pp. 294-300, 1992.