

## 윤곽제어 및 위치추종 성능을 고려한 3축 연동제어 시스템 설계

이학철\*(단국대 대학원 기계공학과), 지성철(단국대 기계공학과)

### Design of a 3-Axis Cross-Coupling Control System Considering Both Contouring and Tracking Performance

H. Lee(Graduate School, Dankook Univ.) and S. Jee(Mechanical Eng. Dept., Dankook Univ.)

#### 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.

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

#### 1. 서론

CNC 공작기계에 대한 기존의 제어기들은 입력된 이송속도에 맞춰 개별적인 구동축의 위치추적 성능을 극대화하기 위한 독립축 제어기와 윤곽추적 성능을 향상시키기 위해 기준 공구경로로부터 벗어난 거리인 윤곽오차를 구해 이를 바탕으로 구동축들을 연계하여 제어하는 다축 연동제어기가 제안되고 있다.<sup>1,3</sup> 하지만 두 제어기는 제어목적 자체가 서로 다른 만큼 분리되어 연구되어져 왔다. 다축 연동제어기의 경우 기 설정된 독립축 제어기의 플랫폼에 두 제어기의 상호영향 등에 대한 포괄적인 해석 없이 추가되어 주로 성능검증에 대한 연구만 이루어졌다. 하지만 다축 CNC 시스템의 정밀도를 개선하기 위해서는 연동제어기가 필수적이며, 설계의 시작단계부터 윤곽제어 및 위치추종 성능을 포괄적으로 고려하는 통합형 제어시스템의 설계가 반드시 필요하다. 본 논문에서는 독립축 제어기와 3축 연동제어기의 통합형 해석 기법 및 설계 방향을 제시하여 기존 다축 CNC의 성능 향상을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

#### 2. 3축 연동제어 시스템의 설계 해석

본 논문에서는 3축 연동제어 시스템에서의 비선형적인 윤곽오차 모델을 추종오차의 함수로 근사화하여, 주어진 시스템에서의 윤곽오차와 추종오차의 상호 연관성을 밝히고, 이를 제어시스템의 해석 및 설계에 반영하였다. 3차원 윤곽오차<sup>3</sup>를 근사화

함에 있어 해석상의 편의를 위해 윤곽오차 벡터를 XY와 YZ 평면에 투영시키고 각 평면상에서 각 축 방향으로의 윤곽오차 성분을 구하여 해석하였다.

3축에 대한 독립축 제어기를 위치비례 피드백 제어기로 구성하고 이를 PID 3축 연동제어기와 결합한 Fig. 1의 제어시스템을 대상으로 전체 시스템의 안정성 해석과 성능 해석을 수행하였다. 3축 연동제어기는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_c(z) = \left[ C_p + C_i \frac{Tz}{z-1} + C_d \frac{z-1}{Tz} \right] I \quad (1)$$

투영된 두 평면에 정의되는 시스템에 대해 Jury의 안정성 판별 조건을 적용하였으며, 이 때 각기

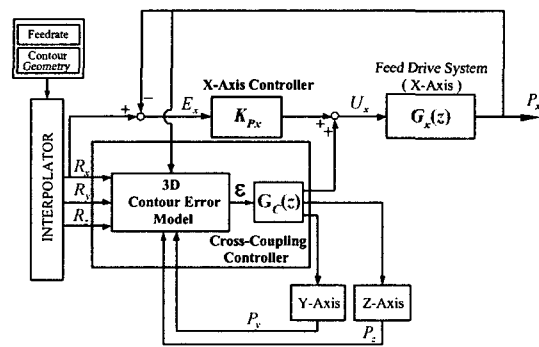


Fig. 1 3-axis cross-coupling control system

다른(mismatched) 이송 드라이브 시스템 파라미터 각각에 대한 안정성 해석을 반복 수행하여 3 축 시스템이 안정한 제어기 게인의 공통 범위를 구하였다. 또한, 3 차원 원호 입력에 대하여 윤곽추적 및 위치추종의 두 가지 관점에서 주파수응답 방법을 이용한 성능 해석을 수행하였다. 그 결과, 3 축 제어 시스템의 정상상태 윤곽추적 및 위치추종 성능을 작동조건(이송속도 및 곡률반경)과 제어기 게인들의 변화에 맞춰 정확히 예측하는 것이 가능함에 따라, 이 결과를 동시에 고려하여 다축 통합형 제어기 설계에 적용할 수 있다.

### 3. 시뮬레이션 결과

제시된 3 축 연동제어기의 해석을 바탕으로 하는 안정성 해석 방법의 타당성을 검증하기 위해 해석 결과를 별도의 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 비교하여 Fig. 2 에 도시하였다. 결과에서 볼 수 있는 바와 같이 제시된 안정성 해석 방법이 적절함을 확인할 수 있다. 제어성능 사양을 만족시키는 게인의 범위 중 윤곽오차가 25  $\mu\text{m}$  이하, 위치추종오차는 250  $\mu\text{m}$  이하인 설계범위의 예를 입력 각속도별로

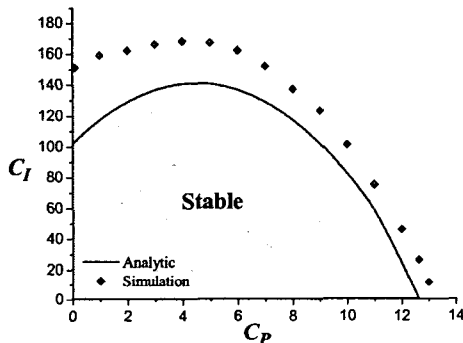


Fig. 2 Stability range for controllers gains  $C_p$  and  $C_t$

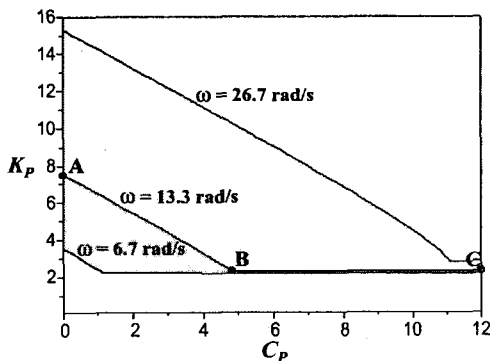


Fig. 3 Design range of controller gains for different input frequencies

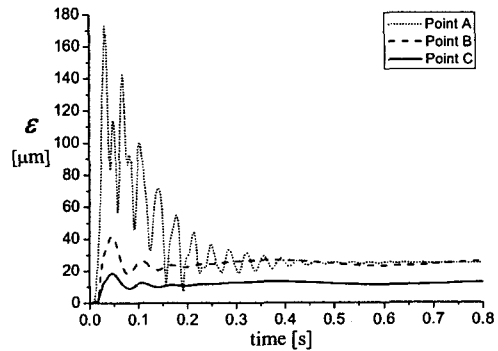


Fig. 4 Simulation result of contour errors at selected points in the design range

Fig. 3 에 나타내었다. 두 제어성능 중, 가공정밀도에 큰 영향이 없는 위치추종오차에 대해서는 주어진 사양을 최소한 만족하도록 취한 피드백 제어기 게인  $K_p$  에 대해, 윤곽추적 성능을 극대화하는 교차축 연동제어기의 비례게인  $C_p$  를 적합한 게인으로 본다면 Fig. 3 의 설계범위 중에서 우측 하단 부분(점 C 부근)이 주어진 작동조건에 대해 적합한 게인의 조합으로 판단될 수 있다. Fig. 4 의 시뮬레이션 결과를 통해 게인 결정방법의 타당성을 확인할 수 있다.

### 4. 결론

본 연구에서는 3 축 연동제어 시스템에 대하여, 수학적 해석을 기초로 제어시스템에 대한 안정성 해석방법을 제시하였으며, 대형 시스템에 대해 정상상태에서의 윤곽제어 및 위치추종 성능을 정확히 결정할 수 있는 해석기법을 제시하였다.

### 후 기

이 논문은 2005 년도 산업자원부 지원의 부품소재기술개발사업에 의하여 연구되었음.

### 참고문헌

1. Koren, Y. and Lo, C. C., "Variable-Gain Cross-Coupling Controller for Contouring," Annals of the CIRP, Vol. 40, pp. 371-374, 1991.
2. 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.
3. 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.