

# CNC 밀링머신 이송장치의 오차유형 및 정상상태 오차해석에 의한 제어기 설계

길형균<sup>#</sup>, 이건복<sup>\*</sup>

## Controller Design by Error Shape and Steady-State Error Analysis for a Feed Drive System in CNC Milling Machine

Hyeong Gyeun Gil<sup>#</sup>, Gun Bok Lee<sup>\*</sup>

### ABSTRACT

This paper deals with the position control for a feed drive system in CNC milling machine, which utilizes a modified error signal for the elimination of steady-state error. A linear time-invariant (LTI) system has consistent properties in response to standard test signal inputs. Those also appear in an error curve acquired from the response. From such properties, constructed is an error model for the position control of the feed drive. And then added is the output of the error model to the current error signal. Consequently the resulting proportional control system brings performance improvement in view of the steady-state error. The effectiveness of the proposed scheme is confirmed through simulations and experiments.

**Key Words** : Error model(오차모델), Error response curve(오차응답곡선), Error shape(오차유형), Error signal modification(오차신호변형), Steady-state error analysis(정상상태 오차해석)

### 1. 서론

피드백제어 시스템은 한 플랜트에 대하여 기준 입력과 실제출력사이의 차이를 오차신호로 정의하여 이 값을 0으로 수렴시키도록 플랜트입력을 생성하는 제어기를 장착함으로써 외란배제 능력, 파라미터 변동에 대한 적응성 등을 갖도록 시스템을 재구성한다. 따라서 향상된 제어 성능을 보유하기 위해서는 제어기로 입력되는 오차신호에 대한 정확한 정보를 계산해 낼 수 있어야 한다. 기존의 CNC

밀링머신의 위치제어를 위해 많은 연구가 수행되어 왔다. 가장 일반적으로 사용하고 있는 제어 알고리즘은 비례제어로서 기준위치에 대한 점대점 제어 및 경로 추적제어를 통한 위치정밀성 향상을 목적으로 한다. 이 알고리즘은 구조가 간단하고 안정적인 반면 오차신호를 제어기 입력으로 사용하기 때문에 항상 0이 아닌 값을 가지고 있어야 한다. 이 값의 크기가 결국에는 정상상태 오차로 나타나며

접수일: 2004년 7월 2일; 게재승인일: 2004년 12월 10일  
# 교신저자: 숭실대학교 대학원 기계공학과  
E-mail waycon67@empal.com Tel. (02) 813-9065  
\* 숭실대학교 기계공학과

이를 제거하기 위해서는 제어계인을 크게 해 주어야 하지만 안정성 측면에서 제한된 범위를 갖는다. 이의 대안으로써 비례적분제어를 고려할 수 있다. 이 알고리즘은 현재 오차신호에 오차에 대한 적분기 출력을 더하는 구조를 가지며, 이 항의 추가로 인하여 정상상태 오차를 제거하게 된다. 하지만, 적분제어 알고리즘은 루프 내에서 동작하기 때문에 입력의 포화현상이 존재하는 경우 오차가 누적되어 제어성능이 나빠질 수 있으며, 점대점제어시 위치의 오버슈트 발생 가능성으로 인하여 그 사용이 제한적이다.<sup>1</sup> 반면 가공부 윤곽 정밀성에 대한 인식이 높아지면서 제안된 상호결합제어 알고리즘은 기준경로에 대한 추적오차를 기반으로 윤곽오차를 정의하고 이 값이 0이 되도록 제어입력을 발생시킨다. 이 알고리즘 또한 비례적분제어 알고리즘에서와 마찬가지로 현재의 오차신호에 부가적인 오차신호를 더하는 구조를 갖지만 부가한 오차신호의 작용이 추적오차 제거를 위한 방향이 아니라 정의된 윤곽오차를 0으로 수렴시키는 방향으로 작용하기 때문에 추적오차의 크기에는 큰 변동이 없고 단지 가공부 윤곽오차를 감소시킨다. 이러한 윤곽오차 저감을 위하여 많은 연구가 수행되어 왔다. Poo<sup>2</sup> 등은 1형(type 1) 킨투어링시스템에 대한 동적 오차를 분석하여 윤곽오차의 주요인으로서 두 축간의 계인 불일치(mis-matching)에서 기인하며 직선경로에서 두 축간의 추적오차가 동일할 경우 윤곽오차는 발생하지 않음을 보였다. Koren<sup>3,4</sup>은 대칭형 상호결합제어 알고리즘 및 윤곽오차 모델을 제안하여 윤곽정밀성을 향상시킬 수 있음을 보였다. 이때 추적성능은 비례제어에 비해 경미하게 감소됨을 언급하고 있다. Srinivasan<sup>5</sup>은 기준경로에 대한 순간기울기 정보로부터 윤곽오차 모델을 구성하여 여러 기준경로에서 윤곽성능을 향상시킬 수 있음을 보였으며, Joo<sup>6</sup> 등은 기존의 윤곽오차 모델이 비선형 경로에서 효율성이 떨어지는 단점을 보완하기 위하여 가변 윈도우를 이용하여 현재 위치에서 과거 궤적과 가장 가까운 포인트를 찾아 실제 윤곽오차를 계산해 내는 방식을 제안한 바 있다. 한편으로 Jee<sup>7,8</sup>는 모델링의 어려움을 갖는 마찰에 대하여 간접적으로 마찰효과를 추정하고 이에 대한 규칙기반의 퍼지제어 알고리즘을 적용한 위치제어 방법을 제안하였으며, 곡률반경에 따른 비례계인과 윤곽계인의 상호조정을 통한 적응성을 갖는 제어 시스템을 제안한 바 있다. 또한 Lee<sup>9</sup>는 최적성의 원리로부터 리카티

방정식의 해를 구하여 윤곽제어 입력을 구하는 후퇴-유한시간 구간 LQ 최적제어를 수행하여 윤곽추적성능을 향상시킬 수 있음을 보였다. 이러한 일련의 연구 결과들로부터 추적오차와 윤곽오차는 CNC 밀링머신의 위치제어를 위한 주요 설계사양이다. 하지만 이 둘은 제어관점이 다르기 때문에 동시에 만족시키기란 매우 어려우며 상호 절충(trade off)이 요구된다. 즉 추적오차 저감에 목적을 둔다면 윤곽오차는 가능한 한 억제시켜야 하고, 윤곽성능 향상을 목적으로 한다면 추적성능 향상을 위한 부가적인 제어 입력을 구성해야 한다. 전자의 관점에서 본 저자<sup>10</sup>는 경사입력에 대한 단위계인 비례제어를 수행하여 얻은 오차응답곡선으로부터 도해적인 방법으로 정상상태 오차를 제거할 수 있는 제어 알고리즘을 제안한 바 있다. 본 연구에서는 도해적 방법에 의해 구성된 제어 알고리즘은 선형시불변 시스템의 특성 및 정상상태 오차해석으로부터 동일한 결과를 얻을 수 있음을 보이고, 코너 경로 및 원 경로에 대한 응용에 대하여 설명한다.

본 연구는 다음과 같이 구성된다. 2장은 실험장치 및 모델링에 대하여 기술한다. 3장은 CNC 밀링머신의 오차유형을 분석하고 오차모델을 정의한다. 4장에서는 오차해석에 의해 제안하는 알고리즘의 구성 및 설계변수 선정방법을 설명하고, 5장에서 시뮬레이션 및 실험을 통하여 제안한 방법의 타당성을 검증하고, 6장에서 본 연구에 대한 결론을 맺는다.

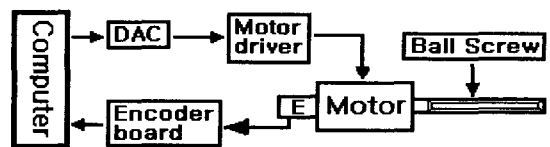


Fig. 1 Schematic of the feed drive system for a single axis

## 2. 실험장치 및 모델링

### 2.1 실험장치

제어 알고리즘의 성능 평가를 위한 플랜트 모델로는 CNC 머시닝센터의 이송장치로서 X-Y table을 사용한다. 각 축의 이송장치는 3상 AC서보 드라이버와 모터, 5 mm 피치의 볼 스크류, 작업 테이블로

구성되며, 서보 드라이버는 Yaskawa 속도 서보팩(velocity servo pack)으로서 아날로그 비례-적분(PI) 제어 방식에 의해 속도 피드백 제어가 수행된다. 또한 12비트 해상도를 가지며  $\pm 5$  V의 출력범위를 갖는 D/A변환기와, 1회전 당 1500개의 펄스신호를 4채배하여 총 6000펄스신호를 출력하도록 구성된 엔코더 보드에 의해 컴퓨터와 인터페이싱 되어 있다. Fig.1 에 직교하는 이송장치의 한 축을 개략적으로 도시하였다.

### 2.2 모델링

서보드라이버에 시험입력신호로서 계단 입력전압을 인가하여 500 Hz의 샘플주파수로 100개의 출력속도 데이터를 수집하여 다음의 근사 모델 식을 획득하였다.

a. 2차 지연형

$$G_i(s) = \frac{v_{ss}}{V_{in}} = \frac{K_{vi}w_i^2}{s^2 + 2\zeta_i w_i s + w_i^2}, \quad i = x, y$$

b. 1차 지연형 :

$$G_i(s) = \frac{K_{vi}}{\tau_{vi}s + 1}, \quad i = x, y$$

여기서,  $\zeta_i$ 는 감쇠비,  $w_i$ 는 비감쇠 고유진동수,  $\tau_{vi}$ 는 시정수, 그리고  $K_{vi}$ 는 속도루프게인 이다.

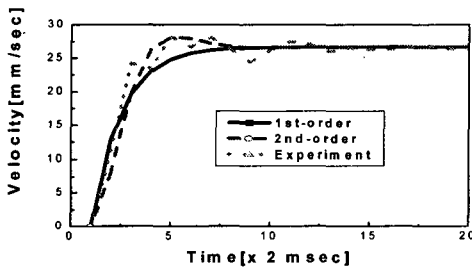


Fig. 2 Step response for the feed drive system, 1st and 2nd-order models

Fig. 2는 한 축에 스텝 시험입력신호를 인가하여 얻은 속도 제어루프 시스템의 응답과 1차 및 2차 지연형 모델의 응답선도이다. 그리고 이후 시뮬레이션 및 실험은 모두 샘플링시간  $T_s=2$  msec에 대하여 수행하였다.

### 3. CNC 밀링머신의 오차유형 및 오차모델

CNC 밀링머신 이송장치의 위치제어에서 발생하는 오차는 기준입력의 변화, 마찰 및 백래쉬, 작동기 동특성의 차이, 외란입력 등에 기인한다. 이러한 오차 원인에 대한 깊이 있는 연구는 매우 가치 있는 작업이지만, 본 연구에서는 오차의 원인 분석보다는 그 결과로써 나타난 오차의 유형에 주목하며, 그 보정 방법을 다룬다.

#### 3.1 CNC 밀링머신의 오차유형

선형시불변시스템은 다음 특성을 만족한다.<sup>11</sup>

전달함수가  $Y(s) = \frac{1}{\tau_v s + 1}$  의 1차형일 경우,

- 단위 경사입력에 대한 출력 및 오차:

$$y(t) = t - \tau_v + \tau_v e^{-\frac{t}{\tau_v}}, \quad t \geq 0$$

$$e(t) = \tau_v (1 - e^{-\frac{t}{\tau_v}})$$

- 단위계단입력에 대한 출력 및 오차:

$$y(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau_v}}, \quad t \geq 0$$

$$e(t) = e^{-\frac{t}{\tau_v}}$$

즉, 경사입력에 대한 출력의 도함수는 계단입력의 출력이며, 역으로 계단입력의 출력을 적분함으로써 경사입력의 출력의 형태를 얻을 수 있다. 반면 정현입력에 대한 출력은 신호의 형태는 동일하지만 진폭 및 위상의 차이만을 갖는다. 본 연구에서는 서보드라이버와 이송장치의 응답속도(Fig. 2 참조)가 정현입력 주파수  $w_0$ 에 비해 매우 빠르고, 페루프 이득이 거의 1이 되기 때문에 입력진폭과 출력진폭은 동일하다. 따라서 오차신호는 위상차( $\phi$ )에 의해 결정되며 이 관계는 삼각함수 합성의공식으로부터 근사적으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

- 정현입력  $r(t) = A_0 \sin(w_0 t)$ 에 대하여,

$$y(t) = A_0 \sin(w_0 t - \phi), \quad t \geq 0$$

$$e(t) = C_1 \cos(w_0 t - \frac{\phi}{2}), \quad C_1 = 2A_0 \sin(\frac{\phi}{2})$$

이러한 특성을 CNC 밀링머신에 대한 실험을 통하여 확인할 수 있다.

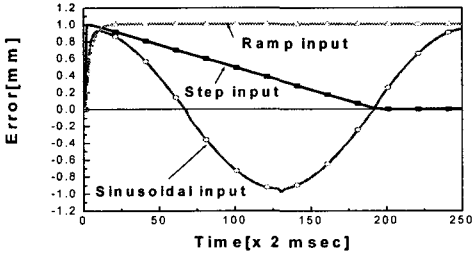


Fig. 3 Error shapes for step, ramp and sinusoidal inputs

Fig. 3은 계단입력, 경사입력 및 정현입력에 대한 단위게인의 비례제어를 수행하여 얻은 추적오차를 나타낸다. 여기서 단위게인이란 기준이 되는 값으로  $K_{px} = 3.7636$ 이다. Fig. 3에서 실선은  $\theta = 45^\circ$  방향의 거리 70 mm 인 기준위치에 대한 x축의 점대점제어, 점선(dot)은  $\theta = 45^\circ$  방향의 이송속도 100 mm/sec의 경사입력에 대한 추적제어 그리고 파선(dash)은 정현입력  $r(t) = 15 \sin(6.28t)$ 에 대한 추적제어를 수행하여 얻은 오차응답곡선이다. 여기서 계단입력에 대한 오차는 그림에 함께 표시하기 위하여 정규화(normalization) 하였다. 그림으로부터 계단입력에 대한 오차응답곡선은 임펄스응답 형태이고, 경사입력에 대한 오차는 크기가 1인 스텝응답 형태이다. 또한 정현입력에 대한 오차는 위상차가  $\phi \approx 90^\circ$  인 여현함수 형태이다. 이 결과로부터 정상상태 오차의 유형은 기준입력의 도함수에 관계하고 있음을 확인할 수 있다.

### 3.2 오차모델

앞 절의 실험결과로부터 CNC 밀링머신은 선형 시불변시스템 특성을 따르며, 경사입력에 대하여 일정한 크기의 정상상태 오차를 갖는 1형 시스템으로 간주할 수 있다. 따라서 경사입력에 대하여, 단위게인 비례제어에 의한 정상상태 오차는 항상 다음의 형태로 나타난다.

$$e_a(t) = E_p(1 - e^{-p_a t}) \quad (1)$$

여기서,  $p_a$ 는 시정수와 관계하고,  $E_p$ 는 정상상태에서의 오차 크기에 관여한다. 비례제어 시스템에서 정상상태 오차는 속도의 증가에 비례하므로 샘플링시간이 일정한 경우에는 기준입력의 변화량

이 속도의 변화로 나타난다. 따라서  $E_p \propto \Delta r(t)$ 의 관계가 성립하며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E_p = K_a \Delta r(t) \quad (2)$$

식 (2)를 식 (1)에 대입함으로써 도해적 방법<sup>10)</sup>에 의해 구한 오차모델과 동일한 결과를 얻는다.

$$e_a(t) = K_a(1 - e^{-p_a t})\Delta r(t) \quad (3)$$

식 (3)에서, 오차모델  $e_a(t)$ 는 기준경로의 도함수의 형태를 취하고 있으며, 정현입력에 대한 오차응답을 내포한다.

## 4. 제어 시스템 구성

### 4.1 제어 알고리즘

선형시스템에서 제어기설계를 단순히 흐름변수인 오차신호  $e_a(t)$ 에 해당하는 제어기출력  $u(t)$ 를 생성하는 것이라 정의한다면, 보다 정확한 오차정보를 제공해야 한다. 예로서 비례제어를 기본으로 하는 비례적분제어 알고리즘은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$u(t) = K_p(e_0(t) + e_i(t)), \quad e_i(t) = \frac{1}{T_i} \int_0^t e_0(t) dt \quad (4)$$

여기서,  $T_i$ 는 적분시간이다. 식 (4)에서  $e_i(t)$ 는 정상상태에서의 추적오차 정보를 반영하며 제어입력의 작용방향은 추적오차 방향이다. 또한 윤곽제어 알고리즘을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$u_c(t) = K_p(e_0(t) + e_c(t)), \quad e_c(t) = \frac{G}{K_p} \epsilon \quad (5)$$

여기서,  $G$ 는 윤곽제어 게인이고  $\epsilon$ 은 윤곽오차를 나타낸다. 식 (5)는 식 (4)와 동일한 형태이지만  $e_c(t)$ 는 추적오차에 기초한 윤곽오차를 나타내며 작용방향은 윤곽오차 방향이다. Fig. 4에 추적오차와 윤곽오차의 정의 및 작용방향을 나타내었다. 여기서,  $P_r$ 은 기준위치,  $P_0$ 는 현재위치,  $P_c$ 는 현재위치와 가장 가까운 위치로 윤곽오차를 정의하는 지점이며, 화살표는 작용방향을 나타낸다. 위 두 경우로부터 어떤 방법을 사용하여 오차신호를 변형하고, 작용방향을 어디로 결정하는가에 따라 제어 방식이

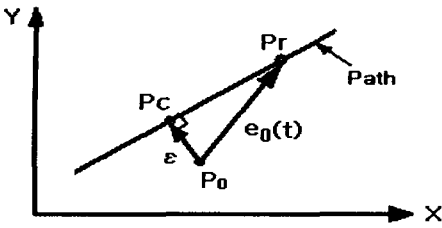


Fig. 4 Definition of tracking(e) and contour error(ε) along with a path

결정된다. 이러한 관점에서 제안한 방법은 다음과 같으며, 본 연구에서 동일하게 적용한다.

$$u_a(t) = K_p(e_0(t) + e_a(t))$$

또한, 비례분제어와는 달리 앞서 구한 오차모델  $e_a(t)$ 의 출력신호를 외부로부터 매순간 현재 오차 신호에 더하여 제어기 출력에 반영한다는 차이점을 갖는다.

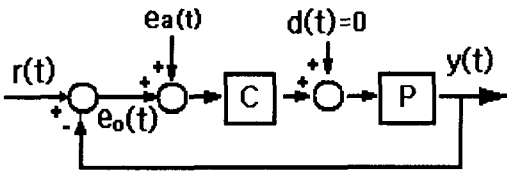


Fig. 5 Block diagram with error model

Fig. 5에 오차모델을 적용한 시스템 블록선도를 나타내었다. 여기서 C는 비례제어기이고 P는 플랜트를 나타낸다.

## 4.2 설계변수 선정

### 4.2.1 비례게인 $K_p$ 의 선정.

오차모델을 적용하지 않은 비례제어시스템에 대하여, 경사입력( $\frac{A}{s^2}$ )에 대한 정상상태 오차해석으로부터 원하는 정상상태 오차  $E_p$ 를 만족시키는 비례게인  $K_{pz}$ 는 다음 식으로부터 구한다.

$$K_{pz} = \frac{A}{K_{vx}E_p} \quad (6)$$

식 (6)은 앞서의 연구에서 실험적으로 구한 비례계

인과 정상상태 오차와의 관계를 나타내는 식  $E_{ss} = \frac{E_0}{K_p}$ 와 동일한 결과를 나타낸다. 즉,  $E_{ss}$ 는 식 (6)의  $E_p$ 를 나타내고,  $E_0$ 는 비례게인  $K_p=1$ 일 때의 정상상태 오차이다. 또한 y축의 비례게인  $K_{py}$ 는 두 축간의 동특성이 일치하도록 결정해야 하며, 다음 식으로부터 구한다.

$$K_{py} = \frac{K_{vx}}{K_{vy}}K_{pz} \quad (7)$$

### 4.2.2 설계변수 $K_a$ 의 선정

설계변수  $K_a$ 를 결정하기 위하여 Fig. 5에 도시한 블록선도에서 오차모델  $e_a(t)$ 를 외란입력  $d(t)$ 로 간주하여 정상상태 오차를 표현하면 다음과 같다.

$$E(s) = \frac{1}{1+CP}R(s) - \frac{CP}{1+CP}D(s) \quad (8)$$

여기서,  $D(s)$ 는  $e_a(t) = K_a(1 - e^{-p_a t})\Delta r(t)$ 의 라플라스 변환이다. 지수함수 항은  $t \rightarrow \infty$ 로 감에 따라 소멸하고, 기준입력의 변화량인  $\Delta r(t)$ 항에 대하여 근사적으로 도함수 정의를 적용하면  $K_a\Delta r(t) = K_a T_s \dot{r}(t)$ 이 된다. 이 항을 라플라스 변환하면  $D(s) = K_a T_s s R(s)$ 을 얻으며, 경사입력( $\frac{A}{s^2}$ )에 대하여 최종값정리를 적용하여 정리하면 다음과 같다.

$$\lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \frac{A(1 - K_a T_s K_p K_v)}{K_p K_v} = E_{ss} \quad (9)$$

식 (9)로부터 최종 정상상태 오차  $E_{ss}$ 와 비례게인  $K_p$ 에 대한 설계변수  $K_a$ 를 결정한다. 따라서 비례 제어 만의 정상상태 오차와 오차모델을 적용한 최종 정상상태 오차사이에는 식 (6)과 식 (9)로부터 다음관계를 만족한다.

$$E_p - E_{ss} = K_a \Delta r(t) \quad (10)$$

### 4.2.3 설계변수 $p_a$ 의 선정

설계변수  $p_a$ 는 정상상태 오차와는 무관하지만 과도상태에서의 응답에 영향을 준다. 따라서 과도

응답을 안정하게 유지하는  $p_a$ 값의 선정이 요구되며, 경험적으로  $K_p=1$ 에 대한 오차곡선의 시정수를 기준으로 결정하는 것이 바람직하다.

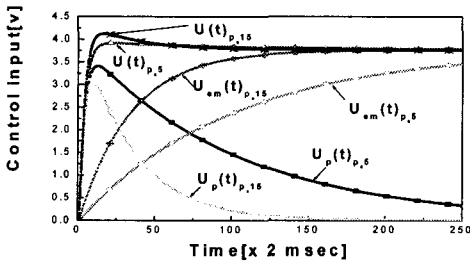


Fig. 6 Control input at  $p_a=5$  and  $p_a=15$

Fig. 6은 설계변수  $p_a=5$ 와  $p_a=15$ 일 때의 비례제어항 제어입력  $u_p(t)$ 와 오차모델 항 제어입력  $u_{em}(t)$  및 총 제어입력  $u(t)$ 를 나타낸다. 그림으로부터 비례제어항은 되먹임제어기로서 작용하여 과도응답에 더 많이 기여하고, 오차모델 항은 앞먹임제어기로서 작용하며 정상상태를 지배하고 있음을 볼 수 있다. 본 연구에서는  $p_a=15$  값을 사용했다.

### 5. 시뮬레이션 및 실험

시뮬레이션 및 실험은 기준속도 100 mm/sec에 대하여 x축의 비례게인의 값을  $K_p=3.7636$ 으로 동일하게 선정하고, 비례제어(P)를 기준으로 하여 적분시간  $T_i=0.027$ 의 적분제어(PI), 가중치  $w=1.0$ 의 상호결합(CC)제어 및 제안하는 알고리즘의 설계변수  $K_a=5$  와  $K_a=3.35$ 에 대한 응답특성으로부터 부가항의 영향을 고찰한다. 여기서 윤곽오차 모델 및 제어입력은 Srinivasan<sup>5</sup>등의 모델을 사용하였다.

#### 5.1 시뮬레이션

Fig. 7은 각 축의 최대 이송속도인 100 mm/sec를 기준으로 정상상태 오차  $E_{ss}=0.1$ 을 만족하도록  $K_p$ 와  $K_a$ 의 값을 선정하였을 경우  $\Delta r(t)$ 의 변동에 기인한 속도변화에 대한 추적오차를 나타낸다. Fig. 7에서 정상상태 오차는 기준 설정값 0.1 mm 이내에서 발생하고 있다. 따라서 원 경로와 같이 연속적인 속도변화를 갖는 경로에 대하여  $\Delta r(t)$ 의 최대 값을 기준으로  $K_a$ 를 결정함으로써 원하는 오차응답을 얻을 수 있다.

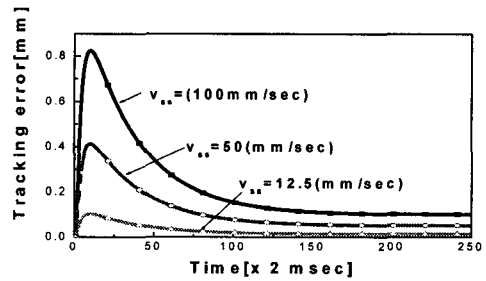


Fig. 7 Tracking error according to decreasing velocity inputs with  $K_a, K_p$  fixed

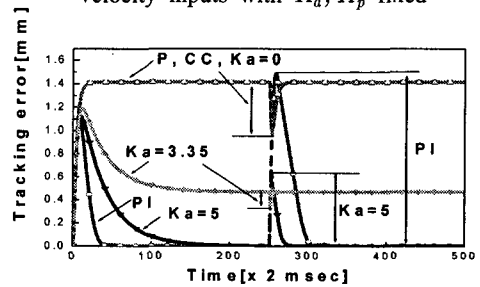


Fig. 8 Tracking error for a corner path

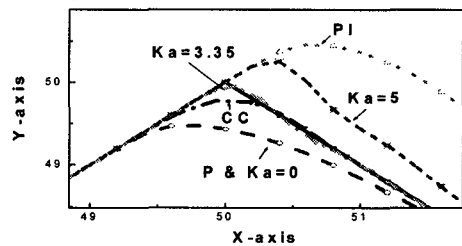


Fig. 9 Actual position plot for a corner path

Fig. 8과 Fig. 9는 코너 기준경로에 대하여 가감속이 없는 경우 추적오차 및 기준경로에 대한 실제 위치 선도를 나타낸다. CC제어의 경우 추적오차는 P제어와 거의 동일하게 나타나지만 윤곽정밀성이 높게 나타난다. 이로부터 제어입력의 부가항의 영향은 윤곽성능에만 작용하고 있음을 알 수 있다. 반면 PI제어와 제안한 알고리즘에서  $K_a=5$ 의 경우는 정상상태 추적오차를 "0"으로 수렴시키지만 급격한 경로 변화 후 오차가 크게 되어 P제어의 값을 음(-)으로 정할 경우 양(+의 값을 갖는다. 이것은 윤곽 정밀성 관점에서 바람직하지 않다. 한편 제안

한 알고리즘의 설계변수  $K_a=3.35$ 로 변경해 줌으로써  $K_a=5$ 에 비해 추적오차는 다소 증가하지만 윤곽 정밀성은 높게 나타나고 있다. 이러한 결과는 추적 성능과 윤곽성능을 동시에 만족시키기란 어려우며 상호간의 절충이 요구됨을 의미한다.

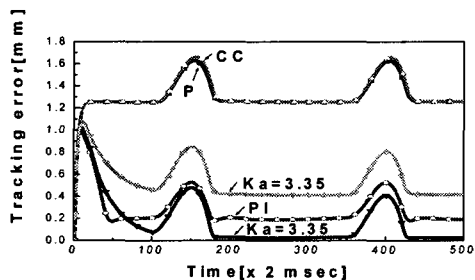


Fig. 10 Tracking error for a circular path with saturation

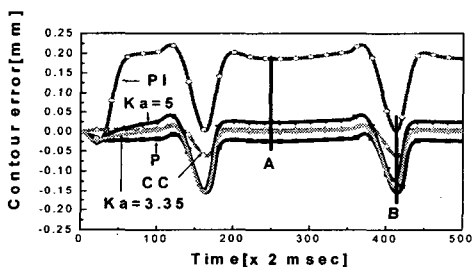


Fig. 11 Contour error for a circular path with saturation

Fig. 10과 Fig. 11은 원 경로에서 입력의 포화구간이 발생하도록 경로를 설계하여 각 제어방식의 추적오차 및 윤곽오차에 대하여 P제어를 기준으로 비교하기 위한 그림이다. 본 연구에서 사용하는 X-Y 테이블의 x축의 최대 각속도는 6.53 rad/sec 이고, y축은 5.97 rad/sec 이기 때문에 최대 각속도 6.28 rad/sec,  $R=20$ 으로 경로를 정하면 y축에서 포화 현상이 발생하게 되며, Fig. 11에서 250스텝인 A 위치를 판정기준점으로 하고, 최대 변동점인 B 위치에서의 오차변동량을 P제어의 값 0.1363 mm 에 대하여 비교하였다. PI제어의 경우 전반적인 추적오차는 P제어에 비해 약 85% 감소를 보이지만 윤곽오차는 그 역으로 나타나며 포화구간에서의 변동량 또한 0.1826 mm 로 P제어에 비해 증가함을 알 수 있다. CC제어의 경우 정상상태에서의 추적오차는 P제어와 거의 유사한 값을 갖지만 윤곽오차는

거의 0 인근에서 발생하고 있으며 포화구간에서의 오차 변동은 0.0605 mm 로 P제어에 비해 약 50% 감소를 보인다. 이것은 포화구간이 짧고, 비 포화상태에 있는 x축 제어입력의 영향이 반영된 상호결합 제어의 특성으로 판단된다. 한편 제안한 방식은 비 포화구간에서  $K_a=3.35$ 일 때 추적오차에 있어 P제어에 비해 약 60%정도의 감소를 나타내고 있는 반면 윤곽오차는 CC제어의 경우와 유사하게 발생하지만 포화영역에서의 오차 변동량 0.1332 mm 로 P제어와 경미한 차이를 보인다. 한편  $K_a=5$ 인 경우 추적오차는 거의 0으로 수렴하지만 윤곽오차는 P제어와 반대 영역에서 발생하며 포화에 대한 변동량은 0.1355 mm 로 P제어와 거의 유사한 값을 나타낸다. 따라서  $K_a$ 의 증가로 P제어 오차발생에 대하여 추적오차는 0으로 수렴하지만 윤곽오차는 점차 반대 부호 영역으로 이동하며 포화 구간에서의 변동량은 P제어에서의 크기보다 작게 나타남을 알 수 있다. 또한 Fig. 11의 초기 20스텝 이전에서 보는 바와 같이 제안한 방식의 과도응답 특성은 P제어의 오차응답과 유사한 경향을 나타낸다. 이것은 제안한 방식의 과도특성을 P제어 응답특성을 따르도록 설계변수  $p_a$ 값을 선정하였기 때문이다. 이러한 결과들로부터 제안한 방식은 기본적으로 P제어 방식의 응답 형태를 나타내지만 추적성능 및 윤곽성능을 향상시킬 수 있으며, 오차의 크기 조절이 용이함을 알 수 있다. 또한 앞서의 코너경로에서와 마찬가지로 윤곽오차의 관점에서 어느 정도 추적오차 값을 유지하는 것이 바람직하다.

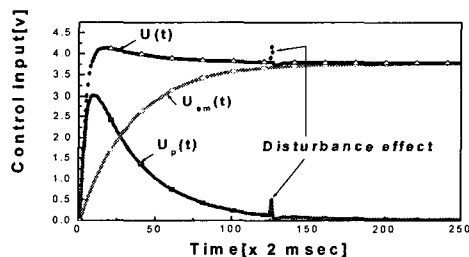


Fig. 12 Control input with disturbance

## 5.2 실험

시뮬레이션으로부터 얻은 결과를 실제 X-Y 테이블에 적용하여 직선경로, 코너경로 및 원 경로에 대한 오차응답으로부터 제안한 방법의 유효성을 검

증한다. Fig. 12는 X-Y 테이블에 대하여  $E_{ss} = 0.0$  을 만족하며, 이송속도 100 mm/sec,  $\theta = 45^\circ$  방향의 직선경로에 대하여 x축에 125스텝에서 외란입력이 인가되는 경우를 가정하여 x축 추적오차에 0.1 mm 를 더하여 실험을 실시하여 얻은 제어입력의 변화를 나타낸다.  $u_p(t)$  는 되먹임제어기로 동작하는 비례제어 항이고,  $u_{em}(t)$  는 앞먹임제어기로 동작하는 오차모델 항의 출력으로 두 신호의 합으로 총 제어기출력을 발생시킨다. 여기서 외란입력에 대하여 되먹임제어기가 대응하고 있음을 확인할 수 있다.

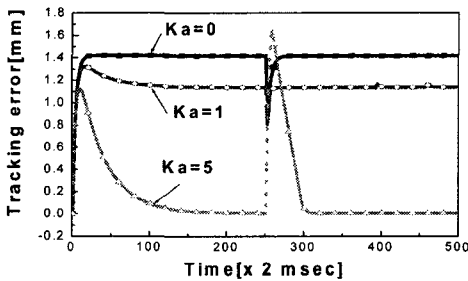


Fig. 13 Tracking errors for corner path

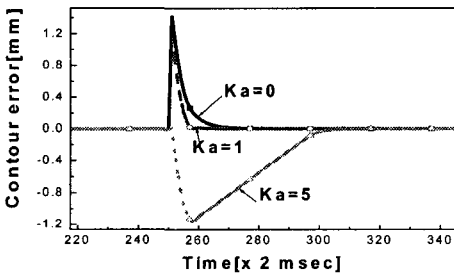


Fig. 14 Contour errors for corner path

Fig. 13과 Fig. 14는 설계변수  $K_a=0, 1, 5$ 에 대한 코너 기준경로에서의 추적오차와 윤곽오차를 나타낸다. 그림으로부터 제안한 방법은 시뮬레이션에서의 결과와 동일하게 설계변수  $K_a$ 의 값에 따라 다양한 형태의 오차응답을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 또한, 직선경로 상에서의 윤곽오차는 거의 0의 상태를 유지하고 있다는 사실로부터 직선경로에서 두 축사이의 동특성이 일치할 경우 윤곽오차는 발생하지 않는다는 Poo<sup>2</sup>등의 연구결과를 확인할 수 있다.

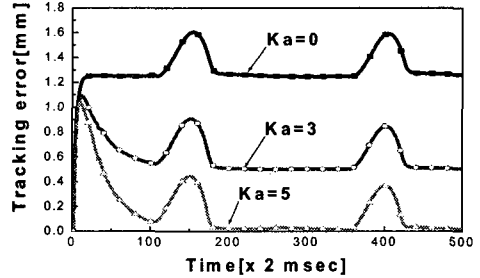


Fig. 15 Tracking errors for circular path with saturation

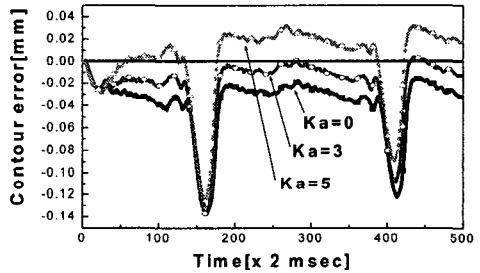


Fig. 16 Contour errors for circular path with saturation

Fig. 15와 Fig. 16은  $K_a=0, 3, 5$ 에 대한 포화를 갖는 원 경로에 대한 추적오차와 윤곽오차를 나타낸다. 그림으로부터 시뮬레이션 결과와 동일한 출력형태를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 한편 오차 곡선의 형태에 초점을 맞추어 보면  $K_a$ 의 값에 무관하게 일정한 형태를 유지하고 있다. 이것은 CC제어가 윤곽성능 향상에 부가 입력 항이 작용하고 있다는 것과 대조적으로 제안한 방식은 추적오차 변화에만 관여하고 있음을 의미한다. 따라서 제안한 방식에 CC제어 방식을 결합시킴으로써 상호간의 간섭 없이 추적성능 및 윤곽성능 모두에 대하여 만족스러운 응답특성을 얻을 수 있을 것으로 기대한다.

## 6. 결론

CNC 밀링머신의 위치제어를 위한 정상상태 오차 해석 방법에 의한 제어 알고리즘의 구성에 대하여 논의하였다. 시뮬레이션과 실험으로부터 다음의 결론을 얻을 수 있다.



- 1) 도해적방법에 의한 결과는 선형시불변시스템의 특성 및 오차해석 방법으로부터 동일한 결과를 얻을 수 있다.
  - 2) 제안한 방법은 앞먹임제어와 뒤먹임제어의 결합 형태를 취하고 있으며 상호 보완적이다.
  - 3)  $K_a$ 의 선정으로 코너 경로 및 원 경로에서의 추적오차의 크기 조정이 용이하다.
  - 4)  $K_a$ 의 작용은 추적성능 향상에 있음을 확인하였으며, 윤곽성능 향상에 기여하는 CC제어와의 결합 가능성을 확인하였다.
- 향후 시스템 동특성 변동에 대응할 수 있도록 실시간 설계변수  $K_a$ 의 가변구조 및 CC제어 알고리즘과의 결합 방법에 관한 연구가 요구된다.

- 1480-1486, 2002.
9. Lee, G. B., "Digital Contouring Control of Multi-axial System," Trans. KIEE, Vol. 47, No. 5, pp.623-630, 1998.
  10. Lee, G. B. and Gil, H. G., "Controller Design using an Error Model for Curvilinear Type Path in Machine Tool," spring proceeding of KSPE, pp. 455-458, 2004.
  11. Katsuhiko, Ogata, "Modern Control Engineering," Prentice Hall, pp. 132-139, 1997.

### 참고문헌

1. Kang, S. K. and Seo, S. W., "Design and Principle of CNC System," Chung Mun Gak, pp. 191-232, 2002.
2. Poo, A. N., Bollinger, J. G. and Younkin, G. W., "Dynamic Errors in Type 1 Contouring Systems," Trans. on Industry Applications, Vol. 1A-8, No. 4, pp. 477-484, 1972.
3. Koren, Y., "Cross-Coupled Biaxial Computer Control for Manufacturing Systems," J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 102, pp. 265-272, 1980.
4. Koren, Y. and Lo, C. C., "Variable-Gain Cross-Coupling Controller for Contouring," Annals of CIRP, Vol. 104, pp. 371-374, 1991.
5. Kulkarni, P. K. and Srinivasan, K., "Cross -Coupled Control of Biaxial Feed Drive Servomechanisms," ASME J. of Dynamic systems, Measurement and Control, Vol. 112, pp. 225-232, 1990.
6. Joo, J. H., Lee, H. C., Lee, Y. J. and Jeon, G. J., "A New Method of Contour Error Modeling for Cross-Coupled Control of CNC Machines," ICASE Magazine. Vol. 3, pp. 389-397, 1997.
7. Jee, S. C., "A Study on the Friction Compensation in CNC Servomechanism by Fuzzy Logic Control," J. of the KSPE, Vol 15, pp. 56-67, 1998
8. Jee, S. C. and Yun, S. P., "Adaptive Cross-Coupling Control System Considering Cutting Effects," Trans. of KSME(A), Vol. 26, pp.