

< 기술논문 >

# 오차모델을 이용한 공작기계 이송장치의 위치제어 알고리즘 개발

길형균\* · 이건복\*

(2004년 5월 31일 접수, 2004년 11월 30일 심사완료)

## Development of a Position Control Algorithm for Feed Drives in Machine Tools Using an Error Model

Hyeong Gyeun Gil and Gun Bok Lee

**Key Words:** Error Analysis(오차해석), Error Model(오차모델), Error Response Curve(오차응답곡선), Ramp Response(경사응답), Steady-State Error(정상상태오차)

### Abstract

This paper presents the development of an algorithm for position control of feed drives in machine tools. The algorithm is constructed through an experimental method based on proportional control with a ramp input. In the first step of designing, a tracking-error curve is generated with the proportional control, and then an error model is decided to reduce the tracking error. Next, the output signal of the error model is added to the current error signal to yield the actuating error signal. The effectiveness of the proposed scheme is confirmed through simulation and experiments.

### 1. 서론

#### 기호설명

- $e_{s1}$  : 단위계인 비례제어 정상상태 오차
- $e_{s2}$  : 임의의  $K_p$ 에 대한 정상상태 오차
- $h_o$  : 부가하는 오차곡선의 정상상태 값
- $T_o$  : 부가하는 오차곡선의 시정수
- $T$  : 샘플링시간
- $E_{ss}$  : 정상상태 오차
- $v_{ss}$  : 정상상태에서의 속도
- $V_{in}$  : 전압입력
- $K_p$  : 비례계인
- $K_o$  : 오차모델의 설계변수

CNC 밀링머신의 이송장치와 같이 서로 직교하는 두 축의 개별적 동작에 의해 하나의 경로를 형성하여 주어진 기준경로를 추적하는 2축시스템의 위치제어는 두 축 사이의 연성관계를 배제하고 각 축의 독립된 운동으로부터 하나의 통합된 운동을 형성하여 기준입력과 실제출력사이의 차인 추적오차가 “0”으로 수렴하도록 제어하는 독립축제어 방식과 실제 연성관계를 추적오차 정보와 기준경로의 기울기 정보를 이용하여 윤곽오차를 정의하고 이 오차가 “0”이 되도록 제어하는 상호결합제어 방식으로 나눌 수 있다. 독립축제어 방식의 대표적인 제어 알고리즘은 비례제어이다. 하지만 비례제어는 속도의 증가에 따른 정상상태 오차의 증가를 수반하며 이를 줄이기 위하여 계인을 증가시킬 경우 진동 등의 문제를 야기한다.<sup>(1)</sup> 이러한 결점에도 불구하고 공작기계의 위치제어에 비례제어 알고리즘을 주로 사용하고 있다. Poo<sup>(2)</sup> 등은 1형 컨투어링 시스템(contouring

† 책임저자, 회원, 숭실대학교 대학원 기계공학과  
E-mail : waycon67@empal.com  
TEL : (02)813-9065 FAX : (02)820-0668

\* 회원, 숭실대학교 기계공학과

system)에서 윤곽오차 발생은 본질적으로 두 축 사이의 시스템 계인의 불일치(mis-match)에 기인함을 보였다. 따라서 독립축제어 방식의 사용은 우선적으로 두 축사이의 시스템 계인을 일치시켜야 한다. 반면에 시스템 동특성은 이송기구의 마찰, 절삭저항, 경로의 변화 및 속도의 변화 등에 의하여 계인 특성이 달라져 윤곽오차를 발생시킨다. 상호결합제어는 이러한 문제의 대안으로 일련의 많은 연구가 수행되어 왔다. Koren<sup>(3)</sup>은 대형 상호결합제어 시스템을 제안하고 이에 대한 수학적 해석을 통하여 각 축사이의 동적 부정합 및 외란에 기인한 영향을 줄일 수 있음을 보였다. 상호결합제어의 실효성은 윤곽오차 모델의 정확성에 크게 의존한다. Srinivasan<sup>(4)</sup> 등은 기준 위치에서의 순간기울기와 추적오차 정보로부터 윤곽오차를 계산하는 모델을 제시하였으며 Koren<sup>(5)</sup> 등은 추적오차의 감소가 반드시 윤곽오차의 감소로 이어지지 않는다는 것을 보이고 비선형계적에 대하여 순간곡률반경 정보를 이용하는 근사적 오차모델을 제시하여 가변계인 구조의 제어시스템을 제안하였다. 또한 Joo<sup>(6)</sup> 등은 기존의 비선형경로에 대한 윤곽오차 모델의 낮은 효율성 극복의 대안으로 이송 시스템의 시간지연을 고려한 비선형 경로에 대한 윤곽오차 모델을 제시하였다. 윤곽오차를 줄이려는 노력들은 제어 방법의 응용에서도 많은 연구가 수행되어 왔다. Na<sup>(7)</sup> 등은 직선경로 및 곡선경로의 보간 시 윤곽오차의 발생원인에 대하여 해석하고, 대안으로써 비례분제어 방식을 제안하였으며, Jee<sup>(8)</sup> 등은 기준경로의 곡률반경 변화에 따라 비례계인과 윤곽제어계인의 상호 가변을 통한 제어기법을 적용하여 위치 정밀성 향상을 위한 방법을 제안한 바 있다. Lee<sup>(9)</sup> 등은 동적부정합 시스템에 대한 비대칭 윤곽제어기 설계방법을 제안하여 동적 부정합 상태에서도 윤곽오차를 크게 줄일 수 있음을 보였다. 한편으로 Jeon<sup>(10)</sup> 등은 마찰은 속도와 절대 위치에 영향을 받는다는 사실로부터 마찰보상 값을 테이블화하여 이를 기존의 제어기 출력에 반영해 줌으로써 위치제어 성능을 향상시킬 수 있음을 보였으며, Jee<sup>(11)</sup>는 비교적 낮은 이송속도에 대하여 위치오차의 주요 인자를 마찰력으로 근사하여 퍼지 논리 제어에 의한 비선형 PD 제어시

스템에 적분동작을 추가하여 마찰외란을 보상할 수 있는 제어방식을 제안한 바 있다. 이러한 연구결과들로부터 공작기계의 정밀한 위치제어를 위해서는 시스템 계인의 일치가 선행되어야 하며, 다양한 인자들에 의한 계인의 불일치가 발생하였을 경우 이를 보상할 수 있어야 한다. 또한 최근 절삭공정의 고속화 경향에 부합하기 위해서는 기존 경로에 대한 추적성능의 향상이 병행되어야 한다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 시스템 계인이 일치하는 경우 비교적 고속이송에도 정상상태 오차를 제거할 수 있는 비례제어 기반의 제어 알고리즘을 제안한다. 제안하는 방법은 단위 계인을 갖는 비례제어를 수행하여 얻은 실측 데이터를 토대로 도해적인 절차에 따라 알고리즘을 구성하기 때문에 구조가 단순하다. 또한 설계변수들의 결정이 간편하고 정확하기 때문에 현장에서 쉽게 응용할 수 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장은 실험장치 및 모델링에 대하여 기술한다. 3장은 기존의 비례제어와 비례적분제어 알고리즘에 대하여 고찰하고, 대안 알고리즘을 제시한다. 4장에서는 제안하는 알고리즘의 설계변수 선정방법을 설명하고, 선정 예를 제시한다. 5장에서 제어대상에 대한 시뮬레이션 및 실험을 통하여 제안한 방법의 타당성을 검증하고, 6장에서 본 연구에 대한 결론을 맺는다.

## 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. 1에 직교하는 이송장치의 한 축을 개략적으로 도시하였다.

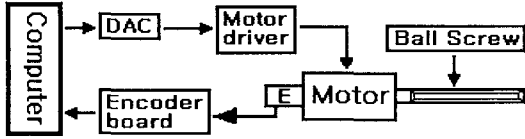


Fig. 1 Schematic of a feed drive system for a single axis

2.2 모델링

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

a. 2차 지연형

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

b. 1차 지연형 :

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

여기서,  $\zeta$ 는 감쇠비,  $\omega$ 는 비감쇠 고유진동수,  $\tau_v$ 는 시정수, 그리고  $K_v$ 는 속도투프게인 이다. Fig. 2 에 한 축에 스텝 시험입력신호를 가하여 얻은 속도 제어루프 시스템의 응답과 근사적으로 구한 1차 및 2차 지연형 모델의 응답을 나타내었다. 이후의 내용은 앞서의 근사 모델을 사용한 시뮬레이션을 통하여 제안하는 방법에 대해 설명하고, 그 타당성 검증은 실험을 통하여 확인한다. 또한 컴퓨터 제어에서 샘플링시간은 중요한 설계인자이며, 본 연구에서는  $T=2$  msec로 설정하였다.

3. PID 알고리즘 고찰 및 제안 알고리즘

3.1 비례제어 및 비례적분제어 알고리즘

X-Y table에  $r(t) = At$ 인 경사입력을 인가하여  $t = 0 \sim 0.5$  sec동안 기준경로 추적제어를 실시하는 경우를 가정하여 기존의 비례제어 및 비례적분제어 알고리즘에 대하여 수식의 형태변화에 초점을 맞추어 고찰한다.

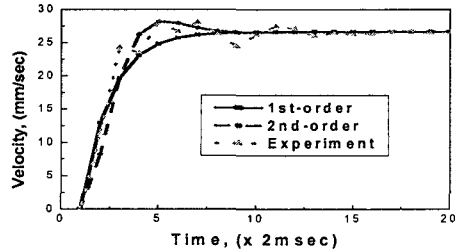


Fig. 2 Step responses of the feed drive system and the 1st and 2nd order models

비례제어의 차분방정식은 다음과 같다.

$$u_n = u_{n-1} + K_p(e_n - e_{n-1}) \tag{1}$$

운동중인 시스템이 오차의 변화가 없게 되면 (이하 이 상태를 정상상태라 칭한다.) 제어기 출력은 다음과 같이 일정하게 된다.

$$u_n = u_{n-1}$$

비례적분제어의 차분방정식은 다음과 같다.

$$u_n = u_{n-1} + K_p(e_n - e_{n-1}) + K_i e_n \tag{2}$$

정상상태에 진입하게 되면 식 (2)의 두 번째 항이 소멸하여 제어기 출력은 다음으로 변형된다.

$$u_n = u_{n-1} + K_i e_n \tag{3}$$

식 (3)에서 두 번째 항의 작용으로 인하여 시스템은 정상상태 오차가 있음을 인식하고 추가 입력을 이전의 제어기출력에 더해준다. 따라서 비례적분제어 알고리즘은 정상상태 오차를 “0”으로 수렴시킬 수 있으며 이때의 제어기 출력은 다음과 같이 일정하게 된다.

$$u_n = u_{n-1}$$

하지만, 입력의 포화시 발생하는 오차누적의

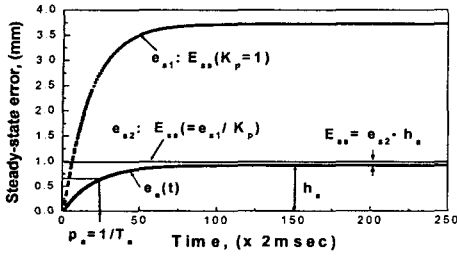


Fig. 3 Added error model

문제와 위치오버슈트 문제 등으로 인하여 동작기계 제어에는 그 사용이 제한적이다.<sup>(12)</sup> 하지만 식 (3)의 두 번째 항을 적분방식이 아닌 다른 방법으로 시스템에게 현재 정상상태오차가 있다는 것을 알려준다면 위 문제는 발생하지 않으며, 정상상태 오차를 제거할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 흐름변수인 오차신호( $e(t)$ )의 변형을 이용한 문제해결 방법을 제안한다.

3.2 제안 알고리즘의 구성

제안하는 방법의 기초개념은 다음과 같다.

· 오차신호 :  $e_{tot}(t) = e(t) + e_a(t)$

· 제어입력 :  $u(t) = K_p e_{tot}(t)$

제어입력의 차분방정식은 다음과 같다.

$$u_n = u_{n-1} + K_p(e_n + e_{an}) - K_p(e_{n-1} + e_{a(n-1)})$$

여기서,  $e_a(t)$ 를 오차모델이라 정의하고, 모델결정 과정을 설명하면서 오차모델식을 제시한다. 첫째로, 경사입력에 대한 단위게인 비례제어를 수행하면 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 정상상태오차  $e_{s1}$ 을 갖는 오차응답곡선을 얻는다. 여기서 단위게인이란 기준이 되는 비례계인으로 본 연구에서는  $K_p = 1$ 로 하였다. 두 번째로 Fig. 4에 나타낸 비례계인의 증가에 따른 정상상태 오차의 관계로부터 알맞은 비례계인을 선정한다. 이때의 정상상태 오차는  $e_{s2}$ 이며 Fig. 3에서 수평 실선으로 표현하였다. 마지막으로,  $e_{s2}$ 로 수렴하는 부가

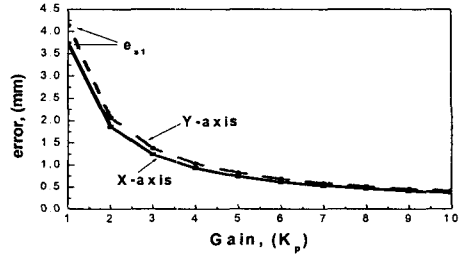


Fig. 4 Steady-state tracking error for a variety of proportional gains

하는 오차곡선의 형태를 결정한다. 이 곡선의 형태는 다양하게 결정할 수 있지만 본 연구에서는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 오차응답곡선의 형태가 계단입력에 대한 1차 시스템의 출력형태 임에 착안하여 다음과 같은 모델을 제시한다.

· 오차모델:  $e_a(t) = h_a(1 - e^{-p_a t})$

따라서, 오차모델의 설계변수는 부가하는 오차곡선의 정상상태 값인  $h_a$ 와 시정수의 역수를 나타내는  $p_a$ 가 된다. 여기서 지수함수 항( $e^{-p_a t}$ )은  $p_a$  값에 따라서 과도상태에서의 제어입력의 형태를 결정하며 일정시간이 지나면 소멸한다.  $h_a$ 는  $E_{ss} = e_{s2} - h_a$ 의 관계를 가지며,  $h_a \leq e_{s2}$ 를 만족하도록 결정한다. 하지만, 제안하는 방법은 경사입력을 기준으로 설계하기 때문에 계단입력이 인가될 때에는 오차모델의 영향으로 인하여 설계변수  $h_a$ 만큼 옅셋이 발생한다. 이 옅셋을 예방하기 위하여 실제 구현 알고리즘에서는 설계변수  $h_a$ 를  $K_a \Delta r(t)$ 로 대체한다.  $K_a$ 는 비례상수이고,  $\Delta r(t)$ 는  $r(t) - r(t - T)$  즉, 기준 입력의 차를 나타낸다. 그 결과 샘플링시간이 고정되었기 때문에  $\Delta r(t)$ 의 변화는 이송속도의 변화로 나타나고 또한 기준경로는 대부분  $\Theta$ 의 함수로 정의할 수 있기 때문에 이송속도의 변화 및 방향의 변화 모두에 적응성을 갖게 된다. 여기서,  $\Theta$ 는 x축과 기준경로 사이의 각이다. 앞서의 절차를 거쳐 얻은 오차모델 및 제어입력은 다음과 같다.

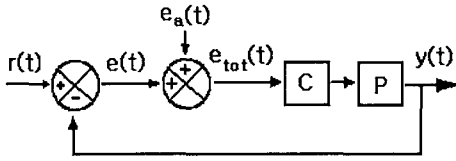


Fig. 5 Block diagram of the proposed closed-loop system

- 오차모델:  $e_o(t) = K_o(1 - e^{-\rho t})\Delta r(t)$  (4)
- 제어입력:  $u(t) = K_p e(t) + K_i K_o(1 - e^{-\rho t})\Delta r(t)$

Fig. 5는 제안하는 방법이 적용된 전체 시스템 블록선도를 나타낸다. 그림에서 기호 C는 제어기를 나타내고, 플랜트 P는 앞에서 구한 1차지연형 모델에 적분기( $\frac{1}{s}$ )가 포함되어 있다. 따라서 1형 시스템의 형태로  $P = \frac{K_m}{s(s + p_m)}$ 이다. 여기서,

$$p_m = \frac{1}{\tau_v} \text{ 이고, } K_m = \frac{K_v}{\tau_v} \text{ 이다.}$$

#### 4. 제안 알고리즘의 설계변수 선정

##### 4.1 비례게인 $K_p$ 의 선정

Fig. 4로부터 설계기준속도에서의 비례게인과 정상상태 오차와의 관계는 다음과 같이 공식화할 수 있다.

$$e_{s,2} = \frac{e_{s,1}}{K_{px}} \tag{5}$$

즉, 오차모델을 적용하지 않은 비례제어 만으로 시스템의 안정성 범위 내에서 원하는 정상상태 오차  $e_{s,2}$ 를 만족하도록 식 (5)로부터 한 축(x)의 비례게인을 결정한다. 다른 축(y)의 비례게인은 Poo 등<sup>(2)</sup>의 논문에서 언급한 바와 같이 “윤곽오차  $\approx 0$ ”을 위해서는 두 축의 동특성이 일치해야 한다. 이 조건을 오픈루프 전달함수로부터 다음과 같이 단순화하여 표현한다.

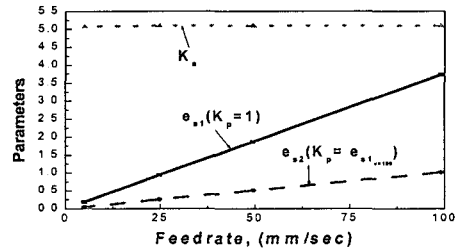


Fig. 6 Relation between parameter  $K_o$  and feedrate when T=2 msec

$$\frac{G_{opx}(0)}{G_{opy}(0)} = \frac{K_{px}K_{vx}}{K_{py}K_{vy}} = 1 \tag{6}$$

따라서, 두 축 사이에는 다음관계를 만족한다.

$$K_{py} = \frac{K_{vx}}{K_{vy}} K_{px} \tag{7}$$

##### 4.2 설계변수 $K_o$ 의 선정

비례게인이 결정되면 그 값에 해당하는 설계변수  $K_o$ 를 다음 식으로부터 구한다.

$$K_o = \frac{h_o}{\Delta r(t)} \tag{8}$$

여기서,  $h_o \leq e_{s,2}$ 이다.

Fig. 6에서 실선(solid)은  $K_p=1$ 일 때 각각의 이송 속도에서의 정상상태 오차  $e_{s,1}$ 을 나타내고, 파선(dash)은 이송속도 100 mm/sec를 설계기준속도로 정하여  $\zeta \geq 1$ 을 만족하고, 또한  $e_{s,2} = 1.0$ 을 만족하도록 선정된 비례게인  $K_p = e_{s,1,100}$ 에 대한 각각의 속도에서의 정상상태오차  $e_{s,2}$ 를 나타내며 이때의 해당  $K_o$ 값을 식 (8)로부터 계산하여 점선(dot)으로 나타내었다. Fig. 6에서 특정속도에서 결정한  $K_o$ 의 값은 속도 변화에 무관하게 전 영역에서 일정한 값을 보인다. 이것은 정현입력과

Table 1 Examples of computed parameter values with varying  $\Delta r(t)$

	case1	case2	case3	case4
$K_p$	3.7	1.86	0.93	0.19
$K_a$	5.07	10.08	20.16	98.66
$\Delta r(t)$	0.2	0.1	0.05	0.025

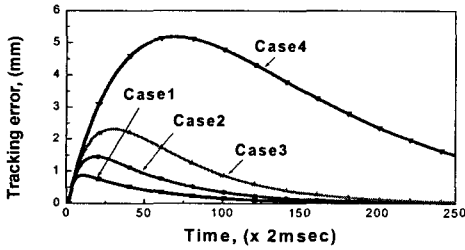


Fig. 7 Tracking error for examples of Table 1, for  $r(t)=100 \cdot t$

같은 연속적인 속도 변화에 대하여도 잘 적용될 수 있음을 나타낸다. Fig. 7은 설계기준속도 4가지 경우의 설계변수들에 대하여 동일한 경사입력에 대한 오차응답곡선으로 해당 값들을 Table 1에 예시하였다. Fig. 7에서  $\Delta r(t)$ 의 값이 클수록 정상상태오차의 크기가 작고, 0으로 빠르게 수렴하고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 설계변수의 선정은 가능한 한 최대 이송속도를 기준으로 결정하는 것이 바람직하다.

4.3 설계변수  $p_a$ 의 선정

설계변수  $p_a$ 는 부가하는 오차곡선의 시정수의 역수에 해당되며 과도상태에서의 제어입력의 형태를 결정하기 때문에 과도응답 사양을 고려하여 결정한다. Fig. 8에  $p_a$ 값의 변화에 대한 제어입력의 변화를 나타내었다.

4.4 정상상태 오차 해석에 의한 계인선정.

Fig. 5의 블록선도는 오차 해석을 위하여 Fig. 9와 같이 변형할 수 있으며, 이 시스템에 대한 정상상태 오차는 다음과 같다.

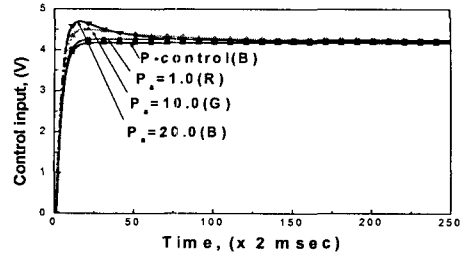


Fig. 8 Relation between control input and parameter  $p_a$  when  $K_a = Const.$

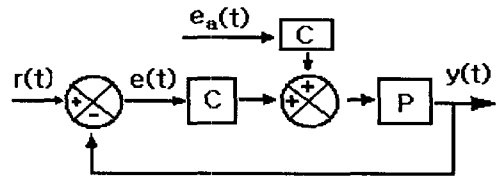


Fig. 9 Modified block diagram of the proposed closed-loop system

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

여기서,  $D(s)$ 는  $d(t) = K_a(1 - e^{-p_a t})\Delta r(t)$ 의 라플라스 변환 값이며, 지수함수 항은  $t \rightarrow \infty$  감에 따라 소멸하며,  $\Delta r(t)$  항에 대하여 근사적으로 도함수의 정의를 적용하여  $\Delta r(t) \cong T \frac{dr(t)}{dt}$ 로 나타내고 이를 라플라스 변환하여 정리하면 외란 항은  $D(s) = K_a T s R(s)$ 이 된다. 경사입력( $\frac{A}{s^2}$ )

에 대하여, 최종값정리를 적용하여 전개하면 다음의 식을 얻는다.

$$\lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \frac{A(p_m - K_a T K_p K_m)}{K_p K_m} = E_{ss} \quad (9)$$

4.5 설계변수 선정 예

4.5.1 도해적 방법에 의한 선정

$r(t) = 100 \cdot t$ 인 경사입력에 대하여,

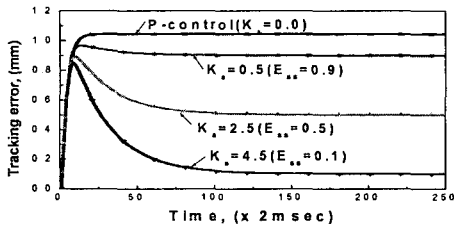


Fig. 10 Relation between tracking error and parameter value  $K_a$  when  $p_a = Const.$

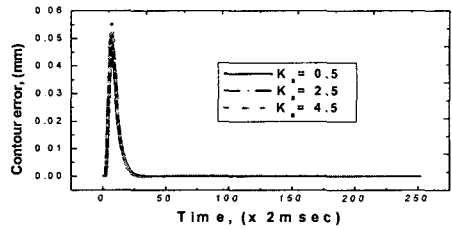


Fig. 11 Relation between contour error and parameter value  $K_a$  when  $p_a = Const.$

step1: 오차응답곡선으로부터  $e_{s1} = 3.749$  획득.  
 step2:  $K_p = 3.749$ 으로 선정하면  $e_{s2} = 1$ .  
 step3:  $h_a = 0.9$ 로 선택하면  $E_{ss} = e_{s2} - h_a = 0.1$ 이 되어 식 (8)로부터  $K_a = 4.5$ 로 결정된다.  
 또한,  $p_a = 20$ 으로 결정한다.

4.5.2 오차해석에 의한 선정

비례게인  $K_p = 3.749$ 에 의한  $E_{ss} = 0.1$ 을 만족시키기 위한  $K_a$ 의 값은 식 (9)로부터 다음과 같다.  $R(s) = \frac{A}{s^2}$ 에 대하여,

$$K_a = \frac{Ap_m - E_{ss}K_pK_m}{ATK_pK_m} = 4.5$$

여기서,  $p_m = 333.3$ ,  $T = 0.002$ ,  $K_m = 8890$

따라서, 도해적 방법에 의한 결과와 동일함을 알 수 있다.

5. 시뮬레이션 및 실험

5.1 시뮬레이션

앞에서 설계된 제어알고리즘을 적용하여 2장에서 모델링한 2차형 모델에 대하여  $\Theta=45^\circ$ 방향으로 100 mm/sec의 이송속도로 직선경로를 추적하도록 시스템을 구성하여 시뮬레이션을 수행하였다.

· x축 및 y축의 시스템변수는 다음과 같다.

$$\zeta_x=0.67, w_{nx}=497.5, K_{vx}=26.67$$

$$\zeta_y=0.53, w_{ny}=926.2, K_{vy}=23.92$$

Fig. 10은 설계변수  $p_a = 20$ 으로 일정하게 하고  $K_a$ 를 0.0에서 4.5의 값에 대한 추적오차의 변화를 나타낸다.  $K_a$ 값이 증가할수록 추적오차량은 감소하고 있으며, 각 경우에 대한 정상상태 오차  $E_{ss}$ 의 값은 설계된 결과값이 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 그리고  $K_a = 0.0$ 의 경우는 비례제어 시스템이 된다. Fig. 11은 윤곽오차의 결과를 나타내고 있다. 그림으로부터 설계변수  $K_a$ 의 값을 증가시켜도 윤곽오차는 일정하게 "0"임을 확인할 수 있다. 이것은 윤곽오차는 계인의 크기와는 무관하고 단지 두 축사이의 동특성의 일치에만 의존한다는 것을 의미한다. 따라서 식 (7)에 의한 계인의 선정으로부터 시스템 계인이 일치하고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 12는  $\Theta=45^\circ$  방향의 거리 7.07 mm 위치에 대한 점대점(point to point)제어를 수행한 결과이다. 제안한 방법은 스텝입력에 대하여  $\Delta r(t) = 0$ 을 출력하기 때문에  $e_o(t) = 0$ 이 되어 전체시스템은 비례제어 시스템으로서 위치 오버슈트 문제는 발생하지 않음을 볼 수 있다. 이 때 비례적분제어는 위치의 오버슈트가 발생하지 않도록 계인을 선정했다.

5.2 실험

Fig. 13은  $\Theta=45^\circ$ 방향, 70.71 mm 거리의 직선경로에 대하여  $t = 0$ 에서 250스텝동안 경사입력이 인가되고, 이후 100스텝동안은 현재 위치에 정지하도록 경로를 구성하고, 100스텝마다 x축에 0.5 V 외란입력이 인가되는 경우를 가정한 실험결과이다. 제안한 알고리즘의 정상상태 오차는  $E_{ss} = 0.1$ 을 만족하고 있음을 확인할 수 있으며, 외란입력에 대하여 비례제어는 0.025 mm, 비례적

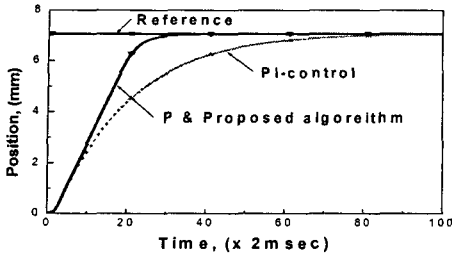


Fig. 12 Simulation result for step input

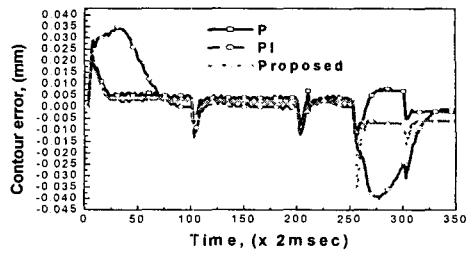


Fig. 14 Contour error with disturbance

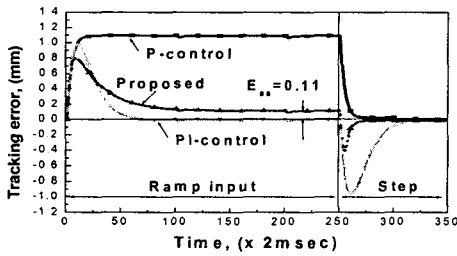


Fig. 13 Tracking error with disturbance

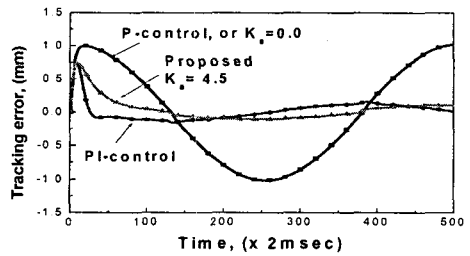


Fig. 15 Tracking error for sinusoidal input

분제어는 0.025 mm의 변동을 보이고, 제안한 알고리즘은 0.027 mm의 변동을 보인다. 그리고 250 스텝에서 경사입력에서 스텝입력으로의 기준경로 변경에 대하여 비례분제어에 비해 오차의 발생이 적은 것을 확인할 수 있다. Fig. 14는 외란입력에 대한 윤곽오차의 변동을 나타낸다. 외란입력에 대하여도 일정한 윤곽오차 발생을 유지하고 있음을 확인할 수 있으며 250스텝에서 기준경로 변경 시 정상상태로의 복귀가 빠름을 확인할 수 있다. Fig. 15는 정현입력의 예로써 이송속도 100 mm/sec로 반지름 15 mm의 원을 0.5초 동안 1회 전하도록 경로를 구성하여 실험한 추적오차의 변화를 나타낸다. 원형경로는 연속적으로 속도가 변화하지만, Fig. 6에서 나타낸 바와 같이, 고정된 샘플링시간에 대해 식 (8)로부터 설계변수  $K_a$ 를 선정함으로써 운동방향 및 속도의 변화에 대해서도 원하는 추적성능을 획득할 수 있음을 확인할 수 있다. Fig. 16은 반지름방향의 추적오차(윤곽오차)의 변화를 나타낸다.  $K_a = 0.0$ 으로 설정하면 비례제어 시스템이 되어 발생한 최소 오차량은 -0.011 mm이며,  $K_a$ 의 최대값인  $K_a = 4.5$ 에 대하여 +0.033 mm이었다. 이 오차가 다양한 원인에

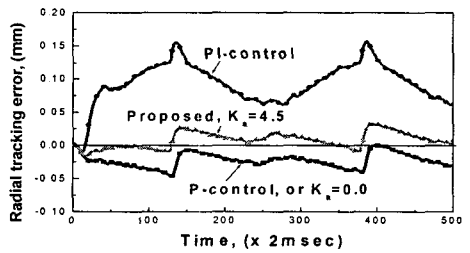


Fig. 16 Radial tracking error for sinusoidal input

의해 발생했는지라도  $K_a$ 값의 선정에 따라 윤곽오차는 앞서의 최소 및 최대값 범위 내에서 발생하게 될 것이다. 이것은 실시간에서 설계변수  $K_a$  값을 조정함으로써 윤곽오차발생이 "0"으로 수렴하도록 제어할 수 있음을 시사한다.

## 6. 결론

오차모델을 정의하고 이를 현재의 오차에 추가하여 실제 오차신호로 사용하는 제어 알고리즘을 제안하였다. 이를 X-Y table에 적용하여 시뮬레이



선 및 실험을 통해 다음의 결론을 내릴 수 있다.

(1) 비례 및 비례적분제어 알고리즘의 장점을 살리고 단점을 보완하였으며, 다양한 표준입력들에 대한 응답이 양호함을 확인하였다.

(2)  $E_{ss} = e_{s2} - h_a$ 의 관계로부터 쉽게 정상상태 오차의 예측 및 조정이 가능하다.

(3) 도해적 방법 및 오차해석 방법을 이용하여 간편하게 설계변수( $K_p, K_o, p_o$ )의 값을 결정할 수 있으며, 또한 알맞은  $K_p$ 의 선정으로 시스템 계인이 일치하였을 경우 직선경로에서 윤곽오차가 발생하지 않음을 확인하였다.

(4) 알고리즘의 구조가 단순하고 설계가 간편하여 현장에서의 실제적 응용이 용이하다.

앞으로의 연구는 시스템 계인의 불일치로 인한 윤곽오차의 발생시 이를 실시간에서 보상할 수 있는 가변계인 구조의 보상 방법이 요구된다.

### 참고문헌

- (1) Kang, S. K. and Seo, S. W., 2002, "Design and Principle of CNC System," *Chung Mun Gak*, Seoul, pp. 191~232.
- (2) Poo, A. N., Bollinger, J. G. and Younkin, G. W., 1972, "Dynamic Errors in Type 1 Contouring Systems," *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. IA-8, No. 4, pp. 477~484.
- (3) Koren, Y., 1980, "Cross-Coupled Biaxial Computer Control for Manufacturing Systems," *ASME Trans. J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 102, pp. 265~272.
- (4) Kulkarni, P. K. and Srinivasan, K., 1990, "Cross -Coupled Control of Biaxial Feed Drive Servomechanisms," *ASME J. of Dynamics systems, Measurement and Control*. Vol. 112, pp. 225~232.
- (5) Koren, Y. and Lo, C. C., 1991, "Variable-Gain Cross-Coupling Controller for Contouring," *Annals of CIRP*, Vol. 104, pp. 371~374.
- (6) Joo, J. H., Lee, H. C., Lee, Y. J. and Jeon, G. J., 1997, "A New Method of Contour Error Modeling for Cross-Coupled Control of CNC Machines," *ICASE Magazine*. Vol. 3, pp. 389~397.
- (7) Na, I. J., Choi, C. H., Jang, T. J., Choi, B. K. and Song, O. S., 1997, "Contour Error Analysis and PID Controller Design for Machining Center," *ICASE Magazine*. Vol. 3, pp. 32~39.
- (8) Jee, S. C. and Yun, S. P., 2002, "Adaptive Cross-Coupling Control System Considering Cutting Effects," *Trans. of KSME(A)*, Vol. 26, pp.1480~1486.
- (9) Lee, G. B., Jung, Y. C. and Sim, Y. B., 1997, "Asymmetrical Contouring Control of Biaxial System," *J. of KSPE*, Vol. 14, pp. 65~72.
- (10) Jeon, D. Y. and Park, K. Y., 1998, "Intelligent Friction Compensation of Servo Systems," *Trans. of KSME(A)*, Vol. 22, pp. 1177~1184.
- (11) Jee, S. C., 1998, "A Study on the Friction Compensation in CNC Servomechanisms by Fuzzy Logic Control," *J. of KSPE*, Vol. 15, pp. 56~67.
- (12) Astrom, K. J. and Hagglund, T., 1988, "Automatic Tuning of PID Controllers," *Instrument Society of America*, pp. 3~14.
- (13) Gil, H. G. and Lee, G. B., 2004, "A P-Parallel Controller Design Based on P-Control Ramp Response in Machine Tool," *Proc. KSME Spring*, pp. 780~785.