

# 추적오차 및 윤곽오차의 상호 절충을 통한 CNC 밀링머신 이송장치의 위치제어

길형균\*, 양호석<sup>+</sup>, 이건복<sup>++</sup>

(논문접수일 2005. 2. 24, 심사완료일 2005. 10. 6)

## Positioning Control through a Trade-off between Tracking Error and Contour Error for a Feed Drive System in CNC Milling Machine

Hyeong-Gyeun Gil\*, Ho-Suk Yang<sup>+</sup>, Gun-Bok Lee<sup>++</sup>

### Abstract

This paper deals with the position control for a feed drive system in CNC milling machine. The study shows that reduction in tracking error does not necessarily increase contouring accuracy, and proposes that a proper control scheme is able to exhibit the optimal tracking and contouring accuracy. The proposed scheme is to fix the parameter of the contouring control, and to find the optimal value of the parameter of the tracking control, which is automatically tuned. The effectiveness of the proposed scheme is confirmed through simulations.

**Key Words** : 윤곽제어(Contouring control), 오차모델(Error model), 추적제어(Tracking control), 절충(Trade-off)

## 1. 서론

CNC 밀링머신의 이송장치는 두 축이 상호 직교하는 전형적인 2축 시스템이다. 이 시스템의 위치 정밀성 향상을 위한 제어기 설계는 오차의 관점에서 크게 기준위치에 대한 추적제어와 윤곽오차에 초점을 맞춘 윤곽제어로 구분할 수 있다. 추적제어 방식은 기준위치와 현재위치 사이의 차이를 추적오차로 정의하고 이 값을 줄임으로써 결과적으로 윤곽정밀

성을 향상시킨다. 따라서 윤곽오차의 크기는 추적성능에 의존하게 된다. 추적제어에서 일반적으로 사용하는 제어 알고리즘은 비례(P)제어이다. 이 알고리즘은 구조가 간단하고 구현이 용이한 장점을 갖는 반면 P제어 고유한 특성으로 인하여 정상상태에서 항상 오차를 수반한다. 반면에 윤곽제어 방식은 현재위치에서 기준경로사이의 최단거리를 윤곽오차로 정의하고 이를 제거하기 위한 제어입력을 생성하는 방식으로 이에 대한 많은 연구가 수행되어 왔다.

\* 숭실대학교 기계공학과 대학원 (waycon67@empal.com)

주소: 156-743 서울시 동작구 상도5동 1

+ 숭실대 기계공학과 대학원

++ 숭실대 기계공학과

Poo<sup>(1)</sup>등은 1형(type 1) 컨투어링 시스템에서 발생하는 윤곽오차의 주요 원인은 두 축사이의 시스템 계인의 불일치(mismatch)에 있으며 이때의 실제 위치는 반경의 확대/축소 및 타원화현상을 나타내고 있음을 보였다. 또한 고속에서 만족할만한 윤곽정밀성을 보유하기 위해서는 우선적으로 잘 일치된 높은 시스템 계인을 설정할 것을 제시하고 있다. 이러한 관점에서 Koren<sup>(2-4)</sup>은 추적오차 및 한 축에 대하여 기준경로가 이루는 각도 정보를 이용하여 두 축사이의 상호연성관계를 윤곽오차에 도입하여 이를 제어입력에 반영함으로써 가공부 윤곽정밀성을 크게 향상시킬 수 있는 제어방법을 제안하였다. 이때 추적오차의 크기는 P제어에 비해 경미하게 증가하는 특성을 갖는다. 특히 Jee<sup>(5)</sup>등은 윤곽의 곡률반경에 따른 비례계인과 윤곽계인의 값을 조정해 줌으로써 곡률변화에 기초하여 효율적인 제어입력을 발생시켜 추적오차 및 윤곽오차를 감소시킬 수 있는 제어방법을 제안한 바 있다. 이러한 관점에서 본 논문에서는 추적제어 방식과 윤곽 제어 방식을 결합하여 윤곽오차 관점에서 추적오차와의 절충을 이루어 합리적인 제어성능을 발휘할 수 있는 제어방법을 제안한다.

## 2. 실험장치 및 모델링

### 2.1 실험장치

제어 알고리즘의 타당성 및 성능 평가를 위한 플랜트 모델로는 CNC 밀링머신의 이송장치인 X-Y 테이블을 사용한다. 각 축의 이송장치는 3상 AC서보 드라이버와 모터, 5mm 피치의 볼 스크류 및 작업 테이블로 구성되며, 서보 드라이버는 Yaskawa 속도 서보팩(velocity servo pack)으로서 아날로그 비례-적분(PI)제어 방식에 의해 속도 피드백 제어를 수행한다. 또한 12비트 해상도를 가지며 ±5V의 출력범위를 갖는 D/A변환기와, 1회전 당 1500개의 펄스신호를 4채배하여 총 6000펄스신호를 출력하도록 구성된 엔코더 보드에 의해 컴퓨터와 인터페이스 되어 있다. Fig. 1에 X-Y 테이블의 한 축을 개략적으로 도시하였다.

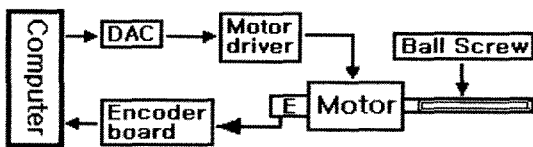


Fig. 1 Schematic of the feed drive system for a single axis.

### 2.2 모델링

모델링은 DAC, 서보드라이버, 서보모터 및 테이블을 일체로 간주하여 스텝응답에 기초하여 수행하였다<sup>(6)</sup>. 방법은 초기 50스텝은 1V 전압입력을 인가하고 51스텝 이후에는 2V 전압을 인가하여 엔코더 데이터로부터 1000 Hz의 샘플주파수로 100개의 데이터를 수집하였으며, 이 정보를 테이블의 위치값으로 환산하여 전압입력에 대한 속도출력사이의 다음과 같은 근사 모델 식을 획득하였다.

a. 2차 지연형

$$G_i(s) = \frac{v_{ss}}{V_m} = \frac{K_{vi}w_{ni}^2}{s^2 + 2\Phi_i w_{ni}s + w_{ni}^2}, \quad i = x, y$$

여기서, 각 파라미터 값은 다음과 같다.

$$K_{vx} = 26.13, \Phi_x = 0.6, w_{nx} = 785.4$$

$$K_{vy} = 23.58, \Phi_y = 0.43, w_{ny} = 1160$$

b. 1차 지연형 :

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

여기서,  $\zeta_i$ 는 감쇠비,  $w_{ni}$ 는 비감쇠 고유진동수,  $T_{vi}$ 는 시정수 그리고  $K_{vi}$ 는 속도제어루프 계인이다.

모델의 유효성을 검증하기 위하여 스텝 시험입력신호에 대한 한 축의 속도 제어루프 시스템의 실제응답과 1차 및 2차 지연형 근사모델의 응답을 구하여 51스텝에서 75스텝까지 응답곡선을 Fig. 2에 도시하였다. 그리고 이후 시물레이션에 사용하는 샘플링시간은  $T = 2\text{msec}$ 로 고정한다.

이후 제어기 설계는 1차 지연형 모델을 사용하였으며,

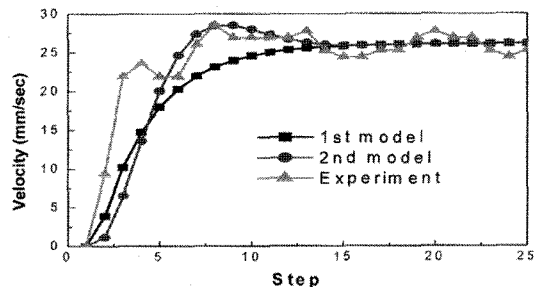


Fig. 2 Step response for the feed drive system, 1st and 2nd-order models

=0.7에 해당하는 위치제어시스템의 비례게인  $K_p$ 의 값은 근  
 궤적으로부터 x축 9.41, y축 10.7을 얻으며, 본 연구에서는  
 이 값의 범위 이내에서 비례게인을 결정한다.

### 3. 제어 알고리즘의 재구성

#### 3.1 오차의 정의

Fig. 3은 직선경로에 대한 현재위치(P)로부터 기준위치  
 $(\vec{P}_r)$ 까지의 크기인 추적오차( $\vec{e}$ )와 현재위치에서 가장 가  
 가까운 기준경로상의 위치( $\vec{P}_c$ )까지의 크기인 윤곽오차( $\vec{\epsilon}$ ) 그리  
 고 추적오차와 윤곽오차사이의 차를 나타내는 값  $\vec{\delta}$ 를 나타  
 낸다. 그림으로부터  $\vec{\delta}$ 의 크기는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$|\vec{\delta}| = |\vec{e}| - |\vec{\epsilon}| = \sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2} \quad (1)$$

여기서,  $\vec{\delta}_x = \vec{e}_x + \vec{\epsilon}_x$ ,  $\vec{\delta}_y = \vec{e}_y + \vec{\epsilon}_y$ 이다.

그리고 윤곽오차와 추적오차 사이의 비는 두 오차의 정의  
 로부터 항상 다음의 관계를 만족한다.

$$-1 < \frac{\Phi(t)}{e(t)} < 1 \quad (2)$$

#### 3.2 추적제어 알고리즘

본 저자는 오차모델( $e_a(t)$ )을 이용한 비례제어 기반의 정  
 상상태에서 추적오차를 0으로 수렴시킬 수 있는 제어 알고  
 리즘을 다음과 같이 제안하였다<sup>(7)</sup>.

$$u(t) = K_p(e(t) + e_a(t)), \quad (3)$$

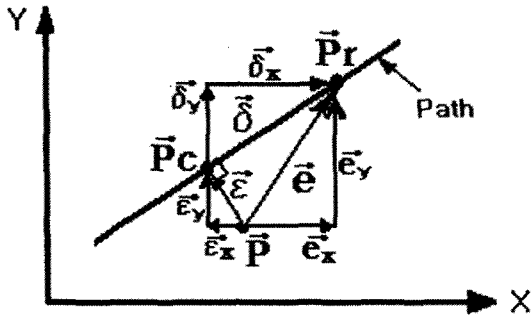


Fig. 3 Definition of tracking( $\vec{e}$ ), contour error( $\vec{\epsilon}$ ) and their vector difference( $\vec{\delta}$ ) along with a path

여기서,  $e_a(t) = K_a(1 - e^{-p_a t})\Delta r(t)$ 이다.

또한 오차모델의 크기는 설계 절차상 항상 다음의 영역  
 내에 있다.

$$0 \leq |e_a(t)| \leq 1 \quad (4)$$

Fig. 4와 Fig. 5는 제어법칙(control law) 식 (3)을 이용하  
 여 반지름 R=15mm인 원 경로를 각속도  $w = 6.28\text{rad/sec}$   
 로 추적하도록 시뮬레이션을 수행한 결과로써,  $K_{px} = 3.827$ 에  
 대하여 설계변수  $K_a$ 값을 증가시키며 얻은 추적오차와 윤곽  
 오차의 변화를 나타낸다. 그림으로부터 추적오차는  $K_a$ 값에  
 대해 선형적으로 변화하여 0으로 수렴하지만 윤곽오차는 일  
 정한 크기의 진폭을 유지하면서 비선형적으로 확대되고 있  
 음을 알 수 있다. 이 때 Fig. 5에서 윤곽오차의 형태 즉 타원  
 화 현상에는 큰 변화가 없다는 사실로부터  $K_a$ 값은 주로 추적  
 성능에 관여하며 그 결과로써 윤곽오차의 발생 영역 즉 반경  
 의 확대/축소를 결정한다.

#### 3.3 윤곽제어 알고리즘

윤곽제어 알고리즘에 관한 많은 연구 결과들이 있지만 본  
 연구에서는 구조가 간단하고 계산이 용이한 Srinivasan<sup>(8)</sup>등  
 이 제안한 알고리즘을 이용한다.

$$u(t) = K_p e(t) + G\epsilon(t), \quad G = WK_p \quad (5)$$

$$\epsilon(t) = -\sin\theta e_x(t) + \cos\theta e_y(t) \quad (6)$$

식 (5)의 형태를 다음과 같이 변형할 수 있다.

$$u(t) = K_p(1 + K_r(t))e(t) \quad (7)$$

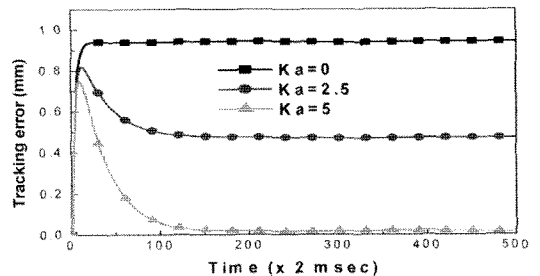


Fig. 4 Tracking error according to increasing  $K_a$

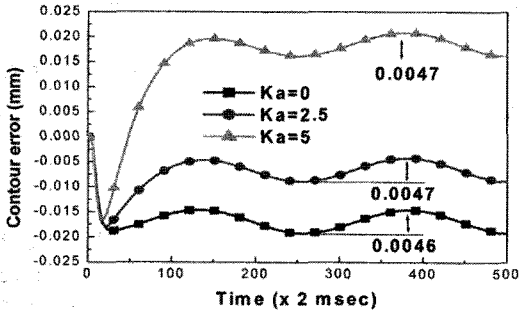


Fig. 5 Contour error according to increasing  $K_a$

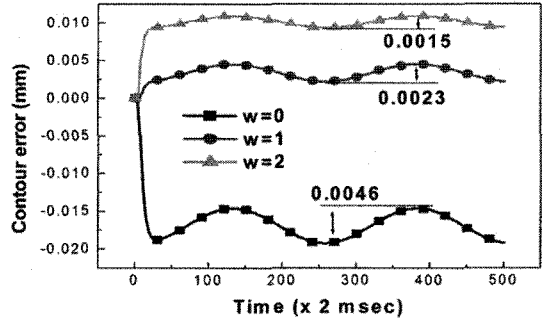


Fig. 7 Contour error according to increasing  $W$

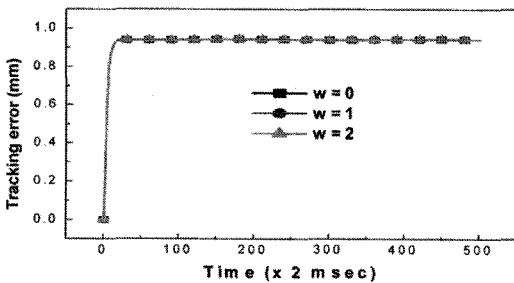


Fig. 6 Tracking error according to increasing  $w$

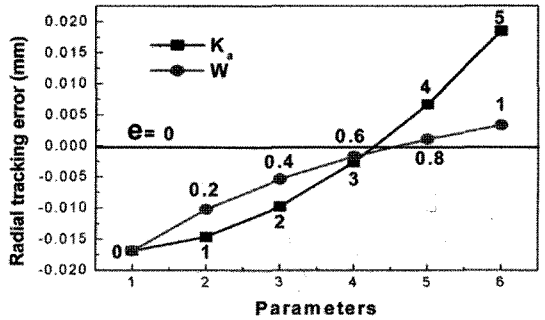


Fig. 8 Contour errors according to increasing  $K_a$  &  $W$

여기서,  $K_r = W \frac{\epsilon(t)}{e(t)}$  이다.

식 (7)에서  $K_p$ 를 고정하면 설계변수  $W$ 의 변화에 따른 오차발생의 형태를 쉽게 파악할 수 있으며 Fig. 6과 Fig. 7에 그 결과를 나타내었다.

그림에서 보는 바와 같이  $W$ 값의 증가는 추적오차와는 무관하고 단지 반경의 확대와 함께 타원화현상을 감소시키고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 설계변수  $K_a$ 와  $W$ 의 변화에 따른 반경의 확대/축소현상의 결과를 나타낸다. 그림으로부터 두 설계변수의 선정에 따른 반경 확대/축소 정도를 예측할 수 있으며, 역으로  $\epsilon = 0$ 을 만족시킬 수 있는 값을 결정할 수 있다.

### 3.4 알고리즘의 재구성

윤곽제어 알고리즘은 추적성능에는 거의 영향을 주지 않음은 기지의 사실이다<sup>(2)</sup>. 또한 제한 알고리즘은 윤곽오차 곡선의 형태에는 무관하고 주로 추적오차에 관여하고 있음을

앞서 모의실험 결과로부터 확인하였다. 이러한 관점에서 두 제어 알고리즘은 서로 독립적이라 간주하여 특별한 알고리즘의 수정 없이 식 (3)과 식 (7)을 결합하면 다음과 같다.

$$u(t) = K_p(1 + K_r(t))e(t) + K_p e_a(t) \quad (8)$$

식 (8)에서 우측 첫째항은 되먹임제어 항에 해당하고, 둘째항은 앞먹임제어 항이다.

Fig. 9는 두 제어규칙을 결합한 전체 시스템 블록선도이다. 그림에서 연산기능을 담당하는 기호 CAL1은 실시간에서 윤곽오차를 포함한  $K_r$ 값을 계산하고, CAL2는 오차모델의 값을 계산한다. 그리고 기호 P는 플랜트, C는 제어기를 나타낸다.

### 4. 설계변수의 선정

설계변수는  $K_p, K_r, K_a, p_a$ 이지만  $p_a$ 값은 다른 값들과 독립적으로 결정되는 인자로서 본 논문에서는  $p_a = 25$ 로 결정하

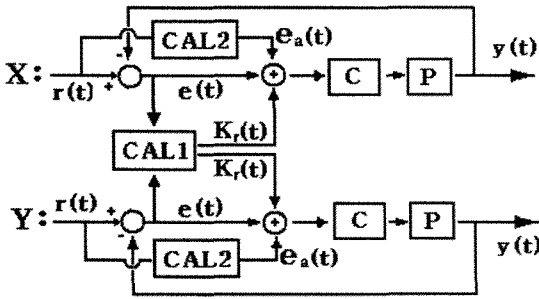


Fig. 9 Block diagram for the whole system

었다. 또한 설계변수  $K_c$ 과  $K_a$ 는  $K_p$ 값에 따라 종속되어 있기 때문에  $K_p$ 값을 결정하고  $K_c$ 값의 결정인자  $W$ 값을  $W=1$ 로 고정함으로써 제어성능은 설계변수  $K_a$ 값에 따라 결정되도록 설계를 단순화할 수 있다.

#### 4.1 비례계인 $K_p$

비례계인은 근궤적법으로부터 얻은 안정한 범위 이내의 값으로서 임의의 설계 기준속도에서 비례동작만을 적용하였을 경우 발생하는 정상상태 오차  $e_0$ 의 크기를 또 다른 설계 기준으로 정한다<sup>(7)</sup>. 본 논문에서는 자세한 내용을 생략하고 해당 수식만을 아래에 인용한다. 경사입력  $A/s^2$ 에 대한 정상상태 오차해석으로부터 결과 식은 다음과 같다.

$$K_{px} = \frac{A}{K_{vx} e_0} \quad (9)$$

또한 y축 비례계인  $K_{py}$ 는 시스템 계인 불일치를 보상할 수 있도록 다음 식에 의해 구한다.

$$K_{py} = \frac{K_{vx}}{K_{vy}} K_{px} \quad (10)$$

#### 4.2 설계변수 $K_a$

각 축의 정상상태 오차  $e_0$ 를 제거하기 위하여 부가하는 오차모델의 설계변수  $K_a$ 는 다음 식으로부터 구한다<sup>(7)</sup>.

$$K_a = \frac{h_a}{\Delta r(t)}, \quad h_a \leq e_0 \quad (11)$$

여기서,  $\Delta r(t)$ 는 기준입력의 변화량이고  $h_a$ 는 설계변수이다. 이때 각 축의  $K_a$ 는 동일한 값을 가지며 윤곽오차가 발생하지 않을 때의 추적 오차의 크기, 즉 Fig. 3에 정의한

단일 축의  $\vec{\delta}$  값에 대응하는 값으로  $|\vec{\delta}| = |\vec{e}|$ 이다. 하지만 기준 경로의 변화 및 속도의 변화 등에 기인하여 윤곽오차가 발생하기 때문에 식 (1)의 형태를 갖게 된다. 따라서  $K_a$  값은 이에 대응할 수 있도록 가변성을 보유하는 것이 바람직하며,  $K_a$ 와 추적오차 사이의 선형관계에 기초하여  $\vec{\delta}$ 값과  $\vec{e}$ 의 관계를 다음과 같이 정의한다.

$$K_a(t) = \frac{\delta(t)}{\delta_0} K_a \quad (12)$$

여기서,  $K_a$ 와  $\delta_0$ 는 초기값이며, 실시간에서 윤곽오차를 고려한  $\delta(t)$ 의 값을 계산함으로써 설계변수  $K_a(t)$ 값을 결정한다.

### 5. 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 장에서는 제한한 결합 알고리즘(CC+PA)을 적용하여 코너 경로 및 원 경로에 대한 시뮬레이션을 통하여 윤곽제어(CC), 추적제어 알고리즘(PA)과의 응답 특성을 비교한다. 각 알고리즘의 비교는 동일한 비례계인에 대하여 각 설계변수에 의한 제어입력의 부가에 따른 응답특성의 변화를 고찰하는 방식을 선택하였다. 경사입력  $100/s^2$ 에  $e_0 = 1$ 대환을 만족시키는 비례계인  $K_p = 3.827$ 에 대하여 각 알고리즘의 x축 설계변수의 값은 다음과 같다.

CC :  $W=1$ , PA :  $K_a=5, p_a=25$

CC+PA:  $W=1, p_a=25, K_a$  : 가변(variable)

#### 5.1 코너 경로

각 축의 이송속도는 100mm/sec를 기준으로 하였으며 가/감속이 없는 모서리부분의 운동을 가정하였다.

Fig. 10은 기준경로에 대한 추적오차의 변화를 나타낸다. 그림에서 CC+PA의 추적오차는 경로변화 전·후에서 평균 0.5858mm로써 CC의 1.4142mm에 비해 약 59% 감소되었다. 이때의  $K_a(t)$  값은 평균 2.929 값으로 초기값 5에 대하여 약 58%에 해당된다. 이 결과로부터  $K_a$ 값과 추적오차와의 선형관계를 만족하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 11은 모서리부분에서의 실제위치를 확대하여 도시한 그림이다. CC+PA의 모서리부분에서의 거동특성은 CC 단독의 경우에 대해 추적성능 향상에 따른 오차의 감소를 보이고 있는 반면 급격한 경로변화 이후의 거동은 거의 유사하게 나타난다. 그리고 P지점을 확대하여 보면 CC에 비해 윤곽오차가 다소 증가하지만 CC의 경우  $K_p$ 값을 증가시키면 동일하게 나타난다. 한편 윤곽오차 곡선의 형태를 결정짓는  $W$

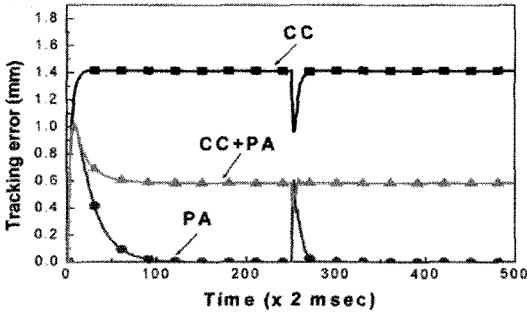


Fig. 10 Tracking error for corner path

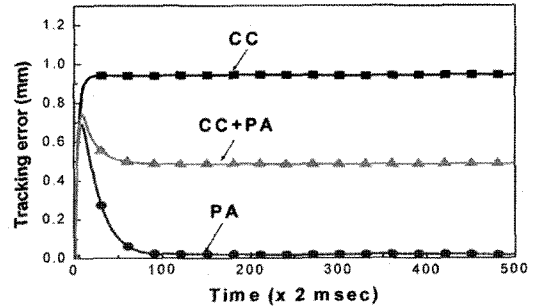


Fig. 12 Tracking error for a circular path, 6.28 rad/sec

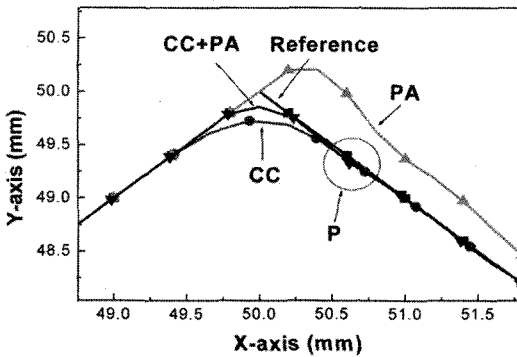


Fig. 11 Position plot for a corner path, feedrate 100 mm/sec

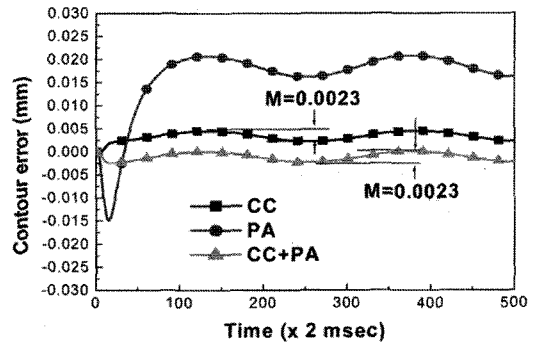


Fig. 13 Contour error for a circular path, 6.28 rad/sec

값의 영향은 쉽게 파악되지 않지만 곡선경로에서 보다 명확히 관찰할 수 있다.

### 5.2 곡선 경로

Fig. 12와 Fig. 13은 반지름  $R=15\text{mm}$ 인 원 경로에 대하여 각속도  $\omega=6.28\text{ rad/sec}$ 로 1초 동안 한바퀴 회전 운동하는 경우에 대한 결과이다. Fig. 12에서 추적오차는 코너경로에서 확인한 바와 같이  $K_f$  값에 대하여 선형관계를 나타내고 있다. 이때 설계변수  $K_f(t)$  값은 평균 2.4297이다. Fig. 13은 윤곽오차의 변화를 나타낸다. 그림에서 0점을 기준으로 각 알고리즘의 출력 값을 정상상태에서 평균을 계산하여 비교해 보면 CC의 경우 반경 확대, CC+PA의 경우 반경 축소를 나타내고 있다. 두 방식은 동일한  $W$ 값에 대한  $K_f$ 값의 유무의 차이로서 반경 확대에서 축소로 나타나고 있다는 사실로부터 설계변수  $K_f$ 의 영향력이 상대적으로 크게 작용함을

알 수 있다. 한편  $K_f=2.4297$ 에 대한 PA의 값은 평균  $-0.0076\text{ mm}$ 인 반면 CC+PA의 경우 평균  $-0.0012\text{ mm}$ 로 감소를 나타내고 있다. 이 결과는 반경 확대/축소에 있어서 임의의  $K_f$  값에 대한  $W$ 값의 기여 정도로 간주할 수 있다. 한편 타원화 현상은  $K_f$  값과는 무관하기 때문에 동일한  $W$ 값에 대하여 CC와 CC+PA는 같은 값을 가져야 한다. Fig. 13에서 정상상태 오차파형의 최대값과 최소값 사이의 구간(M)을 기준으로 비교해 보면 두 방식 모두 동일한 값을 나타내고 있음을 볼 수 있다. 결과적으로 반경의 확대/축소와 타원화현상 모두에 대한 제어능력의 향상은 합리적인  $K_f$ 값에 대한  $W$ 값을 조정해 줌으로써 달성할 수 있음을 시사한다.

Fig. 14는 앞서와 동일한 조건에 대하여 각속도를 0.628 rad/sec로 감소시켰을 경우 윤곽오차를 나타낸다. 그림에서 추적오차는 CC의 경우 0.0942mm, CC+PA는 0.0485mm로 약 49% 감소를 나타내고 있으며, 이때의 평균  $K_f(t)$  값

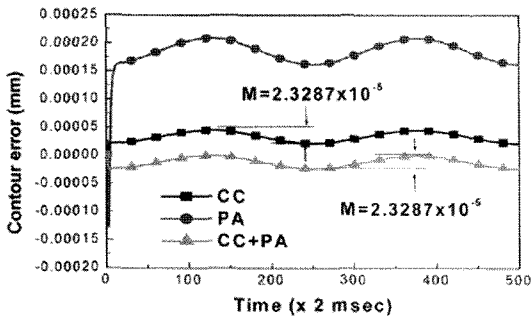


Fig. 14 Contour error for a circular path, 0.628 rad/sec

은 2.4266으로 고속의 경우와 마찬가지로 선형관계를 유지하고 있으며, 반경 확대/축소 및 타원화 현상에 대한 결과 또한 동일한 응답 특성을 보이고 있다.

## 6. 결론

추적오차와 윤곽오차의 상호 절충을 통한 코너경로 및 원 경로에 대한 시뮬레이션을 통하여 다음의 결론은 얻을 수 있다.

- (1) 추적오차가 0으로 수렴하더라도 곡선경로에서의 윤곽오차는 증가하는 즉 반경의 확대현상이 발생함을 확인하였다.
- (2)  $K_a$ 값은 추적오차와는 선형관계, 윤곽오차와는 비선형관계를 가지며 주로 추적성능 및 반경의 확대/축소에 관여하고, 설계변수  $W$ 값은 반경의 확대/축소 및 윤곽의 타원화현상에 주로 기여하고 있음을 확인하였다.
- (3) 고정된  $W$ 값에 대한 가변적인  $K_a$ 값을 적용하여 추적제어와 윤곽제어 방식을 결합한 알고리즘의 적용으로 제어 성능이 향상됨을 확인하였으며 그 타당성을 검증하였다.
- (4) 윤곽오차의 관점에서 보다 정밀한 제어를 위해서는 안정성에 기초한  $K_p$ 값에 따른  $K_a$ 값과  $W$ 값 사이의 정량적인 관계정립이 요구된다.

## 후기

본 연구는 숭실대학교 교내연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Poo, A. N., Bollinger, J. G., and Younkin, G. W., 1972, "Dynamic Errors in Type I Contouring Systems," *IEEE trans. on Industry Applications*, Vol. IA-8, No. 4, pp. 477~484.
- (2) Koren, Y., 1980, "Cross-Coupled Biaxial Computer Control for Manufacturing Systems," *IEEE J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 102, pp. 265~272.
- (3) Koren, Y., and Lo, C. C., 1991, "Variable-Gain Cross-Coupling Controller for Contouring," *Annals of CIRP*, Vol. 104, pp. 371~374.
- (4) Koren, Y., and Lo, C. C., 1992, "Advanced Controllers for Feed Drives," *Annals of CIRP*, Vol. 41, pp. 689~699.
- (5) 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.
- (6) Lee, G. B., 1998, "Digital Contouring Control of Multi-axial System," *the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 45, pp. 623~630.
- (7) Gil, H. G. and Lee, G. B., 2005, "Development of a Position Control Algorithm for Feed Drives in Machine Tools Using an Error Model," *Trans. of KSME(A)*, Vol. 29, pp. 115~123.
- (8) 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.