

〈論 文〉

# CNC 머시닝센터의 정밀도 향상을 위한 반복학습제어

최종호\* · 유경열\*\* · 장태정\*\*

(1993년 12월 31일 접수)

## An Iterative Learning Control for the Precision Improvement of a CNC Machining Center

Chong-Ho Choi, Kyung-Yeol Yu and Tae-Jeong Jang

**Key Words** CNC Machining Center(CNC 머시닝센터), Circular Interpolation(원호보간), Stick Motion(점착운동), Iterative Learning Control(반복학습제어)

### Abstract

We made a counter to measure the output of motor encoders for the motion error analysis of a CNC machining center, and have measured the dynamic characteristics and the position errors experimentally. Especially, we measured the radius errors for different feedrates and different radii when the CNC machining center performed a circular interpolation. We have also used an iterative learning method to reduce the radius errors and stick motion errors generated by the CNC machining center performing a circular interpolation. The results show that the proposed learning scheme can reduce the radius error and stick motion error significantly. The reduction of errors becomes more pronounced for higher feedrate and smaller radius.

### 1. 서 론

오늘날 산업계에서는 생산력 증대와 제품의 품질 향상이라는 두 문제를 동시에 해결하기 위한 방안으로서 생산자동화에 많은 관심이 집중되고 있으며, 이를 실현하기 위하여 자동화의 핵심이 되는 CNC 공작기계의 개발과 응용에 대한 노력이 지속적으로 진행되고 있다. CNC 공작기계는 컴퓨터를 이용한 수치계산에 의해 제어되는 공작기계로서 단지 프로그램만을 바꿈으로써 전혀 다른 공작물을 가공할 수 있기 때문에 소량 다품종 생산에 절대적으로 필요한 유연생산체제(FMS: flexible manufacturing system)의 구현에 유리하다.

공작기계의 성능은 얼마나 빠르고 정밀하게 공작물을 가공해 내느냐에 달려있다. 그러나, 일반적으로 CNC 공작기계에서 고정밀도와 고속 가공을 동시에 실현시키는 것은 매우 어려운 문제인데, 이는 가공속도를 올리면 가감속 회로와 서보기구 구동계의 지연시간의 영향이 커져서 더 큰 가공 오차가 발생하기 때문이다. 지금까지 가공의 정밀도를 향상시키기 위한 노력으로써 앞먹임제어(feedforward control),<sup>(1,2)</sup> 예견제어(predictive control) 등을 비롯하여, 기계 특성의 시간경과에 따른 변화에 적응하거나 이를 보정해 주는 적응제어(adaptive control) 또는 자기동조제어(self tuning control), 속도 관측자, 외란 관측자(disturbance observer)를 이용한 견실제어(robust control), 정지마찰에 의한 오차 등을 보정해 주는 비선형 보상제어, 그리고 학습제어(learning control) 등의 방법들이 실용화 또는 연구되고 있다.

\*정회원, 서울대학교 제어계측공학과

\*\*서울대학교 제어계측공학과

CNC 동작기계로 원의 형상을 가공할 때 원의 크기와 이송속도에 따라 가공된 실제 원의 크기가 감소하며<sup>(3)</sup> 특히 X축이나 Y축의 이송방향이 바뀌는 곳에서는 점착운동(stick motion)에 의하여 큰 오차가 발생한다. 이러한 원호보간 시의 오차의 측정에는 1차원 프로브(probe)나 DBB(double ball bar)를 이용하여 측정하는 방법 등이 소개되었다.<sup>(4,5)</sup> 그러나 이러한 방법들은 측정장치의 제작, 설치 및 운용과정이 복잡하고 상용 제품을 구입하더라도 그 가격이 비쌌 뿐 아니라 장치의 특성상 절대적인 오차의 크기를 알기가 어렵다는 단점이 있다.

본 연구에서는 먼저 CNC 머시닝센터의 각 축 모터의 인코더 펄스를 세는 간단한 측정장치를 퍼스널 컴퓨터에 접속할 수 있는 I/O 보드형태로 제작하고, 이를 이용하여 수직형 머시닝센터 TNV-40(세일중공업(주))의 동적 특성 및 원호보간 시 발생하는 오차를 측정할 수 있도록 하였다. 실제로는 공구의 경로와 모터 인코더 출력간에 백래쉬(back-lash) 등의 비선형성 요인에 의한 오차가 존재하겠으나 공구를 원하는 시간에 원하는 위치에 가게 하기 위해서는 우선 인코더의 출력이 원하는 궤적을 잘 따라가야 하므로 모터 인코더 출력의 측정만으로도 어느 정도 그 동작기계의 제어 정밀도를 측정할 수 있다.

다음으로, 제작한 I/O 보드를 써서 측정된 데이터를 이용하여 TNV-40 머시닝센터의 오차를 분석하며, 특히 이를 이용하여 원호보간시 발생하는 오차를 반복학습제어 기법을 써서 보정하는 방법에 대해 연구한다. 반복학습제어<sup>(7-10)</sup>는 제어대상 플랜트에 대하여 유한한 시간 동안 임의의 원하는 출력이 있다고 할 때 이러한 원하는 출력을 정확하게 따라가게 할 수 있는 플랜트의 입력을 구하는 것이다. 즉 k번째 가한 입력에 대한 플랜트 출력과 원하는 출력과의 오차를 가지고 k+1번째 가한 입력을 구하는 것이다. 이 방법을 사용하면 원하는 출력이 주어진 경우 이를 실현시킬 수 있는 입력을 비교적 쉽게 구할 수 있다. 이 때 CNC 컨트롤러 내부의 제어 신호를 변경하는 것은 어려우므로, 본 연구에서는 CNC 서보시스템(servo system) 전체를 매우 단순한 형태로 모델링하고 기존의 반복학습제어 기법<sup>(10)</sup>을 적용한다. 이 때 입력은 머시닝센터의 가공 지령이 되고 출력은 I/O 보드를 통해 읽어오는 모터 인코더 값이 되며, 원호보간시 가장 정확한 원을 가공할 수 있는 머시닝센터의 가공 지

령을 반복학습에 의해 구하게 된다. 이 방법은 이미 제작 및 설치되어 있는 제어기 자체를 고치지 않고 단지 가공 명령만을 수정하여 줌으로써 가공 정밀도를 향상시킬 수 있다는 장점이 있다. 실험을 통하여 이런 방법을 사용하여 원호보간시 발생하는 오차를 상당히 줄일 수 있음을 보인다.

## 2. 머시닝센터의 동적특성 및 원호보간 시의 운동오차

여기서, 사용한 TNV-40 머시닝센터의 주요 제원은 다음과 같다.

- 최소이송 단위 : 0.001 mm
- 이송속도 단위 : 1~10000 mm/min.
- Step 이송 : 0.001, 0.01, 0.1, 1 mm/min.
- Controller : FANUC Series 0-M
- AC servo motor : A06B-0314-B032 (Standard type absolute pulse coder with 2500 pulse/rev.)

현재 이 머시닝센터는 Fig. 1과 같은 반폐루프 제어기(semi-closed loop controller)로, 각 축의 실제 이동거리를 측정하는 것이 아니라 각 축 모터의 인코더에서 나오는 신호로 경로오차를 계산하여 새로운 지령을 넣어주는 방식이다.

본 연구에서도 CNC 머시닝센터의 X축과 Y축의 모터에 딸린 인코더에서 나오는 신호를 카운터에서 세어 모터의 회전각을 알아내고자 한다. 이를 위해

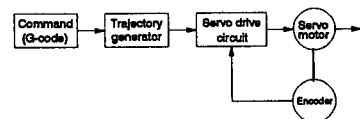


Fig. 1 Block diagram of a semi-closed loop controller

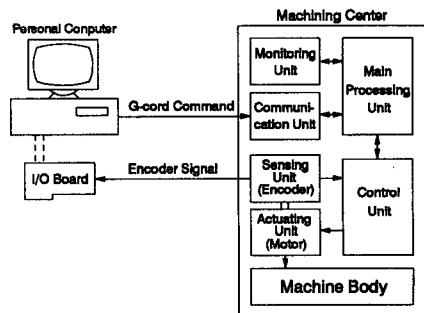


Fig. 2 Block diagram of overall system

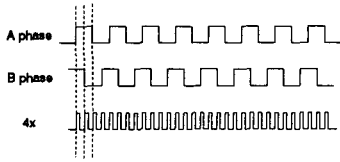


Fig. 3 Pulses for phase A, phase B and 4x of the encoder

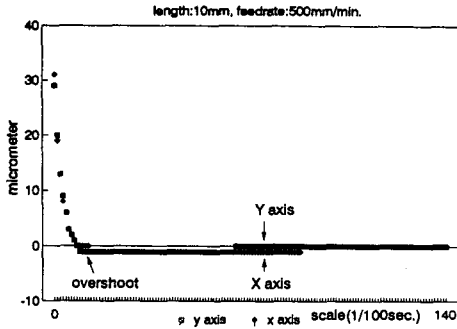


Fig. 4 Step responses of the X axis and Y axis

인코더 카운트 전용 IC인 HCTL-2020을 이용하는 카운터 보드를 제작하여 퍼스널 컴퓨터에 장착하고 TNV-40 내부의 커넥터에서 인코더 신호 부분을 끌어내어 이 보드에 접속하였다. 전체 시스템의 블록선도는 Fig. 2와 같다. 각 축의 모터 인코더에서 나오는 신호는 서로 90° 위상차가 있는 A, B 두 상(phase)으로 이루어져 있으며 이 신호가 HCTL-2020 내부에서는 각 상의 상태(state)가 변하는 순간을 모두 세어 실제로는 각 상 주파수의 4 배에 해당하는 주파수를 카운터하게 된다. (Fig. 3) 실험대상 CNC 머시닝센터의 모터는 AC 서보모터로 1회전당 2500개의 펄스가 발생하지만 HCTL-2020에서 A, B 두 상을 이용하여 이를 4배한 펄스가 만들어지므로 실제로는 10000 pulse/rev.의 해상도를 갖게 된다. TNV-40의 볼 스크류 피치가 10 mm/rev.이므로 1펄스 회전은 1 μm의 이송에 해당된다. 본 실험장치에서는 이렇게 하여 만들어진 펄스를 PC 슬롯(slot) 상에 구현한 카운터 보드에 넣고 PC의 인터럽트(interrupt) 처리 루틴(routine)을 이용하여 펄스의 수를 세어 이송거리를 측정한다.

2.1 머시닝센터의 동적특성

머시닝센터의 동특성을 알아보기 위하여 X축과 Y축을 이송속도 500 mm/min.으로 각각 10 mm 이

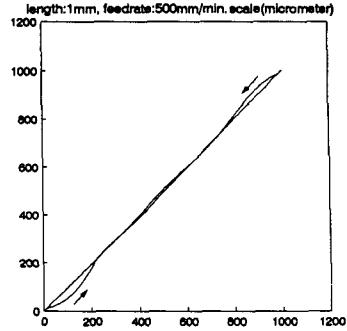


Fig. 5 Trajectory for a straight line (45° with respect to X-axis)

동하였다가 다시 제자리로 돌아오는 명령을 주었을 때 시간에 따른 X축과 Y축의 위치를 나타낸 그림이 Fig. 4이다. 그림에서 보는 바와 같이 바로 제자리를 찾아가지 못하고 처음에 오버슈트(overshoot)가 생긴 후 얼마간의 시간이 흐른 뒤 제자리로 찾아가는 것으로 보아 빠른 응답속도를 가지지는 못한 것으로 생각된다. Fig. 5는 동일한 이송속도로 X축과 Y축을 1 mm 이송하였다가 다시 제자리로 돌아오도록 명령을 주었을 때의 변위레적이다. 이상적인 경우라면 일직선으로 나타나야 하지만 머시닝센터의 X축과 Y축의 동적 특성이 약간 달라 정확한 직선으로 나타나지 않았다.

2.2 원호보간 시의 반경감소

원호보간 시는 Fig. 6에서 보는 것과 같이 가공시 실제 지령치보다 더 작은 원을 가공하는 반경감소가 일어난다. 원호보간 시의 반경감소는 가감속 회로와 서보 기구 구동계의 뒤편 요소가 원인이 된다. Fig. 4의 그림에서 오버슈트(overshoot)가 발생한 것으로 보아 전체 시스템은 2차 이상의 차수를 가지지만 원호보간 시의 반경감소식을 유도하기 위하여 가감속 회로와 서보기구 구동계를 시정수(time constant)가 T인 1차 지연시스템으로 본다면 이들의 페루프 전달함수 G(s)는

$$G(s) = \frac{1}{1 + Ts} \tag{1}$$

로 표시된다. G(s)의 입력은 X축(Y축)의 지령위치  $X_i(Y_i)$ 이고, 출력은 X축(Y축)의 측정위치  $X_o(Y_o)$ 가 된다. R을 지령반경, ω를 각속도라고 하며 시간에 따른 X축, Y축의 입력이 다음과 같을 때 원을 가공하게 된다.

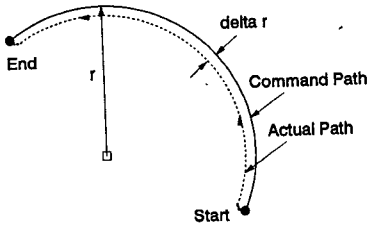


Fig. 6 Radius reduction in circular interpolation

$$\begin{aligned} x_i(t) &= R\cos(\omega t) \\ y_i(t) &= R\sin(\omega t) \quad t \geq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

이 때의 X축의 출력은 전체 시스템을 통과한 후의 출력이므로 다음과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} X_o(s) &= G(s)X_i(s) \\ &= \frac{1}{1+Ts} \frac{Rs}{s^2+\omega^2} \\ &= \frac{-R}{1+\omega^2 T^2} \frac{T}{1+Ts} + \frac{R}{1+\omega^2 T^2} \frac{s}{s^2+\omega^2} \\ &\quad + \frac{R\omega T}{1+\omega^2 T^2} \frac{\omega}{s^2+\omega^2} \end{aligned} \quad (3)$$

위 식(3)을 역라플라스변환(inverse Laplace transform)하면  $x_o(t)$ 는

$$\begin{aligned} x_o(t) &= \left[ \frac{-1}{1+\omega^2 T^2} e^{-t/T} + \frac{1}{1+\omega^2 T^2} \cos(\omega t) \right. \\ &\quad \left. + \frac{T\omega}{1+\omega^2 T^2} \sin(\omega t) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

와 같이 된다. 시간이 충분히 지나면, 즉  $t \gg 0$  이면

$$\begin{aligned} x_o(t) &\cong R' \cos(\omega t - \phi) \\ R' &= R(1+\omega^2 T^2)^{-1/2} \\ \tan\phi &= T\omega \end{aligned} \quad (5)$$

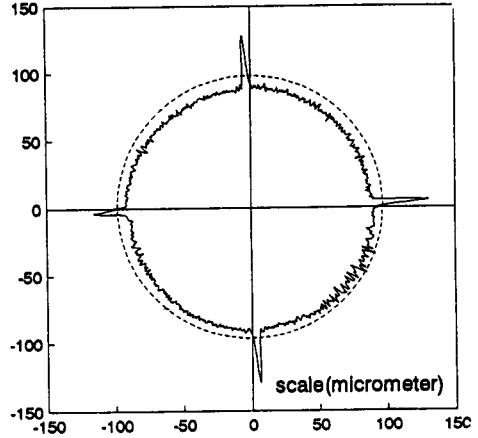
따라서 반경 감소량  $\Delta R$ 은

$$\Delta R = R[1+\omega^2 T^2]^{-1/2} \quad (6)$$

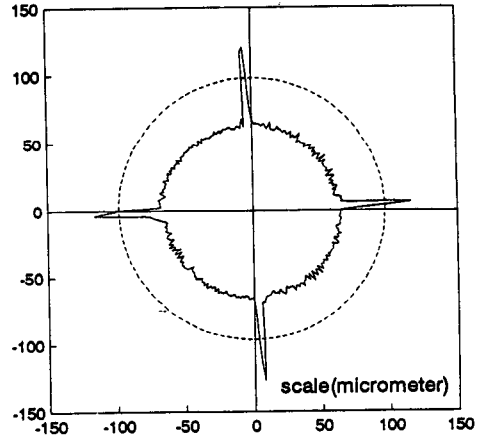
로 주어지며 이를 테일러 전개식(Taylor series)으로 전개하여 1차 항만 취하면 다음과 같다.

$$\Delta R \cong \frac{F^2 T^2}{2R} \quad (7)$$

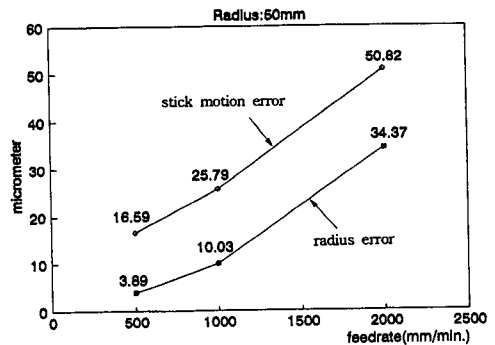
여기서,  $F$ 은 이송속도(feedrate)를 나타낸다. 이로부터 앞에서 제시한 가정들이 옳다면 반경 감소량  $\Delta R$ 은 이송속도의 제곱에 비례하고 가공 반경  $R$ 에 반비례함을 알 수 있다.



(a) Feedrate 1000 mm/min



(b) Feedrate 2000 mm/min



(c) Radius and stick motion error

Fig. 7 Radius error for different feedrates

### 2.3 실험결과

우선 이송속도에 따른 원호보간 시의 오차를 살펴 보았다. 같은 크기의 원의 궤적(반지름 50 mm인 경우)을 따라 서로 다른 이송속도로 움직였을 때의

오차를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 점선으로 그린 원이 오차가 없을 때의 궤적이라면 실선들은 원호보간시의 상대적인 위치를 나타내며 따라서 실선과 점선간의 거리는 반경방향의 오차를 나타낸

다. 앞절에서 보인 바와 같이 이송속도에 따라서 전반적인 반경오차가 커짐을 볼 수 있고, 모터의 운동 방향이 바뀔 때 정지마찰에 의하여 발생하는 점착운동(stick motion) 때문에 4군데서 큰 오차가 발생하는 것을 볼 수 있다. Fig. 7의 (c)에서는 이때의 평균반경 오차(점착운동을 뺀 나머지 부분에서의 절대오차의 평균치)와 점착운동시의 오차를 보인 것이며 거의 이송속도의 제곱에 비례하여 오차가 커짐을 볼 수 있다.

다음으로 가공반경에 따른 원호보간 시의 오차특성을 살펴보았다. 서로 다른 크기의 원을 이송속도 500 mm/min로 가공을 하였을 때의 오차특성을 Fig. 8에 나타내었다. 이 때 역시 반경 감소량은 가공반경  $R$ 에 반비례함을 볼 수 있다. 그러나 반경 감소량은  $R$ 에 반비례하여 한없이 계속 줄어드는 것이 아니라 공작기계의 특성에 따라 어느 정도의 한계를 가지고 있다. Fig. 8의 (c)에서 보면  $R = 100$  mm 에서 약  $5 \mu\text{m}$  정도의 평균반경 오차를 나타내어 오히려 오차가 약간 증가하였는데, 이는 공작기계 고유의 비선형성에 의한 오차가 더 두드러지게 나타난 결과라고 생각된다.

### 3. 반복학습을 이용한 오차 개선

CNC 머시닝센터에서의 원호가공은 보통 한 명령어에 의해 자체적으로 경로를 계산해서 원을 가공하게 된다. 하지만 이렇게 해서 만들어진 경로는 앞서서도 고찰하였듯이 실제 원하는 경로와 다른 결과를 낳게 된다. 이를 극복하는 방법으로서 반복학습기법<sup>(7-10)</sup>을 적용해 보았다. 전체적인 반복학습 제어기의 구성은 Fig. 9와 같다.

원호보간시 실제 적용해 본 반복학습제어 과정은 다음과 같다.

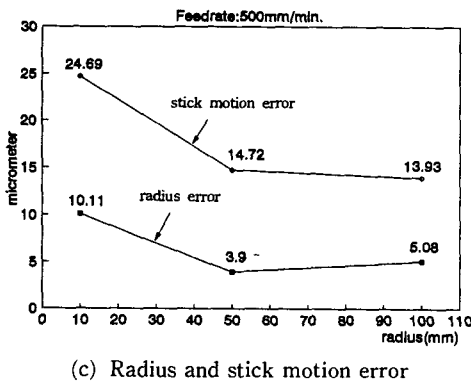
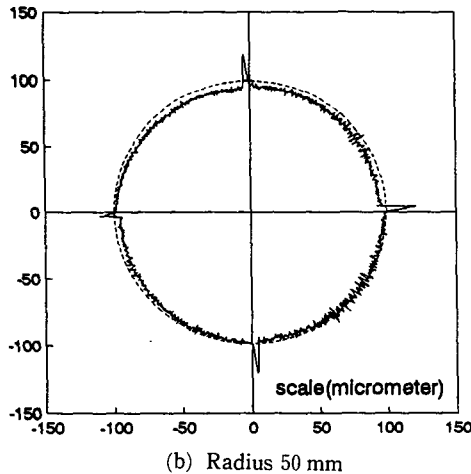
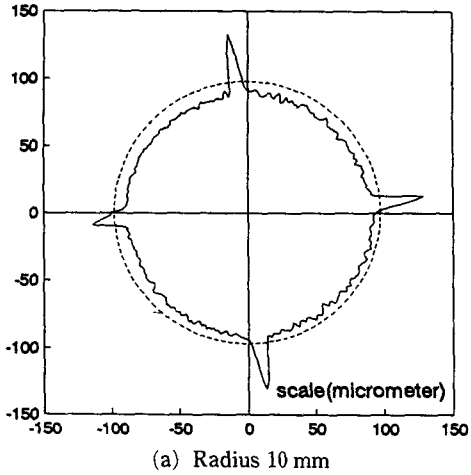


Fig. 8 Radius error for different command radius

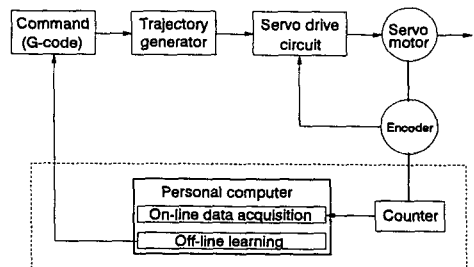


Fig. 9 Structure of iterative learning control

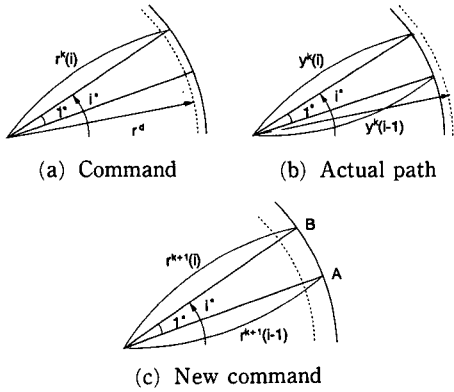


Fig. 10 Path in circular interpolation

(1) 원하는 크기의 하나의 원을 1° 단위로 360개의 원호가공 명령으로 나누어서 연속적으로 실행하여 실측데이터를 얻는다. (Fig. 10(a), (b))

(2) 이렇게 하여 얻어진 데이터와 원하는 크기의 가공반경과 비교하여 그 오차만큼 보정하여 새로운 원호가공 명령을 만든다. (Fig. 10(c))

(3) (2)에서 구한 새로운 원호가공 명령을 실행하여 실측데이터를 얻는다. (Fig. 10(a), (b))

(4) 오차가 원하는 크기 이내로 들어올 때까지 (2)와 (3)의 과정을 반복한다.

이 때 새로운 입력의 갱신식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$r^{k+1}(i) = r^k(i) + \alpha(r^d - y^k(i)) \quad (8)$$

$\alpha$  : 학습률 (learning rate)

$r^d$  : 원하는 가공반경

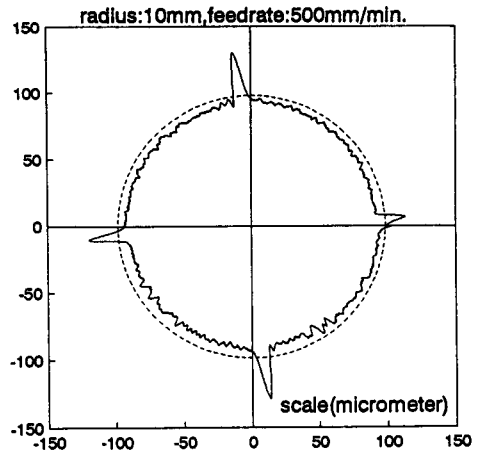
$r^k(i)$  : 각도  $i$ 에서의 가공명령반경 ( $k$ 번째 학습시)

$y^k(i)$  : 각도  $i$ 에서의 실제 측정반경 ( $r_k(i)$ 가 명령일 때)

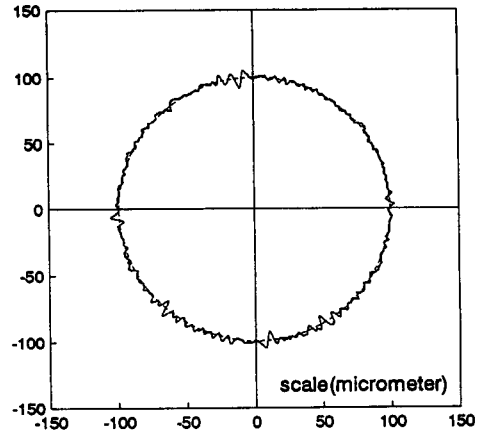
보통  $\alpha$ 의 범위는 0과 1사이의 값이지만 실험에서는 학습률을  $\alpha=1$ 로 하였다. 그리고, Fig. 10(c)에서 A점과 B점 사이의 원호가공시 새로운 가공반경  $r(i)$ 는

$$r(i) = \frac{1}{2}(r^{k+1}(i) + r^{k+1}(i-1)) \quad (9)$$

로 하였다. 위의 반복학습방법에 의해 학습된 결과를 CNC 머시닝센터의 입력으로 주었을 때의 오차를 학습 이전의 것과 비교한 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 제시한 학습방법으로 반경감소 오차뿐만



(a) Error before iterative learning



(b) Error after 5th iterative learning

Fig. 11 Error compensation by iterative learning

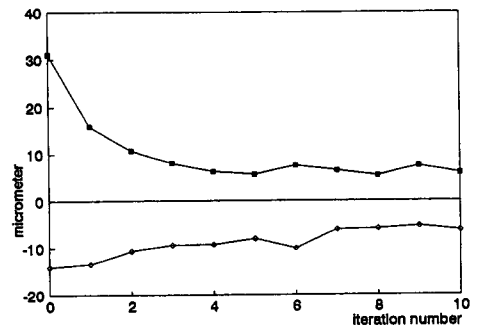


Fig. 12 Error reduction trend by iteration learning

아니라 점착운동 부분의 오차도 크게 줄일 수 있음을 알 수 있다. Fig. 12는 이 때의 오차의 최대값과 최소값을 학습회수에 따라서 나타낸 그림이다.

그림에서 보는 바와 같이 처음에는 가장 컸었을 때의 오차가  $31 \mu\text{m}$ 이고, 가장 작아졌을 때의 오차가  $-14 \mu\text{m}$ 이었지만 학습회수에 따라서 크게 줄어감을 알 수 있다. 그러나, 5회 이상은 학습시켜도 결과가 크게 나아지지 않았다.

#### 4. 결 론

CNC 머시닝센터는 마찰, 기계 자체내의 오차와 서보모터의 가감속 회로의 지연시간 등의 원인 때문에 가공시 위치오차가 발생한다. 현재 CNC 머시닝센터의 오차보정은 가공시 초기에 매개변수(parameter) 값을 변경시킴으로써 원하는 정밀도를 유지하는 것이 대부분이다. 그러나 이런 방법을 쓰더라도 원호보간시 반경이 실제의 지령치보다 작게 되거나 모터의 회전방향이 바뀔 때 생기는 점착운동 등에 의한 오차는 매개변수만으로는 보정할 수 없는 오차이다.

따라서 이미 정해진 정밀도의 제어기를 가진 제품화된 머시닝센터에서 그 제어기 자체를 수정하는 것은 매우 어려운 일이다. 이런 경우 제어기 자체의 수정없이 외부에서 지령신호를 보정하여줌으로써 오차를 줄일 수 있다. 본 연구에서는 이런 방법을 사용하기 위하여, CNC 머시닝센터의 정도를 측정할 수 있는 인코더 카운터법을 소개하고 그 방법에 의해 CNC 머시닝센터의 동특성과 원호보간시의 운동오차를 측정하였다. 그리고, 측정한 데이터를 이용하여 반복학습에 의해 원호보간시의 반경감소 오차 및 점착운동의 오차를 크게 개선시킬 수 있음을 보였다. 이러한 방법을 사용하면 같은 조건하에서 반복적인 작업을 하는 경우에는 오차를 크게 감소시킬 수 있으리라 기대된다. 한번 학습시킨 데이터를 가지고 다른 반경, 다른 이송속도의 원호가공시에 이용할 수 있게 하는 방법 등을 연구해 보는 것이 앞으로 필요하겠다. 또한 3차원 측정기를 통해 실제 가공물에 대한 오차 형태를 분석하여 그 결과를 학습에 이용하는 방법에 대한 연구도 필요하다.

#### 참고문헌

- (1) Tung, E. D., Urushisaki, Y. and Tomizuka, M., 1993, "An Algorithm for High-Speed Control of Machine Tools," *Proc. American Control Conf.*, San Francisco, California.
- (2) Tung, E. D., Urushisaki, Y. and Tomizuka, M., 1993, "Low Velocity Friction Compensation for Machine Tool Feed Drives," *Proc. American Control Conf.*, San Francisco, California.
- (3) 垣野義昭 外, 1988, NC工作機械の運動精度に關する研究(第4報) : 圓弧補間時の半徑減少のNC補正, 일본정밀기계학회지, 54권 6호, pp. 1113 ~ 1118.
- (4) 이후상, 1991, "NC 공작기계의 원호보간 정도 측정법", 한국기계연구소 세미나.
- (5) 박화영, 1992, '92년 수치제어(NC)기술사업, 한국기계연구원.
- (6) Koren, Y., Park, J.-J. and Lo, C.-C., 1992, "A New Architecture for CNC Servo Controllers," NST Report.
- (7) Arimoto, S., Kawamura, S. and Miyazaki, F., 1984, "Bettering Operation of Robots by Learning," *Journal of Robotic Systems*, Vol. 1, no. 2, pp. 123~140.
- (8) Sugie, T. and Ono, T., 1991, "An Iterative Learning Control Law for Dynamical Systems," *Automatica*, Vol. 27, No. 4, pp. 729~732.
- (9) Heinzinger, G., Fenwick, D., Paden, B. and Miyazaki, F., 1992, "Stability of Learning Control with Disturbances and Uncertain Initial Conditions," *IEEE Trans. Automat. Control*, Vol. 37, pp. 110~114.
- (10) Ahn, H.-S., Choi, C.-H. and Kim, K.-B., 1993, "Iterative Learning Control for a Class of Non-linear Systems," *Automatica*, Vol. 29, No. 6, pp. 1575~1578.