

< 논문 >

## 공작기계용 NC제어기의 엔코더 신호를 이용한 위치제어 특성 측정 및 분석

이 응 석\* · 김 종 길\*

(2004년 8월 25일 접수, 2004년 12월 23일 심사완료)

### Measurement and Analysis for Positioning Control Characteristics using Encoder Signal of NC Machine Controller

Eung-Suk Lee and Jong-Gil Kim

**Key Words:** Encoder(엔코더), Hall Sensor(홀센서), Interpolation(보간), NC Controller(NC 제어기), Positioning Control Error(위치제어오차), Velocity Gain(속도이득), Time Constant(시정수)

#### Abstract

NC controller parameters are fixed when the controller is combined with a machine. However, the characteristics of controller could be changed as it has being used by the machine or other environmental conditions. Ultimately, it results in tool positioning accuracy changing. The loading torque in servo motor also influences on the positioning accuracy. This study focus on a measuring and analysing method for verifying the angular positioning accuracy of NC servo motor. We used a high resolution A/D converter for acquiring analogue signal of rotary encoder in servo motor. Generating tool path by the combination of axial movements (X,Y,Z) is compared with the encoder signals with the servo motor torque. The current variation signal is also read from the servo motor power using a hall sensor and converted to the motor torque. The method of analysing proposed in this study will be used for determining the gains (tuning) of parameter in NC controller, when the controller is set up at a machine initially or the controller condition is changed during the work.

#### 기호설명

B : 감쇄계수  
 $B_{gM}, B_{gV}, B_{gW}$  : 자기밀도  
 $I_M, I_V, I_W$  : 3상 전류  
 J,  $J_s$  : 관성모멘트  
 $K_I, K_{sp}$  : 위치제어 비례상수  
 $K_P, K_{PW}$  : 속도제어기의 적분 및 비례상수  
 $K_T, T_L$  : 모터의 토크 상수, 토크  
 $T_r, T_s$  : 시간상수, Sampling time  
 $\alpha$  : 축 모델링상수  
 $\beta$  : 비례상수에 대한 적분상수 비

$\Theta, \Theta_n$  : 회전각도  
 $w_r^*, w_r$  : 속도상수, 응답속도  
 $\Delta R$  : 경로오차

#### 1. 서론

NC공작기계의 제어기에서 서보시스템의 가감 속과 제어에 영향을 주는 위치루프이득, 속도루프이득, 시정수는 기계결합시에 조정하여 고정된 값으로 유지된다. 하지만 이런 상수값은 모든 동작범위에서 일정하지 않고 운동에 따라 관성 모멘트 혹은 외란 토크가 변화하게 된다. 일반적으로 공작기계는 조정이후에 작업환경변화와 기계적 마모의 진행, 관리상태에 따라 시스템의 특성이 변화할 수 있다. 가공물 절삭과정에서 발생하

\* 책임저자, 회원, 충북대학교 기계공학부  
 E-mail : cungsuk@cbnu.ac.kr  
 TEL : (043)261-2442

\* 충북대학교 대학원 기계공학부

는 절삭력은 이송축 토크에 영향을 주며 공구의 강성부족과 외팔지보 형태로 인하여 처짐이 발생하여 형상오차의 원인이 된다. 절삭력에 의한 부하 발생시 스피들 모터에 인가되는 전류의 형태가 정상상태로부터 변화하게 된다.

본 논문에서는 NC제어기와 기계결합 후 조정 이전과 이후 공작기계 위치정밀도 특성 연구와 NC제어기의 위치오차 성능을 평가한다. 서보모터에서 출력되는 토크의 과도한 변화로 인한 공작물형상오차에 미치는 영향에 대해 분석하고, 형상오차감소를 위한 되먹임 정도를 조절할 수 있는 실시간 위치정밀도 모니터링 실험장치를 통하여 작업시간 단축과 NC의 고정도 성능을 유지하도록 한다. 본 연구에서 소개되는 방법으로 NC 가공 중 서보모터에 입력되는 토크와 NC에 되먹임되는 신호를 모니터링하여 이송속도와 각 이득 상수들과의 관계, 과도한 절삭력에 의한 공구마모, 공구손실 및 형상오차를 평가하여 최소화할 수 있을 것이다. 또한 공작기계의 현장의 온도 등 환경변화, 시간경과에 의해 발생하는 부하 등 특성변화와 각 상수들간의 관계를 분석할 수 있고, 이송 가속에 따라 적절한 값을 찾아 보정할 수 있도록 하여 NC제어기에 의한 공구 위치오차가 최소가 되도록 한다.

### 2. NC제어기의 위치결정오차

NC제어기는 보관된 궤적데이터를 기준으로 하여 속도 프로파일을 가속구간, 등속구간 및 감속구간을 생성하게 된다. NC 공작기계의 가속속 방법에 따라 (직선형, 지수형, 파라볼릭형) 적절한 가속속 시정수(Time constant)를 설정한다. 직선형 가속속의 경우 기계의 무리한 부하가 되지 않도록 실제 출력되는 값을 사다리꼴 형태로써 가속하게 된다. 원호보간 연산의 경우 최종 속도값  $V_x, V_y$ 의 가속속을 통한 출력  $Y_x, Y_y$ 는 서보제어시스템의 입력이 되고, 실제 작업으로부터 형

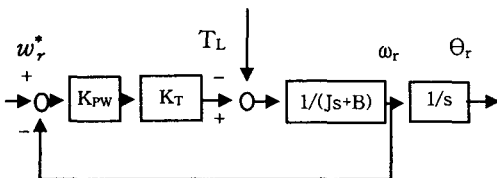


Fig. 1 Servo control system of industrial robots and CNC machines

성되는 원호와  $Y_x, Y_y$ 로부터 생성되는 원호사이에는 경로오차가 발생한다. 실제 가공에서 생성되는 원호의 반경을  $R_{sv}$ 라 정의하면 경로오차  $\Delta R_{sv}$ 는 다음 식으로 정의된다.

$$\Delta R_{sv}(\infty) = R'_c(\infty) - R_{sv}(\infty) \tag{1}$$

Fig. 1의 통상적인 서보제어시스템에서 정상상태에서의 위치 오차를 고려하면 경로오차는 다음과 같이 된다.

$$\Delta R_{sv}(\infty) = R'_c(1 - A/B) \tag{2}$$

여기서,

$$A = \sqrt{K1^2 + K2^2}$$

$$K1 = \cos(2wT_s) + b_1 \cos(2wT_s) + b_2 \cos(wT_s) + b_3$$

$$K2 = \sin(3wT_s) + b_1 \sin(2wT_s) + b_2 \cos(wT_s)$$

$$B = \sqrt{[c_1 \cos(wT_s) + c_2]^2 + [c_1 \sin(wT_s)]^2}$$

위 식에서와 같이 일반적인 서보제어시스템의 경우에서 경로오차는 샘플링주기( $T_s$ ), 제어이득( $K_i, K_p, K_{wp}$ )에 따라 달라짐을 알 수 있다. 본 연구는 제어이득들로 이루어진 제어기 파라미터 및 샘플링주기를 변화시키면서 NC제어기의 위치정밀도 특성을 실험하였다. 실험에 사용된 NC 공작기계의 전달함수 및 속도제어 시스템에서 근사적으로 다음과 같은 전달함수를 갖는다.<sup>(1)</sup>

$$P(z^{-1}) = \frac{(a + \alpha\beta T_s)z^{-1} - \alpha z^{-2}}{1 + (a + \alpha\beta T_s - 2)z^{-1} + (1 - a)z^{-2}} \tag{3}$$

여기서,  $\alpha = \frac{T_s K_{sp} K_t}{J}$  이며, 이 값은 속도제어 시스템에 계단 입력을 가하고 그 응답으로부터 구하게 된다.  $\beta = \frac{K_{si}}{K_{sp}}$ 로서 속도 제어기의 적분 이득과 비례 이득의 비이고,  $z^{-1}$ 은 1 step 시간지연을 나타낸다. 실험대상 NC공작기계의 제어특성을 파악할 수 있는 인자로는 축 모델링상수( $\alpha$ ), 적분이득과 비례이득의 비례값( $\beta$ )이 있다.

### 3. 엔코더 신호 정밀측정 및 분석

NC 공작기계의 서보모터에 사용되는 로타리 엔코더 출력신호는 보통 사인파 (Sine pulse) 와 사각파 (Quadrat pulse)가 사용되며, 사각파인 경

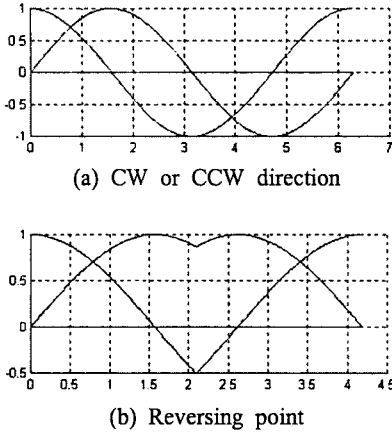


Fig. 2 A(Sin) and B(Cos) output pulse signals of Sine pulse encoder

우는 일반적으로 수천에서 수십만 펄스가 출력되므로 카운터를 이용하여 이동 거리 누적과 회전 방향 판별이 용이하지만 고정된 분해능이라는 단점이 있다. 사인파의 경우 보통 수천개의 출력신호로부터 NC공작기계의 경우 하드웨어 신호처리방법으로 고분해능을 얻을 수 있어 최근 고정밀 서보 시스템에서 많이 사용된다. 본 연구에서는 1회전당 수천펄스의 사인펄스 신호를 PC로 A/D하여 소프트웨어 알고리즘을 구성하여 고정밀도로 분해하였다. 실험에 사용된 광전식 로타리 엔코더는 Fig. 2와 같이 동일한 크기의 90° 위상차이로 A+(sin), A-(sin ref.), B+(cos), B-(cos ref.), GND의 출력신호가 있으며 회전당 1024개의 사인파가 출력된다. 실험에 쓰이는 CNC 공작기계의 X,Y,Z 각 축의 볼스크류의 리드는 10mm이다. 이때 엔코더 출력신호로 축의 회전에 따른 이송거리를 정밀하게 측정하기 위해, 1) 엔코더의 회전방향 (시계방향 CW, 반시계방향 CCW) 판정, 2) 출력신호의 크기변화에 따른 이송거리, 3) 데이터의 신뢰성을 위한 최소한의 샘플링 주기 등에 대한 알고리즘이 필요하다.

엔코더가 회전하면서 출력되는 신호의 형태는 Table 1과 같이 방향과 각도에 따라 독립적인 상태값을 가지므로 출력신호의 추세를 이용하여 방향 판별이 가능하다. 엔코더 출력신호는 sin+, sin-, cos+, cos- 이고 sin- 및 cos-는 각각의 reference신호가 된다. 출력 신호값인 sin+, cos+로 tan값을 구하면 방향에 따라서 기울기가 양과 음

Table 1 Output signals of a rotary encoder in different directions

| θ                       |     | θ        |       |        |         |   |
|-------------------------|-----|----------|-------|--------|---------|---|
|                         |     | 0~π/2    | π/2~π | π~3/2π | 3/2π~2π |   |
| Clockwise (CW)          | sin | gradient | +     | -      | -       | + |
|                         |     | value    | +     | +      | -       | - |
|                         | cos | gradient | +     | +      | -       | - |
|                         |     | value    | -     | +      | +       | - |
| Counter Clockwise (CCW) | sin | gradient | +     | -      | -       | + |
|                         |     | value    | +     | +      | -       | - |
|                         | cos | gradient | -     | -      | +       | + |
|                         |     | value    | +     | -      | -       | + |

으로 일정하게 유지된다. 따라서, 시간 Tx와 Tx+1에서 샘플링 데이터로 식 (4)와 같이 기울기 경향을 판단할 수 있다.

$$\text{Clockwise (CW)} : d(T_{x+1}) - d(T_x) > 0$$

$$\text{Counter Clockwise (CCW)} : d(T_{x+1}) - d(T_x) < 0 \quad (4)$$

위 식을 이용하여 각 축의 엔코더 출력신호에 따라 회전방향을 알 수 있고 따라서 거리의 증감이 판별 가능하다. 축의 리드를 L, 엔코더 회전당 출력신호수 P라 할 때 한주기에 해당되는 거리(P0)는

$$P_0 = \frac{L[mbr]}{P[\text{ppr}]} \quad (5)$$

가 된다. 디지털로 변환된 데이터를 Sn (n = 1,2,...)이라 하면

$$\tan^{-1} \left[ -\frac{(s_n)_{\sin}}{(s_n)_{\cos}} \right] = \theta_n \quad (6)$$

이고 이때 회전각도(θn)와 미소변위(l) 그리고 한 주기(2π)와 P0의 비가 동일하다.

$$\theta_n : l = 2\pi : P_0, \quad l = P_0 \frac{\theta_n}{2\pi} \quad (7)$$

가 된다. 식 (4),(7)를 이용하여 엔코더 출력신호를 이용한 방향판별과 거리누적을 할 수 있다. 이송속도에 따라 로타리 엔코더의 출력주기가 변화하므로 신뢰성 있는 거리계산을 위해서는 원하는 분해능에 따른 최소한의 샘플링주기가 필요하다. NC공작기계의 지정된 속도를 V, 이때 각축의 이송속도를 Vx,Vy,Vz 라 하면

$$(Vx)_{\max}, (Vy)_{\max}, (Vz)_{\max} \leq V \quad (8)$$

가 성립된다. 따라서 A/D 각 채널의 최소 샘플링 주기(Ts)는 식 (9)가 된다.

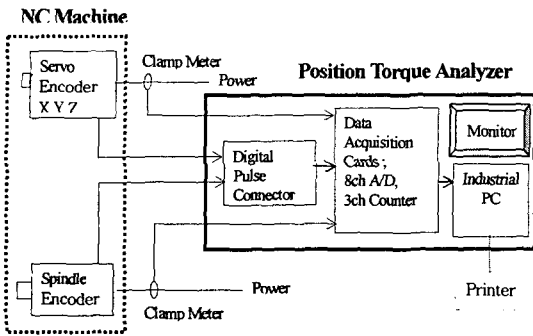


Fig. 3 NC controller signal and servo motor current measuring system using A/D converter and hall sensor

$$T_s = \frac{R(\text{resolution})}{V(\text{feed})} \quad (9)$$

#### 4. 가공 중 NC제어기 위치 오차 분석

##### 4.1 서보모터 위치 및 부하 측정

공작기계용 NC제어기 시스템에 주로 이용되는 AC서보전동기는 제어성 및 효율이 우수한 2극3상 동기전동기는 식 (10)으로 서보모터 토크를 계산할 수 있다.

$$T = K [B_{gM} B_{gV} B_{gW}] \begin{bmatrix} I_M \\ I_V \\ I_W \end{bmatrix} \quad (10)$$

부하운전시에는 이송계의 마찰과 함께 스펀들의 고속회전으로 인하여 절삭력의 변화가 심하고 각각의 축방향으로 힘이 분산 작용한다. 가공물과 공구의 절삭날의 접촉 방향 그리고 절삭력의 분산정도에 따라서 공구의 힘이 각 축방향으로 발생하며 이러한 원인으로 인해 형상오차가 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서는 서보모터의 입력 전류변화를 측정하여 토크변화에 따른 위치정밀도 특성을 분석하였으며 전류의 크기를 측정하기 위하여 홀센서(Hall sensor)가 이용되었다. 홀센서는 교류 전류가 흐르는 도체의 주위에 형성되는 전기장에 의해 유도되는 유도 전류를 이용하여 상대적인 전류값을 측정하게 된다. 서보모터에 인가되는 전류를 측정하여 간접적으로 서보모터의 출력 토크를 구할 수 있다.

실험은 현재 국내에서 개발중인 CNC공작 기계용 제어기를 대상으로 하였다. 앞장에서 소개된 알고리즘으로 엔코더 신호 분석장치를 구성하

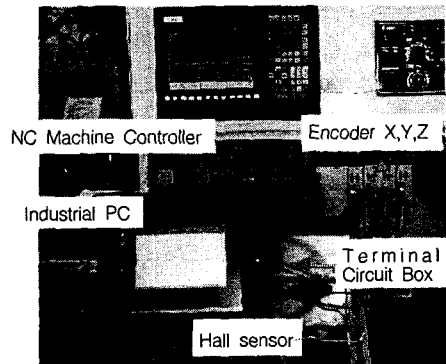


Fig. 4 NC controller and encoder signal measuring system set-up

였으며 3상 AC 서보모터에 입력되는 전류를 측정부분과 X, Y, Z축 엔코더 신호선을 A/D Board에 연결하여 엔코더 출력신호를 얻는 부분과 실험데이터를 모니터링하고 분석하기 위한 PC로 구성되어 있다. 실험용 로타리 엔코더는 1024 ppr, differential, A+, A-, B+, B-, GND type 이다. 엔코더의 신호선은 5개, 실험에 사용된 Clamp meter (홀센서 : 10mV/A, AC)의 경우 2개이며 한 축에서 7개의 아날로그 신호선이 있다. 따라서 Multi-A/D입력단자와 고속처리가 필요하며 분해능 또한 우수하여야 한다. 실험에 사용된 산업용 PC는 실시간 측정과 처리가 가능하도록 구성되어 있다. 이송위치정밀도의 측정은 가공작업중 각 이송축의 최종위치 측정이 난해하므로 서보모터의 엔코더를 이용하는 간접적인 방법을 적용하였다. 즉 서보모터의 로타리엔코더 출력값인 A+, A-, B+, B- 및 GND를 각각 A/D Board로 연결하고, 각 이송축의 이송거리를 연산 할 수 있는 PC 알고리즘을 이용하여 분해능 1 μm의 위치정밀도를 구현 후 공작기계의 2, 3차원 위치 정밀도를 측정한다. 이송계는 서보모터에 의해 구동되며, 서보모터의 출력 토크는 증폭기가 서보모터에 인가하는 전류의 크기에 비례하게 된다. 따라서 증폭기에서 서보모터로 이어지는 3상 전류는 1200의 위상차이가 있으며, 전원선에서 홀센서로 전류값을 측정하여 서보모터에 인가되는 전류의 크기 변화를 측정한다. Fig. 3에 엔코더 아날로그 신호와 홀센서의 출력신호를 A/D board로 입력하기 위한 Terminal box와, Fig. 4에 NC 제어기에 설치된 실험장치 사진을 보여준다.

4.2 제어이득변화에 따른 이송 속도실험

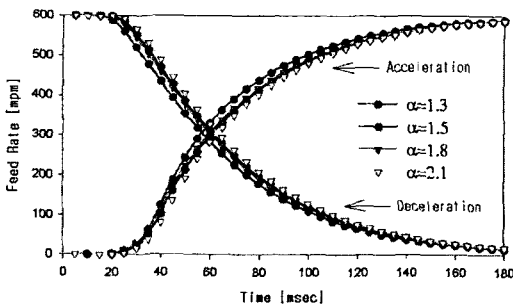
실험용 NC제어기의 제어상수값과 가감속 시정수에 의한 NC제어기의 위치정밀도 및 서보모터에 입력되는 전류파형을 분석하여 특정 공작기계의 특성을 파악하고 위치정밀도가 개선될수 있는 공작기계의 특성값을 찾기 위한 실험이다. 공작기계의 축 이송은 G-code에 입력되는 명령에 의해 수행되며 각각의 위치는 1축에 대해 주어진 거리를 이동하도록 하였다. 주어진 속도에 맞게 순차적인 명령을 수행하게 되는데 각 명령사이의 가감속시간과 유한한 가공시간은 필연적인 위치오차를 수반하게 된다. 위치오차에 영향을 주는 제어기 파라미터인 축 모델링상수( $\alpha$ ), 속도제거기적분/비례이득비( $\beta$ ), 가감속 시정수를 변화시켜 위치오차가 감소하는 상수 값을 얻고자 한다.

CNC 공작기계가 무부하인상태에서 동일한 이송속도인 경우 파라미터인 X축 ( $\alpha$ )값에 따른 속도응답실험을 수행하였다. Fig. 5(a)에서 주어진 속도 600mpm의 이르는 시간 ( $T_r$ , Rising time)은 가감속 특성 실험을 통해  $\alpha=1.5$ 일 때 88msec로

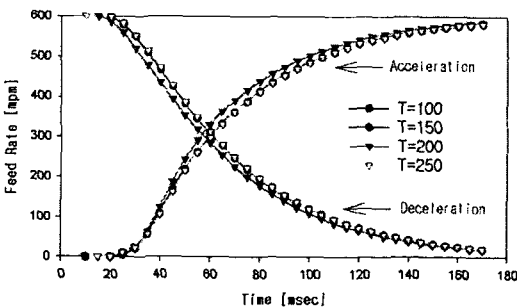
가장 빠른 속도 응답이 이루어짐을 확인할 수 있었다. 직선 가감속만을 적용하였을 경우에도 가감속의 시작과 종료되는 지점에서 완만하게 속도가 변화하고 이로 인하여 가감속의 전체적인 형태가 완만해짐을 알 수 있다. 앞서 실험과 동일한 조건에서 고정된 이송속도에서 X축 ( $\beta$ )를 변화하여 실험을 하였다.  $\beta=220$  일 때 빠른 속도응답이 이루어진다는 것을 알 수 있었으며, 동일한 이유로 가감속형태가 직선이 아닌 완만한 형태로 나타남을 알 수 있었다. Fig. 5(b)는 이송축의 속도가 주어진 이송속도에 이르는 직선 가감속 시간 변화에 따른 실험이다. 결과에서 주어진 속도에 이르는 시간은  $T=200msec$ ,  $T_r=84msec$  일 때 빠른 속도응답이 이루어짐을 알 수 있다.

4.3 이송속도에 따른 위치 및 토크 분석

앞서 실험 및 분석된 동일 NC 제어기를 대상으로 하여 실험결과를 통해 얻은 즉 위치정밀도가 개선되는 제어입력값인  $\alpha=1.5$ ,  $\beta=220$ 과 모터 시정수  $T=200$ 으로 NC제어기의 입력값으로 설정

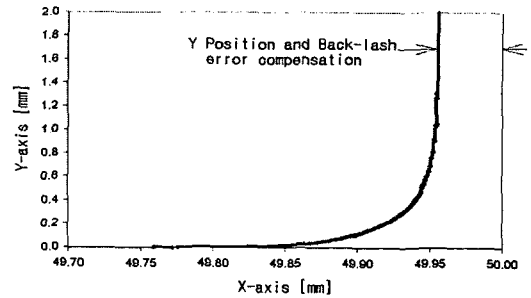


(a) For velocity gain,  $\alpha$

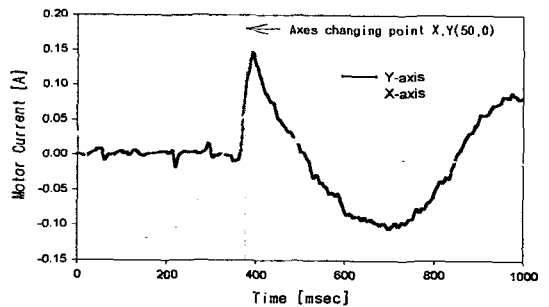


(b) For time constant, T

Fig. 5 Speed profiles for the variation of servo control constants in acceleration and deceleration(Feed rate 600 mpm, No load condition)



(a) Positioning characteristics at a corner

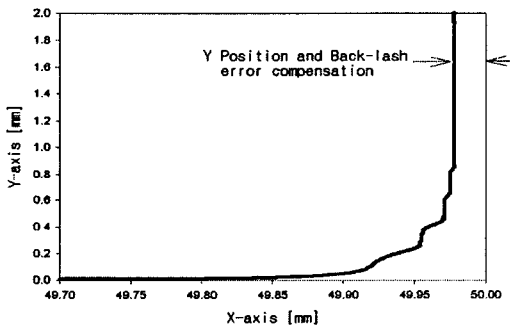


(b) Servo motor current characteristics

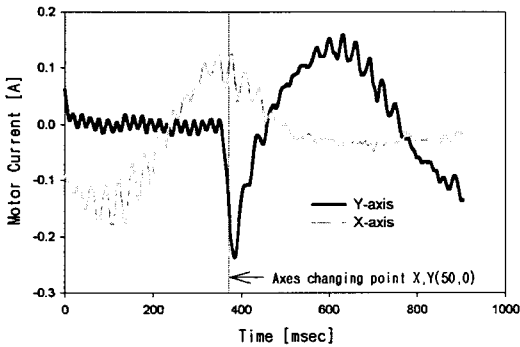
Fig. 6 Controller characteristics for X,Y axes changing at a corner, Feedrate 400 mpm, No load condition of NC milling machine

한 후 무부하와 알루미늄시편을 이용한 가공시 위치정밀도와 서보모터에 인가되는 전류 형태를 측정 및 분석하였다. 가공재료로는 알루미늄이 사용되었으며 엔드밀 직경은  $\phi 8$ , 절입 깊이는 5mm로 하여 가공형상이 직각이 되도록 G-code를 작성하여 각각의 축의 위치정밀도 및 전류파형을 분석하기 위해 X축 이송 후 Y축 이송이 이루어 지도록 하였다. Fig. 6,7은 가공작업 유무와 이송 속도를 변화시키면서 실험한 결과 값이다. 이송 속도에 따른 위치 및 토크 측정 실험을 통하여 다음의 결과를 얻었다.

(1) X축은 정지하면서 전류가 감소하여 변화가 없고 이송이 시작되는 Y축은 입력전류가 갑자기 증가한 후 일정한 주기로 일정하게 전류 파형이 변화하고 있음을 알 수 있다. 일정주기의 전류변화와 최초 가속구간에서의 20% 전류크기가 증가하는 것을 알 수 있다.



(a) Positioning characteristics at a corner



(b) Servo motor current characteristics

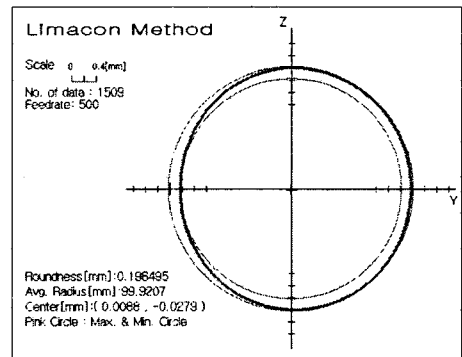
Fig. 7 Controller characteristics for X,Y axes changing at a corner, Feed rate 400 mpmm, No load condition (spindle : 500 rpm, workpiece : Al) of NC milling machine

(2) 알루미늄가공은 Fig. 7에서 보이는 고주파전류변화는 엔드밀(날수 4) 사용시 스피indle회전수가 500rpm일 때 33ms의 절삭력의 변화를 나타내고 있다.

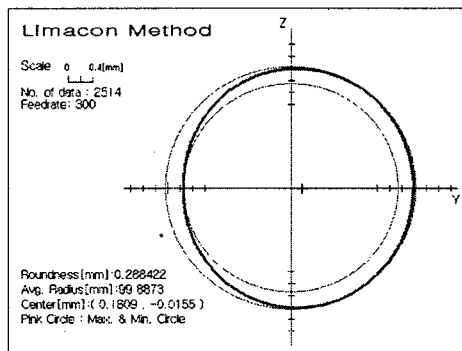
(3) Fig. 7(b)의 이송경로 및 전류값에서의 주기적인 요철은 엔드밀 날에 의한 절삭력 변화에 기인하는 것으로 보인다.

#### 4.4 Contouring 오차 분석

NC제어기의 직선 보간 (Interpolation) 이외의 원호보간에 의한 위치제어 성능을 평가하기 위한 Contouring 실험은 일반적으로 Ball-bar 방법이 알려져 있으나, Ball-bar 장치는 실제 가공 중 장치설치가 불가능한 단점이 있다. 본 논문에서는 NC공작기계의 엔코더신호를 사각파 펄스 카운터 (PCL833)를 이용하여 위치정밀도를 측정하여 지정된 원케적과 비교하는 실험을 수행하였다. 측



(a) Feedrate 500mpmm



(b) Feedrate 300mpmm

Fig. 8 Contouring accuracy compared with Limacon standard circle using servo encoder pulses in CNC milling machine

정된 원호데이터의 위치정밀도를 분석하기위해 기준원을 구하는 방법으로 최소자승 Limacon 방법<sup>(2)</sup>이 사용되었다. Fig. 8은 PCL-833 펄스 카운터를 이용하여 엔코더 신호를 측정한 원호데이터로 Limacon방법에 의한 NC제어기의 원호 궤적 위치 제어 정밀도를 비교하였다.

## 5. 결 론

CNC공작기계 제어기의 위치오차제어특성을 파악하기 위해 홀센서로 서보 모터의 전류신호측정 및 고분해능 A/D에 의한 엔코더신호 분석으로 부하에 따른 위치제어 특성 측정이 가능함을 확인하였다. 구성된 장치에 의한 실험으로 NC 제어기의 위치오차특성 분석값을 다음과 같이 얻을 수 있었다.

(1) 코너부분에서 X축은 감속, Y축은 가속이 이루어지면서 전류의 파형이 등속구간의 전류에 비하여 최대 125%까지 증가하여 변화하고 제어기의 응답특성으로 인하여 정밀한 위치제어가 이루어지지 않고 있다.

(2) 실제 가공작업에서는 가공물과 절삭날에 의한 절삭력에 의해 무부하 운전시와는 다른 전류 형태가 나타나고 이로 인하여 약 10  $\mu\text{m}$ 의 굴곡이 형성되고 이로 인한 위치오차가 발생한다는 것을 알 수 있다. 가공실험에서 절삭력으로 인한 서보모터 입력전류의 크기는 전체 입력전류의 약 25%로 절삭력크기 변화가 위치오차의 원인이 됨을 알 수 있다.

(3) 가감속 특성 실험을 통해  $\alpha$ (축 모델링상수)=1.5일 때,  $\beta$ (속도제어기 적분/비례 이득

비)=220 일 때,  $T$ (직선가감속시간)=200 msec일 때 빠른 속도 응답이 이루어짐을 확인할 수 있었으며, 이 경우 공구위치오차의 감소가 예상된다.

(4) 서보 엔코더 신호 분석을 통해 NC제어기의 직선 및 원호보간 특성 분석이 가능하며, 부하에 따른 실험 결과를 바탕으로 제어기의 모델링상수 속도계인 및 시정수 등의 최적 조정이 가능할 것으로 보인다.

## 후 기

이 논문은 2004년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

## 참고 문헌

- (1) FUNUC AC Servo Motor Digital Series, 1999, Specifications (FUNUC LTD) - CNC Machine Parameters Manual, KSNC.
- (2) Chetwynd, D.G. and Phillipson, P.H., 1980, "An Investigation of Reference Criteria Used In Roundness Measurement," *The Institute of Physics*, pp. 531~538.
- (3) Lee, E.S. and Kim, J.G., 2000, "A study on Minimum Zone Algorithm for Calculation of Roundness," *KSPE*, No. 17, Vol. 7.
- (4) Bolinger, John. G. and Duffie, Neil A., 1988, "Computer Control of Machines and Processes," Addison-Wesley Publishing Company, pp 314~368.
- (5) Lee, Y.H., 1998, "Feedrate Regulation Base on Cutting Force Model in 3-Axis Milling Process," Post-Graduate School, SNU.