

< 기술논문 >

모터 동력계를 이용한 공작기계용 NC제어기 시스템의 위치제어 특성 분석을 위한 측정 연구

이응석* · 김형곤* · 안동을*
(2004년 10월 6일 접수, 2005년 3월 11일 심사완료)

A Measuring Method for Positioning Characteristics Analysis of NC Machine Controller using Dynamometer

Eung-Suk Lee, Hyung-Gon Kim and Dong-Youl An

Key Words: Encoder(엔코더), Dynamometer(동력계), NC Controller(NC 제어기), G-code(가공코드)

Abstract

The gains for NC controller parameter 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. Those result in that the tool positioning accuracy is influenced. The loading torque in servo motor influences on the tool positioning accuracy and it is controlled by the parameter gains. It is required to analyze the torque variation with angular positioning accuracy of the servo motor. This study focus on a measuring method and device for verifying 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. The positional accuracy for a nominal tool path, which is generated by the combination of axial movements (X,Y,Z), is analyzed with the servo motor torque. The current variation signal is acquired at the power line using a hall sensor and converted to the loading torque of servo motor. The method of measurement and analysis proposed in this study will be used for determining the gains of parameter in NC controller. This gain tuning is also necessary when the controller is set up at a machine.

1. 서론

국내 공작기계 메이커에서 필요한 NC공작기계용 NC제어기는 일본, 독일 등에서 수입되어 왔으나 최근 몇 년동안 국내 개발이 추진되어 부분적 국산화 되었다.⁽¹⁾ NC 제어기 및 서보시스템(3축 이송 모터 및 스피들 모터)을 공작기계 또는 기준이송 시스템에 장착하여 성능을 검사하는 기존의 방법은 장착되는 공작기계 또는 기준 이송계의 오차를 포함하기 때문에 NC제어기만의 오차를 분리하기에는 어려움이 있어, 타 제어기와 비교 성능 검사 방법으로만 사용하여왔다. 공작기계에 부착하여 시험하는 방법은 기계의 부하특

성이 각 가공조건마다 다르고, 또한 부하의 정량적인 값을 정의하는 것이 힘들기 때문에 결국 부하에 따라 발생하는 기계 자체의 오차 예측이 어려워진다.

본 연구에서는 NC제어기와 기계구조물 결합후 공작기계 위치정밀도 특성 실험방법 연구와 NC제어기의 위치 오차 특성을 파악하기 위해서 측정분석장치 관련 알고리즘을 연구하고 NC제어기의 위치성능을 평가하는데 목적이 있다. 또한 서보모터에 입력되는 토크와 NC에 되먹임 되는 신호를 모니터링 하여 이송속도와 각각의 이득들과의 관계 그리고 과도한 절삭력으로 공구마모, 공구손실 및 형상오차를 평가 최소화 할 수 있으며, 실시간 모니터링 실험장치를 통하여 작업시간 단축과 NC의 고정도 성능을 유지하도록 한다. 본 연구는 NC제어기의 서보시스템에서 최종적으로 출력되는 서보 모터의 축(Shaft) 회전 특성분

† 책임저자, 회원, 충북대학교 기계공학부
E-mail : eungsuk@cbnu.ac.kr
TEL : (043)261-2442, FAX : (043)263-2441
* 충북대학교 대학원 기계공학부

석을 위하여 모터 동력계(Dynamometer)를 사용하여 축 토크를 정밀하게 제어하고, 또한 회전 위치정밀도를 측정하여 제어기의 구동 S/W(G-code)를 포함하는 NC제어기 전체의 작동 성능을 분석하고자 한다.

2. 실험장치 구성

2.1 전체 장치 구성

본 장치는 개발된 기계 장착 전 수치제어장치의 성능 검사를 위한 PC 기반의 성능 검사 장치를 목적으로 CNC, 서보 모터, 동력계와의 데이터 인터페이스 등으로 구성된다. NC 제어기에 모터 및 드라이버를 장착하여, 3축 서보 모터를 동력계에 연결하여 축 토크 제어가 독립적으로 가능하게 한다. 서보모터의 축에 부하가 가해지는 상태에서 수치제어장치를 다양한 형태의 지령으로 구동시키고 서보모터에 장착된 엔코더 신호를 실시간으로 측정하여 CNC의 구동 S/W(G-code)를 포함하는 NC 제어기의 위치 제어 특성을 실험한다. Fig. 1과 같이 NC제어기 시스템을 구성하는 3축 서보모터 및 스핀들 모터를 4축 모터 동력계에 연결하여 NC제어기 시스템을 부하(Load or Torque)에 따른 위치(Angular positioning) 제어 특

성 시험을 수행하도록 구성하였다. 장치 구성은 각 축의 3상 AC서보모터에 입력되는 전류(u & v상)를 측정하는 와전류 측정센서(Clamp meter, Hall sensor)와 서보모터에 인가되는 전류의 크기와 속도제어를 위한 NC 제어기, 실제 가공환경을 대신할 동력계 및 동력계 제어기로 구성된다. Clamp meter를 통해 입력되는 모터 전류 신호의 크기가 동력계를 통해 얻는 데이터의 크기에 비해 현저히 작아 A/D과정에서 Gain값을 다르게 하였으며, Sampling Rate는 100Hz로 하였다. 실시간적인 데이터 획득과 처리를 위한 프로그램 작성은 Visual C++6.0으로 작성하였다. 사용된 A/D board는 NI사의 PCI-6071E(single-64channel differential-32channel, 12bit, Sampling Rate : 1.25M/s)이며, 실험용 서보모터는 FANUC AC SERVO(X축: a3/3000 Y,Z축: a12/2000)이다. 장치 구성에 사용되는 축 제동력측정용 모터 동력계는 저 RPM - 고 부하에서는 Power Brake, 고 RPM - 저 부하에서는 Eddy Current Brake Mode로 자동 전환되는 Tandem Type의 Swiss Vibrometer(DCU-286 Controller) 장비이다.

2.2 3상 서보모터의 전류치 분석 및 토크

NC공작기계의 이송모터에 인가되는 전류를 감지하여 절삭력을 간접 측정하였다. 공작기계의 공작물 가공 중 절삭력은 이송모터에 외란 토크의 형태로 작용하여, 이송 서보모터의 전류의 변화량을 나타낸다. 따라서 절삭력과 이송모터의 전류사이의 관계는 모터의 전류와 구동토크, 이송모터의 구동토크와 절삭력 관계에 의하여 결정된다. 3상 서보모터에 인가되는 3상(u,v,w)의 전류는 각각 120도의 위상차를 갖게 되며, 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$i_u = I_m \cos(\omega t)$$

$$i_v = I_m \cos(\omega t \pm 2\pi / 3)$$

$$i_w = I_m \cos(\omega t \mp 2\pi / 3)$$
(1)

여기서 I_m 은 전류순시치의 최대치이고는 ω 는 3상 전류의 주파수이며, 주파수(f)는 3상 서보모터의 회전속도와 영구자석의 극수와 관계가 있다. 식 (1)의 \pm 부호는 회전방향에 따라 결정된다. 이때 각상의 전류순시치의 합은 항상 0이 된다.

$$i_u + i_v + i_w = 0$$
(2)

식 (2)로부터 매순간의 각상의 전류값은 u, v, w

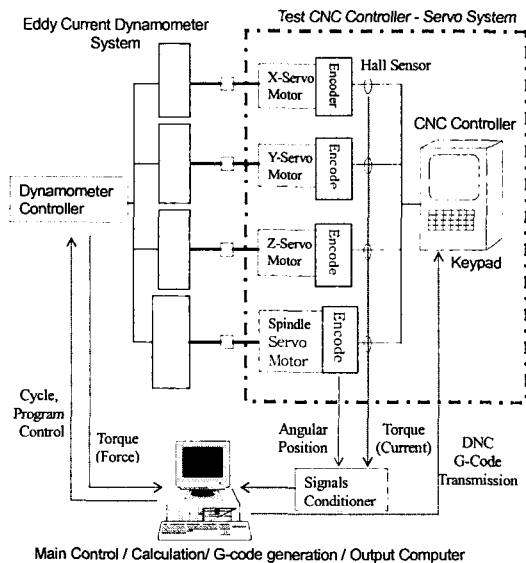


Fig. 1 NC controller system performance testing system with 3 axes servo motors and a spindle motor using 4 axes dynamometers

3상전류를 전부 측정하지 않아도 두상의 전류값만 측정하면 나머지 한상의 값은 전류값을 구할 수 있다. 위에서 측정된 각 상의 전류순시치를 통해 모터의 토크에 직접적으로 비례하는 전류성분을 매순간 계산하여야 한다. 이를 위해서는 이송모터의 회전자와 u상 권선의 상대 각위치에 대한 정보가 필요하다. 이 상대위치는 서보모터에 내장된 엔코더로부터 측정할 수 있다. 이때 모터 회전자에 고정된 가상적인 d-q이동좌표계의 값으로 좌표 변환하면, 구동 토크에 비례하는 전류 Iq를 매순간 구할 수 있다. 모터토크와 Iq전류와의 관계식 및 Iq를 구하는 식은 다음과 같다.

$$T_m = k_a \times I_q \quad (3)$$

$$I_q = \sqrt{\frac{2}{3}} \left\{ \begin{array}{l} i_u \cos(n_p \theta) + i_v \cos\left(n_p \theta \pm \frac{2}{3} \pi\right) \\ + i_w \cos\left(n_p \theta \mp \frac{2}{3} \pi\right) \end{array} \right\} \quad (4)$$

여기서,

Tm : 모터의 토크 (Nm)

ka : 모터 토크 상수 (Nm/A)

Iq : 3상 교류 전류를 직류로 변환한 순시치(A)

θ : 회전자상의 d-q좌표계 q축의 u축 권선에 대한 상대 각위치 (radian)

np : 모터 회전자의 극수.

그러나 위의 식 (4)를 통해 Iq를 구하는 방법은 매순간 정확한 회전각도의 회전각도를 검출해야 하는데, 실제로 회전각도를 검출한다는 것은 어렵고 복잡한 일이다. 따라서 본 연구에서는 식 (2-4)를 이용하지 않고 합성전력을 이용하는 방법으로 토크 전류를 구하였다. 합성전력 I와 iq의 관계는 다음과 같다.

$$I = 1.5I_m \quad (5)$$

$$i_q = \sqrt{3}I \quad (6)$$

식 (5)을 식 (6)에 대입하면 토크 전류분 iq을 상전류의 최대치 Im으로 바꿀 수 있다. Im을 구하는 방법으로는 수치 해석적인 방법으로 식 (7)의 α를 변화시키며 Ia의 최대치 Ia_max는 식 (8)의 관계가 성립한다.

$$I_a = \left\{ \begin{array}{l} i_u \cos(\alpha) + i_v \cos\left(\alpha \pm \frac{2}{3} \pi\right) \\ + i_w \cos\left(\alpha \mp \frac{2}{3} \pi\right) \end{array} \right\} \quad (7)$$

$$I_{a \max} = 1.5I_m \quad (8)$$

3. 실험 및 데이터 분석

3.1 사선 궤적 가공 실험

본 실험에 앞서 시스템 구성방법 및 알고리즘의 문제점을 파악하고 또한 본 장치의 신뢰성을 확보하기 위하여 기본 실험을 실시하였다. 가공형상은 G01코드를 사용하여 사선 모양을 선택하였고 Dynamometer 시험기는 일정 토크모드로 가동하였으며, 3상 전류중 A/D되는 2상의 전류값의 뚜렷한 위상차 그래프를 얻기 위해 Sampling Rate를 1000 Hz로 하였으며, 실험 축은 X축과 Z축을 선택한다.

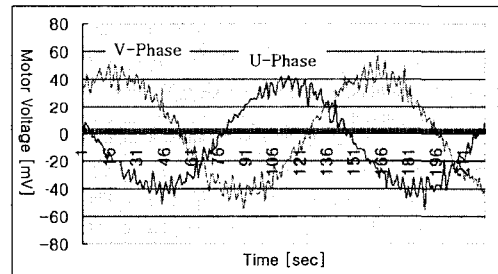


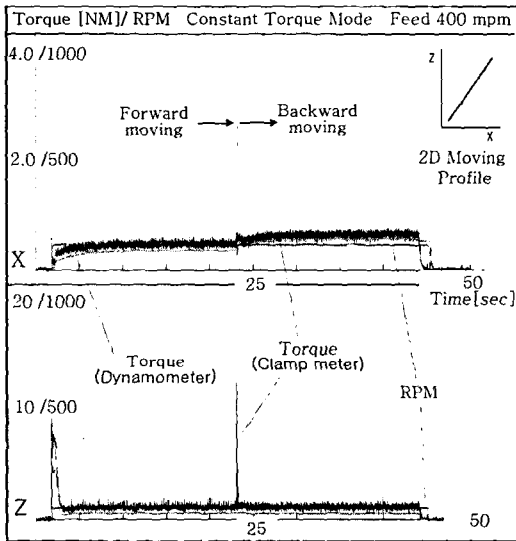
Fig. 2 Current A/D signal for 'u' and 'v' phases in 3 phases servo motor (1000 samples/sec)

Table 1 Fanuc α-series Motor data sheet used for the test

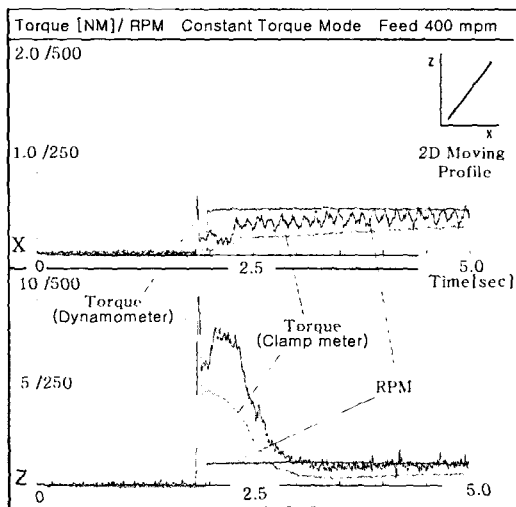
Parameter	X axis	Y, Z axis	Unit
Rating out speed	3000	2000	rpm
Rated torque at stall	3.0	12	Nm
Continuous RMS current at stall	4.6	8.8	A(rms)
Torque constant	0.65	1.36	Nm/A(rms)
Mechanical time constant	0.006	0.005	sec
Thermal time constant	45	60	min
Static friction	0.3	0.8	Nm
Maximum theoretical acceleration	20,000	11,000	rad/sec ²

기본 실험을 통해 얻어진 데이터로부터 Fig. 2에서와 같이 실제 A/D된 3상 전류중 2상의 전류값이 120도의 위상차를 보였고, 이를 통해 계산된 토크값이 X,Z축 모두 Dynamometer에 가해지고 있는 부하토크와 거의 일치함을 보임으로써 본 장치의 신뢰성을 확보 할 수 있다. Table 1은 시험에 사용된 NC제어기 관련 서보모터 사양이다. X축과 Z축을 동시에 구동시켜 서보모터의 회전

방향의 전환점이 발생하도록 하기 위해 가공 시작점으로 왕복운동을 하도록 G01-code를 작성하였다. 이때 A/D board의 Sampling Rate는 100Hz로 설정된 데이터 업데이트 간격을 10ms로 설정하였으며, 데이터 측정시간을 서보모터 구동 시간보다 길게 하여 모터의 구동시작점 및 구동 완료점에서의 특성을 파악할 수 있게 하였다. Fig. 3은 NC제어기에서 G01 코드를 사용한 사선 궤적에 의한 X, Z축 서보모터 이송과 Dynamometer의 정토오크 모드 실험에서의 신호를 측정 한 것이며, 축 RPM, 서보모터 토크(전류 신호 분석) 및 Dynamometer 토크 특성 분석이 시간에 따라 가능하도록 하였다. Fig. 4와 같이 직선궤적 실험을 통하여 외란토크(Torque disturbance)에 해당하는 모터구동 시작점의 구동토크와 회전방향 변환점에서의 Dynamometer 토크의 변화에 의해 서보모터의 기동 전류측정을 통해 얻은 모터토크가 일반적인 외란토크에 대한 응답과 형과 같은 형태임을 알 수 있으며, 서보모터의 반응 토크와 Dynamometer에서의 부하 변화 특성 파악이 가능할 수 있게 하였다.



(a) Total path (forward and backward)



(b) Starting point (forward direction)

Fig. 3 Diagonal path (G01 code) test using X and Z axes motor data signals with dynamometer

3.2 직각 코너 가공실험

사선궤적 실험에서와 같이 구동축을 X축과 Z축으로 정하고 직각 코너가공 시 X축 선행 가공과 Z축 선행 가공형태의 2 종류 실험을 하였다. 각각의 실험에서 Feed는 400 mpm (mm/min)으로 동일하고, 각축에 부가되는 Dynamometer의 부하토크 또한 동일하게 설정하였다. 실시간으로 변화하고 있는 축 rpm으로부터 가공형태를 추론하기 위해 X축, Z축 모두 이송모터 1회전당 10mm이송거리로 계산하였다. X-Z좌표계에서 직각코너 가공을 위해서는 X축 이송모터가 구동을 완료하는 시점에 정확히 Z축의 이송모터가 구동을 시작

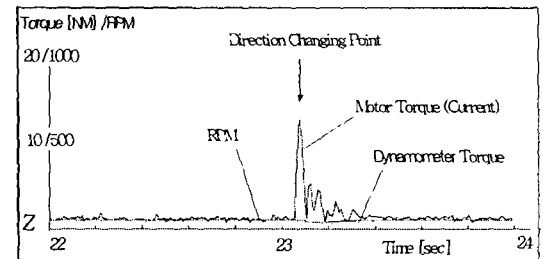


Fig. 4 Motor torque tracing control performance with dynamometer at a direction changing point (forward to backward)

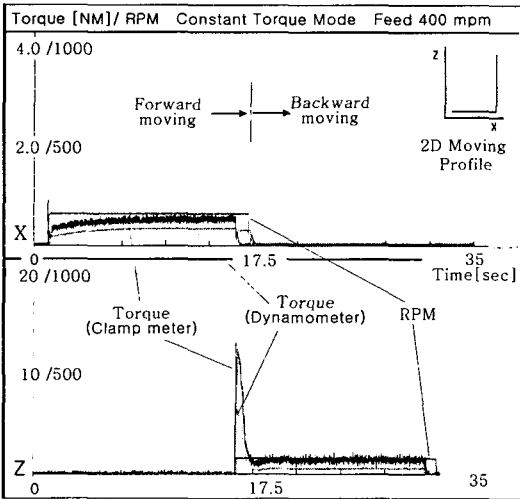
해야 한다. 그러나 Fig. 5에서 2축의 이송모터가 동시에 회전하고 있는 구간을 발견할 수 있다. 이와 같은 이유로 2축 (X,Z) rpm (또는 엔코드) 값으로 계산된 모서리 부분의 가공형태는 Fig. 6 과 같이 직각을 이루지 못하고 형상오차가 발생하고 있으며, 서보 Controller의 Parameter Gain 조정이 요구되며, 여기에 따른 반복 시험이 필요할 것

이다. 이러한 현상은 서보 제어기에서 모서리 반경(chamfer)를 의도적으로 가공하기 위해 자체 parameter 조정이 필요한 것으로 보인다.

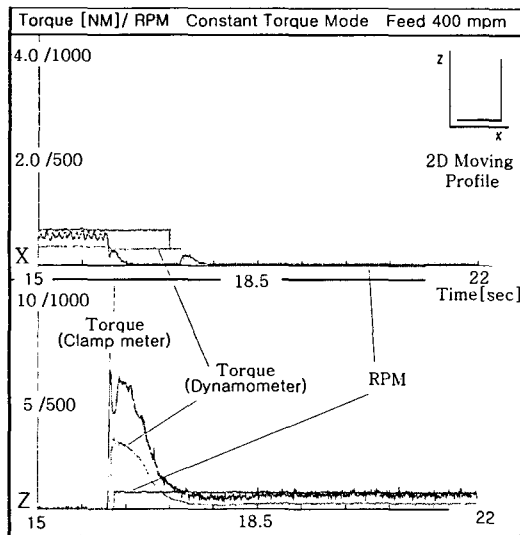
3.3 원호 가공 실험

가공형태는 G02코드를 사용하여 반지름 400mm크기의 90도 원호 모양을 설정하였다. 이는 가공 시작점에서 X축의 이송속도는 최대치가 되고 Z축의 이송속도는 zero가 되며, 이와 반대로 가공 완료 점에서 각각의 이송속도가 X축은 zero, Z축은 최대치가 되게 하기 위해서이다. 또 Feed를 200과 400으로 Fig. 7과 같이 2회 실험하였다.

Fig. 8의 X, Z 2축 rpm으로 그려진 가공형태를 보면 가공 시작점과 완료점 부근에서 직선 구간을 볼 수 있다. 이 형상오차의 원인은 X축이 이송모터가 구동을 시작한 이후에도 Z축의 이송모터는 구동을 시작하지 못하고 있는 구간이 존재함을 확인할 수 있으며, 이러한 현상은 가공의 마지막 부분에서도 유사한 현상이 보임을 알 수 있다. Fig. 9의 rpm과 토크의 원호 path 시작과 마지막 부분의 확대에서도 이러한 현상을 명확히 볼 수 있으며, 앞서 언급한 것과 같이 서보 제어기의 알고리즘 또는 Parameter에서 이러한 효과의 정량적인 조정이 가능할 것으로 보인다.



(a) Total path (forward and backward)



(b) Starting point (forward direction)

Fig. 5 Cornering path test data using X, Z axes (G01 code combination) with dynamometer torque control

3.4 반원 가공 실험

Fig. 10, 11에서 시험된 가공형태는 반지름 400mm의 반원이며 Feed는 400을 설정하였다. 이

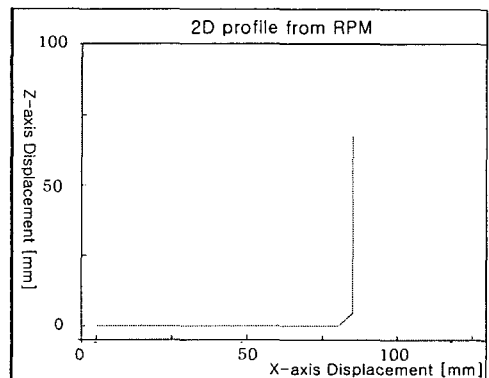
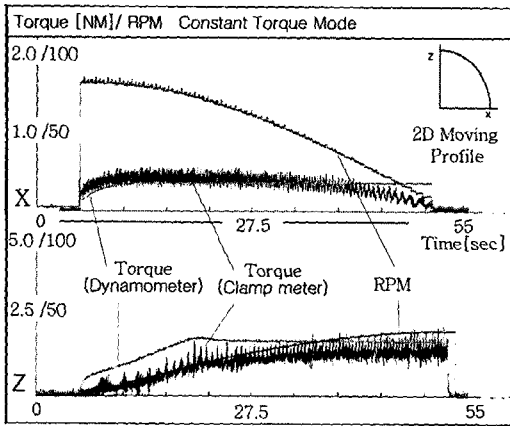
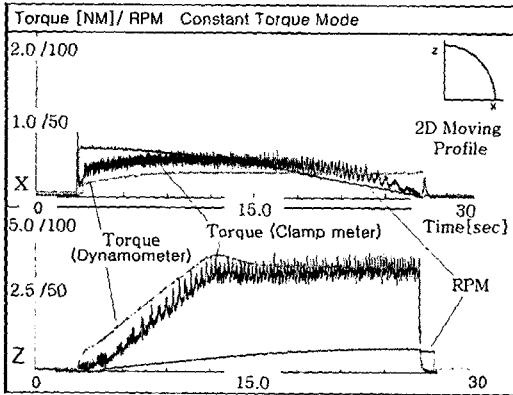


Fig. 6 Cornering path calculation using X, Z motor rpm signals (assumed 10 mm ball crew pitch / servo motor 1 revolution)



(a) Feed 200 mpm



(b) Feed 400 mpm

Fig. 7 90° circular path using X, Z axes (G02 code) motor signals with dynamometer torque control

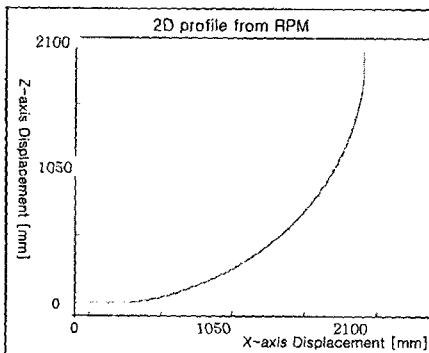
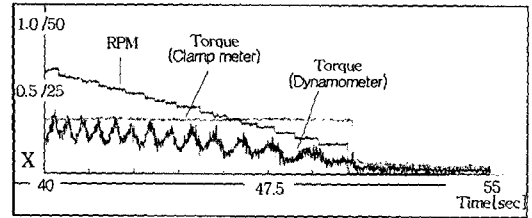
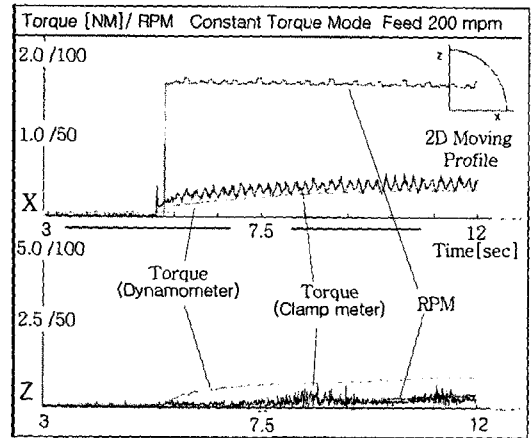


Fig. 8 90° circular path calculation using X, Z rpm motor rpm (assumed 10 mm ball crew pitch / servo motor 1 revolution)



(a) Ending point in the Z axis



(b) Starting point

Fig. 9 90° circular path using X, Z axes (G02 code) motor data at the ending and starting points

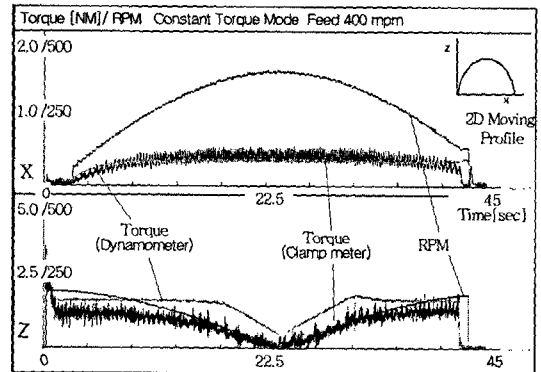


Fig. 10 180° circular path using X, Z axes (G02 code) motor data with dynamometer torque

실험은 절삭력 측 실험에서 Dynamometer에 부가되는 토크가 가중되어지는 부분과 감소되어지는 부분의 차이점을 분석하기 위한 시험이다. 같은

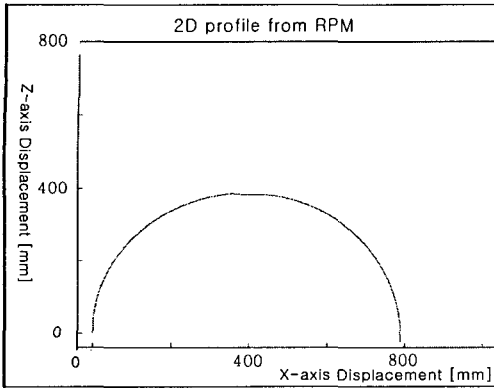


Fig. 11 180° circular path calculation using X, Z rpm signals (assumed 10 mm ball crew pitch / servo motor 1 revolution)

방법으로 X,Y,Z 3축의 서보 모터가 모두 구동되고 있는 상태에서도 실험도 수행 가능하다.

4. 결론

공작기계용 NC제어기는 공장에서 제조시 또는 현장에서 사용 중 정밀도 보정을 위하여 제어 Parameter의 조정이 필수적이며, 이때 위치 정밀도 측정을 위하여 부하 조건을 동시에 고려하여 분석하여야 한다. 본 연구에서 사용된 다축 모터 Dynamometer를 이용하여 NC 제어기 시스템(서보 모터, 드라이브, NC Controller) 전체의 성능을 분석하는 효과적인 방법으로 사용될 수 있음을 보

였다. 가공 중 실제 사용하는 G-code를 사용하여 다축 NC 제어기의 가공경로를 구동하여, 가공 궤적의 시작 또는 마지막 부분의 위치오차의 부하에 따른 정량적인 추적 분석이 가능함을 보였다. 서보모터의 엔코드 신호를 통한 위치 궤적 분석으로 다른 기계적인 마찰이 포함되지 않은 NC제어기 시스템 자체의 순수한 위치제어 능력을 분석할 수 있다. 본 연구의 분석 방법을 이용하여 NC제어기 메이커에서 NC제어기를 가공기계에 부착시 속도, 가속도 및 위치 Gains 등 Parameter의 정밀한 조정(Tuning)을 위한 데이터로 활용될 수 있을 것으로 보인다.

참고문헌

- (1) KSNC (Korean Standard NC) Project Report, 1998 - 2001, Ministry of Commerce, Industry and Energy.
- (2) Lee, Y.-H., 1998, "Feedrate Regulation Base on Cutting Force Model in 3-Axis Milling Process," Graduate School, SNU.
- (3) Kim, H.-Y., 1995, "Cutting Monitoring in Drilling Process Using Motor Current Signal," Graduate School, PNU.
- (4) Kim, J.-W., 1995, "Cutting Force Indirect Measurement in Milling Process Using Kalman Filter and Motor Feeding Current," Graduate School, SNU.
- (5) Korea FANUC, 2000, FANUC Series 0-MC, 00-MC, 0-Mate MC Servo Manual.