

본 논문은 1998년도 과학재단 지정 RRC센터인 조선대학교 수송기계부품 공장 자동화센터 연구비에 의해 연구되었음.

# 볼 나사와 서보모터 메커니즘에 의한 고속 TOOL 이송장치

김 성 식\*, 김 경 석\*\*

## High Speed Tool Feed System by the Mechanism of Ball Screw and Servo Motor

Sung-sik Kim\* , Koung-suk Kim\*\*

### ABSTRACT

In this study, the Ball screw and Servo motor Mechanism is considered as a High Speed Tool Feed System for the machining of a piston of a reciprocating engine. For the machining of a piston, that shapes oval, high speed servo mechanism is needed as a positioning of a cutting tool, and the stroke of tool is 0.1 mm~1 mm. Ball screw and servo motor Mechanism is available very much because this mechanism is used widely in general machine. This Mechanism has been designed with the use of the decrease in mass and partial wear of the ball screw for high speed positioning of tool. Also the periodic learning control method with the inverse transfer function compensation has been applied to the positioning control for the high accuracy positioning of tool. These applications lead the achievement of the machining of a piston with an accuracy of 5 $\mu$ m at 2500 rpm in CNC turning.

**Key Words :** Ball Screw(볼 나사), Piston(피스톤), Learning Control(학습제어), Ovality(타원), Preload(예압), Slide Way(안내면)

### 1. 서 론

자동차 엔진의 피스톤은 엔진의 가동 시에 최적의 출력과 저연비의 목적으로 복잡한 3차원 형상<sup>(1)</sup>(Ovality, Profile)으로 설계되고 수많은 시험을 통하여 개선되어진다. 또한 피스톤의 재질에 있어서도 일반적으로는 알루미늄 합금(AC8A)이 사용되고 있지만 피스톤 링의 마모를 줄이기 위하여 주철계 링을 사용하기도 하고 고출력이 필

요한 트럭이나 선박용에는 주철 피스톤을 사용한다.

이처럼 복잡한 형상과 재질의 변경으로 종래의 피스톤 가공방식에서 벗어난 새로운 가공방식이 요구되었다. 종래 모방절삭방식은 각각의 피스톤형상에 대한 모방모델의 제작을 필요로 하며, 그 모델 자체의 제작에 많은 시간이 소요되고, 스타일러스의 추종성 한계로 회전수는 800RPM 정도가 한계이며, 스타일러스의 마모로 인하여 품질 저하가 일어나는 등의 문제가 있다. 이러한 문제는

\* 화천기술개발연구소  
\*\* 조선대학교

모델에 의존하지 않고 프로그램에 의한 절삭, 즉 CNC 선반에 의한 절삭을 행함으로써 해결이 가능하고 생산성은 C축의 회전에 동기 한 고속이송 및 고속위치결정장치에 의존한다.

고속위치결정장치는 절삭공구의 위치결정을 행하는 제어기구의 개발이 선행되어야 하지만 특히 품질을 높이고 생산성을 향상시키기 위해서는 위치결정기구의 고속응답성과 절삭력에 견딜 수 있는 충분한 힘이 필요하게 된다. 고속위치결정장치의 구동방식은 1987년 일본 Izumi Industries, Ltd.에서 Minoru Tanaka에 의해 개발된 전자흡인력방식<sup>2)</sup> 외에 전기유압서보방식<sup>3)</sup>, 리니어모터방식<sup>4),5)</sup>, 압전 액츄레이터 방식<sup>6)</sup> 등이 연구되었다. 전기유압서보방식은 응답성이 낮고, 유온관리를 포함한 보전이 어려우며 장치가 대형이다. 리니어모터방식은 출력이 낮고, 장치가 대형이다. 압전액츄레이터 방식은 변위가 작고 장치가 대형이다. 전자흡인력방식 역시 변위가 작다는 단점이 있다. 그러나 각 방식들은 성능향상을 목적으로 많은 연구와 개발이 이루어지고 있어 이 분야를 이끌어 가고 있다.

고속위치결정장치로서 또 하나의 방법은 서보모터와 볼나사를 이용하는 것이다. 이 방식은 장치가 비교적 간단하여 제작비가 적고, 대부분의 공작기계에 사용되는 방식으로 장시간 사용에 따른 안정성, 속도 대응성이 좋고 제어 및 사용이 용이하다.

본 연구에서는 실제 피스톤 절삭시 발생하는 절삭저항을 측정 한 후, 서보모터와 볼나사를 선정하고 장치제작 후 정적정밀도를 체크하였다. 또한 Learning control(학습제어)<sup>7),8)</sup> 조작법을 적용하여 서보계의 지연이나 절삭력에 의한 외란 등을 보상함으로써 고속가공이 가능토록 하고 실제 피스톤을 가공하여 위치결정 정도와 응답성 및 가공 정밀도를 평가하였다.

## 2. Tool 이송장치 고속화

### 2.1 절삭저항<sup>9),10)</sup>

피스톤의 형상과 재질은 엔진의 종류에 따라 다르게 설계되지만 본 연구에서는 기준경  $\phi 80$  mm, 피이드 0.3 mm이고 재질은 AC8A이며 타원형상을 갖는 피스톤을 대상으로 하였다. 이러한 피스톤 가공의 생산성을 향상시키기 위해서는 공구이송장치의 고속화가 필수이며 이 장치는 절삭저항을 충분히 이겨내도록 설계되지 않으면 안 된다. 따라서 가공깊이 0.3mm에서 C축 회전수별로 절

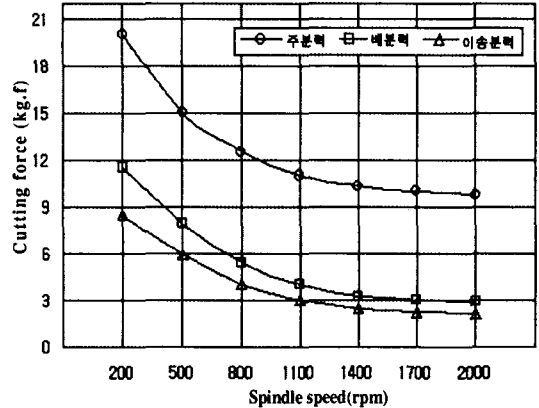
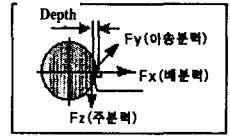


Fig. 1 Spindle Speed vs. Cutting Force

삭저항을 측정하였다. 측정은 KISTLER 9257A에 의해 실시하였으며 측정결과를 Fig. 1에 나타내었다.

### 2.2 서보모터<sup>11)</sup>의 선정

타원형상의 피스톤을 가공하기 위해서는 C축의 회전에 대해 절삭공구의 위치가 동기 되지 않으면 안 된다. 또한 C축의 회전속도를 높이기 위해서는 공구이송장치의 설계가 무엇보다도 중요하다. 본 연구에서는 서보모터와 볼나사를 이용하여 회전운동을 직선운동으로 변환하여 전달하고 고속화를 위해 특별한 제어방식을 부여하였다. 서보모터는 슬라이드 구성의 부하 관성과 절삭시 발생하는 부하토크를 충분히 이겨내고 응답성이 높은 모델의 선정이 필요하다. Tool 이송장치에 사용되는 모터에 의한 C축의 회전속도는 이론적으로 다음 식으로 정의할 수 있다.

$$N \leq \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{\ell}{2\pi} \times \frac{k^2}{1+k} \times \frac{T_1 - T_2}{(J_1 + J_2)s}} \quad (1)$$

여기서, 타원의 장축 반경을 a(mm), 단축 반경을 b(mm)라 하며

- N : C축의 회전수(rpm)
- $J_1$  : 모터 관성(kgf · cm · sec<sup>2</sup>)
- $J_2$  : 부하 관성(kgf · cm · sec<sup>2</sup>)
- $\ell$  : 모터 1회전당 이동량(mm)

$k = b/a$  (피스톤의 장 · 단경비)

$T_1$  : 모터 최대 토크(kgf · cm)

$T_2$  : 부하 토크(kgf · cm)

$s = a-b$  (Y축 스트로크 mm)를 각각 나타낸다.

모터의 사양은 Table 1과 같으며, 볼 나사 리이드에 대한 식(1)의 결과를 Fig. 2에 나타냈다.

Table 1. Specification of Servo Motor

Item	Unit	Specification
Output Power	kw	1.8
Max. Torque	kg · cm	480
Rotor Inertia	kg · cm · sec <sup>2</sup>	0.010
Max. Speed	rpm	3000
Max. Acceleration	rad/sec <sup>2</sup>	48,000

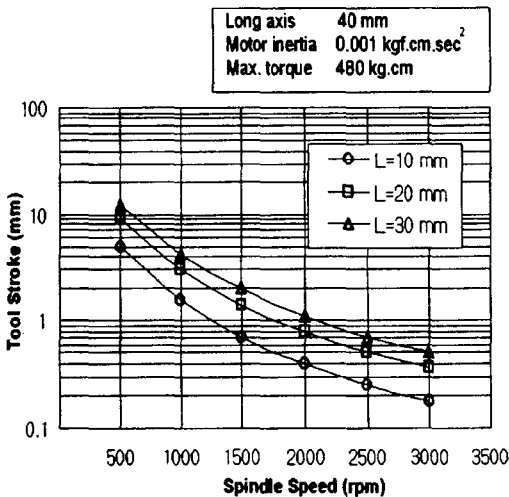


Fig. 2 Spindle Speed vs. Tool Stroke

2.3 볼 나사<sup>(12), (13)</sup>의 선정

Fig. 2에서 서보모터의 회전각이 적을수록, 즉 서보모터 1회전당 이동하는 거리(볼 나사의 리이드)가 클수록 C축의 회전수를 높일 수 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 볼 나사의 리이드가 크게 되면 축방향 부하 토크가 낮아지기 때문에 강성, 부하용량, 속도 등의 사용환경을 고려한 설계가 필요하다. 또한 위치결정 정도와 반복 정도를 향상시켜야 하고 볼의 편 마모에 대한 대책이 선행되

지 않으면 안 된다. 따라서 본 실험장치에서는 볼 나사의 리이드를 10mm로 선정하고 정도 등급은 C1급, 예압은 25kgf로써 예압방식은 Oversize방식을 택하였다. 예압방식은 더블너트 예압방식과 싱글너트 예압방식이 있으나 가능한 한 부하관성을 최소화 할 목적으로 싱글너트 예압방식인 Oversize 방식으로 하였다.

2.3.1 볼의 편 마모<sup>(14)</sup> 대책

볼 나사 구동방식은 볼의 미끄럼이나 스핀으로 인하여 구동 토크의 변동, 볼이나 나사 홈 면의 마모, 전동 피로 파손, 소음 등이 발생하여 볼 나사의 성능에 큰 영향을 주고 특히 볼의 편 마모 발생은 피스톤 가공과 같이 미소 이동을 필요로 하는 경우에 있어서 위치 결정 오차 발생으로 절삭이 불가능하게 된다. 볼의 미끄럼이나 스핀이 일어나는 요인은 다음과 같다. 첫째, 나사 축과 너트의 나사 홈이 볼과 접촉하는 점의 리이드각이 서로 다르기 때문에 볼의 회전운동 방향에 대해서 직각방향의 홈 면으로 미끄럼이 발생하고 둘째, 베어링처럼 볼을 지지해주는 리테이너가 없기 때문에 인접 볼끼리 미끄럼이 발생되며 셋째, 볼의 운동방향에 대해서 미끄럼이 발생한다. 또한 나사축의 이동량이 작으므로 볼의 운동은 예각의 반복 운동이기 때문에 볼이나 나사 홈에 편 마모가 발생하게 된다. 따라서 볼의 미끄럼이나 마모대책을 필요로 하고 이는 볼의 거동을 관찰해야 하는데 볼 나사 내의 볼을 육안으로 관찰하는 일은 전혀 불가능하기 때문에 이론식<sup>(14)</sup>과 볼 나사 제작회사인 NSK에서 제출한 전자유도 현상을 이용하여 측정한 결과치를 이용하였다. 측정은 볼 나사 내의 1개의 볼에 자석을 붙이고 나사가 움직일 때 그 볼의 자극회전에 의해서 너트에 설치한 코일의 鎖交磁速變化에 의한 기전력을 유기 시키고 이 전압변동으로부터 볼의 자전

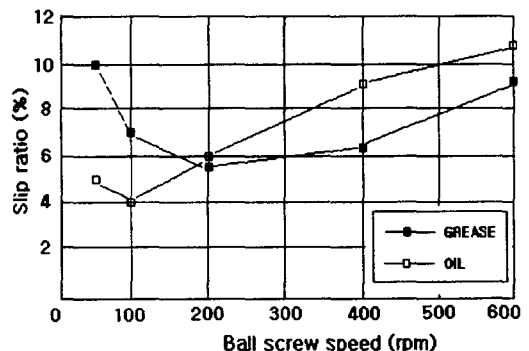


Fig. 3 Slip Ratio of Ball Screw

주기 등의 거동을 측정하는 방법이다. Fig. 3에 볼 나사의 회전수와 미끄럼율의 실험치를 나타낸다.

나사축 및 너트의 나사홈상에 발생하는 볼의 자전미끄럼율을  $S_{By}$ ,  $S_{My}$  라하고 볼의 공전미끄럼율을  $S_m$ 이라 하면

$$S_{By} = \frac{V_{By'}}{|V_B|} \times 100(\%) \quad (2)$$

$$S_{My} = \frac{V_{My'}}{|V_B|} \times 100(\%) \quad (3)$$

$$S_m = \frac{w_{mh} - w_m}{w_{mh}} \times 100(\%) \quad (4)$$

여기서,

$V_B$  : 나사축의 나사 홈과 구의 접촉점에 걸리는 주속도

$v_{By}$  : 나사축의 나사 홈과 구의 접촉점에 걸리는 구의 전동방향 자전미끄럼 속도

$v_{My}$  : 너트의 나사 홈과 구의 접촉점에 걸리는 전동방향 자전미끄럼 속도

$w_{mh}$  : 구의 미끄럼이 없는 경우의 이론 공전 각속도

$w_m$  : 구의 공전각속도

이다.

상기 그림에서 알 수 있듯이 200 rpm에서 미끄럼율이 가장 작기 때문에 Tool의 이송속도가 2 m/min이 되도록 마크로 프로그램하고 볼의 위치를 순환시키기 위해 전체 이동거리를 20mm로 하였으며, 윤활 방식은 슬립율이 적은 Grease 윤활을 하였다. 마크로 프로그램에서 전체 20 mm 이동은 소재 교환시 행하고 2 m/min의 이송은 실제 절삭되지 않은 링홈부에서 이루어지기 때문에 전체 절삭시간에 미치는 영향은 없다. Table 2에 볼 나사의 재원을 나타낸다.

Table 2. Specification of Ball screw

Item	Specification
Dia of Shaft	Ø20 mm
Lead	10 mm
Grade	C1
Basic Lead	9.99937 mm
Ball dia	Ø3.175 mm
Turns and Circuits	2.5 × 1
Preload	25 kg.f
Preload type	Over size
Lubrication	Abrasion Grease

## 2.4 SLIDE WAY

안내면의 구성은 부하관성을 최소화시키기 위하여 최대한 가볍게 하여야 하고 Stick slip이 없도록 해야 한다. 슬라이드의 본체는 구상흑연주철에 특수합성수지 Turcite를 부착후 스크래핑 하고 슬라이드는 두랄루민(AL7075)에 파인 세라믹스<sup>15)</sup>  $AL_2O_3$ 를 코팅하여 구성하였다. 스크래핑은 최소이송단위와 로스트모션(Lost Motion)을 점검하면서 인치당 접촉면을 12개 이상이 되도록 하였으며 강제 윤활방식과 윤활유의 배출량을 조절하여 슬라이드면에 유막이 형성되도록 하였다. 로스트모션<sup>16)</sup>의 데이터는 전체이동거리에 대해 2개소를 측정하고 관련 데이터를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타낸다.

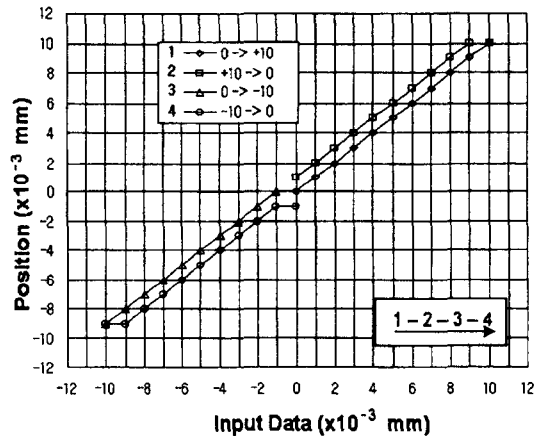


Fig. 4 Lost Motion Data(Position 10 mm)

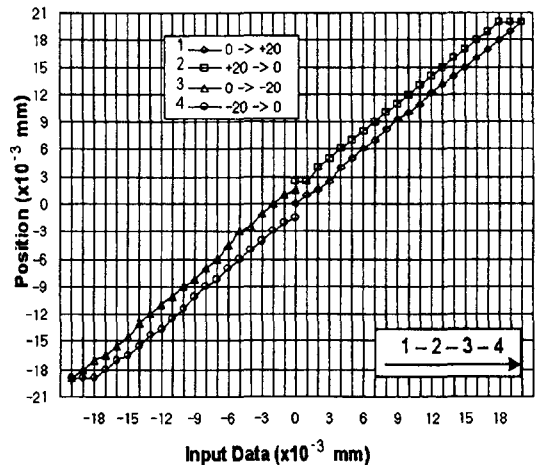


Fig. 5 Lost Motion Data(Position 19 mm)

### 2.5 제어방법

피스톤 가공 데이터는 C-X-Z-Y 축을 동시 제어토록 구성하고 X축은 초기 위치결정을 담당하며 C-Z-Y축의 고속사이클 가공 G05기능으로 가능하게 된다. C축의 회전 제어에 대하여 공구대(Y축)의 이송을 정밀하게 하기 위하여 Y축은 7.8축 보드에 연결하였으며 학습제어 기능을 부가하였다. 학습제어는 임의의 주기로 반복되는 지령에 대하여 지령과 피이드백의 편차가 "0"이 되도록 보정량을 만들어 내어 최종적으로 편차가 "0"에 가까운 치수가 되도록 한다. 학습기능<sup>8)</sup>에는 학습중단모드, 학습단속모드, 보정데이터 중단모드, 보정데이터 단속모드로 4개의 기능이 있다. 이 기능들은 각각 특징이 있지만 본 장치에서는 보정데이터 단속모드를 선택하였다. 이 모드는 전원을 넣어 최초의 고속사이클 가공 시에만 학습을 하고 다음 회부터의 고속사이클 가공은 최초 가공 학습 시에 만들어진 데이터를 사용하여 움직인다. 이 기능은 장시간 기계적 변동이 없는 경우에 사용되며, 2회 제부터는 학습을 하지 않기 때문에 위치편차가 수렴되기까지의 시간이 불필요하게 되어 사이클타임을 단축시킬 수 있으며 주기마다의 반복성도 양호하다. 여기서 초기에 만들어진 보정데이터는 다른 모드로 변경하거나, 전원을 OFF하지 않는 한 지워지지 않는다. 데이터의 보간은 최대 0.5msec, 즉 C축 1회전을 40개 블록(9°)으로 분할함으로써 식 (5)의 고속 위치 결정축(Y축)의 주파수  $f$  (Hz)는 100Hz가 가능하다.

$$f = \frac{2 \times N}{60} \quad (5)$$

여기서, N(rpm)은 C축 회전수이다.

Fig. 6은 학습제어의 개략도를 나타내고 C축 1회전당 공구이동의 주기  $L$ 을 얻는 지령  $r$ 을 Fourier급수로 전개하면  $2\pi/L$ 를 주기로 하여  $\omega_k = 2\pi k/L$ 인 고조파를 갖는 지령이 된다. 이  $\omega_k$  각각의 주파수에 대해 Loop Gain( $k$ )이 무한대가 되는 Controller  $H(s)$ 를 투입하면 각 주파수  $\omega_k$ 성분에 대해서 제어 편차가 0이 되고, 지령에 대해서 고정도로 추종된다.  $H(s)$ 는 기본 주기인  $L$ 과 동일한 지연 시간  $L$ 을 갖는 Controller로 초기 함수 1주기 분으로부터 연속적으로 주기 신호를 발생하는 함수발생기구조로 된다. 이때  $H(s)$ 는 식 (6)과 같다.

$$H(s) = \frac{1}{1 - \exp(-sL)} \quad (6)$$

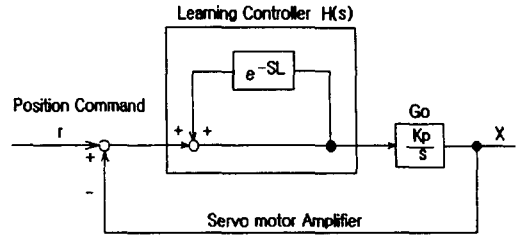


Fig. 6 Schematic diagram of learning control

$s$ 에  $j\omega$ 를 대입하면  $\omega$ 와  $\omega k$ 가 같게되는 전체 주파수에 있어서 출력이 무한대이므로 시스템이 안정하다면 반복 지령에 대해 편차가 0이 된다. 이것은 주기  $L$ 에 동기한 외란에 대해서도 동일 결과가 되기 때문에, 외란에 의한 편차 억제에 대해서도 효과를 기대할 수 있다.

### 3. 실험장치<sup>(17),(18)</sup>

선삭에서 원통 절삭 시 이송방향이 반전하는 경우 X축에서의 백래쉬 발생으로 그 부분에 형상오차가 발생하고 중량이 무겁기 때문에 피스톤 가공의 고속화가 불가능하다. 따라서 X축은 피스톤 직경에 따라 위치결정만 행하고 X축 위에 Y축을 부가하여 고속위치결정이 가능하도록 하였다. 슬라이드부 중량은 4.7kg으로 관성을 최소화하고 구동모터는 100Hz까지 응답 가능한 FANUC社의 모델을 선정하였으며 모터의 관성모멘트 대비 슬라이드부의 관성모멘트를 55% 이내로 설계하였다. 실험장치의 전체 구성은 CNC 선반에 Y축을 부가하고 주축을 서보모터로 구동하며 피스톤 가공을 위한 별도의 소프트웨어를 부가하였다. Photo. 1에 실험장치의 가공부 구성을 나타내고 Fig. 7에 Control 시스템의 구성을 나타낸다.

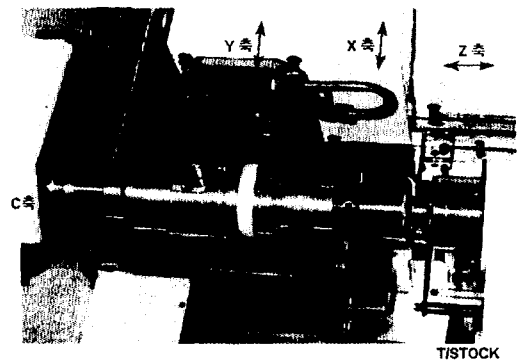


Photo. 1 Construction of cutting part

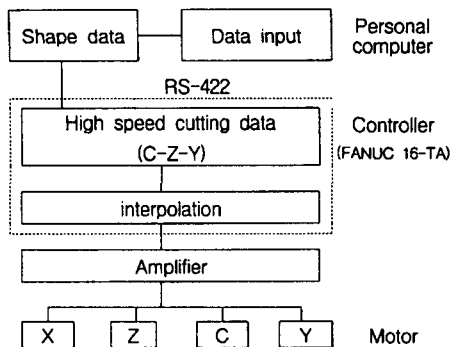


Fig. 7 Schematic diagram of control system

4. 실험결과 및 고찰

피스톤의 기준경  $\varnothing 80$  mm이고 진원가공이 완료된 소재를 피이드 0.3 mm의 조건으로 가공한 후 피스톤 전용 측정기<sup>(19)</sup>에 의해 가공정밀도를 측정하고, 주축의 회전수 대비 공구 이동량의 한계를 실험하였다. 가공정밀도는 장경의 위치편차와 각 위치의 값으로 나타낼 수 있으며 장경 기준으로  $\pm 30^\circ$  범위의 값은 설계치 대비 편차가 3  $\mu$ m 이내이고, 전체의 편차는 10  $\mu$ m 이내의 값을 얻었다. 또한 식 (1)의 C축 회전수와 공구 이송장치에 사용되는 모터의 이론적 응답성과 실제의 응답성을 비교한 결과 80%의 성능을 얻을 수 있었다. C축 모터의 최대능력인 3000 rpm의 경우도 시도하였으나 G05 고속가공 시작 시 기계의 오동작으로 불가능하였다. Fig. 8은 2500 rpm의 결과이고, Fig. 9에 1800 rpm, Fig. 10에 1250 rpm의 결과를 나타낸다. Fig. 11은 시간에 대한 Ovality  $\varnothing 0.2$  mm의 공구경로를 나타내며 Fig. 12는 C축의

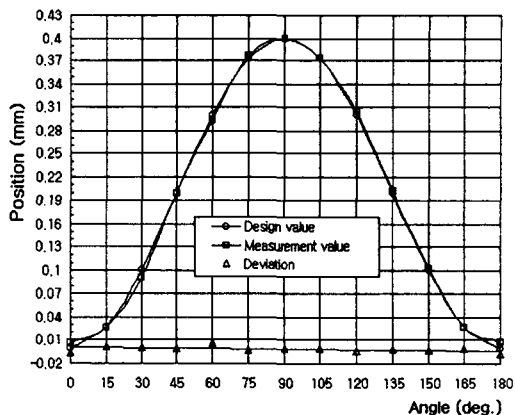


Fig. 9 Measuring results of Ovality(1800rpm)

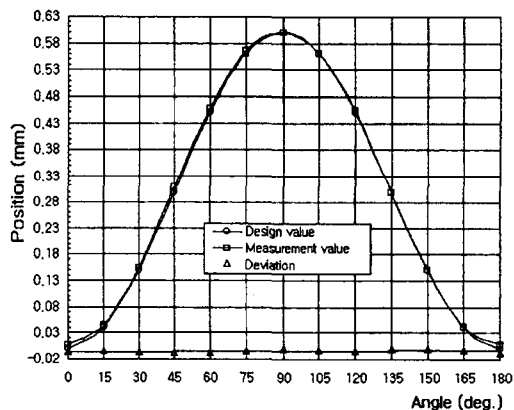


Fig. 10 Measuring results of Ovality(1250rpm)

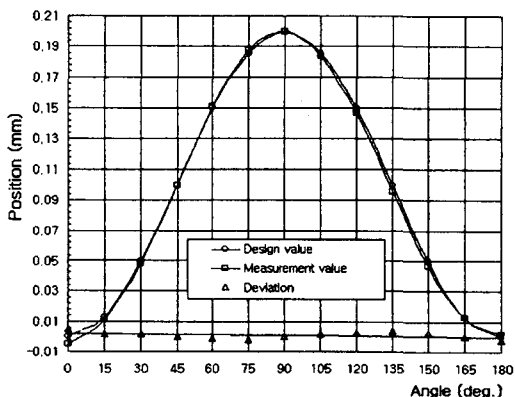


Fig. 8 Measuring results of Ovality(2500rpm)

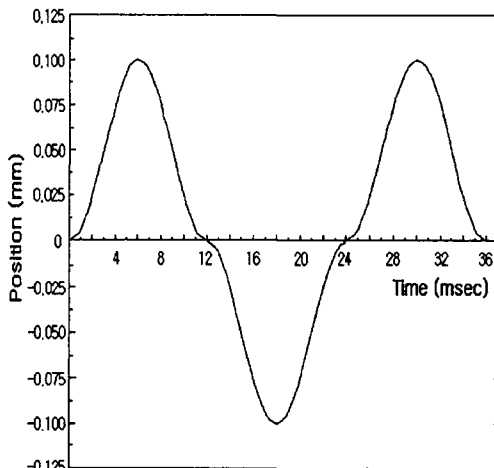


Fig. 11 Measuring results of Ovality (Ø 0.2 mm)

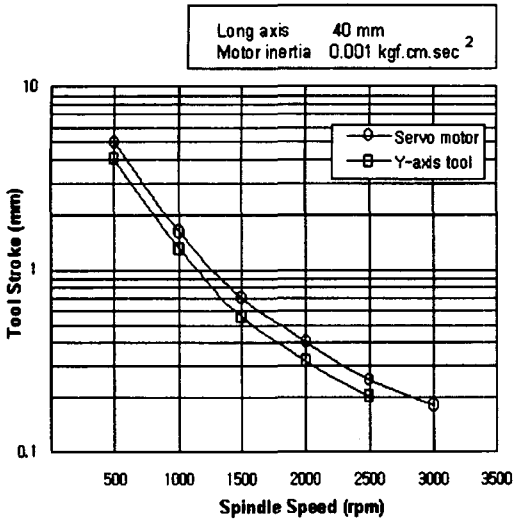


Fig. 12 Spindle speed vs. Tool stroke

회전수에 대한 Y축 모터의 이론적 응답성 대비 구동시스템의 능력을 공구의 이동량으로 나타낸다. 그림의 데이터는 입력데이터를 보정 하지 않은 상태에서 50개의 연속가공을 시행 후 샘플링 한 결과로써 장경 틀어짐  $\pm 3^\circ$ , 장경 기준  $\pm 30^\circ$  범위에서의 편차가 허용치(7  $\mu$ m) 이내임을 알 수 있다.

### 5. 결 론

피스톤 등과 같이 타원형상을 가공하기 위한 공구이송장치를 서보모터와 볼 나사를 이용하여 제작 후 가공 정밀도를 평가하고 모터 자체의 최대 응답성과 구동장치의 응답성을 확인한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 로스트모션이 2  $\mu$ m 이내인 공구이송장치를 CNC 선반에 채용하여 50개의 피스톤을 연속가공 후 샘플링 측정된 결과 장경 기준으로  $\pm 30^\circ$  범위에서 설계치 대비 편차가 3  $\mu$ m 이내로써 허용치(7  $\mu$ m) 이내임을 확인하였다.
2. 구동축의 관성모멘트를 구동모터의 55% 이내로 설계하여 C축 회전수와 공구의 이동거리 능력을 비교한 바, 무부하 상태의 이론적 모터 능력 대비 80%의 성능을 얻을 수 있었다.
3. C축의 회전수 2500rpm에서 0.2mm의 타원을 갖는 피스톤 가공으로 공구대의 응답성을 83Hz까지 얻을 수 있었다.

### 참 고 문 헌

1. 山本英繼, "고성능화, 고신뢰화에 대응한 기계장치의 열 대책 설계," 機械設計技術, Vol. 7, No. 4, pp. 41-45, 1992.
2. 山口智實, 東京大學 博士論文, 1988.
3. Toshiro HIGUCHI 외 3명, "電氣油壓サーボ機構による高速非圓形輪廓切削旋盤의開發," 精密工學會誌, Vol. 56, No. 2, pp. 293-298, 1990.
4. 山川陽一他 3명, 豊田工機技報, Vol. 33, No. 3, pp. 14-19, 1992.
5. 渡邊政治, 松崎哲夫, "AP2V CNC 高速 ピストン旋盤," 豊田工機技報, Vol. 31, No. 2, pp. 82-92, 1990.
6. 田中實, "ピストン外形 加工用 高速 CNC 旋盤의開發," 内燃機關, Vol. 29, No. 12, pp. 72-80.
7. Toshiro HIGUCHI, Tomomi YAMAGUCHI, "Cutting Tool Positioning Control by Periodic Learning Control Method and Inverse Transfer Function Compensation," システムと制御, Vol. 30, No. 8, pp. 503-511, 1986.
8. FANUC LTD, "デジタル AC サーボ 9033. 9053 系列 學習機能 取扱説明書," A-63639-005, 1991.
9. KISTLER 9257A Manual & Catalog.
10. 현동훈, "선삭가공의 절삭저항과 절삭동력," 기계설계 기술, Vol. 11, No. 5, pp. 121-130, 1996.
11. FANUC LTD, "FANUC AC Servo Motor Series Catalog & Manual, 1992.
12. NTN 株式會社, "精密 ボールねじ Catalog, No. 6202, 1989.
13. 大塚 二郎 · 坂戸 啓一郎, 精密位置決め機構設計, 工業調査會, 1996.
14. 井澤實, "ボールねじ應用技術," 工業調査會, pp85-90, pp187-190, 1993.
15. 水田進 · 河本邦仁, "セラミック 材料," 東京大學出版會, 1986.
16. IS 工作機械, "數値制御 旋盤の試験及び検査方法 B6331," 日本規格協會, pp. 942-964, 1986.
17. 김경석, 김성식 외, "비진원 가공용 CNC 선반 개발에 관한 연구," 한국정밀공학회, Vol. 13, No. 4, pp. 152-162, 1996.
18. 화천기공(주), "CNC 선반 시리즈 취급설명서," 1996.