

리니어모터를 이용한 고속이송 장치 개발에 관한 연구

A Study on the Development of High Speed Tool

Feeder using Linear Motor

*이대현(조선대 대학원) **김경석(조선대학교) ***김성식(화천기술개발연구소)

*Dae-hyun Lee **Koung-suk Kim ***Sung-sik Kim

1. 서 론

CNC 선반에 의한 피스톤 등과 같은 타원형상 가공은 공구의 이송축 성능에 따라 품질과 생산성이 좌우된다. 이 이송축의 구동방식은 1987년 일본 Izumi Industries, Ltd.에서 Minoru Tanaka에 의해 개발된 전자흡인력 방식 외에 전기유압서보 방식, 서보모터와 볼나사 방식, 압전액추에이터 방식 등이 연구되었다.

전자흡인력 방식은 변위가 작고 비선형성이며, 전기유압서보 방식은 장치가 대형이고 저응답성으로 속도에 한계가 있다. 또한 서보 모터와 볼나사 방식 역시 저응답성이고 볼나사의 나사부와 너트부의 마멸로 백래쉬가 있으며, 압전액추에이터 방식은 고정도·고응답성을 가지나 저출력인 단점이 있다. 이러한 단점들을 개선하여 성능을 향상시키기 위한 목적으로 많은 연구와 개발이 이루어지고 있으나 실용화 차원에서는 아직 100 Hz에 그치고 있다.

고속위치결정장치로서 또 하나는 리니어 모터(Linear motor)를 이용하여 구동시키는 방법이 있다. 리니어 모터는 1841년 영국의 교통시스템에 실용화 된 이래 최근 각종 자동화 기기를 중심으로 응용되고 있으며 그 응용 면에서 보면 반송용과 위치결정용으로 크게 나눌 수 있다. 고속·고정밀도의 위치결정을 위한 기구로 채용하면 중간의 기계적 요소를 채용하지 않고 장치를 직접 구동할 수 있다. 따라서 다른 액추에이터와 비교해 볼 때 탄성변형이 없고, 백래쉬가 없으며, 고속·고가감속, 추력의 확장성, 단순한 구조, 저소음 등의 장점을 가지고 있으며, 원리 및 구조적으로

다이렉트 드라이브(Direct drive)로서의 기능을 발휘하고 있다. 그러나 기계적 운동 변환 기구를 사용하지 않고 기계를 직접 구동하는 경우에는 추력, 질량, 제어성 및 경제성 등에 과제가 남아 있고, 직선운동에서는 특히 리니어 모터 그 자체와 이것을 조합한 시스템으로서의 고성능화가 절실히 요구된다. 성능을 향상시키기 위해서는 용도에 맞는 모델을 선택하고, 경량이면서도 강성이 높은 프레임의 설계, 저중심 설계, 중력축의 밸런스, 마찰을 작게 하는 등의 조건이 있다.

본 연구에서는 피스톤 가공의 고속화를 행할 수 있는 고성능 위치결정장치를 구현하기 위하여 리니어 브러시리스 직류모터(Linear Brushless DC Motor)를 사용한 고속 공구이송장치의 설계와 응답특성을 연구하였다.

2. 비진원 형상 가공계적

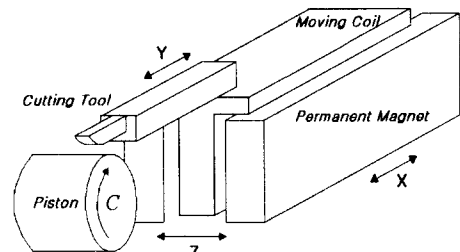


Fig. 1 Schematic diagram of piston turning machine

Fig. 1은 공구 이송축에 리니어 모터를 이용한 피스톤 가공기의 개략도를 나타내고 있다. 여기서, C축은 피스톤을 회전시키는 주축이고, X축은

피스톤의 크기에 따라 개략적인 공구의 위치결정을 행하고, Z축은 C축의 회전에 동기하여 길이방향의 절삭을 행하며, Y축은 미소량만큼 공구를 고속으로 이동시키면서 C축의 회전에 동기하여 절삭을 행하는 축이다. 즉 C-Z축의 동기제어로 Profile을 가공하고, C-Y축의 동기제어로 단면방향의 형상인 Ovality를 가공하게 된다. 피스톤의 타원형상을 가공하기 위해서는 C-Z-Y축의 동기제어가 중요하며, 특히, 주축 1회전당 Y 축이 2회 왕복 이송해야 한다. 따라서 C축의 회전속도를 N (rpm), Y축의 왕복주파수를 f_y (Hz)라 하면 식 (1)과 같은 관계가 성립한다.

$$N = 30 f_y \text{ (rpm)} \quad (1)$$

Fig. 2는 피스톤 횡단면의 타원형상을 보여주고 있다. 여기서 θ (rad)는 회전각도를 나타내고 a, b 는 각각 타원형상의 장축과 단축을 나타낸다.

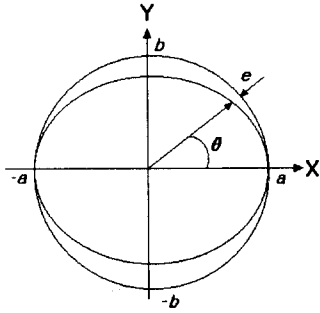


Fig. 2 The oval shape of piston

직교좌표상에서의 일반적인 타원의 공식은 다음과 같다.

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (2)$$

식 (2)를 극좌표상에서 표시하면 다음과 같다.

$$x = r \cos \theta \quad (3)$$

$$y = r \sin \theta$$

$$\therefore r = \frac{ab}{\sqrt{(a \sin \theta)^2 + (b \cos \theta)^2}} \quad (4)$$

따라서 피스톤의 가공시 이송장치의 이송거리 e 는 다음과 같다.

$$e = a - r$$

$$= a \left[1 - \frac{b}{\sqrt{(a \sin \theta)^2 + (b \cos \theta)^2}} \right] \quad (5)$$

장축 $a = 50$ mm이고, 단축 $b = 49.75$ mm인 피스톤 가공에서 공구의 이송궤적을 C축 회전각도에 대해서 도시하면 Fig. 3과 같다.

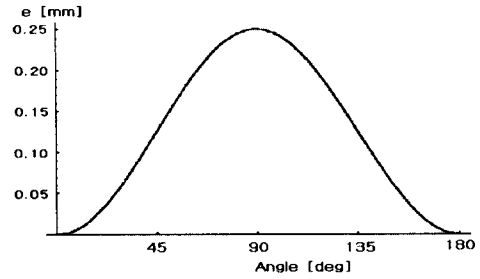


Fig. 3 The tool feed trajectory, e (Ovality $\varnothing 0.5$ mm)

e 를 시간 t 에 대해서 표현하면 다음과 같다.

$$e = a \left[1 - \frac{b}{\sqrt{(a \sin \omega_c t)^2 + (b \cos \omega_c t)^2}} \right] \quad (6)$$

여기서, ω_c 는 C 축의 각속도를 나타낸다.

따라서 e 의 속도, 가속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_e = \frac{ab(a^2 - b^2)\omega_c \sin \omega_c t \cos \omega_c t}{[(a \sin \omega_c t)^2 + (b \cos \omega_c t)^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (7)$$

$$a_e = \frac{ab(a^2 - b^2)\omega_c^2(a^2 - b^2)(\cos 4\omega_c t - 5)}{8[(a \sin \omega_c t)^2 + (b \cos \omega_c t)^2]^{\frac{5}{2}}} + \frac{ab(a^2 - b^2)\omega_c^2 \times 4(a^2 + b^2) \cos 2\omega_c t}{8[(a \sin \omega_c t)^2 + (b \cos \omega_c t)^2]^{\frac{5}{2}}} \quad (8)$$

식 (7)과 (8)을 이용하여 타원량 $\varnothing 5$ mm를 가공하기 위한 절삭공구의 이송궤적의 속도, 가속도를 이송주파수로 분류하여 c축 회전각도에 대해서 도시하면 Fig. 4, 5와 같다.

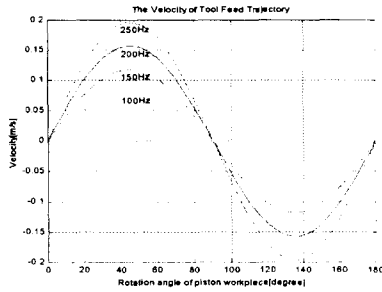


Fig. 4 The velocity of tool feed trajectory , v_e (ovality= $\varnothing 0.5\text{mm}$)

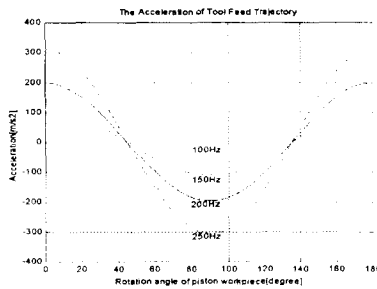


Fig. 5 The acceleration of tool feed trajectory , a_e (ovality= $\varnothing 0.5\text{mm}$)

한편, 식 (5)에서 타원량이 $\varnothing 0.5\text{mm}$ 로 일정한 경우 장축 a 의 변화에 따른 이송 궤적 e 의 변화를 $a = 50\text{mm}$ 일 때의 이송궤적을 기준으로 하여 도시하면 Fig. 6과 같다.

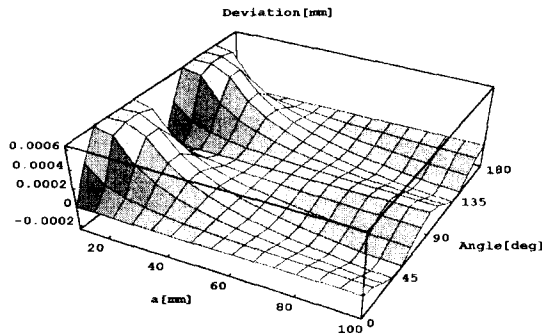


Fig. 6 The variation of tool feed trajectory with respect to piston diameter

이상으로부터 피스톤 타원량과 C 축의 회전수

가 일정할 때, 가공 피스톤의 직경 변화에 따른 이송 궤적 e 의 변화는 $0.8\mu\text{m}$ 정도로 미소하다고 할 수 있다. Table 1에는 이송주파수에 대하여 요구되는 최대속도 및 가속도를 정리한 것으로 주축회전수 7500rpm(250Hz)을 목표로 할 때 32G 이상의 가속도가 요구됨을 알 수 있다.

Table. 1 The maximum velocity and acceleration of tool feed trajectory (ovality= $\varnothing 0.5\text{mm}$)

Feed frequency[Hz]	100	150	200	250
Velocity[m/s]	0.0785	0.1178	0.1571	0.1963
Acceleration[m/s ²]	49.72	111.87	198.88	310.75

3. 공구이송장치의 설계 및 구성

리니어모터의 구동에 의한 고속 공구이송장치는 절삭저항, 기계구조의 강성, 적절한 모터의 선택, 서보계의 강성 및 추종 성능, 위치검출 센서의 성능 등에 의해 좌우된다. Fig. 7은 공구이송장치를 나타낸다.

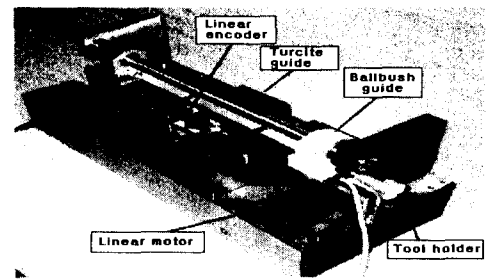


Fig. 7 The overall shape of cutting tool feed system

3.1 기계 구조 및 가이드의 선정

고속위치결정장치의 기계 구조 및 가이드는 낮은 관성, 높은 강성, 내마모성을 고려해야 하고, 또한 구동기에 대해서는 가공 정밀도를 위한 위치 정밀도, 고속 가공을 위한 높은 속도성, 절삭력에 충분히 견디는 추력 특성이 보장되어야 한다. 일반적으로 리니어 모터 시스템의 서보 제어계가 100Hz 이상의 높은 폐루프(Closed loop) 대

역폭을 가지기 위해서는 기계 구조물 진동 대역폭이 500Hz 이상이 되어야 하며, 고속 구동을 위해서는 이동 무게의 최소화가 중요하다. 따라서 리니어 모터는 영구자석을 고정자로 하고 코일이 이동하도록 설치함으로써 구동기의 이동무게를 1.65kg으로 설계하였다. 가이드는 이송축 양단에 볼부쉬 축을 고정하고 두 개의 블록에 모터 코일을 고정하였으며, 회전력을 방지하기 위해 측면에 타카이드를 부착후 면접축 슬라이드를 설치하여 저마찰력에 의한 원활한 운동을 꾀하였다.

3.2 구동모터 및 엔코더 선정

리니어 모터는 구동원리에 따라 LIM(리니어 유도모터), LPM(리니어 펄스모터), LSM(리니어 동기모터), 브러시리스방식의 LDM(리니어 직류모터) 등으로 나눌 수 있다. 이 중에서 리니어 직류모터는 구동길이가 제한되어 있는 단점이 있지만, 질량대비 추력특성이 좋고, 서보화가 용이하여 미소 변위 고속공구이송장치에 적합하다. 리니어 직류모터 중에서도 영구자석을 고정자로 한 코일 가동형 브러시리스 직류모터는 홀센서나 절대치형 리니어 엔코더를 이용한 복잡한 정류작용이 필요하고 가공침이 영구자석에 달라붙을 수 있는 단점이 있지만, 종래의 리니어 모터에 비해 질량대비 추력특성이 뛰어나고 코일의 열발생이 적고 미소위치 결정에 매우 좋은 특성을 가지고 있다. Fig. 8은 일반적인 3상 브러시리스 코일 가동형 리니어 직류모터의 구동 원리를 나타낸다. 그림에서 보듯이 가동코일에 흐르는 전류의 방향을 순차적으로 제어함으로써 위치제어를 하게 된다.

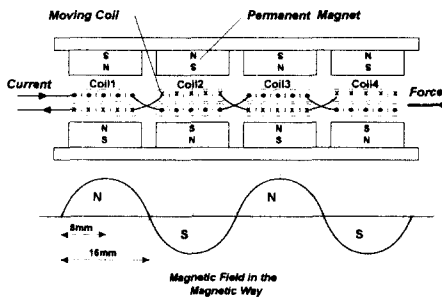


Fig. 8 The principle of linear brushless DC motor

Table 2 The specification of motor

Specification	Unit	Value
Peak force (Fp)	N	1600
Continuous force (Fc)	N	500
Peak power dissipation (Pp)	W	4490
Continuous power dissipation (Pc)	W	440
Motor constant (Km)	N/\sqrt{W}	23.9
Electrical time constant (Te)	ms	0.957
Thermal resistance (Rth)	K/W	0.389
Moving coil mass (Mc)	kg	0.55
Back EMF constant (Kb)	V · s/m	73.2
Coil resistance (R)	Ω	9.4
Maximum coil current (Ip)	A	22.2

모터의 선정은 고속 가공과 절삭력, 코일의 온도 상승 등을 고려하여 추력 정수, 최고 추력, 이동 코일의 무게, 부하하중으로의 열저항 등을 고려하여 선택하였고, 그 사양은 Table 2와 같다. 리니어엔코더는 고속 운전과 위치 정밀도를 고려하여 개방형의 광학식 증분형 리니어 엔코더를 사용하였다. Table 3은 엔코더의 사양을 보여주고 있다.

Table 3 The specification of linear encoder

Grating period	40 μm
Accuracy	$\pm 3 \mu\text{m}$
Maximum speed	480 m/min(=8 m/s)
Maximum acceleration	250 m/s^2 (=25 G)
Output signals	1 Vpp sinusoidal A-quadr-B / 40 μm

3.3 서보계의 구성

시스템의 정밀도를 높이고 고속화를 위하여 디지털 서보앰프와 디지털 제어를 사용하였다. 디지털 서보앰프는 전류 제어를 위해 PI 제어를 사용하며 샘플링 주파수가 높을수록 전류의 리플 현상이 줄고, 그에 따라 모터의 발열이 방지되므로 샘플링 주파수를 24kHz(41.67 μs)로 설정하였다. 디지털 제어기는 기본적으로 PID 제어기법을 사용하며 최대 6kHz(166 μs)의 샘플링 주파수를 가진다. Fig. 9는 제어시스템의 개략이다.

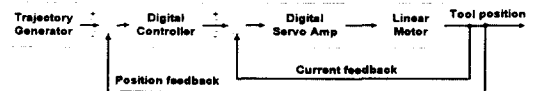


Fig. 9 The servo system of tool feed system

피스톤 타원 형상 가공을 위해서는 리니어 모터의 위치 제어뿐만 아니라 위상 오차를 최소화하는 것이 중요하다. 시스템의 안정성을 유지하면서 고속, 고정밀도의 위치결정과 위상오차를 보상해 주기 위해 다음과 같은 PID 제어를 사용하였다.

$$D(z) = Kp + Kd \frac{(z-1)}{z \cdot ts} + Ki \frac{z \cdot ts}{z-1} \quad (9)$$

따라서, 전체 시스템의 폐루프 전달함수 $G(z)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G(z) = \frac{D(z) Gp(z)}{1 + D(z) Gp(z)} \quad (10)$$

서보앰프 모터 전달함수 $Gp(z)$ 는 제2형 시스템이므로 기준입력에 대한 정상상태 오차는 어느 정도 만족된다고 할 수 있다. 고주파수 입력에 대해서 공구 이송 위치오차와 위상오차를 줄이기 위해서는 폐루프 전달함수 $G(z)$ 의 주파수 대역폭을 넓힐 필요가 있다. 그러나 여기에 시스템의 안정성이 고려되어야 하므로 시스템의 성능과 안정성 사이에 적절한 보상이 필요하다. 따라서, 시뮬레이션을 통하여 가장 응답특성이 좋은 $Kp = 5.6499 \times 10^4$, $Kd = 178.1984$, $Ki = 1.0314 \times 10^{-6}$ 를 취했다.

4. 결과 및 고찰

시스템의 모델링 및 제어를 설계하여 피스톤 가공시 발생하는 절삭력에 의한 외란을 무시하고

$\varnothing 0.5\text{mm}$ 타원 형상 궤적의 추종성을 시뮬레이션을 통하여 검토한 바 있다. 그 결과 50Hz, 70Hz, 100Hz까지는 비교적 양호하였으나 150Hz에서는 위상 오차가 실제 가공형상에 영향을 미칠 정도로 심하게 나타났다. 그러나 이 결과는 시뮬레이션을 통한 결과이므로 실제 공구이송장치의 추종성능을 실험하게 되었다. 또한 자동차용 피스톤의 타원량은 보통 0.1~1mm이고 공구이송장치는 타원량에 따라 추종성능이 달라지기 때문에 각각의 타원량에 따른 추종능력의 한계를 실험하였다. 실험의 한계는 입력치의 형상대비 위상차 1°와 각 위치에서 0.015mm의 오차로 하였고, 타원량을 각각 $\varnothing 0.1, \varnothing 0.5, \varnothing 1\text{mm}$ 로 하여 실험한 결과 추종능력의 한계는 $\varnothing 0.1\text{mm}$ 에서 180Hz, $\varnothing 1\text{mm}$ 에서 60Hz까지 가능함을 알 수 있

었다. Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12는 각각 타원량 $\varnothing 0.1, \varnothing 0.5, \varnothing 1\text{mm}$ 의 결과이고, Fig. 13은 타원량에 따른 공구이송장치의 추종범위를 나타낸다.

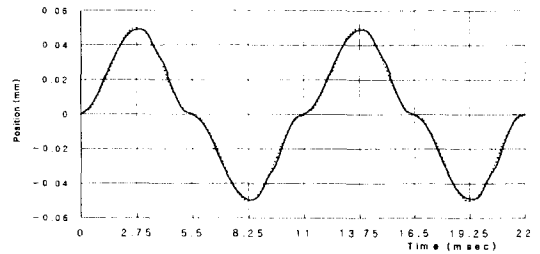


Fig. 10 Measuring result of ovality trajectory($\varnothing 0.1$ mm - 180 Hz)

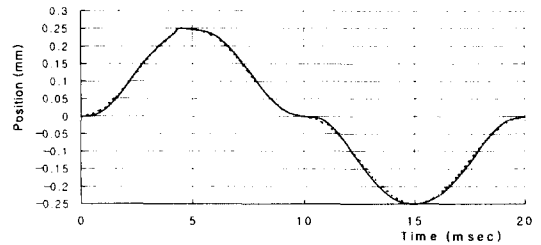


Fig. 11 Measuring result of ovality trajectory($\varnothing 0.5$ mm - 100 Hz)

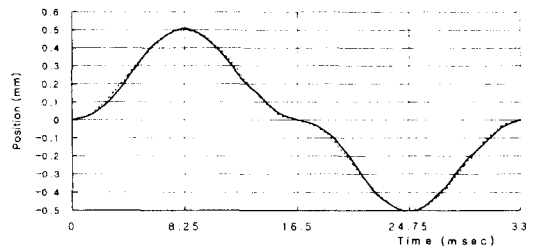


Fig. 12 Measuring result of ovality trajectory($\varnothing 1$ mm - 60 Hz)

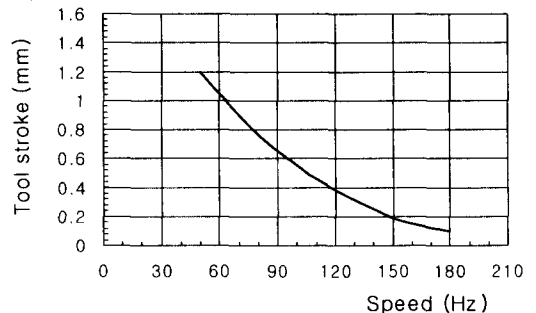


Fig. 13 Tool stroke vs. Response

5. 결 론

본 연구에서는 자동차 엔진에 쓰이는 피스톤의 형상 가공을 위하여 피스톤 가공 케적을 고려한 고속 고정밀 공구 이송 장치를 설계하여 그 응답성을 평가하였다. 디지털 PID 제어기를 이용한 시뮬레이션을 통해 $\varnothing 0.5\text{mm}$ 의 타원형상을 약 100Hz 정도까지 위치오차와 위상오차가 거의 없는 응답을 얻었으며, 입력 데이터와 실제 공구의 거동으로 실험하여 $\varnothing 0.1\text{mm}$ -180Hz, $\varnothing 0.5\text{mm}$ -100Hz, $\varnothing 1\text{mm}$ -60Hz로 종래 피스톤가공기의 생산성보다 향상됨을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. Toshiro Higuchi, Tomomi Yamaguchi and Minoru Tanaka, "Development of a High Speed Non-circular Machining NC-lathe for Cutting a Piston-head of a Reciprocating Engine by use of a New Servomechanism Actuated by Electromagnetic Attractive Force", J. JSPE, Vol. 62, No3, pp. 453-457, 1996.
2. Minoru Tanaka, "Development of High Speed CNC Machine for piston O.D.finish", 内燃機關, Vol. 29, No. 12, pp. 72-80,
3. Bartos, F. J., "Linear Motors and Control take a "direct" route to top performance", Control Engineering, Vol. 44, No. 4, pp. 90-2, 94, 96, 98, 100
4. ETEL S.A "DSA2-PL User's Manual", Ver A, 1997
5. Trilog Systems Corp., "Linear Motors for Precision Motion Control",
6. HIEDENHI, Leaner Encoder Technical books & Catalogue, Ver 1997.
7. 서준호, 민승환, 김성식, 이선규, "리니어 모터를 이용한 고속 비진원 가공용 공구이송장치의 특성연구", 한국정밀공학회 추계논문집, pp. 985-990, 1997.