

비진원 가공용 공구 이송장치의 고속화 성능에 관한 연구

김 성 식*, 김 경 석**, 이 대 현***

A Study on the High Speed of Cutting Tool Feed System for the Noncircular Machining

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

Abstract

With the advance of processing technology, so as to spare fuel, piston heads used in automobile reciprocating engine have complex 3-dimension, with respect to shape such as ovality, profile, eccentricity, offset, recess. Therefore, coming out of the existing process work used master cam, the process work is performed using a CNC lathe. For a precision processing, the processing work is need to make study of high speed feed gear synchronized with the rotative speed of main spindle. And then the high speed feeding system must maintain high dynamic stiffness, high speed and high positioning accuracy. In this paper, in order to achieve high speed cutting tool feeding. The linear brushless DC motor is used for satisfying this process work. The ball bush and turcite is used as the guidance of the feed gear system. Also linear encoders, digital servo amplifiers and controllers are used for controlling driving motor. This paper presents the design and simulation of the new tool feed system for noncircular machining.

Keyword : Noncircular Machining(비원형 가공기), Cutting Tool Feed System(공구이송장치), Piston Head(피스톤헤드), Ovality(타원), Linear Brushless DC Motor(선형 무 브러시 직류모터), Ball Bush(볼 부시)

* 화천기술개발연구소

** 조선대학교

*** 조선대학교 기계설계

1. 서론

자동차용 피스톤은 3차원의 복잡한 형상¹⁾(Ovality, Profile)들로 설계되고, 수많은 시험을 통한 개선으로 형상이 계속적으로 변화됨에 따라 종래의 모방모델을 사용한 모방절삭 방식에서 탈피하여 CNC 선반에 의한 프로그램 절삭을 행하게 되었다. 따라서 품질은 물론 생산성 향상이 가능해졌다. 이 생산성은 주축인 C 축의 회전에 동기한 절삭 공구축의 고속 이송 및 고속 위치결정을 행하는 제어기구의 개발에 의존하며, 위치결정기구는 고속 응답성과 절삭력에 견딜 수 있는 충분한 힘을 필요로 한다. 고속위치결정장치의 구동방식²⁾⁻⁷⁾은 1987년 일본 Izumi Industries, Ltd.에서 Minoru Tanaka에 의해 개발된 전자흡인력 방식 외에 전기유압서보 방식, 서보모터와 볼나사 방식, 압전액츄에이터 방식 등이 연구되었다. 전자흡인력 방식은 변위가 작고 비선형성이며, 전기유압서보 방식은 장치가 대형이고 저응답성으로 속도에 한계가 있다. 또한 서보 모터와 볼나사 방식 역시 저 응답성이고 볼나사의 나사부와 너트부의 마멸로 백래쉬가 있으며, 압전액츄에이터 방식은 고정도·고응답성을 가지나 저출력인 단점이 있다. 이러한 단점들을 개선하여 성능을 향상시키기 위한 목적으로 많은 연구와 개발이 이루어지고 있으며 이 분야를 이끌어 가고 있으나 실용화 차원에서는 아직 100 Hz에 그치고 있다. 고속위치결정장치로서 또 하나는 리니어 모터(Linear motor)를 이용하여 구동시키는 방법이 있다. 리니어 모터⁸⁾⁻¹¹⁾는 1841년 영국의 교통시스템에 실용화 된 이래 최근 각종 자동차 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 액츄에이터와 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 논문에서는 피스톤 가공을 위한 현재까지의 고속위치결정장치의 단점들을 보완하면서 동시에 장치의 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 가공계획

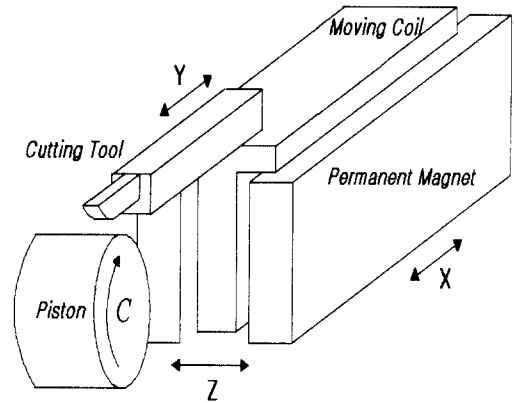


Fig. 1 Schematic diagram of piston turning machine

Fig. 1은 공구 이송축에 리니어 모터를 이용한 피스톤 가공기의 개략도를 나타내고 있다. 여기서, C 축은 피스톤을 회전시키는 주축이고, X 축은 피스톤의 크기에 따라 개략적인 공구의 위치결정을 행하고, Z 축은 C 축의 회전에 동기하여 길이방향의 절삭을 행하며, Y 축은 미소량만 큼 공구를 고속으로 이동시키면서 C 축의 회전에 동기하여 절삭을 행하는 축이다. 즉 C-Z 축의 동기제어로 Profile을 가공하고, C-Y 축의 동기제어로 단면방향의 형상인 Ovality를 가공하게 된다. 피스톤의 타원형상을 가공하기 위해서는 C-Z-Y 축의 동기제어가 중요하며, 특히, 주축 1회전당 Y 축이 2회 왕복 이송해야 한다. 따라서 C 축의 회전속도를 N (rpm), Y 축의 왕복주파수를 f_y (Hz) 라 하면 식 (1)과 같은 관계가 성립한다.

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

Fig. 2는 피스톤 횡단면의 타원형상을 보여주고 있다.

여기서 θ (rad)는 회전각도를 나타내고 a, b 는 각각 타원 형상의 장축과 단축을 나타낸다.

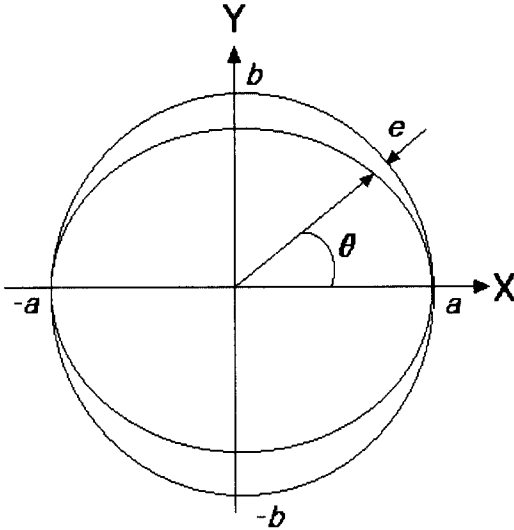


Fig. 2 The oval shape of piston

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 타원량 $\varnothing 2$ mm를 갖는 피스톤의 가공시 이송 장치의 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 C 축 회전각도에 대해서

도시하면 Fig. 3과 같다.

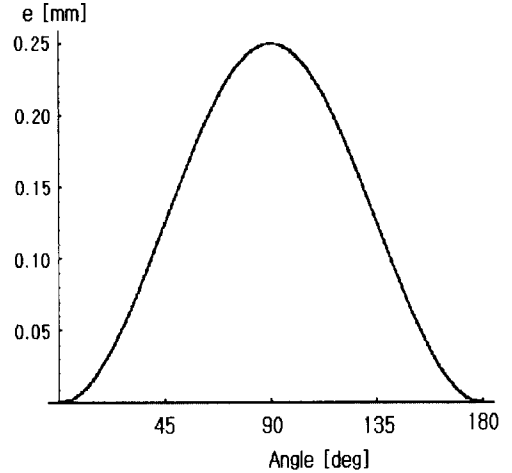


Fig. 3 The tool feed trajectory, e (Ovality $\varnothing 0.5$ mm)

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.

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

$$a_{e''} = \frac{ab(a^2 - b^2)\omega_c^2 [(a^2 - b^2)(\cos 4\omega_c t - 5) + 4(a^2 + b^2)\cos 2\omega_c t]}{8[(a \sin \omega_c t)^2 + (b \cos \omega_c t)^2]^{\frac{5}{2}}} \quad (8)$$

한편, 식 (5)에서 타원량이 $\varnothing 0.5$ mm로 일정한 경우 장축 a 의 변화에 따른 이송 궤적 e 의 변화를 $a = 50$ mm일 때의 이송궤적을 기준으로 하여 도시하면 Fig. 4와 같다.

이상으로부터 피스톤 타원량과 C 축의 회전수가 일정할 때, 가공 피스톤의 직경 변화에 따른 이송 궤적 e 의 변화는 거의 없다고 볼 수 있다.

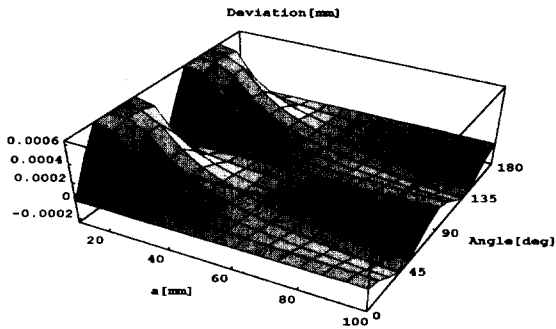


Fig. 4 The variation of tool feed trajectory with respect to piston diameter

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. 5는 공구이송장치를 나타낸다.

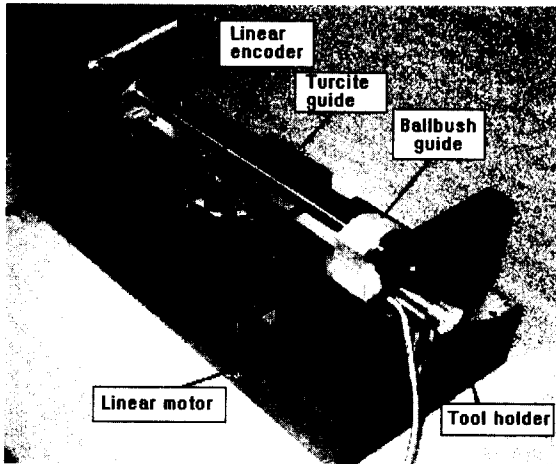


Fig. 5 The overall shape of cutting tool feed system

3.1 절삭저항

피스톤 가공의 생산성을 향상시키기 위해서는 공구이송 장치의 고속화가 필수이며 이 장치는 절삭저항¹²⁾을 충분히 이겨내도록 설계되지 않으면 안된다. 피스톤의 재질은

알루미늄 합금인 AC8A가 주류를 이루고 있으며 형상은 엔진의 종류에 따라 다르게 설계되지만, 피스톤의 외경 사상 가공은 어떤 형상이든지 동일한 깊이의 양으로 가공하기 때문에 일반 선반가공에서 나타나는 절삭 저항값과 같다. 따라서 본 연구에서는 선반의 터터면에 공구 동력계 KISTLER 9257A¹³⁾와 공구를 고정시키고, 주축 회전수를 변화시키며 최대의 주분력(F_z), 배분력(F_x), 이송분력(F_y)을 측정하였다. 가공조건은 $\varnothing 80$ mm의 AC8A 소재를 가공깊이 0.3 mm, 이송속도 0.3 mm/rev으로 하였으며, 측정결과는 Fig. 6과 같다.

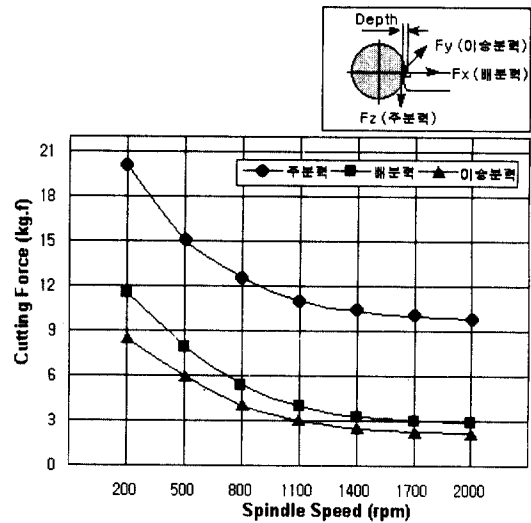


Fig. 6 Spindle Speed vs. Cutting Force

3.2 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 100 Hz 이상의 높은 폐루프(Closed loop) 대역폭을 가지기 위해서는 기계 구조물 진동 대역폭이 500 Hz 이상이 되어야 하며, 고속 구동을 위해서는 이동 무게의 최소화 중요하다. 따라서 리니어 모터는 영구자석을 고정자로 하고 코일이 이동하도록 설치함으로써 구동기의 이동무게를 1.65 kg으로 설계하였다. 가이드는 이송축 양단에 불부쉬 축을 고정하고 두 개의 블록에 모터 코일을

고정하였으며, 회전을 방지하기 위해 측면에 타카이드를 부착후 면접촉 슬라이드를 설치하여 저마찰력에 의한 원활한 운동을 꾀하였다.

3.3 구동모터 및 엔코더 선정

리니어 모터는 구동원리⁹⁾⁻¹¹⁾에 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 질량 대비 추력특성이 뛰어나고 코일의 열발생이 적고 미소위치 결정에 매우 좋은 특성을 가지고 있다. Fig. 7은 일반적인 3상 브러시리스 코일 가동형 리니어 직류모터의 구동 원리를 나타낸다. 그림에서 보듯이 가동코일에 흐르는 전류의 방향을 순차적으로 제어함으로써 위치제어를 하게 된다.

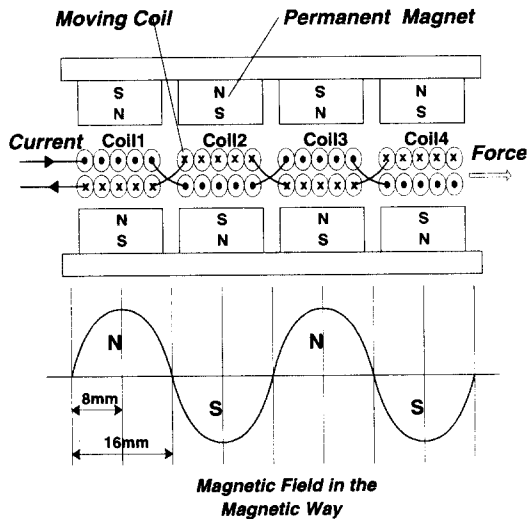


Fig. 7 The principle of linear brushless DC motor

모터의 선정^{14),15)}은 고속 가공과 절삭력, 코일의 온도

상승 등을 고려하여 추력 정수, 최고 추력, 이동 코일의 무게, 부하하중으로의 열저항 등을 고려하여 선택하였고, 그 사양은 Table 1과 같다.

Table 1 The specification of moto

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
Torque constant (Kt)	N/A	72
Back EMF constant (Kb)	$V \cdot s/m$	73.2
Coil resistance (R)	Ω	9.4
Coil inductance ((L)	mH	9
Maximum coil current (Ip)	A	22.2

리니어엔코더는 고속 운전과 위치 정밀도를 고려하여 개방형의 광학식 증분형 리니어 엔코더를 사용하였다. Table 2는 엔코더의 사양을 보여주고 있다.

Table 2 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-quad-B / 40 μm

3.4 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 24 kHz(41.67 μs)로 설정하였다. 디지털 제어기는 기본적으로 PID 제어기법을 사용하며 최대 6 kHz(166 μs)의 샘플링 주파수를 가진다. Fig. 8은 리니어 모터를 이용한 공구 이송장치의 위치결정 제어시스템을 보여주고 있다.

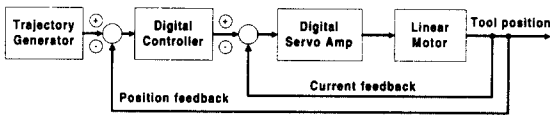


Fig. 8 The servo system of tool feed system

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.

$$D(z) = Kp + Kd \frac{(z-1)}{z \cdot ts} + Ki \frac{z \cdot ts}{z-1} \quad (11)$$

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

$$G(z) = \frac{D(z)Gp(z)}{1 + D(z)Gp(z)} \quad (12)$$

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

4.1 공구이송장치의 추종성능

시스템의 모델링 및 제어를 설계하여 피스톤 가공시 발생하는 절삭력에 의한 외란을 무시하고 Ø0.5 mm 타

원 형상 궤적의 추종성을 시뮬레이션을 통하여 검토한 바 있다.¹⁶⁾ 그 결과 50 Hz, 70 Hz, 100 Hz까지는 비교적 양호하였으나 150 Hz에서는 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 ~ 1 mm이고 공구이송장치는 타원량에 따라 추종능력이 달라지기 때문에 각각의 타원량에 따른 추종능력의 한계를 실험하였다. 실험의 한계는 입력치의 형상대비 각 위치에서 0.015 mm의 오차로 하였고, 타원량을 각각 Ø0.1, Ø0.3, Ø0.5, Ø0.8, Ø1 mm로 하여 실험한 결과 추종능력의 한계는 Ø0.1 mm에서 180 Hz, Ø1 mm에서 60 Hz까지 가능함을 알 수 있었다. Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11은 각각 타원량 Ø0.1, Ø0.5, Ø1 mm의 결과이고, Fig. 12는 타원량에 따른 공구이송장치의 추종범위를 나타낸다.

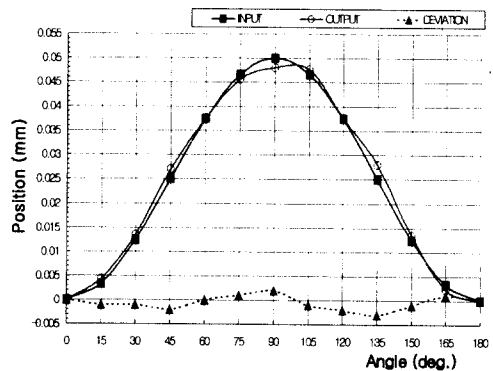


Fig. 9 Measuring result of ovality trajectory (Ø0.1 mm - 180 Hz)

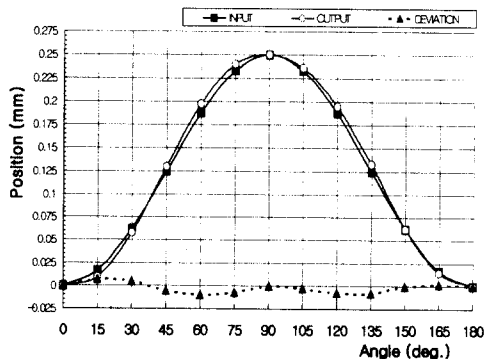


Fig. 10 Measuring result of ovality trajectory (Ø0.5 mm - 100 Hz)

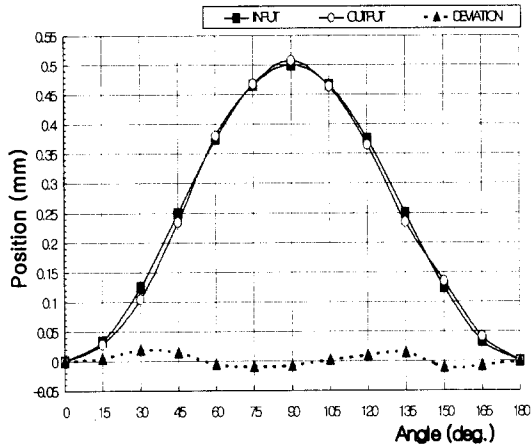


Fig. 11 Measuring result of ovality trajectory (Ø1 mm - 60 Hz)

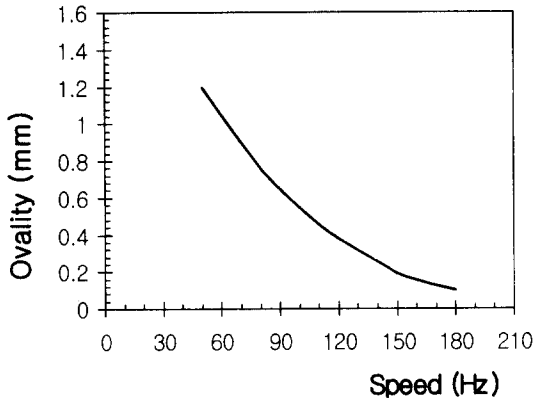


Fig. 12 Tool stroke vs. Response

4.2 모터의 열특성

모터의 고출력화 추세에 따라 그에 따른 모터의 열대책 문제는 현재 모터의 성능을 결정하는 가장 큰 요소로 작용하고 있다. 모터에서 외부로의 열전달은 주로 부하하중으로의 전도에 의해서 일어나고 그 외에 대류현상과 마그네트로의 복사에 의해서 일어난다. 모터의 완전한 열적 거동을 예측하는 것은 복잡하기 때문에 다음과 같은 가정에 의하여 코일의 온도를 간략하게 예측해 보았다.

- 1) 모터, 마그네트, 부하하중을 각각 하나의 집중 열원으로 본다.
- 2) 마그네트의 온도는 주위의 온도와 같고 일정하다.

3) 모터와 부하하중과의 열전달 계수를 열저항과 동일하게 본다.

이와 같은 단순한 가정에 의해서 모터 가동 직후 코일의 열적 거동을 시뮬레이션 하면 그 결과는 Fig. 13과 같다. 여기서 주위 온도는 25°C이며 선택된 모터의 코일의 한계온도가 160°C인 것을 고려하면 최고 200~250 Hz의 성능이 예상된다. 그러나 실제의 온도상승은 더 높게 되며 또한 코일의 최적 온도조건이 최고 100°C 정도인 점을 감안하면, 고속의 운전을 위해서는 코일의 냉각대책은 필수적이라 할 수 있다.

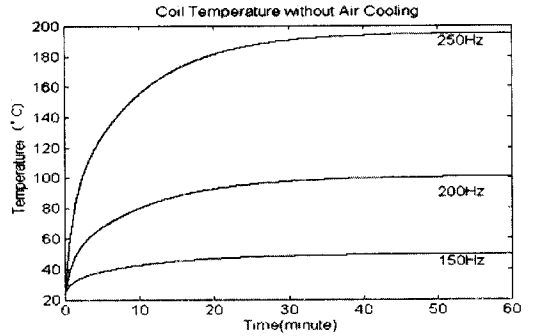


Fig. 13 The Transient behavior of coil temperature

만일 코일 주위로의 열전달 계수가 R_{th} 로 동일하다고 가정하면 정상상태에서의 모터의 추력⁽⁸⁾은 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{con} = K_m [(T_{coil} - T_{amb})/R_{th}]^{1/2} \quad (13)$$

여기서, F_{con} = 연속추력
 K_m = 추력정수
 T_{coil} = 코일의 온도
 T_{amb} = 주위온도를 나타낸다.

주어진 모터의 사양을 대입하고 각각 다른 주위 온도조건에 따른 모터 추력과 코일 온도와의 관계는 Fig. 14와 같다. Fig. 14에서 알 수 있듯이 모터의 추력은 코일과 주위의 온도상승에 밀접한 관계가 있으며 높은 추력 특성을 얻기 위해서는 강제 냉각을 이용하여 온도상승을 억제하는 것이 중요하다.

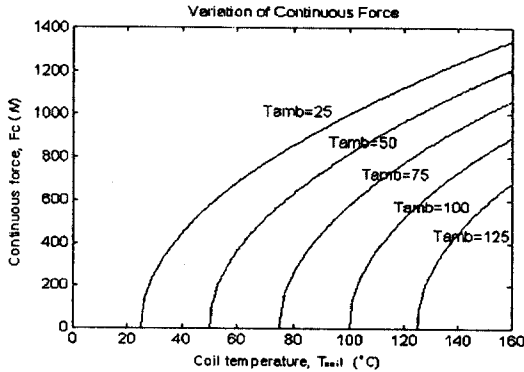


Fig. 14 Continuous force vs. coil temperature

5. 결론

본 논문에서는 자동차 엔진에 쓰이는 피스톤의 형상 가공을 위하여 피스톤 가공 레적을 고려한 고속 고정밀 공구 이송 장치의 설계와 그에 대한 서보특성, 열특성에 대한 연구를 수행하였다.

디지털 PID 제어를 이용한 시뮬레이션을 통해 $\varnothing 0.5$ mm의 타원형상을 약 100 Hz 정도까지 위치오차와 위상오차가 거의 없는 응답을 얻었으며, 입력 데이터와 실제 공구의 거동으로 실험하여 $\varnothing 0.1$ mm에서 180 Hz, $\varnothing 1$ mm에서 60 Hz의 추종성능을 확인하였다. 또한 간단한 시뮬레이션을 통해 공구의 이송 주파수에 따른 모터의 열적 거동을 예측하였으며, 온도 상승과 모터 성능 사이에 밀접한 관계가 있음을 확인하였다.

후 기

본 논문은 "한국과학재단지정 조선대 지역 협력 연구센터인 수송기계 부품 자동화 연구센터의 연구비 지원에 의해 연구되었습니다"

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. 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.
3. Minoru Tanaka, "Development of High Speed CNC Machine for piston O.D.finish", 內燃機關, Vol. 29, No. 12, pp. 72-80.
4. 김성식, "비진원가공용 CNC 선반 개발에 관한 연구", 조선대학교 석사논문, 1994.
5. 화천기공(주) 기술개발연구소, "CNC 피스톤가공기 HOT-1000과 가공용 프로그램 S/W HOTS", 기계자동화, Vol. 4, pp. 36-40, 1994.
6. 三宅秀彦, "CNC 피스톤 가공기 TPS-3000과 가공용 프로그램 데이터 작성 시스템", 기계기술, pp. 42-46, 1992.
7. 김경석, 김성식 외, "비진원 가공용 CNC 선반 개발에 관한 연구", 한국정밀공학회, Vol. 13, No. 4, pp. 152-162, 1996.
8. 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.
9. 조영준, 이강원, "고속정밀 리니어 직류모터 개발", 생산기술, 1995.7, pp. 48-53, 1995.
10. 최기영, "리니어 모터의 기술현황과 응용 I", 전기설비, 1991.9, pp. 76-91, 1991.
11. 海老原 大樹 외, "활발화하는 리니어모터, 액추에이터의 산업용 이용 외", 기계설계기술, 1996. 5, pp. 25-35, 63-71, 1996.
12. 현동훈, "선삭가공의 절삭저항과 절삭동력", 기계설계기술, Vol. 11, No. 5, pp. 121-130, 1996.
13. KISTLER 9257A Manual & Catalog
14. ETEL S.A "DSA2-PL User's Manual", Ver A, 1997.
15. Trilogy Systems Corp., "Linear Motors for Precision Motion Control",
16. 서준호, 민승환, 김성식, 이선규, "리니어 모터를 이용한 고속 비진원 가공용 공구이송장치의 특성연구", 한국정밀공학회 추계논문집, pp. 985-990, 1997.