

리니어 모터를 이용한 고속비진원 가공용 공구이송장치의 특성연구

The Characteristics of High-speed Noncircular Machining Tool Feed System using Linear Motor

서준호*,민승환(K-JIST.원), 김성식(화천기공(주)연구소),이선규(K-JIST)
 Joon-Ho Seo, Seung-Hwan Min (K-JIST),
 Sung-Sik Kim(Hwacheon Machine Tool CO. LTD.), Sun-kyu Lee(K-JIST)

ABSTRACT

Recently, the development of high speed and high precision NC-lathe for piston head machining is needed for the complexity and diversity of the piston head shape used in automobile reciprocating engine. The piston head has many complex shapes in the aspect of fuel economy, such as ovality, profile, double ovality and recess. Among them, for the machining of the oval shape of 0.1~1mm the cutting tool should move periodically synchronized with the rotation of piston workpiece. The cutting tool feed system must have high positioning accuracy for the precise machining, high speed for the fast machining and high dynamic stiffness for the cutting force. The linear brushless DC motor is used for satisfying these conditions. The ball bush guide and supporting guide using turcite is used for the guidance of the feed drive system. Linear encoder, digital servo amplifier and controller are used for driving the motor. This paper presents the design and simulation of the new tool feed system for noncircular machining.

Keywords : noncircular machining, cutting tool feed system, piston head, ovality, linear brushless dc motor

1. 서론

최근 자동차엔진의 고성능화, 차종의 다양화 추세에 따라 엔진 피스톤의 절삭가공에 대해서도 고능률, 변종변량 생산방식의 요구가 높아지고 있다. 자동차 엔진의 피스톤은 리브(rib)나 핀홀(pin hole) 등의 복잡한 형상 때문에 엔진을 워밍업후 열적, 기계적인 변형을 고려하여 그 형상이 진원이 되도록 하기 위해서 단면 형상을 타원에 가깝게 가공하고(ovality), 마찰력의 감소와 연소효율의 극대화를 위하여 축방향으로 반경이 변화하는 형상(profile)으로 가공된다[2,3,4,5]. Fig1.은 피스톤 형상의 예를 보여 주고있다.

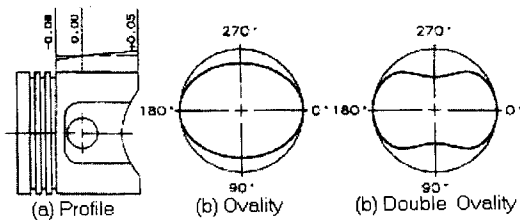


Fig.1 The shape of piston

이러한 자동차 엔진의 피스톤은 종래에는 마스터 피스톤(master piston)을 사용한 모방절삭이 사용되었다. 최근 완성차 메이커의 차종 다양화와 신 모델 개발기간의 단축에 대응한 마스터 모델 제작에 큰 어려움을 겪고 있어서 새로운 방식의 가공기가 요구되었다.

이를 위해 마스터 피스톤 대신 고속, 고정도의 공구이송

장치를 이용하여 피스톤 형상을 가공하는 방법이 등장하게 되었다. 이 방식은 공구이송장치가 스핀들의 고속회전 속도에 동기화하여 공구의 이송깊이를 수백 Hz의 이송주기로 구동시키면서 타원에 가까운 피스톤 형상을 절삭가공하는 방식으로서 이를 실현하기 위해서는 고속, 고정도, 고강성의 구동기와 제어기술이 절대적으로 필요하게 되었다. 이러한 고속이송장치를 설계하기 위해서는 1)낮은 관성 2)높은 강성 3)내마모성 4)낮은 열팽창 등의 요소가 고려되어야 하며[4] 특히 구동기에 대해서는 1)가공정밀도를 위한 위치정밀도 2)고속가공을 위한 높은 속도성 3)절삭력에 대비한 높은 추력 특성이 보장되어야 한다. 현재까지 국내,국외에서 개발되어온 고속공구이송장치의 종류를 살펴보면 Table.1 과 같다.[1,2,3,4,5]

Table.1 Type of tool feed device

구동방식	특징
유압서보방식	고출력
서보모터+볼스크류	고강성,실용성
VCM+PZT	고출력,고응답성
전자흡인력방식	고출력,고응답성

여기서 유압서보방식은 장치가 대형이고 저응답성이며, 서보모터+볼스크류방식 역시 저응답성이고 볼스크류의 마모와 운동전달부의 백래쉬가 존재하며, VCM(Voice Coil Motor)방식은 고정도,고응답성을 가지나 저출력인 단점이 있다. 또한 전자흡인력 방식은 변위가 작고 비선형성을 가지는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 이런 단점들을 보완하면서도 고성능의 위치결정장치를 구현하기

위하여 리니어 브러시리스 직류모터(Linear Brushless DC Motor)를 사용한 고속 공구이송장치에 대하여 그 설계와 응답특성을 검토한 결과에 대해서 보고한다.

2. 모터개요 및 피스톤가공 কে적

2.1 리니어 브러시리스 직류모터의 특성

리니어 모터는 구동원리에[7,8] 따라 1)리니어 유도모터 2)리니어 직류모터 3)리니어 동기모터 4)리니어 펄스모터 등으로 나눌 수 있다. 이중에서 리니어 직류모터는 구동 길이가 제한되어 있는 단점이 있지만 질량 대비 추력 특성이 좋고, 서보화가 용이하므로 미소변위 고속공구이송 장치에 적합하다. 리니어 직류모터 중에서도 영구자석을 고정자로 한 코일가동형 브러시리스 직류모터는 종래의 여느 다른 리니어 직류모터 보다 질량 대비 추력특성이 뛰어나고 코일의 열발생이 적고 미소위치 결정에 매우 좋은 특성을 가지고 있다. 그러나 홀센서나 절대치형 리니어 엔코더를 이용한 복잡한 정류작용이 필요하고 가공 칩이 영구자석에 달라붙을 수 있는 단점이 있다. Fig.2 은 일반적인 3상 브러시리스 코일 가동형 리니어 직류 모터의 구동원리를 나타낸다. 그럼에서 보듯이 가동코일에 흐르는 전류의 방향을 순차적으로 제어함으로써 위치 제어를 하게 된다.

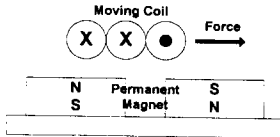


Fig.2 The principle of linear brushless dc motor

2.2 피스톤 가공 কে적

Fig.3 은 리니어 모터를 이용한 피스톤 가공기의 개략도를 나타내고 있다. 여기서 x는 공구이송장치의 이동축, z는 가공피스톤 공작물의 이송축이며 c는 공작물의 주축 회전축이다.

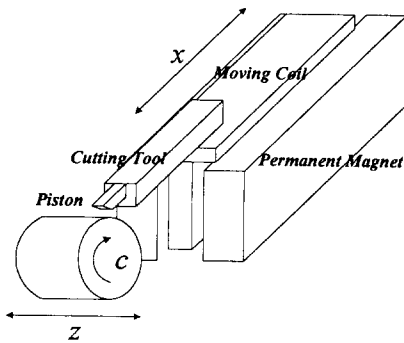


Fig.3 Schematic diagram of piston turning machine

피스톤의 타원형상을 가공하기 위해서는 x, z, c 축의 동기 제어가 중요하며 특히 주축 1회전당 x 축이 2회 왕복 이송 해야 한다. 따라서 c 축의 회전속도를 N[rpm], x 축의

왕복주파수를 fx[Hz]라 하면 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$N = 30f_x \text{ [rpm]} \quad (1)$$

Fig. 4 는 피스톤 횡단면의 타원형상을 보여주고 있다. 여기서 θ [rad] 회전각도를 나타내고 a,b는 각각 타원형상의 장경, 단경을 나타낸다.

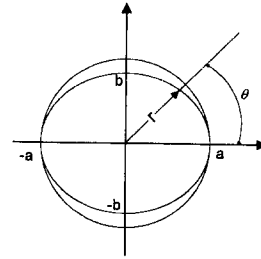


Fig.4 The oval shape of pistotn

직교좌표상에서의 타원의 공식은 다음과 같다.

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

식(2)를 극좌표상에서 표시하면 다음과 같다.

$$x = r \cos \theta, y = r \sin \theta \quad (3)$$

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

따라서 타원량 $\phi 2(a-b)$ 을 가지는 피스톤 가공시 이송 장치의 이송거리 e는 다음과 같다.

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

장경 a=50mm, 단경 b=49.75mm 인 타원량 $\phi 0.5$ mm 에 대한 공구의 이송 কে적 e를 c 축 회전 각도에 대해서 도시 하면 Fig.5 와 같다.

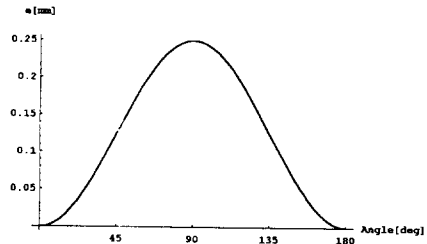


Fig.5 The tool feed trajectory, e

e를 시간 t에 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 e의 속도, 가속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

한편 식(5)에서 타원량 ϕ 0.5mm로 일정한 경우 장경 a의 변화에 따른 이송 궤적 e의 변화를 a=50mm일 때의 이송 궤적을 기준으로 하여 도시하면 Fig.6 과 같다.

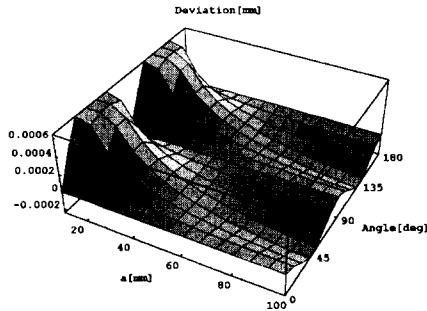


Fig.6 The variation of tool feed trajectory with respect to piston diameter

따라서 피스톤 타원량과 주축 c의 회전 수가 일정할 때 가공 피스톤의 직경 변화에 따른 이송 궤적 e의 변화는 거의 없다고 볼 수 있다.

3. 공구이송장치의 설계 및 구성

리니어 모터 시스템의 성능은 적절한 모터의 선택, 기계 구조의 고 강성화, 서보계의 강성 및 추종 성능, 위치 검출 센서의 성능 등에 의해 좌우된다. Fig.7은 리니어 모터를 이용한 공구이송장치의 개략도를 보여주고 있다.

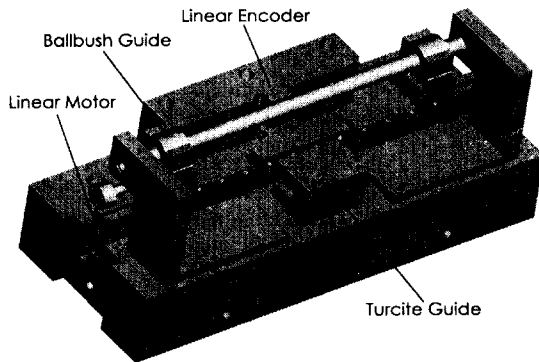


Fig.7 The overall shape of cutting tool feed system

3.1 기계 구조 및 가이드의 선정

기계 구조의 설계 및 모터를 결정하기 위하여 피스톤 소재의 절삭 저항을 측정하였다. 일반적으로 피스톤의 재질은 AL 합금 계열이지만 요즘은 주철 피스톤 재의 수요도 증가하고 있으므로 ϕ 100mm인 연속가공소재에 대해

0.3mm/rev의 이송 속도로 이송 시키면서 각기 다른 절삭 깊이에 대해서 삼분력을 측정된 결과, 최대의 주분력, 배분력, 이송 분력을 각각 AL 합금의 경우 200N, 20N, 10N, 주철의 경우 340N, 200N, 90N으로 설정하였다.

일반적으로 리니어 모터 시스템의 서보 제어계가 100Hz 이상의 높은 페루프 대역폭을 가지기 위해서는 기계 구조물 진동 대역폭이 500Hz 이상이 되어야 하며 고속 구동을 위해서는 이동 무게의 최소화가 중요하다. 설계된 이동 가이드의 무게는 모터 코일을 합하여 1.65Kg으로 설정하였다.

가이드는 이송축 양측에 불부쉬가이드를 사용하였으며 회전력을 방지하기 위해 측면에 타카이드면을 이용한 지지 가이드를 설치하여 저 마찰력에 의한 원활한 운동을 꾀하였다.

3.2 리니어 모터의 선정

모터는 고속 가공과 절삭력, 코일의 온도상승 등을 고려하여 추력정수, 최고추력, 이동코일의 무게, 부하 하중으로의 열저항 등을 고려하여 선택하였다. 선택된 모터의 사양은 Table.2와 같다.

Table.2 The Spec. of motor

모터사양	단 위	값
최고추력(Fp)	N	1600
연속추력(Fc)	N	500
최고출력(Pp)	W	4490
연속출력(Pc)	W	440
모터정수(Km)	N/√W	23.9
전기적시정수(Te)	ms	0.957
열저항(Rth)	K/W	0.389
이동코일무게(Mc)	Kg	0.55
추력정수(Kt)	N/A	72
역기전력상수(Kb)	V·s/m	73.2
코일저항(R)	Ω	9.4
코일인덕턴스(L)	mH	9
코일최대전류(Ip)	A	22.2

3.3 리니어 엔코더의 선정

리니어 엔코더는 고속운전과 위치정밀도를 고려하여 개방형의 광학식 증분형 리니어 엔코더를 사용하였다. Table.3은 엔코더의 사양을 보여주고 있다.

Table.3 The spec. of linear encoder

눈금간격	40μm
정확도	±3μm
최대허용속도	480m/min (=8m/s)
최대허용가속도	250m/s ² (=25G)
출력신호/신호주기	1Vpp sinusoidal A-quadr-B / 40μm

3.4 서보계의 구성

고정밀화와 고속화를 위하여 디지털 서보앰프와 디지털 제어를 사용한다. 디지털 서보앰프는 전류 제어를 위해 PI 제어를 사용하며 전류의 리플 현상과 그에 따른 모터의 발열을 충분히 방지하도록 샘플링 주파수가

24KHz (41.67 μ s)로 설정되었다. 디지털 제어기는 기본적으로 PID 제어기법을 사용하며 최대 6KHz (166 μ s)의 샘플링 주파수를 가진다.

4. 시스템 모델링 및 제어기 설계

Fig.8은 리니어 모터를 이용한 공구 이송 장치의 위치 결정 제어 시스템을 보여주고 있다. 피스톤 타원형 가공을 위해서는 리니어 모터의 위치 제어 뿐만 아니라 위상오차를 최소화 하는 것이 중요하다. 이를 위해 디지털 PID 제어기를 사용하여 이송장치의 위치결정 성능과 위상오차보상 성능을 고찰해 보도록 하였다.

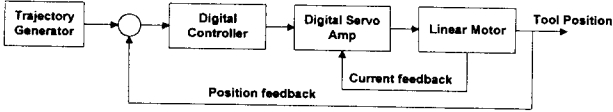


Fig.8 The servo system of tool feed system

4.1 시스템의 모델링

Fig.9는 외부 부하가 없을 경우의 디지털 서보앰프와 리니어 모터의 블록선도를 보여주고 있다. 여기서 t_s 는 샘플링 주기, M 은 이동부 질량, B 는 가이드의 점성감쇠 계수, K_{ip} 는 전류 제어기의 비례제어이득상수, K_{ii} 는 적분 제어이득상수를 나타낸다.

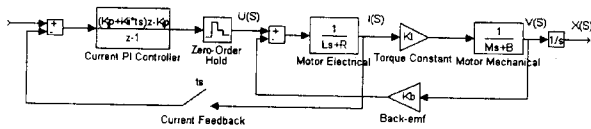


Fig.9 The block diagram of servo amp and motor

여기서 모터의 상태공간 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B}{M} & \frac{K_t}{M} \\ 0 & -\frac{K_b}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} u \quad (9)$$

여기서 $x_1=x(t)$, $x_2=v(t)$, $x_3=i(t)$, u 는 모터의 인가전압을 나타낸다. 볼부쉬의 마찰계수가 0.001로 매우 작고 이동부의 무게가 1.65Kg이므로 볼부쉬에 의한 마찰력은 모터의 구동력에 비해 무시할 수 있다. 또한 타카이드면에는 외부 부하가 없을시 하중이 거의 걸리지 않는다고 가정하면 쿨롱마찰력은 거의 무시할 수 있다. 점성감쇠계수를 $B=0$ 로 보고 식(9)에 영차변환을 포함하여 Z 변환을 수행하면 서보앰프의 입력과 모터출력과의 이산시간 전달함수 $G_p(z)$ 는 다음과 같다.

$$G_p(z) = \frac{K(z^3 + 2.8439z^2 - 2.8626z - 0.9049)}{z^4 - 2.1412z^3 + 0.4552z^2 + 1.5136z - 0.8274} \quad (10)$$

여기서 $K=3.54 \times 10^{-7}$ 이다. 전류제어기의 이득은 $G_p(z)$ 의 극점이 모두 단위원 내부에 존재하고 위상오차를 최대한 줄일 수 있도록 $K_{ip}=100$, $K_{ii}=8000$ 으로 정하였으며 샘플링 주기 t_s 는 166 μ s로 하였다. Fig.10은 $G_p(z)$ 의 페루프 주파수 응답을 보여 주고 있다. 시스템의 샘플링 주기가 충분히 작으므로 실제의 응답과 거의 유사하다고 할 수 있다. Fig.10에서 알 수 있듯이 주파수 5~6 rad/s (0.8Hz) 사이에서 급격한 위상오차와 이득오차를 보여주고 있다.

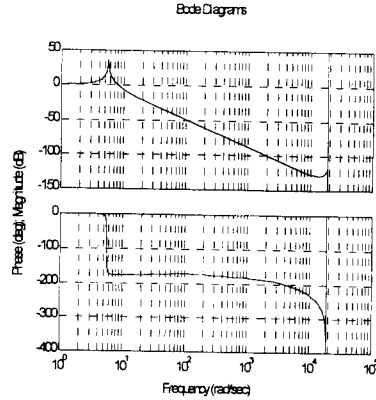


Fig.10 The closed loop frequency response of $G_p(z)$

4.2 제어기의 설계

시스템의 안정성을 유지하면서 고속 고정밀의 위치 결정과 위상오차를 보상해 주기 위해 다음과 같은 PID 제어기를 사용한다.

$$D(z) = K_p + K_d \frac{(z-1)}{z \cdot t_s} + K_i \frac{z-t_s}{z-1} \quad (11)$$

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

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

서보앰프와 모터의 전달함수 $G_p(z)$ 는 제 2형 시스템이므로 기준입력에 대한 정상상태 오차는 어느 정도 만족된다고 할 수 있다. 고주파수 입력에 대해서 공구이송의 위치오차와 위상오차를 줄이기 위해서는 페루프 전달함수 $G(z)$ 의 주파수 대역폭을 넓힐 필요가 있다. 그러나 여기에 시스템의 안정성이 고려되어야 하므로 시스템의 성능과 안정성 사이에 적절한 보상이 필요하다. 여러번의 시뮬레이션 결과 $K_p=5.6499 \times 10^4$, $K_d=178.1984$, $K_i=1.0314 \times 10^{-6}$ 일 때 가장 좋은 응답 특성을 보였다.

Fig.11은 보상된 시스템 $G(z)$ 의 주파수 응답 특성을 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 제어기의 보상에 의해서 주파수 대역이 늘어났으며 위상오차도 1000 rad/s (159Hz)의 구동주파수까지는 미소한것으로 나타났다. 1000 rad/s (159Hz) 이상에서는 위상오차가 대략 5° 정도를 넘어서면서 가공정도에 영향을 미칠 것으로 분석된다.

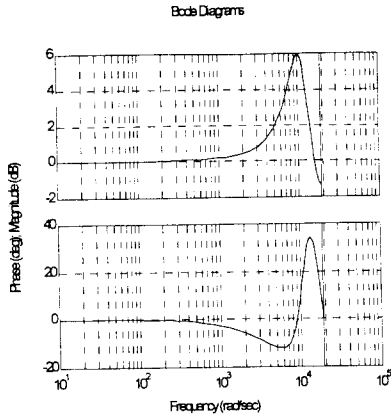


Fig.11 The closed loop frequency response of $G(z)$

5. 결 과

5.1 공구이송장치의 타원궤적 추종성능

설계된 제어기에 의해 보강된 시스템의 타원궤적 추종 성능을 시뮬레이션을 통해 고찰해 보았다. 피스톤 절삭력에 의한 외란은 고려하지 않았으며 $\varnothing 0.5\text{mm}$ 의 동일한 타원형상 가공궤적을 50Hz, 70Hz, 100Hz, 150Hz의 공구이송 속 구동주파수로 이송시키도록 하였다. Fig.12에 그 결과가 극좌표상에 도시 되어있다. 여기서 A는 타원형상의 기준입력이고 B는 그에 대한 시스템의 응답을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 150Hz 이상의 고속구동에 대해서는 위상오차가 가공형상에 영향을 미칠 정도로 심하게 나타나는 것을 알 수 있다.

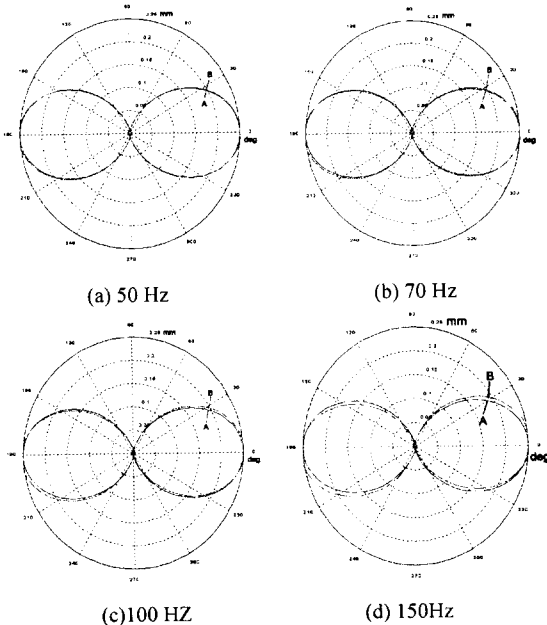


Fig.12 Simulation result of ovality trajectory

설계된 제어기에 대해서 시뮬레이션 결과에 의하면 약 100Hz까지는 위상오차가 거의 없는 고속 고정밀 응답을 얻을 수가 있다.

5.2 모터의 열특성

모터의 출력력화 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 열적거동을 예측하는 것은 복잡하기 때문에 다음과 같은 가정에 의하여 코일의 온도를 간략하게 예측해 보았다.

- 1) 모터, 마그네트, 부하하중을 각각 하나의 집중열원으로 본다.
- 2) 마그네트의 온도는 주위온도와 같고 일정하다.
- 3) 모터와 부하하중과의 열전달계수를 열저항과 동일하게 본다.

이런 단순한 가정에 의해서 모터 가동 직후 코일의 열적거동을 시뮬레이션 하면 Fig.13와 같다. 여기서 주위온도는 25°C 이며 선택된 모터의 코일의 한계온도가 160°C 인 것을 고려하면 최고 200~250Hz의 성능이 예상된다. 그러나 실제의 온도상승은 더 높을 것이고 또한 코일의 최적 온도조건이 최고 100°C 정도 인것을 감안하면 고속의 운전을 위해서는 코일의 냉각대책은 필수적이라 할 수 있다.

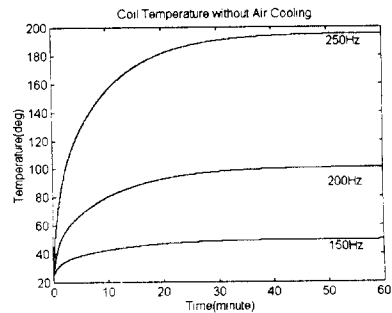


Fig 13. The Transient behavior of coil temperature

만약 코일의 주위로의 열전달계수가 R_{th} 로 동일하다고 가정하면 정상상태에서의 모터의 추력은 다음 식과 같이 나타난다. [6]

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

여기서 $F_{continuous}$ =연속추력, K_m =추력정수, T_{coil} =코일의 온도, T_{amb} =주위온도를 나타낸다. 주어진 모터의 사양의 값을 대입하고 각각 다른 주위온도조건에 따른 모터추력과 코일온도와의 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.

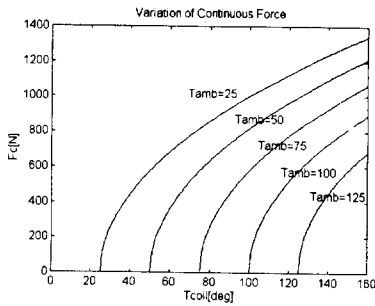


Fig. 14 Continuous force VS. Coil temperature

9. ETEL S.A. "DSA2-PL User's Manual", Ver A, 1997
10. Trilogy Systems Corp., "Linear Motors for Precision Motion Control",
11. Charles L. Philips, H. Troy Nagle, "Digital Control System Analysis and Design", Prentice Hall International Edition, 2nd

6. 결론

본 논문에서는 자동차 피스톤 엔진에 쓰이는 피스톤의 타원 형상 가공을 위하여 피스톤 가공 কে적을 고려한 고속 고정밀 공구이송 장치의 설계와 그에 대한 서보특성, 열특성에 대한 연구를 수행하였다. 그 결과 디지털 PID 제어를 설계하여 시뮬레이션을 통해 약 100Hz 정도 까지 위치오차와 위상오차가 거의 없는 응답을 얻을 수 있었다. 또한 간략한 시뮬레이션을 통해 공구의 이송 주파수에 따른 모터의 열적거동을 예측하였으며 온도상승과 모터성능 사이에 밀접한 관계가 있음을 확인하였다.

참고문헌

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, No.3, 1996, pp453-457
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. 김성식, "비진원가공용 CNC 선반 개발에 관한 연구", 조선대학교 석사논문, 1994
4. 화천기공(주) 기술개발연구소, "CNC 피스톤 가공기 HOT-1000 과 가공용 프로그램 S/W HOTS", 기계자동화, Vol. 4, pp. 36-40, 1994
5. 三宅秀彦, "CNC 피스톤 가공기 TPS-3000 과 가공용 프로그램 데이터 작성 시스템", 기계기술, pp.42-46, 1992
6. Bartos, F. J. , "Linear Motors and Control take a "direct" route to top performance", Control Engineering, Vol.44, no.4, p.90-2,94,96,98,100
7. 조영준, 이강원, "고속정밀 리니어 직류 모터 개발", 생산기술, 1995.7, pp.48-53
8. 최기영, "리니어 모터의 기술현황과 응용I ", 전기설비, 1991.9, pp.76-91