

고속가공기용 고추력 리니어모터 이송계의 특성 평가

송창규*, 황주호, 박천홍, 이후상(한국기계연구원), 정재한(삼익공업(주))

Characteristic Test of High Force Linear Motor Feed Unit for High Speed Machine Tool

C. K. Song, J. H. Hwang, C. H. Park, H. S. Lee(KIMM), J. H. Joung(Samick Industrial Co.)

ABSTRACT

Direct drive linear motors have large potential for use as high speed machine tool feed units since they can increase machining rates and improve servo accuracy by eliminating gear related machining problems. So, in this paper, characteristic of 2-axis linear motor feed unit are studied and control gain are adjusted considering positioning, velocity, acceleration and static stiffness. We confirm linear motor feed unit are affected value of control gain sensitively, because drive directly. From the experiment, this feed unit has $1\mu\text{m}$ micro step resolution, $5.7\mu\text{m}$ positioning accuracy and under $60\mu\text{m}$ circularity.

Key Words : Linear motor(리니어 모터), Feed unit(이송계), High speed machine(고속가공기), Positioning accuracy(위치결정정도), High force(고추력), Circularity test(원호보간)

1. 서론

90m/min 이상의 높은 이송속도를 요구하는 고속 가공기의 구동계로 기존의 회전모터와 볼스크류를 사용하면 백래쉬와 높은 마찰에 의한 발열의 문제가 발생하기 때문에 리니어모터로 모터와 볼나사를 통합하여 직접구동하는 방식이 사용되고 있다. 회전 모터와 볼나사를 사용하는 방식의 고속화의 한계는 50m/min내외가 한계이며, 그 이상의 속도를 실현하기 위하여 리니어 모터를 구동원으로 하는 고속 이송계가 필요하다. 하지만 국내에서 리니어모터를 응용한 공작기계는 아직 상품화되지 않은 상태이고, 고속 머시닝센터를 중심으로 상품화를 위한 연구가 진행되고 있으며, 이에 따라 국내에서도 관련연구가 증가하고 있는 추세이다.

리니어모터 방식의 공작기계가 나오는 선진국의 경우는 리니어모터 이송계에 대한 연구를 활발히 수행하고 있으며, Bramembussche는 공작기계용 리니어 모터의 코깅(cogging)과 추력 ripple에 대한 보상을 통하여 오차를 줄이는 연구를^[1], D. M. Alter는 리니어 모터를 이용한 선반의 이송계의 제어에 관한 결과를 발표한 바 있다.^{[2],[3]}

본 연구는 리니어모터만으로 2축 이송계를 구성

하였을 때 고속위치결정 특성과 원호보간특성을 살펴보고 고속이송시 발생할 수 있는 문제의 분석을 목적으로 수행하였다.

2. 이송계의 설계 및 제작

2.1 리니어 모터 및 제어계 선정

리니어모터의 고속특성을 만족하도록 사다리꼴의 형상을 가지고 가감속할때, Y축은 100m/min의 속도를 달성할 수 있도록 Y축을 이송시키는 X축은 이송 질량이 큰 관계로 최대 60m/min가 가능하도록 설계를 하였다. 이송부의 무게, 가속시간(TA) 0.1초, Stroke 450mm을 기준으로 계산하여 정속, 감속이 가능한 리니어모터를 결정하였다(Table 1 참조).

리니어스케일은 100m/min를 만족하면서 분해능이 높은 것을 조사한 결과 분해능이 $1\mu\text{m}$ 인 RSF社의 MSA 6706으로 결정하였다. 사용된 스케일은 $\pm 3\mu\text{m/m}$ 이고, 스케일 눈금간의 간격인 Grating pitch는 $20\mu\text{m}$ 이다. 제작된 실험용 모델은 Table 1과 같은 사양을 가지고 있으며, Fig 1은 제작된 이송계의 모습이 다. 사용된 리니어모터는 공작기계 이송계에 많이

사용되고 있는 철심형 리니어 모터로 철심에 삼상의 권선이 감겨있고, 추력을 높이기 위하여 두 개의 이동자가 결합되어 있다.

Table 1 Specification of feed unit

	X-축	Y-축
이송계 크기	2070×840×128mm	1080×483×112mm
가이드	LM Guide (THK SR55W)	LM Guide (THK HSR35R)
리니어모터	Normac, BLH-1	Normac, BLH-2
최대추력	5200N	2600N
연속추력	2600N	1300N
이동부무게	487kg	118kg
모터앰프	Glentek, SMA8115, 65A	Glentek, SMA8115, 25A
리니어스케일	RSF, MSA 6706	RSF, MSA 6706
컨트롤러	MEI, PCDSP(P-I-D제어)	



Fig 1. Photo of 2-axis linear motor feed unit

사용된 제어기는 MEI社의 PCDSP로 제어주기는 최소 62.5μs 까지 제어 할 수 있으며, 고속이송의 경우 제어신호를 얼마의 주기로 제어하느냐에 따라서 제어 특성이 다르게 된다.

제어계의 구성을 Fig. 2에 나타냈다. PC 내장형 DSP 컨트롤러를 사용하고 있으며 P-I-D 제어를 수행한다. 원하는 목표위치, 최대속도(Vmax), 가속도(Ac)를 PC 프로그램을 통하여 컨트롤러에 입력하면 컨트롤러는 목표위치까지 명령값(Xc)을 서보 갱신주기(Servo Update Period)마다 내보낸다. 위치, 속도, 가속도의 지령 값은 식 (1)의 위치 데이터인 Xc 값을 갖는다.

$$\begin{aligned}
 V_c(t) &= \int A dt \quad (\text{가속구간}) \\
 V_c(t) &= V_{\max} \quad (\text{정속구간}) \\
 X_c(t) &= \int V_c dt
 \end{aligned} \tag{1}$$

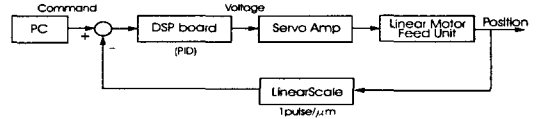


Fig. 2 Block diagram for control system

이러한 명령값을 샘플 시간마다 변화시키며 실제의 위치값(Y)을 리니어 스케일을 통하여 검출한다. 즉, 실험에 사용된 제어기의 명령의 변화율로 원하는 속도, 가속도 형태를 구현하도록 되어 있다.

이때 오차에 대하여 컨트롤러는 다음 식에 따라 계산된 값을 전압으로 출력한다.

$$O_n = K_R(K_p \cdot E_n + K_d \cdot (E_n - E_{n-1}) + K_I \cdot S_n) \tag{2}$$

$$S_n = \begin{cases} S_{n-1} + E_n, & \text{if } -S_{\max} < S_n < S_{\max} \\ S_{\max}, & \text{if } S_n > S_{\max} \\ -S_{\max}, & \text{if } S_n < -S_{\max} \end{cases}$$

O_n : n회째의 출력, K_R : 전체비례계수

K_p : 비례이득, K_D : 미분이득, K_I : 적분이득

E_n : n회째 오차값 ($E_n = X_c - Y$),

S_n : 오차의 n회째까지의 합

2.2 안내계 선정

선정된 리니어 모터용 안내계는 일반적으로 많이 사용하는 LM 가이드를 사용하였으며 하중과 수명을 고려하여 다음과 같이 설계하였다.

$$L = \left[\frac{1}{f_w} \cdot \frac{C}{P_c + P} \right]^3 \cdot 50 \tag{3}$$

여기서, L : 정격 수명 (km), C : 기본 동정격 하중, f_w : 하중계수, P_c : 계산하중, P : 자석과 철심과의 인력

철심형 리니어모터의 경우 철심과 자석과의 인력이 작용하기 때문에 하중에 자석과 철심간의 힘을 고려해야 하는 특성을 가지고 있으며, 수명을 시간에 대하여 나타내면 식 (4)와 같이 표현된다.

$$L_h = \frac{L \times 10^3}{2 \times l_s \times n_1 \times 60} \tag{4}$$

여기서, L_h : 수명시간 (hr),

l_s : 스트로크 길이 (m),

n_1 : 배분 왕복횟수

식(3)과 (4)로부터 하루8시간 50m/min의 속도로 운전하고 $f_w = 3$, $P_c = 2\text{kN}$, P는 X축 13344N, Y축을 7339N으로 계산하여 X축의 LM 가이드는 THK사의 SRW55를 Y축 이송계는 THK사의 HSR35R로 선정하였다.

3. 특성실험

3.1 위치결정정도

리니어모터의 조립정도를 살펴보기 위하여 레

이저 간섭계 HP5529A를 이용하여 직선운동오차를 측정 한 결과를 Fig. 3과 4에 나타내었다.

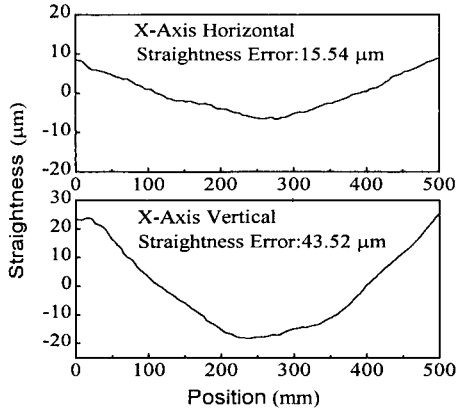


Fig. 3 Vertical, horizontal straightness (X-axis)

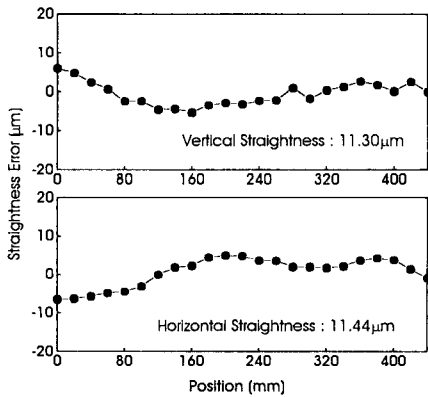


Fig. 4 Vertical, horizontal straightness (Y-axis)

LM 가이드는 정밀급을 사용하였으며, 정밀급의 일반적 사양에 비하여 그 크기가 다소 커서 위치결정 정도에 문제를 일으킬 수 있으나, 수직방향의 진척도 보정을 위해서는 재가공을 수행하여야 하며 고속이송의 영향을 평가하는 과제와 특성파 진행계획을 고려하여 그대로 실험을 진행하였다.

이송계의 미소이송 특성을 실험하기 위하여, 테이블의 끝에 정전 용량형 변위계(ADE, 3401)를 이용하여 X축 및 Y축의 최소 분해능인 $1\mu\text{m}/\text{step}$, $2\mu\text{m}/\text{step}$ 에 대하여 100Hz의 샘플링 속도를 가지고 측정 한 결과를 Fig. 5 및 6에 나타내었다. 보이는 바와 같이 $1\mu\text{m}/\text{step}$ 의 경우 대체로 뚜렷한 응답을 보이고 있다. $2\mu\text{m}/\text{step}$ 의 경우 $1\mu\text{m}/\text{step}$ 보다 명확한 응답을 보이고 있다. 본 이송계는 기계적 장치가 간단하여 리니어스케일의 분해능이 증가되면 미소이송특성이 향상되리라 예상된다.

Y축의 위치결정정도를 레이저 간섭계를 이용하여 측정하였다.

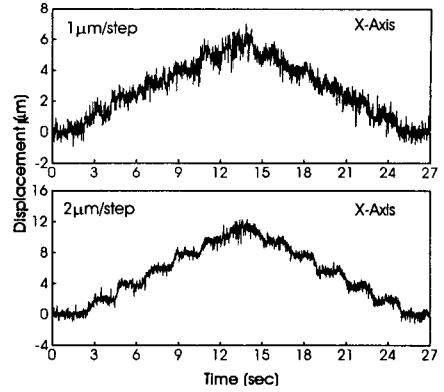


Fig. 5 Micro step response(X axis)

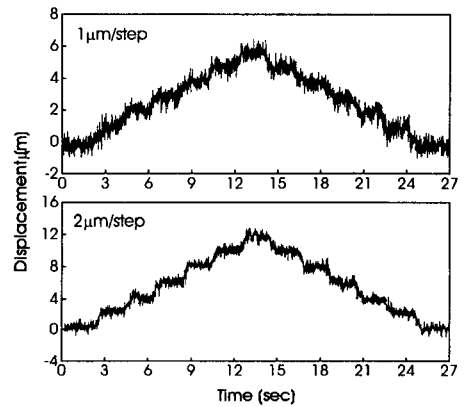


Fig. 6 Micro step response(Y axis)

측정은 ISO230-2규격으로 하였으며 20mm 간격으로, 레이저 간섭계가 측정 가능한 최대 값 부분인 40m/min로 5회 왕복 운동한 오차의 평균을 Fig. 7에 나타내었다.

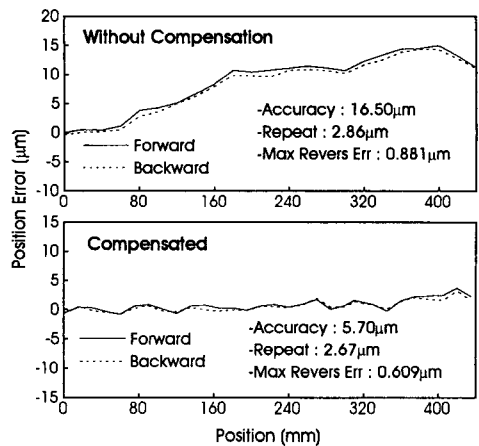


Fig. 7 Positioning accuracy of feed unit

위치 결정정도는 $16.5\mu\text{m}$ 를 보이고 있으며, 리니어 스케일의 사양인 $\pm 3\mu\text{m}$ 에 비하여 그 크기가 크다. 이러한 오차에 대하여 NC 보정을 수행하였으며, Fig. 7의 하단 그림은 15mm 간격으로 이송하면서 5회 측정된 위치 오차의 결과로 보정값은 초기 측정된 20mm 간격의 오차값을 기준으로 사이값을 비례적으로 보간하여 보정하였다. 보정후 $5.70\mu\text{m}$ 의 위치결정정도를 얻을 수 있었다.

Fig. 8은 X축의 위치오차와 각운동 오차를 측정 한 결과이며 측정점은 리니어 스케일 바로 윗면의 지점이다.

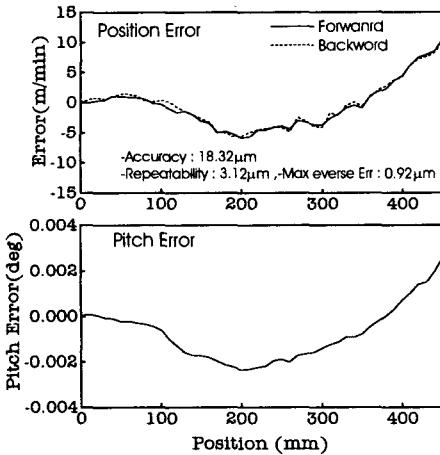


Fig. 8 Positional error and pitch error

이때의 위치결정정도는 $18.32\mu\text{m}$ 이며 이때의 위치오차는 Fig. 8과 유사한 파형을 보이고 있으며 각운동오차의 영향이 위치오차로 전사되어 나타내어진다고 생각된다. 따라서 측정높이까지의 Pitch 오차를 제거한 후 위치결정 정도를 살펴보면 Fig. 9와 같이 $4.09\mu\text{m}$ 의 평균오차를 보이며, 이는 스케일의 오차인 $\pm 3\mu\text{m}$ 이내의 값을 보인다. 따라서 X축에 대한 수치보정을 하는 것은 측정지점에 따라 달라지므로 이전에 각운동 오차를 줄이는 작업이 필요하다 생각된다

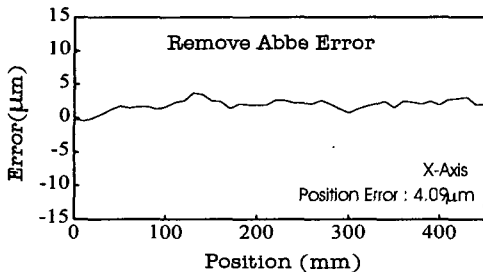


Fig. 9 Positional error after removing effect of pitch error

Fig. 10은 고속 이송시 기계진동, 전자기력의 변화에 의한 기계 변형등에 의하여 발생하는 직선운동 오차의 영향을 살펴보기 위하여 64nm 의 평탄도를 가지는 Straightness Edge를 기준면으로 하여 정전 용량형 센서를 이용하여 이송속도 변화에 대한 진직도를 평가한 결과이다.

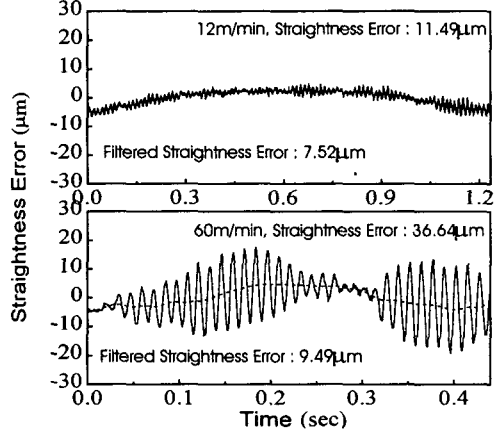


Fig. 10 Change of linear motion error at high speed moving

고속이송시 보이는 약 80Hz 의 진동은 저속 및 정지상태에서도 관찰되는 속도와 무관한 특성으로서 이는 전기적인 영향에 기인된다고 생각되며, 고속이송시 진동이 커지는 것은 인가되는 전류의 크기가 커서 생기는 것으로 생각된다. 그러나 비교적 인가 전류가 적은 저속 구간에서도 계속적으로 큰 진동이 생기는 원인에 대하여는 향후에 좀더 연구가 필요하다고 생각된다. 60m/min 이송시 이러한 80Hz 성분의 진동을 S/W적으로 필터링 한후의 파형도 저속인 20m/min 의 그것에 비하여 적으며 이는 고속이송시 전류의 인가에 의한 테이블 상면의 변형에 의하여 생긴 영향이라고 생각된다.

Fig. 11은 속도변화별 직선운동 오차의 변화를 도시한 것으로 속도의 증가에 따라 그 크기가 커지는 경향을 관찰 할 수 있었다.

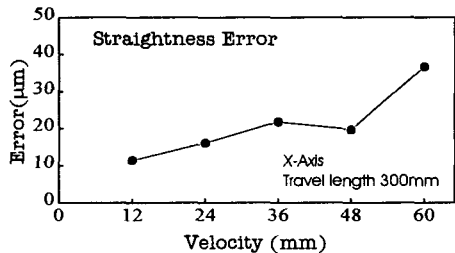


Fig. 11 Change of linear motion error caused by speed variation

3.2 원호보간

Fig. 12는 6m/min의 원주속도로 원호보간을 수행하였을 때의 X, Y축의 리니어스케일 신호를 측정하여 이상적인 원과의 차이를 나타낸 값이며 측정값 중 최대, 최소의 차이는 18.84 μ m이다. Fig. 13은 60m/min의 원주속도로 원호운동시의 오차이며 59.8 μ m의 오차를 보이고 있다. Fig. 14는 속도의 증감에 의한 원호보간정도를 나타낸 것이다. 일반 스크류 이송계와 마찬가지로 속도가 증가할수록 오차가 커짐을 확인 할 수 있었다.

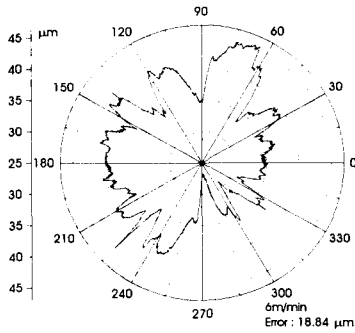


Fig. 12 Circularity (circular speed 6m/min)

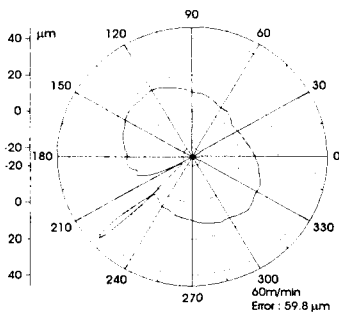


Fig. 13 Circularity (circular speed 60m/min)

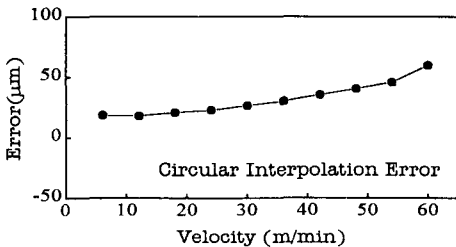


Fig. 14 Change of circularity by speed variation

4. 결론

리니어모터의 특성은 제어이득에 크게 의존함을 알 수 있었으며, 위치, 속도, 가속도, 정강성을 고려하여 적절한 P-I-D 제어이득을 구하였으며, 이로부터 다음의 실험결과를 구하였다.

1) 이송방향의 정강성이 적분이득에 따라 민감하게 변화하는 것을 알 수 있었으며, Y축은 2417N/ μ m으로, X축은 3997N/ μ m의 정강성을 얻을 수 있었다.

2) Y축은 속도 100m/min로 450mm의 위치결정시 0.086mm의 최대오차를 확인 할 수 있었으며 속도의 최대오차는 2.7m/min이며 X축은 60m/min로 500mm의 위치결정시 0.287mm의 오차 2.96의 속도오차로 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

3) 미송이송정도는 X, Y축 모두리니어 스케일의 최소 분해능인 1 μ m가 가능함을 확인하였으며, 리니어모터 이송계의 위치결정정도는 Y축의 경우16.5 μ m이고 수치보정을 통하여 5.7 μ m의 위치결정정도가 실현가능 함을 알 수 있었다. 한편 X축의 경우 각운동 오차에 의하여 위치결정 오차가 영향을 받음을 확인할 수 있었다.

4) 고속이송이 기계의 직선운동오차에 영향을 줄 수 있었으며, 60m/min의 속도로 이송하는 경우 12m/min으로 이송하는 경우보다 약 3.2배 증가함을 확인할 수 있었다.

5) 원호보간정도는 일반적인 이송계의 경우와 마찬가지로 원주속도가 증가할수록 오차가 커짐을 확인할 수 있었으며, 60m/min의 원주속도이송시 6m/min의 원주속도 보다 3.2배 증가한 59.8 μ m의 오차를 보임을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. P. Van Den Bramembussche, "Accurate Tracking Control Of Linear Synchronous Motor Machine Tool Axes", Mechatronics Vol. 6, No. 5, pp. 507-521, 1996.
2. D. M. Alter, "Stability of Turning Process with Actively Controlled Linear Motor Feed Drives", Journal of Engineering for Industry, Vol. 116, August, pp 298-307, 1994.
3. D. M. Alter, "Control of Linear Motors for Machine Tool Feed Drives", Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 118, December, pp. 649-656, 1996.