

리니어 모터를 적용한 공작기계의 열변형 특성에 관한 연구

김종진 (포항공대 대학원), 조동우 (포항공대 기계공학과)

A Study on the thermal behaviors of a machine tool with linear motors

Jong-Jin Kim (Graduate School, POSTECH), Dong-Woo Cho (Dept. of Mech. Eng., POSTECH)

Abstract

The development of feed drive system with high speed and accuracy has been a major issue in the machine tool industry. Linear motors can be used as the efficient tool to achieve fast feed mechanism and high accuracy. However, a high speed feed drive system with linear motors can generate heat problems such as the variation of temperature distribution and the resultant thermal stress. In this paper, the important heat sources and the resultant thermal errors are presented. The thermal deformation characteristics of the machine tool with linear motors were identified, which are thermal expansion of linear scale, shrinkage, expansion and bending in the machine tool structure.

Key Words : Machine tool (공작 기계), Linear motor (리니어 모터), Linear scale (선형 엔코더), Linear guideway (직선 안내면), Thermal deformation (열변형)

1. 서론

공작물의 정밀도와 생산성을 동시에 높이기 위해 리니어 모터를 장착한 고속 고정밀 공작기계들이 선보이고 있다. 리니어 모터는 회전운동을 직선운동으로 변환시키는 기계적인 전달 장치가 필요가 없어 백래쉬가 없고 마찰력이 작다. 따라서 속도, 가감속 성능 그리고 위치 정밀도를 높일 수 있다.⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾

지금까지 공작기계의 열변형에 관한 연구들은 볼스크류를 장착한 공작기계에서의 열변형이 주를 이루었고⁽⁴⁾ 최근에는 리니어 모터 자체에 대한 열적 특성 및 최적화에 관한 논문들이 발표되고 있다.^(5,6) 하지만 리니어 모터를 공작기계에 장착할 경우 구조물과 직접 결합되어 이송을 하게 되므로 리니어 모터에서 발생한 열이 구조물에 영향을 미치게 된다. 따라서 구조물의 하중을 받으면서 빠른 속도로 이송을 할 경우 이송계에서 발생하는 열적 특성과 함께 확인할 필요가 있다.

본 논문에서는 리니어 모터를 적용한 고속 고정밀 가공용 수평형 머시닝 센터에서의 고속 이송에 따른 열변형 특성 분석을 통하여 중요 열원을 알아보고 이와 같은 열원들이 이송계의 위치 정밀도 및 구조물에 어떠한 영향을 미치는지 실험을 통해 분석하였다.

2. 리니어 모터와 공작기계

리니어 모터는 리니어 스케일로부터 직접 피드백을 통해 위치를 제어하므로 위치 정밀도를 향상시킬 수 있으며 이송거리의 제약이 없고 유지보수가 용이하고 수명이 길다. 리니어 모터는 기존의 공작 기계의 볼스크류 이송기구가 갖는 고속, 고정밀의 한계를 극복할 수 있는 새로운 대안으로 제시되어 리니어 모터를 장착한 공작기계가 선보이기 시작했다.⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾

하지만 모터의 전기 손실이 열의 형태로 나타나게 되는데 모터 코일에서는 온도가 100℃ 이상 올라가기도 한다.⁽⁴⁾⁽⁵⁾ 리니어 모터는 공작 기계 슬라이더와 직접 결합되어 구동 되므로 모터에서 발생한 열이 공작 기계 구조물에 직접적으로 영향을 줄 수 있다. 그리고 리니어 모터의 배치 및 공작 기계 구조가 대칭적이더라도 리니어 모터의 온도 변화가 대칭적이지 않을 경우에는 구조물이 뒤틀어지거나 굽힘 변형이 발생할 수 있다.

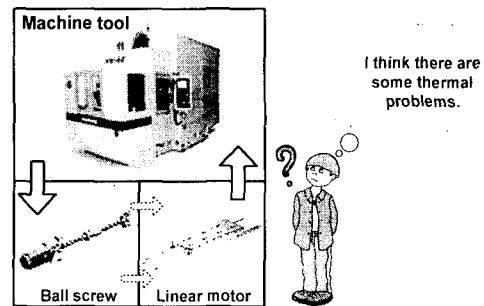


Fig. 1 Machine tool with linear motors

리니어 모터를 적용할 경우에는 120 m/min 이상으로 고속 이송이 가능하므로 안내면에서 볼 또는 롤러가 빠르게 회전하면서 생기는 마찰열 역시 고려할 필요가 있다. 또한 이러한 열에 의해 리니어 스케일이 어떠한 영향을 받을 수 있는지 확인하여야 한다.

3. 실험 장치의 구성

3.1 공작 기계 및 리니어 모터 사양

대우 종합기계에서 개발중인 고속 고정밀 가공용 수평형 머시닝 센터 (FH500)에서 열변형 실험을 수행하였다. 사용된 공작기계 및 리니어 모터의 사양은 Table 1과 2와 같다. 리니어 모터는 X축 2개, Y축 2개 그리고 Z축은 1개를 사용하였으며 각각 리니어 스케일을 통해 위치를 피드백 받고 있다.

3.2 온도 측정

T-type의 열전대를 총 32점에 부착하여 온도 변화량을 측정하였으며 열전대 부착 위치는 Tabel 3에 나타나있다.

Table 1. Specification of machine tool

Contents		Units	FH500
Stroke (X, Y, Z)		mm	630×630×500
Spindle		rpm	35,000
Feedrate	Rapid traverse	m/min	120 (X/Y/Z)
	Cutting feedrate	m/min	60 (X/Y/Z)
Acceleration (X, Y, Z)		1g = 9.8 m/s ²	1.4g/1.4g/2g

Table 2. Specification of SIEMENS linear motors

Axis	Model	Maximum force	Continuous force	Magnetic attraction
X (2)	LB600M -20	13,800 N	5,220 N	27,460 N
Y (2)	LB900M -10	10,350 N	4,050 N	20,600 N
Z (1)	LB450M -20	10,350 N	3,860 N	20,600 N

Table 3. Temperature sensor locations

Sensor number			Location of temperature sensor
X	Y	Z	
			Linear motor
1, 2	10, 11	19	- Primary part
3	12	20	- Secondary part
4, 5, 6			Linear scale
			Linear guideway
9	18	25	- LM block
7, 8			- LM guide
29			Y-frame
30			Column
26, 27			Spindle
			Room temperature
31			- in work space
32			- outside of machining center

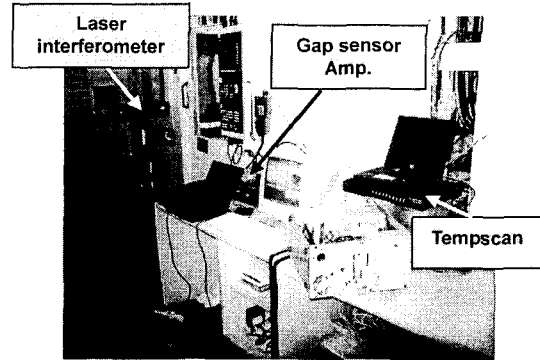


Fig. 2 Experiment set-up

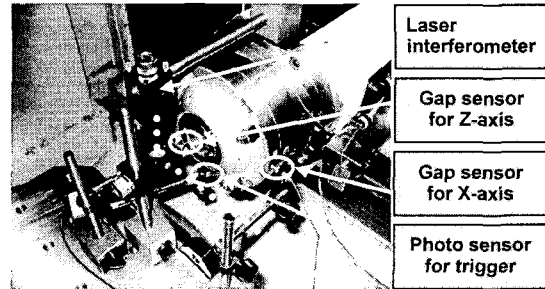


Fig. 3 Measurement set-up for Y-axis

3.3 열변형 오차 측정

Fig. 2는 전체 실험 장치 구성이다. 레이저 인터페로미터(Laser interferometer)를 이용하여 이송 방향의 변위를 측정하고 갭센서(Gap sensor) 2개와 광센서(Photo sensor)를 이용하여 이송 방향을 제외한 나머지 두 방향으로의 열변형 오차를 측정하였다. Fig. 3은 Y축 방향으로 이송할 때의 실험 장치 구성이다.

4. 열변형 특성 분석

4.1 실험 방법

리니어 모터를 장착한 고속 고정밀 수평형 머시닝 센터의 이송시 나타나는 열변형 특성을 분석하기 위해 주축의 회전 및 주축 오일 쿨러를 정지시켜 주축의 영향을 배제하고 이송계의 열변형 특성에 주목하여 실험을 수행하였다. 따라서 Table 4와 같이 각 축별로 다양한 이송 속도 조건에서 각 축의 열변형 특성을 분석하였다.

Table 4. Experiment conditions

Experiment	Axis	Feedrate	Stroke	Time
1	Y	60 m/min	50~550 mm	120 min
2	Y	12 m/min	50~550 mm	180 min
3	Y	Random	50~550 mm	220 min
4	X	60 m/min	60~560 mm	150 min
5	Z	60 m/min	100~430 mm	150 min

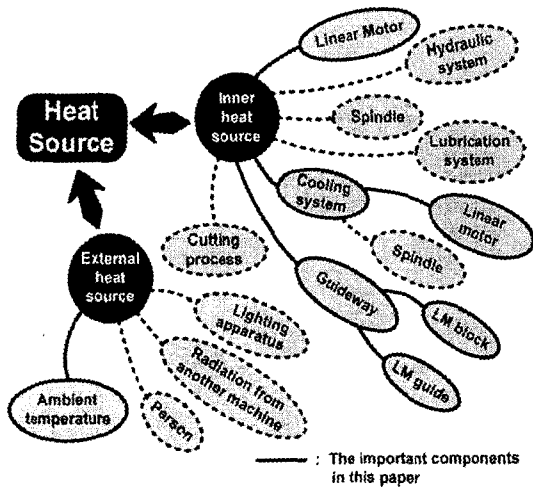


Fig. 4 Heat source

4.2 열원

Fig. 4와 같이 공작기계 열변형의 열원은 크게 내부 열원과 외부 열원으로 나눌 수 있다. 내부 열원으로는 스피들, 절삭공정, 유압시스템, 윤활시스템, 선형 안내면, 리니어 모터 그리고 냉각 시스템 등이 있다. 외부 열원으로는 대기 온도, 전기적 조명, 작업자의 체온 그리고 다른 기계로부터의 복사열등이 있다.

본 논문에서는 리니어 모터를 장착한 공작 기계에서 이송시 발생하는 열적 변화를 중점으로 연구를 수행하였다. 따라서 이송시 리니어 모터의 열손실, 리니어 모터와 관련된 냉각시스템 그리고 선형 안내면에서 풀러의 회전으로 발생하는 마찰열등이 중요 내부 열원이 된다. 그리고 외부 열원으로 대기온도만을 중요하게 취급하기로 한다.

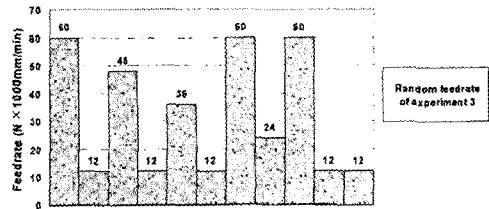
4.3 열변형 오차 분석

4.3.1 리니어 스케일의 열팽창

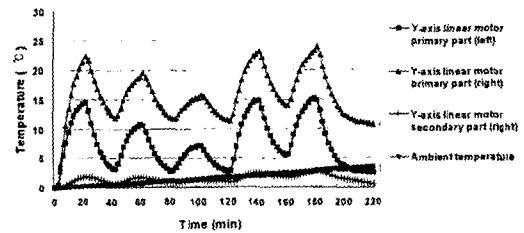
고속으로 이송을 하게 되면 LM 블록의 풀러 역시 빠르게 회전하면서 선접촉에 의한 마찰열이 발생한다. 이것은 안내면 옆에 장착되어 있는 리니어 스케일의 온도 상승을 유발하여 열팽창을 일으킨다. Fig. 5 (b)에서 Y축 리니어 모터의 온도 변화는 Fig. 5 (a) 이송 속도와 비슷하게 변하고 있으며 실내 온도는 약간 상승하고 있다. 하지만 이러한 온도 변화는 Y축에서 발생한 위치 오차를 잘 반영하지 못한다. Fig. 5 (c)를 보면 Y축 LM 블록에서 발생한 열이 Y축 리니어 스케일로 전달되는 것을 확인 할 수 있다. 그리고 리니어 스케일은 온도 상승에 의해 Fig. 6 처럼 열팽창을 하게 되고 이것은 Fig. 5 (d)와 같이 위치에 따라서 다른 위치 오차를 생성하게 된다. Fig. 7은

스케일의 변형에 따른 오차 생성 과정이다.

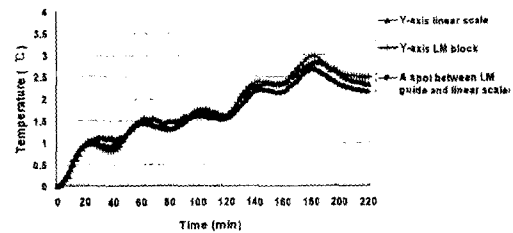
X축의 경우 역시 Y축과 비슷한 결과를 나타내고 있다. Fig. 8은 X축으로 60 m/min으로 이송을 하였을 때의 위치 오차를 나타낸다. Y축 실험처럼 위치에 따라 오차의 크기가 달라지고 있다. Y축과 마찬가지로 X축 이송에 따른 X축 LM 블록에서 발생한 마찰열이 X축 리니어 스케일에 전해져 열팽창이 일어났기 때문이다. Fig. 9에서 이송 구간이 거의 대칭을 이루고 있으므로 측정된 위치 오차 역시 거의 대칭적으로 변하고 있다 그리고 X축 양의 방향으로 약간의 윽셋이 발생하고 있는데 이것은 뒤에서 설명할 Y축 열적 불



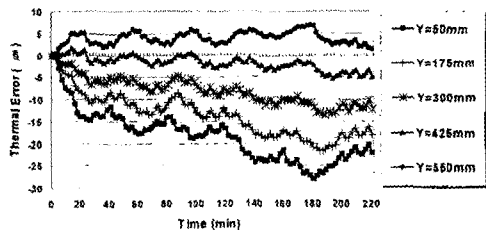
(a) Feedrate condition of experiment 3



(b) Temperature variation



(c) Temperature variation



(d) Thermal error

Fig. 5 Measurement results (Experiment 3)

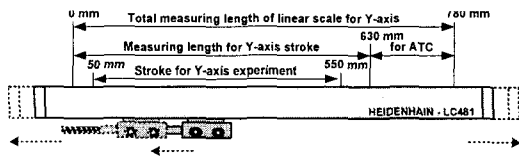


Fig. 6 Y-axis linear scale thermal expansion

1. Scale expansion
2. Movement of reader
3. Movement of Y-frame
4. Produce the position error of Y-axis

Fig. 7 Mechanism for the position error of the Y-axis

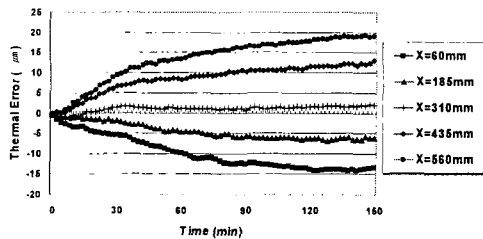


Fig. 8 X-axis position error (Experiment 4)

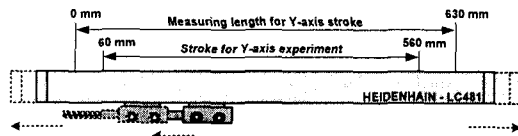
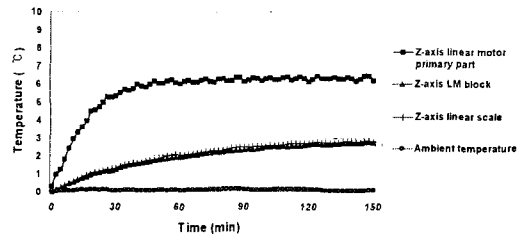


Fig. 9 X-axis linear scale expansion

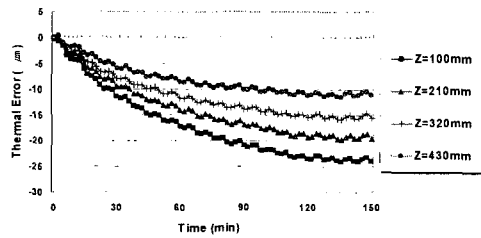
균등에 의한 X축 방향 굽힘 때문이다.

Z축의 경우는 약간 다른 결과를 보여준다. Fig. 10 (a)에서 Z축 리니어 모터는 6°C 정도 변하고 실내 온도는 거의 변화가 없다. 그리고 Z축 LM 블록과 Z축 리니어 스케일의 온도 변화가 Y축 실험에서처럼 일치하고 있음을 볼 수 있다. 하지만 Fig. 10의 측정된 위치 오차의 특성은 앞에서 보인 결과와 같지 않다. 이것은 리니어 스케일이 열팽창을 하여 위치에 따라 달라지는 오차 성분에 시간에 따라 증가하는 움직임의 영향이 합쳐져서 나타났기 때문이다.

움직임의 원인은 크게 두 가지로 설명될 수 있다. 첫번째는 Z축 LM 블록에서 발생한 열에 의한 Z축 슬라이드의 길이 방향 열팽창이고 두번째는 Z축 리니어 스케일을 고정하고 있는 고정바 (mounting spar)가 뒤로 이동하기 때문이다. Fig. 11은 Z축 슬라이드 뒤쪽에 위치한 Z축 리니어 스케일 고정바가 Z축 슬라이드의 열팽창으로 뒤로



a) Temperature variation



b) Thermal error of Z-axis

Fig. 10 Measurement results (Experiment 5)

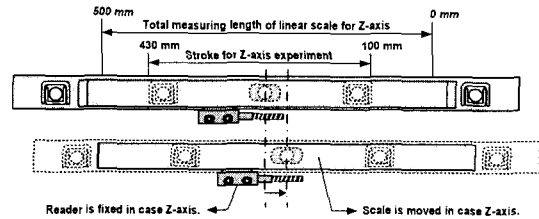
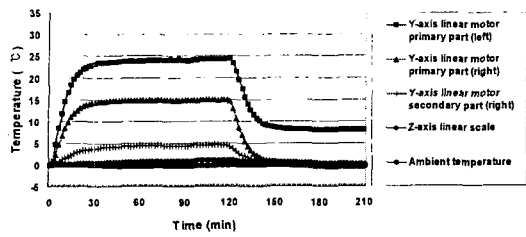


Fig. 11 Position change of a mounting spar

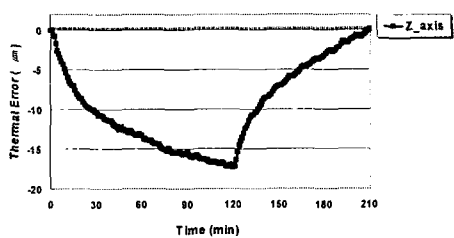
이동하는 것을 나타낸다. 이에 의해 스케일 자체가 뒤로 움직이게 되면 같은 위치를 고수하기 위해 스케일이 움직인 만큼 Z축 슬라이드를 앞으로 밀어 주게 되면서 오차가 생성되고 이것은 Z축 슬라이드의 열팽창과 합쳐져서 Z축 방향의 위치 에러에 영향을 미치게 된다.

4.3.2 구조물의 열팽창

다음은 리니어 모터에서 발생한 열이 구조물에 영향을 주고 있는 경우이다. Fig. 12는 Y축으로 60 m/min으로 이송하였을 경우의 온도변화와 캡 센서로 측정된 Z축 방향의 열변형량을 나타낸다. Fig. 12 (a)를 보면 실내 온도 및 Z축 방향의 리니어 스케일의 온도 변화는 작다. 하지만 Y축 리니어 모터의 온도 변화는 25°C에 이른다. 그리고 Fig. 12 (b)를 보면 Y축 방향으로만 이송을 했음에도 Z축 방향으로 17 µm의 오차가 발생하였다. 이것은 Fig. 14와 같이 Y축 리니어 모터에서 발생한 열이 Y축 프레임을 통해 빔 구조의 Z축 슬라이드에 전달되어 길이 방향 열팽창을 유도했기 때문이다.

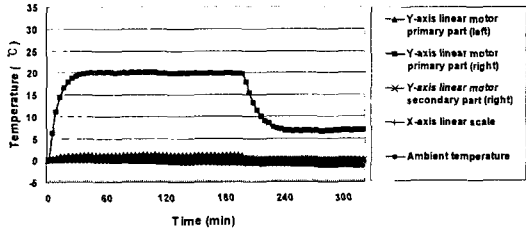


a) Temperature variation

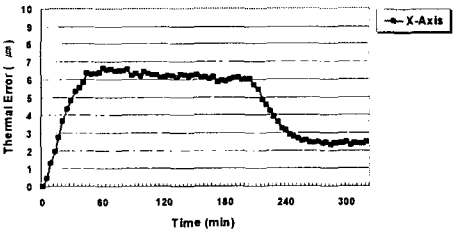


b) Thermal error of Z-axis

Fig. 12 Measurement results (Experiment 1)



a) Temperature variation



b) Thermal error of X-axis

Fig. 13 Measurement results (Experiment 2)

4.3.3 열적 불균등에 의한 굽힘

Fig. 13은 Y축으로 12 m/min으로 이송을 하였을 때 온도 변화와 검출기로 측정된 X축 방향의 열변형량을 나타낸다. 실내 온도와 X축 리니어 스케일의 온도 변화는 거의 없다. 하지만 두개의 Y축 리니어 모터가 서로 열적으로 대칭이 아니다. 이러한 열적 불균등에 의해 Fig. 14와 같이 Y축 프레임의 X축 방향으로의 굽힘이 발생한다.

5. 결론

본 논문에서는 리니어 모터를 적용한 공작기계에서의 열변형 특성을 분석하였다. 리니어

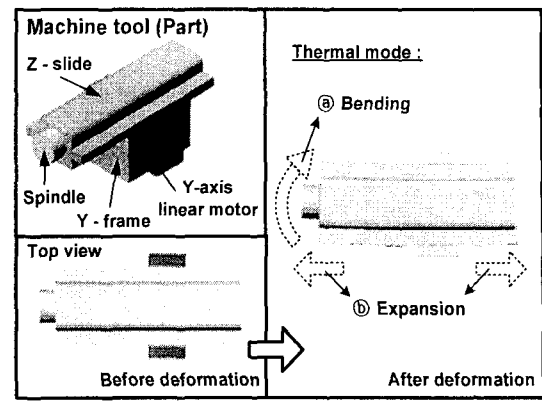


Fig. 14 Thermal deformation of the structure

모터에서 발생하는 열과 안내면의 롤러가 회전하면서 생기는 마찰열, 리니어 모터 냉각수 그리고 대기온도가 주요 열원이 된다. 이러한 열원에 의해 리니어 스케일의 열팽창, 구조물의 팽창 및 수축 그리고 굽힘 등 각 축마다 다양한 열변형 특성을 확인하였고 그 원인을 분석하여 보았다.

후기

본 연구는 대우종합기계 주관의 2000년도 산업 기반 기술과제의 위탁과제로서 진행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

- (1) Bin Yao, Li Xu, "Adaptive robust motion control of linear motors for precision manufacturing," *Mechatronics*, Vol. 12, pp. 595-616, 2002.
- (2) D.Renton, M.A. Elbestawi, "Motion control for linear motor feed drives in advanced machine tools" *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 41, pp.479-507, 2001.
- (3) 은인웅, "Linear Motor를 이용한 위치결정 기술", *한국정밀공학회지*, 제17권, 제12호, pp. 20-25, 2000.
- (4) R. Ramesh, M.A. Mannan, A.N. Poo "Error compensation in machine tools-a review Part II: thermal errors", *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 40, pp.1257-1284, 2000.
- (5) Changsoo Jang, Jongyoung Kim, Yungjoon Kim, "Thermal Resistance Modeling of Linear Motor Driven Stages for Chip Mounter Applications", *Inter Society Conference on Thermal Phenomena*, pp. 77-84, 2002.
- (6) George Abdou, William Tereshkovich, "Performance evaluation of a permanent magnet brushless DC linear drive for high-speed machining using finite element analysis", *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 35, pp. 169-188, 2000.