

초고속 이송 장치로서 리니어 모터의 적용 연구 Application of Linear Motor for the High-Speed Feed System of Machine Tools

신 흥 철, 최 종 료(현대정공(주) 기술연구소)
Heung-Chul Shin, Song-Yul Choe (Technical Research Inst., Hyundai Precision & Ind. Co., LTD)

Abstract

The feed system of the machine tools is limited by the mechanical transmission elements. However, thanks to the advanced modern technology, those machines are able to equip with linear motors. In this paper, the types and application aspects of linear motor are discussed and a synchronous type of the linear motors has been applied to X-Y table for machining center. The performance shows an outstanding result in terms of the accuracy, speed and stiffness. Machine tool system with linear motors is expected to be more productive machines using linear motor in the near next years.

Key Words : Machine Tools(공작기계), Linear Motor(리니어 모터), High Speed and Stiffness(고속 & 강성), Feed System(이송 장치), M/C(머시닝 센터), Actuator(액츄에이터), Direct Drive(직접 구동 방식)

1. 서론

공작기계, 반도체 제조 장치를 비롯한 산업기기 장치 등은 최종적으로 기계적인 직선운동을 필요로 하는 경우가 많다. 이와 같은 장치의 직선운동은 일반적으로 회전 모터와 회전 직선 변환 기구를 조합하여 구현되고 있다^{1)~2)}. 이러한 시스템은, 저가의 구성 요소로 일반적인 공작기계에 많이 사용되어 왔으나 속도의 한계, 저강성 등으로 고속의 이송 장치로 사용되기에는 한계성이 있었다.

이러한 문제점을 극복 하기 위하여, 최근에는 리니어 모터가 주목을 받고 있다^{3)~8)}. 종래는 리니어 모터를 공작기계에 적용하기에는 충분한 강성을 실현시키지 못하는 것이 최대의 단점이었으나, 최근에는 소재의 개발 및 제어기술의 발전 등으로 결점을 해결하기에 이르렀다.

공작기계의 이송 장치에 리니어 모터를 적용시키려는 연구 및 개발은 꾸준히 이루어져, 고속의 이송을 실현시키는 물론 고강성, 기구부의 간략화, 고정도를 실현시키고 있다^{9)~12)}.

이와 같은 시스템의 동적 특성 향상으로 인하여 생산성 증대에 결정적인 역할을 할 것으로 기대된다.

본 논문에서는, 리니어 모터의 원리 및 특성을 분류하고, 저자들이 개발한, “리니어 모터를 이용한 고속 이송 장치”의 기계적인 특징에 대하여 논술하였다. 또한, 기계적인 특성을 측정, 분석하여 논술하였다. 본 고속 이송 장치는 최대 속도 116m/min, 0.5 μm의 위치 결정 정도를 이룩하였다.

2. 개요

일반적으로 공작기계의 이송 장치의 주요 구성요소는, 액츄에이터, 운동 전달 요소, 안내 요소, 위치 검출기, 제어 장치로 구성된다.

그림 1은 운동 전달 요소를 통한 운동의 변환 과정을 정리한 것으로, 운동을 발생시키는 액츄에이터와 운동 전달 요소, 생성되는 운동으로 구성되어 있다. 액츄에이터에 의해 생성된 운동은, 회전과 직선 운동으로 나누어지며 각종 변환 기구를 통하여, 회전 - 회전, 회전 - 직선, 직선 - 회전, 직선 - 회전 운동으로 최종적인 운동이 변환된다

일반적으로 공작기계의 이송계는, AC-Servo 모터의 회전 운동을 볼스크류를 이용하여 직선 운동으로 변환하는 이송 운동을 실현시켜 왔다.

이러한 메카트로닉스 시스템은 광범위하게 사용되어지고 있으며, 위치, 속도, 힘의 정밀한 제어를

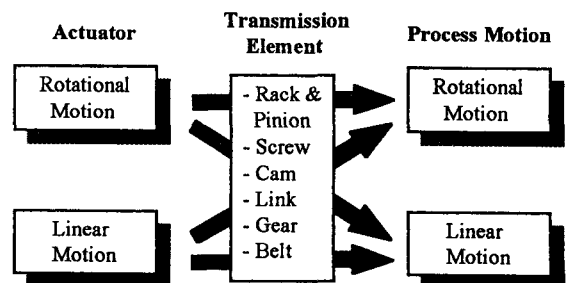


그림 1. 운동 변환의 과정

요구하게 된다.

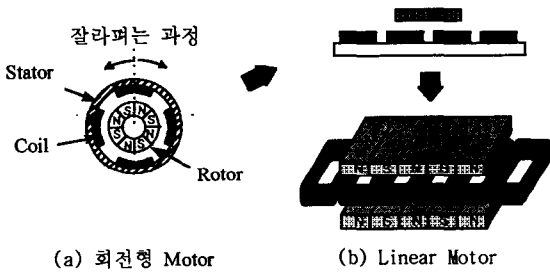
그러나, 이송계의 강성과 속도 그리고 정도에 제한이 있어, 일반적인 공작기계(선반, 머시닝 센터)의 정도는 수 μ m, 최대 속도 수십 m/min로 제한을 받고 있다.

3. 리니어 모터

3.1 기본 원리

AC-Servo 모터는 일반적으로 회전자의 N, S 극과 고정자에 권선이 감긴 형태로 구성되며 전류를 고정자의 코일에 흘려 자속을 형성하면 로렌츠의 힘의 법칙에 의해 힘이 회전자에 작용하여 결국 전기적 에너지를 기계적인 에너지로 바꿔게 한다.

그림 2는 회전기로부터 리니어 모터로의 전개 과정을 표시한 것이다. 그림에 나타난 것과 같이 회전형 모터의 고정자와 회전자를 한곳에서 절단하여 펼쳐놓는 형태가 곧 리니어 모터이며 힘이 발생하는 구동 원리는 회전형 모터와 동일하다.



(a) 회전형 Motor (b) Linear Motor

그림 2. 리니어 모터의 원리⁶⁾
(회전기로부터 리니어 모터로의 전개)

3.2 리니어 모터의 분류

그림 3은 리니어 모터의 분류를 나타내고 있다.

그림과 같이, 리니어 모터는 동작 원리, 구조 및 1차 축은 2차 축 형상에 의해 분류될 수 있다. 첫째로 동작 원리는 회전자 모터와 동일하게 유도기, 동기기, 직류기 그리고 펄스로 구분할 수 있다. 구조의 의한 분류는 1, 2차 축을 비교하여 짧은 것이 1차 축 인지 아니면 2차 축인지 여부에 따라 나눌 수가 있다.

고정자의 권선이 전구간에 고정된 형태에서 2차 축은 고정자의 일부만 커버 되는 구조로 1차 축의 전구간의 권선을 사용함으로써 손실이 비교적 크고, 실질적인 힘은 서로 마주보는 면적에 의해 결정 된

다는 단점을 가지고 있다. 서로 마주보지 않는 부분의 누설 자속이 발생함으로써 동적 특성 및 최대 속도가 제한된다. 그래서 이송 거리가 비교적 짧은 거리에 적용 하기가 유리하다.

반면, 고정자가 짧은 경우 고정자 전체가 힘을 생성하는데 작용하지만 저항으로 인한 손실과 누설 자속은 회전자 모터와 비교할 정도이다. 단 동기형 고정자인 경우 2차 축은 비교적 비싼 영구자석으로 전이동 구간에 설치하여야 한다. 반면 유도기형은 2차 축에 도체가 필요하기 때문에 비교적 가격은 낮으나 효율이 낮고 열이 발생하는 단점이 있다. 일반적으로 유도기형 리니어 모터의 전체 효율은 약 15 ~ 20% 이다.

1, 2차 축의 형상에 따라 세가지로 분류 할 수 있는데, Single 형에서는 1차와 2차 축의 인력으로 인해 기구적인 지지 부분 (베어링등)이 부담이 되며, Double 형에서는 이런 인력이 서로 상쇄될 수가 있다.

이송 거리에 제한이 없으며 동적 제어 특성 및 가속 특성이 특히 높아야 할 경우 Double Slided 형이 유리하다.

Tubular 형은 실린더 형태로써 최소 직경이 자속의 상쇄에 의해 제한되고 제조상 최대 원통 길이도 제한된다. 따라서 산업용 재봉 기기 등 이송 거리가 짧은 곳에 응용이 예상된다.

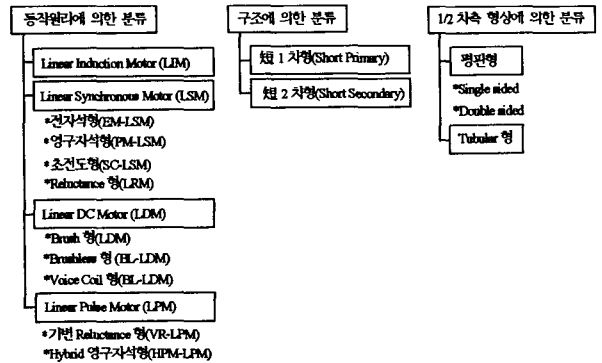


그림 3. 리니어 모터의 분류⁶⁾

3.3 제어 시스템의 구성

그림4는, 회전형 AC-Servo 모터로 구성된 이송시스템과 리니어 모터를 사용하였을 경우의 이송 시스템의 구성을 나타내고 있다.

일반적인 공작기계의 이송 시스템은 회전형 AC-Servo 모터, 엔코더, 기어(벨트), 커플링, 볼스크류, 너트, 가이드로 구성되어져 있다. 그러나, 정밀한 위

치 정도를 요하는 공작기계에서는 각종 기구화적인 오차를 보상하기 위하여 리니어 스케일을 추가해서 사용하기도 한다.

그림 4 (a) 에서는 회전형 AC-Servo 모터의 구성을 보여 주고 있다. 볼스크류와 모터는 토오크의 이용도를 높이기 위하여 일정한 비를 갖는 기어를 사용하였다

그러나, 그림 4 (b)에 나타낸 것과 같이 리니어 모터를 이용할 경우에는, 리니어 모터, 리니어 스케일, 가이드로 구성되어, 각 기구부를 생략 할 수 있는 시스템 구성이 가능하며, 구조의 단순화를 실현시키고 있다.

표1은, 이러한 각각의 시스템 구성에 의한 장· 단점을 비교 정리 한 것이다.

AC-Servo 모터 시스템의 경우 최대의 장점이라고 할 수 있는 것은 구입이 용이하고 저렴한 가격이라고 할 수 있다. 그러나, 회전운동을 직선운동으로 변환하는 변환 기구를 필요로 함은 물론, 충분한 강성을 실현시키기에는 불충분한 것이 현실이다.

왜냐하면 변환 기구(볼스크류)의 이용으로 인한 기구화적인 Backlash등의 오차가 발생하며, 볼스크류의 볼의 회전에 의해 발생하는 진동이 고정밀을 요하는 공작기계에는 문제시 되고 있다.

그러나, 리니어 모터 시스템은 직접 구동 방식이므로 상술한 것과 같은 문제점이 없으며 더우기, 경량,

구조의 단순화, 고속 이송, 고정도, 고강성 등을 장점으로 열거 할 수 있다. 또, 보수성이 우수하며 신뢰성 면에서 뛰어난을 들 수 있다.

반면, 장비의 가격이 높고, 일반적으로 발열이 문제시 되고 있다.

표 1. 각 시스템 구성에 의한 장· 단점 비교표

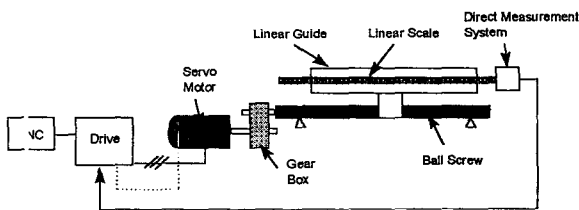
정점	AC Servo Motor System		Linear Motor System
	최대속도	50m/min	800 m/min
최소피더 위치	0.1μm정도	0.02μm정도	
장점	·구입이 용이 ·가격이 저렴 ·내구성	·고속이송고정도 ·고강성, 고강성 ·비정축 구동(Backlash 없음) ·구조의 단순화(소형,경량화) ·신뢰성보수성 우수 ·저음	
	단점	·변환기구 필요(회전→직선운동) ·강성 저하 ·Backlash진동 발생	·발열 ·가격

4. 리니어 모터를 이용한 머시닝 이송 장치의 개발

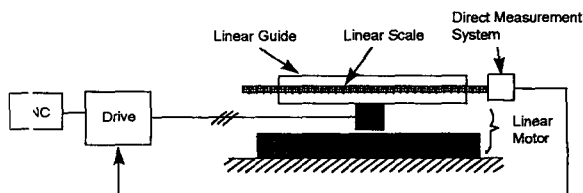
4.1 시스템의 구성

개발한 리니어 모터를 이용한 머시닝 센터 이송 장치(1700 × 1800 × 1300mm)는 그림 5 에 도시한 것과 같이, X 축 위에 Y 축이 있는 2 축으로 구성하였으며 기존의 머시닝 센터의 베드 위에 구축 하였다.

리니어 모터(KRAUSS-MAFFEI Co., Ltd.)의 전류 및 속도, 위치 제어에 필요한 위치는 리니어 스케일(HEIDENHAIN Co., Ltd.)로 검출하여 사용한다.



(a) AC-Servo 모터를 이용한 이송 장치 시스템



(b) 리니어 모터를 이용한 이송 장치 시스템

그림 4. AC Servo 모터 시스템과 리니어 모터 시스템과의 비교

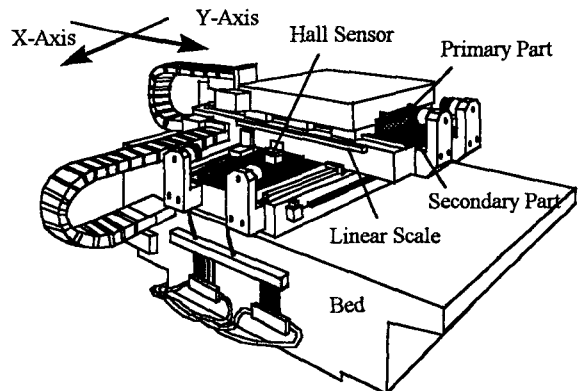


그림 5. 리니어 모터를 이용한 머시닝 이송 장치의 개략도

4.2 위치 결정 정도 특성

위치 결정 정도의 측정은, 이송 축의 이송 변위를 Laser 측정기(RENISHAW, 분해능 1nm))를 이용했으며, 측정기에는 측정 환경 보상을 할 수 있는 센서가 겸비 되어 있다. 측정된 데이터는 컴퓨터에 저장되어 분석할 수 있도록 구성되어 있다.

측정은 이송 축의 운동 방향을 정, 역으로 1 μ m씩 10 계단으로 이송 시켜 나타나는 위치를 실시간으로 측정 하였다.

그림 6은, X 축을 정, 역 방향으로 1 μ m씩 10 계단의 지령치에 대한 이송 축의 위치 결정 정도를 측정한 결과이다.

그림의 횡축은 시간을, 종축은 위치를 나타내고 있으며, 500Hz로 Sampling 하였다. 한 Step의 Dwell Time은 2초로 하였으며, 축의 이송 속도는 1000mm/min로 하였다.

그림의 측정 결과와 같이, 지령치에 대한 정확한 위치 결정을 하고 있으나, 약간의 노이즈를 포함하고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 각 계단의 위치 결정이 끝난 상태에서의 노이즈 성분은, 테이블의 상단에서 측정하는 관계로 Laser 측정기(그림 5 참조) 및 기계 베드 구조의 불안정에 의해 발생하는 것으로 구동에 의해 발생하는 것은 아니라고 판단된다.

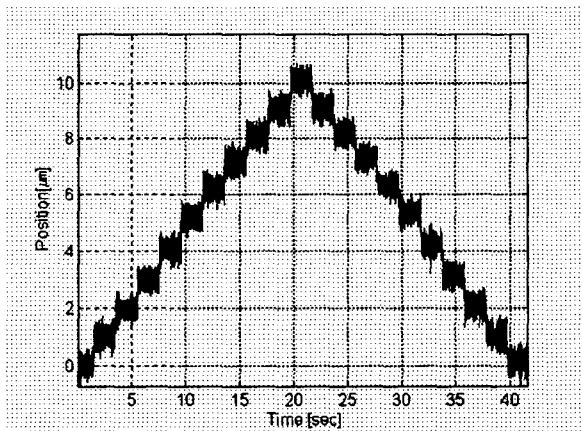


그림 6. 위치 결정 정도 측정 결과

4.3 반복 위치 결정 정도 특성

일정한 명령에 대한 반복 위치 결정 정도 특성을 확인하기 위하여 1 μ m의 지령치에 대한 응답을 50회 측정하여 그 결과를 그림 7과 같이 정리하였다.

그림의 종축은 위치 결정 정도의 오차율, 횡축은 횟수를 나타내고 있다. 측정 결과와 같이, $\pm 0.2 \mu$ m

이내의 뛰어난 반복 위치 결정 정도를 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

4.4 최대 이송 속도 및 가·감속 특성

시험 장치의 최대 이송 속도 및 최대 이송 속도에 이르기까지의 가·감속 시간을 확인 하기 위하여 Controller에서 공급하는 D/A Converter 채널과 오실로스코프를 이용하여 측정하였다.

그림 8은, 각 축의 최대 이송 속도를 측정한 결과를 나타내고 있다. 그림과 같이 116m/min의 최대 속도로 실현시키고 있는 것을 알 수 있다.

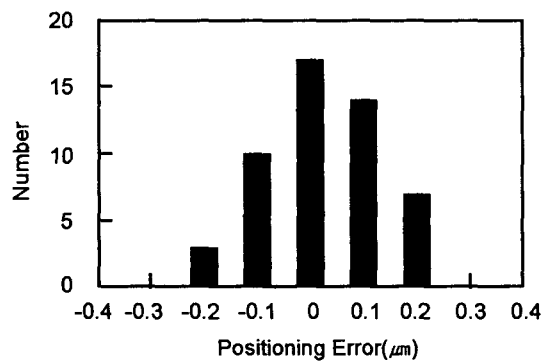
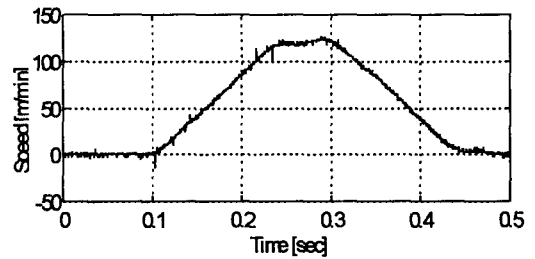
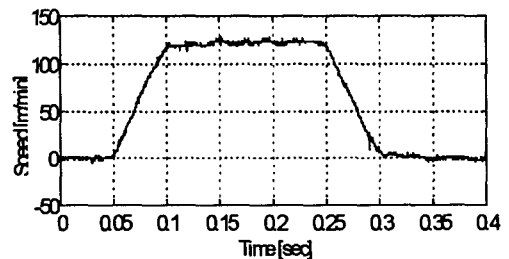


그림 7. 반복 위치 결정 정도 측정 결과



(a) X 축



(b) Y 축

그림 8. 최대 이송 속도 및 가·감속 시간 측정 결과

가·감속 시간은, X축의 경우 각각 0.14sec, Y축의 경우는 0.06sec 인 것을 알 수 있다.

현재 당사가 생산하고 있는 공작기계의 최대 이송 속도(약 30m/min)와 비교해보면 약 4 배의 속도를 실현시키고 있을 뿐만 아니라, 675kg의 축을 0.14sec의 속도로 가·감속 시키는 특성을 보이고 있다.

4.5 원호 보간

가공 정도에 결정적인 영향을 미치는 요인 중의 하나인 운동 정도를 확인하기 위하여, 개발한 이송 장치에 원호 보간을 실시하였다.

그림 9는 그 측정 결과이다. 측정은 Controller가 공급하는 S/W를 사용하여 반경 100mm, 이송 속도 500mm/min로 이송하도록 프로그램을 작성하여 각축의 운동 정도를 리니어 스케일로 입력 처리 하였다.

회전은, 시계 및 반시계 방향으로 각각 2회 반복 측정하여 플롯 하였다

그림의 횡축은 X축을, 종축은 Y축을 표시하고 1눈금이 5 μ m로 표시하였다. 비록 측정 결과는 리니어 스케일의 의한 노이즈 성분을 포함하고 있으나, 대단히 양호한 운동 정도를 나타내고 있다.

기타, 시험 장치의 주요 기계적인 특성은 표 2에 나타낸 것과 같다. 특히 공작기계에서 중요시되고 있는 항복 중의 하나인 정강성은 각축이 26000N/ μ m이고, 최대 가속도는 X축이 1.4G, Y축이 3.3G로 공작기계에 이용하는 데 충분한 특성을 구현 시키는 데 성공하였다.

5. 결론

본 연구에서는 이상과 같이 리니어 모터의 및 특성에 대하여 검토 하였다. 또, 실 시스템(용이 가능한 고속 이송 장치를 개발하여, 그 특 측정을 통하여 확인 분석 하였다.

현 시스템은 뛰어난 동적 제어 특성, 속도, 가속 동기성으로 생산성을 향상 시키는 기계 장치의 0, 장치로 활용하기에 충분한 것으로 판단된다.

표 2. 기계적인 특성

	X축	Y축
WEIGHT	675 kg	230 kg
MAX. AXIS STROKE	660 mm	530 mm
MAX. ACCELERATION	1.4 G	3.3 G
MAX. VELOCITY	116 m/min	116 m/min
PEAK FORCE	14500 N	14500 N
CONT. FORCE	6600 N	6600 N
ACCURACY	0.5 μ m	0.5 μ m
STIFFNESS	26000 N/ μ m	26000 N/ μ m

6. 참고문헌

- (1) 최종률, "산업용 고속·고정도 서보/스핀들 드라이브 기술의 최근 동향과 향후 발전 전망", 대한 전기 학회 학회지, pp.28-32, 제 45 권 1호 1월, 1996
- (2) R. Hagl, "Elektrische Direktantriebe fuer Werkzeugmaschinen und Industrieroboter", *Antriebstechnik 31 Nr.4*, pp32-45, 1992.
- (3) W. Philipp, *Regelung mechanisch steifer Direktantriebe fur werkzeugmaschinen*, Springer - Verlag, ISW92, 1992.
- (4) Linear Motor Catalog, KRAUSS MAFFEI Co., Ltd.
- (5) 山田一編著, 리니어 모터와 응용 기술, 實教출판.
- (6) 白木學, 宮尾修美 著, 圖解리니어 모터와 시스템 설계, 總合電子출판.
- (7) Yamada, *Linear Motor Handbook*, 1987.
- (8) Nikkei Mechanical, p20 ~ 25, 1994. 12.
- (9) Anorad Corp., "Anoline Linear Motors" *Data book*, p3 ~ 15, 1990.
- (10) HD 형 Motor Catalog, 神鋼電機(주)
- (11) Maching Centers Catalog, EX-CELL-O Co., Ltd.
- (12) High Velocity Catalog, INGERSOLL Co., Ltd.

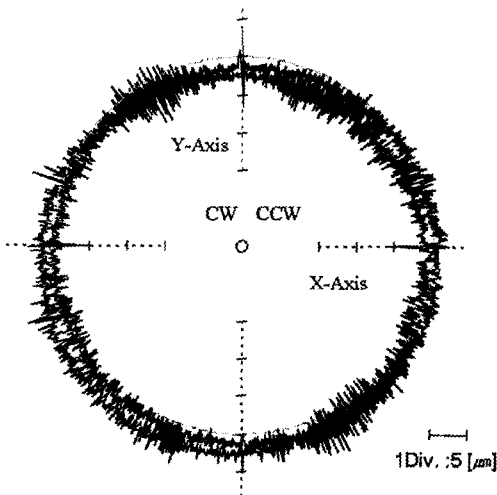


그림 9. 원호 보간 측정 결과