

무철심형 리니어모터 개발 Development of Coreless Linear Motor

성재한*(삼익공업 기술연구소), 박재완(삼익공업 기술연구소), 이상룡(경북대학교)
Jae-han Joung Jae-wan Park Sang-ryong Lee

Abstract

Liner DC motors are widely used for servo-actuator, which would be applied for semiconductor equipments and precise machining systems. we have been developed linear DC motor with high speed, acceleration and position accuracy. From performance test, the position and repeatability accuracy were able to be controlled with 10 μm and $\pm 1 \mu\text{m}$, respectively. The highest acceleration and speed were obtained 3 G and 2 m/sec, respectively. Static thrust force was 270 N, and then error was 25 %.

1. 서론

리니어모터(Linear Motor)는 기존의 회전형 모터와는 달리 별도의 변환기구를 사용하지 않고 전기 에너지를 바로 직선운동에너지로 변환시켜주므로 적용되는 구성부품 수를 적게 할 수 있어 구조가 간단하고, 추력 대 질량비가 클 뿐만 아니라 비접촉 구동이므로 보수와 신뢰성이 우수하다.

특히 리니어모터중에서, 브리시 없는 직류 리니어모터는 서보 제어특성이 뛰어나기 때문에 고속·고정도 위치결정이 필요한 반도체 제조장비와 정밀측정장비 분야의 액츄에이터로서 적용이 확산되고 있고, 이에 따른 연구도 활발하게 진행되고 있다.

본 연구는 브리시 없는 리니어 직류모터(Linear Brushless DC Motor : LBLDCM, 이하 "리니어모터")중에서 무철심(Coreless)형이면서 전기자(이동하는 가동코일형(Moving Coil)의 리니어모터를 개발하였으며, 개발사양에 대한 평가를 위하여 성능평

가를 실시하였다.

2. 설계사양 및 기본구조

본 연구에서 개발한 무철심형 BLDC모터는 다른 형식의 리니어모터와는 달리 소형, 경량화가 가능하고 지속에서 고속까지 자유롭게 회로 구성을 할 수 있다. 또 리니어 펄스모터와 같이 기계가공정도에 의존하지 않고 리니어 스케일을 이동 테이블에 직접 부착함으로써 Closed-Loop 제어가 가능하므로 정밀 위치 제어용에 적합하다. 또 무철심형인 경우에는 코깅(Cogging) 현상이 거의 없어 주행 중 속도 리플이 적어 정속한 운전을 할 수 있다.

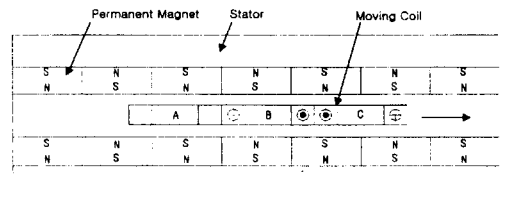


Fig. 1 Structure of moving coil type brushless linear DC moror

Fig. 1은 리니어모터의 구동원리를 나타낸 것으로서, 모터는 크게 고정자(Stator)와 이동자(Moving Coil)로 나누어져 있다. 고정자는 요크에 부착된 영구자석의 N,S극을 서로 마주보게 하고 인접하는 길이방향으로도 서로 상반되는 극성이 되도록 하여 일정간격으로 배치한 양측식 구조이다.

이동자는 영구자석 사이에 일정한 공극을 유지하면서 비접촉 상태에서 이동할 수 있는 구조로 되어있다. 또 추력은 이동자 전기코일의 수를 늘림에 따라 극수를 조절할 수 있는 3상 다극의 무철심형이면서 가동코일형의 구조를 가진다. 개발하고자하는 목표사양은

한편 자극을 검출하기 위하여 이동자 내부에 홀(Hall)센서를 부착시켜 3상의 120° 위상신호를 검출하여 1주기당 6번의 인가전류의 Commutation 이 이루어지도록 한다.

Fig. 4는 리니어모터의 단면도이며 Fig. 5는 리니어모터가 조립된 직선운동시스템의 외형을 나타내었다.

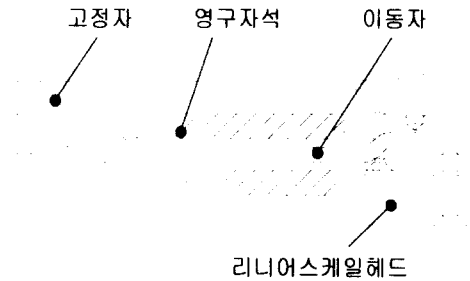


Fig. 4 Section view of linear motor

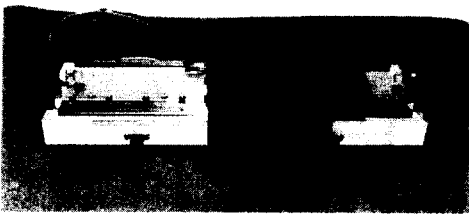


Fig. 5 The overall shape of linear motor

4. 제어부

전동기 제어 시스템은 대부분 아날로그 제어방식으로 사용하였으나 근래는 디지털 제어방식을 사용하는 추세이다. 디지털 제어기는 비선형 시스템을 포함한 광범위한 시스템에 복잡한 현대 제어이론을 적용할 수 있고 환경의 변화에 거의 영향을 받지 않는 안정된 성능을 발휘할 수 있다. 다만 디지털 시스템은 아날로그 시스템을 근사화 하므로 정밀도의 문제가 있으나 DSP소자와 같이 마이크로 프로세서의 처리속도가 빨라지고 비트 수가 증가하며, 각종 센서의 성능향상과 제어기술이 발전으로 실용적인 디지털 제어 시스템설계가 가능하다.

이에 본 개발에서는 디지털 제어를 설계하고 리니어모터에 적용하여 설계의 수정이나 개선에 유연성을 가질 수 있도록 하였다.

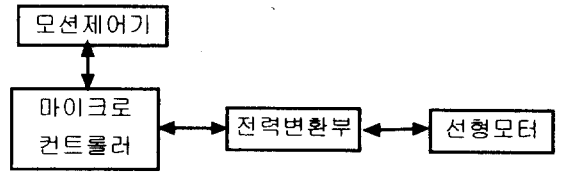


Fig. 6 Block diagram of linear motor system

Fig. 6은 전체 시스템의 구성도를 보여준다. 32bit 부동소수점 DSP인 TMS320C31과 메모리 부분인 ROM, RAM 및 통신을 위한 회로, CPU 주변회로를 내장한 EPLD(Erasable Programmable Logic Device)로 구성된 디지털 부와 모터에 전력을 공급하는 전력변환부, 전류를 측정하기 위한 아날로그 회로부분으로 구성된다.

드라이버의 메인보드인 마이크로 컨트롤러 및 주변회로구성은 Fig. 7과 같다.

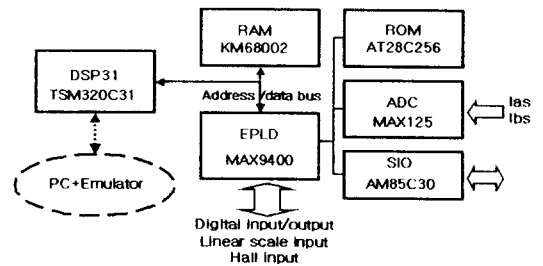


Fig. 7 Micro controller

5. 성능평가

5.1 이동자부 온도특성

실험은 실험실 온도 16°C 정도에서 이동자 부위에 Thermocouple을 장착한 후 Open Loop 상태에서 전류를 인가하고 이때, 이동자가 움직이지 않게 고정을 시킨 후, 전류의 양을 변화시키면서 실시하였다. 리니어모터가 정지되어 있을 경우, 3상의 결선에서 한 상으로만 전류가 인가되므로 순간적으로 흘릴 수 있는 전류량 및 만약의 사태에 대비해서 전류의 한계치를 정할 수 있으며, 실험시 I=3 A 이상에서 코일의 내열온도를 넘어서는 결과를 보이므로 Fig. 8에서 보듯이 정격전류 3 A 내에서 온도의 변화를 시간에 따라 전류를 변화시켜가면서 측정하였다.

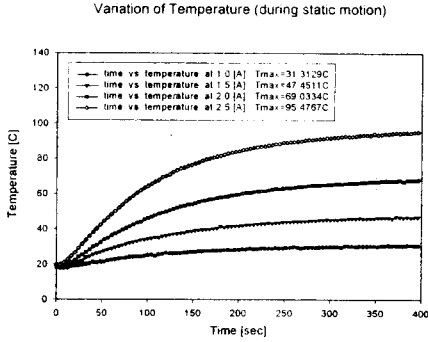


Fig. 8 The temperature variation under the static thrust

모터의 안정성을 위해 실제 운전중인 사용조건에서의 온도상승여부가 중요하다. 리니어모터가 운전시에는 3상의 코일에 홀센서의 스위칭에 따라 번갈아 가며 전류가 흐르게 된다. Fig. 9는 운전시 온도변화를 자세히 살펴보기 위해 짧은 시간 간격으로 온도를 측정한 결과를 나타낸 그래프이다.

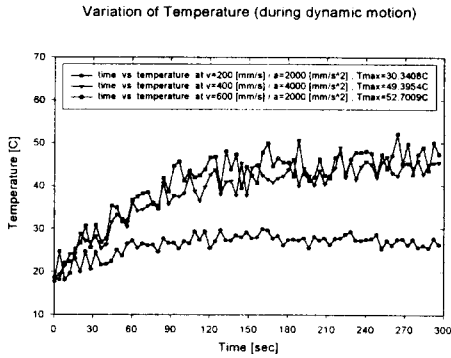


Fig. 9 The temperature variation under the moving state

정지시와 비교하면 온도 변화 폭이 많음을 알 수 있는데 이는 각 상에 인가되는 전류 스위칭 방향과 자연대류에 의한 공냉효과에 기인한 것으로 생각된다.

5.2 추력특성

회전형 모터에서 회전 토크에 해당하는 모터성능 사양이 리니어모터에서는 추력으로 나타난다. 구하는 방법으로는 기본이론에서 살펴본 바와 같이 주어진 데이터를 이용하여 계산한 이론치, 정지시 전류에 따른

추력의 변화를 로드셀로 측정된 실험치, 운전속도에 따라 발생하는 역기전력을 측정하여 구하는 방법 등을 검토할 수 있다.

Fig. 10은 3상 8극의 리니어모터에 대해서 로드셀을 이용한 추력 테스트 결과를 나타낸 그래프이며, Table 2는 측정된 실험치와 식 (1)의 이론치를 비교해서 나타낸 것이다. 이론치와 비교해볼 때 25%정도의 오차가 발생하였다.

이는 식 (1)과 같이 모델을 단순화 시킨 계산식으로 계산함에 따라 생기는 이론식의 오차와 추력에 영향을 미치는 인자들의 물성치가 비선형임에 따라 생기는 오차로 사료된다.

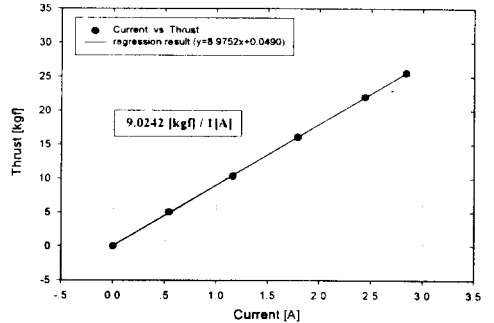


Fig. 10 Thrust force of linear motor (3 Phase, 8 Pole)

Table 2 The comparison of thrust force

	추력(kgf)	오차
실험치	27.15	25%
이론치	36.19	

5.3 위치, 반복위치 정밀도

리니어모터는 기존의 회전형 모터를 사용한 직선 유니트에서 발생하는 Backlash와 같은 위치정밀도에 영향을 주는 부분이 없이 리니어스케일에서 피드백 되는 위치신호에 의존하여 정밀도가 결정된다. 본 실험에서는 위치 및 반복위치결정 정밀도를 JIS 규격(JIS B 6330-1980)을 기준으로 Laser interferometer를 사용하여 실험을 실시하였다.

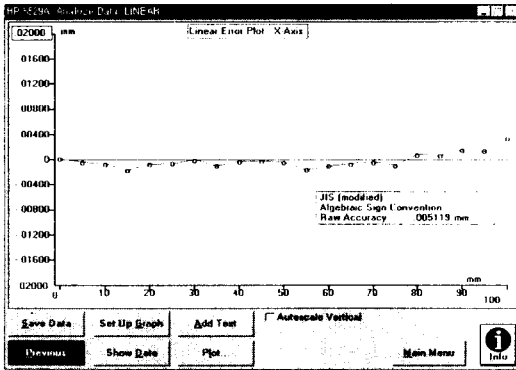


Fig. 11 Position accuracy of Linear motor

Fig. 11은 분해능 $0.5 \mu\text{m}$ 인 리니어 스케일을 사용하여 100 mm 구간을 5 mm 간격씩 측정한 데이터를 나타내는 그래프이며, 기준값이 50mm에 대한 위치 결정 정밀도를 계산하면 $3.7 \mu\text{m}$ 로 나타났다.

Fig. 12는 100mm 구간을 7회 왕복하면서 실제 측정된 데이터를 나타낸 그래프로 나타낸 것인데 반복 위치 정밀도는 $\pm 0.3355 \mu\text{m}$ 로 나타났다.

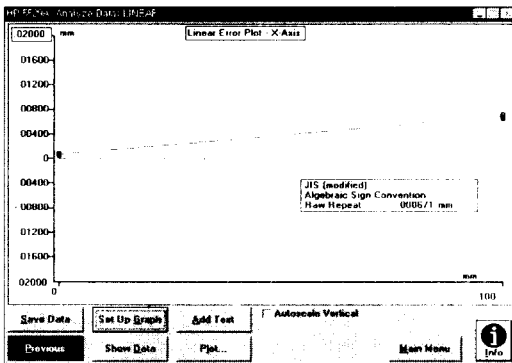


Fig. 12 Repeatability of linear motor

5.4 디지털 드라이버 성능평가

개발된 디지털 드라이버는 목표 직령입력에 대한 속도응답을 기준속도 -2m/sec 의 조건에서 Fig. 13과 같이 나타났으며, 위치오차는 Fig. 14와 같이 초기 과도응답이 나타남을 알 수 있다.

이는 대체적으로 목표하는 성능사항에 준함을 확인하였다.

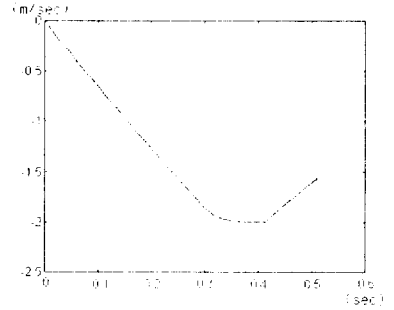


Fig. 13 Speed response at -2.0m/sec

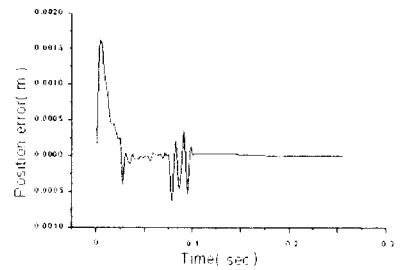


Fig. 14 Position error

6. 결론 및 향후 계획

본 연구를 통하여 Table 1의 기본 목표사항을 갖는 리니어모터를 개발하였으며 성능평가를 통하여 설계 목표치와의 차를 확인하였다. 결과에서 나타난 바와 같이 성능은 대체적으로 잘 만족함을 알 수 있었다.

그러나 성능사항 중 최대속도는 위치정도와 상반되는 관계에 있으므로 1개의 리니어스케일 적용으로 두 가지 사항을 동시에 만족하지는 못하였다. 본 개발에서는 위치정밀도 $5 \mu\text{m}$ 실현을 위해 Resolution이 $0.5 \mu\text{m}$ 인 리니어스케일을 적용하였으며 최대속도 2m/s 이상을 실현하기 위해서 Resolution이 $5 \mu\text{m}$ 인 제품을 적용하였다.

최대속도 높이기 위해서는 현재 공급되는 인가전압을 AC110V에서 AC220V로 높여게 되면 역기전력에 의한 속도한계를 극복할 수 있어 현재보다 더 빠른 3~4m sec의 속도성능을 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

최대추력은 개발 표준품인 4kg, 8kg, 12kg의 경우

18.93 kgf, 27.15 kgf, 38.0 kgf로 각각 나타나서, 12극의 경우 목표사양인 최대추력 300 N을 만족한다.

리니어모터의 최대 장점은 고속, 고가속, 고정도의 성능사양인데, 주로 반도체제조장비나 측정장비와 같은 부가가치가 높은 분야에 많이 적용되고 있다. 향후에는 리니어스케일이나 세어기 등 주변 장치 기술의 향상으로 보다 고성능화 된 리니어모터 출현이 예상되고 그 보급이 확대될 것으로 생각된다.

본 개발에서 채택한 무철심형(Coreless type)의 구조적인 추력한계를 극복하기 위해 향후에는 철심형(Core type)의 고추력용 리니어모터 개발이 필요할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 산업기반기술개발사업 중 “자동화기기용 고속 직선이송 기술개발에 관한 연구(A00-971-2305-01-1-2)”로 산업자원부의 연구사업비 지원에 의하여 수행하였으며, 이에 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) A. Basak, 1996, *Permanent-Magnet DC Linear Motors*, Clarendon Press, Oxford
- (2) S. A. Nasar and I. Boldea, 1987, *Linear Electric Motors: Theory, Design and Practical Applications*, Prentice-Hall, Inc.
- (3) 山田 一, 1976, *リニアモータと應用技術*, 實教出版株式會社
- (4) 白木 學 と 宮尾 修美, 1986, *圖解リニアサーボモータとシステム設計*, 綜合電子出版社
- (5) 山田 一, 1984, *リニアモータとその應用*, 電氣學會
- (6) 正田 英介, 1991, *リニアドライブ技術とその應用*, オーム社
- (7) 武富 正喜 외 5명, 1993, "高精度大加速度 리ニア모ータ의開發", *T. IEEE Japan*, Vol.