

◆특집◆ IT활용을 통한 제어 시스템의 기술발전과 나노 정밀도 구현방안

초정밀 선형 모터의 설계 기술

이우영*, 임경화**, 설진수***, 김현철****

Design of Super-precision Linear Motor

Woo Young Lee*, Kyung Hwa Rim**, Jin Soo Seol***, Hyun Chul Kim****

Key Words : Linear Motor(선형 모터), Motor Characteristic(모터 특성), Positioning system(위치결정 시스템)

1. 서론

현대 산업의 고도 성장에 따라 산업 기기의 소형화, 고속화가 이루어지고 있으며 고정밀/고정도의 위치·속도 제어가 필요한 구동기의 필요성이 날로 높아지고 있다. 선형 모터(linear motor)는 이러한 조건을 만족시키는 구동기로서 Fig. 1 과 같이 회전형 모터를 잘라 펼친 구조로 되어 있다. 회전형 모터의 경우 무한연속 회전운동을 하지만 선형 모터는 구동 길이가 유한하여 입구단(entry end)과 출구단(exit end)이 존재하므로 누설자속과 에너지의 손실을 유발하는 단부 효과(longitudinal end effect)가 나타난다. 또한 측면 모서리방향에서도 모터의 추력 및 수직력 등의 에너지 손실이 발생되는데 이를 횡방향 모서리효과(transverse edge effect)라 한다.¹ 이러한 단점이 있는 반면 선형 모터는 직선 구동이 필요한 시스템에 볼 스크류, 기어 등의 회전-직선 변환 기구 없이 직선 운동을 얻을 수 있고 구조적으로도 간단해짐으로써 협소한 공간에서도 사용할 수 있다. 또한 기구 간의 마찰이 극히 미소하여 소음과 진동이 적고 유지

보수에 탁월한 장점을 가지고 있다. Table 1 은 볼 스크류(ball screw)와 선형 모터의 장단점을 각각 비교하였다.

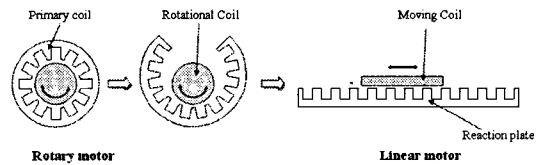


Fig. 1 Basic structure of linear motor

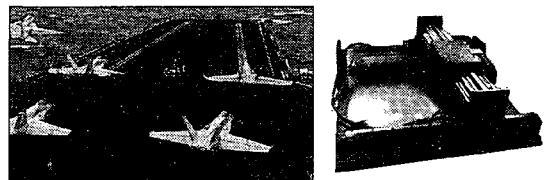


Fig. 2 Application of the linear motor in the industry

선형 모터는 18 세기 중반에 발명되어 초기 섬유 공업에서 사용되었으며 그 후 1946 년, 미국에서는 항공 모함에서의 항공기 이·착륙 보조 장치(electromagnetic aircraft launch system)로서도 개발되었다. 지금은 선행된 많은 연구 결과를 바탕으로 차세대 이동 수단인 자기 부상 열차(magnetic levitation train), 초정밀 반도체 장비(semi-conductor equipment), 직교 로봇(XY stage) 등의 산업 기기와 프린터, 광 드라이브 등의 컴퓨터 산업 등에서 핵

* 한국기술교육대학교 기계정보공학부

Tel. 041-560-1134, Fax. 041-560-1253

Email : wylee@kut.ac.kr

** 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

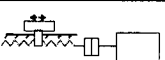

*** 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학과 대학원

**** 한국기술교육대학교 기계공학과 대학원

심 구동 장치로서 많은 응용 개발과 연구가 되고 있다. 한국에서는 1996 년 처음 개발 및 상용화가 이루어졌으며 현재 500 nm 급의 정밀도를 가지는 선형 모터와 스테이지가 상용되고 있다.

본 논문에서는 선형 모터의 분류, 응용 분야 그리고 적용 예에 대하여 기술하고자 한다.

Table 1 Comparison between ball screw and linear motor

Type Item	Ball screw	Linear motor
Structure		
High-speed	Difficult	Very easy
Acceleration	Inevitable limit by structure	Depend only on motor/load
Position accuracy	Difficult	Easy
Stroke	Physical constraint	No constraint
Multi-mover operation	Only 1 ball screw per 1 mover	Multi-mover operation
Noise at high-speed	Very noisy	Very silent
Environmental problem	Some environmental	Clean room operation

2. 선형 모터의 분류 및 특징

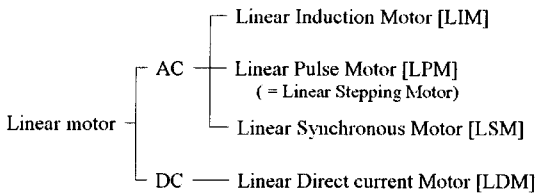


Fig. 3 Classification of linear motor

선형 모터의 분류는 구동 방식, 구조, 가이드 부(guide way) 등에 따라 여러 종류로 나뉘게 된다. 일반적으로 회전형 모터와 구동 원리가 비슷하므로 분류 또한 유사하다. 본 논문에서는 이를 전부

다룰 수 없으므로 구동 방식과 구조에 따른 선형 모터 종류에 대하여 논하였다. 구동 방식에 따른 분류는 Fig. 3 과 같으며 각각의 선형 모터 원리 및 특징은 다음과 같다.

(1) 유도형 선형 모터

유도형 선형 모터(LIM, linear induction motor)의 근본적인 원리는 일반 회전형 유도전동기와 동일한 로렌츠힘(Lorentz force)의 원리이다.¹ 이동자 코일(moving coil)과 도체판(reaction plate)의 자력에 의하여 와전류가 발생된다. 이 때의 와전류와 공극 자속이 상호 작용으로 추력이 발생되어 이송체(mover)를 움직이는 원리이다. 사용 분야로는 자동문 개폐 장치, 콘베어 시스템(conveyor system) 구동 등 간단한 산업 장치에 사용되며 일본에서는 공간 최소화 및 건설비 절감을 위해 Fig. 4 와 같이 소형 지하철에도 사용되고 있으며 일본에서 개발 중인 자기부상식열차에도 응용되고 있다.



Fig. 4 The subway in Tokyo used to a LIM

(2) 선형 펄스 모터

선형 펄스 모터(LPM, linear pulse motor)는 회전형 스텝 모터(step motor)와 동일한 원리로서 매 입력 전류 펄스 신호에 대하여 1 펄스씩 직선 운동을 하는 모터이다. 구조적인 특징으로는 펄스 신호에 따라 이동하므로 반드시 치와 홈이 있어야 한다. 선형 펄스 모터는 자체적으로 위치결정능이 있기 때문에 페루프 제어 없이 위치는 물론 속도, 가속도의 정확한 감지가 가능하다. 위치결정능력은 스텝구동과 다상구동방식에 의해 결정된다. 선형 펄스 모터의 분류는 자기 회로 구성, 자기 회로 상수, 치의 재질, 여자 방식 등에 따라 구분되며 각각의 모터 특성도 달라지게 된다. 응용 분야로는 프린터, 용접 로봇(welding robot), 혈액순환기, 인공심장용 액추에이터(actuator) 등에 활용되고 있다.¹

(3) 동기형 선형 모터

동기형 선형 모터(LSM, linear synchronous motor)는 회전형 동기 모터를 축방향으로 잘라 펼친 형태이므로 구동 원리는 회전형 동기 모터와 동일하다. 동기형 선형 모터 또한 전자석형, 초전도 코일형, 영구자석을 이용하는 영구자석형, 유도자형으로 구분된다. 응용 분야로는 Fig. 5 와 같이 자기부상열차의 구동 시스템으로 사용된다. 실제로 1999 년 독일에서 시속 500 km/h 급의 자기부상열차가 개발되기도 하였다. 또한 대이송/고분해능을 요구하는 위치결정시스템(positioning system)에 광범위하게 활용되고 있다.



Fig. 5 LSM type guide way of magnetic levitation train

(4) 직류형 선형 모터

직류형 선형 모터 (LDM, linear direct current motor)의 기본 원리는 Fleming의 왼손법칙(Fleming's rule)과 같으며 특징으로 구조가 간단하고 고속 동작이 가능한 반면 모터 자체의 위치결정기능이 없어 위치·속도센서와 같이 사용해야만 하는데, 이 경우 고정밀도의 위치결정과 속도제어가 가능하다. 직류형 선형 모터는 가동자와 고정자의 구성에 따라 전기자가동형(moving armature type), 코일가동형(moving coil type), 자석가동형(moving magnet type)으로 구분된다. 응용 분야로는 광 드라이브(optical drive), 플로피 드라이브(floppy drive), 각종 로봇, 광학 기기 등에서 응용되고 있다. 최근에는 직교좌표형 로봇, 선박추진용 선형전동기, 하드디스크용 보이스 코일형(voice coil type) 모터 등에도 활용되고 있다.²

위에서 보듯이 구동 방식에 따른 선형 모터는 여러 종류로 나뉘며 각각의 특성이 있다. Table 2 는 각각의 선형 모터에 대한 응용 특성을 나타내고 있다.^{1,3}

Table 2 Characteristic of the linear motors

Classification	LIM	LPM	LSM	LDM
Function				
Continuous linear operation	Best	Better	Best	Good
Discontinuous linear operation	Good	Best	Better	Best
Short stroke	Good	Best	Good	Best
Long stroke	Best	Better	Best	Good
Positioning control	Good	Best	Good	Best
High-thrust	Best	Better	Better	Better
Low-speed operation	Better	Best	Good	Better
High-speed operation	Best	Good	Best	Better
Closed-loop Control	Better	Best	Bad	Bad
Vertical operation	Good	Better	Good	Good

선형 모터의 구조에 따른 분류는 공심형(coreless type)과 철심형(core type)으로 분류된다.

공심형은 Fig. 6 과 같이 이송자(moving member)와 고정자(magnet)으로 구성되어 있으며 이송자에 철심(core)이 없으므로 정확히 위치를 맞춘 코일(coil)을 수직으로 고정시키고 고정자는 영구 자석을 U 자 형으로 된 철판에 고정시킨 구조로 되어 있다. 공심형의 특징은 흡인력 및 코깅 힘(cogging force)이 없어 가이드 부의 속도 변동이 적고 저소음, 저추력 리플화에 적당하다.⁴

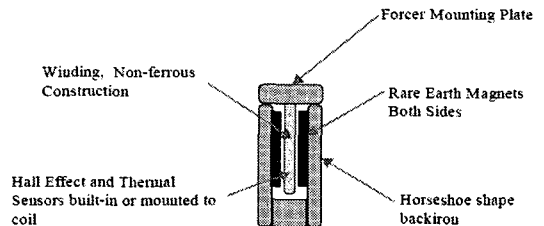


Fig. 6 Coreless type linear motor diagram

철심형은 Fig. 7 과 같이 이송자가 철심과 코일로 함께 구성되어 있으며 이를 수지로 고정시켰으며 고정자는 공심형과 동일하게 영구 자석으로 구성되어 있다. 특징으로는 이송자와 고정자 사이에 큰 자기 흡인력과 코깅 힘이 발생하여 가이드 부의 마찰력이 커지게 된다. 반면 공간을 작게 차지하는 장점이 있다.⁵

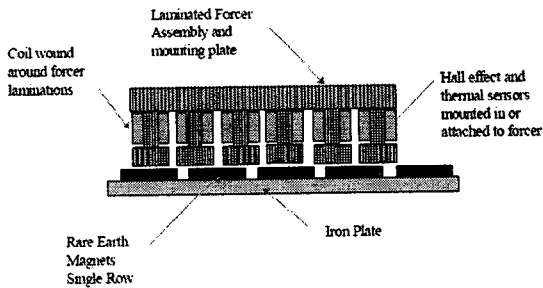


Fig. 7 Core type linear motor diagram

Table 3 Comparison for each type of linear motor

	Coreless	Core
Cost	High	Low
Attractive force	None	Highest
Cogging	None	Highest
Force/Size	Moderate	Best
Mover Weight	Lightest	Heaviest

3. 선형 모터의 적용 사례

현재 선형 모터의 발전으로 일반 가정에서 흔히 볼 수 있는 냉장고, 면도기 등에 활용되고 있으며 산업 현장에서의 응용 분야는 그 범위가 매우 넓다. 또한 연구 목적으로 압전 세라믹을 이용하여 10 mm 의 짧은 구간이지만 4 nm 까지 위치결정이 가능한 선형 모터도 국내 연구진에 의해 개발되었다. Table 4 는 주요 첨단 제품의 허용 공차를 나타내고 있다. 산업 현장에서의 적용 예를 몇 가지 살펴보면 Fig. 8 은 가정에서의 선형 모터 적용 사례로 국내 L 사의 냉장고와 일본 P 사의 면

도기로서 제품의 소음과 진동을 줄인 사례이다. Fig. 9 와 같이 단순히 부품 이송을 위해 선형 모터를 사용한 핸드폰 테스터기(Cellular phone tester)이다.

Table 4 Allowable tolerance of high-technology parts

Measurement	Dimension / Allowable tolerance
12" wafer flatness	300mm/100nm
1Giga bit mask panel Positioning accuracy	100mm/24nm
Optical fiber dimension tolerance	20 mm/10nm
DVD optical pickup objective lens shape accuracy	10mm/10nm
Aircraft engine dimension tolerance	500mm/500nm
Artificial satellite camera lens	300mm/100nm

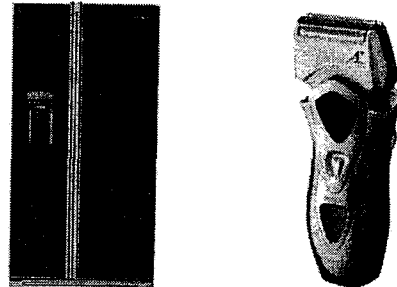


Fig. 8 Example for home appliances used to linear motor

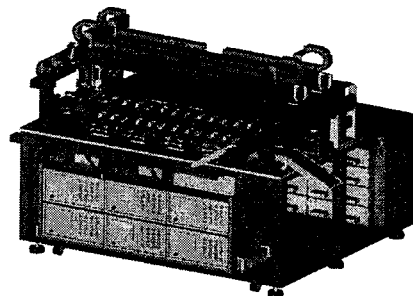


Fig. 9 Cellular phone tester

Fig. 10 은 XY 위치결정 시스템(XY positioning stage)으로 $100 \times 100 \text{ mm}$ 를 이동할 수 있으며 정밀도는 $\pm 1 \mu\text{m}$ 의 정확도를 갖는 시스템으로 레이저 다이아몬드 절단 시스템(laser diamond cutting system) 등에 사용된다. Fig. 11 은 국내에서 개발된 반도체 장비로서 회로 기판에 소자들을 실장하는 표면 실장 장비(SMT, surface mount technology)이다. 구동 범위 300 mm 에 대하여 $\pm 1 \mu\text{m}$ 위치정확도를 갖는다.

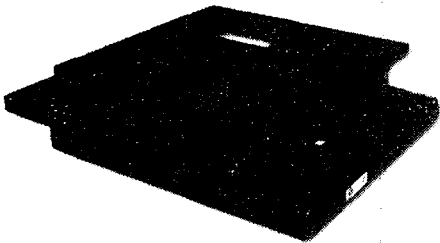


Fig. 10 XY positioning stage

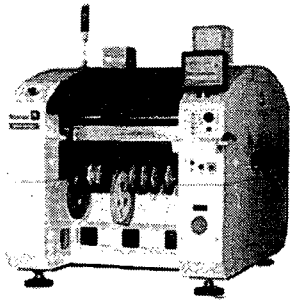


Fig. 11 SMT placement system

Fig. 12 는 7 세대 평판 패널(flat panel) 장비로서 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 이하의 위치정밀도를 갖는다.

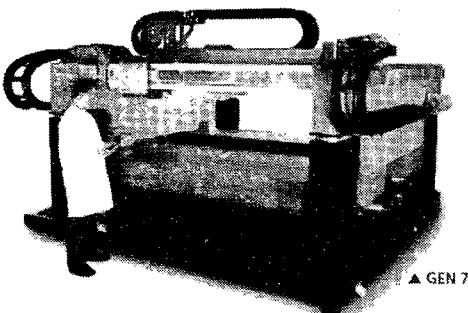


Fig. 12 Positioning system for GEN 7 Flat panel display

4. 선형 모터의 열·진동 평가 기술

선형 모터를 설계하기 위하여 열과 진동에 대한 평가는 매우 중요하다. 이동자와 고정자 사이에서 열과 진동의 발생으로 인하여 모터의 위치결정문제와 더불어 모터 자체의 파손을 야기할 수 있기 때문이다. 현재 상용화된 선형 모터는 이동자에 부착된 코일부의 최대 온도가 $60 \sim 80^\circ\text{C}$ 이하도록 설계되고 있다. 또한 진동은 이동자가 구동되면 발생하는 최대가속도에 대하여 시스템의 안정성이 확보되도록 이동자가 설계되고 있다. 비록 열·진동뿐만 아니라 이동자에 고정될 부하(load) 등의 특성 또한 고려되어야 하지만 우선 모터 자체의 안정성이 확보되어야 하기 때문에 이동자에 대한 열·진동 안정성을 평가할 수 있는 기술을 확보하여야 한다. 본 논문에서는 선형 모터에 대한 열·진동 평가에 직접 수행한 방법에 대하여 논하고자 한다.

4.1 선형 모터의 열 평가

선형 모터의 열 특성에 대한 평가는 열전대(thermocouple)를 주요 위치에 직접 부착하여 측정하는 기법과 유한체적법(finite volume method) 등을 이용한 수치 해석 기법이 있다. 그러나 수치 해석 기법으로 정확한 결과를 얻기 힘들다. 그러므로 실제 측정 결과와 비교하여 검증이 이루어진 후 수치 해석 기법을 사용해야만 한다.

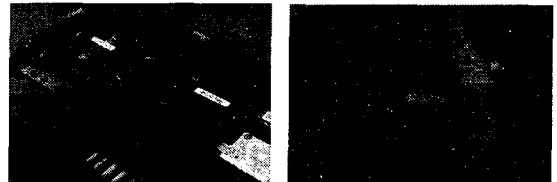


Fig. 13 Position of measurements

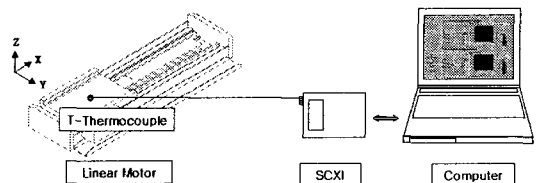


Fig. 14 Schematic diagram of experiment setup

먼저, Fig. 13 은 T 형(T-type) 열전대를 주요 위치에 부착한 것으로 Fig. 14 와 같이 실험 장치를

구성하여 이동자에 대한 직접적인 열 측정을 수행하였다. 이동자와 코일부에 대한 측정으로 구동시 최대 온도와 열 분포를 확인할 수 있다.

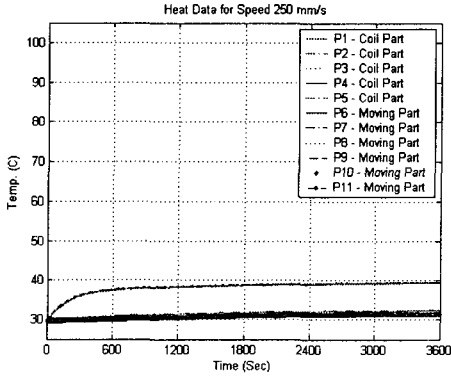


Fig. 15 Heat data of linear motor at 250 mm/s

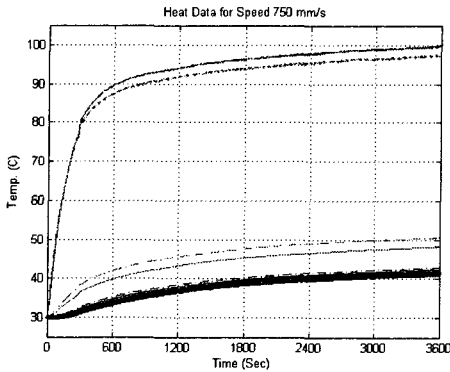


Fig. 16 Heat data of linear motor at 750 mm/s

Fig. 15 와 Fig. 16 은 속도를 변화하고 일정 구간 반복 구동 시키면서 1 시간 동안 이동자와 코일부에 대한 실제 측정 결과이다. 측정 결과 코일부의 온도가 최대 100°C까지 분포되어 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 전체적으로 온도가 고르게 분포되어 있는 것을 알 수 있으며 구동 후 3 분 이내에 최대 온도의 80%까지 상승하는 것을 알 수 있다.

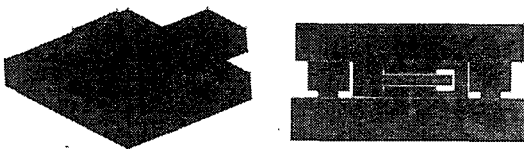


Fig. 17 Linear motor model for heat analysis through finite volume method

위의 측정 결과를 바탕으로 수치적인 해석을 하기 위해 Fig. 17 과 같이 선형 모터를 모델링하였다. 선형 모터의 반 대칭 구조를 이용하여 3 차원 반 모델 형상으로 단순화하였다. Fig. 18 은 유한체적법을 이용하여 얻은 수치 해석 결과이며 Table 5 에 해석 결과와 측정 결과를 비교하였다. 실제 측정 결과와 비교적 유사함을 알 수 있다. 이 결과를 바탕으로 추후 선형 모터의 이동자와 코일에 대하여 수치 해석만으로도 열 특성에 대한 결과를 유추할 수 있을 것이다.

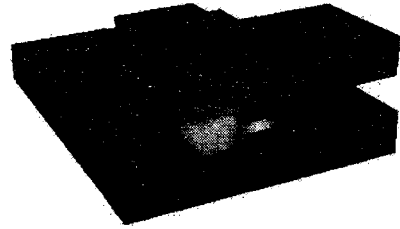


Fig. 18 Steady state heat analysis of linear motor

Table 5 Comparison of linear motor heat data

Result	Experimental result		FVM result	
	First temp.	Last temp.	First temp.	Last temp.
Mover	32°C	51°C	32°C	59°C
Coil	32°C	100°C	32°C	106°C

4.2 선형 모터의 진동 평가

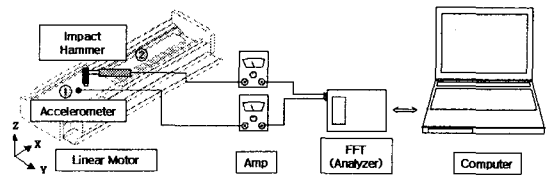


Fig. 19 Schematic diagram of experiment setup

선형 모터의 진동 평가는 주요 가진원이 되는 이동자에 대하여 모드시험(modal test)과 속도별 최대 가속도 측정을 수행하였다. 또한 열 평가와 동일하게 유한요소법(finite element method)을 수행하

여 실제 측정 결과와 비교, 검증하였다. Fig. 19 는 모드시험을 위하여 구성된 실험 장치로서 충격 해머(impact hammer)와 가속도 센서(accelerometer)를 이용하여 이동자의 고유진동수(natural frequency)와 모드형상(mode shape)을 각각 측정하였다.⁶ 측정 위치는 Fig. 20 과 같다.

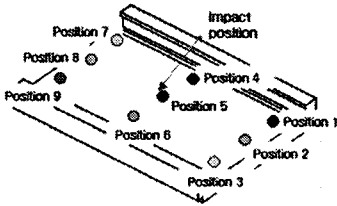


Fig. 20 Position of measurement

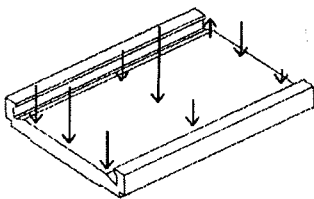


Fig. 21 Measured mode shape of mover

Fig. 21 은 이동자의 각각의 위치에 따른 모드 시험 결과의 크기와 방향을 나타낸 것이다. 1 차 고유진동수가 795 Hz 에 존재하는 것을 알 수 있다. 이 때 모드형상은 자유단 경계 조건을 가지는 일반 평판의 굽힘 모드와 유사하므로 선형 모터의 이동자 구속 조건은 자유 경계 조건(free boundary condition)에 가까움을 알 수 있다.

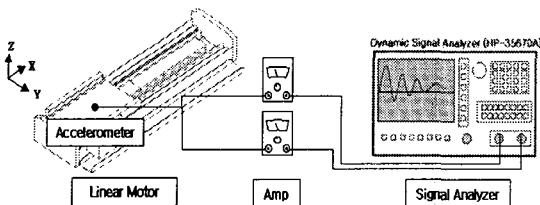


Fig. 22 Schematic diagram of experiment setup

주요 부품의 진동 크기를 확인하기 위하여 Fig. 22 와 같이 실험 장치를 구성하고 이동자를 일정 구간 반복 구동시키며 진동가속도를 측정하였다. Fig. 23 은 이동자가 수평방향(X 방향)으로 이동될 때 시간 영역의 가감속 거동과 진동에너지 분포

를 보기 위한 스펙트럼(spectrum)을 나타낸 것이다. 800 Hz (Point A)부근에서 이동자의 고유진동수 영향이 있음을 알 수 있다. 이는 앞서 측정한 모드 시험 결과와 유사함을 알 수 있다. 그러므로 이동자의 설계 시 이를 고려하여야 한다. 또한 가속도 형태가 일정한 가감속 진동 크기를 보이고 있는 것을 알 수 있고 고주파 진동 성분이 없는 것을 확인할 수 있다. 또한 주요 진동 가진원은 400 Hz 내외에 분포함을 알 수 있다.⁷

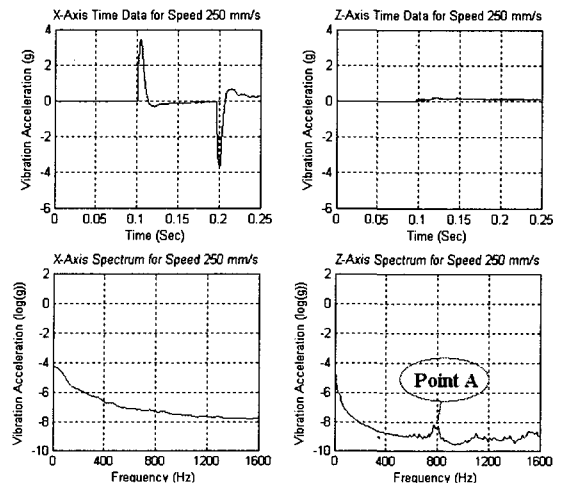


Fig. 23 Mover of linear motor at 250 mm/s

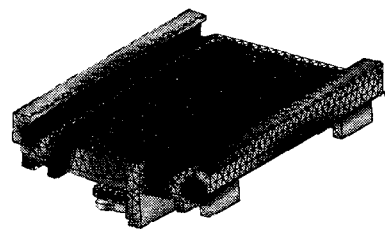


Fig. 24 Result of FEM in mover (753 Hz)

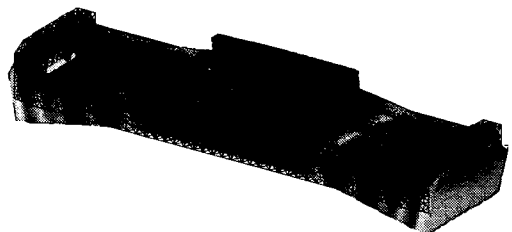


Fig. 25 Result of FEM in linear motor (370 Hz)

위의 결과를 바탕으로 유한요소법을 이용한 수치해석을 수행하였다. Fig. 24 는 이동자에 대한 수치해석 결과로서 앞서 모드시험에서 측정된 결과와 유사함을 알 수 있다. 그러므로 수치 해석 기법을 이용하여 추후 개발될 선형 모터의 진동 특성을 간접적으로 확인할 수 있음을 알 수 있다. Fig. 25 는 선형 모터의 수치 해석 결과이다.

5. 결론

선형 모터는 산업 기기의 직선 구동기로서 많은 장점이 있는 것을 알 수 있고 기술 발전으로 나노 구동이 가능한 선형 모터의 개발이 이루어지고 있다. 그러므로 초정밀 선형 모터의 열·진동 특성을 평가하기 위하여 실험 및 수치 해석 기법을 적용함으로써 평가 기술을 도출하였다. 또한 수치 해석 기법만을 이용하여 추후 개발될 선형 모터의 열·진동 특성을 간접적으로 확인할 수 있었다.

선형 모터는 전기, 전자, 소재 등의 핵심 기술이 집약된 기술로 독일, 일본 등의 선진 기술국에서는 고정밀/고정도 경쟁을 벌이고 있으며 각기 고유의 모델을 설계·제작함으로써 기술 우위에 있음을 표명하고 있다. 그러나 국내에서는 뒤늦게 연구 및 개발이 이루어져 아직은 선진 제품에 미치지 못하고 있으나 최근에는 국내 연구진에 의해 압전 소자를 이용한 나노 구동용 선형 모터와 자기부상열차 등이 개발됨으로써 고정밀/고정도 기술 선진국으로 당당히 발전할 수 있기를 기대한다.

참고문헌

1. Jang, S. M., "Technology and application of Linear motor," pp. 3 - 24, 1999.
2. Lee, G. W., Cho, Y. J., Song, C. S., "Development of a Brushless Linear DC Motor for High Speed and Precise Position Control," KSPE, Vol. 15, No 10, pp. 73 - 80, 1998.
3. Eun, I. U., "Positioning Technology by Linear Motor," KSPE, Vol. 17, No. 12, pp. 20 - 25, 2000.
4. Lee, C. H., "Ultraprecision Positioning Technology," KSPE, Vol. 17, No. 12, pp. 9 - 15, 1990.
5. Jack, J., Tim, H. and Jim, M., "Linear Motor Basics," Parker Hannifin Corporation, pp. 1 - 8.
6. Rim, K. H., Lee, E. K., Cho, J. K., "Vibration Analysis of Spin Etcher," KSSET, Vol. 2, No. 1, pp. 15 - 19, 2003.
7. An, C. H., Rim, K. H., "Dynamic Analysis of a Slider in Near-field Optical Recording Disk Drive," KSNVE, Vol. 13, No. 3, pp. 164 - 171, 2003.