

초정밀 선형 모터의 열·진동 분석

임경화^{*}, 이우영^{**}, 설진수^{***}, 김현철^{****}

^{*}한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부, ^{**}한국기술교육대학교 기계정보공학부,
^{***}한국기술교육대학교 대학원 기계공학과, ^{****}한국기술교육대학교 대학원 기계공학과

Abstract

Linear motor can directly apply to the system needed linear motions without rotary motions. To control a high-speed and high-resolution, the development of the linear motors is recently required in the high-integrated and speed process industry. This paper presents vibration analyses as well as measurement standards of the newly developed linear motors through analyzing the vibration characteristics and thermal behaviors of the advanced products. Vibration experiments are conducted for identifying the hysteresis and vibration level during operation. They are also included in the modal test to analyze the vibration. Analytic data using Finite Element Method (FEM) are compared with the results of the modal. Loss of temperature generated the linear motor leads to a serious deformation within its parts. The thermal behaviors are very important factor in linear motor. The FEM and experiments make it possible to understand these characteristics.

1. 서론

선형 모터(linear motor)는 회전-직선 변환 기구 없이 직선 운동이 필요한 시스템에 직접 적용할 수 있는 시스템으로 기계적 마찰과 백래쉬(backlash)가 없어 반도체 장비, 정비 자동화 기기, 고속 정밀 공작기기 등에 널리 응용되고 있다. 최근에는 고집적화, 초소형화에 따른 고속/고분해능의 제어가 가능한 선형 모터의 개발이 요구되고 있다. 이러한 선형 모터는 진동과 열에 매우 민감하며 특히 고속거동으로 인하여 그에 따른 심각한 문제를 유발한다. 본 연구에서는 선진 제품과 주관 기관에서 개발한 선형 모터의 진동·열 특성을 파악하여 설계 개선 방향을 도출하고자 한다. 최종적으로는 이를 적용하여 초정밀 제어가 가능한 선형 모터의 개발에 있다.

2. 실험 방법

2.1 진동가속도 측정

최근 개발된 고속/고분해능의 선형 모터는 최대 5000mm/s의 이송 속도와 20G이상의 가속도

를 발생하며 이송체(moving part)는 이러한 조건 하에 고속 정밀한 제어를 유지하여야 한다. 따라서 구동 시 취약한 이송체의 진동 특성을 분석해야 할 필요성이 요구된다. 본 연구에 사용된 선형 모터는 Fig. 1 과 같다.

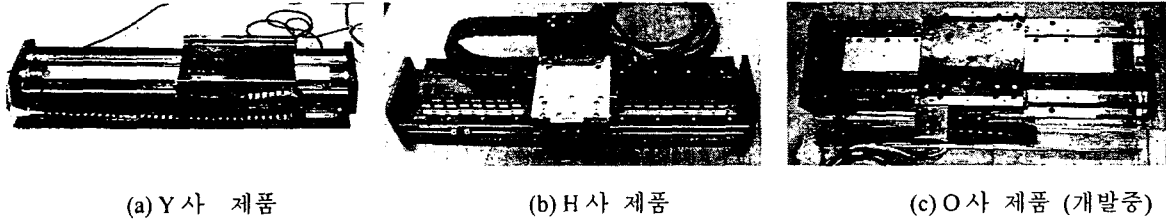


Fig. 1 Linear Motors

2.1.1 히스테리시스(Hysteresis) 측정

히스테리시스 측정은 Fig. 2 와 같이 실험 장치를 구성하고 펄스 발생기(pulse generator)를 구성하고 이송체를 일정한 구간을 이동시키며 LDV(laser doppler vibrometer)를 이용하여 미소 변위를 측정하였다.

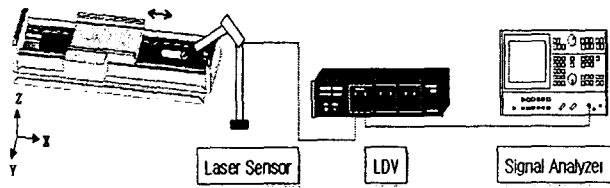


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

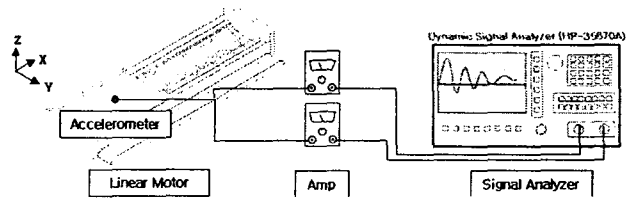


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

2.1.3 이송체의 구동 속도에 따른 진동가속도

주요 부품의 진동 크기를 확인하기 위하여 Fig. 3 과 같이 실험 장치를 구성하고 이송체를 반복적으로 이송하며 진동가속도를 측정하였다.

2.1.2 모드 시험(Modal Test)

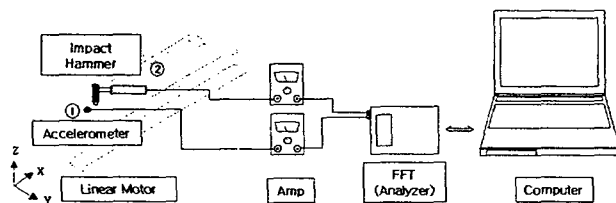


Fig. 4 Schematic diagram of experimental setup

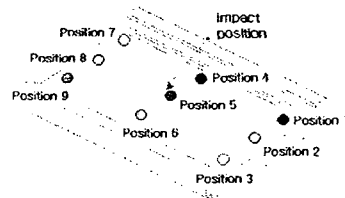


Fig. 5 Position of measurements

모드 시험(modal test)을 이용하여 구동 시 가장 취약한 이송체의 고유진동수 및 모드형상(mode shape)을 각각 측정하였다. Fig. 4 와 같이 충격 해머(impact hammer)와 가속도센서를 이용하여 Fig. 5 와 같은 위치에 대해서 주파수응답함수(frequency response function)를 구하였다.

2 유한요소법을 이용한 수치해석

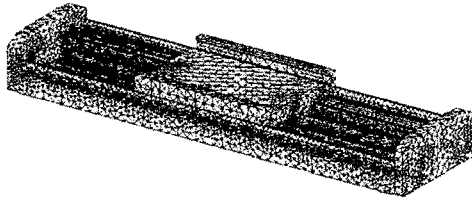


Fig. 6 Linear motor modeling for FEM

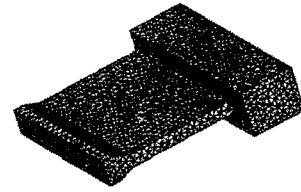


Fig. 7 Thermal Analysis Model

Fig. 6 과 같이 선형 모터를 간략히 모델링 한 후 모드 시험 측정 결과를 검증하고 차후 설계된 선형 모터를 검증하기 위하여 유한요소법을 이용한 해석을 수행하였다. 구조 해석을 위해 사용된 상용 프로그램은 MSC/Nastran을 사용하였으며 솔리드 모델링(solid modeling)을 사용하였다. 또한 열해석은 코일(coil)을 세부적으로 모델링하여 열전도와 대류조건만 있다고 가정하였고 상용 프로그램인 ANSYS를 사용하여 Fig. 7 과 같이 37,786개의 절점과 25,301개의 솔리드 요소(soild87)를 가진 열해석 모델을 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1.1 히스테리시스 측정

Table 1 Hysteresis of moving part

Motor	Error(μm)	Traveling Length(μm)	Percentage Error(%)
Y사(110 μm)	± 3	112.847	2.59
H사(100 μm)	± 7	104.045	4.60

Table 1 과 같이 선진 선형 모터의 위치 오차는 $\pm 10 \mu m$ 내외로 발생하였다.

3.1.2 모드 시험

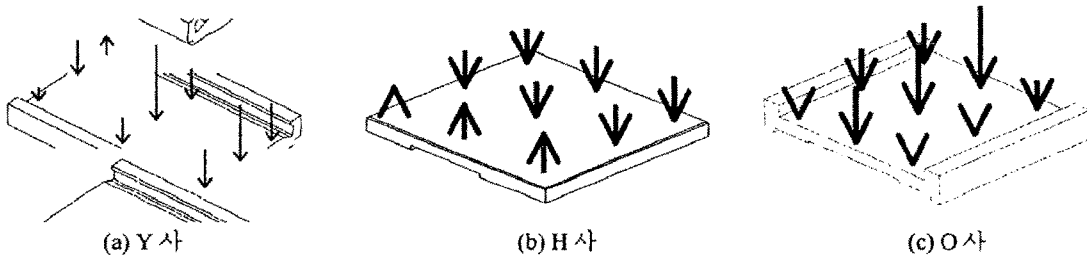


Fig. 8 Measured mode shapes

Table 2 Result of modal test

	Y사	H사	O사 (개발제품)
1 st natural frequency(Hz)	795	607.5	1330

Fig.8 과 같이 이송체의 모드 형상(mode shape)을 나타냈다. 이때의 고유진동수는 Table 2 와 같다. 또한 저주파수대역에서 선형 모터의 베이스(base)의 고유진동수에 의한 이송체의 변형이 측정되었다.

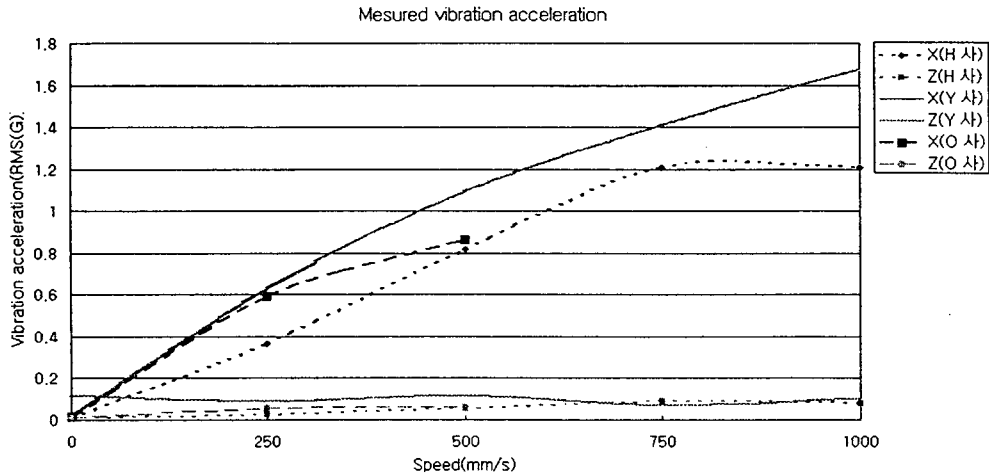


Fig. 9 Measured vibration acceleration

3.1.3 이송체의 구동 속도에 따른 진동가속도

Fig. 9 와 같이 선진 제품은 속도가 증가할수록 선형적으로 가속도가 증가하며 일정 속도 이상에서는 일정한 가속도량을 유지하였다.

3.2 유한요소법을 이용한 수치해석

3.2.1 구조 해석

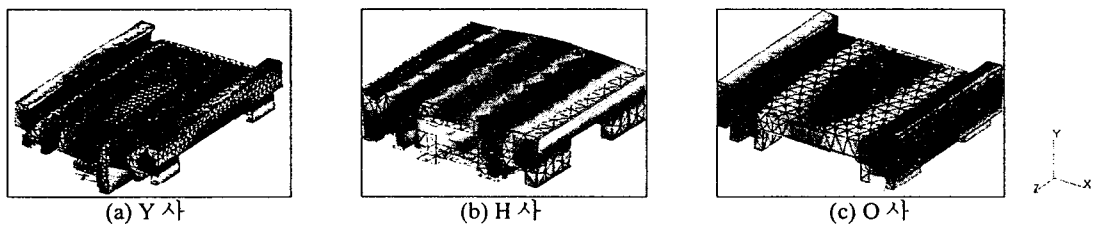


Fig. 10 Analysis results of moving part using the FEM

Table 3 Comparison of natural frequency

Motor	Experiment(Hz)	FEM (Hz)
Y사	795	753
H사	762	607.5
O사(개발중)	1142	1330

Fig. 10 은 유한요소법을 이용하여 이송체에 대한 해석 결과이다. 수치해석과 실험으로 얻은 비교 결과를 Table 3 에 나타내었다. 실험적으로 구한 결과와 유사함을 알 수 있다. 그러므로 추후 설계될 기구는 해석기법을 이용하여 동특성의 변화를 예측하고 설계해 봄으로써 보다 유연한

선형 모터를 설계할 수 있을 것이다.

3.2.2 열해석

정격출력 200W, 정격전류 2.2A일 때 발생한 열손실에 의해 코일부 온도가 최대 54.4c까지 상승함을 Fig. 10 을 통해 알 수 있다. 그러나 선진 제품의 가장 큰 특징인 Self Cooling방식을 고려했을 때 이송체와 베이스부의 전 모델링을 통한 열해석은 추후 수행할 예정이다. 열해석 결과를 토대로 열해석 요소를 구조해석 요소로 변환하여 변형량을 Fig. 11 을 통해 각각의 열팽창 계수를 고려하여 구할 수 있다.

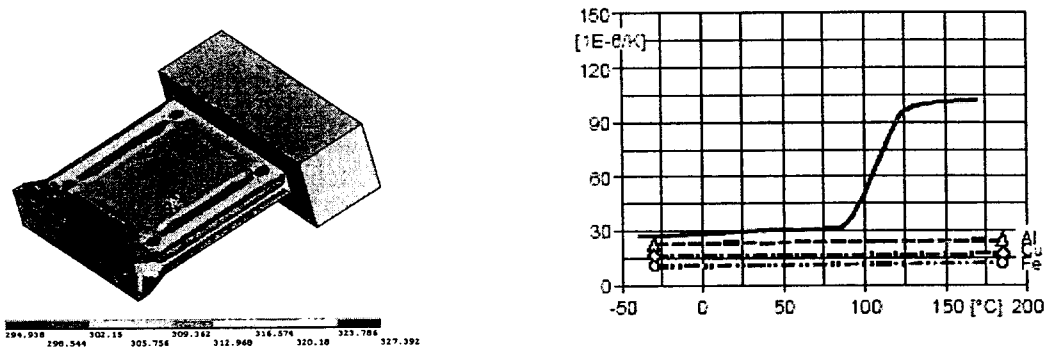


Fig. 10 Analysis results of moving part using the FEM Fig. 11 Coefficient of linear thermal expansion in function of temp.

4. 결론

본 연구는 고속/고분해능의 선형 모터의 진동 특성과 평가 기술 및 설계 방안을 구축하기 위한 기초 연구로서 이미 개발된 제품의 진동 특성을 분석하고 주관 기관의 제작품과 비교하여 그에 따른 설계 변수를 도출하고 이를 적용하기 위해 이루어졌다.

이송체의 진동 특성을 분석하기 위하여 실험을 통하여 속도에 따른 진동 특성과 히스테리시스 특성을 분석하였다. 시스템의 고유진동수와 모드형상을 파악하기 위하여 실험적으로 모드시험을 하였고, 수치적으로 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 또한 선형 모터의 열분포의 결과를 바탕으로 선형 모터의 열·진동 분석 및 평가를 위한 기본 기술을 구축하고 주관 기관 제품의 문제점을 파악하였다.

후기

본 연구는 산자부 중기거점과제의 수행결과를 바탕으로 작성되었으며 연구에 도움을 주신 OTIS-LG 관계자 분들께 감사드립니다.

참고문헌

[1] 송창규, 신영재, 이후상, "마찰구동기구로 구동되는 초정밀 가공기 이송계의 특성 평가," 한국정밀공학회

한국반도체및디스플레이장비학회 2004년도 춘계학술대회 논문집

- 지, 제 19 권, 제 7 호, pp.64-70, 2002.
- [2] 은인용, "Linear Motor 를 이용한 위치결정 기술," 한국정밀공학회지, 제 17 권, 제 12 호, pp.20-25, 2000.
- [3] 이찬홍, "조정밀 위치 결정 기술," 한국정밀공학회지, 제 17 권, 제 12 호, pp.9-15, 2000.
- [4] 임경화, 이은경, 조중근, "Spin Etcher 의 진동 분석," 한국반도체장비학회지, 제 2 권, 제 1 호, pp.15-19, 2003.
- [5] 안채현, 임경화, "근접장 광기록용 슬라이더의 동특성 분석," 한국소음진동공학회, 제 13 권, 제 3 호, pp.164-171, 2003.
- [6] 전종균, 엄호성, 김강부, 원영재, "조정밀 측정/가공 장비의 외부진동에 대한 상대변위의 추출과 진동성능 평가에 관한 연구," 한국소음진동공학회논문집, 제 12 권, 제 1 호, pp.65~72, 2002.