

초정밀 선형 모터의 열·진동 분석

이우영[†] · 임경화* · 설진수** · 김현철***

한국기술교육대학교

[†]기계정보공학부, *메카트로닉스공학부, ** 대학원 메카트로닉스공학과, ***대학원 기계공학과

Analysis of Heat and Vibration of Super-Precision Linear Motors

Woo Young Lee[†], Kyung Hwa Rim*, Jin Soo Seol**, and Hyun Chul Kim***

Korea University of Technology and Education

[†]School of Mechanical Engineering, *School of Mechatronics Engineering,

Graduate School, Mechatronics Engineering, * Graduate School, Mechanical Engineering

ABSTRACT

Linear motor can be directly applied to the system needed linear motions without rotary motions. To control 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 thermal and vibration analyses as well as measurement standards of the newly developed linear motors through analyzing the thermal behaviors and vibration characteristics of the advanced products. The thermal measurements are conducted for comparing the developed linear motor with the advanced linear motor and the Finite Volume Method(FVM) is used to identify the measurement results. And then the vibration measurements are carried out in the developed and advanced linear motors with respect to the speed. To identify the measurement results, the Finite Element Method is utilized in the developed and advanced linear motors, respectively. The FVM, FEM, and experiments make it possible to understand these characteristics. The improvement is suggested through their results conducted experiment and analyses.

Key Words : Linear Motor, Heat Analysis, Finite Volume Method, Vibration Characteristic, Modal Test, Finite Element Method

1. 서 론

선형 모터(linear motor)는 회전형 모터와 감속기구에 의한 직선 운동 기구에 비하여 직선 운동을 고속화·고정밀화를 실현시킨 모터로서 일반 산업 현장에 널리 사용되고 있다. 최근에는 정밀 반도체 장비, 자동화 기기, 고속정밀 공작 기계 등 고부가가치 산업에서도 응용되고 있으며 그 적용범위는 점차 확대되고 있는 추세이다. 그러나 제품의 소형화, 고집적화 및 공정 고속화로 고속/고분해능의 제어가 가능한 선형 모터의 개발이 요구되고 있다. 그러나 고속/고분해능의 선형 모터는 열과 진동에 매우 민감하며 특히 이동체(mov-

ing part)의 고속 거동으로 인한 코일부(coil part)와 영구 자석의 과열은 시스템에 심각한 문제를 유발하게 된다. 또한 선형 모터의 진동 특성으로 위치 제어에 문제를 일으키며 시스템에 파손까지 유발한다[1,2,3].

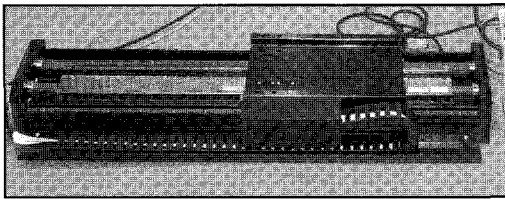
본 연구에서는 기존에 개발된 선진 선형 모터(Model Y)의 열·진동 특성에 대하여 분석하여 평가 기술을 확보하고 개발된 선형 모터(Model O)의 열·진동 특성을 비교 분석을 하였다. 이를 바탕으로 Model O의 개선안을 도출하고자 한다. 또한 최종적으로는 고속/고분해능의 구동에 대해서 열·진동에 안정한 선형 모터의 설계 방안을 제시하는데 있다.

연구 방법은 기존에 개발된 Model Y에 열·진동 특성을 실험과 해석을 통해 먼저 분석하고 그 결과를 바탕으로 Model O의 측정 결과를 비교 분석하고자 한다 [4,5].

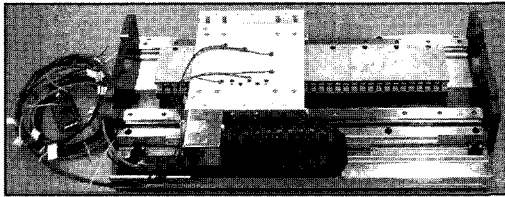
[†]E-mail : wylee@kut.ac.kr

2. 열분석

선형 모터를 공작 기계에 적용할 경우 작동 중 열원(heat source)을 크게 두 가지로 정의할 수 있다. 모터 내부의 전기적 손실에 의한 열과 직선운동 안내면(linear motion guide, LM guide)에서 발생하는 기계적 마찰열이다. 그러나 기계적 마찰열은 미세함으로 모터 내부의 전기적 손실에 의한 열을 주열원으로 한다. 그러나 선형 모터 구동 시 열은 코일부의 선간 저항에 의해서 동력 손실이 발생한다. 이와 같은 열 손실은 선형 모터의 열 특성에 직접적인 영향을 주므로 이에 대한 실험 및 해석을 수행하였다.



(a) Model Y



(b) Model O

Fig. 1. Linear motors

Table 1. Technical specification of linear motors

Technical item	Model Y	Model O
Continuous thrust(N)	93	100
Max. velocity(mm/s)	5000	2000
Continuous current(A_{rms})	1.6	2.2
Max. thrust (N)	280	300

Fig. 1은 본 연구에 사용된 선형 모터이며 Table 1은 선형 모터들의 주요 특성을 보여주고 있다.

2.1. 열 측정

Fig. 2와 같이 실험 장치를 구성하고 Fig. 3과 같이 T-type 열전대(thermocouple)를 부착하였다. 수은 온도계를 사용하여 이송체의 표면 온도 측정하여 온도 보

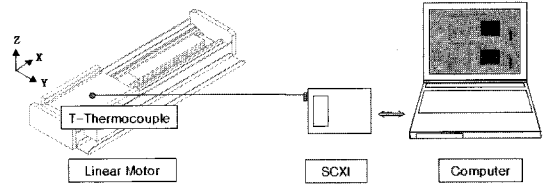
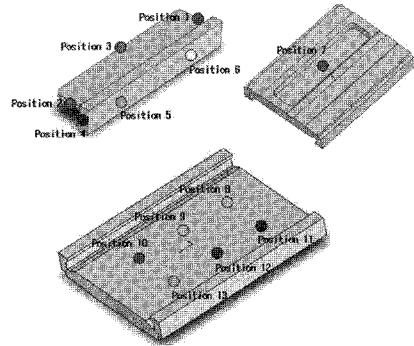
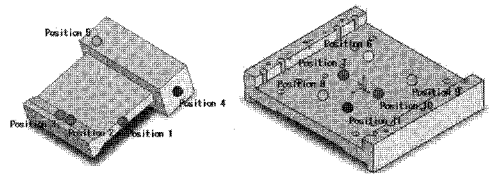


Fig. 2. Schematic diagram of experimental setup



(a) Model Y



(b) Model O

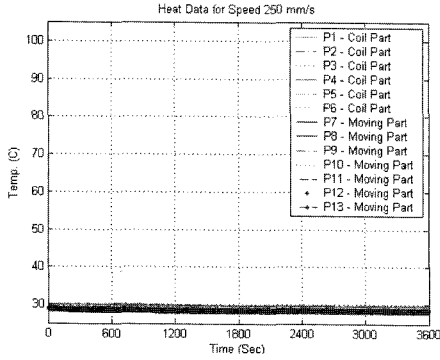
Fig. 3. Position of measurements

정을 하였다. 이송체를 일정 구간 반복시키며 1시간 동안의 온도 변화를 측정하였다.

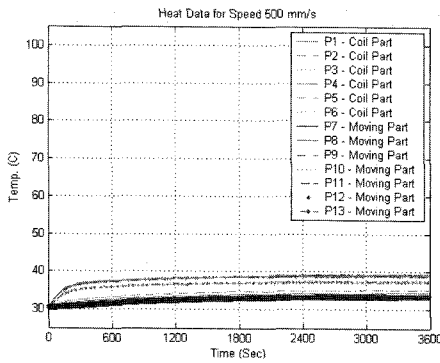
Fig. 4와 Fig. 5는 각각의 선형 모터에 대한 온도 측정 결과이다.

Fig. 4와 같이 Model Y는 이송체의 속도에 따른 온도 분포가 안정적인 것을 알 수 있다. 특히 이송체의 속도가 250 mm/s에서는 온도가 오히려 약 3가 떨어짐을 알 수 있었다. 또한 500 mm/s 이상에서는 이송체와 코일부의 온도가 고르게 상승한다. 이는 열전달이 빠르게 진행되고 자체냉각(self-cooling) 효과가 큼을 알 수 있다.

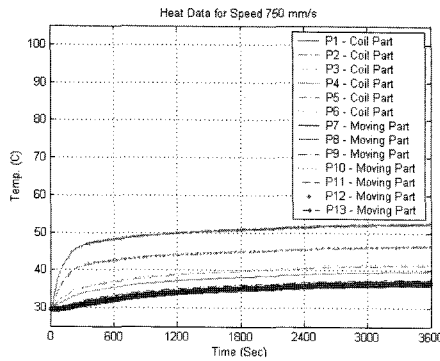
반면 Fig. 5와 같이 Model O는 이송체의 속도에 따른 코일부의 온도가 Model Y에 비하여 급속히 상승하는 것을 알 수 있다. 이는 재질이 탄소강으로 된 선형 모터 베이스(base)와 영구자석 간의 자기장 누유로 발생하는 히스테리시스 손실(hysteresis loss)에 의한 열 손실로 판단되며 자체냉각의 효과가 극히 떨어짐을 알 수 있다. 또한 코일의 배열이 분포권이며 형상이 접시



(a) Heat data at 250mm/s



(b) Heat data at 500mm/s



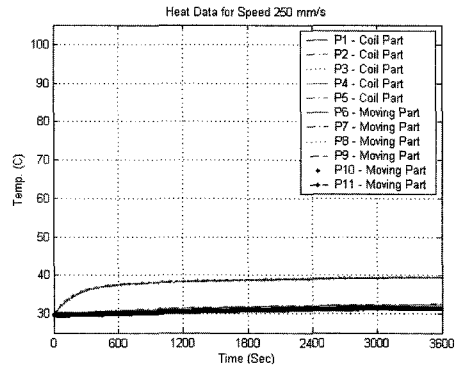
(c) Heat data at 750mm/s

Fig. 4. Measured heat data for Model Y

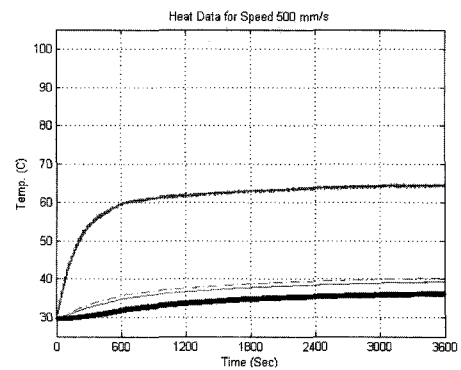
형상으로 코일(coil)의 굵은 부분에서 발열이 가장 큰 것을 알 수 있다.

2.2. 유한체적법(FVM)을 통한 열 해석

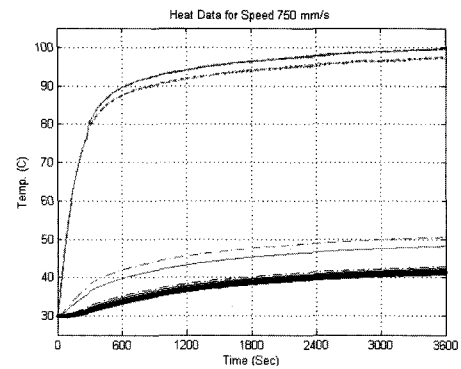
선형 모터의 권선, 영구 자석 및 이송체의 형상이 복잡하나, 좌우 대칭 형상과 대칭 경계 조건이므로 Model O를 Fig. 6 과 같이 선형 모터의 3차원 반모델 형상으



(a) Heat data at 250mm/s



(b) Heat data at 500mm/s



(c) Heat data at 750mm/s

Fig. 5. Measured heat data for Model O

로 단순화하였다(요소 : 69464개, 절점 : 82418개).

선형 모터는 코일부 내부 권선에서 발생하는 동력 손실이 모두 열로 손실된다고 할 수 있다. 따라서 권선에서 발생하는 순간 저항을 통해, 각 상에 발생하는 값인 17.3(Ω)을 구할 수 있다. 정격 전류 2.2(A_{rms})에서 251.1(W)의 동력 손실을 발생한다. 권선에서 발생하는 열 발생량(heat generation)은 구리 권선의 단위 체적

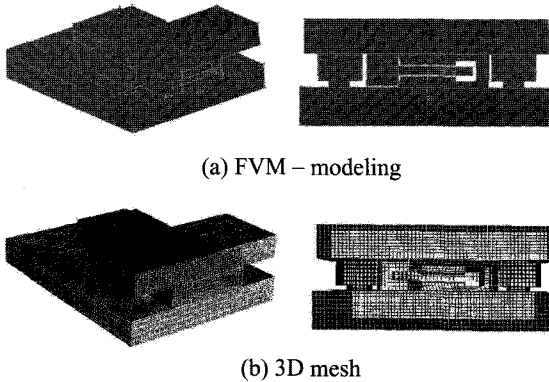


Fig. 6. Modeling for linear motor of Model O.

당 발생하는 열 Q 이며 이는 식(1)에 따라 다음과 같이 계산할 수 있다[4].

$$Q = \frac{P}{m/\rho} = \frac{P}{V} = 5.65 \times 10^{-3} \text{ W/mm}^3 \text{ K} \quad (1)$$

본 연구 대상인 선형 모터는 외부적인 냉각장치 없이 자체냉각 방식과 직선 이송 운동 시에 발생하는 강제 대류에 의해서 열을 제어하는 방식이다. 자체냉각 방식은 모터의 형상과 재질에 의해 결정되며, 선형 모터의 직선 운동시 구조물의 표면에서 자연대류 대신에 강제 대류가 발생하고, 열대류계수는 속도에 의존한다. Nusselt 수는 다음과 같이 표시한다.

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (2)$$

Re 는 Reynolds 수로써 다음과 같이 정의 한다.

$$Re = \frac{V \cdot l}{\nu} \quad (3)$$

식(3)의 V 는 선형 모터의 속도(m/sec), ν 는 대기의 동점성계수(m^2/sec), l 은 선형 모터의 길이(m)를 나타낸다. Reynolds 수로서 층류가 난류로 변화하는 임계점을 알 수 있고, 열대류가 발생하는 선형 모터의 형상과 표면 상태에 따라 달라진다. 대기와 접촉하는 평판의 경우 $Re_{crit} = 5 \times 10^5$ 이다. 선형 모터가 직선 운동시 형상이 평판이고 층류유동인 경우 Nusselt 수는 다음과 같다[5].

$$Nu_{lam} = 0.664 \sqrt{Re} \sqrt{Pr} \quad (4)$$

난류 유동의 경우는 다음과 같이 나타낸다[6].

$$Nu_{turb} = \frac{0.037 Re^{0.8} \cdot Pr}{1 + 2.443 Re^{-0.1} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} \quad (5)$$

실제의 경우 평판의 끝 단의 영향과 유체의 깨어진 층으로 인하여 전 길이에 걸쳐 층류가 형성되는 경우는 드물고, Krischer 와 Kast 에 의해 고안된 대기가 유

체인 경우 다음과 같은 층류와 난류의 평균값이 사용된다[5,6].

$$Nu_{i,t} = \sqrt{Nu_{i,am}^2 + Nu_{i,urb}^2} \quad (6)$$

Table 2는 본 연구에 사용된 선형 모터의 구성 부품들의 열전달계수와 열팽창계수를 나타낸다.

Fig. 7은 이송체의 구동 속도 750(mm/s)일 때, 열대류계수 26.85($\text{W/m}^2\text{K}$)인 정상 상태 열해석을 수행한 결과이다. 주열원인 코일부는 초기 32°C에서 106°C까지 상승하는 것을 알 수 있으며 끝단에서 가장 높은 온도를 나타낸다. 방열판(heat sink)으로써의 역할을 하는 이송체는 초기 32°C에서 59°C까지 상승함을 알 수 있다. 이송체의 구동 속도 750(mm/s)일 때 열실험을 통해 측정된 결과와 열해석 결과는 Table 3과 같다. 실험값과 열해석값의 오차는 FVM해석 과정에서 단지 Y결선의 권선에서 발생하는 선간 저항에 의해 동력 손실을 구하여 열손실을 제한한 것과 열전도와 대류만을 고려하였기 때문에 오는 것이다.

위 결과를 바탕으로 열해석의 결과에 대한 검증이 이루어졌으며 이를 통해 Model O의 선형 모터에 대한

Table 2. Material properties

	Thermal conductivity (W/m-K)	Thermal expansion coefficient (m/m/K)
Cu	385	17E-6
Al	210	25E-6
Araldite CW229-3	0.7	28E-6

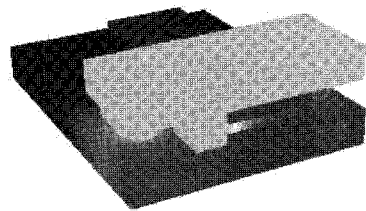


Fig. 7. Steady state heat analysis of the linear motor(steel).

Table 3. Comparison of heat data at 750mm/s

Parts	Results	Experimental result		FVM result	
		Initial temp.	Last temp.	Initial temp.	Last temp.
Moving part		32	51	32	59
Coil part		32	100	32	106

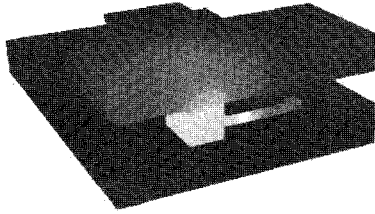


Fig. 8. Steady state heat analysis of the linear motor (Al).

Table 4. Comparison of heat data for material

Parts	Result	Steel		Al	
		Initial temp.	Last temp.	Initial temp.	Last temp.
Moving part		32	59	32	40
Coil part		32	106	32	84

개선안을 도출하고자 한다.

Model O는 이송체를 제외하고 베이스 및 기타부속 부품이 탄소강으로 제작되었다. 재질에 대한 열전도 특성을 알아보기 위해 탄소강으로 제작된 부분을 알루미늄으로 재해석하였다. Fig. 8은 그 해석 결과이며 Table 4는 재질에 대한 해석 결과 비교이다.

전체적으로 알루미늄일 때 이송체와 코일부의 온도가 약 20정도 낮은 것을 알 수 있다. 이를 통해 베이스의 재질을 알루미늄으로 변경하는 것이 Model O의 열 특성을 개선할 수 있다는 것을 확인하였다.

3. 진동 분석

3.1. 모드 시험(Modal Test)

모드 시험(modal test)을 이용하여 선형 모터가 구동할 때 가장 취약한 이송체의 고유진동수 및 모드형상(mode shape)을 각각 측정하였다. Fig. 9와 같이 충격해머(impact hammer)와 가속도센서를 이용하여 Fig. 10과 같은 위치에 대해서 주파수응답함수(frequency response function)를 구하였다.^[7]

Fig. 10은 선형 모터의 이송체 각각의 위치에 따른 측정 결과의 방향과 크기를 나타낸 것이다. 이송체의 증앙을 가진하고 9개의 위치에 대하여 측정하였다. Model Y는 1차 고유진동수가 795 Hz에 존재하는 것을 확인하였으며 모드형상은 자유단 경계 조건을 가지는 일반 평판의 굽힘 모드와 유사하므로 가이드 레일(guide rail)에 탑재되어 있는 부분은 거의 자유경계조건(free boundary condition)에 가까움을 알 수 있다. Model O는 1차 고유진동수가 1390 Hz에 존재하며

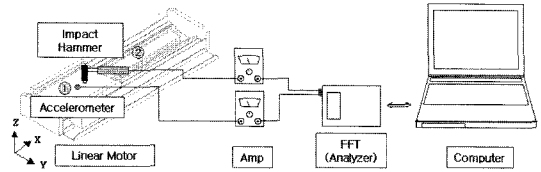


Fig. 9. Schematic diagram of experimental setup.

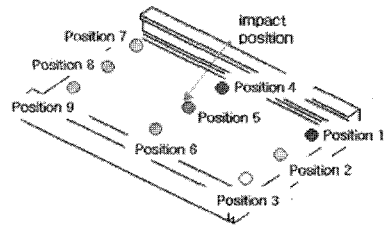
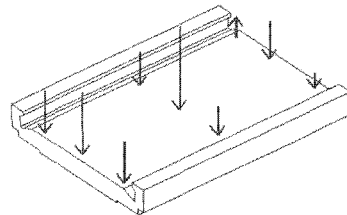
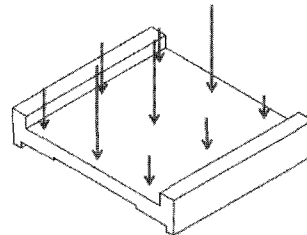


Fig. 10. Position of measurements.



(a) Model Y(795 Hz)



(b) Model O(1390 Hz)

Fig. 10. Measured mode shapes of moving part.

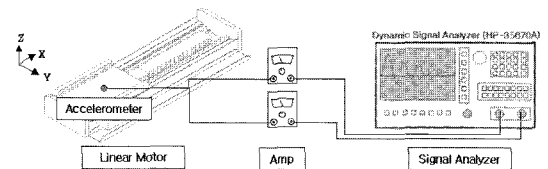
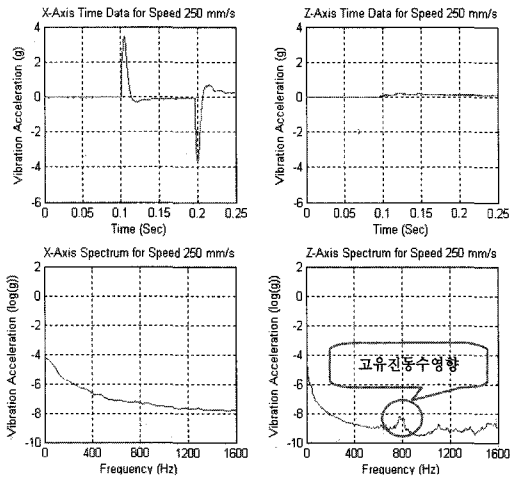


Fig. 11. Schematic diagram of experimental setup.

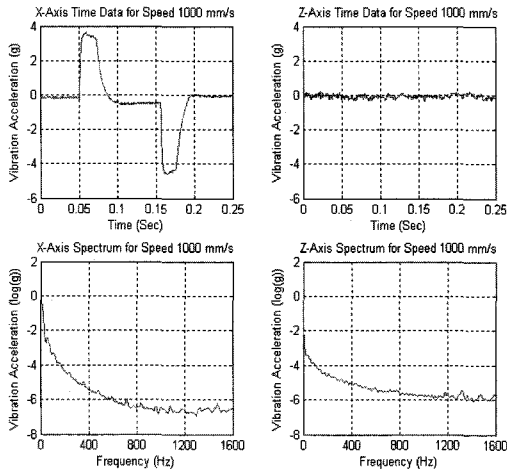
Model Y와 유사한 모드 형상을 나타내고 있다.

3.2. 진동가속도 측정

주요 부품의 진동 크기를 확인하기 위하여 Fig. 11과



(a) Moving part at 250mm/s

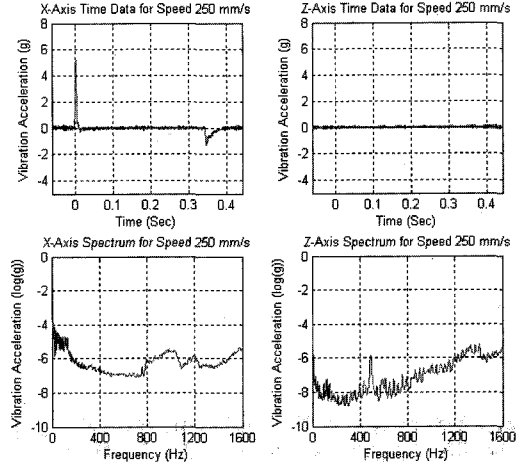


(b) Moving part at 1000mm/s

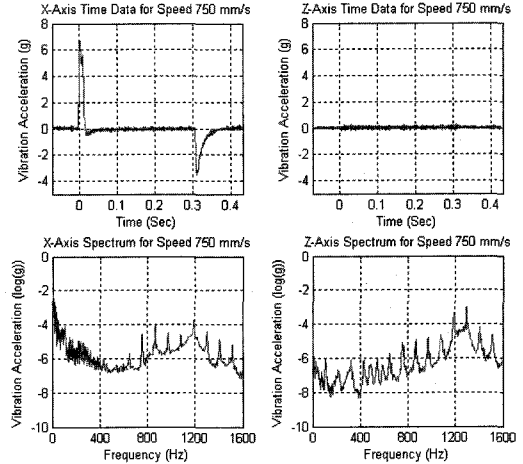
Fig. 12. Measured vibration acceleration of Model Y.

같이 실험 장치를 구성하고 이송체를 반복적으로 이송하며 진동가속도를 측정하였다. 이송체를 정지상태부터 이송 속도 1000 mm/s까지 250 mm/s간격으로 증가시키며, 이때 발생하는 진동가속도를 이송체 이동방향(X방향)과 수직방향(Z 방향)에 대하여 가속도센서를 이용하여 측정하였다[8,9].

Fig. 12는 Model Y의 이송체가 수평방향(X방향)으로 각각의 속도로 이송될 때 시간영역의 가·감속 거동과 스펙트럼(spectrum)을 나타낸 것이다. 800 Hz 부근에서 이송체의 고유진동수 영향을 있음을 알 수 있다. 이는 앞서 측정된 모드 시험과 그 결과가 일치하다. 그러므로 이송체 설계시 이를 고려하여 설계가 이루어져야 한다.



(a) Moving part at 250mm/s



(b) Moving part at 750mm/s

Fig. 13. Measured vibration acceleration of Model O.**Table 4.** Measured vibration acceleration for linear motors

Linear motor	Speed (mm/s)	Maximum accel.(G)	Minimum accel.(G)
Model Y	250	2.3	-3.1
	1000	3.7	-4.3
Model O	250	5.2	-1.3
	750	6.7	-3.4

Fig. 13은 Model O의 진동가속도 측정 결과로 가감속의 거동이 깨끗하지 못하며 가속과 감속 진동량이 크게 차이가 남을 알 수 있다. 제어기의 최적 설계가

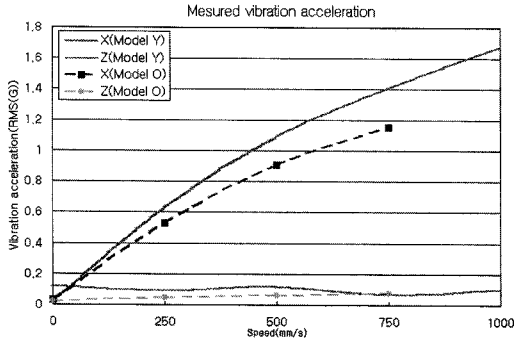


Fig. 14. Measured vibration acceleration.

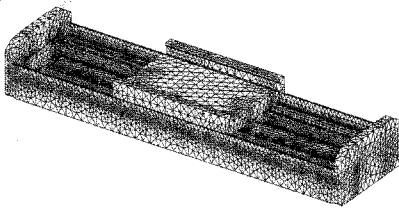


Fig. 15. Modeling for linear motor.

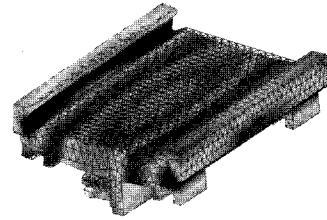
이루어지지 않음을 알 수 있다. 또한 스펙트럼에서는 전반적으로 고주파 진동 성분의 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 14는 속도에 따른 시간영역 진동가속도를 RMS (root-mean square)값으로 나타낸 것이다. X방향은 선형적으로 증가하는 형태를 보이며 Z 방향의 진동가속도는 X방향보다 상대적으로 미소한 차이만 있음을 확인하였다. 이는 직선 운동 베어링(linear motion bearing, LM bearing)에 의한 구속으로 인한 것으로 공기 베어링(air bearing)을 사용할 시 Z 방향의 진동에 대한 보완이 이루어져야 할 것이다.

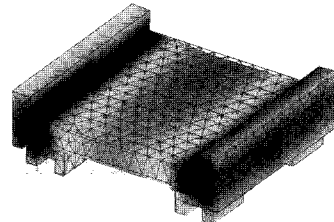
3.3. 유한요소법(FEM)을 이용한 진동 해석

모드 시험 측정 결과 검증과 차후 설계된 선형 모터를 검증하기 위하여 유한요소법을 이용하여 해석을 수행하였다. Fig. 15는 수치 해석을 하기 위한 선형 모터의 모델링으로 요소는 221890개로 이루어져 있다. 수치 해석은 Model Y와 이송체, Model O와 이송체를 각각 해석하여 설계 변수를 도출하고 개선안을 제시하는데 그 목적이 있다.

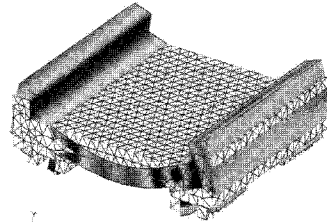
Fig. 16은 이송체에 대한 해석 결과로서 모드 시험을 통하여 얻은 결과인 Fig. 10과 유사함을 알 수 있다. 그러므로 추후 설계될 기구는 해석기법을 이용하여 동특성의 변화를 예측할 수 있을 것으로 판단되며 설계



(a) Model Y – aluminum (753 Hz)



(b) Model O – steel (1142 Hz)



(c) Model O – aluminum (1266 Hz)

Fig. 16. Analysis results moving part using the FEM.

Table 5. Comparison of natural frequencies

Linear motor	Material	Experimental result (Hz)	FEM result (Hz)
Model Y	Al	795	750
	Steel	1330	1142
Model O	Al	1390	1266

개선안에 대한 검증이 이루어졌음을 확인하였다. 해석 및 실험 결과는 Table 5와 같다. Model O는 고속/고분해능에서 안정한 구동을 필요로 한다. 그러므로 진동에 강한 설계가 이루어져야 한다. 그러나 Model Y에 비해 약 2배에 달하는 고유진동수 차를 보이지만 재질에 변화가 있어도 고유진동수의 차이는 미소하다. 그러므로 기존 고유진동수를 유지하며 경량화할 수 있는 알루미늄 재질로 이송체를 교체해야 하며 Model Y의 이송체에 비해 과대 설계가 이루어졌으므로 형상 변화 등을 통해 최적화된 설계가 이루어져야 하겠다.

Fig. 17은 선형 모터의 경계 조건을 자유 상태로 해석한 결과로서 재질이 상이한 Fig. 17(a)의 Model Y에 비

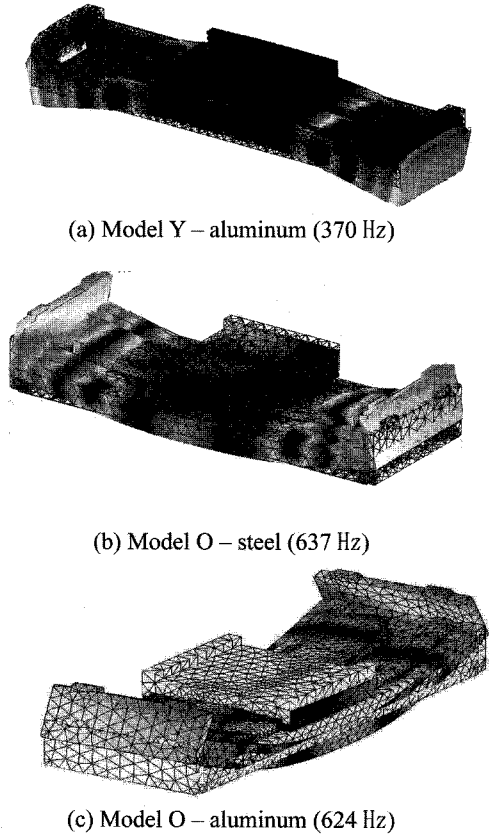


Fig. 17. Analysis result of linear motors using the FEM.

Table 6. Comparison of natural frequencies

Linear motor	Material	FEM result (Hz)
Model Y	Al	370
Model O	Steel	637
	Al	624

해 Fig. 17(b)의 Model O에 고유진동수가 매우 높음을 알 수 있다. 그러나 Fig. 17(c)와 같이 동일한 알루미늄 재질일 때도 고유진동수의 변화가 미소함을 알 수 있다. 이는 베이스의 설계가 과대하게 되었음을 알 수 있으며 추후 베이스에 대한 적절한 설계가 이루어져야 할 것이다. Table 6은 해석 결과를 표로 나타낸 것이다.

4. 결 론

본 연구는 이미 확보된 고속/고분해능의 선형 모터의 열·진동 특성과 평가 기술을 이용하여 개발된 선형 모터에 대한 분석 및 설계 개선안을 도출하기 위한 연

구로서 이미 개발된 선형 모터의 주요 부위의 열 특성을 분석하였으며 또한 진동 특성을 분석하였다.

이송체와 코일부의 열 특성을 분석하기 위하여 열전대를 이용하여 온도를 측정하고 열해석을 통하여 검증하여 선형 모터의 열 특성에 대한 개선안을 도출하였다. 또한 진동 특성을 분석하기 위하여 이송체의 속도별 진동가속도를 실험을 통하여 측정하였다. 또한 시스템의 고유진동수와 모드형상을 파악하기 위하여 실험적으로 모드시험을 수행하였고, 수치적으로 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 그 결과 열 특성을 개선하기 위해 변경한 알루미늄 재질에서도 진동 특성의 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 다만, 고유진동수의 미소한 감소가 있으나 Model Y의 이송체에 비해 첫번째 고유진동수가 약 1.7배 높으므로 선형 모터의 구동에 큰 영향이 없을 것으로 판단된다. 위 결과를 바탕으로 개발된 선형 모터의 열·진동에 대한 개선안을 도출하였다.

감사의 글

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

참고문헌

- 송창규, 신영재, 이후상, “마찰구동기구조 구동되는 초정밀 가공기 이송체의 특성 평가,” 한국정밀공학회지, 제19권, 제7호, pp.64-70, 2002.
- 은인용, “Linear Motor를 이용한 위치결정 기술,” 한국정밀공학회지, 제17권, 제12호, pp.20-25, 2000.
- 이찬홍, “초정밀 위치 결정 기술,” 한국정밀공학회지, 제17권, 제12호, pp.9-15, 2000.
- 은인용, “FEM을 이용한 동기식 리니어 모터 열특성의 해석”, 대한 기계학회 논문집 A권, 제26권 제8호, pp. 1401-1471, 2002.
- 은인용, “고속·대추력 리니어 모터의 열특성 최적화 [1]”, 한국정밀공학회지 제19권 제6호, pp.184-191, 2002.
- Suhas V. Patankar, 번역 : 이재현, 오명도, “열-유체공학 수치 해법”, 2001.
- 임경화, 이은경, 조중근, “Spin Etcher의 진동 분석,” 한국반도체장비학회지, 제2권, 제1호, pp.15-19, 2003.
- 안채현, 임경화, “근접장 광기록용 슬라이더의 동특성 분석,” 한국소음진동공학회, 제13권, 제3호, pp.164-171, 2003.
- 전종균, 엄호성, 김강부, 원영재, “초정밀 측정/가공 장비의 외부진동에 대한 상대변위의 추출과 진동성능 평가에 관한 연구,” 한국소음진동공학회논문집, 제12권, 제1호, pp.65-72, 2002.