

다구찌 기법을 이용한 선형 모터의 최적 설계

Optimum Design of Linear Motor by Using Taguchi Method

설진수*·이우영**·임경화†
Jin Soo Seol, Woo Young Lee, Kyung Hwa Rim

Key Words : Liner Motor(선형 모터), Mover(이송체), Taguchi Method(다구찌 기법), SN Ratio(잡음비), Larger-the-Better(방대 특성), Finite Element Method(유한요소법)

ABSTRACT

Nanometer operating linear motor is difficult to control the nano-positioning because of the vibration between structures changing of mechanical friction force happened by properties of the vibration and heat caused by operating of a mover. Therefore, it is required to analysis the vibration and heat about a mover. In this paper, we will analyze the property of vibration through analyzing by using FEM a mover of linear motor developed in the non-load situation and suggest the direction of optimal design about a mover by using method of DOE, also try to find the solution to operate the linear motor stabilized through the reducing weight of mover considering the vibration.

1. 서 론

최근 반도체 산업과 정보 저장 분야 산업 등의 급속한 발전으로 고속/고정밀의 이송 방법에 대한 관심이 높아지고 있다. 회전-직선 변환 기구가 필요한 볼 스크류(ball screw) 등이 사용되는 직선 구동기는 기구 간의 간섭과 기계적 마찰로 인하여 이송 속도와 정밀도에 한계를 드러내고 있다. 반면에 선형 모터(linear motor)는 이송체를 직접적으로 직선 구동시켜 기구 간의 간섭 및 기계적 마찰이 적어 고속/고정밀도의 구동이 가능한 직선 구동기로서 많은 관심을 받고 있다. 또한 선형 모터의 구동 성능은 제어기, 리니어 스케일(linear scale), 직동 시스템(linear motion system), 구동 코일(coil) 등에 의하여 결정되지만 선형 모터의 베이스(base), 이송체(mover) 등의 기계적 특성 또한 중요한 요소이다. 특히 진동 특성에 의하여 선형 모터의 구동에 큰 영향을 준다. 그러므로 선형 모터의 베이스와 이송체에 대한 진동 특성에 대한 안정된 설계, 즉 최적 설계가 이루어져야 한다.

본 논문에서는 이송체의 구동에 따른 진동 특성 및 경량화를 위하여 다구찌 기법(Taguchi method)을 이용하였다. 개발된 선형 모터의 이송체에 대하여 설계 인자(design factor)의 변화에

따른 고유진동수(natural frequency)를 분석하고자 한다. 또한 이송체에 대한 경량화 작업을 수행하여 진동 특성 및 무게 절감에 따른 최적의 형상을 찾고자 한다.^(1,2) 진동 특성 분석을 위해 유한요소법(FEM, finite element method)을 이용하였으며 Fig. 1 과 Fig. 2 는 실험에 사용된 선형 모터와 그 이송체이다.

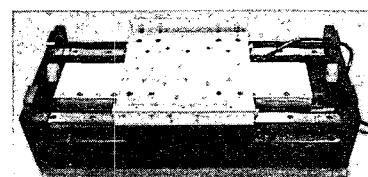


Fig. 1 Linear motor

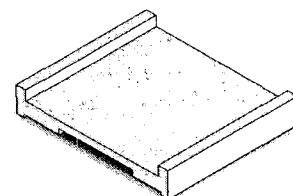


Fig. 2 Mover of linear motor

2. 선형 모터의 형상 최적화

2.1 시스템 분석 및 FEM 해석 검증

최적화에 사용되는 FEM 해석 결과와 실험 결과를 비교하여 FEM 해석만으로도 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있는지 미리 검증해 보고자 한다. 검

† 책임저자; 한국기술교육대학교

E-mail : rim@kut.ac.kr

Tel : (041) 560-1147, Fax : (041) 560-1253

. 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학과 대학원

.. 한국기술교육대학교 기계정보공학부

증 방법은 Fig. 2 의 개발된 이송체를 모드 시험(modal test)를 통한 결과를 미리 얻은 후 FEM 결과와 비교하였다. 모드 시험은 Fig. 3 과 같이 충격 해머(impact hammer)와 가속도 센서를 이용하여 9 개의 위치에 대하여 측정하였다.

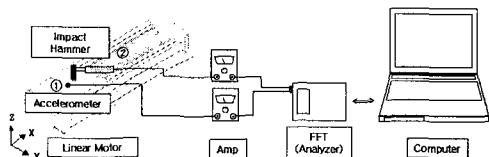


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

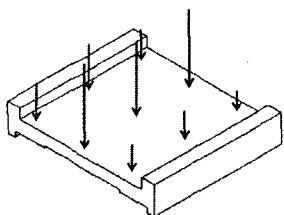
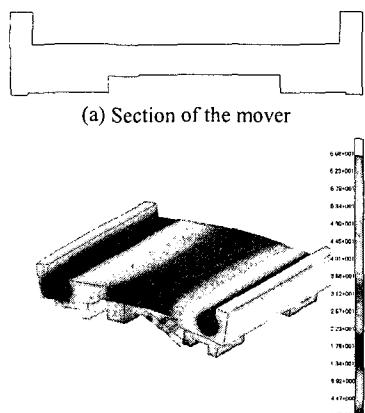


Fig. 4 Measured mode shape of mover

Fig. 4 는 이송체의 각각 위치에 따른 모드 시험 결과의 크기와 방향을 나타낸 것으로 1280 Hz 에 1 차 고유진동수가 존재하며 모드 형상은 일반 평판의 굽힘 모드와 유사함을 확인할 수 있었다.

이를 바탕으로 Fig. 5(a)와 같이 모델링된 이송체에 유한 요소 해석을 수행하여 앞서 수행한 모드 시험 결과와 비교 분석하였다. 그 결과 Fig. 5(b)와 같이 1 차 고유진동수는 1170Hz 에서 얻을 수 있었으며 모드 시험 결과와 유사함을 알 수 있었다. 이를 바탕으로 최적화된 형상을 유추할 수 있음을 확인하였다.



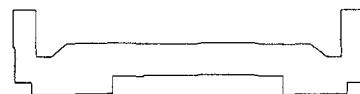
(b) Result of FEM (1170Hz)

Fig. 5 Original mover

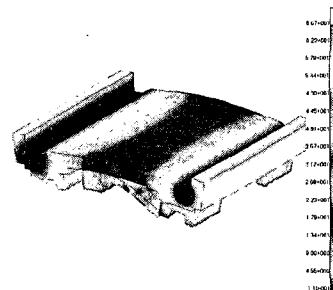
2.2 이송체의 기본 형상 변화에 따른 해석

선형 모터의 이송체는 이송 속도와 부가질량에 따라 진동 특성이 크게 변화된다. 그러므로 이송체의 이송 속도에 따른 안정된 구동 형태를 확보하기 위하여 최적화된 이송체의 형상 설계가 이루어져야 한다.

이송체의 경량화 목적을 위하여 불필요한 공간 선정하고자 이송체에 대한 응력 해석을 수행하였다. 이를 바탕으로 하여 Fig. 6(a)와 같이 기본 형상을 수정하고 유한 요소 해석을 수행하였으며 그 결과는 Fig. 6(b), Table 1 과 같다. 기본 형상 수정 전의 이송체와 비교하여 무게는 3.7% 감소하였으며 1 차 고유진동수는 미소하게 증가한 것을 확인할 수 있다. 이를 바탕으로 수정된 형상에 대하여 실험계획법(DOE, design of experiment)을 이용한 최적 형상 설계가 이루어질 수 있음을 간접적으로 알 수 있다



(a) Section of the mover



(b) Result of FEM (1172Hz)

Fig. 6 Modified mover

Table 1 Analysis results with a change of shapes

	Mass [kg] (Percentage)	1 st natural frequency for FEM Result [Hz] (Percentage)
Original mover	4.594 (-)	1170 (-)
Modified mover	4.424 (3.7% ↓)	1172 (0.2% ↑)

2.3 다구찌 기법을 이용한 이송체의 형상 최적화

무게를 줄이기 위한 설계 변수는 Fig. 7 과 같이 응력 해석 결과값이 상대적으로 낮은 부분을 선정

하였다. 경량화를 위한 설계 변수로 4 개의 위치에 대하여 3 수준으로 각각 설정하였으며 설정된 값은 Table 2 와 같다. 실험계획법의 목표특성치는 고유진동수에 대하여 망대 특성(larger-the-better)을 적용하여 경량화에 따른 이송체의 진동 영향이 미소하도록 하였다.⁽³⁾

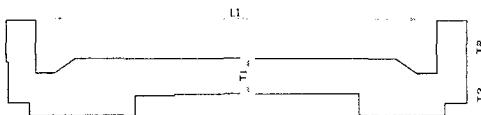


Fig. 7 Design factors

Table 2 Design factors for optimization

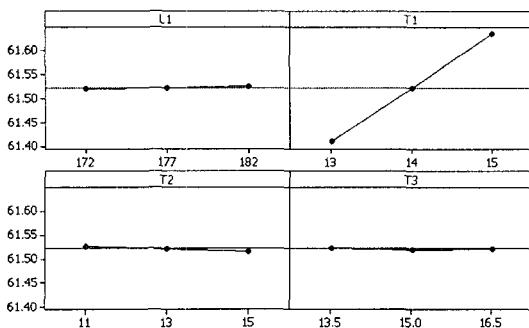
	Level		
	1	2	3
L1	172	177	182
T1	13	14	15
T2	11	13	15
T3	13.5	15	16.5

Table 3 Orthogonal array for L9(3⁴)

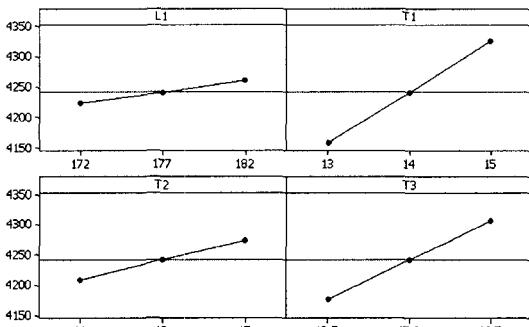
L1	T1	T2	T3	Mass [kg]	Natural frequency [Hz]
1	1	1	1	4.043	1177
1	2	2	2	4.224	1191
1	3	3	3	4.405	1206
2	1	2	3	4.223	1176
2	2	3	1	4.209	1191
2	3	1	2	4.293	1208
3	1	3	2	4.212	1176
3	2	1	3	4.292	1192
3	3	2	1	4.281	1208

Table 3 과 같이 실험계획법을 적용하여 L9(3⁴)으로 이송체의 무게와 고유진동수 변화를 비교·분석하였다. Fig. 8 에서 볼 수 있듯이 설계 변수 T1에 대하여 무게와 고유진동수 변화율이 다른 설계 변

수보다 비교적 크다는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 이송체의 무게 감소율과 고유진동수를 모두 만족할 수 있는 최적화된 설계 인자를 설정하기 위하여 L1, T2, T3 설계 변수에 대하여 각각 L1₁, T2₁, T3₁ 으로 고정한 후 T1 의 차수 변화에 대하여 수치해석을 수행하였다.⁽⁴⁾



(a) SN ratio for 1st natural frequency



(b) Means data for weight

Fig. 8 Results of DOE

Table 4 Full factorial of design factor T1

T1	Mass [kg] (Percentage)	1 st natural frequency for FEM Result [Hz] (Percentage)
1	4.043 (12.0% ↓)	1177 (0.4% ↑)
2	4.120 (10.3% ↓)	1191 (1.7% ↑)
3	4.195 (8.7% ↓)	1207 (3.0% ↑)

Table 4 에서 볼 수 있듯이 설계 인자 T1 의 변화에 따라 이송체의 무게와 고유진동수의 변화를 확인할 수 있다. 이를 바탕으로 최적의 이송체 치수

를 선택하여 무게는 10.3% 감소하고 1 차 고유진동 수는 1.7% 미소 증가한 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 9 는 최적화 과정을 통하여 얻은 치수로 모델링한 후 유한 요소 해석한 결과이다. 설계 인자는 각각 $L1_1$, $T1_2$, $T2_1$, $T3_1$ 으로 설정하였다.

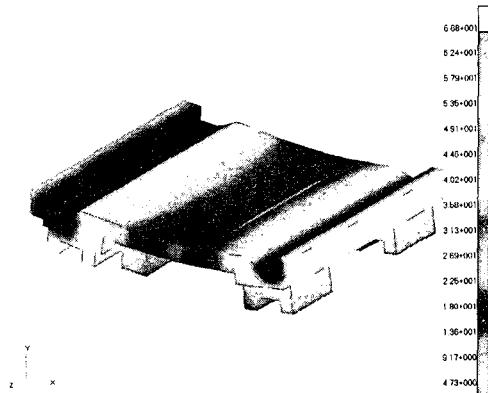


Fig. 9 Results of FEM for optimized model (1191 Hz)

3. 결 론

기존에 개발된 선형 모터의 이송체를 설계하고 그 모델에 대하여 다구찌 기법을 이용하여 경량화와 고유진동수에 대한 최적화 과정을 수행하였다. 기존 이송체와 비교하여 무게는 10.3% 감소하였으나 고유진동수는 1.8% 미소하게 상승하였다.

이를 바탕으로 향후 설계될 이송체에 대하여 무게와 고유진동수에 직접적인 영향을 주는 설계 변수를 유한요소해석 결과를 바탕으로 확인하였다.

후 기

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

참고문현

- (1) Yang, W.H., Tarng, Y.S., 1998, "Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method", *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 122~129.
- (2) 이병찬 등, 1996, "다구찌방법을 이용한 디프드로잉 공정의 가공성평가에 대한 연구", *추계학술대회 논문집*, 한국정밀공학회, pp. 938~942.
- (3) 이기하 등, 1999, "다구찌방법을 이용한 다축 동시 PID 제어시스템의 제어이득 조정", *한국정밀공학회지*, 제 16 권, 제 6 호, pp. 25~35.
- (4) 오제승 등, 2005, "초소형 광디스크 드라이브를 위한 스윙암 타입 액추에이터 설계", *한국소음진동공학지*, 제 15 권, 제 6 호, pp. 660~666.