실험계획법을 이용한 선형 모터의 최적 설계

설진수* , 임경화(책임저자)**

*한국기술교육대학교 대학원 메카트로닉스공학과, **한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

초 록

나노 구동용 선형 모터는 이송체의 구동에 따른 진동과 열 특성으로 인하여 발생되는 기구간의 진동과 기계적인 마찰력 변화로 나노위치제어에 어려움이 있다. 그러므로 이송체에 대한 진동과 열에 대한 분석이 필요하다. 본 논문에서는 개발된 선형 모터의 이송체를 무부하 상태에서 유한 요소 해석을 통해 진동 특성을 분석하고 실험계획법을 적용하여 이송체에 대하여 최적화된 설계 방향을 제시하고자 한다. 또한 이송체의 진동 특성을 고려한 경량화를 통해 선형 모터의 안정된 구동을 모색하고자 한다.

Key Words : Linear motor(선형 모터), Taguchi method(다구찌 기법), S/N ratio(잡음비)

1. 서론

최근 반도체 산업과 정보 저장 장치 분야 등의 급속한 산업 발전에 따라 고속/고정밀의 이송 방법에 대한 관심이 높아지고 있다. 회전-직선 변환 기구가 필요한 볼 스크류(ball screw) 등이 사용된 직선 구동기는 기계적인 마찰과 기구 간의 간섭으로 인하여 이송 속도와 정밀도에 그 한계를 나타내고 있다. 반면 선형 모터(linear motor)는 이송체(mover)의 구동에 따른 직접적인 직선 구동을 할 수 있고 기계적인 마찰과 기구 간의 간섭이 적고 고속/고정밀 구동이 가능한 직선 구동기로서 그 연구 및 개발이 활발히 이루어지고 있다. 또한 선형 모터의 구동 성능을 향상시키기 위해서는 이송체에 대한 진동과 열에 대한 최적 설계는 필수적으로 이루어져야 한다.

본 연구는 선형 모터의 이송체에 대한 진동 특성 향상과 경량화를 목적으로 이루어졌다. 개발된 선형 모터의 이송체에 다구찌 기법(Taguchi method)을 적용하여 설계 인자를 설정하고 각각의 인자에 따른 이송체의 진동 특성과 경량화 문제를 유한 요소 해석을 통하여 분석하였다.[1,2] Fig. 1과 Fig. 2는 실험에 사용된 선형 모터와 그 이송체이다.

Fig. 1 Linear motor

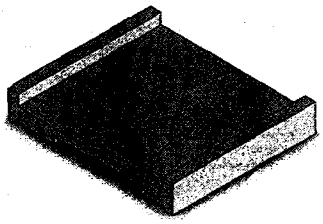
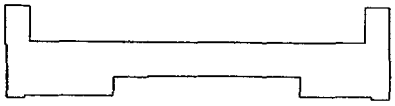


Fig. 2 Mover of linear motor

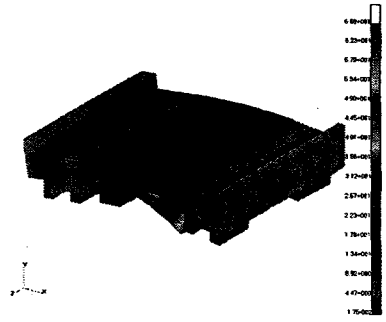
2. 실험계획법을 통한 이송체의 형상 최적화

2-1. 이송체의 기본 형상 변화

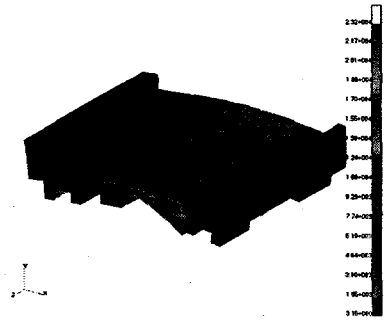
선형 모터의 이송체는 이송 속도와 부가질량(loader)에 따라 진동 특성에 큰 변화가 발생한다. 그러므로 이송 속도에 따른 안정된 구동 형태를 위하여 최적화된 이송체의 형상이 필수적으로 확보되어야 한다. 먼저, Fig. 3(a)와 같이 기존에 설계된 이송체에 대한 형상 변화에 따른 진동 특성을 분석하였다. 유한 요소 해석 결과 Fig. 3(b)와 같이 1차 고유진동수(natural frequency)는 1170Hz에서 얻을 수 있었다. 또한 무게를 줄이기 위한 공간을 선정하기 위하여 이송체의 응력 해석을 수행하였다. 이를 적용하여 Fig. 4(a)와 같이 수정된 형상으로 변경한 후 각각 유한 요소 해석 및 응력 해석을 수행하였으며 그 결과는 Fig. 4(b)와 Table 1과 같다. 기존 이송체에 대비하여 무게는 3.7% 감소하였으며 고유진동수는 미소하게 증가한 것을 확인할 수 있다.



(a) Section of the mover

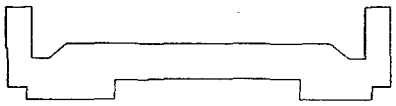


(b) Result of FEM (1170Hz)

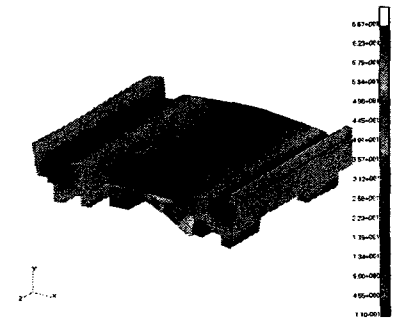


(c) Von-mises stress of mover (1170Hz)

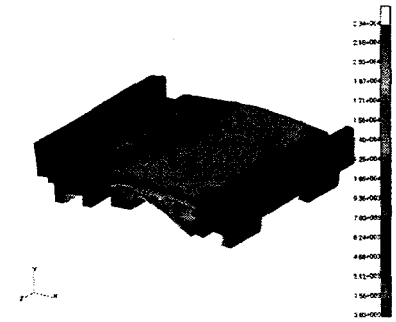
Fig. 3 The original mover



(a) Section of the mover



(b) Result of FEM (1172Hz)



(c) Von-mises stress of mover (1172Hz)

Fig. 4 The changed mover

Table 1 A weight and natural frequency percentage with a change of shapes

Table 1 A weight and natural frequency percentage with a change of shapes

	Weight (g)	Percentage (%)	Result of FEM (Hz)	Percentage (%)
Original shape	4593.5	-	1170	-
Out change shape	4423.7	3.7	1172	0.2

2-2. 실험계획법을 이용한 이송체의 형상 최적화

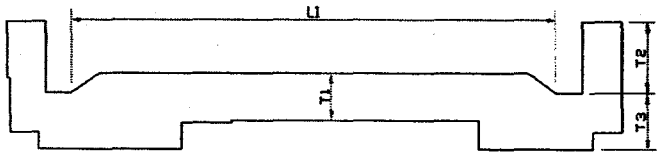


Fig. 5 Design factors

Table 2 Design factors for optimization

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

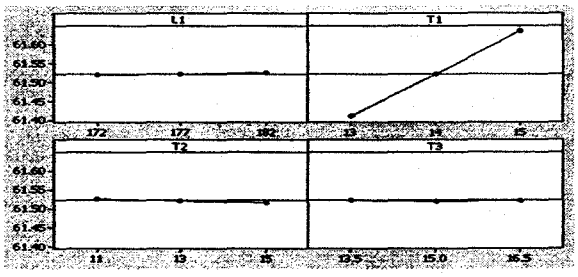
Unit : (mm)

무게를 줄이기 위한 설계 변수는 Fig. 5 와 같이 응력 결과값이 상대적으로 낮은 부분으로 선택하여 경량화를 위한 설계 변수로 4 개의 위치에 대하여 3 수준으로 각각 설정하였다. 설정된 값은 Table 2 와 같으며 목표특성치는 고유진동수에 대하여 망대 특성(larger-the-better)을 적용하였다.[3] Table 3 과 같이 실험계획법(DOE, design of experiment)을 적용하여 L9(3^4)으로 이송체의 고유진동수 및 무게 변화를 분석하였다. Fig. 6 과 같이 설계 변수 T1 에 대하여 고유진동수와 무게 변화율이 다른 설계 변수에 대하여 비교적 크다는 것을 알 수 있다. 그러므로 이송체의 고유진동수와 무게 감소율을 모두 만족할 수 있는 최적화된 인자를 설정하기 위하여 L1, T2, T3 인자에 대하여 각각 $L1_1$, $T2_1$, $T3_1$을 고정한 후 T1 에 대한 변화를 재해석하였다.[4]

Table 3 Orthogonal array for L9 (3^4)

L1	T1	T2	T3	Weight (g)	Natural frequency (Hz)
1	1	1	1	4042.9	1176.9
1	2	2	2	4224.0	1190.9
1	3	3	3	4404.7	1206.2
2	1	2	3	4222.5	1176.2
2	2	3	1	4209.0	1190.8
2	3	1	2	4292.5	1207.6
3	1	3	2	4211.8	1175.7
3	2	1	3	4291.6	1192.4
3	3	2	1	4281.4	1207.8

(b) Means data for weight



(a) SN ratio for 1st natural frequency

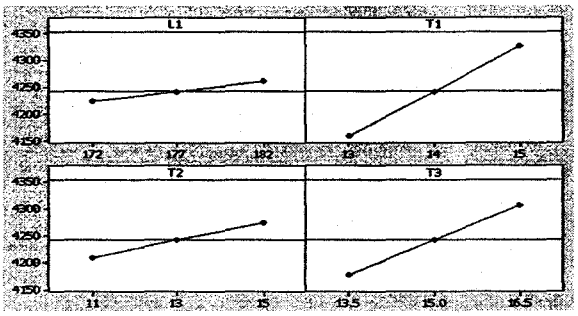
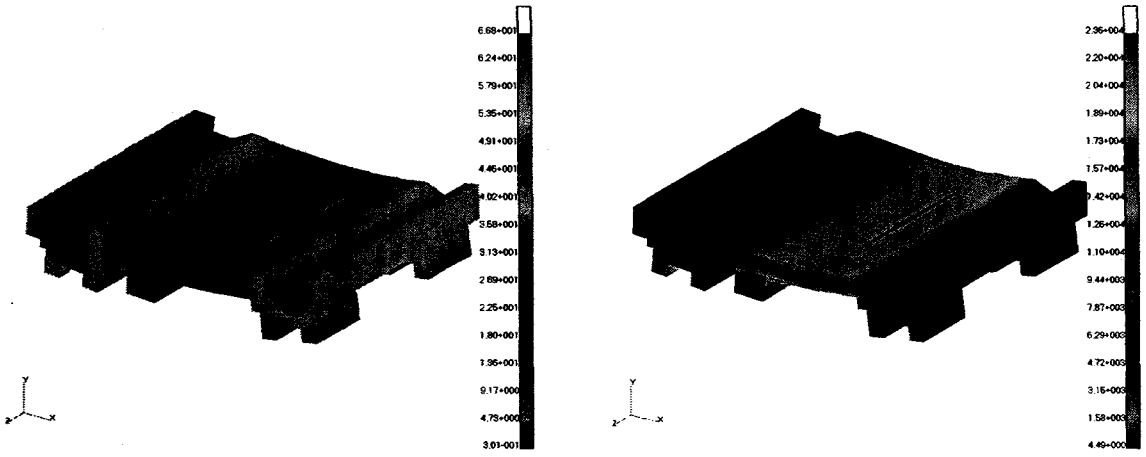


Fig. 6 Results of DOE

Table 4 Full factorial of design factor T1

	Weight (g)	Percentage (%)	Natural Frequency (Hz)	Percentage (%)
1	4042.9	12.0	1176.9	0.4
2	4119.9	10.3	1191.4	1.7
3	4195.0	8.7	1206.8	3.0

Table 4에서 볼 수 있듯이 설계 인자 T1의 변화에 따라 고유진동수와 무게의 변화를 확인할 수 있다. 이를 통하여 최적의 이송체 치수를 선택하여 무게는 10.3% 감소하고 1차 고유진동수는 1.7% 증가한 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 7은 최적화 과정을 통하여 얻은 치수로 모델링한 후 유한 요소 해석한 결과이다. 설계 인자는 각각 $L1_1$, $T1_2$, $T2_1$, $T3_1$으로 설정하였다.



(a) 1st natural frequency (1191.4Hz) (b) Von-mises stress

Fig. 7 Results of FEM for optimized model

3. 결론

나노 구동용 선형 모터의 이송체를 설계하고 그에 대하여 실험계획법을 이용한 최적화 과정을 수행하였다. 또한 향후 설계될 이송체에 대하여 고유진동수와 무게에 대한 설계 변수를 유한 요소 해석 결과를 바탕으로 확인하였다.

후기

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

참고문헌

[1] W.H. Yang, Y.S Tarng, "Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method," Journal of Materials Processing Technology, 84, pp. 122-129, 1998.

[2] 이병찬, 강연식, 양동열, 문재호, "다구찌방법을 이용한 디프드로잉 공정의 가공성평가에 대한 연구," 한

국정밀공학회 추계학술대회논문집, pp. 938-942, 1996.

[3] 이기하, 김종원, "다구찌방법을 이용한 다축 동시 PID 제어시스템의 제어이득 조정," 한국정밀공학회지, 제16권, 제6호, pp. 25-35, 1999.

[4] 오재승, 박세준, 이동주, 정호섭, 박노철, 박영필, "초소형 광디스크 드라이브를 위한 스윙암 타입 액추에이터 설계," 한국소음진동공학지, 제15권, 제6호, pp. 660-666, 2005.