

초정밀 선형 모터의 진동 분석

Vibration Analysis of Super-Precision Linear Motors

설진수* · 이우영** · 임경화†

Jin-Soo, Seol, Woo-Young, Lee and Kyung-Hwa, Rim,

Key Words : Linear Motor(선형 모터), Vibration Characteristics(진동 특성), Modal Test(모드 시험), Finite Element Method(유한요소법), Acceleration Pattern(가속도 형태), SMART Pattern(구조진동 최소레직 형태)

ABSTRACT

Development of the linear motors is recently required to control a high-speed and high-resolution 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 of the advanced products. Vibration experiments are conducted for identifying vibration level during operation. They are also included in the modal test to analyze dynamic characteristics. Analytic data using Finite Element Method (FEM) are compared with the results of the modal. The FEM and experiments make it possible to understand these characteristics. Further, through computer simulation for the behavior of moving part to be vibration source, the best acceleration pattern of moving part movement can be verified to achieve effective moving part positioning and reduce the vibration due to moving part movement.

1. 서 론

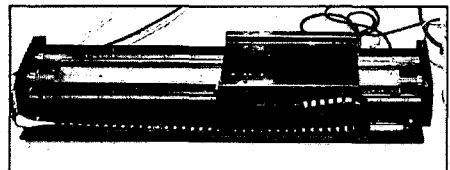
선형 모터(linear motor)는 회전-직선 운동 변환 기구 없이 직선 운동이 필요한 시스템에 직접 적용할 수 있다. 기계적인 마찰이 없어 반영구적이며 소음이 적고 백래쉬(backlash) 현상이 없는 장점이 있어 반도체 장비, 정밀 자동화 기기, 고속 정밀 공작 기계 등 고부가가치의 응용 범위를 가지고 있다. 최근에는 기기의 소형화, 고집적화에 따른 고속/고분해능의 제어가 필요한 선형 모터의 개발이 요구 되고 있다. 그러나 이러한 선형 모터는 진동과 열에 매우 취약함을 나타내고 있다. 특히 고속 거동으로 인한 진동 특성으로 선형 모터의 구동에 문제를 유발하게 된다.⁽¹⁾

본 연구의 목적은 기존에 개발된 선진 제품 선형 모터의 진동 특성에 대하여 분석하여 평가 기술을 확보하고 개발 제품 선형 모터의 진동 특성과 비교 분석하였다. 이를 바탕으로 개발 제품 선형 모터의 개선 방향을 도출하고자 한다. 또한 진동원(vibration source)인 이송체(moving part)의 가속도 형태에 대한 최적의 형태를 파악하기 위해 수치적으로 다른 가속도 형태를 비교하여 최적의 형태를 제시하였다. 최종적으로는 고속/고분해능의 구동에 대하여 진동에 안정한 선형 모터의

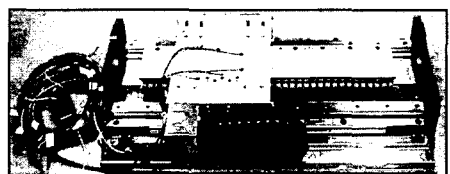
설계 방안을 제시하는데 있다.

2. 시스템 분석

먼저 Fig. 1(a)의 선진 제품(Model Y) 이송체의 모드 시험(modal test)과 이송체의 속도에 따른 진동 특성을 파악하고자 한다. 또한 유한요소법(finite element method)의 해석을 통하여 모드 시험 결과와 비교 분석하고 평가 기술을 확보하고자 한다.^(2,3) 이를 바탕으로 Fig. 1(b)의 개발 제품(Model O)의 실험 및 해석 결과를 비교 분석하였다.



(a) Model Y



(b) Model O

Fig. 1 Linear Motors

† 책임저자 ; 정희원, 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부
E-mail : rim@kut.ac.kr
Tel : (041) 560-1143, Fax : (041) 560-1253

* 정희원, 한국기술교육대학교 대학원 메카트로닉스공학과

** 한국기술교육대학교 기계정보공학과

Table 1은 본 연구에 사용된 선형 모터의 중요 특성을 보여주고 있다.

Table 1 Technical data for linear motors

Functions	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

2.1 모드 시험(Modal Test)

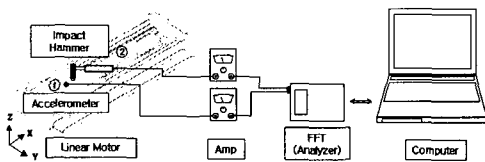


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

모드 시험을 이용하여 선형 모터가 구동할 때 가장 취약할 것으로 판단되는 이송체의 고유진동수(natural frequency)와 모드형상(mode shape)을 각각 측정하였다. Fig. 2와 같이 충격 해머(impact hammer)와 가속도 센서를 이용하여 Fig. 3과 같은 위치에서 주파수응답함수(frequency response function)를 구하였다.⁽⁴⁾

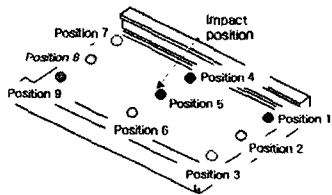
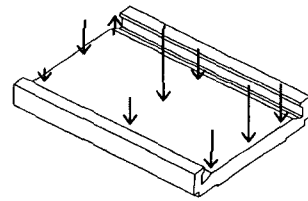


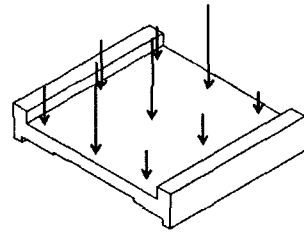
Fig. 3 Position of measurement

Fig. 4는 이송체의 각각 위치에 따른 모드 시험 측정 결과의 크기와 방향을 나타낸 것이다. 이송체의 중량을 가진하며 9개의 위치에 대하여 측정하였다. Model Y는 1차 고유진동수가 795Hz에 존재하는 것을 확인하였다. 이 때의 모드 형상은 자유단 경계 조건을 가지는 일반 평판의 굽힘 모드와 유사하므로 가이드 레일(guide rail)에 탑재되어 있는 부분은 거의 자유 경계 조건(free boundary condition)에 가까움을 알 수 있다.

Model O는 1차 고유진동수가 1390Hz에 존재하며 모드형상은 Model Y와 유사한 형상을 나타내고 있다.



(a) Model Y



(b) Model O

Fig. 4 Measured mode shapes of moving part

2.2 진동가속도 측정

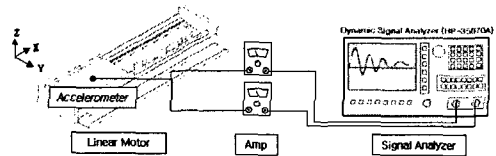
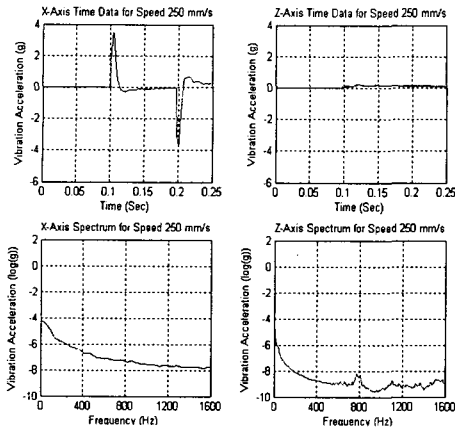


Fig. 5 Schematic diagram of experimental setup

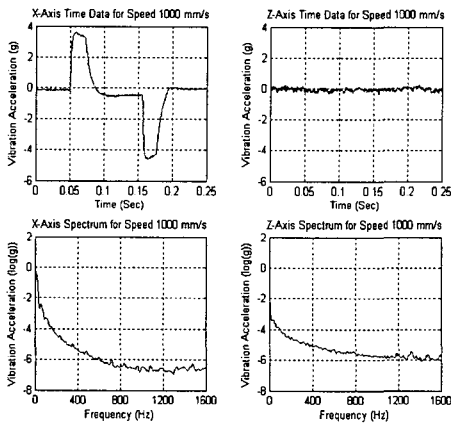
주요 부품의 진동 크기를 확인하기 위하여 Fig. 5와 같이 실험 장치를 구성하고 이송체를 반복적으로 일정 구간을 이송하며 진동가속도를 측정하였다. 이송체를 정지 상태부터 이송 속도 1000 mm/s까지 250 mm/s 간격으로 증가시키며, 이때 발생하는 진동가속도를 이송체 이동방향(X 방향)과 수직방향(Z 방향)에 대하여 가속도센서를 이용하여 측정하였다.⁽⁵⁾

Fig. 6은 Model Y의 이송체가 수평방향(X 방향)으로 각각의 속도로 이송될 때 시간영역의 가속도 거동과 스펙트럼(spectrum)을 나타낸 것이다. 800 Hz 부근에서 이송체의 고유진동수 영향이 있음을 알 수 있다. 이는 앞서 측정한 모드 시험과 그 결과가 일치하다. 그러므로 이송체 설계시 이를 고려하여 설계가 이루어져야 한다. 또한 가속도 형태가 일정한 가·감속 진동 크기를 보이고 있는 것을 확인할 수 있으며 고주파 진동 성분이 없는 것을 알

수 있다. 또한 전체적으로 주요 가진 진동원이 되는 주파수는 400Hz 내외에 분포함을 알 수 있다.



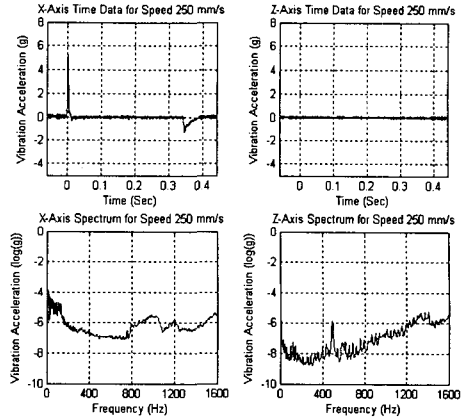
(a) Moving part at 250 mm/s



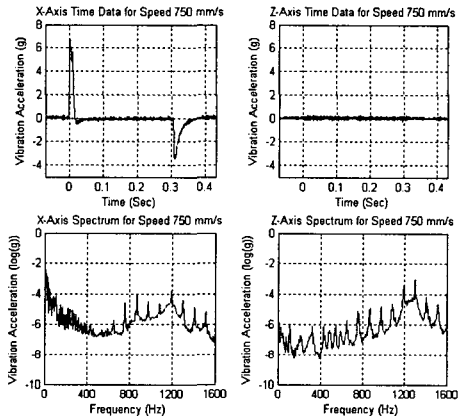
(b) Moving part at 1000 mm/s

Fig. 6 Measured vibration acceleration of Model Y

Fig. 7 은 Model O 의 진동가속도 측정 결과로 가 · 감속의 거동이 상대적으로 깨끗하지 못하며, 가 · 감속 진동 크기가 크게 차이가 남을 알 수 있다. 이는 제어기의 최적 설계가 이루어지지 않음을 알 수 있으며 이에 대한 보완이 이루어져야 하겠다. 또한 스펙트럼에서는 전반적으로 고주파 진동 성분의 영향이 크게 나타나는 것을 알 수 있으며 주요 진동원은 측정 주파수 전역에 넓게 분포되어 있는 것을 알 수 있다.



(a) Moving part at 250mm/s



(b) Moving part at 750mm/s

Fig. 7 Measured vibration acceleration of Model O

Table 2 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

2.3 유한요소법(FEM)을 이용한 진동 해석

모드 시험 측정 결과 검증과 차후 설계된 선형 모터를 검증하기 위하여 유한요소법을 이용하여 해석을 수행하였다. Fig. 8 은 수치해석을 하기 위한 선형 모터의 모델링으로 요소는 221890 개로 이루어

어져 있다. 수치 해석은 Model Y 와 이송체, Model O 와 이송체를 각각 해석하여 설계 변수를 도출하고 개선안을 제시하는데 그 목적이 있다.

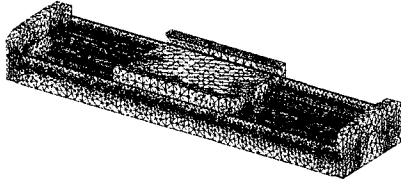
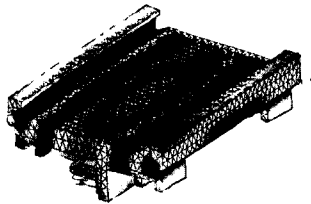
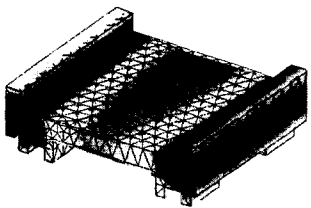


Fig. 8 Modeling for linear motor

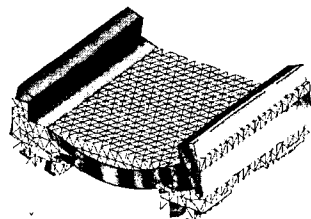
Fig. 9 는 이송체에 대한 해석 결과로서 모드 시험을 통하여 얻은 결과인 Fig. 4 와 유사함을 알 수 있다. 그러므로 추후 설계될 기구는 해석기법을 이용하여 동특성의 변화를 예측할 수 있을 것으로 판단되며 설계 개선안에 대한 검증이 이루어졌음을 확인하였다.



(a) Model Y(753 Hz)



(b) Model O - steel(1142 Hz)



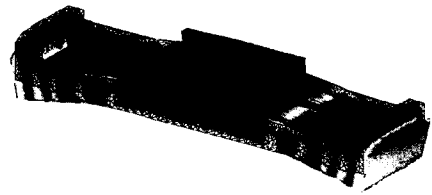
(c) Model O - aluminum(1266 Hz)

Fig. 9 Analysis results moving part using the FEM

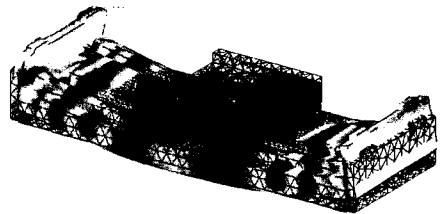
해석 및 실험 결과는 Table 3 과 같다. Model O 는 고속/고분해능에서 안정한 구동을 필요로 한다. 그러므로 진동에 강한 설계가 이루어져야 한다. 그러나 Model Y 에 비해 약 2 배에 달하는 고유진동수 차이를 보이지만 재질에 변화가 있어도 고유진동수의 차이는 미소하다. 그러므로 기존 고유진동수를 유지하며 경량화할 수 있는 알루미늄 재질로 이송체를 교체해야 하며 Model Y 의 이송체에 비해 과대 설계가 이루어졌으므로 형상 변화 등을 통해 최적화된 설계가 이루어져야 하겠다.

Table 3 Comparison of natural frequencies

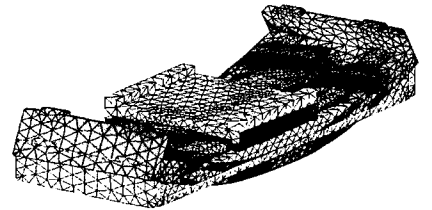
Linear motor	Material	Experimental result(Hz)	FEM result(Hz)
Model Y	Al	795	750
Model O	Steel	1330	1142
	Al	1390	1266



(a) Model Y(370 Hz)



(b) Model O - steel(637 Hz)



(c) Model O - aluminum(624 Hz)

Fig. 10 Analysis result of linear motors using the FEM

Fig. 10 은 선형 모터의 경계 조건을 자유 상태로 해석한 결과로서 Model Y 에 비해 Model O 의 고유진동수가 매우 높음을 알 수 있다. 재질의 차이는 있으나 Fig. 10(c)처럼 같은 재질일 때도 고유진동수의 변화가 미소함을 알 수 있다. 그러므로 베이스의 재질 변화를 통하여 전체적인 무게 감소 효과를 얻을 수 있다. 또한 Model Y 에 비해 베이스의 설계가 과대하게 되었음을 알 수 있으며 추후 베이스에 대한 적절한 설계가 이루어져야 할 것이다. Table 4 는 해석 결과를 표로 나타낸 것이다.

Table 4 Comparison of natural frequencies

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

3. 이송체의 진동원 분석

이송체의 거동은 선형 모터의 주요 진동원이므로 근본적으로 진동을 저감시키기 위하여 이에 대한 분석이 필요하다. 이송체의 가속도를 저주파수에 분포할 수 있다면 선형 모터의 고주파수 모드에 대한 가진을 억제할 수 있다. 그러므로 시뮬레이션을 통하여 서로 다른 3 개의 가속도 형태에 대한 스펙트럼 분포를 정량적으로 비교하고자 한다.⁽⁶⁾

3.1 모델링 및 제어 특성 분석

실험에 사용된 Model O 는 동기형 선형 모터 (LSM, linear synchronous motor)로 영구 자석을 이용하는 형태이다. 1 자유도계의 위치 제어로만 국한하여 Fig. 11 과 같이 모델링하였다. 이송체의 이동 질량을 M 으로 단순히 모델링하였고 가이드 레일에 의한 마찰력은 미소하므로 무시하였다.

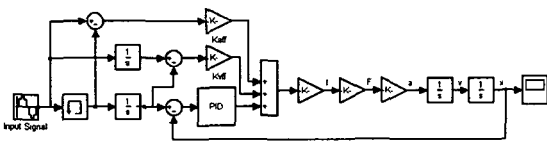


Fig. 11 Control block diagram with feed-forward terms

먼저 제어 특성을 살펴보기 위해 현재 선형 모터에서 사용하고 있는 파형과 유사한 사이클로이드 형태를 사용하여 제어 특성을 확인하였다. PID 이득(gain)은 실험에서 구한 최적 이득을 사용하며 PID 제어기에 대한 추종 성능을 확인하였다. Fig. 12 는 PID 제어기의 최적 이득으로 시뮬레이션한 결과로서 원하는 가속도 파형을 정확하게 추종하는 것을 알 수 있다.

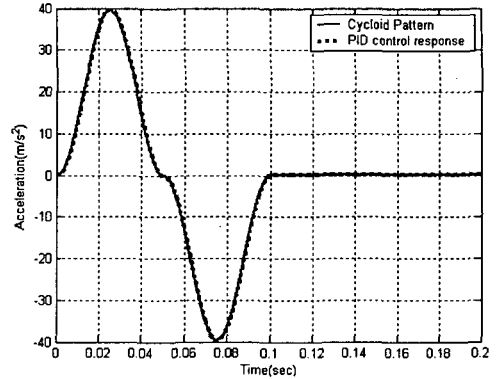


Fig. 12 Tracking pattern of optimized PID controller

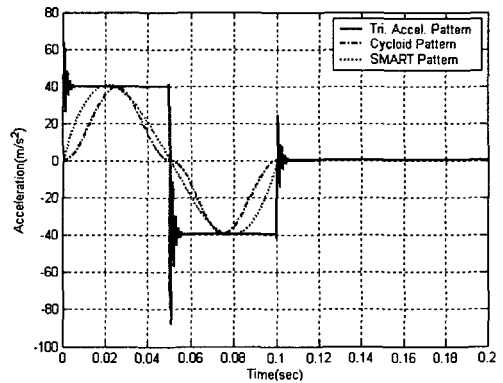


Fig. 13 Acceleration profiles of moving part

3.2 입력 파형에 따른 주파수 특성

앞서 이송체의 거동에 따른 진동가속도 실험 결과에서 알 수 있듯이 고주파수 진동원을 발생시키지 않도록 가속도 형태를 결정하여야 한다. 가속도 형태에 따른 진동에너지 분포를 분석하기 위하여 3 가지 파형을 이용하였다. 입력 가속도 형태는 Fig. 13 과 같이 간단한 삼각파형 가속도 형태, 사이클로이드 형태 그리고 하드디스크 드라이브

버 등에 적용하는 구조 진동 최소 궤적(SMART, structural vibration minimized acceleration trajectory) 형태를 사용한다. 분석을 위해 최대 가속도를 동일하게 하였고 Fig. 14 는 일정 시간에 이송체가 이동한 거리를 보여주고 있다. 삼각파형 형태가 가장 빠르게 이송하는 것을 알 수 있고, 이송 거리도 사이클로이드 형태보다 약 2 배를 이송함을 알 수 있다. 또한 SMART 형태는 사이클로이드 형태보다 1.4 배정도 이송함을 알 수 있다.

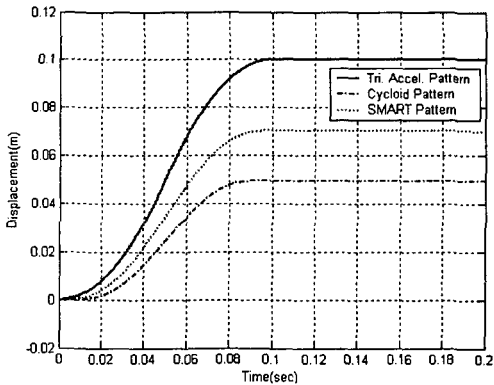


Fig. 14 Displacements of moving part

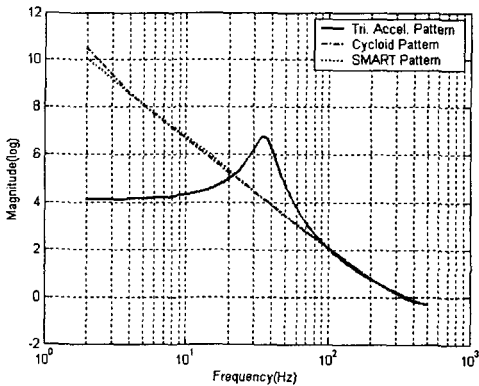


Fig. 15 Spectrum of acceleration pattern

Fig. 15 는 이송체의 가속도에 대한 스펙트럼을 나타내고 있다. 삼각파형 형태는 상대적으로 고주파 성분의 에너지가 크다. 이는 선형 모터에 고주파수 영역까지 가진원으로 작용할 수 있으므로 바람직한 입력 형태가 아님을 알 수 있다. 이에 비해 사이클로이드 형태와 SMART 형태는 서로 큰 차이는 없으나 전체적으로 저주파수 대역에 진동원이 분포하는 것을 알 수 있다. 또한 가·감속의

경우에 저크(jerk)를 줄일 수 있으므로 이송체의 위치 제어 성능을 향상시킬 수 있다. 또한 SMART 형태는 이송체의 이송 거리가 사이클로이드 형태에 비해 약 1.4 배 많으므로 SMART 형태가 보다 적절한 가속도 형태임을 알 수 있다.

4. 결론

선진 제품의 선형 모터 이송체에 대한 진동 특성을 분석하여 평가 기술을 확보하였으며 유한요소법을 이용하여 이를 검증하였다. 이를 바탕으로 개발 제품의 선형 모터의 진동 특성과 비교 분석하여 이송체의 과대 설계에 대한 개선안을 도출하였다. 또한 베이스의 재질 변화를 통한 개선안을 제시하였다. 이송체의 거동에 대해서 진동 저감 관점에서 수치해석을 통하여 여러 가속도 형태에 대하여 비교 분석하였다. SMART 형태가 기존에 사용되고 있는 사이클로이드 형태보다 이송 속도가 빠르고 진동에너지 관점에서도 유리함을 확인할 수 있었다.

후 기

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

참 고 문 헌

- (1) 송창규 등, 2002, "마찰구동기구조로 구동되는 초정밀 가공기 이송계의 특성 평가," 한국정밀공학회지, 제 17 권, 제 7 호, pp. 64~70.
- (2) 은인용, 2000, "Linear Motor 를 이용한 위치결정 기술," 한국정밀공학회지, 제 17 권, 제 12 호, pp.20~25
- (3) 이찬홍, 2000, "초정밀 위치 결정 기술," 한국정밀공학회지, 제 17 권, 제 12 호, pp. 9~15.
- (4) 임경화 등, 2003, "Spin Etcher 의 진동 분석," 한국반도체장비학회지, 제 2 권, 제 1 호, pp.15~19.
- (5) 안채현 등, 2003, "근접장 광기록용 슬라이더의 동특성 분석," 한국소음진동공학회, 제 13 권, 제 3 호, pp.164~171.
- (6) 장헌탁 등, 2001, "칩 마운트 시스템의 진동 저감," 한국소음진동공학회, 제 11 권, 제 8 호, pp.331~337