

# 선형 모터의 동특성 분석

## Analysis of the Dynamic Characteristics of the Linear Motors

설진수\*·임경화†

Jin-Soo, Seol and Kyung-Hwa, Rim

**Key Words :** Linear Motor(선형 모터), Friction Force(마찰력), Dynamic Characteristics(동특성), Hysteresis(히스테리시스), Finite Element Method(유한요소법), Acceleration Pattern(가속도 형태), SMART Pattern(구조진동최소제적형태)

### ABSTRACT

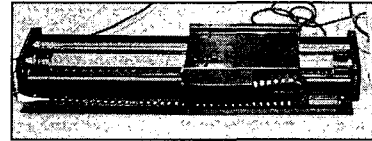
The nearest variety of the industrial world requires using the high precision and resolution positioning technology to do a semi-conductor, information field, and measurement field. It is especially important for the positioning technology that makes up a proper controller, is affected by the minimal heat and vibration, and can control a structurally generated non-linear friction factor to determine the efficiency of the system. The paper is to analyze the vibration characteristic according to the speed of linear motor and grasp the dynamic characteristic through the modal test and show the verification of the experimental result and design parameters by using FEM(Finite Element Method). Also, it shows the optimum standard analyzed the acceleration patterns of the moving part that lead to the vibration source in linear motor. It presents the analyzed dynamic of linear motor in compliance with a change of the non-linear factor.

### 1. 서론

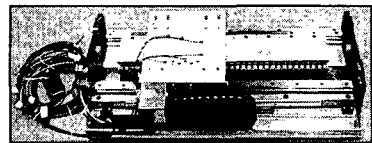
최근 선형 모터(linear motor)는 정밀 동작기계, 반도체 제조 장비, 정보기기 등의 분야에서 고정밀/고정도화의 요구에 대응하는 이송 장치로서 많은 연구 및 개발이 이루어지고 있다. 이러한 선형 모터는 고속 거동으로 인한 진동 및 코일부(coil part)에서 발생하는 열 등에 의하여 시스템 구동에 심각한 문제를 유발하게 된다.<sup>(1)</sup> 또한 회전-직선 운동 변환 기구 없이 직선 운동을 하므로 변환 기구 사이에서 발생하는 백래쉬(backlash)가 없고 구조가 간단하다. 직동 시스템으로 사용되는 직선 운동 베어링(LM bearing, linear motion bearing)은 정마찰과 동마찰의 차이가 거의 없어 스틱-슬립(stick-slip) 현상이 극히 미소하다. 그러나 나노 구동용 선형 모터에서는 초정밀 위치 제어를 요구하므로 직동 시스템들이 나노 구동에 적합한지 검증할 필요성이 있다.<sup>(2)</sup>

본 논문에서는 선진 제품과 개발 제품의 진동 특성을 비교, 분석하고 개선안을 도출하고자 한다. 또한 진동원(vibration source)인 이송체(moving part)의 가속도 형태를 수치적으로 분석하여 최적의 형태를 제시하였다. 또한 직동 시스템이 나노 구동에 적합한지 검증하기 위하여 비선형 요소인 마찰력에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 최종적

으로는 고정밀/고정도의 구동이 가능한 선형 모터의 설계 방안을 제시하는데 있다.



(a) Model Y



(b) Model O

Fig. 1 Linear Motors

### 2. 시스템 분석

먼저 Fig. 1(a)의 선진 제품(Model Y)의 모드 시험(modal test)과 이송체의 속도별 진동 특성을 파악하고자 한다. 또한 유한요소법(finite element method)의 해석을 통하여 모드 시험 결과와 비교, 분석하고 평가 기술을 확보하고자 한다.<sup>(3,4)</sup> 이를 바탕으로 Fig. 1(b)의 개발 제품(Model O)의 실험 및 해석 결과를 비교, 분석하였다.

† 정희원, 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부  
E-mail : rim@kut.ac.kr  
Tel : (041) 560-1147, Fax : (041) 560-1253

\* 정희원, 한국기술교육대학교 대학원 메카트로닉스공학과

## 2.1 모드 시험(Modal Test)

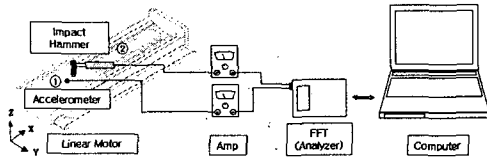


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

Fig. 2 와 같이 충격 해머(impact hammer)와 가속도 센서를 이용하여 선형 모터가 구동할 때 가장 취약할 것으로 판단되는 이송체의 고유진동수(natural frequency)와 모드형상(mode shape)을 각각 측정하였다. 측정 위치는 Fig. 3 과 같다.<sup>(5)</sup>

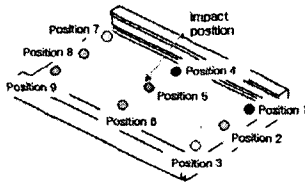
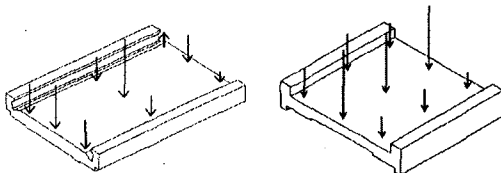


Fig. 3 Position of measurement

Fig. 4 는 이송체의 각각 위치에 따른 모드 시험 결과의 크기와 방향을 나타낸 것이다. Model Y 는 1 차 고유진동수가 795Hz 에 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 O 는 1 차 고유진동수가 1390Hz 에 존재하며 모드형상은 Model Y 와 유사한 형상을 나타내고 있다.



(a) Model Y

(b) Model O

Fig. 4 Measured mode shapes of moving part

## 2.2 진동가속도 측정

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

방향)에 대하여 가속도센서를 이용하여 측정하였다.<sup>(6)</sup>

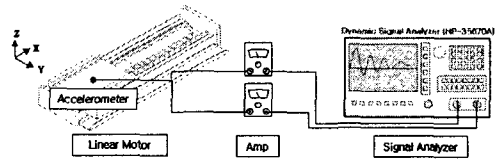
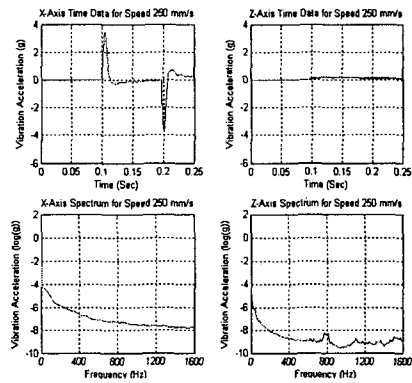
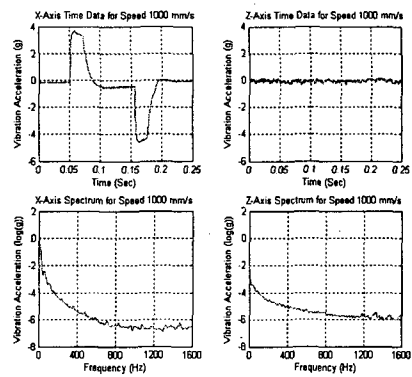


Fig. 5 Schematic diagram of experimental setup



(a) Moving part at 250 mm/s

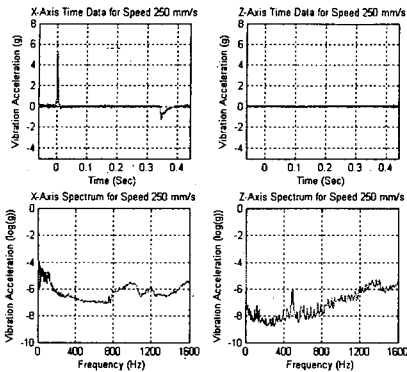


(b) Moving part at 1000 mm/s

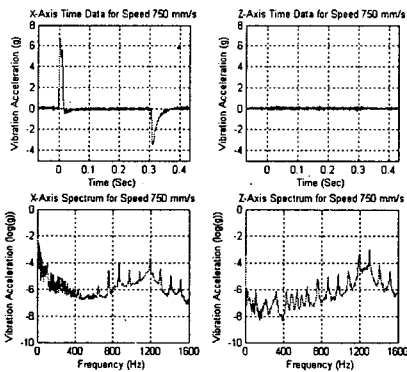
Fig. 6 Measured vibration acceleration of Model Y

Fig. 6 은 Model Y 의 이송체가 수평방향(X 방향)으로 각각의 속도로 이송될 때 시간영역의 가·감속 거동과 스펙트럼(spectrum)을 나타낸 것이다. 800 Hz 부근에서 이송체의 고유진동수 영향이 있음을 알 수 있다. 이는 앞서 측정한 모드 시험의 결과와 일치하다. 그러므로 이송체 설계 시 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 750mm/s

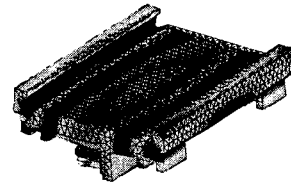
Fig. 7 Measured vibration acceleration of Model O

Fig. 7 은 Model O 의 진동가속도 측정 결과로 가속도의 거동이 상대적으로 깨끗하지 못하며, 가속도 진동 크기가 크게 차이 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.

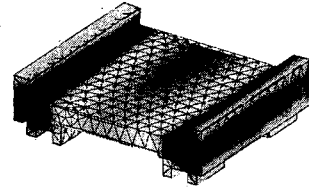
### 2.3 유한요소법(FEM)을 이용한 진동 해석

모드 시험 측정 결과 검증과 차후 설계된 선형 모터를 검증하기 위하여 유한요소법을 이용하여 해석을 수행하였다. 수치 해석은 Model Y 와 이송체, Model O 와 이송체를 각각 해석하여 설계 변수를

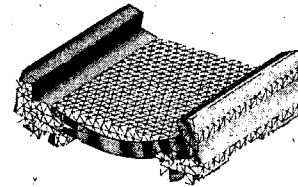
도출하고 개선안을 제시하는데 그 목적이 있다.



(a) Model Y - aluminum(753 Hz)



(b) Model O - steel(1142 Hz)



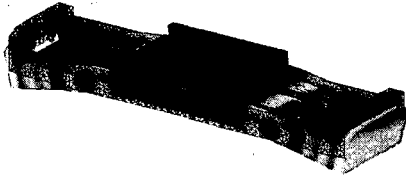
(c) Model O - aluminum(1266 Hz)

Fig. 8 Analysis results moving part using the FEM

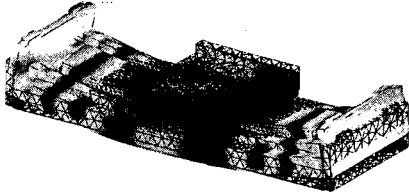
Table 1 Comparison of natural frequencies

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

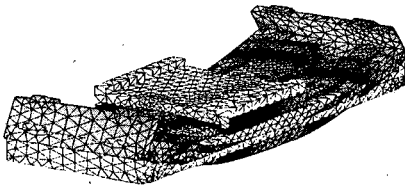
Fig. 8 은 이송체에 대한 해석 결과로서 모드 시험을 통하여 얻은 결과인 Fig. 4 와 유사함을 알 수 있다. 그러므로 추후 설계될 기구는 해석기법을 이용하여 동특성의 변화를 예측할 수 있을 것으로 판단되며 설계 개선안에 대한 검증이 이루어졌음을 확인하였다. Model O 는 고속/고분해능에서 안정한 구동을 필요로 한다. 그러므로 진동에 강한 설계가 이루어져야 한다. 그러나 Model Y 에 비해 약 2 배에 달하는 고유진동수 차이를 보이지만 재질에 변화가 있어도 고유진동수의 차이는 미소하다. 그러므로 기존 고유진동수를 유지하며 경량화할 수 있는 알루미늄 재질로 이송체를 교체해야 하며 Model Y 의 이송체에 비해 과대 설계가 이루어졌으므로 형상 변화 등을 통해 최적화된 설계가 이루어져야 하겠다.



(a) Model Y - aluminum(370 Hz)



(b) Model O - steel(637 Hz)



(c) Model O - aluminum(624 Hz)

Fig. 9 Analysis result of linear motors using the FEM

Table 2 Comparison of natural frequencies

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

Fig. 9 는 선형 모터의 경계 조건을 자유 상태로 해석한 결과로서 Fig. 9(a)의 Model Y 에 비해 Fig. 9(b)의 Model O 에 고유진동수가 매우 높음을 알 수 있다. 그러나 Fig. 9(c)와 같이 동일한 알루미늄 재질일 때 고유진동수의 변화가 미소함을 알 수 있다. 이는 베이스의 설계가 과대하게 되었음을 알 수 있으며 추후 베이스에 대한 적절한 설계가 이루어져야 할 것이다. Table 2 는 해석 결과를 표로 나타낸 것이다.

### 3. 이송체의 진동원 분석

이송체의 거동은 선형 모터의 주요 진동원이며

로 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.<sup>(7)</sup>

#### 3.1 모델링 및 제어 특성 분석

실험에 사용된 Model O 를 1 자유도계의 위치 제어로만 국한하여 Fig. 10 과 같이 모델링하였다. 이송체의 이동 질량을 M 으로 단순히 모델링하였고 가이드 레일에 의한 마찰력은 무시하였다.

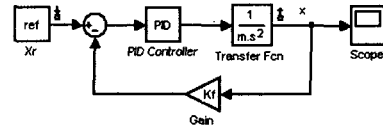


Fig. 10 Control block diagram with PID control term

#### 3.2 입력 파형에 따른 주파수 특성

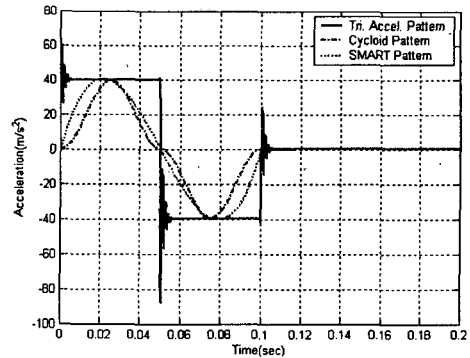


Fig. 11 Acceleration profiles of moving part

앞서 이송체의 속도별 진동가속도 실험 결과에서 알 수 있듯이 고주파수 진동원을 발생되지 않도록 가속도 형태를 결정하여야 한다. 가속도 형태에 따른 진동에너지 분포를 분석하기 위하여 3 가지 파형을 이용하였다. 입력 가속도 형태는 Fig 11 과 같이 간단한 삼각파형 가속도 형태, 사이클로이드 형태 그리고 하드디스크 드라이버 등에 적용하는 구조 진동 최소 궤적(SMART, structural vibration minimized acceleration trajectory) 형태를 사용한다. 분석을 위해 최대 가속도를 동일하게 하였고 Fig. 12 는 일정 시간에 이송체가 이동한 거리를 나타낸다. 삼각파형 형태가 가장 빠

르게 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.

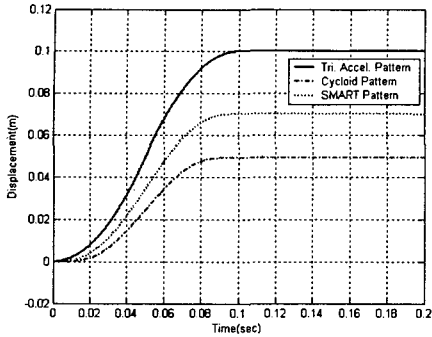


Fig. 12 Displacements of moving part

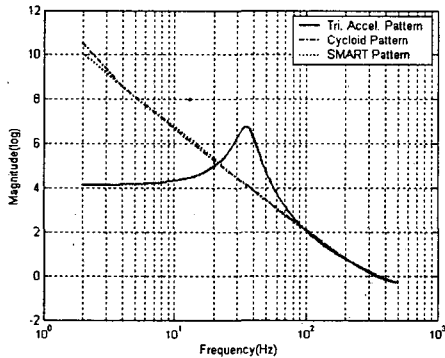


Fig. 13 Spectrum of acceleration pattern

Fig. 13 은 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. 반면 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. 마찰력에 따른 위치결정 분석

현재 선형 모터에 적용된 직동 시스템이 나노 구동에 적합한지를 평가하기 위해 앞서 모델링한 1 자유도계 시스템에 비선형 요소인 마찰력을 추가하

였다. 마찰력은 쿨롱 마찰력(coulomb friction)과 점성 마찰력(viscous friction)를 적용하여 선형 모터의 직동 시스템이 나노 구동에 적합한지를 검증해보고자 한다.

#### 4.1 시스템 모델링

마찰력이 작용하는 시스템은 다음과 같이 모델링 된다.

$$m\ddot{x} = u - f_d \quad (1)$$

여기서  $u$  는 입력되는 힘이고  $f_d$  는 시스템에 작용하는 마찰력으로 다음과 같은 쿨롱 마찰력과 점성 마찰력으로 표현하였다.

$$f_d = \pm(\mu N + \beta \dot{x}) \quad (2)$$

Fig. 14 는 마찰력을 적용한 1 자유도계 시스템 모델링이다.<sup>(8)</sup>

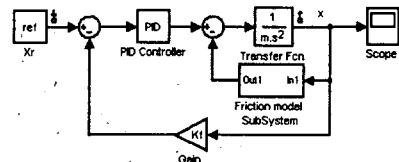


Fig. 14 Control block diagram with friction term

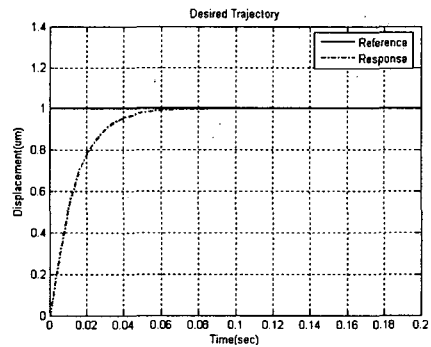


Fig. 15 Step response of precision positioning system

Fig. 15 와 Table 3 은 PID 최적 게인(gain)으로 시뮬레이션한 결과로서 좋은 응답 특성을 보이고 있다.

Table 3 Step response of close loop

Functions	value	unit
Steady-state error	0	
Overshoot	0	[%]
Raising time	0.0278	[sec]
Settling time	0.0504	[sec]

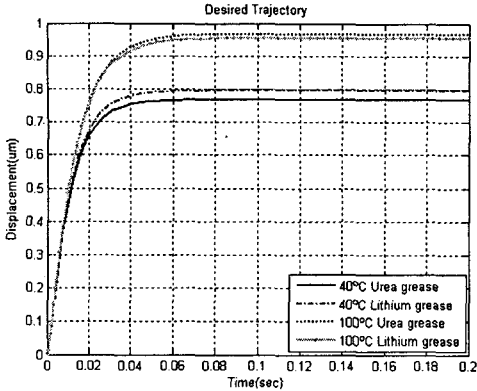


Fig. 16 System response of the viscous frictions

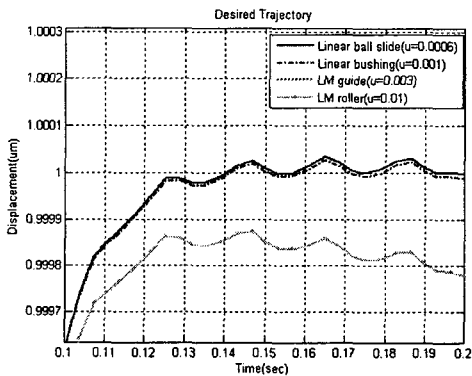


Fig. 17 System response of the coulomb frictions

Fig. 16 은 점성 마찰력에 의한 시스템의 응답으로 실제 선형 모터의 윤활제로 사용되는 그리스(grease)의 점성 계수를 바탕으로 온도 변화에 따른 이송체의 변위를 나타낸 것이다. 그리스는 대부분 온도가 낮을 때 점성계수가 크므로 마찰력 또한 커지게 되어 위치결정능력이 오히려 나빠짐을 알 수 있다. 또한 입력된 기준 위치에 도달하지 못하고 정상 상태가 되는 것을 알 수 있다.

Fig. 17 은 쿨롱 마찰력에 의한 시스템의 응답을 나타낸 것이다. 선형 모터의 직동 시스템으로 사용되고 있는 직선 운동 베어링, 리니어 부싱(linear bushing) 등의 마찰 계수를 사용하였다. 그 결과 정상 상태 오차가 계속 증가하는 것을 알 수 있다. 그러므로 마찰력에 대한 보상 제어가 필요할 것으로 보이나 선형 모터의 이송 거리와 이송 속도에

의한 비선형 요소이므로 설계 단계에서 공기 베어링(air bearing) 등을 사용하여 제거하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

선진 제품의 이송체에 대한 진동 특성을 분석하여 평가 기술을 확보하였으며 유한요소법을 이용하여 이를 검증하였다. 이를 바탕으로 개발 제품의 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 분석하여 SMART 형태가 기존에 사용되고 있는 사이클로이드 형태보다 이송 속도가 빠르고 진동에너지 관점에서도 유리함을 확인할 수 있었다.

현재 사용되는 직동 시스템은 마찰력의 영향이 크다. 그러므로 이를 고려하여 마찰 요소가 극히 미소한 공기 베어링 등을 사용하여 비선형 요소를 저감시키는 설계가 이루어져야 한다.

## 참고 문헌

- (1) 송창규 등, 2002, "마찰구동기구로 구동되는 초정밀 가공기 이송계의 특성 평가," 한국정밀공학학회지, 제 19 권, 제 7 호, pp. 64~70.
- (2) 박기형 등, 2000, "DC Servo Motor 를 이용한 초정밀 위치결정기구의 컴퓨터 시뮬레이션 및 제어성능 평가," 한국공작기계학회지, 제 9 권, 제 6 호, pp.164~169.
- (3) 은인용, 2000, "Linear Motor 를 이용한 위치결정 기술," 한국정밀공학학회지, 제 17 권, 제 12 호, pp.20~25.
- (4) 이찬홍, 2000, "초정밀 위치 결정 기술," 한국정밀공학학회지, 제 17 권, 제 12 호, pp. 9~15.
- (5) 임경화 등, 2003, "Spin Etcher 의 진동 분석," 한국반도체장비학회지, 제 2 권, 제 1 호, pp.15~19.
- (6) 안채현 등, 2003, "근접장 광기록용 슬라이더의 동특성 분석," 한국소음진동공학회, 제 13 권, 제 3 호, pp.164~171.
- (7) 장현탁 등, 2001, "칩 마운트 시스템의 진동 저감," 한국소음진동공학회, 제 11 권, 제 8 호, pp.331~337.
- (8) Brain A. A., et al., 1998, "Nanometer Positioning of a Linear Motion Stage Under Static Loads," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol.3, No.1, pp.113~119.