

## 나노위치제어용 선형 모터의 거동 분석

설진수\*, 이우영\*\*, 임경화(책임저자)\*\*\*

한국기술교육대학교

\*대학원 메카트로닉스공학과, \*\*기계정보공학부, \*\*\*메카트로닉스공학부

### ABSTRACT

The equipments in semi-conductor, display and measurement fields require high precision and resolution positioning technology. High positioning control can be carried out by using linear motors with little vibration, backlash and friction. In this paper, the acceleration patterns of the moving part are analyzed to obtain the optimum pattern which leads to the less vibration reduction of equipment. In addition, the effect of friction force in guide rail on position control accuracy is investigated to identify possibility of using current bearing system for nano-positioning control.

### 1. 서론

최근 선형 모터(linear motor)는 정밀공작기계, 반도체 제조 장비, 정보기기 등의 분야에서 고정밀/고정도화의 요구에 대응하는 이송장치로서 많은 연구 및 개발이 이루어지고 있다. 선형 모터는 회전-직선 운동 변환 기구 없이 직선 운동을 하므로 변환 기구 사이에서 발생하는 백래쉬(backlash)가 없고 구조가 간단하다. 또한 직선 구동 시스템으로 사용되는 직선 운동 베어링(LM bearing, linear motion bearing)은 정마찰과 동마찰의 차이가 거의 없어 스틱-슬립(stick-slip) 현상이 극히 미소한 장점이 있다. 그러나 나노급의 초정밀 위치제어를 위해서는 이송체의 고속 거동으로 인한 진동에 의한 문제를 최소화 시킬 필요가 있다.<sup>[1]</sup> 또한 기존 이송체의 베어링 구조에서 발생하는 마찰력이 나노 구동에 적합한지 검증할 필요성이 있다.<sup>[2]</sup>

본 논문에서는 MATLAB 의 Simulink 를 이용하여 선형 모터의 주요 진동원(vibration source)인 이송체(moving part)의 거동을 수치적으로 분석하여 진동이 최소화 되는 최적의 거동 형태를 제시하고자 한다. 또한 기존의 베어링 구조가 나노 위치제어에 적합한지 검증하기 위하여 비선형 요소인 마찰력에 대한 시뮬레이션을 수행하고자 한다. 최종적으로는 고정밀/고정도의 구동이 가능한 선형 모터의 설계 방안을 제시하고자 한다.

## 2. 분석

### 2.1 이송체의 이동형태 분석



Fig. 1 Linear motor

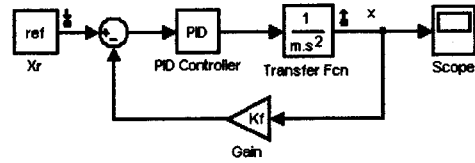


Fig. 2 Control block diagram with PID control term

선형 모터의 이송체 거동은 위치이동시간도 중요하지만, 장치의 주요 진동원(vibration source)이 되기도 하므로 진동을 작게 발생하는 이송체의 이동 형태가 필요하다.

실험에서 사용된 Fig. 1의 선형 모터에서 이송체를 강체로 모델링한 뒤에, 위치 제어관점에서 Fig. 2와 같이 수치해석 하였다. 이송체의 이동 질량을  $m$ 으로 단순화하였고 진동원 분석에서는 가이드 레일(guide rail)에 의한 마찰력은 무시하였다. 진동원 분석을 위해 이송체의 이동 가속도 형태에 따른 분포를 분석하기 위하여 3 가지 파형을 분석하였다. 입력 가속도 형태는 Fig 3 과 같이 간단한 삼각파형 가속도 형태, 기존에 많이 사용되고 있는 사이클로이드 형태(cycloid pattern) 그리고 하드디스크 드라이버 등에 많이 적용하는 구조 진동 최소 궤적(SMART, structural vibration minimized acceleration trajectory) 형태를 사용하였다.<sup>[3]</sup> 분석을 위하여 최대 가속도를 동일하게 하였다.

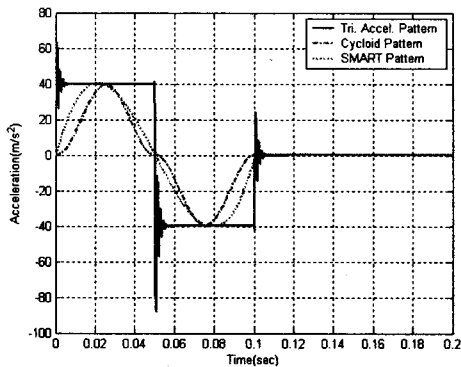


Fig. 3 Acceleration profiles

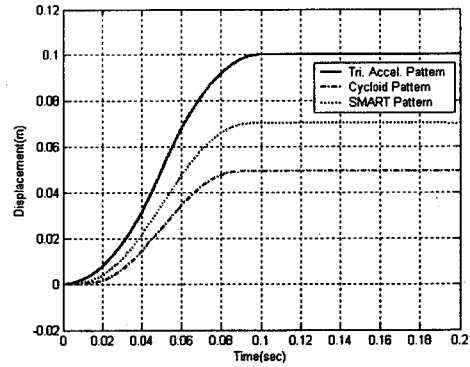


Fig. 4 Displacements of moving part

Fig. 4는 가속도 형태가 입력되었을 때 일정 시간 이송체가 이동한 거리를 나타낸다. 삼각파형 형태가 가장 빠르게 이동하는 것을 알 수 있고 이동 거리에서 사이클로이드 형태보다 약 2 배를 이동함을 알 수 있다. 또한 SMART 형태는 사이클로이드 형태보다 1.4 배정도 이동함을 알 수 있다.

Fig. 5는 이송체의 거동에 대한 가속도 스펙트럼을 나타내고 있다. 삼각파형 형태는 상대적으로 고주파 성분의 에너지가 큰 것을 알 수 있다. 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 SMART 형태는 이송체의 이동 거리가 사이클로이드 형태에 비해 약 1.4 배 많으므로 SMART 형태가 보다 적절한 가속도 형태임을 알 수 있다.

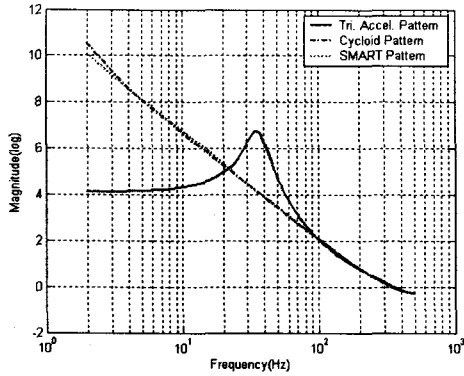


Fig. 5 Spectrum of acceleration pattern

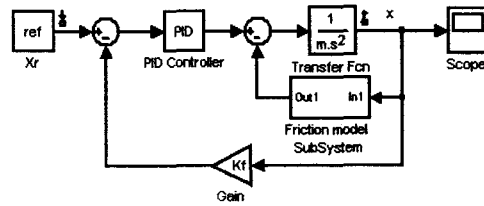


Fig. 6 Control block diagram with friction term

## 2.2 위치제어에 미치는 마찰력 영향분석

현재 선형 모터에 적용된 가이드-베어링 구조가 나노 구동에 적합한지를 평가하기 위해 앞서 모델링한 강체 시스템에 비선형 요소인 마찰력을 추가하였다. 고려된 마찰력은 쿨롱 마찰력(coulomb friction)과 점성 마찰력(viscous friction)으로 모델링 하여 나노 구동에 미치는 영향을 분석하였다. Fig. 6 은 마찰력을 적용한 1 자유도계 시스템 모델링이다.<sup>[4]</sup> 마찰력이 작용하는 시스템의 운동방정식은 식(1)과 같다.

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

여기서  $u$  는 제어오차에 의한 입력되는 힘이고  $f_d$  는 시스템에 작용하는 마찰력이다. 마찰력을 식(2)와 같이 쿨롱 마찰력과 점성 마찰력의 조합으로 구성하였다.

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

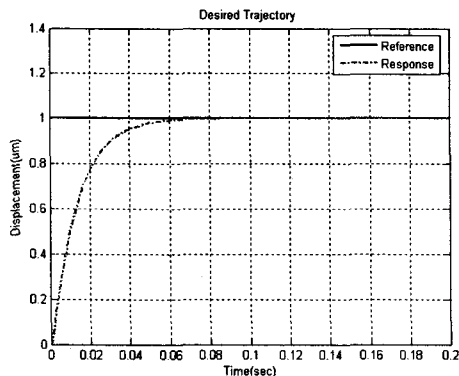


Fig. 7 Step response of precision positioning system

Table 1 Step response of closed loop

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

Fig. 7 과 Table 1 은 마찰력이 없을 때, PID 최적 이득(gain)으로 수치 해석한 결과로서 정상상태오차(stead-state error)가 없는 좋은 응답 특성을 보이고 있다. Fig. 8 은 점성 마찰력이 존재할 때 계단응답(step response)으로 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. 9 는 쿨롱 마찰력에 의한 시스템의 계단응답 특성을 나타낸다. 선형 모터의 구동구조로 사용되고 있는 직선 운동 베어링, 선형 부싱(linear bushing) 등의 마찰계수를 사용하였다. 그 결과 정상 상태 오차가 계속해서 시간에 따라 증가하는 것을 알 수 있었다. 그러므로 마찰력에 대한 보상 제어가 필요할 것으로 판단된다. 그러나 마찰력은 선형 모터의 이송 거리와 이송 속도에 의한 비선형 요소이므로 제어가 상대적으로 어려우므로 설계 단계에서 공기 베어링(air bearing) 등과 같은 비접촉 구동 시스템을 사용하여 비선형 요소를 제거하는 것이 필요할 것이다.

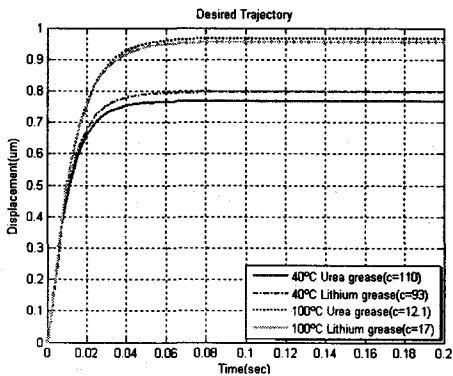


Fig. 8 System response of the viscous frictions

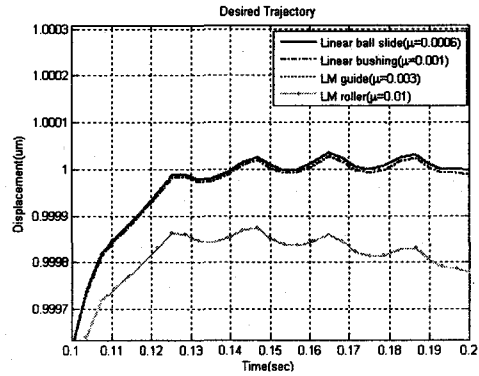


Fig. 9 System response of the coulomb frictions

### 3. 결론

선형 모터 이송체의 거동에 대한 진동 저감 관점에서 여러 가속도 형태를 비교 분석하였다. SMART 형태가 기존에 사용되는 사이클로이드 형태보다 이송 속도가 빠르고 진동에너지 관점에서도 유리함을 확인할 수 있었다. 현재 사용되는 구동 구조에서 마찰력의 영향은 나노 위치제어를 달성하기에는 상대적으로 크다. 그러므로 마찰 요소가 극히 미소한 공기 베어링 등을 사용하여 비선형 요소를 저감시키는 설계가 이루어져야 한다.

### Acknowledgement

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI04-01-02) 지원으로 수행되었음

### 참고문헌

- [1] 송창규 등, “마찰구동기구로 구동되는 초정밀 가공기 이송계의 특성 평가,” 한국정밀공학회지, 제19권, 제7호, pp.64-70, 2002.
- [2] 박기형 등, “DC Servo Motor를 이용한 초정밀 위치결정기구의 컴퓨터 시뮬레이션 및 제어성능 평가,” 한국공작기계학회지, 9권, 제 6호, pp.164-169, 2000.
- [3] 장헌탁 등, “칩 마운트 시스템의 진동 저감,” 한국소음진동공학회, 제11권, 제8호, pp.331-337, 2001.
- [4] Brain A.A, et al., “Nanometer Positioning of a Linear Motion Stage Under Static Loads,” IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol3, No.1, pp.113-119, 1998.