

## 나노 구동용 선형 모터의 열 · 진동에 관한 연구

김현철\*(한국기술교육대학교 기계공학과 대학원), 이우영(기계정보공학부),  
임경화(메카트로닉스공학부), 설진수(메카트로닉스공학과 대학원)

### A Study on Heat and Vibration of Nano Precision Linear Motors

H.Y. Kim (Mechanical Eng. KUT), W.Y.LEE (Mechanical Eng. Prof. KUT),  
K.H. Rim (Mechatronics. Eng. Prof. KUT), J. S. Seol (Mechatronics. Eng. KUT)

#### ABSTRACT

The heat and vibration effect is known to cause a serious deformation in linear motor system. The paper presents a heat and vibration characteristics that compare a advanced linear motor with developed linear motor through experiment and analyses. The heat in linear motor system is identified for experimental data and analytic data using the Finite Volume Method (FVM). Also, it shows that the optimum standard analyzed the acceleration patterns of the moving part cause the vibration source in linear motor. It presents the analyzed dynamics of linear motor in compliance with a deformation of the non-linear factor.

**Key Words :** Linear Motor (선형 모터), Heat Characteristic (열특성), Finite Volume Method (유한체적법), Friction Force(마찰력), Acceleration Pattern(가속도 형태), SMART Pattern(구조진동최소 쾰적형태)

#### 1. 서론

나노 구동용 선형 모터(linear motor)는 회전형 모터와 감속기구에 의한 직선 운동 기구에 비하여 직선 운동을 보다 효율적으로 고속화 · 고정밀화를 실현시킨것으로 일반 산업 현장에 널리 사용되고 있다. 최근에는 정밀 반도체 장비, 자동화 기기, 고속정밀 공작 기계 등 고부가가치 산업에서도 응용되고 있으며 그 적용범위는 점차 확대되고 있는 추세이다. 또한 제품의 소형화, 고집적화 및 공정고속화로 고속/고분해능의 제어가 가능한 선형 모터의 개발이 요구되고 있다. 그러나 고속/고분해능의 선형 모터는 열과 진동에 매우 민감하며 특히 이송체(moving part)의 고속 저동으로 인한 코일부(coil part)와 영구 자석의 과열은 시스템에 심각한 문제를 유발하게 된다. 또한 선형 모터의 진동 특성으로 위치 제어에 문제를 일으키며 시스템에 파손까지 유발한다.<sup>[1,2,3]</sup>

본 연구에서는 기존에 개발된 선진 선형 모터(Model Y)의 열 · 진동 특성에 대하여 분석하여 평가 기술을 확보하고 본 연구를 통하여 개발된 선형

모터(Model O)의 열 · 진동 특성을 비교 분석을 하였다. 이를 바탕으로 Model O의 개선안을 도출하고자 한다. 또한 최종적으로는 고속/고분해능의 구동에 대해서 열 · 진동에 안정한 선형 모터의 설계방안을 제시하는데 있다.

연구 방법은 기존에 개발된 Model Y에 열 · 진동 특성을 실험과 해석을 통해 먼저 분석하고 그 결과를 바탕으로 Model O의 측정 결과를 비교 분석하고자 한다.<sup>[4,5]</sup>

#### 2. 열분석

##### 2.1 이론적 배경

선형 모터를 공작 기계에 적용할 경우 작동 중 열원(heat source)을 크게 두 가지로 정의할 수 있다 모터 내부의 전기적 손실에 의한 열과 LM 가이드(LM guide)에서 발생하는 기계적 마찰열이다. 그러나 기계적 마찰열은 미세함으로 모터 내부의 전기적 손실에 의한 열을 주열원으로 한다. 코일부 내부 권선에서 발생하는 동력 손실이 모두 열로 손실

된다고 할 수 있다. 따라서 Y결선인 권선에서 발생하는 선간 저항을 통해, 각 상에 발생하는 값인 17.3(Ω)을 구할 수 있다. 점격 전류 2.2(A<sub>rms</sub>)에서 251.1(W)의 동력 손실을 발생한다. 권선에서 발생하는 열발생(heat generation)은 구리 권선의 단위체적 당 발생하는 열 Q는 식(1)에 따라 다음과 같이 계산할 수 있다.<sup>[4]</sup>

$$Q = \frac{P}{m/\rho} = \frac{P}{V} \quad (1)$$

$$= 5.65 \times 10^{-3} W/mm^3 K$$

본 연구 대상인 선형 모터는 외부적인 냉각장치 없이 자체냉각 방식과 직선 이송 운동 시에 발생하는 강제대류에 의해서 열을 제어하는 방식이다. 자체냉각 방식은 모터의 형상과 재질에 의해 결정되며, 선형 모터의 직선 운동시 구조물의 표면에서 자연대류 대신에 강제대류가 발생하고, 열대류계수는 속도에 의존한다. 식(2)의 Nusselt 수는 다음과 같이 표시한다.

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (2)$$

Re 는 Reynolds 수로써 다음과 같이 정의 한다.

$$Re = \frac{V \cdot l}{\nu} \quad (3)$$

식(3)의 V는 선형 모터의 속도(m/sec), ν는 대기의 동점성계수(m<sup>2</sup>/sec), l은 선형 모터의 길이(m)을 나타낸다. Reynolds 수로써 층류가 난류로 변화하는 임계점을 알 수 있고, 열대류가 발생하는 선형 모터의 형상과 표면상태에 따라 달라진다. 대기와 접촉하는 평판의 경우  $R_{crit} = 5 \times 10^5$ 이다. 선형 모터가 직선 운동시 형상이 평판이고 층류유동인 경우 Nusselt 수는 다음과 같다.

$$Nu_{lam} = 0.664 \sqrt{Re} \cdot (\sqrt[3]{Pr}) \quad (4)$$

난류 유동의 경우는 다음과 같이 나타낸다.

$$Nu_{urb} = \frac{0.037 Re^{0.8} \cdot Pr}{1 + 2.443 Re^{-0.1} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} \quad (5)$$

실제의 경우 평판의 끝 단의 영향과 유체의 깨어진 층으로 인하여 전 길이에 걸쳐 층류가 형성되

는 경우는 드물고, Krischer 와 Kast 에 의해 고안된 대기가 유체인 경우 다음과 같은 층류와 난류의 평균값이 사용된다.<sup>[5,6]</sup>

$$Nu_{l,I} = \sqrt{Nu_{lam}^2 + Nu_{urb}^2} \quad (6)$$

Table 1 Material properties

	Thermal conductivity (W/m·K)	Thermal Expansion Coefficient (m/m/K)
Cu	385	17E-6
Al	210	25E-6
Araldite CW229-3	0.7	28E-6

Table 1 는 본 연구에 사용된 선형 모터의 구성 부품들의 열전달계수와 열팽창계수를 나타낸다.

## 2.2 열측정

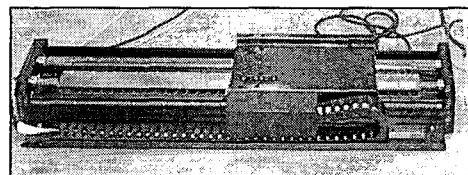


Fig. 1(a) Advanced Linear Motor Model Y

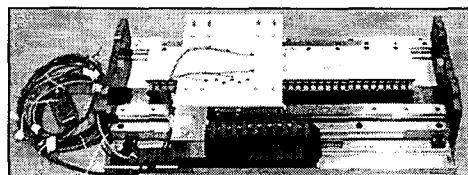


Fig. 1(b) Developed Linear Motor Model O

Fig. 1 은 본 연구에 사용된 선형 모터이다. Fig. 1(a)는 선진 선형 모터(Model Y )이며 Fig. 1(b)는 개발된 선형 모터(Model O)로서 속도에 따른 코일부와 이송체의 온도 변화와 그 영향을 비교 분석 하였다.

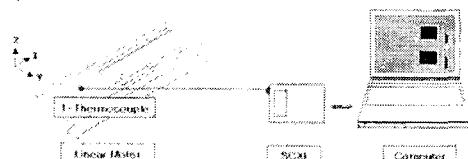


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

Fig. 2 와 같이 실험 장치를 구성하고 Fig. 3 과 같이 주요 위치에 T-type 열전대(t-type thermocouple)를 부착하였으며 온도 보정을 위해 온도 보정기를 사용하였다. 1 시간 동안 이송체를 일정 구간 반복 구동시키며 각 위치에 대한 온도 변화를 측정하였다.

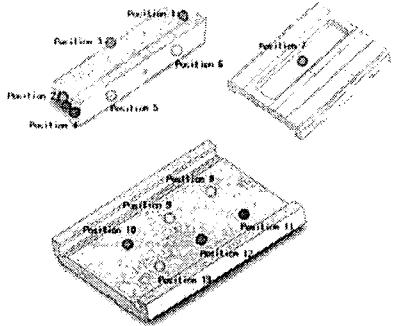


Fig. 3 (a) Model Y Position of measurements

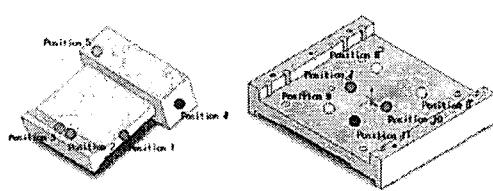


Fig. 3 (b) Model O Position of measurements

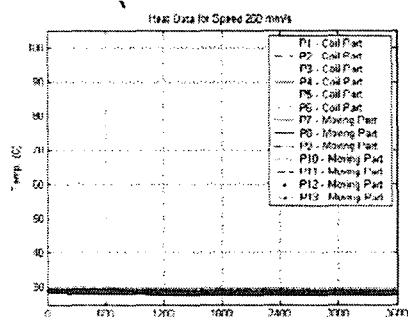


Fig. 4 (a) Heat data of Model Y at 250mm/s

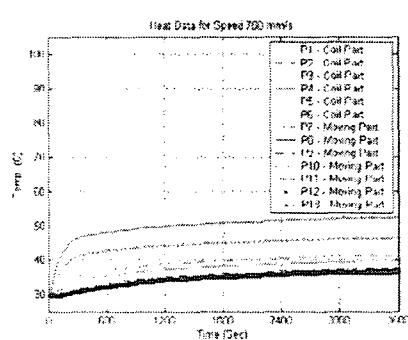


Fig. 4 (b) Heat data of Model Y at 750mm/s

Fig. 4 는 Model Y 의 온도 측정 결과로써 이송체의 속도에 따른 선형 모터 자체의 온도 분포가 안정적인 것을 알 수 있다. 특히 이송체의 속도가 저속인 250mm/s 에서는 온도가 오히려 약 3°C 가 떨어짐을 알 수 있었다. 또한 750mm/s 에서는 이송체와 코일부의 온도가 고르게 상승하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 열전달이 빠르게 진행되어 선형 모터 자체적인 자체냉각 효과가 크다는 것을 알 수 있었다.

반면 Fig. 5 의 Model O 는 이송체의 속도에 따른 코일부 및 이송체의 온도가 Model Y 에 비하여 급속히 상승하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 코일의 배열이 분포권 형상이며 접시 형상으로 코일(coil)의 급은 부분에서 발열이 가장 큰 것을 알 수 있다. 또한 탄소강으로 제작된 선형 모터 베이스(base)와 영구자석 사이에 자력 손실이 일어나게 되어 입력된 속도를 유지할 수 없게 된다. 이를 보정하기 위해 선형 모터에 공급되는 전류의 양이 증가한다. 그 결과 코일부의 온도를 급격히 상승시키는 요인으로 작용하게 된다. 또한 베이스의 자화 현상을 유발하며 그 결과 히스테리시스 손실(hysteresis loss) 이 발생하여 열손실이 일어나는 것으로 판단된다.

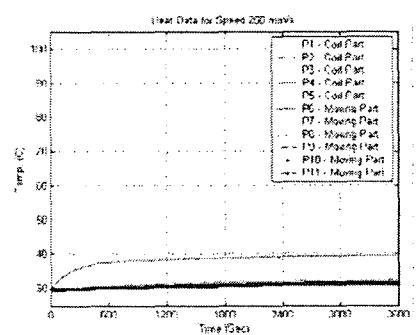


Fig. 5 (a) Heat data of Model O at 250mm/s

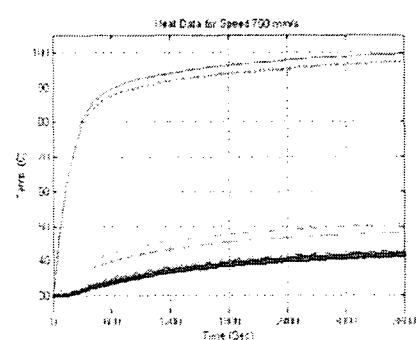


Fig. 5 (b) Heat data of Model O at 750mm/s

### 2.3 열해석

선형 모터의 권선, 영구 자석, 이송체의 형상이 복잡하고 반 대칭 구조이므로, Model O 전체를 모델링하는데 많은 요소(element)와 노드(node)가 필요하고, 계산상 많은 시간이 필요하므로 Fig. 6 의 선형 모터의 모델링을 3 차원 반 모델 형상으로 단순화 하였다. ( Element : 69,464 개, Node : 82,418 개)

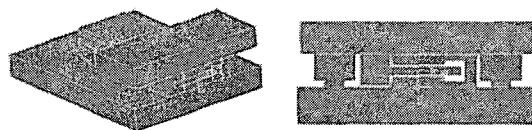


Fig. 6 Modeling for linear motor of Model O

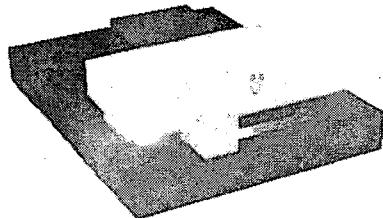


Fig. 7 Steady state heat analysis of linear motor(steel)

Fig. 7 은 이송체의 구동 속도 750(mm/s)일 때, 열 대류계수  $26.85(W/m^2K)$ 인 정상 상태 열해석을 수행한 결과이다. 주열원인 코일부는 초기 32°C에서 106°C까지 상승하는 것을 알 수 있으며 끝단에서 가장 높은 온도를 나타낸다. 방열판(heat sink)로 쪽의 역할을 하는 이송체는 초기 32°C에서 59°C까지 상승함을 알 수 있다. 이송체의 구동 속도 750(mm/s) 일 때 열실험을 통해 측정된 결과와 열해석 결과는 Table 2 과 같다. 실험값과 열해석값의 오차는 FVM 해석 과정에서 단지 Y 결선의 권선에서 발생하는 선간 저항에 의해 동력 손실을 구하여 열손실을 제한한 것과 열전도와 대류만을 고려하였기 때문에 오는 것이다.

Table 2 Comparison of Model O heat data at 750mm/s

Parts	Result		Experimental result		FVM result	
	First Temp.	Last Temp.	First Temp.	Last Temp.	First Temp.	Last Temp.
Moving part	32 °C	51 °C	32 °C	59 °C	32 °C	59 °C
Coil part	32 °C	100 °C	32 °C	106 °C	32 °C	84 °C

위 결과를 바탕으로 열해석의 결과에 대한 검증

이 이루어졌으며 이를 통해 Model O 의 선형 모터에 대한 개선안을 도출하고자 한다.

Model O 는 이송체를 제외하고 전체적으로 탄소강으로 제작되었다. 재질에 대한 열전도 특성을 알아보기 위해 탄소강으로 제작된 부분을 알루미늄으로 재해석하였다. Fig. 8 은 그 해석 결과이며 Table 3 는 재질에 대한 해석 결과 비교이다.

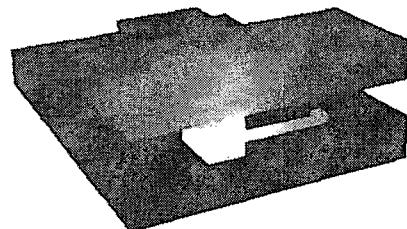


Fig. 8 Steady state heat analysis of linear motor(Al)

전체적으로 알루미늄일 때 ;이송체와 코일부의 온도가 약 20°C 정도 낮은 것을 알 수 있다. 이를 통해 베이스의 재질을 알루미늄으로 변경하는 것이 Model O 의 열 특성을 개선할 수 있다는 것을 확인하였다.

Table 3 Comparison of Model O heat data for material

Parts	Steel		Al	
	First Temp.	Last Temp.	First Temp.	Last Temp.
Moving part	32 °C	59 °C	32 °C	40 °C
Coil part	32 °C	106 °C	32 °C	84 °C

### 3. 전동분석

이송체의 거동은 선형 모터의 주요 열원인 동시에 진동원(vibration source)이기도 하다. 그러므로 근본적인 진동을 저감시키기 위하여 이에 대한 분석이 필요하다. 이는 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>



Fig. 9 Control block diagram with PID control term

실험에 사용된 Model O 를 1 자유도계의 위치 제어로만 국한하여 Fig. 9 와 같이 모델링하였다. 이송체의 이동 질량을 M 으로 단순히 모델링하였고 가이드 레일에 의한 마찰력을 무시하였다.

### 3.1 입력 파형에 따른 주파수 특성

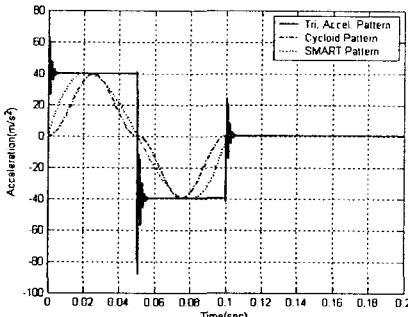


Fig. 10 Acceleration profiles of moving part

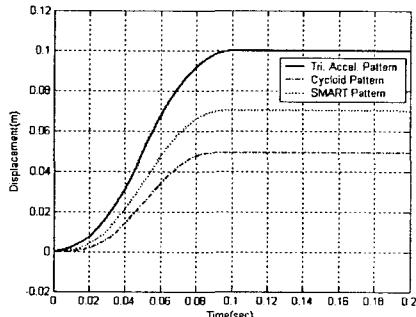


Fig. 11 Displacements of moving part

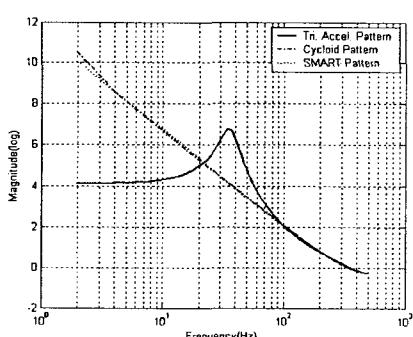


Fig. 12 Spectrum of acceleration pattern

가속도 형태에 따른 진동에너지 분포를 분석하기 위하여 3 가지 파형을 이용하였다. 입력 가속도 형태는 Fig. 10 과 같이 간단한 삼각파형 가속도 형태, 사이클로이드 형태 그리고 하드디스크 드라이버 등에 적 적용하는 구조 진동 최소 쾨적(SMART, structural vibration minimized acceleration trajectory) 형태를 사용한다.

분석을 위해 최대 가속도를 동일하게 하였고 Fig. 11 은 일정 시간에 이송체가 이동한 거리를 나타낸다. 삼각파형 형태가 가장 빠르게 이동하는 것을 알 수 있고, 이동 거리도 사이클로이드 형태보다 약 2 배를 이동함을 알 수 있다. 또한 SMART 형태는 사이클로이드 형태보다 1.4 배정도 이동함을 알 수 있다.

Fig. 12 는 이송체의 가속도에 대한 스펙트럼을 나타내고 있다. 삼각파형 형태는 상대적으로 고주파 성분의 에너지가 크다. 이는 선형 모터에 고주파수 영역의 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 점크(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 위하여 앞서 모델링한 1 자유도계 시스템에 비선형 요소인 마찰력을 추가하여 기준 위치에 대한 위치결정을 분석하고자 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 마찰력(coulomb friction)과 점성 마찰력(viscous friction)으로 표현하였다.<sup>[8]</sup>

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

이를 시스템에 적용하고 PID 제어를 통하여 Fig. 13 과 같은 응답 특성을 확인하였다.

Fig. 14 는 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 커

지게 되어 위치결정능력이 오히려 나빠짐을 알 수 있다. 또한 입력된 기준 위치에 도달하지 못하고 정상 상태가 되는 것을 알 수 있다.

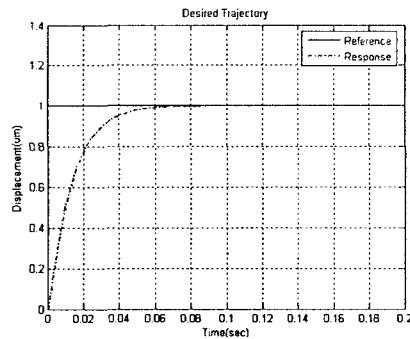


Fig. 13 Step response of precision positioning system

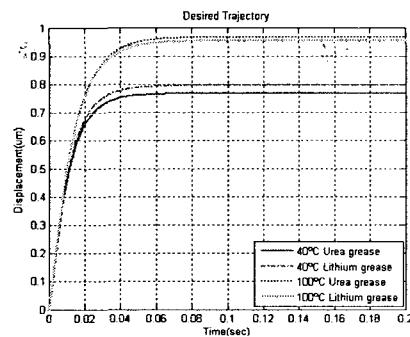


Fig. 14 System response of the viscous frictions

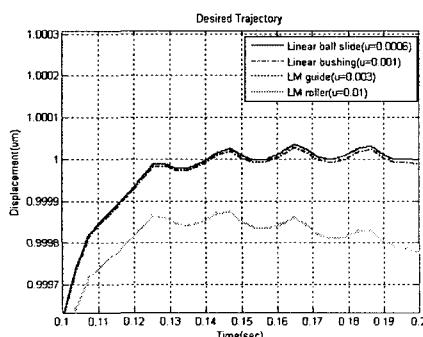


Fig. 15 System response of the coulomb frictions

Fig. 15 는 쿨롱 마찰력에 의한 시스템의 응답을 나타낸 것이다. 선형 모터의 직동 시스템으로 사용되고 있는 직선 운동 베어링 등의 마찰 계수를 사용하였다. 그 결과 정상 상태 오차가 계속 증가하는 것을 알 수 있다. 그러므로 마찰력에 대한 보상 제어기가 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

본 연구는 이미 확보된 나노 구동형 선형 모터의 열·진동 특성과 평가 기술을 이용하여 개발 선형 모터에 대한 분석 및 설계 개선안을 도출 하기 위한 목적으로 이미 개발된 선형 모터의 열·진동 특성을 분석하였다.

1. 이송체와 코일부의 열특성 분석을 위하여 실험적 결과와 유한체적법(FVM)을 이용한 해석 결과를 비교함으로써 코일부 형상 변화와 선형 모터의 재질 변화를 통한 개선안을 도출하였다.
2. 진동 저감 관점에서 SMART 형태가 기존에 사용되는 사이클로이드 형태보다 이송 속도가 빠르고 진동에너지 관점에서도 유리함을 확인하였다.
3. 현재 사용되는 직동 시스템은 마찰력의 영향이 크므로 이를 고려하여 마찰 요소가 극히 미소한 공기 베어링 등을 사용하여 비선형 요소를 저감시키는 설계가 이루어져야 한다.

## 참고문헌

1. 송창규, 신영재, 이후상, 마찰구동기구로 구동되는 초정밀 가공기 이송계의 특성 평가, 한국정밀공학회지, 제 19 권, 제 7 호, pp.64-70, 2002.
2. 은인웅, 봄inear Motor 를 이용한 위치결정 기술, 한국정밀공학회지, 제 17 권, 제 12 호, pp.20-25, 2000.
3. 이찬홍, 초정밀 위치 결정 기술, 한국정밀공학회지, 제 17 권, 제 12 호, pp.9-15, 2000.
4. 은인웅, 봄EM 을 이용한 동기식 리니어 모터 열 특성의 해석? 대한 기계학회 논문집 A 권, 제 26 권 제 8 호, pp. 1401-1471, 2002.
5. 은인웅, 고속·대추력 리니어 모터의 열특성 최적화 [1].? 한국정밀공학회지 제 19 권 제 6 호, pp.184-191, 2002.
6. Suhas V. Patankar, 번역 : 이재현, 오명도, 열·유체공학 수치 해법? 2001.
7. 장현탁 등, 침 마운트 시스템의 진동 저감?, 한국소음진동공학회, 제 11 권, 제 8 호, pp.331~337, 2001.
8. Brian A. A., et al., 봄 anometer Positioning of a Linear Motion Stage Under Static Loads?, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol.3, No.1, pp.113~119, 1998.