

평면형 구조와 Halbach 자석배열 선형모터를 이용한 리니어 XY 스테이지의 설계

김기현*, 이문구⁺

(논문접수일 2010. 6. 28, 심사완료일 2010. 8. 4)

Design of Linear XY Stage using Planar Configuration and Linear Motors with Halbach Magnet Array

Kihyun Kim*, Moon G. Lee⁺

Abstract

In flat panel display or semiconductor industries, they install the equipments with fine line width and high throughput for fabrication and inspection. The equipments are required to have the linear stage which can position the work-piece with high speed, fine resolution on wide range of motion. In this paper, a precision planar linear XY stage is proposed. The stage has a symmetric planar window configuration and is guided by air-bearings on granite plate. The symmetric planar window configuration makes the stage has robustness against dynamic and thermal disturbances. The air-bearings let the stage move smooth on straight guide bar and flat granite surface. The stage is actuated by linear motor with Halbach magnet array (HMA). HMA generates more confined magnetic flux than conventional array. The linear motors are optimized by using sequential quadratic programming (SQP) with the several constraints that are thermal dissipation, required power, force ripple and so on. The planar linear XY stage with the symmetric planar configuration and the linear motors is implemented and then the performance such as force ripple, resolution and stroke are evaluated.

Key Words : Linear motor(선형모터), Halbach magnet array(할바흐 자석 배열), Precision stage(정밀 스테이지), Optimal design(최적설계)

* 특허청

+ 교신저자, 아주대학교 기계공학부 (moongulee@ajou.ac.kr)

주소: 443-749 경기도 수원시 영통구 원천동 산 5번지

기호설명

- l = Effective length of coil in magnetic field (mm)
- B = Magnetic flux density (T)
- R_{phase} = Resistance of each phase of coil winding (Ω)
- μ_0 = Permeability of vacuum (T/A)
- k = Thermal conductivity of backing plate (W/m)
- h = Convection coefficient of air (W/m^2)
- J = Current density (A/m)
- i = Current in each phase of coil winding (A)
- n = Number of turns of each phase of coil winding

1. 서론

최근 전자산업의 발전은 시스템의 고속, 정밀 그리고 대형화를 요구하며, 이러한 요구는 분해능과 행정거리의 비율인 상대 불확도 관점에서 점점 미소해지는 경향을 갖는다. 이러한 경향은 정밀 시스템을 구성하는 구동기, 위치 측정 시스템과 제어기 등의 요소품의 극한적인 성능을 요구한다. 다시 말해 효율이 높고 외란이 적은 구동기, 높은 정확도와 환경 영향에 강건한 측정기, 빠른 속도로 정밀한 운동을 수행할 수 있는 제어기 등이 필요하다.

외란을 줄이거나 높은 정확도를 위한 정밀 위치 결정 시스템에 대한 연구로써 다 자유도를 한 번에 구현하는 자기 부상 시스템, 외란의 영향을 줄이기 위하여 보이스 코일 모터를 이용한 기계적 결합이 없는 시스템, 그리고 높은 정지 정밀도를 갖기 위하여 압전소자를 이용한 이중 서보시스템이 연구되었다.⁽¹⁻⁴⁾ 또한, 기존에 자동화 시스템에 채용되었던 회전 모터는 힘 전달 시스템인 볼 스크류를 사용하고 있기 때문에 백래쉬, 소음 그리고 저속 구동의 특성을 갖고 있다. 이 문제를 극복하기 위하여 힘 전달 시스템이 필요 없는 다양한 선형모터(Linear Motor, LM)가 개발되었으며 현재 대부분의 정밀 스테이지에 채용된다. 선형모터는 철심이 있는 것과 철심이 없는 것으로 구성이 되는데, 철심형 모터는 비철심형에 비해 큰 힘을 발생하나 모터 구성에 의하여 외란 요소인 코깅을 발생시킨다. 반면에 비철심형 모터는 코깅은 작으나 효율이 떨어진다. 이를 극복하기 위한 연구로써 Lee에 의하여 Halbach 자석 배열(Halbach Magnet Array, HMA)을 이용한 선형모터가 제안되었다.⁽⁵⁾

본 논문에서는 HMA를 이용한 효율이 높은 선형모터를 이용하여 평면 구동이 가능한 스테이지를 다음과 같이 제안

하고자 한다. 첫째, 제안하는 평면형 리니어 XY 스테이지의 구성 및 특징을 설명한다. 둘째, 제안된 스테이지의 구동을 위하여 적용된 HMA를 이용한 선형모터의 구동 원리, 설계 조건 및 최적 설계 결과를 기술한다. 마지막으로 최적 설계된 선형모터의 제작 및 조립을 과정을 기술하고, 설계 결과를 검증한다.

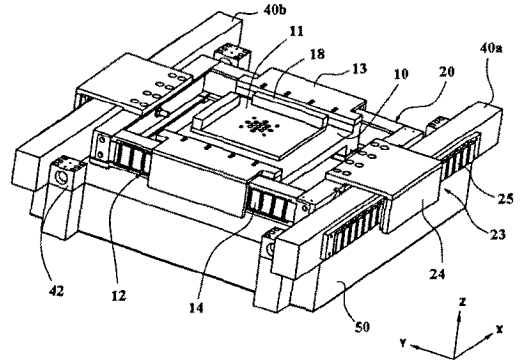


Fig. 1 Proposed planar linear XY stage with linear motors using HMA. 10: XY stage that carries sample, 12: Y HMA, 13: Y coil winding assembly, 18: L mirror for position sensing using laser interferometer, 20: X stage, 25: X HMA, 24: X coil winding assembly, 40a, b: X guide

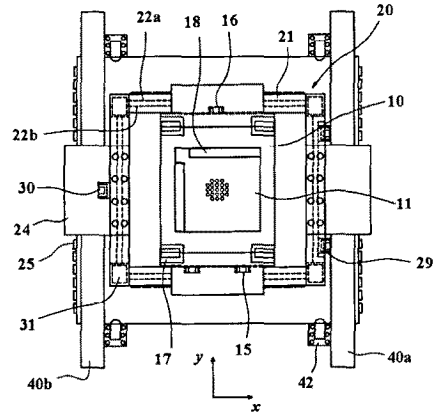


Fig. 2 Top view of proposed stage. 11: L mirror assembly, 15, 16: air bearing along I beams for X motion, 17, 31: air bearing on granite plate, 21: window frame with I beams, 29, 30: air bearing along guides for Y motion

Table 1 Configurations of XY stage with guide mechanism

		Advantages	Disadvantages
Stack		Low cost Simple configuration	Bad flatness and pitch & yaw error Tall structure
Stack and Open		Large actuating force Symmetric configuration Small yaw error	Tall structure Complicate configuration
Window		Low structure Large actuating force Easy to emit heat Small yaw error	Complicate configuration Weak to distortion Difficult to make long stroke
T type		Simple configuration Small number of guide bar	Sensitive to disturbing torque Small actuating force
H type		Simple configuration Medium height	Need to compensate yaw error

2. 평면형 리니어 XY 스테이지의 개념설계

본 논문의 평면형 XY 스테이지의 개념도는 Fig. 1과 2와 같다.⁶⁾ 이 정밀 XY 스테이지의 구성 및 특징은 다음과 같다.

첫째, 평면형 Window 구조를 XY 스테이지의 기본 구조로 선택한다. 일반적으로 XY 스테이지의 형태는 Table 1과 같이 정리된다.⁶⁻⁹⁾ Window 형의 장점은 설치되는 모터가 대칭적으로 두 개씩 배치되므로 구동력을 증가 시킬 수 있고 모터의 코일 권선에서 발생하는 열이 구동 방향의 수직 방향으로 쉽게 방출되어 열에 의한 변형을 최소화할 수 있다는 것이다. 전체 시스템의 무게 중심이 낮고 각 방향의 가동부 중심의 높이 차이도 최소화 할 수 있어서, 힘 중심과 시스템의 무게 중심의 불일치로 인한 기생운동을 최소한으로 줄일 수 있다. 그러나, 이 구조의 시스템은 복잡한 구조와 낮은 강성 갖는다. 본 논문에서는 일반적인 Window 구조의 복잡한 구조와 낮은 강성을 개선하기 위한 기본 프레임의 부재로 I형 빔을 이용하였다. I빔의 형상적 특징인 양쪽 홈을 공기베어링 고정면, 가이드 면과 선형모터의 자석 배열 고정면으로 활용하여 전체 시스템을 단순화 하였다. 또한, I빔의 사용은 Window 구조의 단점인 약한 강성을 강화시키는 효과를 갖는다.

둘째, 선형 운동을 위한 정밀 가이드 시스템은 마찰이 없

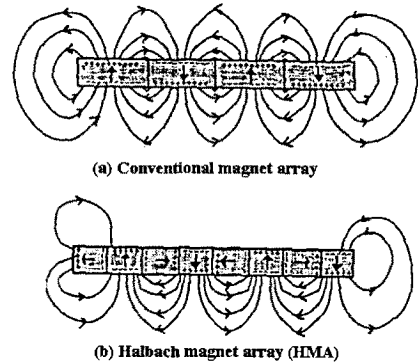


Fig. 3 Configuration of magnet array: The boxes are magnets, the head of arrow is N pole and the tail is S pole, and the curves are magnetic flux lines

는 공기 베어링과 정밀 석정반(Granite plate)과 I빔의 홈을 이용하여 구성된다. 특히, 가이드 면의 가공 및 조립 한계를 해결하기 위하여 베어링과 가동부 사이에 자유도를 허용할 수 있는 볼 접촉 방식을 적용한다.

셋째, 기존 연구를 참고하여 HMA를 갖는 선형모터를 구동기로 적용한다. 기존 분석에 의하면 Fig. 3(a)의 기존 자석

배열에 비하여 Fig. 3(b)처럼 수평 자화된 영구자석을 추가로 갖는 HMA가 높은 밀도의 자기장을 코일에 가할 수 있어서 기존에 비해 단위 체적당 구동력이 약 1.4배 높다.^(2,5,10)

3. HMA 선형모터의 설계

3.1 제한조건과 설계변수

제안된 스테이지는 아래 사양의 검사 시스템을 위한 위치 결정 시스템으로써 Fig. 4의 운동궤적과 Table 2와 같은 구동 조건을 만족하도록 설계되어야 한다. 그러므로 본 절에서는 제안된 선형모터의 요구 사양과 최적 설계에 대하여 기술한다.

- 검사 정비의 검사 방법 : Scan & Step
- 전체 검사 영역(Diameter) : 8inch Wafer
- 전수 검사 시 Field Size : 약 25mm²
- 생산 속도 : 60 wafer per hour
- 가동부 질량 : X축 20kg, Y축 30kg

HMA 선형모터를 설계하기 위하여 각 상의 코일들은 직렬 연결을 하고 전체 코일부 구성에는 Y 결선이 적용된다. 직렬로 연결하는 방법은 인덕턴스를 증가시키고 요구되는 전압을 증가시키나 공급 전류의 크기가 작아진다. 이것은 선형모터에 의한 이송 기구의 반응을 느리게 하는 단점이 있으나 선형모터에서 발생하는 열을 감소시킬 수 있다. 최적 설

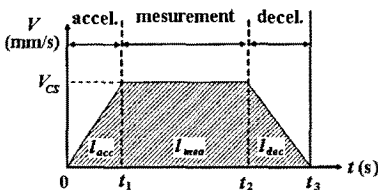


Fig. 4 Motion profile of positioning system

Table 2 Parameters of motion profile

Parameters	Value
V_{cs} (constant velocity)	300mm/s
A (acceleration)	5m/s ²
l_{dec} (deceleration region)	1mm
l_{acc} (acceleration region)	1mm
l_{mea} (measurement region)	25mm

계 시 사용될 Y 결선 모터의 파라미터는 Table 3과 같다.⁽¹¹⁾

구동 조건 및 코일 결선 방법과 함께 선형모터의 최적 설계에 적용되는 제한 조건들은 다음과 같다.

첫째, 가속도와 이송 시스템의 질량에 의하여 요구되는 구동력을 X축 100 N, Y축 150 N 으로 선정한다. 이것은 Fig. 4의 가감속 구간의 가속도에서 계산된 값이다. Fig. 1(a)의 정밀 XY 스테이지의 대칭적인 구조에 의해서 X 방향과 Y 방향으로 각각 2개의 선형모터를 가지므로 모터의 구동력은 각각 50 N과 75 N 이상이 되어야한다.

둘째, 선형모터의 구동을 위하여 사용되는 앰프(Amplifier)가 전류를 모터에 인가하는 방식은 소모되는 파워를 최소화하고 코일의 열 발생을 줄이기 위하여 PWM(Pulse Width Modulation) 방식이 적용된다. 구동 앰프는 STMicroelectronics사의 L298을 사용한다. 적용된 구동 칩의 최대 전류 값(I_{max})은 2A 이며, 최대 인가될 수 있는 구동 전압(V_{max})은 45V 이다. 그러므로, 선형모터에 인가될 수 있는 최대 전압은 역기전력까지 고려하여 45V 이하가 되어야 한다.

셋째, 모터를 구성하는 코일에 의하여 발생하는 열에 대한 조건이 고려되어야 한다. 최적 설계 시 모터에 의한 열 발생을 고려하기 위하여, 본 논문에서는 열 방출 과정을 두 부분으로 나눈다. 시스템을 구동하는 데 있어서 가감속 구간 즉, 열을 발생하는 구간과 정속구간 즉, 열을 발생 시키지 않는 구간이 있다. PWM의 Duty는 전체 소요되는 시간에 대해 열을 발생하는 구간의 비율을 나타낸다. Fig. 4와 Table 2의 조건을 갖는 시스템의 Duty는 식 (1)~(2)에서 표현되며 약 24%이다. 최적설계에 적용되는 발열 조건 관계식은 식 (3)

Table 3 Coil connection: L_{phase} is inductance and R_{phase} is resistance, n is number of turns of coil and l is effective length of each phase of coil winding

Coil connection	Y-connection
Force constant	$\frac{3}{2}nBl$
Resistance	$2R_{phase}$
Inductance	$2L_{phase}$

으로 표현된다. 식 (3)에서 i_s 는 코일에 흐르는 전류이고 R_{coil} 은 각 모터의 주기당 3상에 의한 저항($2R_{Phase}$)이다. 발생하는 열에 의해 코일의 온도가 상승하게 되는데, 코일에 코팅된 피복이 견디는 온도를 감안하여 온도상승이 80°C 를 넘지 않도록 한다. 이때, 코일권선의 열전달은 Fig. 5와 같이 모델링한다. 대부분의 열은 대류로 전달되며 일부만 후면판(backing plate)를 통하여 전도된다고 가정하였다. 이것은 세라믹 재료인 자석의 열전도도를 무시한 것으로써 온도상승에 안전계수를 고려한 것과 같은 효과를 가진다.

$$T_{total} = 2\left(\frac{l_{acc}}{V_{cs}} + \frac{l_{dec}}{V_{cs}}\right) + T_{settling} + \frac{l_{measure}}{V_{cs}} + T_{Jump} \approx 0.25s \quad (1)$$

$$Duty = \frac{2\left(\frac{l_{acc}}{V_{CS}} + \frac{l_{dec}}{V_{CS}}\right)}{T_{tot}} \approx 24\% \quad (2)$$

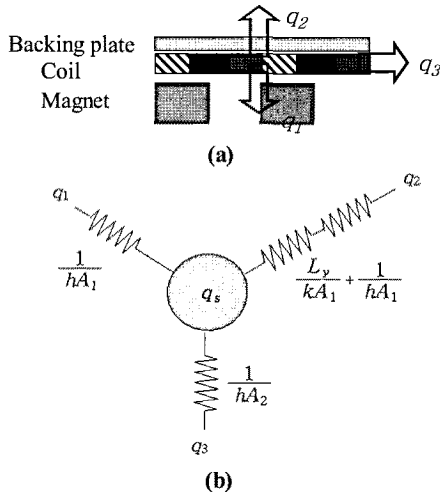


Fig. 5 Heat transfer model of Linear Motors: (a) Thermal dissipation from coils, (b) Thermal resistance model

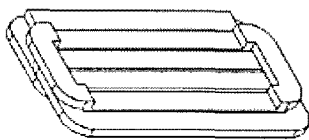


Fig. 6 Schematics of 3 phase coil winding assembly

$$q_s = i^2 R_{coil} = i^2 n \rho \frac{l_c}{A_c} < q_{out}/Duty \quad (3)$$

넷째, 선형모터는 자속과 전류의 상호작용으로 힘을 생성한다. 두 변수의 관계가 정확한 관계로 상호작용을 하지 않을 경우 정밀 구동 시 외란 역할을 하는 힘 리플(Force Ripple)이 발생한다. 본 논문에서는 이를 개선하기 위하여 제어기로부터 코일에 인가되는 전류를 완전한 정현파로 가정하고, 설계되는 모터의 힘 리플이 10%보다 작도록 제한한다.

다섯째, 본 논문에서의 선형모터의 코일은 굽힘 성형과 접착에 의해서 Fig. 6과 같이 3상의 코일권선 조립체로 제조된다. 이때, 코일의 두께와 형상에 의하여 성형할 수 있는 두께가 4mm로 한정된다.

여섯째, 시스템 간소화를 위하여 선형모터의 코일부가 차지하는 모터 부피는 $4,000\text{mm}^3$ 를 넘지 않도록 한다.

마지막으로 최대 구동력의 안전계수는 1.5로 정한다.

위 조건들과 함께 제안된 HMA 선형모터의 설계 변수는 코일 직경(d_{coil}), 코일 감은 수(n), 자석 두께(w_m)이다.

3.2 자속 모델과 설계 최적화 과정

전자기 구동기의 힘은 코일의 전류와 자속의 상호작용으로 발생한다. 자속 밀도를 구하기 위하여 식 (4)의 Maxwell 방정식이 이용되며, 자속에 의한 자속밀도는 상용 유한요소 해석 프로그램인 MaxwellTM로 모델링 하였다. 구동력(\vec{F})을 구하기 위하여 식 (5)의 Maxwell 응력 텐서(\vec{f})를 적용한다. 이때 벡터(\vec{n})은 적분면에 수직인 단위벡터이다.⁽⁵⁾

$$\nabla \cdot B = 0, \nabla \times B = \mu_0 J \quad (4)$$

$$\vec{f} = (\vec{B} \cdot \vec{n}) \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \frac{1}{2} \vec{n} \left(\frac{B^2}{\mu_0} \right), \vec{F} = \oint_A \vec{f} dA \quad (5)$$

식 (4), (5)와 상용 프로그램인 MatlabTM의 최적설계 알고리즘 중에서 각각의 계산 단계를 2차 문제로 단순화시키는 방식인 SQP(Sequential Quadratic Programming)와 각 계산단계의 Lagrangian의 Hessian을 갱신하여 설계 결과가 지역 최소값으로 수렴하게 하는 BFGS(Broyden- Fletcher- Goldfarb- Shanno) 방법이 적용된다.⁽¹²⁾

최적설계 과정에서 최소화하고자 하는 목적함수(J)는 단위 부피당 힘을 최대화 하기 위하여 식 (6)과 같이 표현된다.

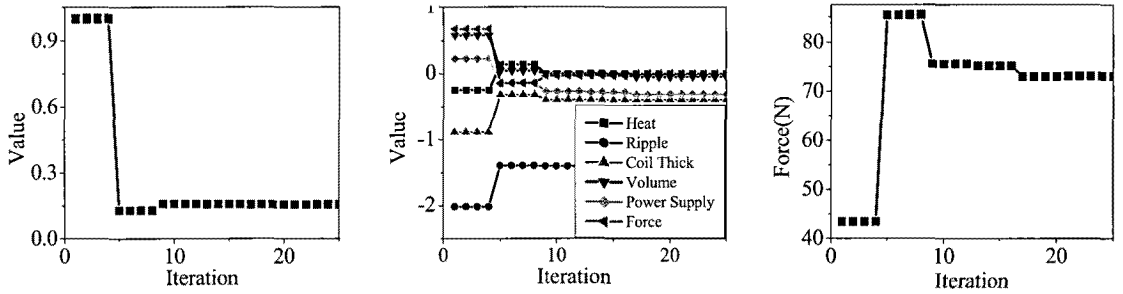


Fig. 7 Optimization process of X-axis linear motor : (a) cost function, (b) constraint values, (c) actuating force

Table 4 Results of optimization

Design Variables	Optimal Values (mm)	
	Y LM	X LM
Magnet Thickness (l_m)	12 (Fixed)	
Magnet Length (l_m)	75	45
Magnet Thick. (w_m)	11.2	12.9
Coil Turns (n)	96	108
Coil Diameter (d_{coil})	0.45	0.45
Air Gap (w_{gap})	1	
Current (i)	2 A (Fixed)	
No. of a motor pitch	5	5
$F_{optimal}$	$F_x=72$ (N), $F_y=110$ (N)	

$$J = \left(\frac{Volume_i}{F_i} \right)^2 \text{ where, } i = X, Y. \quad (6)$$

최적설계 과정은 앞서 논의한 제한조건에서 Fig. 7과 같이 임의의 시작점에서 일정한 값으로 수렴한다. 이러한 양상은 Y 선형모터에서도 비슷하게 나타난다. 최적 설계를 이용하여 얻은 HMA 선형모터의 형상 및 치수는 Table 4와 같다.

3.3 HMA 선형모터의 설계 검증

자속밀도평가 장치의 구성은 Fig. 8(a)와 같이 가우스 미터(FW Bell 7010)와 마이크로 모션 스테이지로 이루어진다. 최적 설계되어 제작된 HMA의 자속 밀도의 측정결과는 Fig. 8(b)와 같이 MaxwellTM의 모델과 거의 일치하고 있다. 제작된 선모터의 힘 리플을 확인하기 위하여 자속 밀도 곡선을 최소 자승법에 의하여 식 (7)과 같이 근사한다. 모델링된 자속 밀도, 이상적인 정현파를 갖는 입력 전류와 식 (8)을

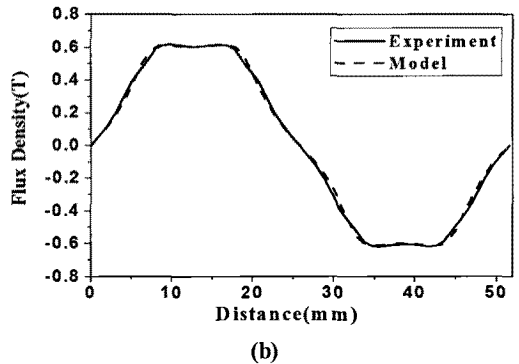
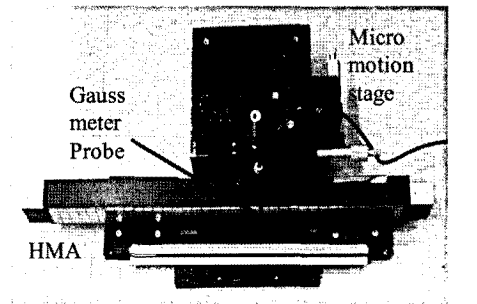


Fig. 8 Evaluation for magnetic flux density of linear motor: (a) Experimental setup, (b) Flux density of X-axis LM

이용하여 실험결과를 분석할 수 있다. 식 (7)에서 p_x 는 선형모터의 한 피치의 길이이고, 첨자 ϕ 가 각각 $0, -2\pi/3, 2\pi/3$ 이면 U, V, W 상의 위치에서 자속밀도의 분포이다. 식 (8)의 첨자 $0, -2\pi/3, 2\pi/3$ 는 각 상의 코일에 전류를 인가할 때의 위상차를 나타낸다. N 은 선형모터의 피치의 수이다. 이 관계는 Y축에도 비슷하게 성립한다.

Table 5 Specifications of proposed precision XY stage

	X-axis	Y-axis
	Coreless HMA linear motor (serial & Y connection)	
Actuator	Motor pitch $p_x = 51.6\text{mm}$	Motor pitch $p_y = 45\text{mm/pitch}$
	$L_{\text{phase}}=20\text{mH}$, $R_{\text{phase}}= 13.6 \Omega$, $K_e=31.61\text{V/m/s}$	$L_{\text{phase}}=20\text{mH}$, $R_{\text{phase}}= 14.8 \Omega$, $K_e=47.5\text{V/m/s}$
Guide	Parallel 2 granite guide bar & Porous air bearing	
Structure	One Body	Window Frame with Four I Beams
Range	200mm	
Force	$F_x = 146 \text{ N @ } 2\text{A}$ ($k_{f_x}=36.5 \text{ N/A}$)	$F_y = 220 \text{ N @ } 2\text{A}$ ($k_{f_y}=55 \text{ N/A}$)
Mass	9.7kg	16.4kg
Ripple	6.2%	7.0%
Size	$466 \times 240 \times 70\text{mm}^3$ on $600 \times 700\text{mm}^2$ granite	$768 \times 430 \times 80\text{mm}^3$ on $600 \times 700\text{mm}^2$ granite

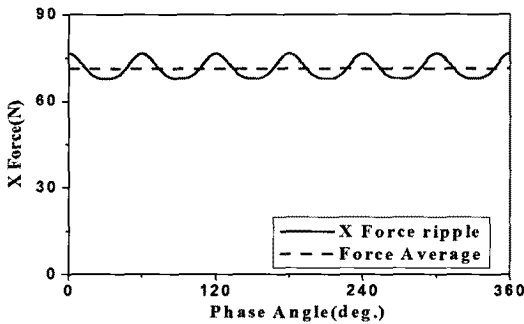
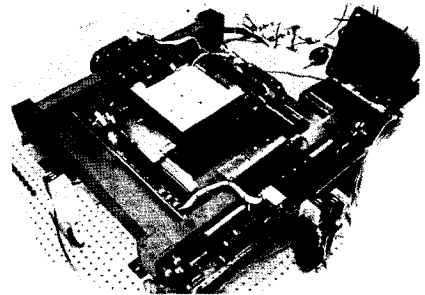


Fig. 9 Actuating force of HMA LM

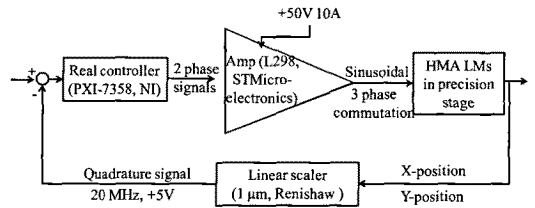
$$B_\phi = \sum_{n=1}^7 A_{2n-1} \sin(2n-1) \left(2\pi \frac{x}{p_x} + \phi \right) \quad (7)$$

$$F_x = \frac{3}{2} nN \begin{bmatrix} i_0 & i_{-2\pi/3} & i_{2\pi/3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_0 \\ B_{-2\pi/3} \\ B_{2\pi/3} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Fig. 9에서 제작된 선형모터에 의해 발생 되는 X, Y축 힘은 평균 71.5 N과 106.9 N이다. 그리고, 일정한 주기를 보이고 있는 힘 리플은 각각 6.2%와 7.0%이다. 최적 설계 결과와 실험에서 구동력이 최대 약 3 N의 차이가 있다. 이는 제작과 조립 및 자속 밀도의 측정에서 기인한 것으로 보인다. 제작된 HMA 선형모터의 주요 사양은 Table 5에 표시하였다.



(a)



(b)

Fig. 10 Proposed precision XY stage: (a) Fabricated stage with HMA LM and symmetric window structure, (b) Electronics, sensors and controllers

4. 제안된 XY 스테이지의 성능

4.1 XY 스테이지 시스템의 구성

Fig. 10(a)와 Table 5와 같이 HMA 선형모터가 적용된 XY 스테이지를 구현하였다. 제작된 정밀 스테이지의 제어를 수행하기 위하여 1 μm 선형 스케일러(Renishaw 社), PXI

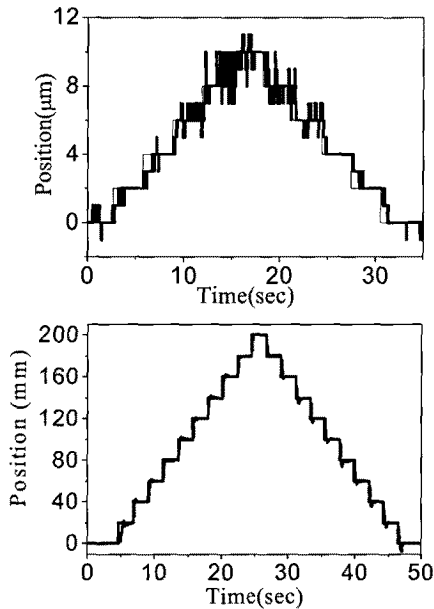


Fig. 11 Evaluation of precision XY stage; (a) 1 μ m resolution test and (b) 20mm step response

실시간 제어 시스템(National Instrument 社), 그리고 앞에서 언급되었던 PWM 앰프(L298, STMicroelectronics 社)가 Fig. 10(b)에 표시된 것 같이 적용되었다.

DQ 변환(Direct Quadrature transform)과 PPI(Proportional-Integral) 제어를 제작된 스테이지에 적용하면 Fig. 11과 같이 1 μ m의 분해능과 200mm 행정거리 안에서 자유로운 운동이 가능하다. 그러나, 제어 알고리즘에 대한 연구는 이 논문의 주제인 설계를 넘어서는 것으로 향후 논문에서 자세히 밝힐 예정이다.

5. 결론

본 연구에서는 평면형 구조와 HMA 자석 배열을 갖는 선형모터를 구동 사양, 형상, 그리고 열 조건에서 최적 설계 및 제작, 평가하였다. 그리고 제작된 HMA 선형모터를 적용한 평면형 구조의 평면형 리니어 XY 스테이지가 평가되었다.

최적 설계 및 제작 HMA 선형모터는 설계 조건을 만족할 수 있도록 X, Y축으로 평균 71.5 N과 106.9 N의 구동력을 생성하고 구동 시의 힘 리플은 각각 약 6.2%, 7.0% 이다.

HMA 선형모터와 제안된 I빔으로 구성된 Window 구조의 XY 스테이지의 성능은 적용된 HMA의 기생 운동을 제

거하기 위한 DQ 변환과 정밀 제어 시스템을 이용하여 1 μ m의 분해능과 200mm 구간 내의 운동으로 구현되었다.

후기

본 연구는 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 전략기술 인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참고문헌

- (1) Kim, M.-S., Oh, M.-T., Kim, J.-H., 2008, "Design of the Low Hunting Controller for the Reticle Stage for Lithography," *Trans. of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 17, No. 4, pp. 51~57.
- (2) Trumper, D. L., Kim, W. J. and Williams, M. E., 1996, "Design and analysis framework for linear permanent-magnet machines," *IEEE Trans. On Industry Appl.*, Vol. 32, No. 2, pp. 371~379.
- (3) Kim, K. H., Choi, Y. M., Kim, D. M., Nam, B. U., Lee, S. W., Lee, M. G. and Gweon, D. G., 2005, "Ultra high precision Dual stage system Using Air bearing and VCM for Nano level Scanning," *KSPE*, Vol. 22 No.5, pp. 103~112, in Korean.
- (4) Elfizy, A. T., Bone, G. M. and Elbestawi, M. A., 2005, "Design and control of a dual-stage feed drive," *Inter. Jour. of Machine Tools & Manufacture* Vol. 45, pp. 153~165.
- (5) Lee, M. G. and Gweon D. G., 2004, "Optimal design of a double-sided linear motor with a multi-segmented trapezoidal magnet array for a high precision positioning system," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 281, pp. 336~346.
- (6) Gweon, D. G., M. G. Lee, Kim, K. H., *Long stroke stage using double H structure with I beams*, Korea patent 10-0428052.
- (7) Novak, W. T., 1998, *Dual guide beam stage mechanism with yaw control*, US patent 5760564.
- (8) Lee, M. E., 1999, *Window Frame-guided stage mechanism*, US patent 5874820.
- (9) Novak, W. T., 2000, *Precision scanning apparatus and method with fixed and movable guide members*,

US patent 6134981.

- (10) J. Ofori-Tenkorang and J. H. Lang, "A Comparative Analysis of Torque Production in Halbach and Conventional Surface-Mounted Permanent-Magnet Synchronous Motors", IEEE IAS Annual meeting, Oct. 8-12, 1995, pp. 657~663.

(11) Fitzgerald, A. E., Kingsley, Charles, Umans, Stephen, 1990, Electric Machinery 5th, McGraw-Hill, New York.

(12) Jasbir S, Arora, 1989, Introduction to Optimum Design, McGraw-Hill, New York, pp. 347~425.