

VCM 을 이용한 나노 정밀도 스캐닝 용 초정밀 이중 스테이지

김기현[#], 권대갑^{*}, 최영만^{*}, 김동민^{*}, 남병욱^{*}, 이석원^{**}, 이문구^{**}

Ultra high precision Dual stage system Using Air bearing and VCM for Nano level Scanning

Ki-Hyun Kim[#], Dae-Gab Gweon^{*}, Young-Man Choi^{*}, Dong-Min Kim^{*}, Byoung-Uk Nam^{*},
Suk-Won Lee ^{**} and Moon-Gu Lee^{**}

ABSTRACT

This paper presents one-axis high precision scanning system and illustrates the design of modified X-Y- θ stage as a tracker using VCM and commercialized air bearings for it. The scanning system for 100nm resolution is composed of the 3-axis stage and one axis long stroke linear motor stage as a follower. In this study a previous proposed and presented structure of VCM for the fine stage is modified. The tracker has 3 DOF(X-Y- θ) motions by four VCM actuators which are located on the same plane. So 4 actuating forces are suggested and designed to create least pitch and roll motions. This article will show about the design especially about optimal design. The design focus of this fine stage is to have high acceleration to accomplish high throughput. The optimal design of maximizing acceleration is performed in restrained size. The most sensitive constraint of this optimal design is heat dissipation of coil. There are 5 design variables. Because the relationship between design variables and system parameters are quite complicated, it is very difficult to set design variables manually. Due to it, computer based optimal design procedure using MATLAB is used. Then, this paper also describes the procedures of selecting design variables for the optimal design and a mathematical formulation of the optimization problem. Based on the solution of the optimization problem, the final design of the stage is also presented. The results can be verified by MAXWELL. The designed stage has the acceleration of about 5 m/s² with 40kg total mass including wafer chuck and interferometer mirror. And the temperature of coil is increased 50°C. In addition, the tracker is controlled by high precision controller system with HP interferometer for it and linear scaler for the follower. At that time, the scanning system has high precision resolution about 5nm and scanning resolution about 40nm in 25mm/s constant speed

Key Words : High precision, Scanning system, VCM, Dual Servo system

접수일: 2004 년 12 월 3 일; 게재승인일: 2005 년 3 월 11 일

교신저자 : 한국과학기술원 기계공학과

E-mail dgweon@kaist.ac.kr Tel. (042) 869-3225

* 한국과학기술원 기계공학과

** 삼성전자 지능시스템 연구소 메카트로닉스 센터

기호설명

F = Lorentz Force generated by magnetic flux and current (N)

n = Numbers of Coil turn

B = Magnetic flux density(T)

i = Current through the coil(A)

l_{eff} = Effective coil length in Magnetic field(m)

P = Permeance(H or Wb/A)

A = Sectioned Area(m²)

l = Length of Magnetic field path(m)

μ = Permeability of material(H/m)

R_{total} = Reluctance seen by the mmf source(coil)(1/H)

R_{coil} = Resistance of coil(Ω)

f = Actuating frequency(Hz)

k = Back-emf constant(N · sec/m)

h = Conductance(kcal/m²/h/°C)

k = Thermal conductivity(kcal/m/h/°C)

ΔT = Temperature Changed in coil(°C)

qs = Heat Power dissipated in coil(W)

$R_{Thermal}$ = Heat Resistance(°C/W)

1. 서론

반도체 및 LCD, PDP 의 대형 패널 디스플레이 장비들은 장행정· 고정밀도의 장비를 요구하고 있다. 검사 구간의 증가와 장비 및 생산 시스템의 고생산성 요구는 고정밀도와 고속 조건을 동시에 수행하는 스테이지의 필요성을 증가시킨다. 고정밀도·고속 스테이지들은 높은 정지 정밀도를 갖는 시스템과 속도 리플이 거의 없는 정속 특성을 갖는 시스템으로 구분되었으며, 여러 생산 과정의 필요에 따라 사용성이 각각의 특성에 맞도록 요구되었다. 요즈음에 두 요건을 모두 충족시키면서, 특히, 고정밀도의 정속 특성을 갖는 시스템들은 제안되고 발표되고 있다.^{1,2} 제안된 시스템들의 특징은 이중 서보 구조이며, 단행정 구동기는 VCM(Voice Coil Motor) 혹은 압전 구동기를 장행정 구동기는 선형모터를 사용하고 있다. 그 외 정지 정밀도와 안정도만을 고려하는 시스템에서는 볼 스크류, 리니어모션 가이드, 그리고 압전 구동기를 이용하는 것들이 발표가 되었다.^{3,4} 본 논문은 김동민⁵에 의하여 제안되고 발표된 시스템을 500mm 행정 구현

시스템으로 변경· 발전시키며, 실제 장행정 운동 구현성을 평가하고자 하는 것을 목적으로 한다. 또한, 본 논문에서는 VCM 스테이지 최적 설계 시, VCM 에서 발생하는 열적 문제와 시스템의 운동 특성에 의하여 수반되는 조건들이 함께 고려된다.

본 논문은 총 3 장으로 구성된다. 첫 장은 고정밀 스캐닝 시스템의 구성 및 개념을 제안하고 설명하며, 둘째 장에서는 고정밀 스캐닝 시스템을 구성하는 VCM 스테이지의 최적 설계에 대하여 기술한다. 열 방출 조건 및 열 해석 모델을 최적 설계 시 고려한다. 그리고, FEM 시뮬레이션을 통하여 설계의 타당성을 검증한다. 마지막 장에서는 제안되고 설계· 구현된 시스템의 성능을 평가한다.

2. 이중 스테이지의 개념 설계

2.1 분리형 이중 스테이지의 개념

일반적인 이중 스테이지 시스템은 미세 변위 스테이지와 장행정 스테이지로 구성되며, 두 스테이지의 기계적 결합으로 이루어진다. 그러나, 기계적 결합으로 이루어진 시스템은 예상할 수 없는 장행정 스테이지의 외란이 미세 변위 스테이지에 작용되고 전달된다. 그 외란이 때로는 미세 변위 스테이지를 제어하여 극복하기 힘들 정도의 성분들로 구성될 수 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여, 본 논문에서는 Fig. 1 과 같은 개념 구조를 갖는 이중 스테이지 구조를 제안하며, 스테이지들 사이에 기계적 결합이 없도록 구동 방법과 구조를 제안한다. 제안되는 한 축 고정밀도 스캐닝 장행정 시스템은 평면 3 축(XYθ) 운동 에너지를 보상하면서 고정밀도의 정속 운동을 생성하지만 근본적으로 작은 행정거리를 갖는 스테이지와 그 작은 행정 거리를 극복할 수 있도록 하고 기계적 결합으로 인한 불확실성은 전달하지 않는 장행정 스테이지로 구성된다. VCM 으로 이루어진 스테이지는 기준을 추정하는 일을 담당하기에 본 논문에서는 트랙커(tracker)로 명명한다. 그리고, 기준을 추정하는 트랙커가 갖는 근본적 한계인 작은 행정 거리를 극복하기 위하여 선형모터와 공기베어링으로 구현된 장행정 구동부를 팔로워(follower)라 한다.

제안되는 시스템 구성 시, 트랙커와 팔로워 사이 기계적 불확실성 및 제어 할 수 없는 기계적 진동오차 등이 없도록 하기 위하여 트랙커의 구동

원리를 로렌츠 힘으로 한다. 로렌츠 힘은 플레밍의 왼손 법칙을 따르면서 힘과 전류와의 관계로 표현 되는데, 로렌츠 힘, 전류, 코일 감긴 수, 그리고 자속 밀도 관계는 Eq. (1)과 같이 수식적으로 표현되며 이러한 구성 성분들은 기계적 결합이 없이 작용된다. 로렌츠 힘을 이용하는 구동기는 일반적으로 보이시 코일 모터(VCM)로 알려져 있다.

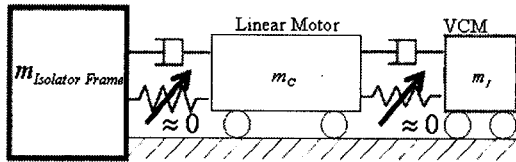


Fig. 1 Schematic of Tracker and Follower

$$F = ni\vec{l}_{eff} \times \vec{B} = ni(l_x\vec{i} + l_y\vec{j} + l_z\vec{k}) \times (B_x\vec{i} + B_y\vec{j} + B_z\vec{k}) \quad (1)$$

2.2 분리형 이중 스테이지의 구성

제안된 이중 스테이지는 앞 절에서 언급된 트래커와 팔로워, 그리고 가이드와 측정 센서들로 이루어진다. 운동 가이드들은 트래커와 팔로워의 평면 운동을 위한 석정반과 팔로워의 직선 운동을 가능하게 하는 알루미늄 바로 존재한다.

로렌츠 힘을 본 논문에 구체적으로 적용하기 위하여, 코일은 팔로워에 고정하고, 자속 밀도를 생성하는 자석과 요크는 실제 움직임을 갖는 트래커에 고정하는 구조를 채택한다. 고정하는 것은 일정한 힘 방향 생성과 열 방출에 의한 트래커 시스템의 변형 및 영향을 줄여주기 위함이다. 그런데, 기존 연구되어 발표된 3 개의 VCM 을 120° 배열한 시스템은 장행정을 외부로 설치할 수 밖에 없는 시스템이며, 5 장행정을 구현하기 위하여서는 넓은 시스템 공간 및 가이드 면을 요구 한다. 또한, 세 개의 VCM 의 운동을 평면 운동으로 변환하기 위하여서는 비선형적 기구학 모델링을 수행하여야 하며 시스템 구동력 크기 측면에서 단점을 갖는다. 이것을 해결하기 위하여 본 논문의 트래커는 Fig. 2 에서 보여지는 것 같이 4 개의 VCM, 4 개의 상용 포러스 형 공기베어링, 그리고 350mm 평면 직각 미러로 구성된다. 이러한 사각 구조는 내부에 팔로워를 포함하여 시스템의 크기를 줄일 수 있는 구

조가 가능하며, 삼각형 배열에 비하여 한 축 방향으로 약 20%힘 향상을 보인다.

그리고, Fig. 3 과 같이, 팔로워에는 트래커의 자기회로와 함께 로렌츠 힘을 생성하기 위하여 대칭형으로 y 축을 위한 y1 & y2 코일들과 x 축을 위한 x1 & x2 코일들이 조립된다. 그리고, 팔로워의 구동을 위하여, 코어 없는 상용의 선형 모터가 채택이 되어 Fig. 3 과 같이 구성된다.

스캐닝 시스템을 구현하는데 있어, 가장 큰 문제인 스택-슬립 현상을 줄이고 마찰을 최소화하기 위하여 마찰력이 없는 공기베어링을 채택하여 사용한다. 공기베어링은 Newway 사의 상업화된 제품으로 시스템 무게와 시스템 강성 특성을 고려하여 선정된다. 그리고, 선정된 베어링은 각 스테이지의 운동을 형성하고 제한하기 위하여 배치된다. 특히, 팔로워의 베어링들은 직선 운동 만을 수행하기 위하여, Fig. 3 의 공기베어링 가이드를 따라 움직일 수 있도록 시스템 내부에 추가로 설치된다.

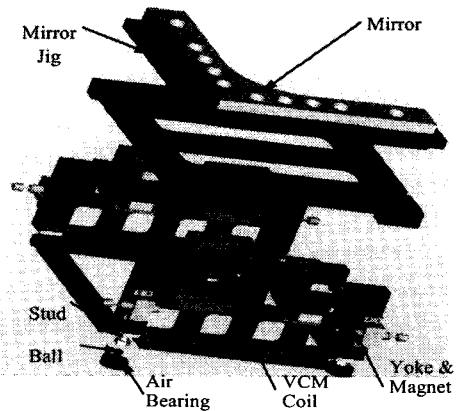


Fig. 2 Exploded Tracker with air bearings and VCMs

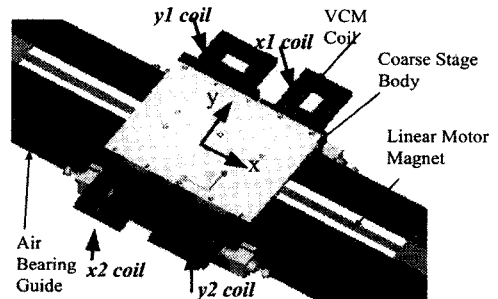


Fig. 3 Follower Embodied with Tracker Coil

3. 트랙커를 위한 보이싱 코일 모터 설계

VCM의 설계 기법은 많은 전자기 구동 장치에서 연구되어 왔다.^{6,7} VCM 구성 요소인 자속 밀도를 계산하는 기법으로 퍼미언스 방법이 쉽고 간단하게 이용되며 최적 설계 기법에 적용하기가 용이하다. 그리하여, 본 논문에서는 자속, 물체의 투과율, 그리고 자속 밀도가 전기 회로의 전류, 저항, 그리고 전압과 상사성을 갖고 있으므로, 이러한 관계를 이용한 자속 밀도를 계산 방법인 퍼미언스 방법을 사용하여 Fig. 4에서 표현되는 흐름도에 따라 최적설계를 수행하고 상용 FEM 툴인 MAXWELL을 통하여 검증한다. 본 논문에서 중점적으로 다루어지는 관점은 요구되는 형상 조건(넓이, 높이, 그리고 폭) 안에서 400mm²의 물체를 싣고 원하는 위치 정도와 운동 시 VCM 코일에서 변화 온도(ΔT)가 50℃이하를 유지하며, 그 외에 스테이지와 전원 공급 장치 등과의 관계를 고려하여 설계하는 곳에 있다. 설계 변수로 자석 두께, 자속 폭, 요크 두께, 코일 두께, 그리고 코일의 지름이 된다. 그리고, Table 1에서와 같이 본 논문에서 구현 될 시스템 설계 조건이 주어진다. 최적 설계는 설계 조건을 만족시키면서 Eq. (2)에서 나타낸 것 같이 최대의 힘을 생성하는 것을 목표로 한다.

$$F_{\text{coil}} = \left(\frac{(mass_{\text{Fine}} + mass_{\text{Chuck}})(kg) \times a(m/s^2)}{F_{\text{VCM}}} \right)^2 \quad (2)$$

Table 1 Constraints of VCM optimal design

Constraints	Temperature (ΔT)	50
	Power Consumption (I ² /2R)	≤ 325(W)
	Yoke Saturation (B _{yoke})	≤ 2.2(T)
	VCM Size(mm ²) (Height×Length×width)	≤ 75× 100×50
	Generated Force	≥ 40(kg) ×5(m/s ²)

3.1 보이싱 코일 모터의 자기 회로 모델링

본 논문에 적용되는 VCM의 개념적 구성은 Fig. 5에서 표현된다. 전류에 영향을 주는 자속 밀도를 일정하게 유지할 수 있도록 자석을 쌍으로 배치하였으며, 자석의 배치를 대칭으로 하여 자속의 흐름이 원활하게 이루어지도록 하였다. 또한, Fig. 5 ~ 6은 앞에서 언급된 퍼미언스 방법에 사용될 퍼미언스들과 자속을 시스템의 위치와 형상에 따라 표현하고 있다. 그런데, 요크 크기는 시스템 특성에 맞추어 100mm로 한정하며, 코일에 인가될 전류의 크기를 무조건 크게 할 수 없는 관계로 8A를 최대 전류로 하였다.

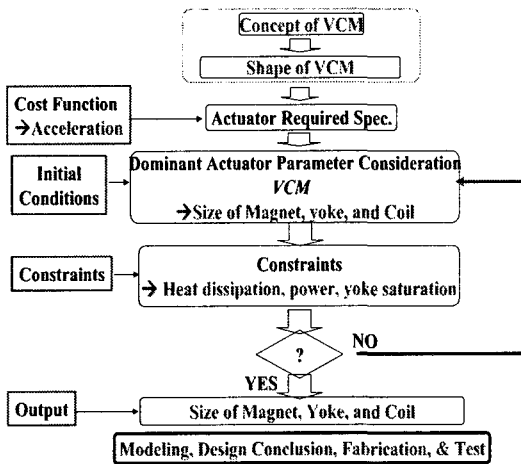


Fig. 4 Flow chart of the optimal design of VCM

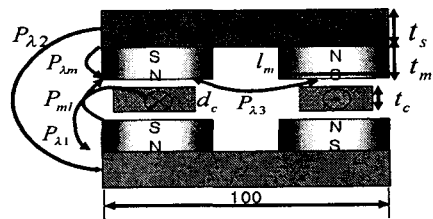


Fig.5 Schematic of VCM variables and permeances

위와 같은 방법으로 전류에 바로 공급되지 않는 자속 흐름까지 고려하여 전류에 영향을 주는 평균적인 자속 밀도를 계산할 수 있다. 그러나, 정확히 코일에 인가되는 자속 밀도에 대한 평가를

하기에는 제약이 있다. 그리고, 인가되는 전류와 자속 밀도 사이의 작용 방향으로 인한 코일의 운동을 예측하기가 어렵다. 다시 말해, 이상적인 시스템 구현은 자속 밀도와 전류의 흐름 방향이 완전히 직각이어서 기생운동이 없어야 하나, 자속 흐름의 특성 상 시스템의 자속 밀도의 방향은 전류의 방향과 완전히 직각을 이루고 있지 않다. 이러한 현상은 추후 FEM 시뮬레이션을 통하여 검증을 하며 시스템의 구현 시 발생할 수 있는 문제는 추후 고찰할 것이다.

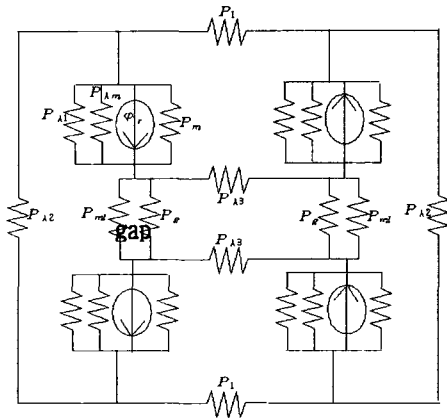


Fig. 6 Permeance circuit of VCM

3.2 보이스 코일 모터 사양 및 설계

반도체 장비와 대형 디스플레이 산업에 사용되는 고속 초정밀 스캐닝 장비의 운동을 Fig. 7 과 같이 대략적으로 가정한다. 그리고, Eq. (3)과 같이 전체 측정구간에 따른 운동 시간은 표현된다. 본 논문에서 시스템을 구성하려고 하는 약 20 인치 크기의 디스플레이 검사 장치 혹은 8 인치 wafer 장비 시스템에 대하여 요구되는 운동 상태를 Table 2 와 같이 가정한다.

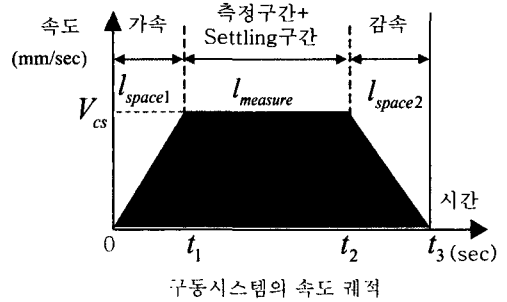


Fig. 7 Schematic velocity profile of scanning system

$$T_{total} = 2\left(\frac{l_{acc}}{V_{CS}} + \frac{l_{dec}}{V_{CS}}\right) + T_{settling} + \frac{l_{measure}}{V_{CS}} + T_{Line_Jumping} \quad (3)$$

$$= 2 \times \left(\frac{0.025}{0.5} + \frac{0.025}{0.5}\right) + 0.1 + \frac{0.4}{0.5} + 0.1 = 1.2 \text{ sec}$$

Table 2 Measuring conditions of scanning system

Parameter	Measuring Condition
V_{CS} (Constant Velocity)	500mm/s
l_{dec} (Deceleration Region)	25mm
l_{acc} (Acceleration Region)	25mm
$T_{Settling}$ (Settling Time)	0.1sec
$l_{measure}$ (Measurement Region)	400mm
$T_{Line_Jumping}$ (Stepping Time)	0.1sec

Table 2 와 Eq. (3)의 전개를 참고하여 Eq. (4)와 같이 VCM 으로 구성된 트랙커의 운동에서 VCM 에 열을 발생시키는 시간영역을 전체 운동 시간과의 비율로 표시할 수 있다. 이것은 최적 설계 시, 열 발생량에 대한 조건으로 고려된다.

$$Duty = \frac{2\left(\frac{l_{acc}}{V_{CS}} + \frac{l_{dec}}{V_{CS}}\right)}{T_{tot}} = \frac{0.2}{1.2} = 16.6\% \quad (4)$$

$$I = \frac{V - k \dot{x}}{Ls + R} \approx \frac{V - 2(2 \times nBI) \dot{x}}{R_{coil}} \quad (5)$$

스캐닝 시스템의 운동에 따른 트랙커의 VCM

은 소모 전류는 인덕턴스의 값이 작다고 가정하고 Eq. (5)와 같이 표현을 하고 최적 설계에 적용한다.

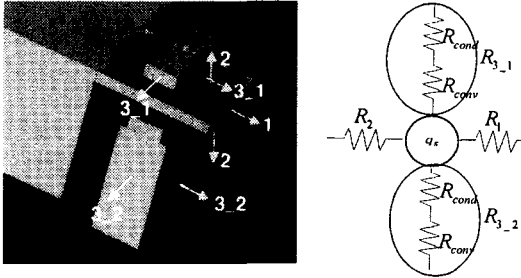


Fig. 8 Schematic diagram of heat dissipation of VCM

평균적으로 사용되는 전류의 계산보다 발열 상태를 유지하는 운동 시의 발열량(q_s)과 Eq. (4)에서 언급된 시스템의 발열 시간 비율을 이용하여 시스템에서 발생하는 열량과 온도 변화를 시스템 설계 시 반영한다. 그리고, Fig. 8 와 같이 VCM 코일에서 발생하는 열량을 전도와 대류를 통하여 방출한다. 이 때, 방출에 대한 열 저항은 Eq. (7) ~ (10)으로 표현된다. A_1 은 코일의 옆면의 넓이, A_2 는 코일 위·아래의 대류 발생 넓이, A_3 는 자석과 코일의 관계 면적, A_4 는 VCM 의 외부 넓이, 그리고 A_5 는 VCM 과 결합되어있는 시스템의 외부 넓이를 표현한다. 이 때, 금속에서의 열 저항은 무시한다.

$$q_s = i^2 R_{coil} \quad (6)$$

$$R_{Thermal_1} = \frac{1}{h_{Air} A_1} \quad (7)$$

$$R_{Thermal_2} = \frac{1}{2h_{Air} A_2} \quad (8)$$

$$R_{Thermal_3_1} = R_{Cond} + R_{Conv} = \frac{L_{Airgap}}{k_{Air} A_3} + \frac{1}{h_{Air} A_4} \quad (9)$$

$$R_{Thermal_3_2} = R_{Cond} + R_{Conv} = \frac{L_{Airgap}}{k_{Air} A_3} + \frac{1}{h_{Air} A_5} \quad (10)$$

위 수식들을 통하여 획득된 열 저항과 VCM 의 코일에서 발생하는 온도 변화(ΔT)에 따른 외부로 발생하는 열량은 Eq. (11)과 같이 표현 되며, Eq (3) ~ (11)을 통한 관계식들을 정리하여 열 발생 및 온도 조건을 Eq. (12)와 같이 생성한다.

$$q_{out} = \frac{\Delta T}{R_{total}} \quad (11)$$

$$Duty \times q_s < q_{out} \quad (12)$$

Table 1 ~ 2 와 Eq. (2) ~ (12)를 이용하고, Fig. 4 에서 그려진 차트에 따라 MATLAB SQP(Sequential Quadratic Programming) 최적 설계과정을 이용하여 설계한 결과와 실제 제작된 시스템의 값들은 Table 3 에서 기술된다. 그리고, 퍼미언스 방법에 의한 자속 밀도와 3 차원 FEM 을 이용한 자속 밀도는 Fig. 9 과 같이 표현된다. 3 차원 FEM 에 의한 값을 평균하면 약 0.52T 의 자속 밀도를 갖는다. 퍼미언스 방법과 약 10% 이내의 오차를 보이고 있다. 퍼미언스 방법에서 손실 자속에 대한 모델이 부족하였기에 발생한 문제이다.

Table 3 Parameter values of the design and optimal VCM for Tracker

Parameter	Optimal Value	Design Value
l_m	40	40
t_m	15.4	15.4
t_c	11.74	11.8
d_c	0.79	0.76
t_s	15.2	15.2

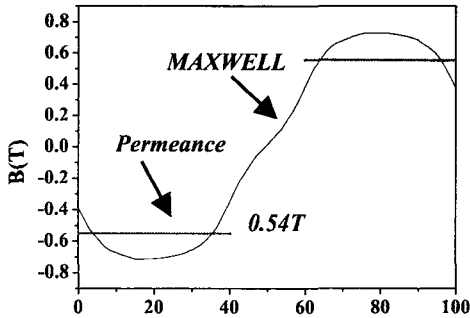


Fig. 9 Flux densities at the gaps by MAXWELL and permeance method

최적 설계 결과를 이용하여 트랙커 보이스 코일 모터의 코일과 자기 회로를 구성한다. 코일의 재질은 구리이며, 영구 자석은 NdFe40 이다. 전체 이중 스테이지를 구성하기 위하여 트랙커의 운동을 추적할 수 있는 팔로워의 구동기로서 Trilogy 코어리스 선형 모터를 선정하여 설치한다. 결과적으로, Fig. 10 과 같이 초정밀 스캐닝 시스템이 구현된다. 그리고, 트랙커 성능에 관련된 설계 및 변수 값(최대 전류, 코일 권선 수, 그리고 자속 밀도)은 Table 4 와 같다.

Table 4 Design results of VCM

Parameter	Design Value
i (Maximum current)	3.8A
B (Flux density in air gap)	0.54T
l_{eff} (Effective coil length)	40mm
n (Number of turns)	636 turns
F (Force in one axis)	211.9N

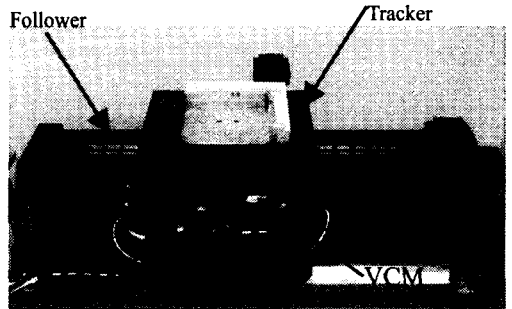


Fig. 10 100nm level high precision scanning system

4. 이중 스테이지 제작 및 실험

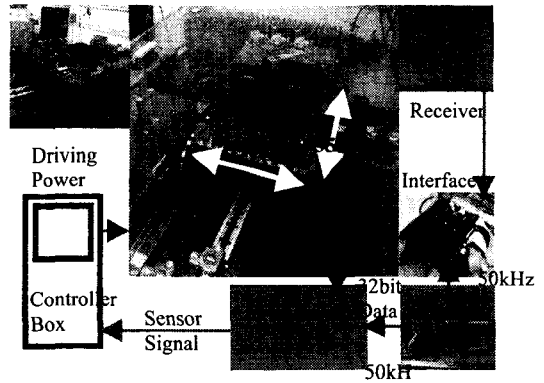


Fig. 11 Experimental setup

제작된 시스템과 초정밀 측정을 위한 실험 장치, 그리고 제어 시스템은 Fig. 11 과 같이 구현된다. 측정 시스템은 5nm 분해능과 최대 속도 500mm/s 의 사양을 갖고 있는 3 축 에이질런트의 광 간섭계 시스템과 레이저 헤드가 사용된다. 측정된 고속의 위치 데이터를 정확히 처리하기 위하여 dSPACE 의 32 채널의 DIO 보드와 인터페이스 회로를 이용한다. 획득된 32bit 위치 정보는 고속 제어를 위하여 실시간 제어 시스템에서 사용된다. 일반적으로, PWM(Pulse Width Modulation)으로 작동되는 앰프는 파워 소모 측면에서 우수한 성능을 보이나, 시스템 특성상 불규칙적 혹은 주기적으로 발생하는 비선형성과 임펄스 파형을 수반하게 된다. 이것은 고정밀 속도 제어에 불연속적인 노이

즈 문제를 야기 시킨다. 본 논문에서는 제안된 스캐닝 목적을 위한 VCM 트랙커를 구동하기 위하여 Trust Automation 의 선형 앰프가 사용된다. 그리고, 장행정을 형성하는 팔로워는 위치를 측정하기 위하여 5nm 분해능의 Renishaw 선형 스케일러와 Varedan LA400 의 고전력 선형 앰프가 사용된다.

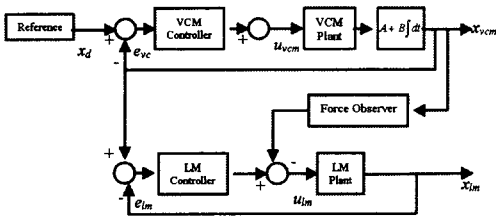


Fig. 12 Master-Slave controller block diagram for high precision scanning system with Tracker and Follower

제안되고 구현된 고분해능 스캐닝 시스템을 위한 제어 알고리즘은 Fig. 12 에서 그려진 것 같이 트랙커가 움직인 후에 팔로워가 따라오는 방식으로 구성된다. 앞장에서 언급하였듯이, 트랙커와 팔로워가 서로 마찰이 없는 공기베어링 가이드와 서로 기계적 결합이 없는 구조를 갖기 때문에 VCM 에 의하여 발생하는 반작용 힘이 팔로워에 적용이 된다. 이러한 힘은 팔로워에 큰 disturbance 로 작용되기 때문에, 이에 대한 대응이 필요하여 force observer 가 제어 알고리즘에 도입된다.

Slocum 의 기술에 따르면, 일반적으로 분해능은 시스템의 이동 시 구현 가능한 가장 작은 값이며, 반복 정밀도는 같은 목적 점의 연속적인 시도에 따른 에러 정도를 나타낸다. 제안된 스캐닝 시스템의 위치 분해능은 Fig. 13 에서 보여주는 것 같이 5nm 이다.

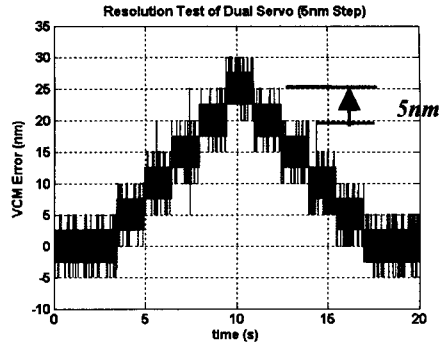


Fig. 13 50nm step response of 100nm high precision scanning system with 5nm interferometer

덧붙여, Fig. 14 는 본 논문에서 제안되고 구성된 시스템이 250mm 행정거리 안(측정 미러의 크기 한계)에서 24.1nm(3σ)의 위치 반복정밀도를 보여준다. 결과로 본 제안된 스캐닝 시스템은 고정밀도의 Step-Repeat 시스템에도 적용이 가능함을 알 수 있다. Fig. 15 는 25mm/s 의 정속 운동에 대한 시스템의 운동 분해능을 보여준다. 정속 구간에서 약 ±20nm 의 시스템 위치 변화가 있으며, 그 때의 표준편차는 18.86nm(2σ)이다. 중간에 시스템의 불연속적인 특성을 보이는 것은 공기 유동의 불안정성과 공기베어링의 가이드 면인 석정반의 들거 같은 형상으로 기인 된 것으로 판단된다.

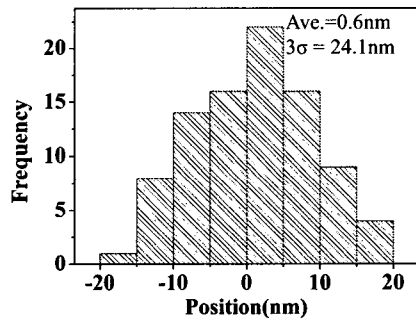


Fig. 14 Repeatability of the proposed dual scanning system

스테이지의 운동 곡선은 Fig. 15 에서와 같이 감·가속, 정속구간으로 표현된다. 그리고, Fig. 16 은 스테이지 운동 시 발생하는 추적 에러를 표현한다. 최종적으로, Table 5 와 같이 시스템 추적 특성을

나타낼 수 있다.

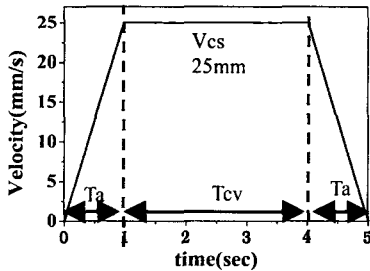


Fig. 15 Velocity profile of the Tracker and the Follower

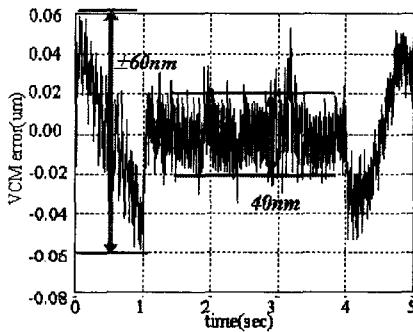


Fig. 16 Tracking error of the Tracker in 25mm/s constant velocity

Table 5 Specifications of the proposed scanning system

Parameter	Value	Tracking Results
Ta (De/Acceleration Time)	1 sec.	±60nm
Tcv (Constant speed Time)	3sec.	±18.86nm(2σ)
Vcs (Constant velocity)	25mm/s	<±0.08% Vel. Ripple
L (이동거리)		100mm
Repeatability		24.1nm(3σ)

5. 결론

본 논문에서는 십 nm 급 반복 정밀도와 서브

um 급 스캐닝을 위한 기계적 결합이 없는 이중 스테이지를 제안하였다. 제안된 이중 스테이지는 수 mm 의 XYθ 운동이 가능하도록 4 개의 VCM 과 공기베어링으로 구성된 트랙커와 트랙커의 장행정 운동을 가능하도록 하는 하나의 선형모터와 공기 베어링으로 구성된 팔로우로 이루어진다.

트랙커를 구성하는 VCM 의 설계 시, 열 방출 과 제안된 시스템이 요구하는 특성과 사양을 위하여 MATALB 의 SQP(Sequential Quadratic Programming)를 이용한 최적 설계를 수행하였다. 그에 따라, $5m/s^2$ 의 가속을 갖고 350mm 의 X 축 운동과 미세 Yθ 운동이 가능한 고속의 시스템을 구현하였다.

구성된 이중 스테이지의 성능은 광간섭 센서 와 환경에 의하여 5nm 의 분해능과 24.1nm(3σ)의 반복 정밀도, 그리고 25mm/s 의 정속에서 약 18.86nm(2σ)의 운동 편차를 갖는다. 그러나, 시스템의 수백 mm/s 의 고속 실험 시의 정속 특성에 대한 분석 및 실험이 미비하여 추가로 수행을 진행해야 할 것이다. 또한, 자속 밀도와 전류의 방향 성에 의한 기생 운동에 대하여 FEM 해석을 통한 분석을 수행하여 시스템에 대한 고려가 필요하다.

후 기

본 논문은 KISTEP 에서 지원하는 한· 러 국제 공동과제의 연구를 통하여 기초 연구가 이루어졌습니다. 특히, 시스템 제작 및 구성을 할 수 있도록 지원해준 삼성전자에 진심 어린 감사의 마음을 표현합니다.

참고문헌

- Hans, Butler, Richard, A. George and Jan, Baselmans, "Scanning Stage technology for exposure tools," Microlithography world, Spring 1999.
- Lee, C. H. and Kim, S. W., "An ultraprecision stage for alignment of wafers in advanced microlithography," Precision Engineering, Vol.21, No.2, pp. 113-122, 1997.
- Kwon, S. J., Chung, W. K. and Youm, Y. G., "On the Coarse/Fine Dual-Stage Manipulators with Robust

- Perturbation,” Proc. of IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation, pp. 121-126, 2001.
4. Elfizy, A. T., Bone, G. M and Evestawi, M. A., “Design and control of a dual-stage feed drive,” Int. Jour. of Machine tools and Manufacture, Vo. 45, pp.153-165, 2005.
 5. Kim, D. M., Kim, K. H., Lee, S. Q. and Gweon, D. G., “Optimal design and control of $xy\theta$ fine stage in lithography system,” KSPE(in Korean), 2002.
 6. Duane, C. Hanselman, " Brushless Permanent-Magnet Motor Design," McGraw-Hill, Inc., 1994.
 7. Kim, K. H., Lee, M. G. and Gweon, D. G., “The Design and Performance Test of Tracking Actuator for NFR system,” KSPE(in Korean), 2001.