

리소그래피 장비에서 $xy\theta$ 미세구동기의 최적 설계 및 제어

김동민*, 김기현*, 이성규*, 권대갑*

Optimal Design and Control of $xy\theta$ Fine Stage in Lithography System

Dong Min Kim*, Ki Hyun Kim*, Sung Q Lee* and Dae Gab Gweon*

ABSTRACT

The quality of a precision product, in general, relies on the accuracy and precision of its manufacturing and inspection process. In many cases, the level of precision in the manufacturing and inspection system is also dependent on the positioning capability of tool with respect to the work piece in the process. Recently the positioning accuracy level has reached to the level of submicron and long range of motion is required. For example, for 1GDARM lithography, 20nm accuracy and 300mm stroke needs. This paper refers to the lithography stage especially to fine stage. In this study, for long stroke and high accuracy, the dual servo system is proposed. For the coarse actuator, LDM (Linear DC Motor) is used and for fine one VCM is used. In this study, we propose the new structure of VCM for the fine actuator. It is 3 axis precision positioning stage for an aligner system. After we perform the optimal design of the stage to obtain the maximum force, which is related to the acceleration of the stage to accomplish throughput of product. And we controlled this fine stage with TDC. So we obtained 50nm resolution. So later more works will be done to obtain better accuracy.

Key Words : $xy\theta$ fine stage($xy\theta$ 미세구동기), lithography(노광 장비), dual servo(이중 서보), VCM(보이스 코일 모터), optimal design(최적설계), force maximization(힘의 최대화), TDC control(시간 지연 제어)

1. 서론

포토리소그래피 장비는 마스크에 새겨진 집적 회로의 패턴을 파장이 일정한 빛을 매개로 하여 웨이퍼에 전달하는 장치를 말한다. 이 리소그래피 시스템은 크게 두 부분으로 나눌 수 있는데 하나는 광학부이고 다른 하나는 구동부이다. 광학부에 의하여 파장에 비례하고 NA(Numerical Aperture)에 반비례하도록 최소 선폭이 결정된다. 리소그래피 장비의 성능은 마스크의 회로를 얼마나 조밀하게 웨이퍼에 전달하느냐에 달려있다. 그래서 리소그

라피 장비를 만들 때는 먼저 광학부에 의해서 최소 선폭을 줄이고 그 후 구동부에 의하여 웨이퍼와 마스크 간의 상대 위치 정밀도를 좋게 함으로써 성능을 키우는 것에 목표를 두어야 한다. 예를 들어 1GDRAM의 경우 리소그래피 장비는 최소 선폭 $0.18\mu\text{m}$ 을 가져야 하며 20nm의 스테이지 정확도를 가져야 한다.¹⁾ 뿐만 아니라 이렇게 제작된 리소그래피 장비가 원하는 생산목표를 달성하기 위해서는 필요한 생산속도를 만족시켜야 한다.²⁾ 본 논문의 목표는 앞서 말한 리소그래피의 성능을 만족할 수 있는 미세구동기를 설계하고 주어진 크

2001년 10월 29일 접수
* 한국과학기술원 기계공학부

기 내에서 그 구동기가 최대의 힘을 내도록 최적 설계를 수행 함으로 원하는 생산속도를 만족시키도록 하는 것이다. 또한 제작된 구동기에 대해 그 구동기가 원하는 정밀도를 낼 수 있도록 구동기를 제어하는 것을 목표로 한다.

2. xyθ 미세 구동기의 개념설계

스테이지는 좋은 응답 특성(빠른 응답)과 높은 정확도(약 20nm 의 정확도)를 갖도록 설계되어야 한다. 뿐만 아니라 300mm 의 웨이퍼를 노광시키기 위해서는 적어도 300mm 의 스트로크를 만족하여야 한다. 따라서 구동 방식으로 이중 서보를 선택하였다. 이중 서보란 장행정과 단행정을 담당하는 부분에 대하여 각각 조동구동기와 미세구동기가 그 역할을 나누어서 수행하는 것을 말한다. 그래서 개념적으로 조동구동기로서 LDM(Linear DC Motor)을 선택하였고 미세구동기로서 VCM(Voice Coil Motor)를 선택하기로 한다. Fig. 1 은 이러한 이중서보의 구조를 개념적으로 나타낸 것이다.

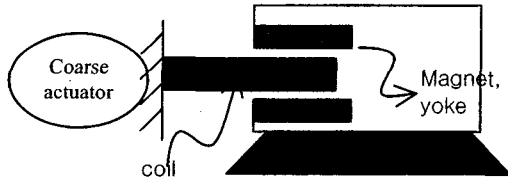


Fig. 1 The conceptual figure of proposed dual servo

조동구동기로서 LDM과 friction drive가 많이 사용되는데^{3),4)} LDM을 선택한 이유는 LDM이 friction drive에 비해 높은 bandwidth를 가지므로 고속 제어에 적합하기 때문이다. 다음으로 미세 구동기로는 VCM type과 PZT type이 많이 사용되는데 VCM을 선택한 이유는 PZT^{5),6)}가 정확도가 좋다는 장점을 가진 반면 행정이 수십 마이크로미터 밖에 안 될 뿐만 아니라 가격이 비싸다는 단점 때문이다. 또한 미세구동기의 행정이 짧으면 조동구동기는 상대적으로 정밀해야 하는 단점 또한 갖고 있다. 현재 나와 있는 논문들에 따르면 VCM은 5~10nm의 정확도를 낼 수 있다. 그래서 VCM을 미세구동기로서 선택하였다.

정리하면 xyθ스테이지를 만드는데 조동구동기

로서 LDM을 미세구동기로서 VCM을 선택한다. 본 논문에서는 xyθ스테이지에 사용 되어지는 새로운 구조의 VCM type 미세 구동기를 제안하고자 한다. Fig. 2에서는 제안된 전체 미세구동기의 전개된 모습이 보여진다.



Fig. 2 The exploded structure of xyθ fine stage

xyθ 미세 구동기는 다음과 같은 특징들을 가지고 있다.

- A. 조동구동기와 미세구동기 사이에 기계적인 커플링이 없다.
: 조동구동기에 의해서 발생하는 외란이 미세구동기에 직접적으로 전달되지 않는다.
- B. 고정된 힘의 작용점
: 구동기의 힘은 자석 사이에 놓인 코일에 의해 발생하게 되는데 이때 코일은 평면에 고정되어 있으므로 구동기가 움직이더라도 작용점은 항상 일정하다는 장점을 갖는다.
- C. 단일 평면 구조 : 조립 오차가 거의 없다.
: 일반적으로 3 DOF 운동을 얻기 위해선 3 개의 1DOF 시스템이 결합되어야 한다. 그러나 이 시스템은 3 개의 구동기가 한 평면에 집약적으로 놓여서 3DOF 운동을 하는 시스템을 한 번에 만들게 된다. 때문에 조립오차를 없앨 수 있다.

Fig. 3 에 이러한 구조가 잘 나타나 있다. 3 개의 코일이 코일 고정구에 삼각형 모양으로 배열되어 한 평면에 위치함을 볼 수 있다.

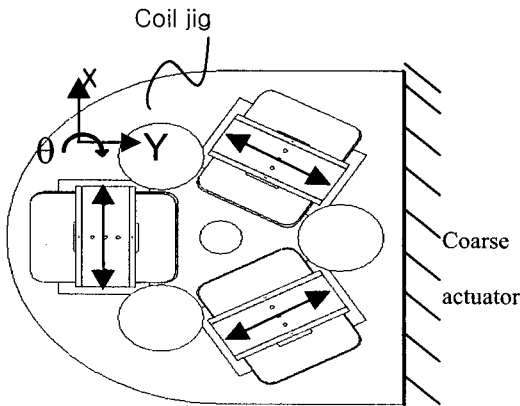


Fig. 3 Symmetric and compact structure

D. 낮은 높이, 가벼운 무게

: 세 개의 구동기가 한 평면에 있기 때문에 전체 구동기의 높이는 낮고, 무게 또한 작다. 전체 구동기의 높이가 높아질 경우 힘의 작용점에 의하여 구동기에 모멘트가 발생하게 되고 이에 따라 pitch, roll 운동이 발생하므로 정밀도가 떨어질 수 있다. 하지만 이처럼 구동기의 전체 높이가 낮은 구조는 높은 구조에 비해 작은 모멘트를 발생하므로 정밀 구동기에 적합하다.

E. 대칭 구조: 열로부터 둔감

: 완전히 같은 3 개의 구동기가 반경 방향으로 120 도 간격으로 대칭적으로 배치되어 있다. 때문에 구동기에 열이 가해졌을 때 변형에 의한 오차가 작아 정밀 위치 제어 시스템에 유리한 구조이다. 이 3 개의 구동기가 연합하여 xyθ 운동을 가능하게 해 준다.

F. 힘이 직접 구동이다. : 제어가 용이하고 미세 구동기로써 상대적으로 장행정 운동이 가능하다는 장점이 있다.

: 구동기에 의해 생성된 힘이 힌지나 볼 베어링을 통해 간접적으로 전달되는 것이 아니라 직접 전달된다. 다시 말하면 운동의 전달부가 없다. 따라서 미세구동기로써는 장행정을 움직일

수 있고 제어가 쉽다는 장점을 갖고 있다. 참고로 미세 구동기의 행정이 짧으면 조동구동기는 상대적으로 높은 정확도를 가져야 한다는 단점이 있다.

G. 효과적인 자석 배열 : 높은 자속 밀도, 균일한 자속 밀도

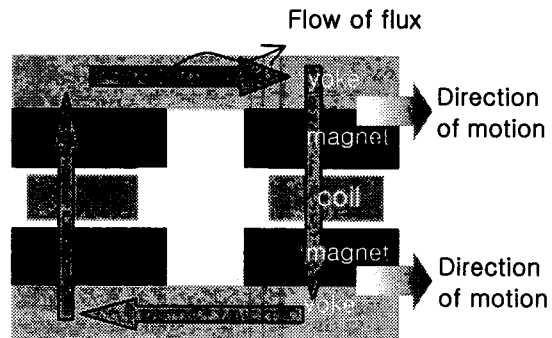


Fig. 4 Effective magnet array

: 코일이 두 개의 자석 사이에 위치하므로 자속 밀도는 높고 균일하다. 자석 및 요크 그리고 코일의 배열이 Fig. 4 에 잘 나타나 있다. 아래 Fig. 4 를 보면 구동기의 작동원리를 알 수 있는데 자속 사이에 놓여진 코일에 전류가 흐를 때 플레밍의 왼손법칙에 의하여 힘이 발생하게 된다. 이 때 코일이 조동구동기에 연결된 고정구에 고정되어 있기 때문에 미세구동기는 조동구동기에 대해 상대운동을 하게 되는 것이다.

H. 진공으로 당겨지는 공기 베어링

: 공기 베어링은 베이스의 외관이 스테이지에 전달되는 것을 막아주고 마찰 없이 스테이지를 움직일 수 있게 해주는 역할을 한다. 그러나 공기베어링의 단점으로는 포러스(porous)로부터 방출되는 공기가 스테이지를 진동시킨다는 것이다. 따라서 이러한 단점을 보완하기 위해 뉴웨이사에서 개발한 Vacuum preloaded 타입의 공기베어링을 사용한다. 이 베어링은 진공의 흡입력으로 베어링을 베이스로 당겨줌으로 공기의 터블런스에 의해서 발생하는 진동을 줄여주는 장점을 갖고 있다.

3. xyθ 미세 구동기의 모델링

앞선 2 장에서는 xyθ 미세 구동기의 개념설계를 수행하였다. 다음 4 장에서는 개념설계된 미세 구동기가 원하는 생산속도를 낼 수 있도록 제작하기 위하여 제한된 크기 내에서 최대의 힘을 생산하도록 하는 최적설계를 수행하고자 한다. 이에 앞서 본 3 장에서는 시스템을 모델링하고 이를 통하여 최적설계에서 필요한 수식을 얻어내고자 한다. 시스템은 Fig. 5 와 같이 모델링 된다. Fig. 5 에는 또한 다음 4 장에서 언급될 설계 변수도 나타나 있다. 이때 시스템에 흐르는 자속을 모델링 하기 위하여 퍼미언스(Permeance) 방법을 사용하였다. 그림에 나타난 화살표는 누설 자속을 나타낸 것으로써 기존에 일반적으로 사용되는 방법으로 모델링하여 계산하였다.⁷⁾ 이를 통해 시스템의 자기 회로를 나타내면 Fig. 6 과 같다. 여기서 Fig. 5 의 N, S 는 자석의 극성을 나타 내며 $P_{2m}, P_{m1}, P_{A1}, P_{A2}, P_{A3}$ 은 누설 자속을 나타낸다. 또한 t_s, t_m, l_m 은 설계변수로서 각각 요크의 두께, 자석의 두께, 자석의 폭을 나타낸다.

이 회로를 이용하여 코일이 통과하는 곳의 자속을 구할 수 있게 되었고 이를 자속의 유효 단면적으로 나누어 자기장을 구한다. 이로써 설계 변수와 자기장과의 관계식을 구하게 된다. 이 때 스테이지가 내는 힘은 자기장의 세기에 비례 하므로 다음 4 장에서 설계 변수를 변화시켜 줄 때 힘이 최대가 되는 설계변수의 수렴값을 찾는 최적설계를 수행할 수 있게 되었다.

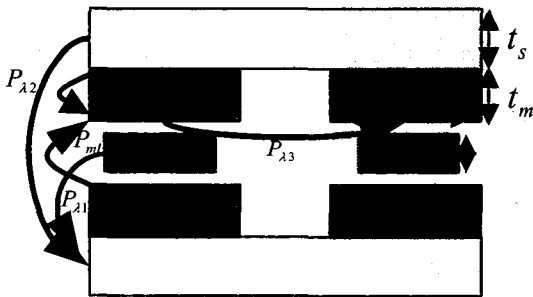


Fig. 5 The Modeling of system and design variables

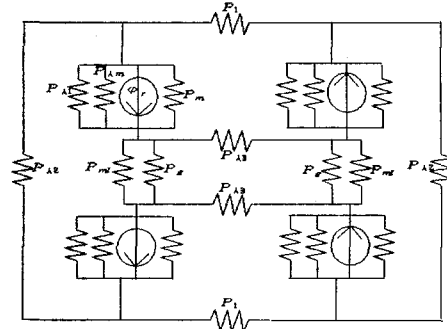


Fig. 6 The flux circuit of the system

4. xyθ 미세 구동기의 최적 설계

앞에서 언급하였듯이 스테이지의 크기가 제한 되었을 때 웨이퍼의 생산속도를 만족시키기 위하여 힘을 최대로 하는 최적설계 수행한다. 최적 설계에 대한 성능함수, 제한 조건, 설계 변수는 다음과 같다.

성능함수: VCM force maximization.

: VCM 의 작동힘은 $F=nBil$ 로 표현된다.

(n: 코일의 감은 수

B: 자기장의 세기(T)

i: 코일에 흐르는 전류의 세기(A)

l: 자속 사이에 놓인 코일의 길이(m))

제한조건: A. 코일의 온도는 공기온도보다 30°C 이상 높지 않도록 한다.

B. 공급되는 전력은 15W 를 넘지 않도록 한다.

C. 요크는 포화되지 않도록 한다.

D. VCM 의 높이와 폭의 제한

설계 변수

: 자석 폭, 자석 두께, 코일 두께, 코일 직경, 요크의 두께

이러한 상황에서 최적설계를 수행하였다. 최적설계 tool로는 상용 제품인 matlab 을 사용하였다.

이 때 이용된 방법은 steepest decent rule 이다. 수십 개의 초기 조건에 대하여 모두 일정한 값으로 수렴해 가는 것을 확인함으로써 수렴값이 전역 최소(global minimum)임을 확인하였다.

Fig. 7 은 성능함수의 수렴과정을 보여준다.

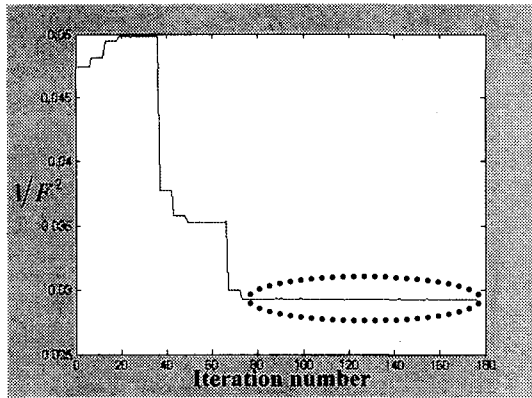


Fig. 7 Converging process of cost function

이 때 사용한 설계 변수의 범위는 Table 1 과 같다.

Table 1 The range of design variables (unit : mm)

l_m (length of magnet)	t_m (thickness of magnet)	t_c (thickness of coil)	d_c (diameter of coil)	t_y (thickness of yoke)
0 ~ 65	0 ~ 20	0 ~ 20	0 ~ 1.5	5 ~ 20

최적 설계결과 구동기의 힘을 최대화 하는 최적 설계 변수를 결정하였다. 결과는 Table 2 에 정리 하였다.

Table 2 The result of optimal design (unit : mm)

l_m (length of magnet)	t_m (thickness of magnet)	t_c (thickness of coil)	d_c (diameter of coil)	t_y (thickness of yoke)
60	14.1	13.01	0.758	14.91

그리고 이에따라 정해지는 코일의 감은 수 n 은 1137 (turns), 갭에서의 자기장의 세기는 0.547(T)을 얻을 수 있었다. 제한 조건 중 active constraints 는 B,C,D 였는데 A가 active constraint 가 되지 않은 이유는 A 와 B 는 서로 관계가 있는 constraint 인데 A가 active constraint 가 되기 이전에 이미 B가 active constraint 가 되었기 때문에 A 는 active constraint 에 걸리지 않은 것이다. C가 active constraint 인 이유는 주어진 높이에서 최대의 힘을 내기 위해선 요크는 포화되지 않는 범위 내에서

최소이어야 하기 때문에 당연히 active constraint 가 된다. 또한 D 는 전체 시스템의 크기를 제한한 것이기 때문에 당연히 active constraint 가 된다.

이를 바탕으로 최적설계가 올바르게 수행되었음을 예상할 수 있다.

5. 제어

최적 설계된 값을 이용하여 실제로 제작된 시스템을 제어하기 위하여 먼저 시스템을 모델링 해 보자. 구동기는 공기 베어링에 의해 움직이므로 스프링 상수 $k=0$ 이라 가정할 수 있고 기계적 부분과 전기적 부분은 각각 (5.1), (5.2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} = nBiI \quad (5.1)$$

$$L \frac{di}{dt} + R_c i = V_r - k_b \dot{x} \quad (5.2)$$

- (m : 구동기의 전체 질량
- c : 구동기의 damping 상수
- L : 코일의 인덕턴스
- Rc : 코일의 저항
- Vr : 가진 전압
- Kb : 역기전력 상수)

또한 본 시스템은 삼각으로 3 개의 구동기가 배열되어 있으므로 Fig. 8 에 보는 바와 같이 구동기에 대한 좌표 $xy\theta$ 에 대해 간단한 모델링 및 좌표 변환을 하였다. 그 결과는 (5.3)과 같다.

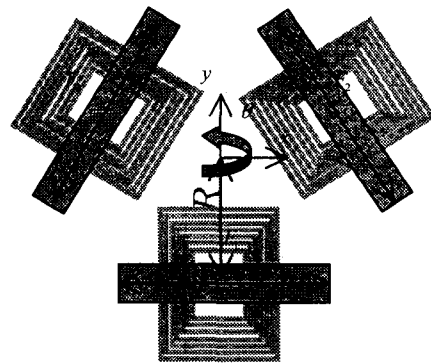


Fig. 8 The model for coordinate transforms

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ T_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & \cos 60^\circ & \cos 60^\circ \\ 0 & \sin 60^\circ & -\sin 60^\circ \\ R \cos \theta & R \cos \theta & R \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Fig. 9 는 $xy\theta$ 위치를 측정하기 위한 실험세팅을 보여주고 있다. Fig. 9 에서 사용된 위치센서는 HP 의 10 nm 분해능을 갖는 레이저 간섭계이다. 레이저 빔을 반사하는 데 사용되는 거울의 재료로는 열팽창이 거의 없는 zerodure 를 사용하였다. 3 축을 측정하기 위하여 plane mirror interferometer 중 온도가 달라져도 측정값이 똑같은 athermalized PMI(in HP co.)를 사용하였다. 측정부를 간단히 그리면 Fig. 10 과 같은데 S_1, S_2, S_3 에서 인터페로미터를 통해 변위를 얻어낸다. 이 세 개의 변위를 가지고 구동기가 x, y, θ 로 얼마나 움직였는지를 측정하게 된다. 여기서 주의할 것은 x, y, θ 좌표간에 서로 Coupling 이 되어있다는 것이다. 그리하여 S_1, S_2, S_3 와 x, y, θ 좌표와의 관계는 (5.4)와 같다.

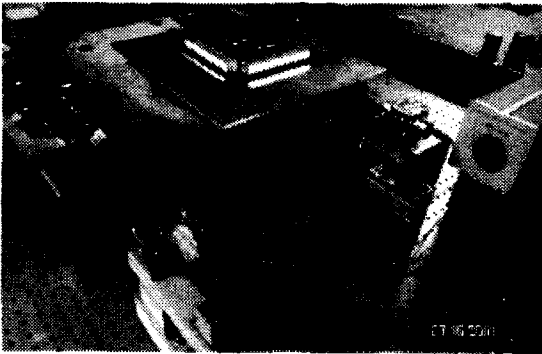


Fig. 9 Experimental setting for $xy\theta$ measurement

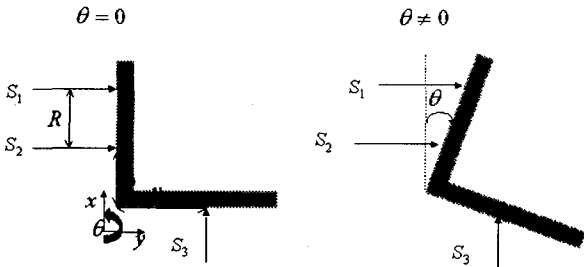


Fig. 10 The relationship between interferometer signal and $xy\theta$ coordinate

$$\begin{aligned} y &= \frac{(S_1 + S_2)}{2} - (x_0 + \frac{R}{2} - y) \tan \theta \\ x &= S_2 - (y_0 - x) \tan \theta \\ \theta &= \frac{S_1 - S_0}{R} \end{aligned} \quad (5.4)$$

구동 방식으로는 작은 노이즈와 높은 효율을 위하여 PWM(Pulse Width Modulation)방식을 채택하여 실험을 수행했다.

전체 시스템의 flow chart 를 그려보면 Fig. 10 과 같다.

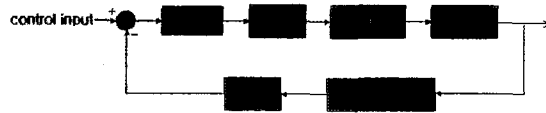


Fig. 11 System flow chart

제어를 위하여 시스템의 불확도와 비선형성에 강한 TDC(Time Delay Control)⁸⁾ 기법을 이용하여 제어하였다. 제어의 결과는 다음과 같다(Fig. 12~Fig. 16).

Fig. 12~Fig. 15 는 Y 방향에 대해서 1mm, 10 μm, 100nm, 50nm step 에 대하여 스테이지가 따라가는 것을 그린 결과이다. 그 결과 스테이지가 50nm 이하의 분해능을 갖음을 알 수 있다. 레이저 간섭계의 분해능이 10nm 이었는데도 불구하고 스테이지의 분해능이 50nm 로 나온 이유로는 주변 공기의 유동과 바닥의 진동 그리고 air-pad 자체의 진동 등의 영향 때문이라 생각된다. 추후에 좀 더 좋은

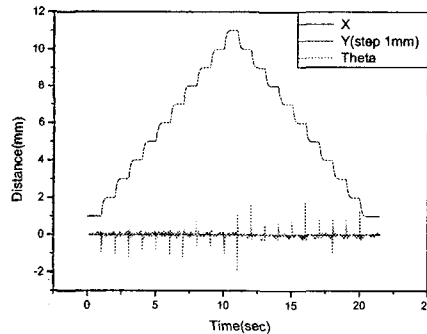


Fig. 12 1mm step in Y direction

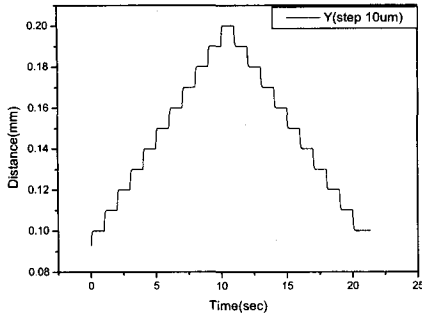


Fig. 13 10 μm Step in Y-direction

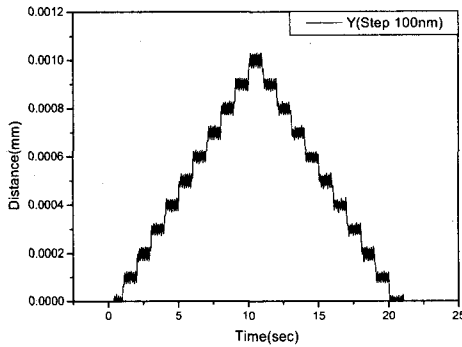


Fig. 14 100nm Step in Y-direction

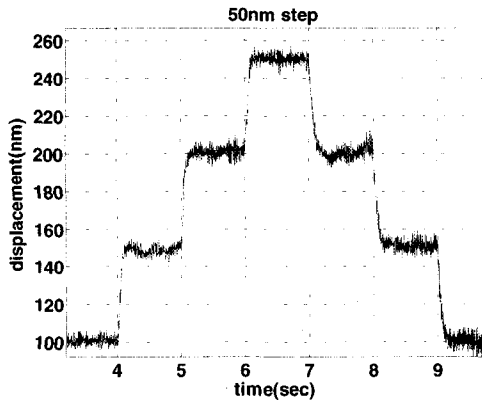


Fig. 15 50nm Step in Y-direction

환경을 만들어 줌으로써 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다. 또한 Fig. 16 을 통해 X 와 Y 방향으로 동시에 움직일 때 theta 방향 error 는 0.06arcsec 이하로 제어할 수 있음을 확인할 수 있다.

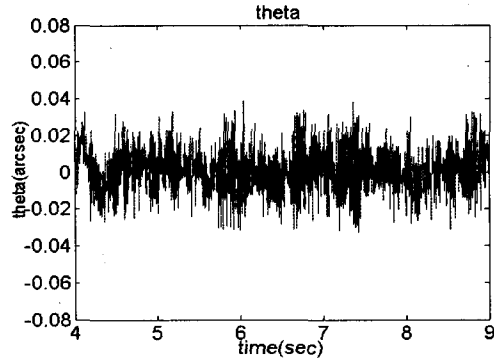


Fig. 16 theta error at 50nm step in X&Y direction

6. 결론

- A. 새로운 개념의 VCM(Voice Coil Motor) 구동기를 제안하였다.
 - 기존에 사용되던 방식이 아닌 새로운 구조로 된 미세구동기가 필요하여 이를 개념적으로 설계하였다.
- B. 힘을 최대한으로 하는 최적설계를 수행하여 제작하였다.
 - 웨이퍼의 생산량에 관계된 구동기의 가속도가 필요한 만큼 나오도록 힘을 최대한으로 하는 최적설계를 수행하였고 설계한 대로 제작하였다.
- C. 고정밀 제어
 - 제어결과 X,Y 방향으로 각각 50nm 이하의 resolution 을 얻었다.

참고문헌

1. Earle G. Cromer, Jr., "Mask Aligners and steppers for precision microlithography," Solid State Technology, pp. 23-27, April 1993.
2. Hans Butler, Richard A. George, Jan Baselmans, "Scanning Stage technology for exposure tools," Microlithography world, Spring, 1999.
3. Yuichi Okazaki, Shin Asano and Takayuki Goto "Dual-servo Mechanical stage for continuous positioning," Int. JSPE, Vol. 27, No. 2, pp. 172-173, 1991.
4. Chang-Woo Lee and Seung-Woo Kim, "An ultraprecision stage for alignment of wafers in

- advanced microlithography," *Precision Engineering*, Vol. 21, No. 2, pp. 113-122, 1997.
5. Motoya Taniguchi, Minoru Ikeda, Akira Inagaki and Ryuichi Funatsu, "Ultra precision wafer positioning by six-axis micro-motion mechanism," *Int. JSPE*, Vol. 26, No. 1, pp. 35-40, 1992.
 6. Yoshiyuki Tomita, Fumiake Sato, Kazuhiro Ito, Yasushi Koyanagawa, "Decoupling method of ultraprecision stage using parallel linkage mechanism," *Int. J. soc. Pre. Eng.*, Vol. 26, No. 1, pp. 47-53, 1992.
 7. Duane C. Hanselman, "Brushless Permanent-Magnet Motor Design," McGraw-Hill, Inc., 1994.
 8. Kamal Youcef-toumi "A time delay controller for systems with unknown dynamics," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and control*, March 1990.