

나노 정밀도 스캐닝 용 공기베어링과 보이스 코일 모터의 초정밀 이중 스테이지 설계 및 제어

김기현*(한국과학기술원), 최영만(한국과학기술원), 김정재(한국과학기술원), 이문구(삼성전자), 이석원(삼성전자), 권대갑(한국과학기술원)

Design and Control of Ultra-precision Dual Stage with Air bearings and Voice coil motor for nm scanning system

K. H. Kim (ME Dept. KAIST), Y. M. Choi (ME Dept. KAIST), J.J. Kim (ME Dept. KAIST), M. G. Lee (Samsung Electronics), S. W. Lee (Samsung Electronics), D. G. Gweon (ME Dept. KAIST)

ABSTRACT

In this paper, a decoupled dual servo (DDS) stage for ultra-precision scanning system with large working range is introduced. In general, dual servo systems consist of a fine stage for short range and a coarse stage for long range. The proposed DDS also consists of a XY θ fine stage for handling and carrying workpieces and one axis coarse stage. Its coarse stage consists of air bearing guide system and a coreless linear motor with force ripple. The fine has four voice coil motors(VCM) as its actuator. According to a VCM's nature, there are no mechanical connections between coils and magnetic circuits. Moreover, VCM doesn't have force ripples due to imperfections of commutation components of linear motor systems – currents and flux densities. However, due to the VCM's mechanical constraints the working range of the fine is about 25mm². To break that hurdle, the coarse stage with linear motors is used to move the fine about 500mm. Because of the above reasons, the proposed DDS can achieve higher precision scanning than other stages with only one servo. With MATLAB's Sequential Quadratic Programming (SQP), the VCMs are optimally designed for the highest force under conditions and constraints such as thermal dissipations due to its coil, its size, and so on. And for their movements without any frictions, guide systems of the DDS are composed of air bearings. To get precisely their positions, a linear scale with 5nm resolution are used for the coarse stage's motion and three plane mirror laser interferometers with 5nm for the fine's XY θ motions. With them, on scanning the two stages have same trajectories. The control algorithm is named Parallel method. The embodied ultra-precision scanning system has sub 100nm following error and in-positioning stability.

Key Words : High precision(정밀), Scanning stage(스캐닝 스테이지), Voice Coil Motor(보이스 코일 모터), Dual Servo system(이중 서보 시스템), Air bearing(공기베어링)

1. 서론

정보화 및 나노 기술 산업의 급속한 발달에 따라 초정밀 장비의 활용이 증대되고 있다. 특히, 대형디스플레이 산업과 반도체 산업에서는 수 μm ~ 수십 nm의 분해능과 수백 mm ~ 수 m의 구동영역의 장비를 요구하고 있다. 높은 상대분해능(정밀도/행정거리)는 단일서보 시스템으로 구현하기 쉽지 않다. 이것을 해결하기 위하여, 행정거리와 높은 분해능

을 독립적으로 수행할 수 있는 이중 서보 시스템 개념이 도입·연구되고 있다. [1]

이중 서보 시스템은 단행정·고정밀을 위한 미세 구동부와 장행정을 위한 조동 구동부로 나누어진다. Moriyama 는 구동기로써 DC 서보 모터와 피에조를 이용하였고, 가이드로써는 대행정을 위하여 PTFE (polytetrafluoroethylene)를 이용한 마찰 가이드를 이용하였다. [2] 그리고, Lee 는 선형 모터와 피에조 구동기, 그리고 공기베어링과 유연기구를 이용한 이

중 서보 시스템을 제안하였다. [3] 두 시스템을 비롯한 대부분의 이중 서보 시스템은 미세 구동부가 조동 구동부 위에 기계적 결합을 통하여 설치되어 있다. 기계적 결합을 통하여 조동 구동부의 기계적 진동 및 변형 등 정밀도에 영향을 주는 여러 외란이 미세 구동부로 전달된다. 시스템의 크기가 커지고 속도가 증가함에 따라 이러한 외란들은 미세 구동부가 추적하기 어려울 정도가 되었다. 특히, 조동 구동부에서 사용되는 선형 모터의 불안정한 정류로 인하여 발생하는 리플은 고정밀 정속 운동에 큰 문제가 되고 있다. [4] 이러한 문제를 해결하기 위하여, 조동 구동부와 미세 구동부 사이에 기계적 결합이 없는 시스템이 개발 되었다. [5] 그러나, 그 시스템은 대형 시스템에 적용하기가 어려운 창형(window type) 프레임이 조동 구동부에 사용되었다.

본 논문에서 조동 구동부와 미세 구동부 사이 기계적 결합이 없으며, 500mm 이상 대형 시스템을 구현하기 위하여 조동 구동부와 미세 구동부를 동일 평면에서 구동하는 메커니즘을 제안한다.

또한, 0.5G의 가속도와 정밀 운동을 형성하기 위하여 MATLAB의 순차적 2차 계획법을 이용하여 50°C의 온도 상승과 크기, 그리고 공급 전원의 제약을 고려한 보이시 코일 모터를 최적 설계 제작한다. 마지막으로 제안된 시스템이 나노미터급 정밀도의 스캐닝에 적합한지를 평가한다.

2. 기계적 결합이 없는 이중서보 시스템 설계

2.1 개념 설계

기계적 결합이 없는 이중 서보 시스템의 개념은 Fig. 1과 같다.

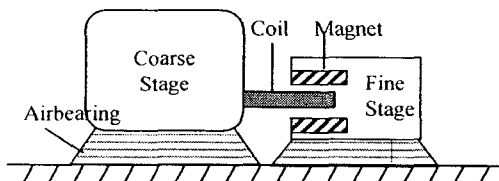


Fig. 1 Concept of the proposed Decoupled Dual Servo

기계적 결합이 없는 시스템을 구현하기 위하여, 미세 구동부의 구동기로써 보이시 코일 모터가 사용된다. 보이시 코일 모터는 로렌츠 힘 원리를 이용한 것으로 자속을 형성하는 자기 회로부와 전자가 흐르는 코일 사이에 물리적 결합을 갖지 않도록 할 수 있다. 기계적 비결합성과 더불어 구동기가 생성할 수 있는 힘을 크게 하기 위하여 Fig. 2에서 나타내는 보이시 코일 모터 구조를 채택한다.

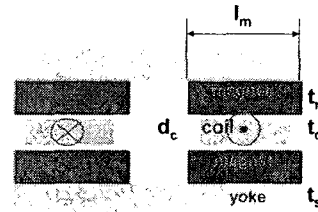


Fig. 2 Schematic of Voice Coil Motor for Fine Stage

보이시 코일 모터의 작동을 위하여 자기회로와 코일 부의 상대적 높이는 일정하게 유지되어야 한다. 본 논문에서 제안된 이중 서보 시스템에서는 이를 위하여 조동 구동부와 미세 구동부 각각에 근본적으로 마찰이 없는 공기베어링을 적용한다.

보이시 코일 모터는 앞에서 이야기 하였듯이 크게 자기 회로부와 코일부가 있다. 보이시 코일 모터는 가동자가 무엇이나에 따라, 자기 회로부가 움직임을 갖는 장치(가동 자석 형장치)와 코일 부가 움직이는 장치(가동 코일형 장치)로 구분될 수 있다. 본 논문에서 제안하는 구조는 자기 회로부가 미세 구동부에 설치되어 조동 구동부에 설치되는 코일에 대하여 상대 운동을 갖는 가동 자석형이다. 가동 자석형의 장점은 다음과 같다. 첫째, 구동 시 코일에서 발생하는 열이 직접적으로 미세 구동부에 전달되지 않는다. 둘째, 코일의 운동을 일정하게 함으로써 보이시 코일 모터가 생성하는 힘의 변화를 최소화한다.

$$\vec{F} = \vec{I} \times \vec{B} \quad (1)$$

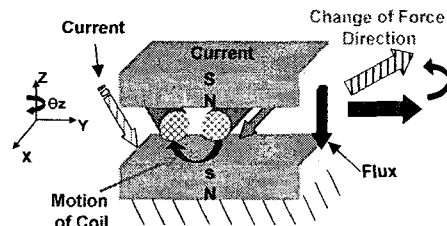


Fig. 3(a) Force Variation of Moving Coil Type VCM

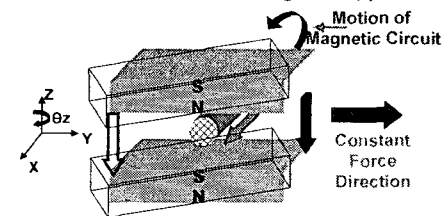


Fig. 3(b) Constant force of Moving Magnet Type VCM

코일과 자기 회로부의 운동이 평면상에서만 이루어진다고 가정하였을 때, 두 가지 장점 중 힘 변화에 대한 요소는 보이시 코일 모터 지배 방정식인 식 (1)과 Fig. 3을 통하여 설명된다. Fig. 3(a)와 같이 자기 회로는 고정되고 코일부가 움직임을 갖는 시

시스템은 식 (1)에서 \vec{L} 의 방향에 변화가 있을 때, 보이스 코일 모터 힘의 방향과 크기는 변화된다. 가동 자석형의 Fig. 3(b)는 코일부가 고정되고 자기 회로부의 평면운동을 보여준다. 자기 회로부의 평면이동은 자기회로에서 생성되는 자속 밀도의 방향을 변화시키지 않는다. 다시 말해, 전자가 흐르는 코일이 받는 자속(\vec{B})의 방향은 수직 성분으로 일정하게 되고 식 (1)에 의하여 힘의 방향과 크기의 변화가 없게 된다.

제안된 비결합 이중 서보 시스템의 미세 구동부는 XY θ 운동을 위하여 Fig. 4와 같이 4 개의 보이스 코일 모터들이 동일 평면 상에 구성된다. 또한, 기존의 창형 조동 구동부의 크기를 줄이기 위하여 Fig. 4와 5 같이 코일과 자기 회로부의 위치가 스테이지의 중심이 아닌 외곽에 위치한다.

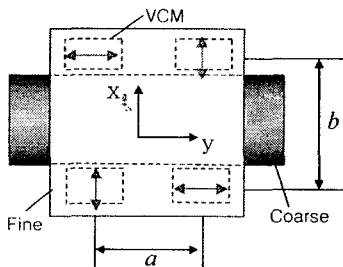


Fig. 4 Schematic of the proposed Fine stage with four VCMs

제안된 이중 서보 시스템의 보이스 코일 모터는 구조적 문제에 의하여 $\pm 5\text{mm}$ 의 운동만 가능하다. 장행정 운동을 위하여 코어 없는 선형 모터와 공기베어링 가이드의 조동 구동부가 설치된다. 본 논문에서는 조동 구동부에 대한 상세 설계를 논의하지 않는다. 미세 구동부의 전체 분해도는 Fig. 5에서 보여진다.

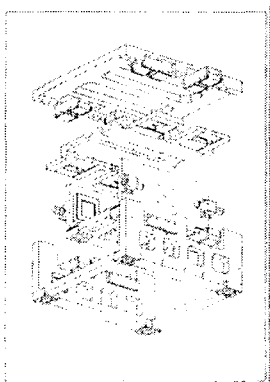


Fig. 5 Exploded Fine Stage with air bearings and VCMs

제안된 이중 서보 시스템이 초정밀 스캐닝 장치로서 적합한지를 평가하기 위하여 최대 0.5G의 가

속도와 최고 300mm/s의 속도를 가질 수 있도록 최적 설계를 수행하였다. 최적 설계는 MATLAB의 순차적 2차 계획법을 이용하였다. 주어진 환경 속에서 최대힘을 얻기 위하여 식 (2)와 Table. 1의 목적 함수와 설계 제약을 설정한다. 이를 적용하여 최적 설계된 보이스 코일 모터의 형상은 Table 2에서 표현된다.

$$F_{\text{cost}} = \left(\frac{1}{F_{\text{VCM}}} \right)^2 \quad (2)$$

Table 1 Constraints of VCM optimal design

Constraints	Temperature (ΔT)	50
	Power Consumption ($I^2/2R$)	$\leq 325(\text{W})$
	Yoke Saturation (B_{yoke})	$\leq 2.2(\text{T})$
	VCM Size (Height \times Length \times width)	$\leq 75 \times 100 \times 50$ (mm^3)
	Generated Force	$\geq 40(\text{kg})$ $\times 5(\text{m/s}^2)$

Table 2 Parameter values of the design and optimal VCM

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

3. 제어 알고리즘 및 결과

3.1 제어 알고리즘

정보저장기기 연구에서 많은 이중 서보 알고리즘이 보고되고 제안되었다. [6] 그러나, 본 논문에서 제안된 이중 서보 시스템은 조동 구동부와 미세 구동부 사이에 기계적 결합이 없기 때문에 기존의 제어 기법과는 다른 제어 알고리즘이 적용되어야 한다

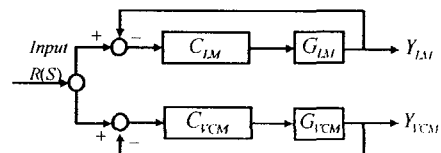


Fig. 6 Parallel type algorithm for the proposed dual servo

본 논문에서는 Fig. 6에서 보여주는 것과 같이 각 구동부가 개별적으로 구동되는 형태의 이중 서보 알고리즘을 채택한다. 제안되는 이중 서보 알고

리즘에서는 추적 궤적이 동시에 조동 구동부와 미세 구동부에 인가되고 각 구동 시스템은 독립적으로 제어된다. 제어 시 필요한 요소품은 각 구동부의 독립적 센서시스템이다. 본 논문에서는 조동 구동부를 위하여 5nm 분해능의 Renishaw 선형 스케일, 미세 구동부는 5nm 분해능의 3축 레이저 인터페로미터 시스템이 설치된다. 제안된 이중 서보 시스템의 실험 장치는 Fig. 7에 도시하였다.

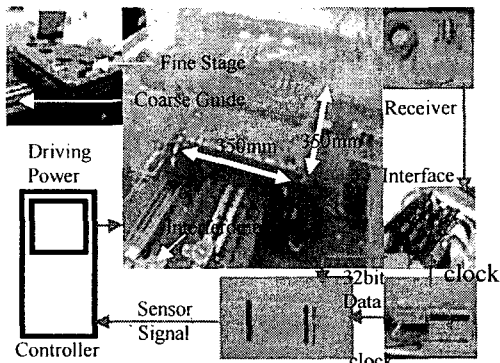


Fig. 7 Experimental Setup

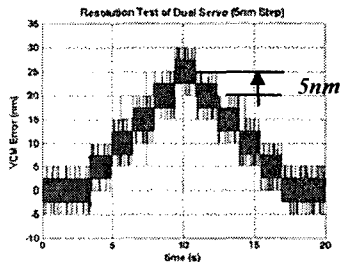


Fig. 8 5nm step response of high precision scanning system with 5nm interferometer

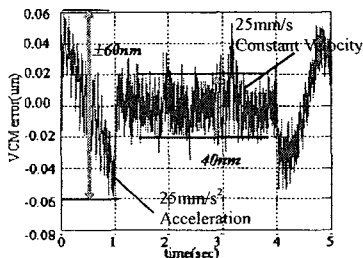


Fig. 9 Tracking error in 25mm/s constant velocity

제안된 이중 서보 시스템의 분해능 실험 결과 Fig. 8에서와 같이 약 5nm의 분해능을 가짐을 알 수 있었다. 또한, 사다리꼴 속도계적 실험(25mm/s²의 가속과 25mm/s 정속 운동) 결과 Fig. 9에서 보듯이 전체 구간에서 100nm 이하의 추적 에러를 가짐을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서 초정밀 정속 스캐닝 시스템을 위하여 조동 구동부와 미세 구동부 사이에 기계적 결합이 없는 이중 서보 시스템이 제안되었다.

제안된 이중 서보 시스템의 특징은 다음과 같다.

- 첫 째, 조동 구동부와 미세 구동부 사이에 기계적 결합이 없는 500mm 행정의 이중 서보 시스템
- 둘 째, 0.5G의 가속 운동이 가능한 가동 자석형 보이스 코일 모터를 이용한 XYθ 미세 구동장치
- 셋 째, 정밀 스캐닝을 위한 마찰 없는 공기베어링 가이드 시스템

넷 째, 정밀 측정 및 제어를 위한 평행형 이중 서보 알고리즘과 독립적인 측정 시스템(선형 스케일과 인터페로미터 시스템)

설계된 이중 서보 시스템은 5nm의 분해능과 100nm 이하의 추적 에러를 보이고 있다. 다시 말해, 본 논문에서 제안된 이중 서보 시스템은 초정밀 스캐닝 시스템에 적용 가능하다.

후 기

본 초정밀 스캐닝 이중 서보 스테이지 개발을 지원하여주신 삼성전자 메카 센터에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Elfizy, A. T., Bone, G. M., Elbestawi, M. A., "Design and control of a dual-stage feed drive," Inter. Jour. of Machine Tools & Manufacture Vol. 45, pp. 153-165, 2005.
2. Moriyama, S., Harada, T., Takanashi, A., "Precision X-Y Stage with a Piezo-driven Fine-table," Bull. Japan Soc. Of Prec. Eng., Vol. 22, No.1, pp. 13-17, 1988.
3. Lee, C. W., Kim, S. W., "An Ultra precision Stage for Alignment of wafers in advanced microlithography," Precision Engineering, Vol. 21, No. 23, pp. 113-122, 1997.
4. Van den Braembussche, P., et al, "Accurate tracking control of linear synchronous motor machine tool axes," Vol. 6, No. 5, pp. 507-521, 1996.
5. Kim, K. H., Lee, M. G., Kim, D. M., Gweon, D. G., "Control and design of a dual servo with fine 6-axis stage," ASPE 2003 Annual meeting, pp. 187-190, 2003.
6. Mamun, A. A., Mareels, I., Lee, T. H. and Tay, A., "Dual Stage Actuator Control in Hard Disk Drive - A Review," IECON Proc. v.3. 2003. pp.2132-2137