

초정밀 가공기를 위한 다극자석 선형 모터와 초정밀 스테이지 설계

김기현*, 이문구*, 김동민*, 권대갑*, 조형석*

Design of a high precision stage and a multi-segmented magnet array linear motor for high precision machine

Ki Hyun Kim*, Moon-Goo Lee*, Dongmin Kim*, Dae-Gab Gweon*, Hyung Suck Cho*

Abstract

본 논문은 초정밀 가공기에 적용 가능한 6자유도의 운동이 가능한 초정밀 스테이지의 설계를 기술한다. 본 초정밀 스테이지는 특히, 광학을 이용한 가공기와 절삭력이 작은 가공기에 적합하다. 스테이지는 장행정·단행정 스테이지로 구성된 이중 서보를 채택한다. 장행정 스테이지는 초정밀 운동에 방해가 되는 운동을 줄이며 높은 효율을 갖는 다극 자석 배열을 이용한 선형모터를 사용한다. 그리고 단행정 스테이지는 장행정 스테이지와의 기계적 결합에 의한 구조적 영향성을 없애는 개념을 적용할 수 있는 보이스코일 모터를 이용한다. 그리고 각 구동부는 최상의 성능을 유지할 수 있도록 최적설계를 수행한다.

Key Words : 초정밀 스테이지, 선형모터, 다극 자석 배열, 보이스코일모터, 이중 서보, 최적 설계

1. 서론

나노기술은 근본적으로 'Top-Down'과 'Bottom-Up' 두 생산 접근법이 있다. 'Top-Down' 접근 방법은 가공기 혹은 에칭 기법을 이용하여 나노단위의 구조를 만드나, 'Bottom-Up'은 원자를 점차 결합시켜 구조를 형성하는 것이다.[1] 'Top-Down' 접근 방법을 발전시키기 위하여 초정밀 가공기가 요구된다. 초정밀 가공기의 발전은 'Bottom-up'에 의한 나노제작품의 측정 및 처리에도 영향을 미친다.

초정밀 가공기를 구성하는 요소는 제어기, 구동기, 측정기로 구분되어진다.

초정밀 스테이지에 관한 연구는 N. Taniguchi의 나노기술 기류에 대한 논문을 토대로 하여 일본에서 주로 행해졌다.[2] 연구되는 구동기들은 힘을 전달하여주는 연결 구조를 필요로 하지 않는 직접 구동 시스템과 필요로 하는 간접 구동 시스템으로 나누어져서 발생이 되었다.[3, 4] 또한, 단일 서보와 이중 서보로 구분이 된다.[5]

본 논문은 광학을 이용한 초정밀 가공기, 절삭력이 작은 가공기, 환경을 고려한 가공기를 위하여 선형 모터를

* 한국과학기술원 기계공학과(khkim12@mail.kaist.ac.kr)
주소: 305-701 대전시 유성구 구성동 373-1
+ 한국과학기술원 기계공학과

이용한 직접 구동 및 이중 서보형 6축 초정밀 스테이지의 설계를 기술한다.

2장에서는 본 논문에서 설계하고자 하는 초정밀 스테이지의 특징들을 설명한다. 3장에서는 6축 단행정 구동부의 설계를 기술한다. 4장에서는 장행정 구동부를 위한 다극 자석 배열을 위한 선형 모터의 설계를 설명한다.

2. 제안하는 초정밀 스테이지의 특징

본 논문에서 제안하는 그림 1, 2에서 보여주는 것처럼 초정밀 스테이지는 6축의 운동을 하는 단행정 구동부와 평면운동을 수행하는 장행정 구동부로 구성이 된다.

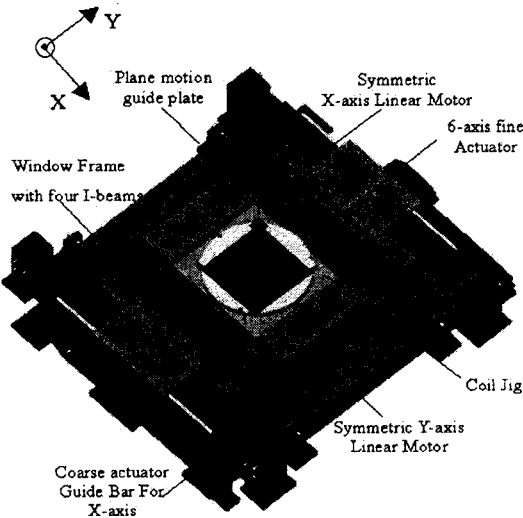


그림 1. 제안된 초정밀 스테이지

첫 번째, 일반적으로 단행정과 장행정 사이에 기계적 결합이 존재할 경우 장행정의 예상할 수 없는 운동이 초정밀 스테이지의 최종 성능을 나타내는 단행정 구동부의 운동에 제어·예측하기 어려운 현상을 발생시켜 초정밀 스테이지의 성능을 저하시킨다. 이러한 현상을 막기 위하여 그림 3에서 보여주는 것과 같은 기계적 결합이 없는 구조를 채택한다. 이때, 기계적 결합이 없는 구조를 형성하기 위하여 사용되는 시스템은 보이스코일모터이다.[6]

두 번째, 시스템의 구조적 강성을 높이며 구동 힘을 효과적으로 사용하기 위하여 I-Beam으로 구성된 장행정 구동부의 윈도우 프레임을 형성한다. 이때, I-Beam 한쪽 공간을 이용하여 Y축의 가이드 역할도 수행한다.

세 번째, 장행정 구동부의 효율을 증가시켜며 코깅 힘과

같은 불필요한 힘들을 줄이는 것으로 다극자석배열을 이용한 선형모터를 적용한다.[7]

네 번째, 초정밀 스테이지의 설계 시 가장 중요하게 여기는 온도 에러에 대한 대책으로써 전체 시스템을 각각의 구조에 맞도록 대칭 구조를 적용한다. 대칭적구조는 열적 변화로 발생하는 기계물들의 스트레스를 균등하게 분할하여 전체적으로는 없는 것으로 여길 수 있게 하여 열적 변화에 둔감한 시스템을 형성하여준다.

다섯 번째, 빠른 속도와 잠재적으로 무한대의 분해능을 얻기 위하여 본 스테이지에 porous 형의 공기 베어링이 가이드 시스템으로 이용된다. 그리고, 전체 가이드 면을 기준으로 선정하는 것은 생산성적 측면에서 불합리하므로, XY축 한 면씩만 기준면으로 사용하고, 기준이 되는 면에는 예압 형의 공기 베어링을 설치하여 가이드로써 사용하였다. 그리고, 단행정 구동부의 밑에는 베어링에 인가된 공기의 불규칙성을 보상하기 위하여 예압 형의 공기 베어링을 삼각형 대칭구조로 배열을 한다.

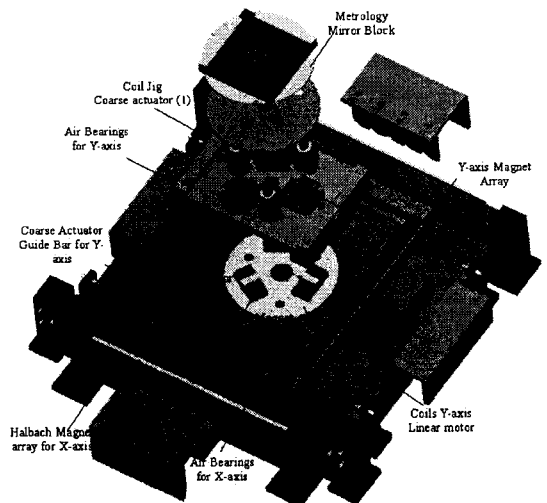


그림 2. 제안된 초정밀 스테이지 분리도

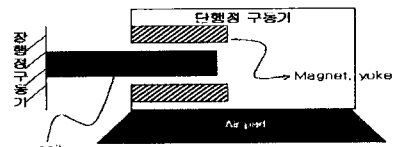


그림 3. 기계적 결합을 분리하는 구조

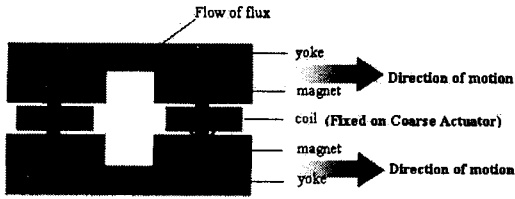


그림 4. 제안된 보이스코일모터의 작동 원리도

3. 6축 단행정 구동부의 설계

3.1 XY θ_z 구동을 위한 보이스코일모터 설계

앞에서 언급하였듯이, 단행정 구동부 중 평면 운동-XY θ_z -을 담당하고 그림 3과 같이 조동 구동기와의 기계적 결합을 없애기 위하여 보이스코일모터를 이용한다. 보이스코일모터를 이용할 수 있는 이유는 자석이 형성하는 자속흐름회로 안에서 작동하는 코일은 자석회로와 기계적 결합 없이 운동을 생성할 수 있는 특징이 있다. 그림 2에서와 같이 본 논문에서 제안되는 보이스코일모터의 원리도는 그림 4와 같다. 코일은 장행정 구동부의 코일 지그에 결합되며, 자석과 요크부는 단행정 구동부에 결합된다.

제안된 보이스코일 모터를 설계하기 위하여 식 (1)로 자기회로를 전기회로로 상사를 하면서 자속 밀도(B)를 구하기 위하여 이용되는 자기 회로법을 이용한다.[8,9] 그리고 구성된 자기회로에 의한 자속 밀도의 값은 MATLAB의 SQP를 이용하여 최대의 힘을 얻기 위하여 설계 값을 획득한다.

$$P = \frac{uA}{l} \quad (1)$$

Table 1. Optimal Design values

Design Variables	Optimal Values (mm)	Designed Value (mm)
Magnet Thickness (t_m)	7.5244	7.5
Magnet Length (l_m)	33.3	33
Yoke Thickness (t_y)	8.0314	8.0
Coil Thickness (t_c)	6.8893	6.9
Coil Diameter (d_c)	0.5922	0.55

3.2 Z θ_x θ_y 구동을 위한 레벨링 구동기 설계

레벨링 구동기는 영구자석과 코일을 이용한다. 구동기의 기본 개념은 그림 5에서 보여준다.

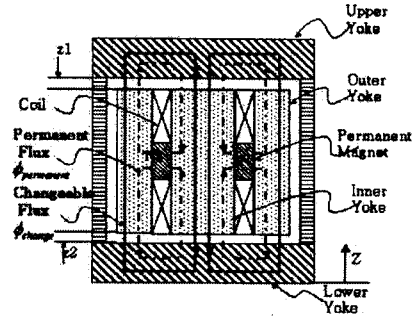


그림 5. 제안된 레벨링 구동기 개념도

영구자석에 의한 자속량($\phi_{permanent}$)은 일정하나 코일에 의한 자속량(ϕ_{change})은 코일에 인가해주는 전류의 양에 따라 변화한다. 이때, 간격($z1$ 과 $z2$)사이에서 실제로 발생하는 자속량은 식 (2)과 같이 주어진다.

$$\phi_{gap} = \phi_{permanent} \pm \phi_{change} \quad (2)$$

Table 2. Design Values of the Level Actuator

Resistance	Turns	Coil Diameter.	Magnet (mm)	Yoke	Circular Plate(mm)
20 Ω	520	$\phi_{coil} : 0.4$ (Bars)	NdFe40 $\epsilon : 4$ $\phi_m : 15$ $\phi_{ms} : 25$	S10C	$\epsilon : \emptyset.1$ $\phi_{ms} : 5$ $\phi_{ms} : 30$

이 식이 지배되면서, 레벨 구동기는 운동을 갖게 된다. 그리고 레벨 구동기의 가이드는 원판형 가이드를 사용함으로써 직선 외의 운동을 잡아 줄 수 있도록 한다.[10]

4. 고강성 · 고효율을 위한 장행정 구동부의 설계

4.1 구조적 강성을 높이며, 효율을 높이기 위한 장행정 구동부의 구조

그림 1, 2에서 보여진 것처럼 I-beam 네 개를 이용하여 윈도우 구조를 형성하였다. 이것은 장행정 구동부 무게를 줄이는 역할과, 구동 선형 모터의 배열을 대칭적 구조로 놓이도록 하여 두 배의 힘을 얻을 수 있도록 한다. 마지막으로 I-beam 자체의 특성인 높은 강성을 이용하여 전체 구동 시스템의 강성을 높여준다. 덧붙여, I-Beam의 활용 목적은 그림 1, 2에서 알 수 있듯이 y축 방향의 공기베어링 들의 가이드 역할이다.[11]

4.2 다극 자석 배열을 이용한 선형모터 설계

다극 자석 배열은 기존 자석 배열에 자속의 흐름을 더욱 원활히 하는 것에 도움을 주는 부가 자석을 첨가함으로써 자속의 흐름을 원활하게 하며 고효율을 얻기 위한 구조이다. 그림 5에서와 같이 본 제안된 시스템에서는 간단한 다극 자석 배열을 채택하였다. [12]

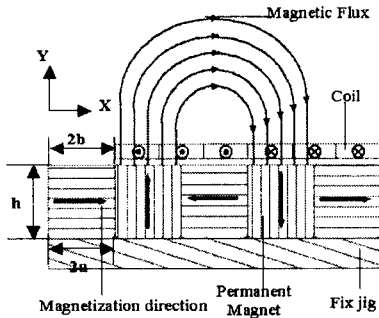


그림 6. 다극 자석 배열의 단면도

선형 모터를 설계함에 있어 수식적인 방법을 이용하였다. 그리고, 수식화된 정리를 MATLAB의 SQP에 적용하여 최적설계를 수행하였다.

Table 3. Optimal Value of XY linear motors

Design Variables	Optimal Values (mm)		Designed Value (mm)	
	X-axis	Y-axis	X-axis	Y-axis
Magnet Thickness (t_m)	12 Fixed			
Magnet Length (l_m)	75	45	75	45
Magnet Width (w_m)	11.2	12.9	11.25	12.9
Coil Turn number (n)	96	108	96	110
Coil Diameter (d_c)	0.4495	0.4495	0.45	0.45
Air Gap (w_{j0})	1			
Current (A)	2(A) Fixed			

5. 제안된 초정밀 스테이지의 제작 및 조립

앞장에서 언급된 결과를 갖고 그림 7에서 보여준 것과 같이 단행정 구동부 위에서 보이스코일모터와 레벨링 구동기가 대칭형 구조를 형성한다.

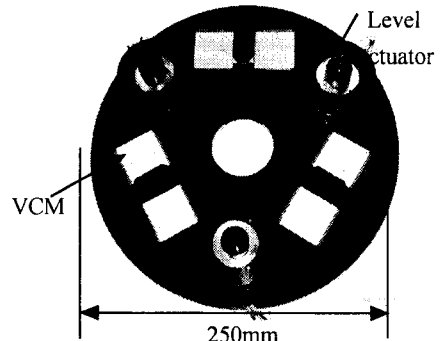


그림 7 대칭적으로 배치된 구동시스템

그림 8,9는 각각 다극자석 배열과 I-Beam을 이용한 윈도우 프레임이 보여준다. 그리고 마지막으로 그림 10에서는 제안되고 설계·제작된 초정밀 6축 스테이지를 보여준다. 전체 스테이지의 크기는 600mm × 600mm × 108mm이다. 그리고, 구동 가능한 영역은 평면 운동(XY 축)은 200mm × 200mm, 레벨링 운동과 피치, 롤 운동($Z \phi_x \phi_y$)는 약 $400\mu\text{m} \times 0.7^\circ \times 0.3^\circ$ 를 갖는다.

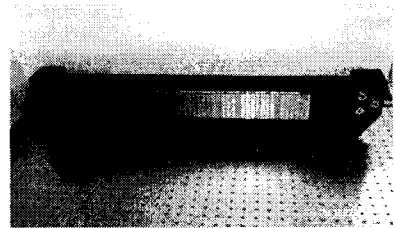


그림 8. 선형 모터를 위한 다극 자석 배열 및 X축 가이드

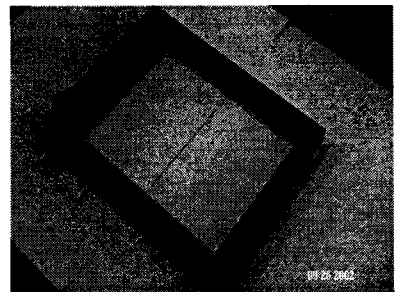


그림 9. I-Beam을 이용한 윈도우 프레임

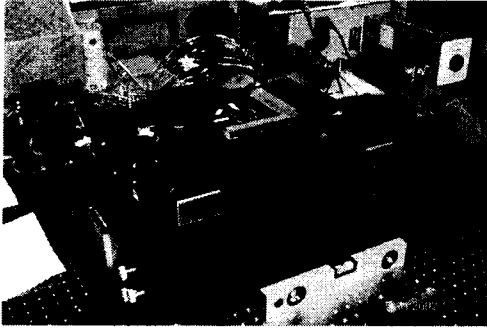


그림 10. 제작된 초정밀 스테이지

4. 결론

제안된 스테이지는 장행정과 단행정 사이에 보이스코일 모터를 이용하여 기계적으로 간섭이 없는 구조를 획득하였고, I-Beam을 이용하여 전체적으로 고강성과 높은 효율을 갖는 시스템을 형성하였다. 그리고, 덧붙여 다극자석 배열을 이용한 선형모터를 채택함으로써 높은 생산성과 우수한 선형운동성을 갖는 초정밀 가공기의 개발에 기여한다.

본 연구를 통하여 $600\text{mm} \times 600\text{mm} \times 108\text{mm}$ 의 크기를 갖는 초정밀 스테이지를 제작하였다. 그리고, 구동 가능한 영역은 평면 운동(XY 축)은 $200\text{mm} \times 200\text{mm}$, 레벨링 운동과 피치, 롤 운동(Z ϕ_x, ϕ_y)는 약 $400\mu\text{m} \times 0.7^\circ \times 0.3^\circ$ 이다. 본 연구를 통하여 초정밀 스테이지의 제작 및 설계 시 최적 설계를 통한 최적 성능을 얻을 수 있는 계기를 마련하였다.

추후로 제작된 시스템을 이중 서보 제어를 하고, 성능향상을 위한 시스템 분석을 진행할 것이다.

후기

본 연구는 KISTEP의 국제공동연구 사업의 일환으로 지원을 받아 수행되었습니다.

참고 문헌

(1) John M Taylor, 2002, *New Dimensions for Manufacturing: A UK Strategy for Nanotechnology*, Department of Trade and

Industry, UK

(2)N. Taniguchi, Mar., 1992, "Future Trends of Nanotechnology", *JSPE*, Vol. 26, No. 1, pp1~7.

(3) Y. Aoki, Y. Kawase, S. Fukada and J. Otsuka, 1990, "Ultraprecision Positioning by Using Lead Screw Drive(1st Report)", *JSPE*, Vol. 56, No. 11, pp2033~2038.

(4)H. A. Waggener, D. W. Peters, G. Chen, C. M. Rose and D. C. Fowlis, Nov/Dec., 1991, "Preliminary Analysis of Electron-Beam positioning errors in Lepton EBES4", *J. Vac. Sci. Tech. B* 9(6), pp3033~3038

(5)Y. Okazaki, S. Asano and T. Goto, 1993, "Dual-Servo Mechanical Stage for Continuous Positioning", *JSPE*, Vol. 27, No. 2, pp172~173

(6)Hans Butler, R. A. George and J. Baselmans, Spring, 1999, "Scanning stage technology for exposure tools", *Microlithography World*, pp. 8~16

(7)J. Ofori-Tenkorang and J. H. Lang, Oct. 8-12, 1995, "A Comparative Analysis of Torque Production in Halbach and conventional Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Motors", *IEEE IAS Annual meeting*, pp657~663.

(8)D. C. Hanselman, 1994, "Brushless Permanent-Magnet Motor Design", McGraw-Hill, New York.

(9)D. M. Kim, K. H. Kim and D. G. Gweon, October, 2001, "The conceptual design of the xy fine stage and its optimal design to obtain fast response in lithography system". *ICCAS 2001*.

(10)K. H. Kim, D. M. Kim, S. Q. Lee and D. G. Gweon, October, 2001, "Bi-directional Actuator using a permanent magnet and solenoid", *ICCAS 2001*.

(11) K. H. Kim, M. G. Lee, D.M. Kim and D. G. Gweon, 2002, "Design of a Dual Servo XYtheta Stage using double H-frame" , *ASPE*.

(12) M. G. Lee, K. H. Kim, and D. G. Gweon, 2002, "Novel Linear Motor for High Precision Stage of Semiconductor Lithography System", *ASPE*.