

플렉서 힌지 기반 6-자유도 초정밀 위치 결정 스테이지의 기구학 해석

Kinematic Analysis of a 6-DOF Ultra-Precision Positioning Stage Based on Flexure Hinge

신현표^{1,✉}, 문준희²
Hyun-Pyo Shin^{1,✉} and Jun-Hee Moon²

1 동양미래대학교 로봇자동화공학부 (School of Robot and Automation Engineering, Dongyang Mirae University)
2 유한대학교 메카트로닉스과 (Department of Mechatronics, Yuhan University)
✉ Corresponding author: hpshin@dongyang.ac.kr, Tel: +82-2-2610-1816

Manuscript received: 2015.12.26. / Revised: 2016.4.22. / Accepted: 2016.4.26.

This paper describes kinematic analysis of a 6-degrees-of-freedom (DOF) ultra-precision positioning stage based on a flexure hinge. The stage is designed for processes which require ultra-precision and high load capacities, e.g. wafer-level precision bonding/assembly. During the initial design process, inverse and forward kinematic analyses were performed to actuate the precision positioning stage and to calculate workspace. A two-step procedure was used for inverse kinematic analysis. The first step involved calculating the amount of actuation of the horizontal actuation units. The second step involved calculating the amount of actuation of the vertical actuation unit, given the the results of the first step, by including a lever hinge mechanism adopted for motion amplification. Forward kinematic analysis was performed by defining six distance relationships between hinge positions for in-plane and out-of-plane motion. Finally, the result of a circular path actuation test with respect to the x-y, y-z, and x-z planes is presented.

KEYWORDS: Flexure hinge (플렉서 힌지), Parallel mechanism (병렬 기구), Inverse kinematics (역기구학), Forward kinematics (정기구학), Positioning stage (위치 결정 스테이지)

1. 서론

초정밀 위치 결정용 스테이지 (Ultra-Precision Positioning Stage)는 마이크로나 나노 수준의 위치 결정을 필요로 하는 분야에 매우 다양한 형태로 사용되어 왔다. 전자 주사 현미경에서의 대물 위치 조정, 셀 조작, 마이크로 가공 및 조립, 광학 장치의 위치 및 자세 결정, 웨이퍼 정렬 등 수많

은 분야에서 정밀 위치 결정 스테이지를 필요로 한다.¹⁻³

정밀 위치 결정 스테이지는 단순한 위치 결정의 용도로 사용되기도 하지만, 미세 조립과 같이 높은 자유도의 운동을 통해 제품 생산에 사용될 수도 있고, 가공 공정에 투입될 경우 위치 결정뿐 아니라 하중을 가하는 용도로도 활용될 수 있다. 이를 위해서는 고정밀, 넓은 운동범위, 높은 자유

도의 운동, 위치 안정성, 컴팩트한 사이즈 등을 요구한다. 특히, 웨이퍼 렌즈 성형 및 접합 공정과 같이 두께 편차가 존재하는 웨이퍼를 정밀 정렬하고 높은 압력을 가하는 공정의 경우 높은 분해능과 더불어 높은 내하중성과 같이 동시에 만족시키기 어려운 요구 사항들이 양립하기도 한다.

위치 결정 스테이지는 스텝모터, 서보모터 등 회전자에 포함된 모터를 사용한 것과 그 외의 PZT 액추에이터, 자기부상 액추에이터 등을 사용한 것으로 나눌 수 있다.⁴ 기존의 서보모터나 볼스크류, 강체 링크로 구성된 위치결정 스테이지는 유격, 마찰, 백래쉬 (Backlash) 등의 문제로 인해 마이크로/나노 위치결정에 있어 적용이 많이 제한되는 편이다. 반면, 운동을 전달하기 위해 탄성 변형을 사용하는 플렉서 힌지 기반의 스테이지 (Flexure Hinge Based Stage)는 마모, 마찰, 백래쉬 등이 존재하지 않아서 높은 반복정밀도를 제공하며 초정밀 위치결정에 적합하다.⁵

또한, 플렉서 힌지를 사용하여 병렬 기구 (Parallel Mechanism) 방식으로 스테이지를 구성할 경우 병렬 기구 방식의 장점인 높은 강성, 낮은 관성, 높은 하중 지지력으로 인해 유리해지는 측면도 있지만 직렬 기구 방식에 비해 구조적으로 복잡하여 기구학 해석이 복잡해진다는 단점이 또한 존재한다. 이는 결과적으로 제어를 복잡하게 하는 요인이 되기도 한다.⁶

정밀 위치 결정 스테이지에 자주 사용되는 PZT 액추에이터는 빠른 주파수 응답성, 높은 분해능, 부드러운 운동 등의 특성을 지니고 있다.^{7,8} 그러나 최대 운동 범위가 액추에이터 길이 대비 0.1% 정도로 제한되어 운동 증폭 메카니즘과 함께 사용되지 않으면 액추에이터의 설치 공간 대비 작업영역이 매우 적어지게 된다. 이러한 특성을 극복하기 위해 별도의 운동 증폭 메카니즘과 함께 사용되는 경우가 많다.⁹ 이러한 증폭 메카니즘을 적용할 경우 크게 운동 범위의 증폭이 이루어지지만, 기구학적으로는 복잡한 구조를 지니게 되어 기구학 해석에 있어서 복잡도를 증가시킨다.

본 논문에서는 고정밀 내하중성을 동시에 갖춘 플렉서힌지 및 병렬 기구 기반의 6-자유도 정밀 위치 결정기구에 대한 기구학 해석을 수행한다. 본 위치 결정기구는 일차원(1-D) 및 이차원(2-D) 플렉서 힌지를 적용하여 6-자유도 운동이 가능하도록 설계되었다.¹⁰ 기구학 해석을 위해 플렉서 힌지를 적용한 수평구동유닛 (Horizontal Actuation

Unit)과 수직구동유닛 (Vertical Actuation Unit)에 대해 엔드 이펙터 (End-Effector)와 액추에이터의 위치 관계를 수식화하여 해석을 수행한다. 수직구동 유닛의 경우 레버 힌지를 통해 운동의 방향을 수직으로 바꾸어주는 운동 증폭 메카니즘을 적용했으므로 이를 고려한 해석을 수행한다. 역기구학 해석의 경우 해석적으로 해를 도출하고, 정기구학 해석의 경우 유일한 해의 해석적 결정이 어려우므로 먼저 6가지 구속조건을 수식화한 후 수치적인 방법으로 해를 도출한다.

2장에서는 6-자유도 정밀 위치 결정 스테이지의 구조 및 기구적 특징에 대해 소개한다. 3장에서 먼저 역기구학 해석을 수행하고 이후 4장에서는 정기구학 해석을 수행한다. 5장에서는 기구학 해석을 활용한 제어 실험 결과를 제시하고, 마지막으로 결론을 제시한다.

2. 6-자유도 초정밀 위치 결정 스테이지의 구성 및 기구 구조

본 스테이지는 6-자유도 운동이 가능하면서 공간활용도를 높이고 각 구동유닛에 하중을 균일하게 부담되도록 설계되었다. 또한 웨이퍼 성형 및 접합 공정에 적합하게 딥트 모션 범위 향상에 강조점을 두도록 설계 되었다.

스테이지의 형상과 내부 구조가 Fig. 1에 나타나 있다. 위의 그림은 조립된 전체 외형이며, 아래의 그림은 내부 구조를 볼 수 있도록 탑 플레이트 (Top Plate)를 제거한 것이다. 스테이지는 베이스 플레이트 (Base Plate)와 엔드 이펙터에 해당하는 탑 플레이트, 구동 유닛 (Actuation Unit), 센서 유닛 (Sensor Unit) 등으로 구성되어 있다. 6개의 PZT 액추에이터가 모두 지면에 평행하면서 운동의 중심에 해당하는 힌지 중심이 서로 정삼각형을 이루도록 장착되어 있고 6개의 센서가 피드백 제어 (Feedback Control)를 위해 설치되어 있다.

Fig. 2는 구동 유닛을 중심으로 평면 조립도를 나타낸 것이다. x , y -축 병진 및 z -축 회전 운동을 의미하는 인플레인 운동 (In-Plane Motion)과 x , y -축 회전 및 z -축 병진 운동을 의미하는 아웃오브플레인 운동 (Out-of-Plane Motion)을 담당하는 수평 구동 유닛과 수직 구동 유닛이 서로 이중 삼각형 구조를 이루도록 배치되어 있다. 플렉서 힌지의 중심을 작은 원으로 표시하여 정삼각형의 꼭지점에 대응되는 운동 중심을 나타내었다. 수평 구동 유

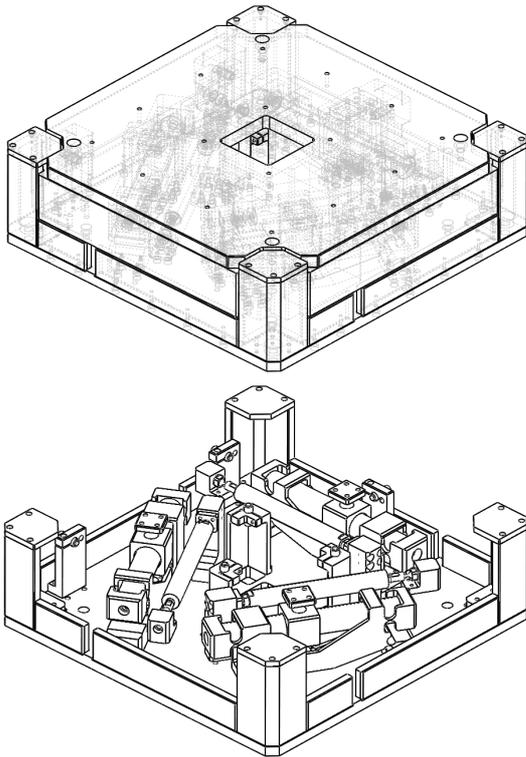


Fig. 1 Appearance and inner structure of the 6-DOF ultra-precision positioning stage

닛과 수직 구동 유닛이 각각 내부와 외부의 삼각형을 이루도록 배치함으로써 z-축 회전운동 범위와 x, y-축 회전운동의 민감도가 최대화 되도록 했으며, 동시에 웨이퍼 접합과 같은 수직 방향의 하중에 대해 안정적으로 지지할 수 있도록 하였다. 또한, 이중 삼각형 구조 중앙에 홀을 만듦으로써, 스테이지 중앙 부분에 광학 모듈을 관통하도록 장착하는 것이 가능하다. 이는 공간활용을 최대한으로 높이면서 광학 장치의 정밀 제어가 가능하다는 장점이 있다.¹⁰

스테이지를 구동하기 위한 액추에이터와 센서는 분해능 및 응답속도가 빠르고 백래쉬 (Backlash)가 없는 PZT와 서브나노급 (Sub-Nano) 분해능으로 운동을 감지할 수 있는 정전용량 갭 센서 (Capacitive Gap Sensor)를 각각 사용하였다. 3개의 센서는 스테이지 바닥면에 수평이 되도록 배치되어 인플레이션 운동을 감지하고, 3개의 센서는 스테이지 바닥면을 기준으로 수직으로 배치되어 아웃오브플레인 운동을 감지한다. 각 센서는 엔드

이펙터의 움직임을 높은 정밀도로 감지하기 위해 직각이 되도록 설계 되었고, 센서와 마주하는 면은 센싱 오차를 줄이기 위해 표면 조도가 높게 가공되었다. 본 스테이지는 총 6개의 센서를 사용하여 스테이지의 움직임을 감지함으로써 피드백 제어를 하게 된다.

3. 역기구학 해석

3.1 병렬기구의 역기구학 해석

역기구학 해석은 스테이지 엔드이펙터의 위치와 자세를 알 때, 각 액추에이터의 구동량을 계산하기 위한 해석 과정이다. 직렬 기구 방식 스테이지의 경우 역기구학 해가 무한하므로 유일하게 결정되지 않으나, 병렬 기구 방식의 스테이지의 경우 유일하게 결정된다는 특징이 있다.

스테이지의 엔드이펙터를 원하는 위치 및 자세로 움직이기 위해서는 역기구학 해석을 통해서 액추에이터의 구동거리를 계산해야 한다. 또한, 역기구학 해석 결과는 스테이지 구동뿐 아니라, 모달 해석 (Modal Analysis)을 위한 동역학 해석 및 제어에도 활용된다. 본 스테이지는 병렬기구이므로 모든 액추에이터가 함께 구동되어야 운동이 구현되며, 비교적 단순하게 이루어져 있는 수평구동유닛과 달리 수직구동유닛의 경우 내부의 힌지 배치와 증폭 메커니즘을 고려한 해석이 필요하다.

3.2 수평구동유닛 및 수직구동유닛을 고려한 수식화

스테이지의 구동에 관계된 구성 부품 및 장착거리가 Fig. 2에 나타나 있다. Fig. 2에서 $p_i (i=1\sim6)$ 는 수평구동유닛의 경우 앞쪽 힌지 중심 위치를, 수직구동유닛의 경우 폴힌지 (Pole Hinge) 중 위쪽 힌지 중심 위치를 나타내는 벡터이다. 또한, $q_i (i=1\sim6)$ 는 수평구동유닛의 경우 뒤쪽 힌지 중심 위치를, 수직구동유닛의 경우 폴힌지 중 아래쪽 힌지 중심 위치를 나타내는 벡터이다. $B_i (i=1\sim6)$ 는 6개의 PZT 액추에이터를 뜻하며, l 은 수평구동유닛 앞과 뒤쪽 힌지 중심 사이의 거리를 뜻한다.

Fig. 3에는 수직구동유닛이 나타나 있다. 수직구동유닛은 3개의 일차원 힌지와 2개의 이차원 힌지 및 구동기로 구성되어 있으며 구동기의 운동을 90도 바꾸어 줌과 동시에 운동 범위를 증폭시켜 주는 역할을 한다. m 은 폴 힌지의 위와 아래쪽 힌지 중심 간 거리를 나타낸다. r_1 과 r_2 는 레버힌지를 통

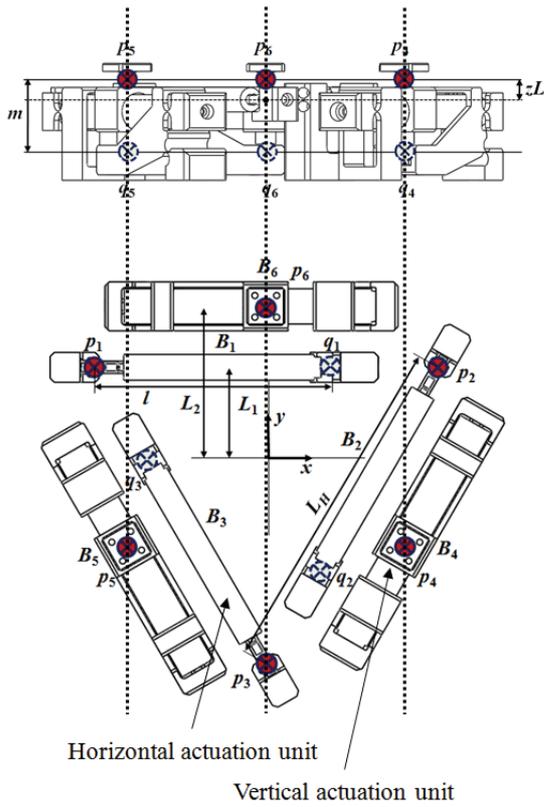


Fig. 2 PZT actuator arrangement of the 6-DOF ultra-precision positioning stage

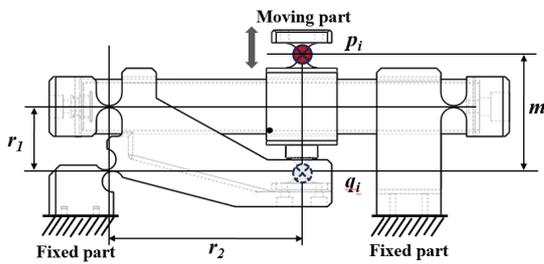


Fig. 3 Vertical actuation unit and related parameter

한 운동의 증폭을 보여주기 위해 표시하였다. 운동의 증폭은 r_1 과 r_2 의 비율에 의해 계산된다.

아래의 식(1)과 (2)는 p_i 와 q_i 의 초기 위치를 나타내는 행렬이다.

$$p_0 = \begin{bmatrix} -\sqrt{3}L_1 & \sqrt{3}L_1 & 0 & 0 & -\sqrt{3}L_2 & \sqrt{3}L_2 \\ L_1 & L_1 & -2L_1 & 2L_2 & -2L_2 & -2L_2 \\ 0 & 0 & 0 & zL & zL & zL \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$q_0 = \begin{bmatrix} -\sqrt{3}L_1 + l & \sqrt{3}L_1 - \frac{1}{2}l & -\frac{1}{2}l & 0 & -\sqrt{3}L_2 & \sqrt{3}L_2 \\ L_1 & L_1 - \frac{\sqrt{3}}{2}l & -2L_1 + \frac{\sqrt{3}}{2}l & 2L_2 & -2L_2 & -2L_2 \\ 0 & 0 & 0 & zL - m & zL - m & zL - m \end{bmatrix} \quad (2)$$

식(3)은 스테이지 엔드이펙터가 T 만큼의 x, y, z -축 병진운동과 R_x, R_y, R_z 만큼의 x, y, z -축 회전운동을 한 후의 각 힌지 중심 위치를 나타낸다. $p_{i,0}$ 는 p_i 의 초기 위치를 나타내는 벡터이며, I 는 단위행렬이다.

$$p_i = T + (R_x + R_y + R_z - 2I)p_{i,0}, \quad p_i \in \mathbb{R}^{3 \times 1}, \quad i = 1 \sim 6 \quad (3)$$

인플레이션 운동과 관련된 역기구학 해는 식(4)에서 바로 계산할 수 있지만, 아웃오브플레이션 운동의 경우 레버힌지가 포함된 메커니즘으로 인해 추가적인 해석과정이 필요하다.

$$e_i = \|p_i - q_i\| - l, \quad i = 1, 2, 3 \quad (4)$$

다음에 제시되는 과정을 통해 수직구동유닛에 대한 역기구학 해석을 수행할 수 있다. 먼저 식(5)와 (6)는 수직구동유닛의 풀힌지(위쪽, 아래쪽 풀힌지) 간의 거리가 일정하다는 조건을 통해서 아래쪽 풀힌지의 위치 q_i ($i=1\sim 3$)를 도출하기 위한 것이다. 여기에서 AR 은 운동범위의 증폭비를 나타낸다. ($AR = r_2 / r_1$)

$$\|p_i - q_i\| = m, \quad i = 4, 5, 6 \quad (5)$$

$$q_i = q_{i,0} + [0 \ 0 \ E], \quad E = AR \times e_i \quad (6)$$

식(7)은 아래쪽 풀힌지 위치로부터 레버힌지를 거쳐 액추에이터의 구동량을 구하기 위한 식이다. 여기에서 z_p 와 $z_{q,0}$ 는 각각 p_i 와 $q_{i,0}$ 의 z 축 좌표를 나타낸다. 식(7)에 대해서 방정식의 해를 도출하여 식(8)과 같이, 수직구동유닛에 포함되어 있는 액추에이터의 구동량을 최종적으로 구할 수 있다.

$$E^2 - 2(z_p - z_{q,0})E + \|p_i - q_{i,0}\|^2 - m^2 = 0 \quad (7)$$

$$e_i = \frac{1}{AR} \left\{ (z_p - z_{q,0}) - \sqrt{(z_p - z_{q,0})^2 - \|p_i - q_{i,0}\|^2 + m^2} \right\} \quad (8)$$

Table 1 Workspace specifications for the 6-DOF ultra-precision stage

Axis		Stroke / Angle
In-Plane motion	x-translation	± 50 μm
	y-translation	± 50 μm
	z-rotation	± 733 μrad
Out-of-Plane motion	x-rotation	± 244 μrad
	y-rotation	± 244 μrad
	z-translation	± 150 μm

4. 정기구학 해석

4.1 병렬기구의 정기구학 해석

역기구학 해석과는 반대로 정기구학 해석은 액추에이터의 변위 값을 입력해 주었을 때 엔드이펙터의 위치 및 자세를 계산하기 위해 필요하며 작업영역 해석을 가능하게 한다. 병렬기구의 정기구학 해석은 정기구학식의 해가 유일하게 결정되지 않으므로 구속조건식을 구성하여 수치적인 방법으로 수행해야 한다.

본 스테이지의 목표 작업영역은 Table 1에 나타나 있다. 목표 작업영역은 웨이퍼 레벨 렌즈 성형 및 접합 공정에 적합하도록 정해진 것이다. 특히, 이 공정은 수평 방향의 운동 범위보다는 수직 방향으로 웨이퍼에 압력을 가하거나, 접합하는 공정이므로 z-축 병진운동 범위가 커야 한다는 특징이 있다.

4.2 힌지 회전 중심간의 구속관계 도출

본 스테이지의 경우 인플레인 운동과 아웃오브플레인 운동에 관련된 힌지 사이에 2가지의 거리 관계가 존재한다. 2가지의 거리는 기구적으로 고정되어 있으므로 상수로 볼 수 있다. 그러므로, 거리 관계에 대한 구속 조건을 활용하여 다변수 뉴턴-랩슨 법 (Multi Variable Newton-Rahpson Method)을 적용함으로써 조건을 만족하는 해를 도출할 수 있다.

PZT 액추에이터가 축방향으로 움직이며 변위를 만들어 내는 방식이므로 거리 구속 조건을 활용하는 것이 단순하면서도 효율적이다. Fig. 4는 인플레인 운동을 만드는 수평구동유닛의 세 개의 힌지 위치 (A, B, C)와 아웃오브플레인 운동을 만드는 수직구동유닛의 세 개의 힌지 위치 (D, E, F)를 연결한 삼각형들 간의 거리 관계를 나타낸 것이다. 인플레인 운동을 위한 수평구동유닛 및 아웃오브플레인 운동을 위한 수직구동유닛은 정삼각형을 이루도록 배치되어 있으므로 L_3, L_4 로 표현된 2가

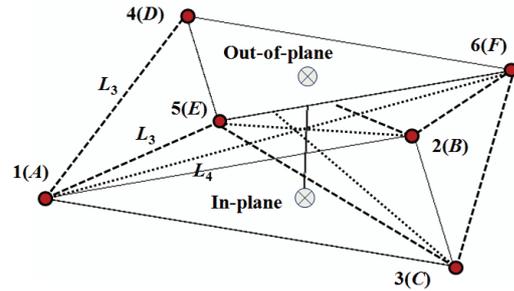


Fig. 4 Distance relationships between the virtual triangles related to out-of-plane motion and in-plane motion

지 거리 조건만이 존재함을 알 수 있다.

구체적인 거리 구속관계는 식(9) - (14)에 나타나 있다. $x_i, y_i, z_i (i=A, B, C, D, E, F)$ 는 Fig. 4에 나온 6개의 힌지 위치 좌표를, $x_i, y_i, z_i (i=a, b, c, d, e, f)$ 는 6개의 힌지의 초기 위치 좌표를, L_H 는 3개의 수평구동유닛의 앞쪽 힌지 간 거리를, d 는 PZT 액추에이터의 구동거리를 각각 나타낸다. d 앞에 곱해져 있는 3은 수직구동유닛의 운동범위 증폭비를 의미한다. 구속 관계식을 정리하면 다음과 같다.

#1: 수평구동유닛의 세 개의 점(A, B, C) 간의 거리는 일정하다.

$$\begin{aligned}
 f_1 &= (x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2 + (z_A - z_B)^2 - L_H^2 \\
 f_2 &= (x_B - x_C)^2 + (y_B - y_C)^2 + (z_B - z_C)^2 - L_H^2 \\
 f_3 &= (x_C - x_A)^2 + (y_C - y_A)^2 + (z_C - z_A)^2 - L_H^2
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

#2: A 위치에서 수직구동유닛의 세 개의 점(D, E, F)까지의 거리는 일정하다.

$$\begin{aligned}
 f_4 &= (x_A - x_D)^2 + (y_A - y_D)^2 + (z_A - z_D)^2 - L_3^2 \\
 f_5 &= (x_A - x_E)^2 + (y_A - y_E)^2 + (z_A - z_E)^2 - L_3^2 \\
 f_6 &= (x_A - x_F)^2 + (y_A - y_F)^2 + (z_A - z_F)^2 - L_4^2
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

#3: B 위치에서 수직구동유닛의 세 개의 점(D, E, F)까지의 거리는 일정하다.

$$\begin{aligned}
 f_7 &= (x_B - x_D)^2 + (y_B - y_D)^2 + (z_B - z_D)^2 - L_4^2 \\
 f_8 &= (x_B - x_E)^2 + (y_B - y_E)^2 + (z_B - z_E)^2 - L_3^2 \\
 f_9 &= (x_B - x_F)^2 + (y_B - y_F)^2 + (z_B - z_F)^2 - L_3^2
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

#4: C 위치에서 수직구동유닛의 세 개의 점(D,

E, F)까지의 거리는 일정하다.

$$\begin{aligned} f_{10} &= (x_c - x_D)^2 + (y_c - y_D)^2 + (z_c - z_D)^2 - L_5^2 \\ f_{11} &= (x_c - x_E)^2 + (y_c - y_E)^2 + (z_c - z_E)^2 - L_4^2 \\ f_{12} &= (x_c - x_F)^2 + (y_c - y_F)^2 + (z_c - z_F)^2 - L_3^2 \end{aligned} \quad (12)$$

#5: 수평구동유닛의 앞과 뒤 힌지 간의 거리는 초기 길이에 변위를 더한 것과 같다.

$$\begin{aligned} f_{13} &= (x_A - x_a)^2 + (y_A - y_a)^2 + (z_A - z_a)^2 - (l + d_A)^2 \\ f_{14} &= (x_B - x_b)^2 + (y_B - y_b)^2 + (z_B - z_b)^2 - (l + d_B)^2 \\ f_{15} &= (x_C - x_c)^2 + (y_C - y_c)^2 + (z_C - z_c)^2 - (l + d_C)^2 \end{aligned} \quad (13)$$

#6: 수직구동유닛의 위쪽 힌지와 아래쪽 힌지 초기 위치 사이의 거리는 초기 길이에 증폭비를 곱한 변위를 더한 것과 같다.

$$\begin{aligned} f_{16} &= (x_D - x_d)^2 + (y_D - y_d)^2 + (z_D - z_d)^2 - (m + 3d_D)^2 \\ f_{17} &= (x_E - x_e)^2 + (y_E - y_e)^2 + (z_E - z_e)^2 - (m + 3d_E)^2 \\ f_{18} &= (x_F - x_f)^2 + (y_F - y_f)^2 + (z_F - z_f)^2 - (m + 3d_F)^2 \end{aligned} \quad (14)$$

아래의 식(15)에서 $f(x_n)$ 은 구속 조건 식을 나타내는 벡터이며 x_n 은 Fig. 4에 나타난 6개의 힌지의 좌표를 모두 포함하는 벡터이다.

$$x_{n+1} = x_n - \nabla^{-1} f(x_n) \cdot f(x_n), x_n \in \mathbb{R}^{18 \times 1} \quad (15)$$

이와 같은 다변수 뉴턴-랩슨 법을 적용한 정기구학 해석을 통해 구속조건을 만족하는 작업영역을 구할 수 있다.

5. 스테이지 구동 테스트

역기구학 해석을 통해서 PZT 액추에이터의 구동량을 계산한 후 정기구학 해석을 통해 확인한 작업영역 내에서 스테이지의 원운동 궤적 구동 테스트를 실시하였다. 전체적인 H/W 시스템의 구성은 Fig. 5와 같다. H/W 시스템은 스테이지와 제어기, 구동기 앰프, 센서 앰프 등으로 구성되어 있다. 6개의 정전용량 센서를 장착하여 운동을 감지함으로써 페루프 제어를 수행하도록 했고, x-y, y-z, x-z 평면 상에서 각각 50 μm의 반경을 가지고 원운동을 하도록 테스트를 실시하였다.

구동 테스트 결과가 Table 1 및 Fig. 6에 나와 있다. Fig. 6을 보면 명령을 나타내는 검은색 선

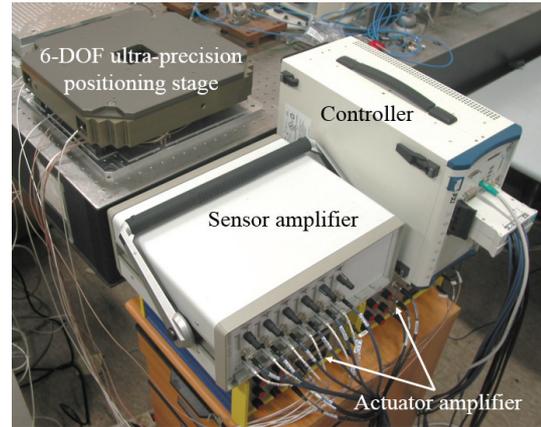


Fig. 5 Configuration of the hardware system

Table 2 RMS errors for the three plane motions of the 6-DOF ultra-precision positioning stage

Plane	Mean radius	RMS error
x-y	50.22 μm	0.11 μm
y-z	50.24 μm	0.13 μm
x-z	50.23 μm	0.13 μm

(Black Line: Reference Trajectory)과 실제로 스테이지가 운동하며 그린 궤적을 나타내는 빨간색 선 (Red Line: Actual Trajectory)이 서로 겹쳐져 있음을 알 수 있다. 3가지 평면상의 운동 모두에서 명령값에 가까운 원을 그리면서 스테이지가 구동되는 것을 확인할 수 있다. 각 그래프 중심에 위치한 그림은 궤적의 일부분을 확대한 그림이다. 스테이지 구동 실험에 대한 오차는 RMS (Root Mean Square) 에러값을 통해 3가지 평면 운동에 대해 Table 2에 나타내었다. 평균값의 오차는 최대 0.48%로 나타났다, 최대 RMS 에러값은 y-z 및 x-z 평면 원운동 시 0.13 μm인 것으로 나타났다.

6. 결론

본 논문에서는 플렉서 힌지 및 병렬 기구 기반의 6-자유도 초정밀 위치 결정 스테이지에 대한 기구학 해석을 수행하였다. 논문의 내용은 다음과 같이 요약될 수 있다.

첫째, 본 초정밀 위치 결정 스테이지는 이중삼각형 형태로 PZT 액추에이터가 배치되어 있으며 각 삼각형은 인플레이션과 아웃오브플레이션 운동을 구현하는 역할을 한다.

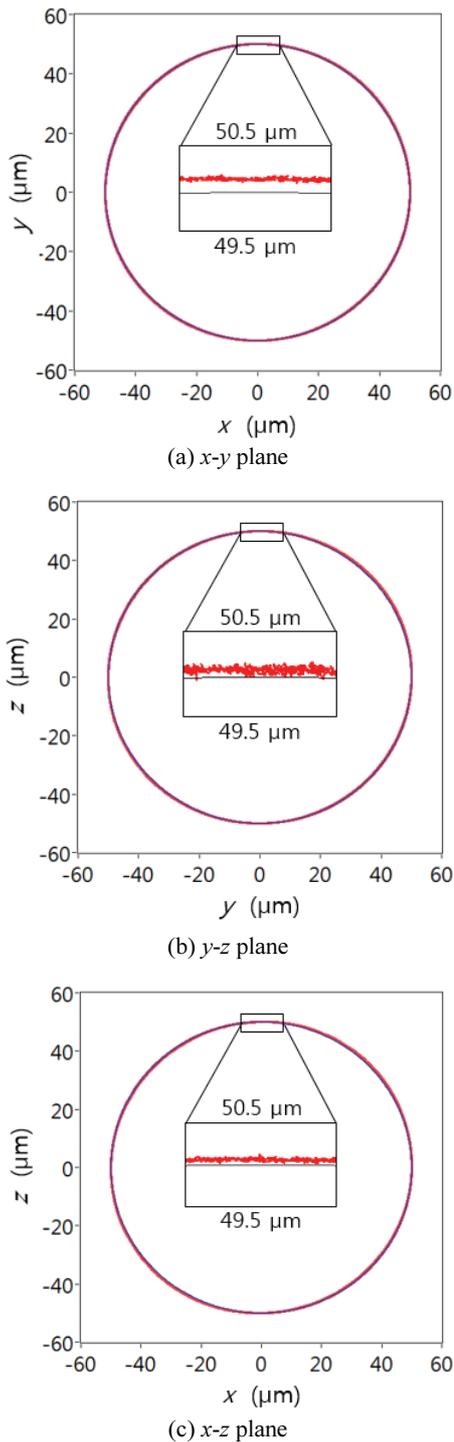


Fig. 6 50 μm-radius circular path actuation tests (black line: reference trajectory, red line: actual trajectory)

둘째, 인플레인 운동과 아웃오브플레인 운동을 구현하기 위한 핵심 구성요소로 수평구동유닛과 수직구동유닛이 있으며, 수직구동유닛의 경우 운동 범위를 증폭하기 위해 레버 힌지를 사용하였다.

셋째, 이러한 구조를 지닌 정밀 위치 결정 기구에 대해 역기구학 및 정기구학 해석을 수행하기 위해 수평구동유닛과 수직구동유닛에 대해 엔드 이펙터와 액추에이터의 변위 간의 관계를 수식화하여 해석을 수행하였다.

넷째, 역기구학 해석의 경우 해석적 방법으로 수식을 도출하였고, 정기구학 해석의 경우 6가지 구속 조건을 정의하여 수치적 방법으로 수식을 도출하였다.

다섯째, 기구학 해석 결과를 적용한 스테이지를 원운동 구동 실험 결과, 3가지 평면 상의 원운동에 대해 평균값 오차는 최대 0.48%, RMS 오차는 최대 0.13 μm로 구동됨을 확인하였다.

후 기

본 논문은 2015년도 동양미래대학교 교내학술 연구과제 연구지원에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

1. Yang, R., Jouaneh, M., and Schweizer, R., "Design and Characterization of a Low-Profile Micropositioning Stage," Precision Engineering, Vol. 18, No. 1, pp. 20-29, 1996.
2. Chang, S. H. and Du, B. C., "A Precision Piezodriven Micropositioner Mechanism with Large Travel Range," Review of Scientific Instruments, Vol. 69, No. 4, pp. 1785-1791, 1998.
3. Yao, Q., Dong, J., and Ferreira, P. M., "Design, Analysis, Fabrication and Testing of a Parallel-Kinematic Micropositioning XY Stage," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 47, No. 6, pp. 946-961, 2007.
4. Chen, M.-Y., Huang, S.-C., Hung, S.-K., and Fu, L.-C., "Design and Implementation of a New Six-DOF Maglev Positioner With a Fluid Bearing," IEEE/ASME Transactions Mechatronics, Vol. 16, No. 3 pp. 449-458, 2011.
5. Kim, H. S., Cho, Y. M., and Moon, J. H., "Active Vibration Control Using a Novel Three-DOF

- Precision Micro-Stage,” *Smart Materials Structures*, Vol. 19, No. 5, 2010.
6. Shin, H., Lee, S., Jeong, J. I., and Kim, J., “Antagonistic Stiffness Optimization of Redundantly Actuated Parallel Manipulators in a Predefined Workspace,” *IEEE/ASME Transactions Mechatronics*, Vol. 18, No. 3, pp. 1161-1169, 2013.
 7. Moon, J.-H., Pahk, H. J., and Lee, B.-G., “Design, Modeling, and Testing of a Novel 6-DOF Micropositioning Stage with Low Profile and Low Parasitic Motion,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 55, No. 1, pp. 163-176, 2011.
 8. Choi, S. B., Han, S. S., and Lee, Y. S., “Fine Motion Control of a Moving Stage Using a Piezoactuator Associated with a Displacement Amplifier,” *Smart Materials and Structures*, Vol. 14, No. 1, pp. 222-230, 2004.
 9. Moon, J.-H., Park, J.-H., and Pahk, H.-J., “Design and Modeling of a 6-DOF Stage for Ultra-Precision Positioning,” *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 26, No. 6, pp. 106-113, 2009.
 10. Shin, H.-P., “Design of a 6-DOF Stage for Precision Positioning and Large Force Generation,” *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 30, No. 1, pp. 105-111, 2013.