

## 초정밀작업을 위한 6자유도 마이크로 스테이지의 개발

김경찬\* · 김수현\*\* · 곽윤근

(1997년 4월 30일 접수)

### Development of a 6 Degrees-of-Freedom Micro Stage for Ultra Precision Positioning

Kyung-Chan Kim, Soo-Hyun Kim and Yoon Keun Kwak

**Key Words :** Micro Manipulator(미소운동 머니플레이터), Precision Positioning(정밀위치 결정), Piezoelectric Elements(압전소자), 6-Degrees-of-Freedom(6-자유도), Parallel Mechanism(병렬메커니즘)

#### Abstract

A new 6 degrees-of-freedom micro stage, based on parallel mechanisms and actuated by using piezoelectric elements, has been developed for the application of micro positioning such as semiconductor manufacturing devices, high precision optical measurement systems, and high accurate machining. The micro stage structure consists of a base platform and an upper platform (stage). The base platform can effectively generates planar motion with yaw motion, while the stage can do vertical motion with roll and pitch motions with respect to the base platform. This separated structure has an advantage of less interference among actuators. The forward and inverse kinematics of the micro stage are discussed. Also, through linearization of kinematic equations about an operating point on the assumption that the configuration of the micro stage remains essentially constant throughout a workspace is performed. To maximize the workspace of the stage relative to fixed frame, an optimal design procedure of geometric parameter is shown. Hardware description and a prototype are presented. The prototype is about 150mm in height and its base platform is approximately 94mm in diameter. The workspace of the prototype is obtained by computer simulation. Kinematic calibration procedure of the micro stage and its results are presented.

#### 1. 서 론

제품의 소형화, 경량화, 첨단화에 대한 요구가 늘어남에 따라 미세한 부위에서의 고정밀도작업에 대한 필요성이 점차 커지고 있다. 반도체 제조장비,

정밀 광학기기, 대용량 자기디스크 등과 같은 첨단 산업제품에서 요구되는 위치 정밀도는 현재 서브 마이크로(sub micron) 단위이며, 2000년대에 이르러서는 1 나노미터(nm) 정도의 정밀도가 필요할 것으로 예상되고 있다.<sup>(1)</sup> 기존의 산업현장에서 널리 쓰이고 있는, DC 모터를 액츄에이터(actuator)로 하는 기구들은 그 분해능의 한계로 인해 정밀한 위치결정이 필요한 곳에는 부적합하다. 또한 DC 모

\*회원, 한국과학기술원 대학원 기계공학과

\*\*회원, 한국과학기술원 기계공학과

터의 회전운동을 직선운동으로 변환하는 리드-스크류(lead screw)에서 발생하는 이력현상(hysteresis), 마찰, 백래쉬(backlash) 등도 무시할 수 없다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 압전소자(piezoelectric element)와 같은, DC 모터를 대체할 수 있는 매우 정밀한 액츄에이터를 이용하는 위치결정 메커니즘(mechanism)에 관한 연구가 활발히 수행되고 있다. Moriyama,<sup>(2)</sup> Lee<sup>(3)</sup> 등은 각각 제한된 평면상의 3자유도 운동과 공간상의 3자유도 운동만을 할 수 있는 메커니즘을 압전소자를 이용하여 구현하였다. Arai 등<sup>(4)</sup>은 공간상에서의 매우 정밀한 6자유도 운동을 구현하기 위하여 기존의 운동 시뮬레이터(motion simulator)에 널리 쓰이고 있는 스투어트 플랫폼(stewart platform) 구조와 압전소자를 이용한 초 정밀 위치결정 메커니즘을 개발한 바 있다. 그러나 이 구조는 각 액츄에이터의 기구학적 간섭현상으로 인해 작업영역이 크지 않다는 단점을 지니고 있다.

따라서 본 연구에서는 6자유도의 운동을 구현하며, 액츄에이터의 간섭을 최소화 한 초정밀 마이크로 스테이지(micro stage)를 개발한다. 마이크로 스테이지는 보다 정밀한 다 자유도 위치결정을 위하여 병렬링크구조(parallel link mechanism)로 되어 있으며, 압전소자를 이용한 액츄에이터는 나노미터의 분해능을 지닌다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 역기구학(inverse kinematics)적인 관계식을 유도하고, 링크의 길이변화량과 스테이지 중심의 위치변화량과의 관계를 구한다. 3장에서는 기하학적 설계 변수를 구하는 방법을 제시하며, 4장에서는 기구학적 보정(kinematic calibration)을 통해 실제 제작된 스테이지의 자코비안을 구한다. 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

## 2. 구조 및 기구학

### 2.1 구조 및 역기구학

마이크로 스테이지의 전체적인 구조는 Fig.1과 같으며, 각각 3자유도를 지니는 스테이지(stage)와 하부 이동평판(base platform)이 결합된 형태이다.

스테이지는 3개의 선형 액츄에이터를 이용하여 하부 이동평판에 대해 3자유도의 공간운동을 한다. 하부 이동평판은 역시 3개의 선형 액츄에이터로 3 자유도의 평면운동을 한다. 하부 이동평판의 좌표

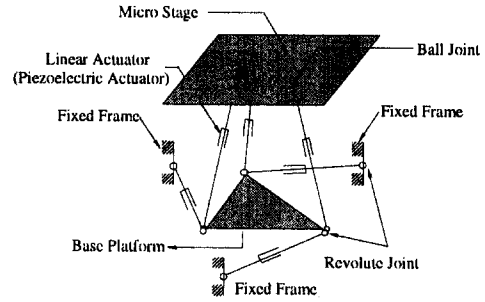


Fig. 1 Kinematic structure of the 6-DOF micro stage.

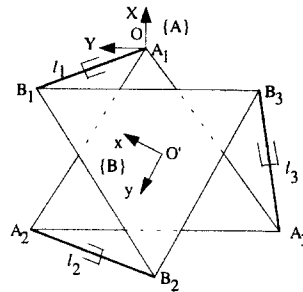


Fig. 2 Coordinate system for the base platform.

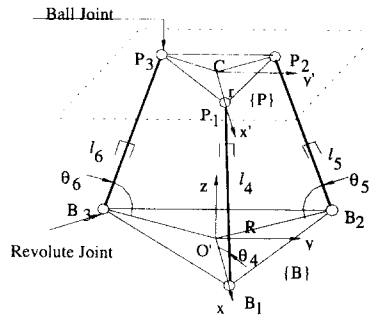


Fig. 3 Coordinate system for the micro stage.

계와 기준좌표계는 Fig.2와 같고, 스테이지의 중심과 하부 이동평판에 고정된 좌표계는 Fig.3과 같다.

{A}는 고정된 기준좌표계를, {B}는 하부 이동평판의 중심에 부착된 좌표계를, {P}는 스테이지의 중심에 고정된 좌표계를 각각 나타낸다. 좌표계 {A}, {B}, {P}의 중심을 각각 O, O', C로 표시하면, {B} 좌표계의 {A} 좌표계에 대한 변환행렬(transformation matrix)  ${}^A T_B$ 는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$${}^A T = \begin{bmatrix} C_\theta & -S_\theta & 0 & m_1 \\ S_\theta & C_\theta & 0 & m_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)에서  $\theta$ 는 {A} 좌표계에 대한 {B} 좌표계의 반시계방향 회전각을 표시하며,  $(m_1, m_2, 0)^T$ 는 {A} 좌표계에 대한 점 O'의 좌표값이다.  $C_\theta, S_\theta$ 는 각각  $\cos \theta, \sin \theta$ 를 의미한다. 하부 이동평판이 고정좌표계에 대해 움직이는 경우, 식 (1)에서 정의한 변환행렬을 이용하면 각 링크의 길이는 벡터  $A_i B_i (i=1, 2, 3)$ 의 크기이므로 하부 이동평판에 대한 역기구학을 아래와 같은 형태로 쓸 수 있다.

$$l_i^2 = (RC_\theta + m_1)^2 + (RS_\theta + m_2)^2$$

$${}^B T = \begin{bmatrix} C_{\delta_3} C_{\delta_2} & C_{\delta_3} S_{\delta_2} S_{\delta_1} - S_{\delta_3} C_{\delta_1} \\ S_{\delta_3} C_{\delta_2} & S_{\delta_3} S_{\delta_2} S_{\delta_1} + C_{\delta_3} C_{\delta_1} \\ -S_{\delta_2} & C_{\delta_2} S_{\delta_1} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

하부 이동평판과 3개의 레벌루트조인트(revolute joint)와 3개의 볼조인트(ball joint)로 연결된 스테이지는 3개의 운동구속조건을 가진다. 그러므로 식 (3)의 미지수는 6개에서 3개로 줄어들게 되고, 스테이지의 역기구학은 입력변수 3개와 출력변수 3개의 일대일 대응을 만족하게 되어 해를 구할 수 있다. 하부 이동평판은 고정된 채 스테이지만 움직이는 경우, 식 (2)와 같은 방법으로 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} l_1^2 &= (ra_1 + x_c - R)^2 + (ra_2 + y_c)^2 + (ra_3 + z_c)^2 \\ l_2^2 &= \left(-\frac{r}{2}a_3 + \frac{\sqrt{3}}{2}r\beta_3 + z_c\right)^2 \\ &\quad + \left(-\frac{r}{2}a_2 + \frac{\sqrt{3}}{2}r\beta_2 + y_c - \frac{\sqrt{3}}{2}R\right)^2 \\ &\quad + \left(-\frac{r}{2}a_1 + \frac{\sqrt{3}}{2}r\beta_1 + x_c + \frac{R}{2}\right)^2 \\ l_3^2 &= \left(-\frac{r}{2}a_3 - \frac{\sqrt{3}}{2}r\beta_3 + z_c\right)^2 \\ &\quad + \left(-\frac{r}{2}a_2 - \frac{\sqrt{3}}{2}r\beta_2 + y_c - \frac{\sqrt{3}}{2}R\right)^2 \\ &\quad + \left(-\frac{r}{2}a_1 - \frac{\sqrt{3}}{2}r\beta_1 + x_c + \frac{R}{2}\right)^2 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,  $r$ 은 스테이지에 고정된 정삼각형  $P_1 P_2 P_3$ 의 외접원의 반지름을 나타내며,  $a_1, a_2, a_3, \beta_1,$

$$\begin{aligned} l_2^2 &= \left(-\frac{R}{2}C_\theta - \frac{\sqrt{3}}{2}RS_\theta + m_1 + \frac{3}{2}R^F\right)^2 \\ &\quad + \left(-\frac{R}{2}S_\theta + \frac{\sqrt{3}}{2}RC_\theta + m_2 - \frac{\sqrt{3}}{2}R^F\right)^2 \\ l_3^2 &= \left(-\frac{R}{2}C_\theta + \frac{\sqrt{3}}{2}RS_\theta + m_1 + \frac{3}{2}R^F\right)^2 \\ &\quad + \left(-\frac{R}{2}S_\theta - \frac{\sqrt{3}}{2}RC_\theta + m_2 + \frac{\sqrt{3}}{2}R^F\right)^2 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $R^F$ 는 기준좌표계 {A}에 고정된 정삼각형  $A_1 A_2 A_3$ 의 외접원의 반지름을,  $R$ 은 하부 이동평판에 고정된 정삼각형  $B_1 B_2 B_3$ 의 외접원의 반지름을 각각 나타낸다. {B} 좌표계에 대한 점 C의 좌표값을  $(x_c, y_c, z_c)$ 로 정의하고, 스테이지의 하부 이동평판에 대한 회전을 XYZ fixed angle( $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ )을 이용하여 나타내면,  ${}^B T$ 는 아래와 같다.

$${}^B T = \begin{bmatrix} C_{\delta_3} S_{\delta_2} C_{\delta_1} + S_{\delta_3} S_{\delta_1} & x_c \\ S_{\delta_3} S_{\delta_2} C_{\delta_1} - C_{\delta_3} S_{\delta_1} & y_c \\ C_{\delta_2} C_{\delta_1} & z_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$\beta_2, \beta_3, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ 는  ${}^B T$ 의 원소로서 식 (3)에 의해 정의되며 아래와 같다.

$${}^B T = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 & x_c \\ \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 & y_c \\ \alpha_3 & \beta_3 & \gamma_3 & z_c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

## 2.2 마이크로 스테이지 자코비안

초정밀 위치제어를 위해 압전소자를 액츄에이터로 이용할 경우, 전체 구조는 수십 마이크로미터( $\mu\text{m}$ ) 이하의 미소운동을 하게 된다. 링크의 전체 길이에 대해 늘어난 변위량은 매우 적으므로 기구학적 관계식을 테일러급수(Taylor series)로 전개하면 링크길이의 변화량과 스테이지 중심의 위치변화량과의 함수관계를 구할 수 있다. 병렬링크구조를 가지는 기구에서 자코비안  $\mathbf{J}^{-1}$ 의 정의는 아래와 같다.<sup>(5)</sup>

$$\Delta \mathbf{W} = \mathbf{J}^{-1} \Delta \mathbf{L} \quad (5)$$

여기서,  $6 \times 1$  벡터  $\Delta \mathbf{W}$ 는 스테이지 중심의 고정좌표계에 대한 위치와 방위의 변화량을 나타내며,  $6 \times 1$  벡터  $\Delta \mathbf{L}$ 는 각 링크의 길이의 변화량을 각각 나타낸다. 스테이지의 {A} 좌표계에 대한 회전을

XYZ fixed angle ( $\eta_1, \eta_2, \eta_3$ )을 이용하여 정의한다. 이 경우, 하부 이동평판은 Z축 방향으로  $\theta$ 의 회전운동만 하므로 ( $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ )과 ( $\eta_1, \eta_2, \eta_3$ )의 관계는 다음과 같다.

$$\eta_1 = \delta_1, \quad \eta_2 = \delta_2, \quad \eta_3 = \delta_3 + \theta \quad (6)$$

또한, 고정좌표계에 대한 {P} 좌표계 중심의 좌표를 [X Y Z]<sup>T</sup>라 하고, 스테이지 중심 E의 {P} 좌표계에서의 좌표를 [0 0 0]<sup>T</sup>이라 정의하면, E의 {A}에 관한 좌표값은 아래와 같이 표현된다.

$${}^A E = {}_8^A T {}_7^P T {}^P E$$

$$J^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{R-2R^E}{3l_{10}} & \frac{R^F-2R}{3l_{10}} & \frac{R+R^F}{3l_{10}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\sqrt{3}R}{3l_{10}} & \frac{\sqrt{3}R}{3l_{10}} & \frac{\sqrt{3}R}{3l_{10}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{3 \sin \theta_6} & \frac{1}{3 \sin \theta_6} & \frac{1}{3 \sin \theta_6} \\ \frac{2\sqrt{3}l_{10}}{9RR^F} & \frac{2\sqrt{3}l_{10}}{9RR^F} & \frac{2\sqrt{3}l_{10}}{9RR^F} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-2}{3r \sin \theta_6} & \frac{1}{3r \sin \theta_6} & \frac{1}{3r \sin \theta_6} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{3}r \sin \theta_6} & \frac{-1}{\sqrt{3}r \sin \theta_6} \end{bmatrix}$$

여기서,  $\theta_4, \theta_5, \theta_6$ 는 Fig. 3에 나타난 것과 같이 각각 링크 4, 5, 6이 하부 이동평판과 이루는 각이며,  $\theta_4, \theta_5, \theta_6$ 가 모두 동일한 값일 때 그 값을  $\theta_0$ 라 정의한다. 자코비안행렬을 살펴보면 스테이지의 중심은 링크 1, 2, 3에 의해 절대좌표 X, Y 방향의 병진운동과 Z방향의 회전운동을 하며, 링크 4, 5, 6에 의해 Z방향의 병진운동과 롤(roll), 피치(pitch)운동을 함을 알 수 있다.

### 3. 기구학적 최적설계

일반적으로 병렬링크구조에서 기하학적 설계 변수들(geometric design parameters)의 값과 전체 운동영역의 크기는 서로 밀접한 관계가 있다. 즉, 동일한 변위량을 지니는 액추에이터를 이용하더라도 기하학적 설계변수의 값에 따라 전체 구조의 운동영역은 많은 차이를 보이게 된다.<sup>(5)</sup> 따라서 스테이지의 운동영역의 크기를 최대로 하는 기하학적

$$= \begin{bmatrix} C_{\theta}x_c - S_{\theta}y_c + m_1 \\ S_{\theta}x_c + C_{\theta}y_c + m_2 \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (7)$$

벡터 W와 L을 각각  $W=[X \ Y \ Z \ \eta_1 \ \eta_2 \ \eta_3]^T$ ,  $L=[l_1 \ l_2 \ l_3 \ l_4, \ l_5 \ l_6]^T$ 라 하고 스테이지의 초기위치를 아래와 같다고 가정한 뒤 식 (2), 식 (4)를 테일러급수로 전개하여 식 (5)의 형태로 정리하면 다음과 같은 자코비안을 구할 수 있다.

Nominal position :

$$l_1 = l_2 = l_3 = l_{10}$$

$$\theta = 60^\circ, \quad (m_1, m_2) = (-R^F, 0)$$

$$\theta_4 = \theta_5 = \theta_6 = \theta_0$$

$$l_4 = l_5 = l_6 = l_{20}$$

설계변수들을 주어진 제한조건 내에서 결정하는 것이 필요하다. 최적화 문제의 정의는 다음과 같다.

“주어진 제한조건을 만족하면서 목적함수 M의 값이 최소가 되게 하는 기하학적 설계변수의 집합 S를 결정한다.”

마이크로 스테이지의 고정좌표계 X, Y, Z 방향으로의 최대 변위변화량을 각각  $\Delta X_{max}$ ,  $\Delta Y_{max}$ ,  $\Delta Z_{max}$ 라 하고 목적함수(objective function) M을 다음과 같이 정의한다.

$$M = \Delta X_{max} \cdot \Delta Y_{max} \cdot \Delta Z_{max} \quad (8)$$

2장에서 유도한 자코비안을 이용하여 임의의 설계변수들의 값에 따른 목적함수 M의 값을 수치해석법으로 계산할 수 있다. 자코비안에서 운동영역을 결정하는 변수들의 집합은 6개의 원소, 즉 { $R^F \ R \ r \ l_{10} \ l_{20} \ z_{c0}$ }로 이루어져 있다. 여기서  $l_{10}$ 는 링크 1, 2, 3의 초기길이를,  $l_{20}$ 는 링크 4, 5, 6의 초

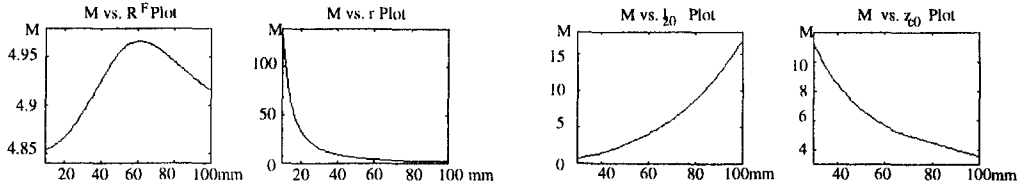


Fig. 4 Sensitivity analysis of the gemoetric design variables.

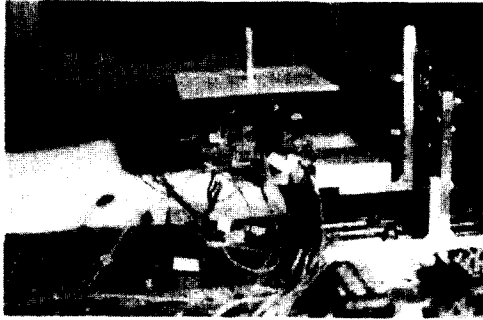


Fig. 5 Prototype of 6-DOF micro stage

기길이를,  $z_{c0}$ 는 스테이지의 하부 이동평면에 대한 높이를 나타낸다. 그러나 초기위치에 대해 하부 이동평판과 스테이지는 각각 다음과 같은 2개의 기하학적 구속조건을 만족해야 한다.

$$\begin{aligned} l_{10}^2 &= (R^F)^2 + R^2 - RR^F \\ l_{20}^2 &= z_{c0}^2 + (R-r)^2 \end{aligned} \quad (9)$$

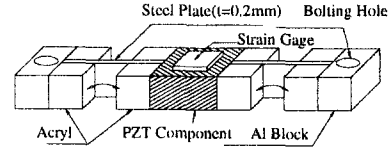
그러므로  $M$ 을 구성하는 독립변수들로 이루어진 집합  $S$ 는 아래와 같이 4개의 요소로 간략화 된다.

$$S = \{ R^F, r, l_{20}, z_{c0} \} \quad (10)$$

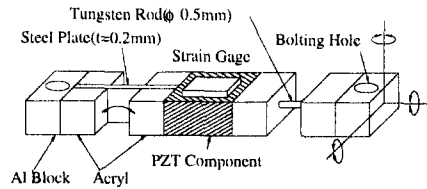
마지막으로 마이크로 스테이지의 특이점(singularity)<sup>(6)</sup>을 피하기 위해 설계변수들이 아래와 같은 제한조건을 가지도록 한다.

$$\begin{aligned} r < R, \quad |R^F - R| \leq 60, \\ 0.1 \leq \frac{z_{c0}}{l_{20}} = \sin \theta_0 \leq 0.9 \end{aligned} \quad (11)$$

본 연구에서 수행하고자 하는 최적화 문제에 있어 ‘제한조건’은 식 (9)와 식 (11)로 설정한다. Fig. 4는 4개의 원소로 이루어진 집합에서 나머지 3개의 변수는 고정시킨 채 1개의 변수만을 변화시키는 경우 목적함수  $M$ 의 변화를 나타내고 있다. 이때 각 기하학적 설계변수들은 각각  $10 \leq R^F \leq 100$ ,  $10 \leq r \leq 100$ ,  $30 \leq l_{20} \leq 100$ ,  $30 \leq z_{c0} \leq 100$ 의 범위를 가진다고 가정한다.



(a) Design of revolute joint



(b) Design of ball joint

Fig. 6 Link design of the micro stage.

Fig. 4의 결과에서  $R^F$ 변화에 따라 목적함수는 포물선형태를 가지고 변화하는 것을 볼 수 있으며  $R^F$ 가 60 mm 정도일 때 최대값을 가진다.  $R$ 과  $z_{c0}$ 는 작은수록 목적함수의 값이 증가함을 알 수 있으나,  $R$ 의 값의 변화에 따라 목적함수의 변화는 좀더 급격함을 알 수 있다. 본 연구에서 수행하고자 하는 최적화 문제는 매우 강한 비선형 제한조건을 지니고 있으며, 목적함수 또한 비선형성을 지니고 있다. 이러한 비선형성 문제를 풀기 위해 최적화의 알고리즘(algorithm)으로 Method of Feasible Direction<sup>(7)</sup>을 사용한다. 이 방법은 설계 변수들로 이루어진 임의 차원의 공간에서 목적함수의 값을 최소로 하는 점을 찾아가기 위해 매 최적화 스텝마다 feasible point를 개선된 feasible point로 옮겨가는 비선형 최적화 기법이다. 최적화의 결과는 다음과 같다.

$R^F$	$R$	$r$	$l_{10}$	$l_{20}$	$z_{c0}$
48.00	105.2	10.00	91.30	100.0	30.00

결과를 살펴보면 하부 구조에서 정삼각형  $A_1A_2A_3$ 의 외접원의 반지름보다 정삼각형  $B_1B_2B_3$ 의 외접원의 반지름이 더 클 때 운동영역이 최대로 된다는 사실을 알 수 있다. 또한 운동영역을 크게 하기 위

해서는 스테이지 상의 정삼각형  $P_1P_2P_3$ 의 외접원의 반지름을 최대한 작게 해야 한다는 사실을 알 수 있다. 스테이지와 하부 이동평판을 연결하는 세 개의 링크의 길이는 스테이지의 높이보다 클때 운동영역이 역시 최대가 됨을 알 수 있다.

기구학적 최적설계를 바탕으로 만들어진 시작품(prototype)은 Fig. 5와 같다.

마이크로 스테이지의 조인트는 압전소자의 변위 발생시 다른 압전소자에 과중한 전단력을 가하지 않고, 압전소자의 변위발생에 가해지는 구속을 줄이는 역할을 하여야 한다. 또한 정밀한 위치결정을 위해 이력현상과 백래쉬가 없어야 한다. 이러한 조건을 만족시키는 조인트로는 탄성관절<sup>(8)</sup>이 있다. 본 연구에서는 탄성관절의 구조를 응용하여 조인트 역할을 할 수 있는 새로운 구조를 제안한다. Fig. 6은 1자유도를 지니는 레벌루트조인트(revolute joint) 역할을 하는 구조와 3자유도를 지니는 볼조인트(ball joint) 역할을 하는 구조를 나타낸다. 본 연구에서 제작한 스테이지의 액츄에이터인 압전소자의 이력현상을 보정하기 위하여 PI 보상기를 이용한다.

#### 4. 기구학적 보정

2장에서 살펴본 바와 같이 마이크로 스테이지의 정확한 위치, 방위의 변화량은 각 축의 길이변화량과 자코비안행렬을 통해 구할 수 있다. 그러나 부품의 기계가공시에 생기는 오차, 조립시 발생하는 오차 등으로 인해 자코비안행렬은 계산값과 실제값에 있어서 많은 차이를 보이게 된다. 따라서 본 연구에서는 정확한 자코비안행렬을 기구학적 보정을 통해 구해냄으로써 마이크로 스테이지 중심의 고정좌표계에 대한 위치와 방위의 변화량을 얻고자 한다. 2장에서 구한 마이크로 스테이지의 자코비안행렬은 아래와 같이 링크 1, 2, 3의 길이 변화와 관련되는  $3 \times 3$ 행렬  $J_B^{-1}$ 와, 링크 4, 5, 6의 길이

변화와 관련되는  $3 \times 3$ 행렬  $J_S^{-1}$ 로 정리하여 쓸 수 있다.

$$J^{-1} = \begin{bmatrix} J_B^{-1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & J_S^{-1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서, 행렬  $\mathbf{0}$ 는  $3 \times 3$  영행렬을 의미한다. 링크 4, 5, 6은 구동하지 않은 채 링크 1, 2, 3만 구동하면  $J_B^{-1}$ 행렬을 얻을 수 있다.  $J_B^{-1}$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta \eta_1 \end{bmatrix} = J_B^{-1} \begin{bmatrix} \Delta l_1 \\ \Delta l_2 \\ \Delta l_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta l_1 \\ \Delta l_2 \\ \Delta l_3 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\Delta \eta_1 = \Delta \theta$$

여기서,  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta \eta_1$ 는 스테이지의 고정좌표계에 대한  $X$ ,  $Y$ ,  $\eta_1$ 방향으로의 좌표값의 변화를 나타내며,  $\Delta \theta$ 는 하부 이동평판의 고정좌표계에 대한  $\theta$ 방향으로의 좌표값의 변화를 나타낸다. 또한  $\Delta l_1$ ,  $\Delta l_2$ ,  $\Delta l_3$ 는 각각 링크 1, 2, 3의 길이변화량을 의미한다. 스테이지는 미소운동을 하므로  $a_{ij}$  ( $i, j=1, 2, 3$ )를 상수라 가정할 수 있다. 하부 이동평판을 이루는 나머지 2개의 링크는 고정시킨 채 한개의 링크만 구동할 때  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta \theta$ 를 측정하면 상수  $a_{ij}$ 를 구할 수 있다.

Fig. 7은  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta \theta$ 를 측정하는 방법을 나타낸다.

스테이지의 중심  $C_1$ 이 링크 1, 2, 3의 운동에 의해  $C_2$ 로 이동할 경우 스테이지 상의 임의의 두 점

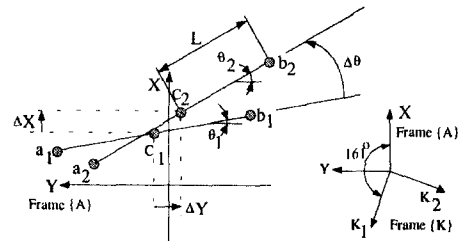


Fig. 7 Schematic sketch of calibration system for the base platform.

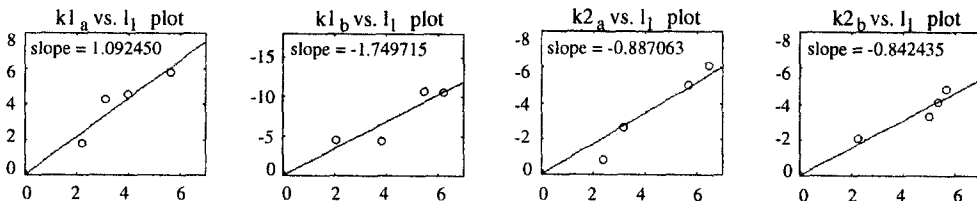


Fig. 8 Relation between stage position and link length, link 1 (unit :  $\mu\text{m}$ ).

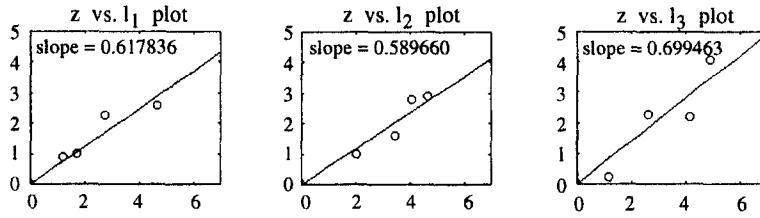


Fig. 9 Relation between stage position link length, Link 4, 5, 6 (unit :  $\mu\text{m}$ ).

$a_1, b_1$ 은  $a_2, b_2$ 로 각각 이동하게 된다. 점  $a_1, b_1$ 은 스테이지의 중심 C1에서 동일한 길이 L만큼 떨어져 있다. 본 연구에서는 스테이지 상의 두 점에 대하여 K1, K2 방향으로의 위치변화량을 Keyence사의 10 nm 위치 분해능을 가지는 레이저 변위 측정기 (laser displacement meter)를 이용하여 측정한다. Fig. 8은 링크 1만 운동하는 경우 하부 이동평판의 고정좌표계에 대한 위치변화량과 링크 길이변화와의 관계를 보여 준다. 링크 2와 3만 운동하는 경우에 대해서도 각각 Fig. 8과 유사한 결과를 얻을 수 있으며, 단위는  $\mu\text{m}$ 이다.

실험적으로 구해진 하부 이동평판의 운동에 의한 자코비안행렬  $J_B^{-1}$ 는 아래와 같다.

$$J_B^{-1} = \begin{bmatrix} -0.71 & -0.20 & -0.92 \\ 0.60 & -1.30 & 0.42 \\ 7.7 \times 10^{-4} & 5.7 \times 10^{-4} & 7.3 \times 10^{-4} \end{bmatrix}$$

링크 1, 2, 3은 고정시킨 채 링크 4, 5, 6을 구동하면 스테이지의 위치변화를 나타내는  $3 \times 3$ 행렬  $J_S^{-1}$ 를 구할 수 있으며,  $J_B^{-1}$ 에서와 같이  $J_S^{-1}$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{bmatrix} \Delta Z \\ \Delta \eta_2 \\ \Delta \eta_3 \end{bmatrix} = J_S^{-1} \begin{bmatrix} \Delta l_4 \\ \Delta l_5 \\ \Delta l_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta l_4 \\ \Delta l_5 \\ \Delta l_6 \end{bmatrix} \quad (15)$$

여기서,  $\Delta Z$ ,  $\Delta \eta_2$ ,  $\Delta \eta_3$ 은 각각 스테이지의 기준좌표계에 대한 Z,  $\eta_2$ ,  $\eta_3$  방향으로의 좌표값의 변화를 의미하며,  $\Delta l_4$ ,  $\Delta l_5$ ,  $\Delta l_6$ 는 각각 링크 4, 5, 6의 길이변화량을 나타낸다.  $b_{ij}$  ( $i, j=1, 2, 3$ )를 상수라 가정하고, 나머지 두개의 링크는 고정시킨 채 하나의 링크만 구동하여 위치와 방위의 변화량을 측정하면 행렬  $J_S^{-1}$ 를 구할 수 있다. Fig. 9는 링크 4, 5, 6이 움직이는 경우 스테이지 중심의 고정좌표계에 대한 위치변화량과 링크 길이변화량과의 관계를 보여준다.

실험적으로 구한 상수  $b_{11}$ ,  $b_{12}$ ,  $b_{13}$ 의 값은 아래

와 같다.

$$b_{11}=0.62, \quad b_{12}=0.59, \quad b_{13}=0.70$$

식 (14)와 식 (15)를 이용하면 링크길이의 변화량과 스테이지의 기준좌표계에 대한 3방향의 병진 운동량의 관계를 구할 수 있다. 또한 기준좌표계의 방향으로의 회전량의 변화도 구할 수 있다. 실험적으로 구한 상수들의 값은 아래와 같다.

$$b_{21}=-4.2 \times 10^{-5}, \quad b_{22}=2.9 \times 10^{-5}, \quad b_{23}=2.4 \times 10^{-5} \\ b_{31}=1.6 \times 10^{-6}, \quad b_{32}=4.8 \times 10^{-5}, \quad b_{33}=-5.7 \times 10^{-5}$$

## 6. 결 론

본 연구에서는 반도체 제조장비, 광학기기, 초정밀 기계가공 등에 응용할 수 있는 6개의 적층형 압전 소자를 이용한, 병렬링크구조를 지니는 6자유도 위치결정 마이크로 스테이지를 설계, 제작하였다. 마이크로 스테이지의 구조에 대해 역기구학의 해를 구하였다. 마이크로 스테이지가 미소운동을 한다는 조건하에서 자코비안을 유도하였다. 스테이지는 하부 이동평판을 이루는 링크 1, 2, 3에 의해서 고정좌표계에 대한 X, Y방향으로의 위치변화와 Z방향으로의 방위변화만을 가졌다. 또한 링크 4, 5, 6에 의해서는 Z방향으로의 위치 변화와 나머지 2방향의 회전자유도만 가진다는 것을 알 수 있었다. 최적화 과정을 통해 주어진 제한조건 내에서 운동영역을 최대로 할 수 있는 기하학적 설계변수들을 구하였으며, 이를 기초로 마이크로 스테이지를 제작하였다. 입력링크의 위치 정밀도는  $1 \mu\text{m}$ 이며, 상승시간은 1.8 ms를 구현할 수 있었다. 10 nm의 정밀도를 가지는 레이저 변위 측정장치를 이용, 3방향의 이동자유도와 1방향의 회전 자유도에 관해 자코비안 행렬의 기구학적 보정을 행하였다. 실험결과들은 선형적인 관계를 보임을 알 수 있었다.

## 참고문헌

- (1) Taniguchi, N., 1990, "Construction and Idea of Nanotechnology," *International Journal of Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 56, No. 3, pp. 427~431.
- (2) Moriyama, S., Hanada, T. and Takanashi, A., 1988, "Precision X-Y Stage with a Piezo-driven Fine-Table," *Bulletin of Japan Society of Precision Engineering*, No. 1, pp. 13~17.
- (3) Lee, K. M. and Shah, D. K., 1988, "Kinematic Analysis of a Three-Degrees-of-Freedom In-Parallel Actuated Manipulator," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. 4, No. 3, pp. 354~360.
- (4) Arai, T. and Stoughton, R., 1992, "Micro Hand Module Using Parallel Link Mechanism," Proc. of the Japan U. S. A Symposium on Flexible Automation, pp. 163~168.
- (5) Stoughton, R. and Arai, T., 1992, "Kinematic Optimization of a Chopsticks-Type Micromanipulator," Proc. of the Japan U. S. A. Symposium on Flexible Automation, pp. 151~157.
- (6) Gosselin, C. and Angeles, J., 1990, "Singularity Analysis of Closed-Loop Kinematic Chains," *IEEE Transc. on Robotics and Automation*, Vol. 6, pp. 281~290.
- (7) Vanderplaats, G. N., 1984, *Numerical Optimization Techniques for Engineering Design: With Applications*, McGraw-Hill.
- (8) Paros, J. M. and Weisbord, L., 1965, "How to Design Flexure Hinges," *Machine Design*, Vol. 27, pp. 151~156.