

H_∞ norm 을 이용한 6 자유도 정밀스테이지의 모델기반 제어기 설계

Design of a Model-based Controller for a 6-DOF Precision Positioning Stage using H_∞ norm

문준희^{1,✉}, 이봉구²
Jun-Hee Moon^{1,✉} and Bong-Gu Lee²

¹ 대림대학 메카트로닉스과 (Dept. of Mechatronics, Daelim University College)

² 대림대학 기계과 (Dept. of Mechanical Engineering, Daelim University College)

✉ Corresponding author: jhmoon@daelim.ac.kr, Tel: 031-467-4687

Manuscript received: 2010.8.2 / Accepted: 2010.11.10

We developed a model-based controller for 6-DOF micropositioning of a precision stage using H_∞ norm. For the design, a state-space system of the mathematical model of the stage is derived. In developing the controller, weighting functions are effectively designed in consideration of upper bounds of the sensitivity of the control loop and control input. Step responses in open and closed loop control are provided to verify the micropositioning performance of the stage. By applying the developed controller we prove that the inverse of the weighting function forms the upper bound of the control loop. It is also found that the controller makes the same sensitivity shape with all the DOFs due to the use of H_∞ norm. The developed controller is expected to be applied successfully for industrial use.

Key Words: Precision Stage (정밀 스테이지), Micropositioning (마이크로 위치이송), 6-DOF (6 자유도), H_∞ norm (H_∞ 노름), Weighting Functions (가중 함수), Model-based Controller (모델기반 제어기)

1. 서론

반도체, 바이오, 디스플레이 산업 등의 발달로 초정밀 위치제어의 필요성은 지속적으로 증가하고 있다.^{1,2} 예를 들어 마이크로 위치결정 스테이지는 반도체와 TFT-LCD 를 위한 리소그래피에서 핵심적인 장비로서의 역할을 해 왔으며³ 원자현미경 (AFM)과 주사현미경 (SPM)의 탐침이나 대상물의 이송에도 핵심적인 역할을 하고 있고⁴ 그 외에 세포 생물학이나 의학 분야에서도 활발히 이용되고 있다.⁵

초정밀 위치이송 장치가 사용되는 대표적인 장

비로는 옵티컬 얼라이너, 스캐너, 전자현미경 스테이지 등이 있다. 이러한 장치들은 대부분 2~3 자유도를 가지고 위치제어를 하고 있는데,⁶ 정밀 산업의 발전은 더욱 높은 자유도의 정밀 위치제어 장치의 개발을 요구하고 있다.

기존에 개발된 6 자유도 스테이지들은 다음과 같다. Kuo 등⁷ 은 자기력을 이용하여 스테이지의 일부를 스테이지의 기초와 분리함으로 6 자유도 스테이지의 복잡한 기구부를 생략하였다. 또한, Dejima 등⁸ 은 공기 베어링을 사용하여 스테이지를 띄움으로 기구부를 단순화하여 제어하였다. 하지만, 이러한 방법은 필연적으로 스테이지의 강성을

크게 낮추어 진동 교란에 상당히 취약하게 만든다. Gao 등⁹은 6 자유도 스테이지를 설계함에 있어서 지면에 평행한 운동은 병렬 기구로 설계하고 거기에 직렬 구조를 세워 지면에 수직인 운동을 구현하도록 하였다. 이러한 방법은 제작이 쉬우나 방향에 따라 강성이 다른 성질을 갖게 하는 단점이 있다. Portman 등¹⁰은 헥사포드 스테이지를 개발하여 6 자유도 운동을 제어하였다. 이러한 방법은 스테이지의 강성을 높이고 비교적 쉽게 제작할 수 있는 장점을 가지지만 구동기와 센서의 방향이 직교하지 않으므로 반복 정밀도가 좋지 않은 단점을 가지고 있으며 오차가 발생하였을 때 어떠한 요인으로 오차가 발생하였는지의 규명과 그에 따른 보정이 곤란해진다. Chen 등¹¹은 창의적인 설계를 통해 나노미터 수준까지 위치결정이 가능한 스테이지를 제작하고 제어하였으나 크기와 구동할 수 있는 힘이 작아서 실질적인 산업현장에서 이송의 목적으로 사용하기에는 곤란하다. 다자유도 정밀 위치 이송장치의 강인제어는 Kim 등¹²에 의해 연구가 되었으며 본 연구는 스테이지의 자유도를 높여서 적용한 후속연구로서 진행되었다.

본 연구에서의 초정밀 위치 이송장치는 금속 재질의 기구부를 사용하므로 본질적으로 낮은 감쇠로 인한 진동에서 자유로울 수 없다. 또한 제어의 측면에서 보면 이는 시스템의 극점이 허수축에 가깝다는 것을 의미하여 시스템의 모델을 고려하지 않은 피드백 제어를 적용할 경우 제어 이득의 증가에 따른 시스템의 불안정에 직면하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 본 연구에서는 시스템의 모델에 기초한 제어를 설계하고자 한다.

2. 초정밀 6 자유도 스테이지의 구조

2.1 전체 시스템의 구조

개발된 초정밀 위치제어 장치는 구동부, 제어부, 센서부, 스테이지로 구성되어 있는 병렬 기구 구조¹³이다. 구동부는 압전소자(Piezomechanik, PSt 500/10/25 VS18)와 전후의 플렉서 부분으로, 센서부는 정전용량형 간격센서(Lion Precision, C7 type gap sensor)와 고정 치구로 구성하였다. 신호처리는 dSpace DS-1103에 의해 수행하였다.

개발된 스테이지의 분해도는 Fig. 1 과 같으며, 수평방향의 구동부와 수직방향의 구동부는 각각 상부의 조립체(assembly)와 하부의 판에 양끝이 닿아 있다. 상부의 조립체인 상판의 질량과 회전관

성 모멘트는 다음과 같다: $m=12.86$ kg, $I_{xx}=0.086$ kg m², $I_{yy}=0.091$ kg m², $I_{zz}=0.166$ kg m².

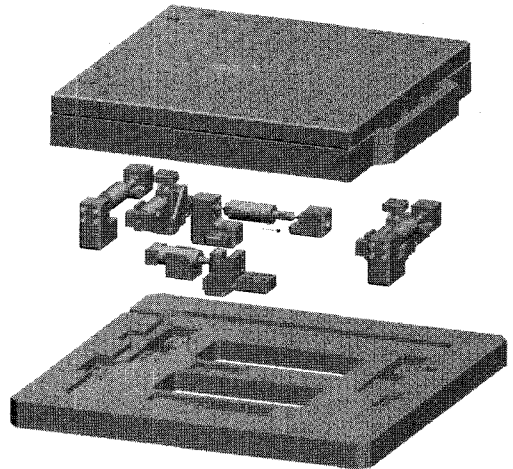


Fig. 1 Exploded view of the proposed 6-DOF micropositioning stage

상판에 작동되는 힘의 작용점과 센서의 위치를 Fig. 2 에 도시하였다. A₁, A₂, A₃는 각각 수평구동기와 상판과의 접촉점이고 화살표는 방향을 의미하며, A₄, A₅, A₆는 수직구동기와 상판과의 접촉점으로 지면에 수직인 방향으로 움직인다. 또한, S₁~S₆는 스테이지의 움직임을 측정할 센서의 위치를 표시한 것이다. 제작된 스테이지의 주요 치수는 다음과 같다: L₁=115 mm, L₂=144 mm, L₃=52 mm, L₄=104 mm, P₁=65 mm, P₂=P₃=280 mm.

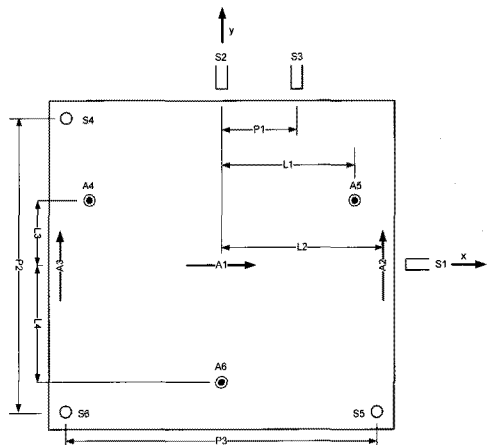


Fig. 2 Positions and directions of contact points of actuation modules and sensors

2.2 구동기의 구조

구동기로는 PZT 스택을 선택하였다. 전기모터나 유압 액추에이터와 같은 전통적인 구동기와 비교할 때, 압전소자는 높은 에너지 변환 효율과 이론적으로는 무한소의 분해능, 작은 부피등의 장점으로 인해 마이크로/나노 미터 수준의 정밀 이송에 훨씬 유리하다. 그 중에서도 PZT 는 높은 강성과 빠른 응답 속도와 같은 탁월한 기계적인 성능을 가지고 있다. 이러한 이유로 PZT 스택이 초정밀 스테이지를 위한 구동기로 선택되었다.

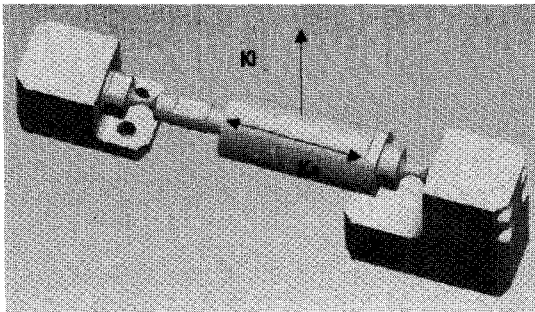


Fig. 3 Horizontal actuation module

플렉서 힌지는 높은 반복정밀도를 가지며 백래시, 스틱-슬립, 마모 없이 힘과 변위를 전달함으로써 정밀 기구부에서 선호되고 있다. 또한, 마찰로 인한 부산물(debris)을 발생시키지 않고 윤활제를 필요로 하지 않으므로 클린룸에도 문제없이 사용될 수 있다. 따라서 본 연구에서 개발되는 초정밀 스테이지의 구동기의 기구적인 연결부위는 플렉서 힌지를 사용하였다.

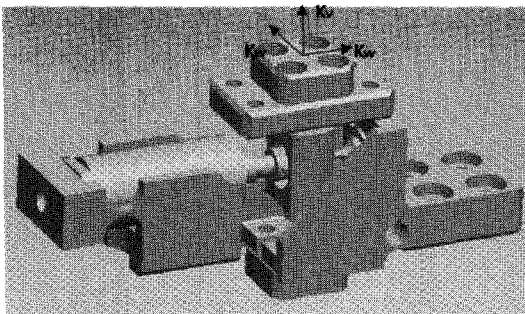


Fig. 4 Vertical actuation module

개발된 정밀 스테이지의 분해도인 Fig. 1 의 가운데에 나타나 있는 수평구동기와 수직 구동기는 각각 Fig. 3 과 Fig. 4 에 표시하였다. 수평구동기에

서 Fig. 3 에서 보이는 좌측 부분은 상판에 고정되고, 우측 부분은 하판에 고정되며, 중간의 PZT 구동기는 변위를 발생시킨다. 이와 같이 약간의 편심을 가지고 하판에 대해 상판의 상대변위를 발생시키는 역할을 한다.

수직 구동기는 세 부분으로 구성되어 있다. 수평방향과 수직방향으로 밀어주는 부분들과 그 둘 사이에서 방향을 직각으로 틀어주는 레버 링크지 부분이다. 레버 링크지는 Fig. 4 와 같이 단축 플렉서 힌지와 다축 플렉서 힌지를 사용하여 수평방향 움직임을 수직 방향 움직임으로 바꿔주는 기구로서, 본 연구에서 수직방향 구동부로 개발되었다. 수직 구동기를 통해 스테이지의 높이를 낮춤으로 수평방향으로 고강성의 시스템을 구현하였다.

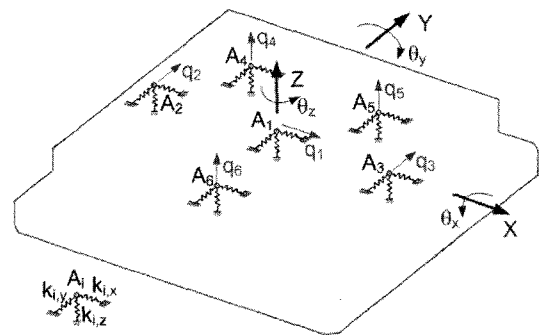


Fig. 5 Schematic of the precision stage

3. 초정밀 스테이지의 동역학적인 모델링

정밀 스테이지의 동역학은 스테이지에 의해 움직이는 상판의 관성과 그것을 지지하고 구동하는 구동부의 강성과 감쇠로 기술될 수 있다. 다음의 Fig. 5 에서는 Fig. 2 에서 도시한, 상판을 지지하는 구동부의 끝부분에서의 강성을 나타내고 있다. 여기서 q_i 는 지지점 A_i 의 변위이며, 각 스프링은 감쇠를 포함한 강성을 의미한다.

각 구동부는 축방향과 횡방향의 강성을 모두 가지지만, 구동기의 진후에 플렉서 힌지를 부착하여 횡방향의 강성을 최소화하였으므로 모델링에서는 횡방향의 강성을 무시할 수 있다고 가정한다. 따라서, 다음과 같은 관계식이 성립한다. (Fig. 3 과 Fig. 4 참조): $k_1/k_o \approx 0$, $k_w/k_v \approx 0$. 따라서 각 구동기의 강성은 축방향으로만 표시할 수 있게 되어, A_1 구동기의 강성은 k_x , A_2 와 A_3 구동기의 강성은 k_y , $A_4 \sim A_6$ 구동기의 강성은 k_z 로 표현하고 그 의

의 방향의 강성은 무시한다. 또한, 스테이지의 상판이 대칭구조로 설계되었기 때문에 회전관성 모멘트는 대각성분만 고려한다. 그 결과로 정밀 스테이지의 동역학적 관계식의 표현은 다음과 같다.

$$m\ddot{x} = -c_x \dot{q}_1 + k_x (u_1 - q_1) \quad (1)$$

$$m\ddot{y} = -c_y \dot{q}_2 + k_y (u_2 - q_2) - c_y \dot{q}_3 + k_y (u_3 - q_3) \quad (2)$$

$$m\ddot{z} = -c_z \dot{q}_4 + k_z (u_4 - q_4) - c_z \dot{q}_5 + k_z (u_5 - q_5) - c_z \dot{q}_6 + k_z (u_6 - q_6) \quad (3)$$

$$I_{xx} \ddot{\theta}_x = -L_3 c_z \dot{q}_4 + L_3 k_z (u_4 - q_4) - L_3 c_z \dot{q}_5 + L_3 k_z (u_5 - q_5) + L_4 c_z \dot{q}_6 - L_4 k_z (u_6 - q_6) \quad (4)$$

$$I_{yy} \ddot{\theta}_y = -L_1 c_z \dot{q}_4 + L_1 k_z (u_4 - q_4) + L_1 c_z \dot{q}_5 - L_1 k_z (u_5 - q_5) \quad (5)$$

$$I_{zz} \ddot{\theta}_z = -L_2 c_y \dot{q}_2 + L_2 k_y (u_2 - q_2) + L_2 c_y \dot{q}_3 - L_2 k_y (u_3 - q_3) \quad (6)$$

여기서, 첨자 i 에 따른 L_i 값은 Fig. 2 에 도시하였다. m 과 I_{ii} 는 각각 상판의 질량과 회전관성모멘트이고, u_i 는 PZT 구동부에 의해 발생하는 변위이다. 식(1) ~ (6)을 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} = -\mathbf{D}\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{K}\mathbf{q} + \mathbf{K}\mathbf{u} \quad (7)$$

여기서

$$\mathbf{x} = [x \quad y \quad z \quad \theta_x \quad \theta_y \quad \theta_z]^T \quad (8)$$

$$\mathbf{q} = [q_1 \quad q_2 \quad q_3 \quad q_4 \quad q_5 \quad q_6]^T \quad (9)$$

$$\mathbf{u} = [u_1 \quad u_2 \quad u_3 \quad u_4 \quad u_5 \quad u_6]^T \quad (10)$$

$$\mathbf{M} = \text{diag}(m, m, m, I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}) \quad (11)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} c_x & & & & & \\ & c_y & & & & \\ & & c_y & & & \\ & & & c_z & & c_z \\ & & & L_3 c_z & L_3 c_z & -L_4 c_z \\ & & & L_1 c_z & -L_1 c_z & \\ L_2 c_y & -L_2 c_y & & & & \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_x & & & & & \\ & k_y & & & & \\ & & k_y & & & \\ & & & k_z & k_z & k_z \\ & & & L_3 k_z & L_3 k_z & -L_4 k_z \\ & & & L_1 k_z & -L_1 k_z & \\ L_2 k_y & -L_2 k_y & & & & \end{bmatrix} \quad (13)$$

구동기와 상판 사이의 접촉점의 변위벡터 \mathbf{q} 와 전체 좌표계 \mathbf{x} 사이에는 다음과 같은 관계가 성립된다. (Fig. 2 참조)

$$\mathbf{q} = \mathbf{R}_a \mathbf{x} \quad (14)$$

여기서

$$\mathbf{R}_a = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & & -L_2 \\ & & 1 & & & L_2 \\ & & & 1 & L_3 & L_1 \\ & & & & 1 & L_3 \\ & & & & & 1 \\ & & & & & & -L_4 \end{bmatrix} \quad (15)$$

또한, 센서 사이의 거리 P_1, P_2, P_3 에 따라서 (Fig. 2 참조) 상판의 좌표와 센서의 검출변위 s_i 사이에는 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$\mathbf{s} = \mathbf{R}_s \mathbf{x} \quad (16)$$

여기서

$$\mathbf{s} = [s_1 \quad s_2 \quad s_3 \quad s_4 \quad s_5 \quad s_6]^T \quad (17)$$

$$\mathbf{R}_s = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & 1 & & & \\ & & & 1 & P_2/2 & P_3/2 \\ & & & & 1 & -P_2/2 \\ & & & & & 1 \\ & & & & & & -P_3/2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

위의 모델에 대한 검증은 선행 연구¹⁴에서 수행되었으며, 전달율 비교를 통해 구한 계수의 값은 다음과 같다: $k_x=1.37 \times 10^7 \text{N/m}$, $k_y=7.9 \times 10^6 \text{N/m}$, $k_z=4.7 \times 10^6 \text{N/m}$, $C_x=351 \text{N s/m}$, $N \text{ s/m}$, $C_y=202 \text{N s/m}$, $C_z=78.1 \text{N s/m}$.

식(7)과 식(14)를 이용하여 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\ddot{\mathbf{x}} = -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{DR}_a\dot{\mathbf{x}} - \mathbf{M}^{-1}\mathbf{KR}_a\mathbf{x} + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{KR}_a\mathbf{v} \quad (19)$$

여기서 \mathbf{v} 는 $\mathbf{v} = \mathbf{R}_a^{-1}\mathbf{u}$ 의 관계를 가지고 전체 좌표계를 기준으로 한 입력변위이다. 식(19)를 상태공간표현으로 바꾸면 다음과 같다.

$$\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{A}\mathbf{y} + \mathbf{B}\mathbf{v} \quad (20)$$

$$\mathbf{z} = \mathbf{C}\mathbf{y} \quad (21)$$

여기서

$$\mathbf{y} = [\mathbf{x} \quad \dot{\mathbf{x}}]^T \quad (22)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{KR}_a & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{DR}_a \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\mathbf{B} = [\mathbf{0} \quad \mathbf{M}^{-1}\mathbf{KR}_a]^T \quad (24)$$

$$\mathbf{C} = [\mathbf{R}_s \quad \mathbf{0}]^T \quad (25)$$

4. 스테이지의 초정밀 구동을 위한 모델기반 제어기의 설계

광학계를 이송하는 목적으로 주로 사용되고 있는 초정밀 스테이지는 금속으로 만들어진 기구부로 구성되어 있으므로 구조적인 감쇠가 아주 작다. 이는 주변의 진동에 취약하게 되고, 실질적인 위치제어에서 가장 많이 사용되는 입력인 계단 입력에 대한 응답에 많은 잔류 진동(residual ripple)을 남기는 치명적인 단점을 갖는 이유이기도 하다. 잔류 진동은 광학계와 같이 진동에 민감한 부품을 다루는 시스템에서는 반드시 피해야 할 것이나, 모델을 고려하지 않는 일반적인 제어(예를 들어 PI

제어)를 적용하여 이러한 잔류 진동을 제거하려면 시스템의 응답을 느리게 하는 방법 외에는 뚜렷한 해결책이 없게 된다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 한계점을 극복하고자 H_∞ norm 을 이용한 모델기반 제어기를 설계하고자 한다. 제어기의 설계에 앞서 전체 시스템의 제어계를 Fig. 6 과 같이 구성하였다.

여기서 \mathbf{G} 는 식(20)과 식(21)에 의해 표현되는 스테이지의 모델이고, \mathbf{G}_a 는 PZT 스택을 구동하기 위한 증폭기의 전달함수로서, 실험을 통해 각 자유도에 대해 $1/(1+0.00177s)$ 의 값을 얻었다. (여기서 s 는 라플라스 변수이다.) \mathbf{r} 은 지령값이고, \mathbf{K}_c 는 제어기이며, $\mathbf{W}_s, \mathbf{W}_T, \mathbf{W}_u$ 는 각각 감도(sensitivity), 위치 추종 성능, 입력에 대한 가중행렬이다. 모델기반 제어기를 생성하는 것은 결국 성능을 보장할 수 있는 가중행렬들을 적절히 선정한 후 출력값의 H_∞ norm 이 1 미만이 되게 하는 것이다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\left\| \begin{bmatrix} \mathbf{W}_s\mathbf{S} \\ \mathbf{W}_T\mathbf{T} \\ \mathbf{W}_u\mathbf{SK}_c \end{bmatrix} \right\|_\infty < 1 \quad (26)$$

여기서, \mathbf{T} 는 보감도(complementary sensitivity) 행렬, \mathbf{S} 는 감도행렬로서 각각은 다음의 식으로 표시할 수 있다.

$$\mathbf{S} = (\mathbf{I} + \mathbf{GG}_a\mathbf{K}_c)^{-1} \quad (27)$$

$$\mathbf{T} = (\mathbf{I} + \mathbf{GG}_a\mathbf{K}_c)^{-1}\mathbf{GG}_a\mathbf{K}_c \quad (28)$$

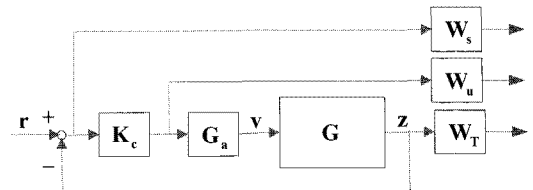


Fig. 6 Block diagram for H_∞ controller design

다음으로는 적절한 가중행렬을 구하는 것이 제어를 만드는데 필요하다. 식(26)에서 알 수 있듯이 각 가중행렬의 역행렬의 H_∞ norm 은 가중의 대상이 되는 함수행렬보다 커야 한다. 따라서, 각

가중행렬의 역행렬은 가중의 대상이 되는 함수행렬의 상한(upper limit)을 결정하게 된다. W_u 는 제어기의 출력의 상한을 결정한다. 즉, PZT 증폭기에 과도한 입력을 제한함으로 증폭기의 출력이 포화되는 것을 막는다. 이는 증폭기의 입력 범위로 간단히 정의될 수 있다. W_s 는 감도의 상한을 정하는 것이고, W_T 는 보감도의 상한을 정하는 것이지만, 이 둘은 서로 연관성을 갖는다. 연관성을 단일입출력 시스템으로 설명하면 다음과 같다.(단일입출력이므로 벡터와 행렬을 표시할 때 사용한 볼드체가 아닌 일반체를 사용하였다)

$$S + T = 1 \tag{29}$$

$$S < 1/W_s \tag{30}$$

$$T < 1/W_T \tag{31}$$

단일 입출력 시스템에서는 식(29)의 관계가 성립하는데, 가중함수의 특징인 식(30)과 식(31)을 같이 고려하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$1 - 1/W_T < S < 1/W_s \tag{32}$$

즉, W_s 와 W_T 가 감도함수의 범위를 정하게 된다. 따라서 이러한 개념을 가지고 가중함수를 정하였다. 먼저 개발된 초정밀 스테이지는 정확한 이송을 목표로 하기 때문에 정상상태오차가 완전히 제거되도록 하였다. 이는 낮은 주파수에서의 제어기 이득을 높임으로 구현할 수 있으며, 구체적으로는 저주파에서 W_s 값을 크게 되도록 조정하는 것이다. 또한, 페루프 제어를 사용할 때의 이송 대역폭도 W_s 의 절점주파수를 높이는 것을 통해 구현될 수 있다. 왜냐하면 식(32)에 보인 바와 같이 W_s 는 감도함수의 상한값을 결정하기 때문이다. W_T 는 식(31)로 알 수 있듯이 고주파에서의 보감도함수(=전달함수)의 상한을 결정하는 데 사용되는 것인데, 기계시스템의 특성상 고주파에서는 급격한 전달함수의 감소가 일어나는 것이 일반적인 현상이므로 W_s 의 절점주파수보다 약간 큰 절점주파수를 정해주면 대부분의 기계시스템에서 제어기를 설계하는데 별다른 영향을 미치지 않는다. 실제로 본 연구의 시스템에서 W_T 를 고려하여 개발

한 제어기와 제외하여 개발한 제어기는 거의 같은 성능을 가짐을 확인할 수 있었다. 따라서, 유일하게 중요한 가중함수로 평가된 W_s 를 적절히 조절함으로 H_∞ norm 을 이용하여 원하는 성능을 가진 모델기반 제어기를 설계하였다. 선택된 가중함수행렬 W_s 는 식(33)과 같다. 정밀 스테이지는 광학 장비나 현미경의 대상물과 같이 주로 가볍고 민감한 부품의 이송에 사용되므로 오버슈트는 가능한 억제되어야 한다. 따라서, 가중함수는 이후의 식(33)에서 볼 수 있는 바와 같이 지령값에 대한 출력이 17/16 이하가 되도록 하였다. 이는 최대 오버슈트를 제한하는 효과를 갖는다.

$$W_s = I_{6 \times 6} \times \frac{1.6e - 5s^2 + 0.013s + 1}{1.7e - 5s^2 + 0.013s + 1e - 6} \tag{33}$$

설명한 가중함수를 사용하여 H_∞ norm 이 1미만이 되게 하는 제어기 K_c 를 설계하였으며, 수치적인 연산을 위해 γ -반복을 이용하였다. 계산 결과로 얻은 γ 값은 0.9858 이다.

5. 초정밀 스테이지의 위치이송 성능평가

실제된 모델기반 제어기를 이용하여 스테이지의 초정밀 위치제어 성능평가는 두 가지를 기준으로 하였다. 첫째는 개발된 제어기를 적용한 단위계단응답이 가중함수행렬을 통해 설정한 특성을 따라가고 있는지 확인하였다. 다음에 적분제어기를 적용한 단위계단응답과 개발된 모델기반 제어기를 적용한 단위계단응답을 실험결과를 토대로 비교한다.

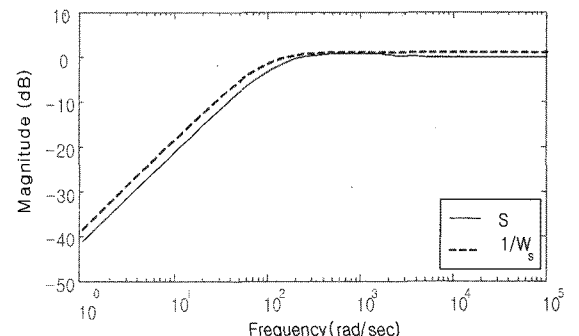


Fig. 7 Comparison between sensitivity function S and the inverse of weighting function 1/W_s

먼저 설계된 제어기를 적용할 때 스테이지의 감도 S 가 가중함수의 역수 $1/W_s$ 로 제한되는 범위에 들어오는지 점검하였다. 가중함수의 역수가 감도함수의 상계(upper bound)를 형성하고 있음을 Fig. 7 에서 볼 수 있다. 이는 설계된 제어기를 통해 시스템의 감도가 의도된 대로 설계되었음을 의미한다. 각 자유도의 공진주파수는 다르나 같은 가중함수가 적용되도록 하였기 때문에 결과적으로 얻는 감도함수 S 는 모든 자유도에 대해서 같다. 실제로 6 개의 모든 자유도에 대해서 Fig. 7 과 같은 모양의 보드 선도를 얻을 수 있었다. 따라서, H_∞ -제어기를 적용하는 것은 각 방향의 제어 이득을 균일하게 하여 2 개 이상의 축이 동시에 거동하는 경우에 정밀 스테이지의 정밀도를 높이는 요인이 된다.

본 연구의 스테이지와 같이 감쇠가 아주 적은 시스템 타입 0 인 시스템에 비해-적분-미분(PID) 제어기를 적용할 때, 미분 제어기는 설정점 킥을 일으키며 센서신호의 잡음을 증폭시키는 역할을 하기 때문에 대부분의 경우에 사용하지 않는다. 또한, 비례 제어기를 적용할 경우에도 부족한 감쇠로 인해 과도한 오버슈트가 발생하므로 앞먹임 루프에는 위치시키지 않고, 뒤먹임 루프에 위치시키는 것이 일반적이다.¹⁵ 더욱이 개발 대상인 스테이지는 관성의 크기에 비해 강성이 크므로 뒤먹임 루프에 비례제어기를 적용하는 것이 큰 효과를 주지 못한다(개발 과정에서 시행착오를 통해 얻은 결과이다). 따라서, 앞먹임 루프에 적분제어기만을 적용한 제어기를 개발된 제어기의 비교대상으로 삼았다.

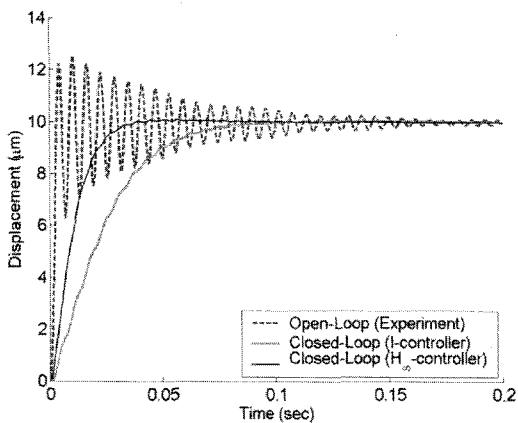
개루프 계단 응답과 적분(integral) 제어기를 이용한 페루프 계단 응답, H_∞ -제어기를 이용한 페루프 계단 응답을 병진운동인 경우와 회전운동인 경우를 나누어서 제작된 스테이지를 통해 수행하였으며 그 실험결과를 Fig. 8 에 수록하였다. 적분 제어기의 적분상수는 H_∞ -제어기를 이용한 제어기와 같은 오버슈트를 만드는 값을 선택하였다.

실험 결과에서 볼 수 있듯이 (Fig. 8 참조) 적분 제어기를 적용한 계단응답은 상승시간이 길 뿐 아니라 스테이지의 진동모드에 의한 잔류진동이 더 크다는 것을 발견할 수 있으며, 이는 H_∞ -제어기가 효과적으로 스테이지의 위치 이송을 수행하고 있음을 의미한다. x 방향과 θ_x 방향의 계단 응답만 수록해 놓은 것은 병진 운동(x, y, z)의 계단 응답은 x 방향의 계단 응답과 거의 일치하며, 회전 운동($\theta_x, \theta_y, \theta_z$)의 계단 응답은 θ_x 방향의 계단 응답과 거의 일치하기 때문이다. 시스템의 하드웨어적인 제한에 의해서 병진 운동의 운동 범위는 $\pm 10 \mu\text{m}$ 이고, 회전 운동의 운동 범위는 $\pm 100 \mu\text{rad}$ 이다. 하드웨어의 사양에 따라 결정되는 위치결정 분해능은 병진 운동과 회전 운동에 대해 각각 6.1 nm 와 $0.12 \mu\text{rad}$ 이다.

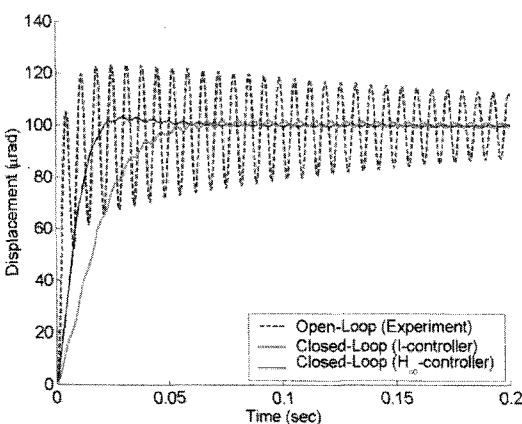
6. 결론

본 연구에서는 6 자유도 정밀 위치이송 스테이지의 제어기를 H_∞ norm 을 사용하여 설계하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 6 자유도 초정밀 이송 스테이지의 동역학을 상태공간표현으로 모델링하였다.



(a) translational step response (x -direction)



(b) rotational step response (θ_x -direction)

Fig. 8 Experimental comparison of step responses

(2) 주파수 대역에서의 명령추종 감도 윤곽을 정하기 위해 가중함수를 효과적으로 정의하였다.

(3) 설계된 제어기를 적용한 스테이지의 감도가 가중함수의 역수로 정의되는 감도의 상계 이내에 있음을 확인하였다.

(4) 스테이지의 공진주파수가 각 자유도 별로 상이함에도 불구하고 H_{∞} norm 을 이용하여 설계된 제어기를 적용한 스테이지는 각 자유도 별로 동등한 주파수 특성을 가짐을 입증하였다.

(5) 설계된 제어기를 적용한 페루프 제어에서의 스테이지의 성능은 계단 응답을 통해 검증하였으며 적분 제어기를 사용한 페루프 제어와 비교해 볼 때, 빠른 응답을 가지며 고유진동 모드로 인한 잔류진동이 최소화 되었음을 확인하였다.

후 기

연구의 환경을 제공해 주신 서울대학교의 박희재 교수님께 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Shan, X., Kuo, S., Zhang, J. and Meng, C., "Ultra precision motion control of a multiple degrees of freedom magnetic suspension stage," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 7, No. 1, pp. 67-78, 2002.
2. Gordon, C. G., "Generic Criteria for Vibration-Sensitive Equipment," Proc. of International Society for Optical Engineering(SPIE), Vol. 1619, pp. 71-85, 1991.
3. Sugihara, K., Mori, I., Tojo, T., Ito, C., Tabata, M. and Shinozaki, T., "Piezoelectrically driven XY θ table for submicron lithography systems," Rev. of Scientific Instruments, Vol. 60, No. 9, pp. 3024-3029, 1989.
4. Smith, A. R., Gwo, S. and Shih, C. K., "A new high-resolution two-dimensional micropositioning device for scanning probe microscopy applications," Rev. of Scientific Instruments, Vol. 65, No. 10, pp. 3216-3219, 1994.
5. Muthuswamy, J., Salas, D. and Okandan, M., "A chronic micropositioning system for neurophysiology," Proc. the Second Joint EMBS/BMES Conference, pp. 2115-2116, 2002.
6. Physik Instrumente GmbH & Co, Products webpage, <http://www.physikinstrumente.com>
7. Kuo, S.-K. and Meng, C.-H., "Modeling and control of a six-axis precision motion control stage," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 10, No. 1, pp. 50-59, 2005.
8. Dejima, S., Gao, W., Shimizu, H., Kiyono, S. and Tomita, Y., "Precision positioning of a five degree-of-freedom planar motion stage," Mechatronics, Vol. 15, No. 8, pp. 969-987, 2005.
9. Gao, P. and Swei, S.-M., "A six-degree-of-freedom micro-manipulator based on piezoelectric translators," Nanotechnology, Vol. 10, No. 4, pp. 447-452, 1999.
10. Portman, V. T., Sandler, B.-Z. and Xahavi, E., "Rigid 6-DOF parallel platform for precision 3-D micromanipulation," Int. Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 41, No. 9, pp. 1229-1250, 2001.
11. Chen, S.-C. and Culpepper, M. L., "Design of a six-axis micro-scale nanopositioner - μ HexFlex," Precision Engineering, Vol. 30, No. 3, pp. 314-324, 2006.
12. Kim, H. S., Cho, Y. M. and Moon, J. H., "Active vibration control using a novel three-DOF precision micro-stage," Smart Structures and Materials, Vol. 19, No. 5, Paper No. 055001, 2010.
13. Yao, Q., Dong, J. and Ferreira, P. M., "Design, analysis, fabrication and testing of a parallel-kinematic micropositioning XY stage," Int. J. of Machine Tools Manufacture, Vol. 47, No. 6, pp. 946-961, 2007.
14. Moon, J. H., Park, J. H. and Pakh, H. J., "Design and Modeling of a 6-DOF Stage for Ultra-Precision Positioning," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 26, No. 6, pp. 106-113, 2009.
15. Ogata, K., "Modern control engineering, 4th ed.," Prentice Hall, 2002.