

# 자기부상식 미동 매니플레이터의 추종성능 향상

최기봉\*, 김수현\*, 곽윤근\*

## Tracking Performance Improvement of a Magnetic Levitation Based Fine Manipulator

Kee-Bong Choi\*, Soo Hyun Kim\*, Yoon Keun Kwak\*

### ABSTRACT

A magnetic levitation system requires a robustness to overcome a dynamic instability due to disturbances. In this paper a robust controller for a magnetically levitated fine manipulator is presented. The proposed controller consists of following two parts: a model reference controller and an  $H_\infty$  controller. First, the model reference control stabilizes the motion of the manipulator. Then, the motion of the manipulator follows that of the reference model. Second, the  $H_\infty$  control minimizes errors generated from the model reference control due to noise and disturbance since the  $H_\infty$  control is a kind of robust control. The experiments of position control and tracking control are carried out by use of the proposed controller under the conditions of free disturbances and forced disturbances. Also, the experiments using PID controller are carried out under the same conditions. The results from above two controllers are compared to investigate the control performances. As the results, it is observed that the proposed controller has similar position accuracy but better tracking performances comparing to the PID controller as well as good disturbance rejection effect due to the robust characteristics of the controller. In conclusion, it is verified that the proposed controller has the simple control structure, the good tracking performances and good disturbance rejection effect due to the robust characteristics of the controller.

**Key Words** : Robust control (강인제어), Model reference (모델 기준),  $H_\infty$  control ( $H_\infty$  제어), Magnetic levitation (자기부상), Fine manipulator (미동 매니플레이터)

### 기호설명

$x, y, z$  = translational axes  
 $\psi, \phi, \theta$  = rotational axes with respect to  $x, y, z$  axes  
 represented by Z-Y-X Euler's angle  
 $q = [x \ y \ z \ \psi \ \phi \ \theta]^T$

$C_M, K_M, K_F$  = coefficient matrices of equation of motion

$i_q$  = current supplying to solenoid corresponding to  $q$  axis

$K_a, K_s$  = gains of current amplifier and sensor

$u, u_r, u_h$  = control input, reference control input,  $H_\infty$

\* 한국과학기술원 기계공학과

control input

$q_p, q_m$  = state vectors of plant and model

$A_p, A_m$  = system matrices of plant and model

$B_p, B_m$  = input matrices of plant and model

$\omega_n, \zeta$  = natural frequency and damping ratio of model

$q_e$  = error state

$w_1, w_2$  = disturbance and sensor noise

$w = [w_1 \ w_2]^T$

$z_1, z_2$  = output and input of plant

$z = [z_1 \ z_2]^T$

$W_d(s), W_s(s), W_1(s), W_2(s)$  = weight factors to be chosen by designer

$P(s)$  = packed transfer function of error dynamics

$K_x(s)$  = controller law of  $H_\infty$  controller

$\gamma$  = bound of infinite norm

$\omega$  = angular velocity

$e_x, e_y$  = tracking errors of x and y direction

## 1. 서론

많은 제조공정에서 고정밀 작업의 중요성이 인식됨에 따라 고정밀 위치정밀도를 갖는 구동기에 대한 관심도 증폭되고 있다. 고정밀 구동기로는 압전구동기, 정전기력 구동기 및 전자기력 구동기 등이 있다<sup>(1-10)</sup>. 이중 전자기력 구동기는 고정부와 이동부 사이에 접촉이 없어 마찰에 의한 분진이 발생하지 않아 반도체 공정과 같은 청정환경용 구동기로 선호되어 오고 있다<sup>(1,2)</sup>.

자기부상식 시스템으로는 자기부상열차, 자기베어링 및 자기부상식 미소 위치결정기구 등이 있다. 이들 대부분의 자기부상 시스템은 고유적으로 불안정하기 때문에 이들은 안정화시키기 위한 제어회로를 필요로 한다. 이러한 시스템을 제어하기 위해 PID 제어가 비교적 많이 사용되었다<sup>(7,10)</sup>. 그러나 자기부상식 시스템은 구동부가 접촉이 없는 관계로 외부 외란에 매우 민감하게 반응을 하며 이로 인하여 시스템이 불안정하게 될 우려가 크다. 따라서 외부 외란에 대한 영향을 충분히 보상해줄 필요가 있으며, 외란의 영향을 충분히 고려한 제어기로서는  $H_\infty$  제어가 대표적이다.

자기부상 시스템에 대해 강인제어를 적용한 많은 사례가 최근 많이 발표되고 있다. Lim은 자기부상 시스템을 위해 설계된 여러 제어기에 대

한 강인성(robustness)에 대한 실험 결과를 제시하고 있다<sup>(11)</sup>. Mohamed와 Vestgard는  $H_\infty$  제어를 사용하여 2-DOF 자기부상용 위치결정기구의 위치 제어를 수행하였다<sup>(12)</sup>. 특히 Vestgard는  $H_\infty$  제어기와 상태귀환 제어기의 성능을 비교 평가하였다. 여기서,  $H_\infty$  제어기의 경우가 상태귀환 제어기의 경우보다 외란에 대해 좋은 성능을 보이고 있음을 실험을 통하여 입증하고 있다.

이 논문에서는 불안정한 자기부상 시스템에  $H_\infty$  제어를 용이하게 적용하기 위해 모델기준제어기와  $H_\infty$  제어기가 합성된 MR- $H_\infty$  제어를 제시한다. 이 제어기는 모델기준제어기의 기준모델에 의해 제어시스템의 응답형태가 결정되며 외란과 잡음에 의한 실제 시스템과 기준모델 사이의 오차들은 새로운 오차방정식에 적용된  $H_\infty$  제어기에 의해 제거되는 형태를 갖는다. 이 MR- $H_\infty$  제어기는 자기부상식 미동용 매니플레이터에 적용되며, 경로 추종 실험에 의해 제시한 제어기의 성능을 PID 제어기와 비교 평가한다.

## 2. 자기부상식 미동 매니플레이터

본 연구에 사용된 시스템은 자기력을 이용하여 6 자유도의 운동을 할 수 있는 매니플레이터로서, 각 축이  $\pm 1mm$ 의 작업영역과  $1 \mu m$  이하의 정밀도를 가지는 미동용 매니플레이터이다. 매니플레이터의 운동은 공심 솔레노이드와 영구자석을 이용한 구동기에 의해 발생된 힘을 이용하였다<sup>(1-3)</sup>. 솔레노이드와 영구자석은 각각 고정부와 매니플레이터에 부착되어 있으며, 서로의 반발력 및 흡인력에 의해 매니플레이터가 구동된다. 6 자유도의 운동을 발생시키기 위해 총 16 쌍의 솔레노이드/영구자석(SOL/PM)이 이용되었다. 이중 4 쌍의 SOL/PM은 매니플레이터의 내부에 위치하여 부상운동을 발생시키는 반면, 12 쌍의 SOL/PM은 매니플레이터의 외부에 위치하고 있어 평면운동을 발생시킨다. 평면운동은 x, y 및 요오(yaw) 방향의 운동을 의미하고, 부상운동은 z 및 로울(roll), 피치(pitch) 방향의 운동을 의미한다.

본 연구에 사용된 자기부상식 매니플레이터의 조립 전 형태는 Fig.1과 같으며 조립 후의 형태는 Photo 1과 같다.

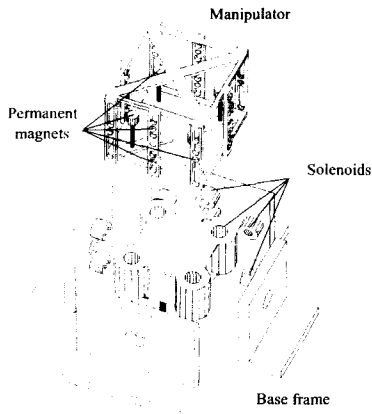


Fig. 1 Schematic diagram of the magnetic levitated manipulator

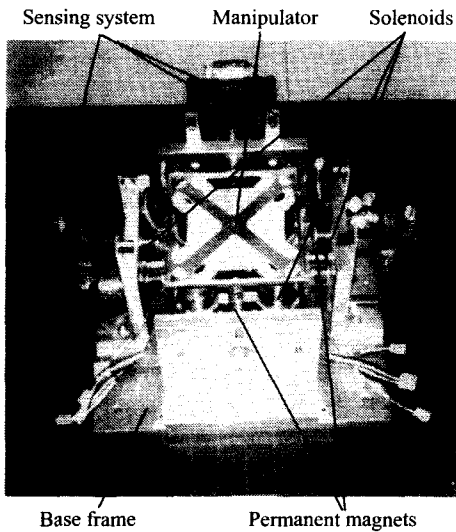


Photo 1 The whole mechanical system

Photo 1 에는 조립된 매니플레이터의 위치와 자세를 측정하기 위한 측정시스템이 부착되어 있으며, 이 측정시스템은 3 개의 PSD(Position Sensitive Device)와 3 개의 LD(Laser Diode)로 구성되어 있다. 고정부에 부착된 솔레노이드에 전류 앰프를 사용하여 전류를 인가하면 전자기력이 발생된다. 이때 이 힘은 상당 영구자석에 영향을 미쳐 운동을 발생시킨다. 이 들에 의해 발생하는 힘은 미소영역에서 거리와 인가전류의 함수로 선형화할 수 있으며, 모든 영구자석에 작용하는 힘에 의해 매니

플레이터의 운동방정식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\ddot{q} + C_M \dot{q} + K_M q = K_F i_q, \quad (1)$$

여기서 각 계수행렬은 다음과 같다.

$$C_M = \text{diag}[-6.4 \ -5.1 \ 2.6 \ 2.5 \ -3.3]$$

$$K_M = \text{diag}[-523.0 \ -534.5 \ 1183.8 \ 539.3 \ 548.5 \ -366.8]$$

$$K_F = \text{diag}[2.2 \ 2.1 \ 5.1 \ 84.2 \ 79.3 \ 22.2].$$

계수행렬의 각 원소는 매니플레이터가 미소운동을 할 때 각 축의 운동은 서로 비연성되어 있으며, 매니플레이터 동역학의 차수가 2 차라 가정된 후 각축의 계단응답을 실험에 의해 구하여 산출하였다<sup>(1)</sup>.

식 (1)의 계수행렬을 고찰해 보면,  $C_M$ 과  $K_M$ 의 부호가 평면운동에 상당하는  $x, y, \theta$  축에서는 음인 반면, 부상운동에 상당하는  $z, \psi, \phi$  축에서는 양으로 나타났다. 이것은 부상운동을 위해 매니플레이터의 자중에 대해 반대방향의 상반력(antagonistic force)<sup>(1)</sup>이 발생하도록 구조를 설계했기 때문에 나타난 현상이다. 상반력을 발생시키기 위해서는 항상 솔레노이드에 일정한 전류를 인가해야 하며 이것은 에너지의 소모와 함께 솔레노이드에 열을 발생시키는 원인이 된다. 따라서 매니플레이터의 자중에 영향을 받지 않는 평면운동은 상반구조 대신에 추진력(push-and-pull force)이 발생하는 구조로 설계했으며 따라서 평면운동용 축에서는 불안정한 동역학을 가진다.

### 3. 강인 제어기

식 (1)로 부터, 매니플레이터는 개회로 시스템에서 불안정한 평면운동을 가지며, 심하게 진동하는 부상운동을 갖는다는 것을 알 수 있다. 그러므로 이 자기부상 시스템은 안정화 및 정밀 위치 제어를 위하여 폐회로의 제어를 요구한다. 더욱이 시스템에 외란이 작용할 때 PID 제어에 의한 제어시스템의 성능은 현저하게 저하된다. 따라서 외란에 의한 성능저하를 방지하기 위하여 강인제어의 필요성이 대두된다.

이 연구에서는, 자기부상 시스템을 제어하기 위해 MRC(모델기준제어기, Model Reference Controller)와  $H_2$ 제어기가 합성된 제어기를 도입한

다. 여기에서 MRC 는 시스템을 안정화시키는 역할을 하며,  $H_w$  제어기는 MRC 에서 발생된 오차를 최소화하는 역할을 한다. 특히,  $H_w$  제어기는 강인 제어기의 일종으로서 외란이나 노이즈의 영향을 최소화하는 역할을 한다

시스템의 운동방정식 (1)에 전류앰프의 이득  $K_a$  와 센서의 이득  $K_s$  를 고려하면, 각축에서 다음 식과 같은 동일한 형태의 2 차 미분방정식으로 표현된다.

$$\ddot{q} + a_1\dot{q} + a_0q = bK_aK_s u. \quad (2)$$

이 식을 상태공간식으로 표현하면 다음 식과 같다.

$$\dot{q}_p = A_p q_p + B_p u, \quad (3)$$

여기서  $q_p = \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \end{bmatrix}, A_p = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 \end{bmatrix}, B_p = \begin{bmatrix} 0 \\ bK_aK_s \end{bmatrix}$ .

기준입력의 형태를 결정하는 기준모델은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{q}_m = A_m q_m + B_m r, \quad (4)$$

여기서  $q_m = \begin{bmatrix} q_m \\ \dot{q}_m \end{bmatrix}, A_m = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\zeta\omega_n \end{bmatrix}, B_m = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_n^2 \end{bmatrix}$ .

또한  $\omega_n$  과  $\zeta$  는 설계자에 의해 임의로 선정될 수 있는 값이다. 본 연구에서는 평면운동에 대한 추종성능을 향상을 목적으로 하기 때문에, 부상운동에 대해서는 레귤레이션 제어를 수행하면서 평면운동에 대해서 추종제어를 수행하였다. 본 연구의 평면운동용 축에 추종제어를 위해  $\omega_n$  과  $\zeta$  를 각각 90 과 0.9 으로 선정했다.

제어입력  $u$  를  $u_r$  과  $u_h$  로 분리하면

$$u = u_r - u_h \quad (5)$$

라 놓을 수 있고,  $q_e$  를 다음으로 정의하면

$$q_e = q_m - q_p \quad (6)$$

이며, 다음의 오차방정식이 유도된다.

$$\dot{q}_e = A_m q_e + B u_h + \{(A_m - A_p) q_p + B_m r - B_p u_r\} \quad (7)$$

이 식에서  $u_r$  을 다음과 같이 정의하자.

$$u_r = B_p^+ \{(A_m - A_p) q_p + B_m r\} \quad (8)$$

여기서  $B_p^+ \equiv (B_p^T B_p)^{-1} B_p^T$ .

식 (8)을 식 (7)에 대입하면 다음 식과 같은 새

로운 오차방정식이 유도된다.

$$\dot{q}_e = A_m q_e + B_p u_h. \quad (9)$$

이 새로운 오차 동역학을 레귤레이션하기 위해 오차 동역학 모델에 모델링 오차, 외란 및 센서 노이즈를 고려한  $H_w$  제어기를 Fig.2 와 같은 구조로 설계한다<sup>(13,14)</sup>.

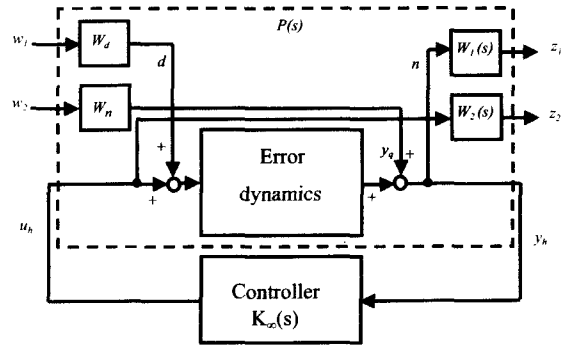


Fig. 2 Configuration of  $H_w$  controller

새로운 동역학 모델  $P(s)$ 를 다음과 같이 나타내자.

$$P(s) = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$P(s)$ 는 다음 식과 같이 입출력에 관계하는 전달함수이다.

$$\begin{aligned} z &= P_{11}w + P_{12}u_h \\ y_h &= P_{21}w + P_{22}u_h. \end{aligned} \quad (11)$$

이때,  $w$  에서  $z$  로의 전달함수는

$$z = F_l(P, K_x)w \quad (12)$$

이때  $F_l(P, K_x)$ 는 LFT(Linear Fractional Transformation)이라 부르며, 다음과 같이 정의된다.

$$F_l(P, K_x) = P_{11} + P_{12}K_x(I - P_{22}K_x)^{-1}P_{21}. \quad (13)$$

제어기  $K_x(s)$ 를 구하기 위하여 Glover-Doyle 알고리즘<sup>(13)</sup>을 이용한다. 즉, LFT 의 무한노름(infinite norm)이 다음 식과 같이 적정범위  $\gamma$  이내에 있도록 가중치 및 제어기를 설계한다.

$$\|F_l(P, K_x)\|_\infty < \gamma \quad (14)$$

본 연구에서 가중치  $W_d, W_n, W_p$ , 및  $W_2$ 와 제어기  $K_z$ 는 MATLAB의 설계 패키지를 이용하여 반복적인 모의실험에 의해 선정 및 설계되었다(14). 선정된 가중치는 모든 축에서 동일하며 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 W_d &= 0.001 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 W_n &= 0.001 \\
 W_1(s) &= 0.05 \frac{s+1000}{s+0.01} \\
 W_2(s) &= 5 \frac{s+500}{s+50000}
 \end{aligned} \tag{15}$$

모의실험에 의해 선정된 평면운동축의 제어기는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 K_{x,s}(s) &= \frac{100s^3 + 50 \times 10^3 s^2 + 10 \times 10^6 s + 50 \times 10^9}{s^4 + 81 \times 10^2 s^3 + 20 \times 10^5 s^2 + 21 \times 10^7 s + 21 \times 10^9} \\
 K_{y,s}(s) &= \frac{100s^3 + 50 \times 10^3 s^2 + 10 \times 10^6 s + 50 \times 10^9}{s^4 + 81 \times 10^2 s^3 + 19 \times 10^5 s^2 + 20 \times 10^7 s + 20 \times 10^9} \\
 K_{\theta,s}(s) &= \frac{100s^3 + 50 \times 10^3 s^2 + 10 \times 10^6 s + 50 \times 10^9}{s^4 + 78 \times 10^2 s^3 + 17 \times 10^5 s^2 + 15 \times 10^7 s + 15 \times 10^9}
 \end{aligned} \tag{16}$$

이 연구에서 제한한 제어기는 불안정한 시스템을 제어하기 위한 기존의  $H_\infty$  제어기 보다 비교적 간단한 구조를 가지고 있으며 제어 대상이 기준 모델을 추종하기 때문에 기준모델에 따라 다양한 형태의 천이상태(transient state)를 만들 수 있는 장점을 가지고 있다.

#### 4. 경로추종제어 실험 및 고찰

위에서 제시한 MR- $H_\infty$  제어기의 성능을 조사하기 위해 PID 제어기와 비교 실험하였다. 자기 부상 매니플레이터에 외부 부하를 가하지 않은 상태에서 여러 각속도에 대하여 x-y 평면상에 반경 0.3 mm 인 원을 추종하는 실험을 수행하였다.

Table 1 PID control gains

Axis	$K_p$	$K_i$	$K_D$
x	5.0	100	0.04
y	5.0	100	0.04
$\theta$	6.8	100	0.055

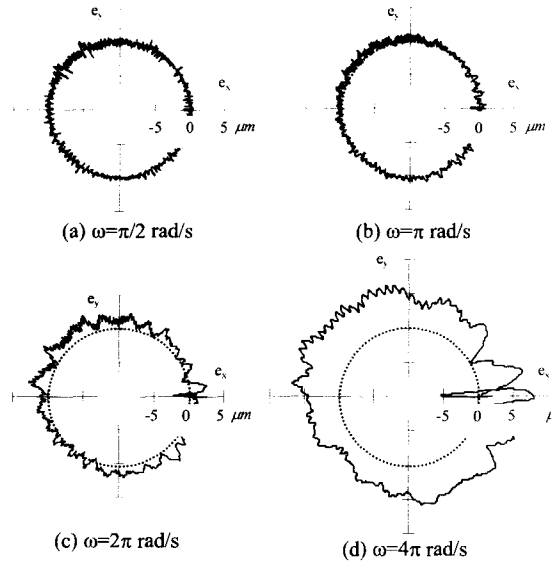


Fig. 3 Experimental results of tracking control using the conventional PID controller in the absence of disturbances

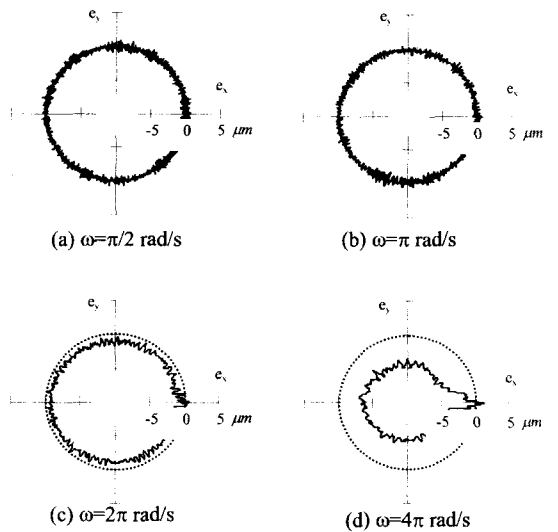


Fig. 4 Experimental results of tracking control using the MR- $H_\infty$  controller in the absence of disturbances

Fig.3 과 Fig.4 는 매니플레이터의 각속도  $\omega$ 가  $\pi/2, \pi, 2\pi, 4\pi$  rad/s 인 경우에 대하여 외부의 강제 외란이 없는 경우 PID와 MR- $H_\infty$  제어를 수행했을 때 경로에 대한 추종오차를 도시한 것이다. 여기

서  $e_x$  와  $e_y$  는 각각 x 및 y 축 방향의 추종오차를 의미한다. 실험에 사용된 PID 제어기의 제어이득은 시스템의 성능을 결정하기 때문에 가장 좋은 성능을 보이는 이득값을 선정하여야 한다. PID 제어기의 이득을 선정하는 방법으로는 Ziegler-Nichols<sup>(15)</sup> 방법이 대표적이지만 안정화되지 않은 시스템에 적용하기는 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 이득을 실험적으로 조정해 가면서 가장 좋은 성능을 나타내는 값을 선택하였으며 이 값은 Table 1 과 같다.

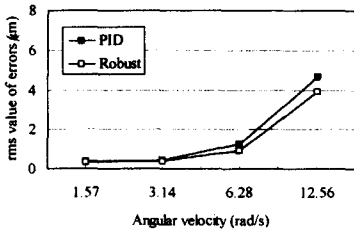


Fig. 5 Comparison of rms values of errors between the conventional PID control system and the MR- $H_\infty$  control system in the absence of forced disturbances

Fig.5 는 위의 두 제어 시스템에서 발생된 오차의 rms(root mean square) 값을 도시한 것이다. 그림으로부터 각속도의 증가에 따라 rms 오차도 함께 증가하며, 각속도의 증가에 따라 MR- $H_\infty$  제어 시스템으로부터 발생된 rms 오차는 PID 제어 시스템으로부터 발생된 rms 오차와 동일한 크기로부터 약 80 % 정도의 크기로 변하고 있음을 보이고 있다.

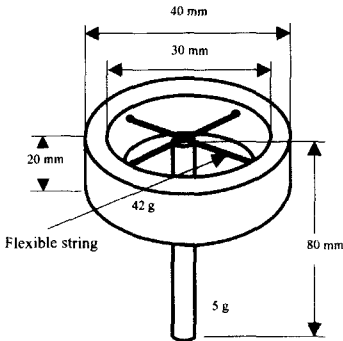


Fig. 6 Disturbance generating mechanism

강제 외란에 의한 제어기의 성능을 조사하기 위해 매니플레이터의 상부에 Fig.6 과 같은 형태의

외란발생장치를 제작하여 부착하였다. 이 부하는 매니플레이터가 운동을 함에 따라 임의의 외란을 발생시킬 수 있도록 막대와 환형 강체 사이에 탄력이 있는 줄로 연결되어 있다.

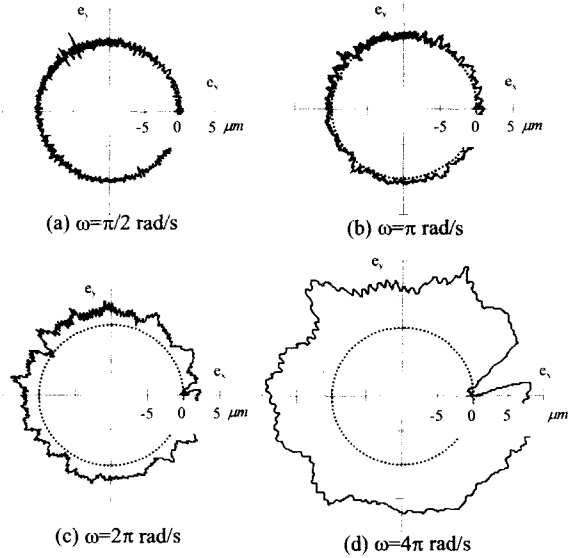


Fig. 7 Experimental results of tracking control using conventional PID controller in the presence of disturbances

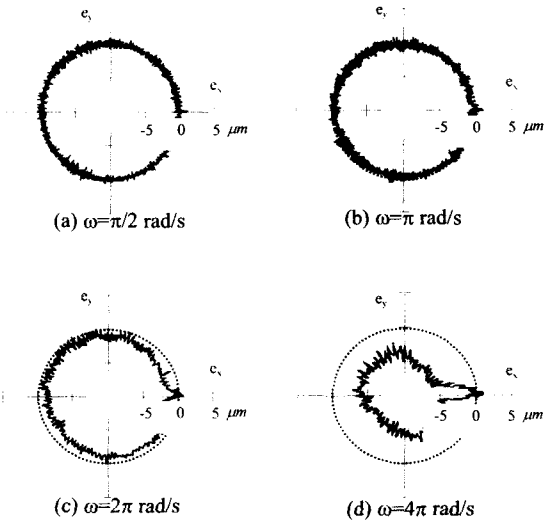


Fig. 8 Experimental results of tracking control using the MR- $H_\infty$  controller in the presence of disturbances

Fig.7 과 Fig.8 은 위의 경로추종 실험과 동일한 각속도에서 강제 외란이 매니플레이터에 가해지는 상태에서 PID 와 MR-H<sub>∞</sub> 제어를 수행했을 때 경로에 대한 추종오차를 도시한 것이다. 추종오차의 발생형태는 강제 외란이 없는 경우와 비슷하나 크기는 증가된 형태를 보이고 있다.

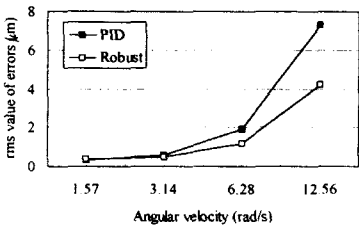


Fig. 9 Comparison of rms values of errors between the conventional PID control system and the MR-H<sub>∞</sub> control system in the presence of forced disturbance

Fig.9 는 강제 외란이 작용하는 상태에서 위의 두 제어시스템으로부터 발생된 오차의 rms 값을 도시한 것이다. 그림으로부터 각속도가 증가함에 따라 rms 오차도 함께 증가하며, 각속도의 증가에 따라 MR-H<sub>∞</sub> 제어시스템으로부터 발생된 rms 오차는 PID 제어시스템으로부터 발생된 rms 오차와 동일한 크기로부터 약 60 % 정도까지의 크기로 변하고 있음을 보이고 있다.

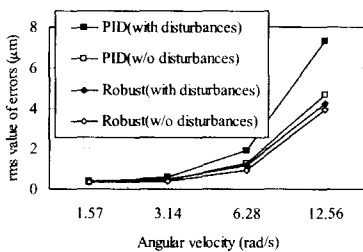


Fig. 10 Comparison of the rms values of errors between the conventional PID control system and the MR-H<sub>∞</sub> control system in the absence of disturbances and in the presence of disturbances

Fig.10 은 Fig.5 와 Fig.9 의 상대적인 오차의 비교를 위해 동일한 그래프 상에 오차의 rms 값을 도시한 것이다. 두 제어기에 의해 발생된 rms 오

차는 강제 외란이 존재하는 경우가 없는 경우에 비해 상대적으로 큰 값을 보이고 있다. MR-H<sub>∞</sub> 제어 경우 강제 외란이 존재하는 경우가 없는 경우에 비해 1~1.3 배 정도의 크기를 보이며, PID 제어의 경우 1~1.6 배 정도의 크기를 보이고 있다. 또한 MR-H<sub>∞</sub> 제어의 경우가 PID 제어의 경우보다 외란에 둔감하게 작용하는 것을 알 수 있다.

위의 경로 추종 실험으로부터 속도가 증가할수록 MR-H<sub>∞</sub> 제어기는 PID 제어기에 비해 좋은 추종성능을 보이고 있으며, 외란이 존재하는 경우 PID 제어기에 비해 보상능력이 우수하다는 것을 알 수 있다.

## 5. 결론

불안정한 축을 포함하고 있는 자기부상식 미동용 매니플레이터의 추종제어를 위해 MR-H<sub>∞</sub> 제어기를 제안하였다. 이 제어기는 불안정한 시스템을 제어하기 위한 기존의 H<sub>∞</sub> 제어기 보다 비교적 간단한 구조를 가지고 있으며 제어 대상이 기준 모델을 추종하기 때문에 기준모델에 따라 다양한 형태의 천이상태(transient state)를 만들 수 있다. 또한 이 제어기는 H<sub>∞</sub> 제어기의 특성으로 인해 PID 제어기에 비해 외란의 보상능력이 뛰어나다.

외란에 보상능력을 고찰하기 위해 제안한 MR-H<sub>∞</sub> 제어기와 PID 제어기에 대한 추종제어 실험을 비교 분석하였다. 추종제어 실험으로부터 속도가 증가할수록 MR-H<sub>∞</sub> 제어기는 PID 제어기에 비해 좋은 추종성능을 보이고 있으며, 외란이 존재하는 경우 PID 제어기에 비해 보상능력이 우수하다는 것을 증명할 수 있었다.

## 참고문헌

1. 최기봉, 김수현, 박윤근, "컴플라이언스를 갖는 웨이퍼 탐침 시스템용 미동 매니플레이터," 한국정밀공학회지, Vol.14, No.9, pp.68~79, 1997.
2. 최기봉, 박기환, 김수현, 박윤근, "자기력을 이용한 비접촉 6 자유도 미소위치결정기구의 개발," 대한기계학회논문집, Vol.20, No.4, pp.1164~1176, 1996.
3. Park K.H., Choi, K.-B., Kim S.-H., Kwak Y.K.,

- “Magnetically Levitated High Precision Positioning System Based on Antagonistic Mechanism,” *IEEE Tran. on Magnetics*, Vol.32, No.1, pp.208~218, 1996.
4. Umetani Y. and Suzuki H., “Piezoelectric Micro Manipulator in Multi Degree-Of-Freedom with Tactile Sensibility,” 10th International Symposium on Industrial Robots, pp.571~579, 1980.
  5. Fujita H. and Omodaka A., “Electrostatic Actuators for Micromechanics,” *IEEE Micro Robots and Teleoperators Workshop*, Hyannis, MA., 1987.
  6. Tsuda M., Higuchi T. and Fujiwara S., “Magnetically Supported Intelligence Hand for Automated Precise Assembly,” *Proc. of Conf. on Industrial Electronic, Control and Instrumentation*, SPIE, Vol.805, pp.926~933, 1987.
  7. Hollis R. L., Allan A. P. and Salcudean S., “A Six Degree-of-Freedom Magnetically Levitated Variable Compliance Fine-Motion Wrist : Design, Modeling and Control,” *IEEE Tran. on Robotics and Automation*, Vol.7, No.3, pp.320~332, 1991.
  8. Ohnuki H. and Fukui Y., “Three-dimensional Actuators for Optical Head,” *Optical Disk Technology*, SPIE, Vol.329, pp.103~108, 1982.
  9. Jeong M. C. and Busch-Vishniac I. J., “A Submicro Accuracy Magnetic Levitation Micromachine with End point Friction,” *Sensors and Actuators*, A.29, pp.225~234, 1991.
  10. Chen S.-J. S. and Busch-Vishniac I. J., “A Magnetically Levitated, Automated, Contact Analytical Probe Tool,” *IEEE Tran. on Semi. Manuf.*, Vol.8, No.1, pp.72~78, 1995.
  11. Lim K.B. and Cox D.E., “Experimental Robust Control Studies on an Unstable Magnetic Suspension System,” *Proc. Of the American Control Conference*, Baltimore, Maryland, pp.3198~3203, 1994.
  12. Mohammed A., Vestgard B. and Busch-Vishniac I., “Real Time Implementation of a Robust  $H_{\infty}$  Controller for a 2-DOF Magnetic Micro-levitation Positioner,” *Proc. Of the American Control Conference*, Baltimore, Maryland, pp.3219~3223, 1994.
  13. Doyle J. C., Khargonekar P. P. and Francis B. A., “State Space Solutions to Standard  $H_2$  and  $H_{\infty}$  Control Problem,” *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol.34, No. 8, pp.831~847, 1989.
  14. Grace A., Laub A. J., Little J. N. and Thompson C. M., *Control System TOOLBOX for Use with MATLAB*, The Math Works, 1989.
  15. Ziegler, J. G., and Nichols N. B., “Optimum setting for automatic controllers,” *Trans. ASME*, Vol. 64, pp.759~568, 1942.