

# 능동형 제진테이블의 외란억제를 위한 강인제어기 설계에 관한 연구 A Study on Robust Control System Design for Vibration Suppression of AVIS

박정석\* · 이동훈\*\* · 김영복\*\*\*†

Jung-Suk Park\*, Dong-Hoon Lee\*\* and Young-Bok Kim\*\*\*†

(Received 15 February 2022, Revision received 15 April 2022, Accepted 18 April 2022)

**Abstract :** This paper presents a novel method for designing an active vibration isolation system (AVIS) by robust control theory. Then, the designed system can effectively reject the impact of disturbances on the high precision fabrication table. In particular, the authors provide a robust control scheme to decrease and delete the interactions appeared in the controlled system dynamics such that the control performance is improved. For occupying an robust control performance under the disturbance attack, the  $H_\infty$  approach is introduced. Therefore, the experiment is performed to verify the effectiveness of the proposed method. In the result, the vibration suppression performance is significantly improved.

**Key Words :** Active vibration isolation system, Robust control theory, Experiment, High precision, Disturbance

## 1. 서 론

본 논문에서는 정밀작업용 테이블의 작업완성도를 개선하기 위해, 외부로부터 유입되는 외란의 영향을 억제하기 위한 제어시스템 구축문제에 대해 고찰하고 있다. 본 연구에서의 제어대상인 테이블은, 반도체 제조공정, 초미세 제품가공공정, 초정밀 계측기기를 올려놓고 측정작업을 수행하는 등, 그야말로 고정도 작업에 필요한 기반시설 중의 하나이다. 테이블이 갖추어야 할 가장 중요

한 기본기능은 외부로부터 유입되는 외란의 영향을 가능한 억제하는 것이다. 기계적이고 수동적인 댐퍼장치를 이용해도 외란억제성능을 확보할 수도 있다. 그러나 제조기술수준의 발전은 이러한 수동적 제진장치 기술과 기능을 훨씬 능가하는 성능을 요구하고 있다. 즉, 나노단위 이상의 정밀도가 요구되는 제조공정에서는 수 마이크론 단위의 미세진동도 허용되지 않는다.<sup>1-3)</sup> 즉, 제진성능은 제품정밀도뿐만 아니라 제품생산성, 결과적으로는 기술적 우위를 기반으로 시장경쟁력확보를 위한

\*\*\* 김영복(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-6035-6744)

: 교수, 부경대학교 기계시스템공학전공

\*박정석(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-5670-7246) :

3등 기관사, 부경대학교 실습선 백경호

\*\*이동훈(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-6157-9763) :

조교수, 부경대학교 기계시스템공학전공

\*† Young-Bok Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-6035-6744)

: Professor, Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University.

\*Jung-Suk Park(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-5670-7246)

: 3<sup>rd</sup> Engineer, Training Ship Baekkyong, Pukyong National University.

\*\*Dong-Hun Lee(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-6157-9763)

: Assistant Professor, Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University.

결정적 요소가 되기 때문이다.

이와 같은 기술적 요구수준은, 수동적 댐퍼기술의 한계를 극복하기 위한 노력으로 발전하여 현재는 제어기술을 접목한 능동제진기술의 개발과 이의 실용화 단계에 이르렀다.<sup>4,6)</sup> 즉, 제한적인 외란억제성능을 보다 적극적으로 확장함으로써 다양한 크기와 넓은 주파수대역의 외란을 능동적으로 제어할 수 있게 되었다. 제어기술을 적용함으로써 외란억제성능을 획기적으로 개선할 수 있다는 사실은 선행연구를 통해 이미 증명되었다.<sup>7,9)</sup>

예를 들어 6자유도 운동을 하는 테이블의 운동 특성 파악과 수식화, 이를 기반으로 하여 제어성능을 개선하기 위한 다양한 제어기법의 적용과 시뮬레이션 평가도 수행되었다.<sup>10-14)</sup> 결과적으로 다양한 제어기술의 적용을 통해, 외부 환경으로부터 유입되는 외란을 적극적으로 억제함으로써 작업정밀도를 적극적으로 개선할 수 있다는 것이다.

본 논문에서는 지금까지 수행한 이론적 연구결과를 실험적으로 검증하고자 한다. 제어대상 실험장치는 2 kg 내외 하중에 대응할 수 있도록 설계된 상용제품이다. 제어계 설계를 위한 일반적인 과정, 즉 운동특성파악을 통한 수식모델 도출 및 파라미터 추정을 수행하고 이를 기반으로 제어기를 설계한다. 제진용 테이블이 필요한 이유가 외란을 억제하여 높은 수준의 작업정밀도를 확보하는 것이다. 따라서 장치의 운동특성을 나타내는 물리파라미터의 불확실성도 고려해야 하므로 강인제어기법에 기반하여 제어기를 설계한다. 즉, 강인제어의 대표적인 제어기법이라 할 수 있는  $H_\infty$  제어기 설계법으로 제어기를 설계하고, 실제 시스템에 적용하여 실험을 수행한다. 실험장치에는 PID 제어기가 기본적으로 포함되어 있다. 그래서 본 연구에서 설계하고 적용하는 제어기법과의 성능평가는 용이하게 수행되며, 비교평가를 통해 제안하는 제어기법의 유효성을 검증하도록 한다.

## 2. 제진테이블의 구성과 모델링

본 논문에서 제어대상으로 하는 능동형 제진테

이블은 다자유도 운동을 하므로 구해지는 수식모델도 고차형태로 표현된다. 따라서 상태방정식에 나타나는 물리파라미터를 정확하게 동정하는 것도 어렵다.

이러한 점을 감안해서 강인제어기법에 기반하여 제어기를 설계한다. 특히 외란이 유입되는 위치와 그것이 응답특성에 미치는 영향을 반영하고 평가할 수 있도록 한다.

서론에 기술하였듯이 본 논문에서의 제어대상은 기본적으로 6자유도 운동으로 동특성이 표현된다. 상부는 500 mm[W]×500 mm[L]×10 mm[t]의 강재판이고, 바닥과 상판사이에 댐퍼가 설치되어 있는 구조이다. 소형의 제진테이블이기 때문에 바닥으로부터 유입되는 외란이 상판에 미치는 특성은 대형구조에 비해 상대적으로 단순하다.

따라서 상판의 굽힘 등을 고려하지 않고 상하운동만으로 표현되는 수식모델을 이용한다. 그래서 본 논문에서는 테이블이 좌우대칭 구조라고 가정하고 Fig. 1의 표현에 기반하여 모델링을 수행하고 제어기를 설계하도록 한다.

Fig. 1에서 사용하고 있는 각 파라미터는 아래와 같이 정리한다.

$c_1, c_2$ : 감쇠계수

$d_1, d_2$ : 바닥외란(변위단위)

$F_{s1}, F_{s2}$ : 액추에이터 제어력

$k_1, k_2$ : 스프링상수

$l_1, l_2$ : 상판 무게중심으로부터 양단 지지점까지 수평 거리

$p_1, p_2$ : 상판 양 끝단 변위

$y$ : 상판 중심 변위

$J$ : 상판의 관성모멘트

$\theta$ : 무게중심을 기준으로 한 상판회전각도

Fig. 1에 나타낸 것과 같이 바닥으로부터 유입되는 외란은 댐퍼, 지지대 등을 통해 테이블 상판에 전달된다. 이때 상판에 놓여지는 부가적 장치와, 장치구동으로 발생하는 불확실성은 상판에 직접적으로 영향을 미치게 되고, 제어기 설계를 통해 대응할 수 있어야 한다.

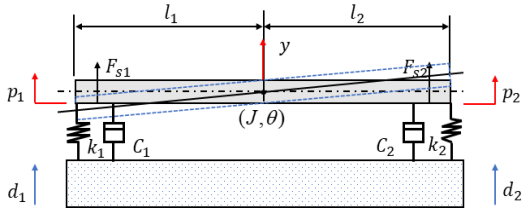


Fig. 1 Schematic drawing of an anti-vibration table

Fig. 1에서 상판은 y축을 중심으로 상하로 운동하고, 상판 무게중심을 기준으로 회전운동이 발생한다고 가정한다. 따라서 테이블과 바닥으로부터 유입되는 외란 등의 불확실성을 고려한 운동방정식은 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 M\ddot{y} - k_1(d_1 - y + l_1\theta) + k_2(y - d_2 + l_2\theta) \\
 - c_1(\dot{d}_1 - \dot{y} + l_1\dot{\theta}) + c_2(\dot{y} - \dot{d}_2 + l_2\dot{\theta}) \\
 = F_{s1} + F_{s2} \quad (1) \\
 J\ddot{\theta} + k_1l_1(d_1 - y + l_1\theta) + k_2l_2(y - d_2 + l_2\theta) \\
 + c_1l_1(\dot{d}_1 - \dot{y} + l_1\dot{\theta}) + c_2l_2(\dot{y} - \dot{d}_2 + l_2\dot{\theta}) \\
 = -l_1F_{s1} + l_2F_{s2}
 \end{aligned}$$

여기서  $M$ 은 테이블 질량이며, 식 (1)을 상태방정식으로 나타내면

$$\begin{aligned}
 \dot{X} &= M^{-1}(AX + BU + Dd) \quad (2) \\
 Y &= CX
 \end{aligned}$$

와 같고, 여기서 상태  $X = [y \ \dot{y} \ \theta \ \dot{\theta}]^T$ , 제어입력  $U = [F_1 \ F_2]^T$ , 그리고  $d = [d_1 \ \dot{d}_1 \ d_2 \ \dot{d}_2]^T$ 는 바닥으로부터 유입되는 외란입력이며,  $A, B, D$  각 행렬은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -k_1 - k_2 & -c_1 - c_2 & k_1l_1 - k_2l_2 & c_1l_1 - c_2l_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_1l_1 - k_2l_2 & c_1l_1 - c_2l_2 & k_1l_1^2 + k_2l_2^2 & c_1l_1^2 + c_2l_2^2 \end{bmatrix} \\
 B &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ -l_1 & -l_2 \end{bmatrix} \quad (3) \\
 D &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_1 & c_1 & k_2 & c_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_1l_1 & -c_1l_1 & k_2l_2 & c_2l_2 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

그리고 테이블 끝단 변위  $p_1, p_2$ 는

$$\begin{aligned}
 p_1 &= y - l_1\theta \\
 p_2 &= y + l_2\theta
 \end{aligned} \quad (4)$$

와 같이 계산되고 출력신호  $Y = [p_1 \ \dot{p}_1 \ p_2 \ \dot{p}_2]^T$ 와 같이 나타낼 수 있다. 따라서 식 (2)의 출력방정식에서 행렬  $C$ 는 다음과 같다.

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -l_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & l_2 & -l_1 \\ 0 & 1 & 0 & l_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

### 3. 제진테이블의 운동특성 분석

본 논문에서 제어대상으로 하는 실험장치를

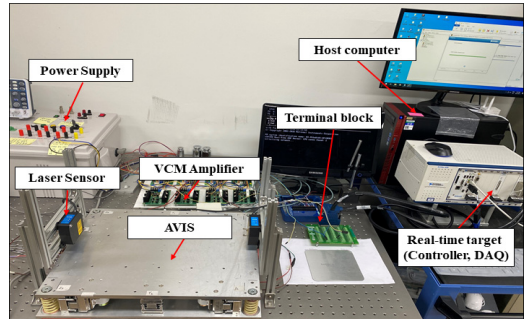


Fig. 2 AVIS and control system apparatus

Table 1 Specification of experimental apparatus

Apparatus	Specification	
Voice Coil Motor (VCM)	Control frequency	0.5~1000[Hz]
	Control scheme	Feedback and Feedforward control
	Power	AC 90~230[V]
Laser Sensor	Measuring range	30±5[mm]
	Measuring frequency	10[kHz]
	Resolution	1[μm]
	Reproducibility	3[μm]
	Accuracy	±10[μm]
Mass of Upper plate	6.605[kg]	
Size of Upper plate	500[mm]×500[mm]×10[mm]	

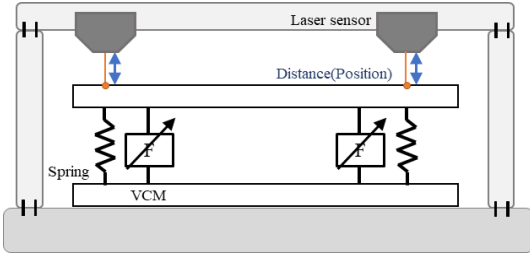


Fig. 3 Schematic of experiment apparatus

Fig. 2에 나타내었다. 테이블은 각 모서리에 설치된 4개의 압축스프링에 의지하는 4축 지지구조이며, 제진용 액추에이터는 좌우, 전후 방향으로 대칭이 되도록 설치하였다. Fig. 2의 사진으로 나타난 실험장치와 제어계측시스템에 대한 상세규격은 Table 1에 정리하였다.

이에 따라 상하운동특성을 측정하기 위한 변위 센서도 대칭 형태로 설치하였다.

결국, 압축스프링만으로는 외란을 억제하는 것이 어렵기 때문에 능동형 댐퍼를 제어함으로써 진동을 적극적으로 억제하는 것이 AVIS 장치의 도입 목적이다. 그래서 본 논문에서는 제어가 가능한 능동댐퍼로 VCM(Voice Coil Motor)를 이용한다.

서론에서 설명하였듯이 2자유도 운동특성만을 고려하여 수식모델을 구하고 이를 기반으로 제어

기를 설계하여 실험을 수행한다. 결과적으로 Fig. 2의 실험장치는 Fig. 3의 개략도로 나타낼 수 있다.

먼저 제어기를 설계하기 위한 절차에 대해 간단히 정리한다. 제어대상에 대한 수식모델은 식 (2)의 상태방정식으로 나타낼 수 있다. 이때 물리 파라미터를 정확하게 파악하는 것은 어렵다. 그래서 실험을 통해 추정하는 것이 일반적이고, 본 연구에서도 이와 같은 통상적인 절차에 따라 파라미터 동정을 수행하여 대표모델을 구한다. 즉, 제어대상에 특정한 입력을 가하고 이때의 출력응답으로부터 파라미터를 추정한다. 본 연구에서는 액추에이터에 일정한 크기의 액추에이터 구동입력 신호를 가하고, 이에 따른 테이블 변위를 출력으로 하여 구한 데이터로 시스템 동정을 진행한다. 즉, 식 (6)에서와 같이  $u_1, u_2$ 는 좌·우측 VCM의 입력신호,  $y_1, y_2$ 는 좌·우측 레이저 센서부터 측정되는 테이블의 변위라 두어 전달함수식으로 표현한다.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

따라서 제어대상의 운동특성은 입력과 출력 간의 관계를 나타내는 전달행렬  $G_{ij} (i, j = 1, 2)$ 를 구하면 파악할 수 있다. 이러한 준비 아래 5 V의 전

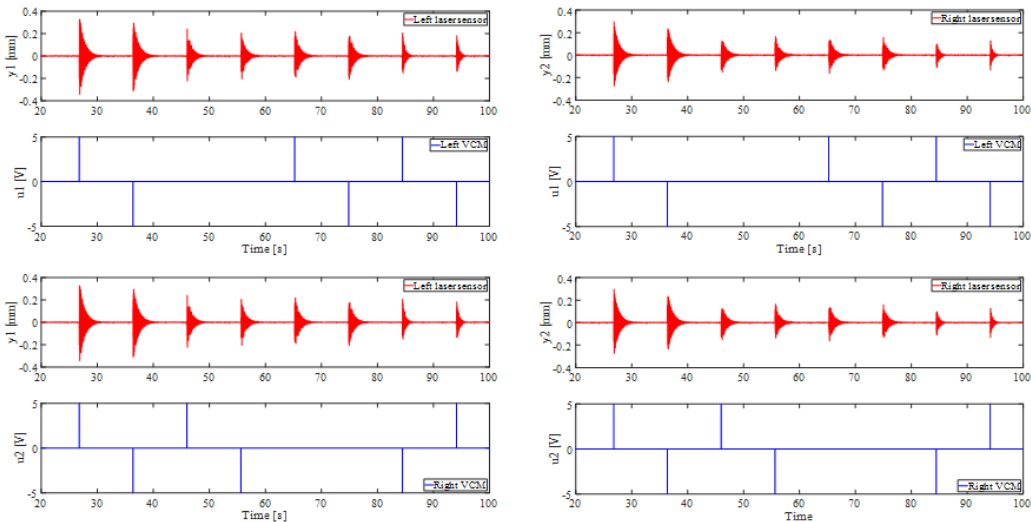


Fig. 4 Time responses (table displacement) for applying the impulse type signal to the actuators

압을 임펄스 형으로 액추에이터에 인가하였다. 이때의 입력에 대한 출력응답을 Fig. 4에 나타내었다. 즉, 입력  $u_1$ 에 대한 두 개의 출력  $y_1, y_2$ , 그리고 입력  $u_2$ 에 대한 두 개의 출력  $y_1, y_2$ 를 각각 나타낸 것이다. 이것을 주파수응답으로 변환하여 나타낸 것이 Fig. 5이다. 그림에서 밝은 청색이 실험결과이다. 이 결과를 기초로 파라미터가 변동하는 등의 불확실성이 포함되었다고 가정하여 7개의 수식모델(identified models)을 구하였고, 수식모델 각각의 주파수응답도 같이 나타내었다.

7개의 수식모델 중 하나를 대표모델(붉은색), 즉 공칭모델로 선정하였다. 공칭모델을 기준으로 하여 그 외 모델과의 차이는 불확실성으로 고려하여 제어기 설계에 반영하게 된다. Fig. 5의 실험 결과로부터 공칭모델인 식 (6)의 전달함수식은 다음 식 (7)과 같이 구하였다.

$$G_{11} = \frac{0.0633s - 182.6}{s^2 + 2.494s + 9251} \quad (7)$$

$$G_{12} = \frac{0.953s - 120.8}{s^2 + 2.562s + 9253}$$

$$G_{21} = \frac{0.2211s - 167.5}{s^2 + 2.91s + 9256}$$

$$G_{22} = \frac{0.9266s - 124.7}{s^2 + 2.455s + 9224}$$

#### 4. 제어기 설계

3장에서 구한 수식모델, 즉 식 (7)을 이용하여 제어기를 설계한다. 먼저 Fig. 6은 테이블에 외력이 작용하는 메커니즘을 나타낸 것이다. 이것은 바닥으로부터의 외란유입 경로와 이것을 억제하기 위한 제어력이 테이블에 인가되는 구조를 설명하고 있다.

강인제어기법으로 제어기를 설계하기 위해, Fig. 6에 표현한 테이블, 댐퍼 및 액추에이터를 하나의 제어대상으로 간주하고, 외란의 영향이 제어 출력에 가능한 나타나지 않도록 제어기를 설계한다. (Fig. 7 참조)

제어기 설계과정에서 고려해야 할 불확실성은 바닥으로부터 유입되는 외란과 운용환경변화에 따른 파라미터변동 등이다. 본 논문에서는 이것을 비구조적 불확실성(unstructured uncertainty)으로 간주하여 제어기설계에 반영한다.

그래서 불확실성을 고려한 경우의 제어대상을 전달함수식으로 나타내도록 한다. 즉, 식 (6)을 불확실성을 포함한 형태로 표현한다. 먼저, 테이블 변위, 바닥외란( $d_i$ )에 의해 발생하는 외력( $F_{di}$ )과 이것을 억제하기 위한 제어력( $F_{si}$ )의 영향을 받으므로 그 관계는 다음 식으로 표현할 수 있다.

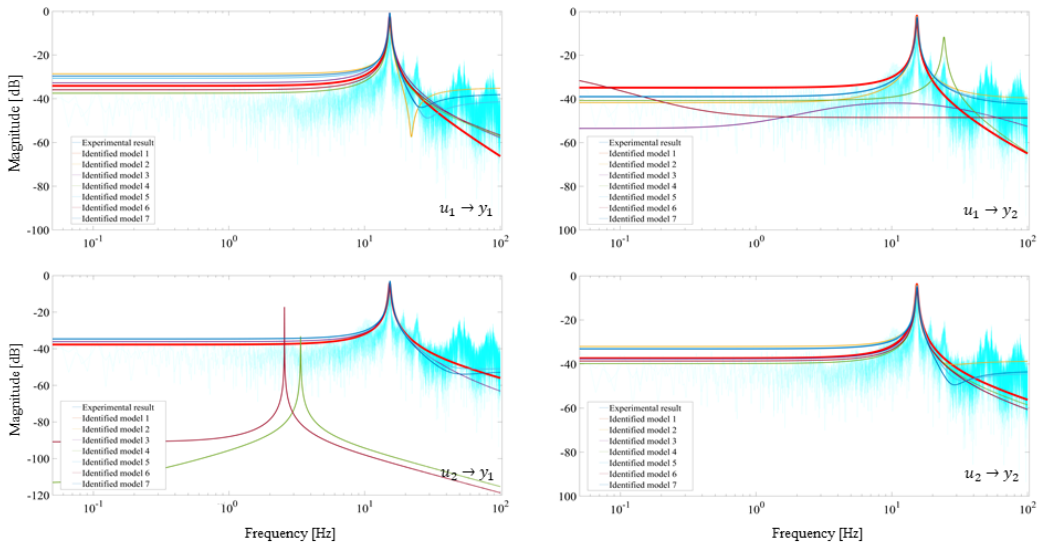


Fig. 5 Frequency responses of AVIS (real plant) and identified models

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{m11} & G_{m12} \\ G_{m21} & G_{m22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{s1} \\ F_{s2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} F_{d1} \\ F_{d2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{u1} & 0 \\ 0 & G_{u2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

이때 식 (8)은 제어력과 테이블 변위와의 상관관계를 나타내고, 식 (9)는 바닥외란이 테이블에 추가적인 변위를 일으키는 힘과의 상관관계를 나타낸다.

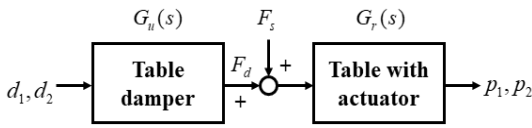


Fig. 6 Disturbance and its rejection force acting mechanism

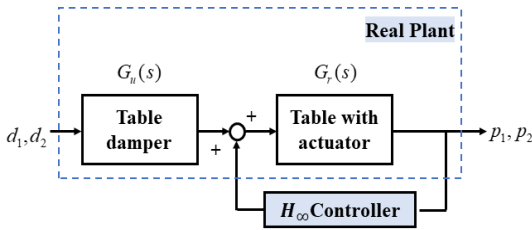


Fig. 7 A robust control system designed by  $H_\infty$  control approach

결국 테이블 운동은 식 (8)에 식 (9)가 더해지는 형태로 나타난다. 여기서  $G_{mij}$ 을 공칭모델의 전달함수라고 하고, 모델링 오차 및 외란을 곱셈형 불확실성으로 고려하면, 불확실성이 포함된 전달함수식은 식 (10) 및 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} = G_r(s) \begin{bmatrix} F_{s1} \\ F_{s2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$G_r(s) = \begin{bmatrix} (1 + \Delta_{m11})G_{m11} & (1 + \Delta_{m12})G_{m12} \\ (1 + \Delta_{m21})G_{m21} & (1 + \Delta_{m22})G_{m22} \end{bmatrix} \quad (11)$$

식 (11)에서  $\Delta_{ij}$  ( $i, j = 1, 2$ )는 외란 및 파라미터 변동을 대표하는 불확실성이다. 따라서  $H_\infty$  제어기 설계법에 기반한 제어계는 Fig. 8과 같이 나타낼

수 있게 된다. 여기서  $G_m(s)$ 는 제어대상,  $W_m(s)$ 는 불확실성을 고려한 가중함수(weighting function)로서 제어대상 입력측으로 유입되는 외란이 반영되도록 적절히 선정한다. 이러한 설정 아래 외란을 적절하게 억제하기 위한 제어기  $K(s)$ 를 설계하는 것이 본 연구의 목적이고, 달리 표현하면 다음의 norm 조건을 만족하는 제어기를 설계하는 것으로 귀착된다.

$$\|T_{zw}\|_\infty < \gamma (> 0) \quad (12)$$

여기서,  $T_{zw}$ 는 외부입력  $w$ 에서 출력  $z$ 까지의 전달함수를 나타낸다. 또한 바닥으로부터 유입되는 외란과 제어대상의 모델링 오차에 대한 불확실성을 고려하기 위해 제어기 설계과정에서 도입한 가중함수는 다음 식 (13)의 조건

$$\|\Delta_m\| \leq \|W_m\| \quad (13)$$

을 만족하도록 가중함수는 아래와 같이 선정하였다.

$$W_m = \begin{bmatrix} W_{m11} & W_{m12} \\ W_{m21} & W_{m22} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$W_{m11} = \frac{300s + 0.0001}{s + 0.005} \quad (15)$$

$$W_{m12} = \frac{300s + 0.0001}{s + 0.005} \quad (16)$$

$$W_{m21} = \frac{270s + 1.0001}{s + 4.008} \quad (17)$$

$$W_{m22} = \frac{270s + 1.0001}{s + 4.008} \quad (18)$$

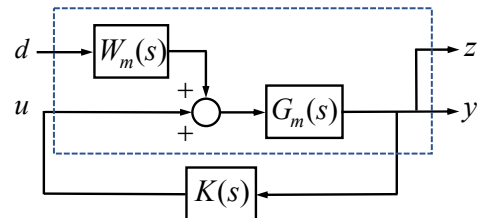


Fig. 8 Generalized plant and feedback system configuration with uncertainty

위의 조건으로부터 설계된 제어기는 식 (19)~(23)과 같다.

$$K = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$K_{11}(s) = \frac{N_{k11}(s)}{D_{k11}(s)} \quad (20)$$

$$N_{k11}(s) = -16.32s^3 + 1.223 \times 10^{-4}s^2 - 1.225 \times 10^{-5}s + 1.137 \times 10^{-8}$$

$$D_{k11}(s) = s^4 + 37.85s^3 + 1.916 \times 10^{-4}s^2 + 3.52 \times 10^{-5}s + 9.093 \times 10^{-7}$$

$$K_{12}(s) = \frac{N_{k12}(s)}{D_{k12}(s)} \quad (21)$$

$$N_{k12}(s) = -2.31s^3 + 3022s^2 - 1.43 \times 10^{-4}s + 2.808 \times 10^{-7}$$

$$D_{k12}(s) = s^4 + 37.85s^3 + 1.916 \times 10^{-4}s^2 + 3.52 \times 10^{-5}s + 9.093 \times 10^{-7}$$

$$K_{21}(s) = \frac{N_{k21}(s)}{D_{k21}(s)} \quad (22)$$

$$N_{k21}(s) = 48.19s^3 + 9709s^2 + 4.696 \times 10^{-5}s + 8.899 \times 10^{-7}$$

$$D_{k21}(s) = s^4 + 37.85s^3 + 1.916 \times 10^{-4}s^2 + 3.52 \times 10^{-5}s + 9.093 \times 10^{-7}$$

$$K_{22}(s) = \frac{N_{k22}(s)}{D_{k22}(s)} \quad (23)$$

$$N_{k22}(s) = 12.85s^3 + 2320s^2 + 1.246 \times 10^{-5}s + 2.214 \times 10^{-7}$$

$$D_{k22}(s) = s^4 + 37.85s^3 + 1.916 \times 10^{-4}s^2 + 3.52 \times 10^{-5}s + 9.093 \times 10^{-7}$$

## 5. 실험 및 고찰

4장에서 강인제어기법으로 설계한 제어기를 적용하여 제어성능을 평가하도록 한다. 비교평가를 위해 PID 제어기를 적용한 경우에 대해서도 실험을 수행하였고, 비교평가를 위한 PID 제어기 이득은 다음과 같다.

Table 2 Conditions for AVIS control experiment

	Condition	Control Option
Case 1	Table (nominal)	Uncontrolled
		PID
		$H_\infty$
Case 2	Table+Additional Mass(2.36[kg]) (uncertainty considered)	Uncontrolled
		PID
		$H_\infty$

$$K_P = 1.8, K_I = 1.5, K_D = 0.00001 \quad (24)$$

제어성능을 평가하기 위해서는 외란뿐만 아니라 파라미터 변동 및 테이블 위에 놓여지는 부하 변동도 고려해야 한다. 그래서 본 연구에서는 Table 2에 나타난 것과 같이 2가지 조건을 설정하여 실험을 진행하였다. Case 1은 파라미터 변동이 없는 공칭계, Case 2는 상판에 2.36 kg의 부가질량이 더해진 경우이다.

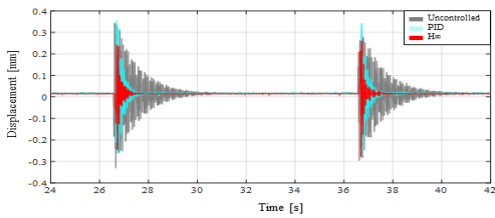
이러한 조건에서 임의의 임펄스 외란이 가해진 경우의 외란억제성능을 평가하였다. 이때의 실험 결과를 Fig. 9~10에 각각 나타내었다. 그림에서 (a)는 외란에 대한 테이블 변위, (b)는 제어력 발생을 위한 액추에이터 구동전압, 마지막으로 (c)는 제어출력에 대한 주파수응답을 나타낸 것이다.

각 그림에서 흑색실선은 제어를 하지 않은 경우, 밝은 청색은 PID 제어기를 적용한 경우이며 강인제어기법을 적용한 경우가 붉은색 실선이다.

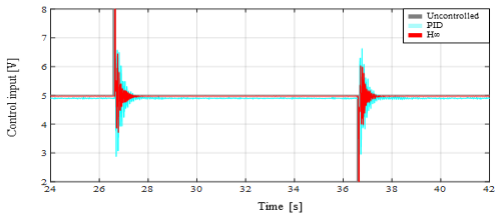
먼저, 파라미터변동이 없는 공칭계에 외란이 인가되었을 때의 응답을 나타내고 있는 Fig. 9를 살펴보자. 그림에 나타난 것과 같이 특정시각에 2회에 걸쳐 임펄스형의 외란을 테이블에 가하였다.

이때의 시간응답인 (a)로부터 알 수 있듯이 강인제어기법을 적용한 경우가 가장 우수한 외란억제성능을 얻을 수 있었다. 특히 이득선도를 나타낸 (c)에서, 강인제어기법을 적용한 경우에는 설정 주파수대역에서 이득값이 상대적으로 작다는 것을 확인할 수 있으며, 이것은 외란억제성능이 개선되었다는 것을 의미한다.

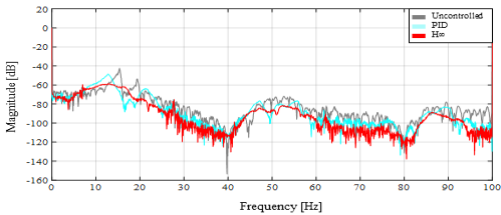
Fig. 10은 설계된 제어계의 강인성을 평가하기



(a) table displacement

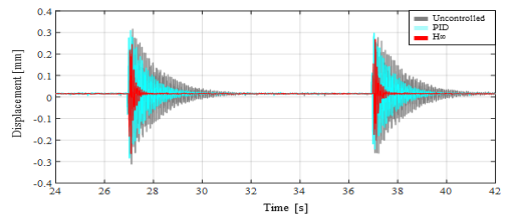


(b) control inputs to the VCM actuator

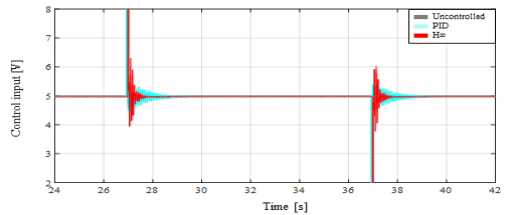


(c) frequency responses

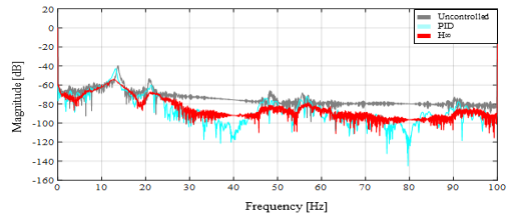
Fig. 9 Experiment results with Case 1 condition



(a) table displacement



(b) control inputs to the VCM actuator



(c) frequency responses

Fig. 10 Experiment results with Case 2 condition

위한 실험결과이다. 즉, 기존 상판에 질량을 추가한 경우의 외란응답을 나타낸 것이다. 공칭계의 외란응답특성과도 거의 차이가 없을 정도로 양호한 외란억제성능을 얻을 수 있다는 것을 확인하였다. 이와 같이, 물리특성이 변하는 경우에도 우수한 외란억제성능을 얻을 수 있으며, 결과적으로 강인제어성능이 보장된다는 것을 확인할 수 있다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 정밀작업용 테이블에 유입되는 외란을 억제하기 위한 제어계 설계문제에 대해 고찰하였다. 상용의 제어대상에 대한 물리특성을 파악하여 수식모델을 구하고, 파라미터변동 및 외란이 유입되는 불확실성에 적극적으로 대응하기 위해 강인제어기법에 기반하여 제어를 설계하

였다. 그리고 설계한 제어기의 유효성을 검증하기 위해 실험을 통해 비교평가도 수행하였다. 본 논문에서 제안한 제어기법은 수동식 댐퍼만 사용하는 경우뿐만 아니라, PID 제어기법을 적용한 경우와는 비교할 수 없을 정도로 우수한 제어성능을 확보할 수 있다는 것을 확인하였다. 또한 테이블에 설치되는 장치가 항상 특징적이고 고정적인 것이 아니므로 상판의 무게 변화도 고려해야 한다. 그래서 부하변동과 외란이 공존하는 경우에도 제어계의 안정성과 외란억제성능이 보장된다는 것을 실험을 통하여 검증하였다.

## 후 기

본 논문은 부경대학교 자율창의연구비(2021년) 지원사업으로 수행된 결과임.



## Author contributions

Y. B. Kim; Conceptualization. J. S. Park; Data curation. D. H. Lee; Formal analysis. J. S. Park; Funding acquisition. J. S. Park; Investigation. Y. B. Kim; Methodology. D. H. Lee; Software. Y. B. Kim; Supervision. D. H. Lee; Validation. J. S. Park; Writing-original draft. Y. B. Kim; Writing-review & editing.

## References

1. Z. Lu and R. Zhu, 2006, "Simulation Study of Robust  $H_{\infty}$  Control System for the Optical Ultra-precision Vibration Isolation System", The Proceeding of the Multiconference on "Computational Engineering in Systems Application", pp. 1787-1797. (<https://doi.org/10.1109/CESA.2006.313603>)
2. J. P. Hong and K. Y. Park, 2010, "Design and Control of Six Degree-Of-Freedom Active Vibration Isolation Table", Review of Scientific Instruments, Vol. 81, No. 035106, pp. 1-6. (<https://doi.org/10.1063/1.3298605>)
3. L. Du, L. Ji, Y. Luo, S. Shao and M. Xu, 2021, "Simulation and Experiment of An Active-Passive Isolator for Micro-Vibration Control of Spacecraft", 15<sup>th</sup> Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves and Device Applications (SPAWDA), pp. 227-232. (<https://doi.org/10.1109/SPAWDA51471.2021.9445543>)
4. Y. Nakamura, M. Nakamura, M. Kura, M. Yasuda and T. Fujita, 2007, "Application of Active Micro-Vibration Control System Using a Giant Magnetostrictive Actuator", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 18, No. 11, pp. 1137-1148. (<https://doi.org/10.1177/1045389X06072365>)
5. Y. Gao and L. Li, 2008, "Model of the Active Vibration Isolation Platform with Magnetostrictive Actuators", 2008 IEEE International Conference on Automation Logistics, pp. 346-350.
6. S. M. Kim, S. Wang and M. J. Brennan, 2011, "Dynamic Analysis and Optimal Design of a Passive and an Active Piezo-Electrical Dynamic Vibration Absorber", Journal of Sound and Vibration, Vol. 330, No. 4, pp. 603-614. (<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2010.09.004>)
7. Z. Qianghong, Z. Shijian, L. Jingjun and Z. Xin, 2010, "Study on the Application of H-infinity Control to Double-Layer Vibration Isolation System", 2010 Second International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, pp. 274-279. (<https://doi.org/10.1109/IHMSC.2010.169>)
8. M. A. Beijen, M. F. Heertjes, H. Butler and M. Steinbuch, 2017, " $H_{\infty}$  Feedback and Feedforward Controller Design for Active Vibration Isolators", IFAC-Papers(Online), Vol. 50, No. 1, pp. 13384-13389. (<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2413>)
9. H. Kwakernaak, 1993, "Robust Control and  $H_{\infty}$  Optimization Tutorial Paper", Automatica, Vol. 29, No. 2, pp. 255-273.
10. M. H. Kim, H. Y. Kim, H. C. Kim, D. Ahn and D. Gweon, 2016, "Design and Control of a 6-DOF Active Vibration Isolation System Using a Halbach Magnet Array", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 21, No. 4, pp. 2185-2196. (<https://doi.org/10.1109/TMECH.2016.2539349>)
11. H. G. Gil and K. S. Kim, 2010, "Development of a 6-DOF Active Vibration Isolation System Using Voice Coil Motor", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 20, No. 7, pp. 637-643. (<https://doi.org/10.5050/KSNVE.2010.20.7.637>)
12. J. M. Kim and T. K. Nam, 2013, "Study on the Control of VCM and Its Application to the Vibration Isolator", Journal of Advanced Marine Engineering and Technology, Vol. 37, No. 1, pp. 91-98.

- (<https://doi.org/10.5916/jkosme.2013.37.1.91>)
13. R. Banik and D. G. Gweon, 2007, "Design and Optimization of Voice Coil Motor for Application in Active Vibration Isolation", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 137, No. 2, pp. 236-243.  
(<https://doi.org/10.1016/j.sna.2007.03.011>)
14. H. J. Kim, D. H. Lee, H. C. Park and Y. B. Kim, 2020, "Direct Disturbance Suppression System Design for High Precision Fabrication Table", *Transaction of the Korea Society of Mechanical Engineers(A)*, Vol. 44, No. 11, pp. 843-853.  
(<https://doi:10.3795/KSME-A.2020.44.11.843>)