

정밀작업용 6자유도 제진시스템의 출력피드백 기반 최적제어계 설계 Optimal Control Design with Output Feedback for 6-DoF Active Vibration Isolation System

박정석* · 응엔탄녹** · 김영복*** †

Jung-Suk Park*, Tan-Ngoc Nguyen** and Young-Bok Kim*** †

(Received 06 August 2025, Revision received 25 October 2025, Accepted 27 October 2025)

초록 : 본 논문에서는 고정밀 제조 장비의 진동 억제 성능 향상을 목적으로 능동형 제진시스템의 제어기 설계 및 성능 평가 문제에 대해 고찰하였다. 제어대상은 6자유도 운동 특성을 갖는 플랫폼으로, 시스템 동역학을 속도 기반 상태방정식으로 수식화하고 출력피드백 기반의 최적제어기법으로 제어기를 설계하였다. 제어기는, 진동억제성능과 제어입력의 에너지 소비 간의 균형을 고려하여 설정한 이차 성능지표를 최소화하는 방식으로 최적 제어칙을 도출하였다. 제안된 제어기법의 유효성은 수동형 제진시스템 및 PD 제어기와 비교실험을 통해 검증하였으며, 그 결과 충격 외란에 대한 진동 억제 성능과 상호 간섭 억제 효과가 우수함을 확인하였다.

키워드 : 6자유도, 능동형 제진시스템, 고정밀 장비, 출력 피드백, 진동억제

Abstract : This paper presents the controller design and performance evaluation of an Active Vibration Isolation System (AVIS) aimed at enhancing vibration suppression in high-precision equipment. The target system is a platform with six degrees of freedom (6-DoF), and its dynamic behavior is formulated as a velocity-based state-space model. An output feedback-based Linear Quadratic Regulator (LQR) controller is designed to minimize a quadratic performance index that balances vibration attenuation and control effort. The effectiveness of the proposed control strategy is experimentally validated through comparisons with a passive vibration isolation system and a conventional proportional-derivative (PD) controller. The results confirm that the proposed controller provides superior vibration isolation and effectively suppresses cross-axis coupling under external disturbances.

Key Words : 6-DoF, AVIS, High-Precision Equipment, Output Feedback Control, Vibration Isolation

*** † 김영복(<https://orcid.org/0000-0001-6035-6744>) : 교수,
국립부경대학교 기계시스템공학전공
E-mail: kpjiwoo@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6197
*박정석(<https://orcid.org/0000-0001-8165-7773>) : 2등 기관
사, 국립부경대학교 실습선 백경호
**응엔탄녹(<https://orcid.org/0000-0002-0097-6391>) : 교수,
호치민시 기술교육대학교 차량·에너지공학부

*** † Young-Bok Kim(<https://orcid.org/0000-0001-6035-6744>) :
Professor, Major of Mechanical System Engineering, Pukyong
National University.
E-mail: kpjiwoo@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6197
*Jung-Suk Park(<https://orcid.org/0000-0001-8165-7773>) : 2nd
Engineer, Training Ship Backkyong, Pukyong National University.
**Tan-Ngoc Nguyen(<https://orcid.org/0000-0002-0097-6391>) :
Professor, Faculty of Vehicle and Energy Engineering, Ho Chi
Minh City University of Technology and Education.

1. 서 론

지난 수십 년간 과학기술의 발전은 정밀기계 및 장비의 성능향상을 가속화시켜 왔다. 오늘날에는 초고속 제조로부터 나노미터 수준의 이미징 장비에 이르기까지, 다양한 첨단 시스템들이 점차 더 빠른 속도, 높은 정밀도, 그리고 우수한 안정성을 요구받고 있다. 이러한 기술적 요구는 반도체 공정, 생체 의료 영상, 우주 탐사, 중력과 검출 등과 같은 분야에서 활용되는 고정밀 장비의 발전으로 이어졌다. 이들의 응용 분야에서는 서브마이크론, 심지어 서브나노미터 수준의 정밀도가 새로운 기준으로 자리잡고 있다.^{1,3)}

그러나 이러한 초정밀 시스템이 점차 복잡하고 정밀해짐에 따라 외란, 특히 기계적 진동에 대한 취약성도 함께 증가하고 있다. 진동의 원인은 내부의 기기 및 부품 이동으로 발생하는 기계적 운동뿐 아니라, 외부 환경의 불규칙한 외력이나 인접 장비로부터 전달되는 구조적 진동 등 매우 다양하다. 이러한 진동은 발생 원인에 무관하게 본질적으로 불가피하며, 측정 신호의 왜곡, 제어 성능 저하, 시스템 구조적 피로 누적 등에 대한 문제로 이어지게 된다. 따라서 고정밀 장비의 성능을 안정적으로 유지하고 작업 수준을 향상시키기 위해서는, 외란 억제 및 진동 격리를 효과적으로 수행할 수 있는 능동적인 진동 제어시스템의 개발이 필수적이다.⁴⁾

앞서 언급한 바와 같이, 진동 절연은 고정밀 장비의 안정성을 유지하고 성능 저하를 방지하는데 핵심적인 역할을 한다. 이를 위해 현재까지 두 가지 주요 접근 방식이 널리 활용되고 있으며, 각각 수동형 제진(Passive Vibration Isolation System, PVIS)과 능동형 제진(Active Vibration Isolation System, AVIS) 방식으로 구분된다.

수동형 제진시스템은 설치 장소와 고정밀 장비가 탑재된 플랫폼 사이에 스프링 및 감쇠기와 같은 기계적 요소를 삽입하여 진동을 차단하는 방식으로, 구조가 단순하고 별도의 전력이 필요하지 않기 때문에 에너지 효율성이 높고 비용 측면에서도 경제적이라는 장점을 갖는다. 그러나 PVIS는

시스템 외란이 변화하거나 주파수 응답 특성이 복잡한 상황에 적응하기 어렵고, 특히 저주파수 영역에서 절연 성능이 저하되며, 고유 공진 주파수 영역에서는 오히려 진동이 증폭되는 문제가 발생한다. 이러한 특성은 고정밀도와 높은 안정성이 요구되는 응용 분야에서 수동형 시스템의 적용을 제한하는 주요 요인이다. 이러한 한계를 극복하기 위해 AVIS가 제안되었다. AVIS는 PVIS와 유사한 기계적 기반 구조를 유지하되, 상부 및 하부 플랫폼 사이에 센서와 액추에이터를 추가하여 외란에 실시간으로 반응하며 진동을 능동적으로 제어할 수 있다. 이를 통해 다양한 주파수 대역에서 일관된 진동 억제 성능을 확보할 수 있으며, 특히 복잡한 동적 환경에서도 안정적인 제진 효과를 기대할 수 있다. AVIS의 효과적인 운용을 위해서는 고속 응답성과 강인성을 갖춘 고급 제어 알고리즘의 적용이 필수적이다.^{5,6)}

기존의 관련 연구에서는 속도와 변위, 변위와 가속도, 또는 두 종류의 가속도 센서를 결합하여 정밀한 운동제어를 구현한다. 반면, 본 연구에서는 시스템 피드백을 위해 단일 센서인 속도 지오폰 센서만을 사용하는 간단한 접근 방식을 채택하였다. 이는 속도 센서가 동적 운동에 매우 민감하고 설치가 용이하며, 비용 면에서도 효과적이라는 장점이 있기 때문이다. 특히, 가속도 센서는 노이즈에 취약하고, 변위 센서는 고가이며 환경 조건에 민감한 경향이 있다.^{7,8)} 속도 센서만을 사용하면으로써 시스템 복잡성을 낮추면서도 효과적인 동적 모니터링과 제어성능을 확보할 수 있다. 또한 액추에이터는 일반적으로 압전 스택, 공압식, 보이스 코일 모터(Voice Coil Motor, VCM)로 분류된다. 첫 두 가지는 각각의 장점이 있으나 고비용, 환경 민감성, 설치에서 복잡함 등의 단점이 있다.^{9,10)} 본 연구에서는 구조가 간단하고 선형 응답 특성을 가지며, 비용 효율성이 우수한 VCM을 채택하였다. 이는 특히 소형 AVIS 애플리케이션에 적합하다.¹¹⁾

제어시스템은 AVIS에서 또 다른 핵심 구성 요소이다. 일반적으로 사용되는 방법 중 하나는 모달 분해법이며, 두 개의 가속도 센서와 VCM을 활

용해 6개의 복합 비선형 피드백(CNF) 제어기를 설계하였다.¹²⁾ 해당 제어기는 전통적인 PID 제어기보다 응답 안정 시간, 전달특성 및 오버슈트 측면에서 향상된 성능을 보였으나, 상태 변수가 많아 설계 과정이 복잡하다는 한계가 있다. 한편 선형행렬부등식(LMI)을 기반으로 한 비간섭화 제어 전략이 제안되었고,¹³⁾ 강인한 H_∞ 제어를 적용하여 축 간 상호 간섭 작용을 외란으로 간주하는 방식이 제시되었다.¹⁴⁾ 두 방법 모두 시뮬레이션에서는 유효한 결과를 얻었지만, 실험적 검증이 부족하였다. 또한 피드포워드 기반 상호 간섭 억제와 혼합 감도 함수를 도입한 H_∞ 제어 기반 강인한 외란 억제시스템이 제안되었으며, 6자유도 AVIS에서 실험을 통해 효과가 입증되었다. 그러나 이 접근법 역시 가중 함수의 선택과 파라미터 튜닝 과정이 복잡하다는 단점이 있다.¹⁵⁾

따라서 본 연구에서는 구조가 간단하면서도 실용적인 출력피드백 기반의 최적제어시스템을 제안한다. 제안된 시스템은 보이스 코일 모터를 액추에이터로 사용하고, 지오폰을 속도 센서로 활용하여 시스템의 동작을 실시간으로 모니터링하며, 외란의 영향을 억제시키고 축 간 상호 간섭작용을 최소화함으로써 플랫폼의 전체의 안정성을 유지하는 것을 목표로 한다. 제어 성능은 주요 제어 축에서 뿐 아니라 상호 간섭작용이 발생하는 방향에서도 평가된다. 제안된 방법의 유효성과 실용성을 입증하기

2. 시스템 모델링

본 연구에서 제안하는 AVIS의 전체 구성은 Fig. 1에 제시되어 있다. 시스템은 작업 장비가 탑재되는 상부 플랫폼과 이를 지지하는 하부 플랫폼으로 구성된다. 수동 구조는 스프링과 플레이트 가이드(plate guide)로 구성되어, 상부 플랫폼의 6자유도 운동을 가능하게 하면서도 특정 상황에서 과도한 변위를 억제하는 역할을 한다.

본 연구에서 적용된 plate guide는 운동을 물리적으로 구속하는 일반적인 가이드와는 달리, VCM의 보호를 위한 제한 장치로 설계되었다. 해당 간

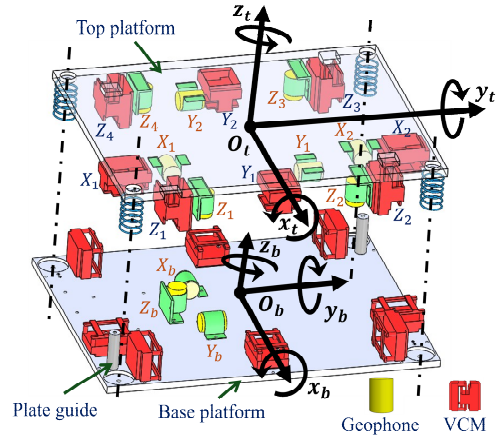


Fig. 1 Structure of the proposed Active Vibration Isolation System (AVIS)

격은 각각 수직 방향 30 mm, 수평 방향 290 mm이며, 이는 VCM의 최대 작동 범위(32 mm)보다 충분히 크게 확보되어 있다. 따라서 정상 작동 시 상부 플랫폼은 6자유도 운동을 자유롭게 수행하면서도 진동 절연이 가능하도록 설계되었다.

$\mathbf{x}_t = [x_t \ y_t \ z_t \ \theta_{xt} \ \theta_{yt} \ \theta_{zt}]^T$ 는 상부 플랫폼의 운동 상태이며, 상부 플랫폼 기준 원점 O_t 에 대한 이동(x_t, y_t, z_t)과 회전($\theta_{xt}, \theta_{yt}, \theta_{zt}$)을 포함한다.

$\mathbf{x}_b = [x_b \ y_b \ z_b \ \theta_{xb} \ \theta_{yb} \ \theta_{zb}]^T$ 는 하부 플랫폼의 거동(상태)이며, 기준 원점 O_b 에 대한 이동(x_b, y_b, z_b)과 축을 중심으로 한 회전 성분($\theta_{xb}, \theta_{yb}, \theta_{zb}$)을 포함한다. 그리고 $\mathbf{F}_{vj}$ ($j = x, y, z$)는 제어입력이고, 해당 j 방향에 대한 합성 제어력이다.

따라서 본 시스템의 동역학은 다음과 같이 상태방정식으로 기술된다.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}} &= \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}_v\mathbf{U}_v + \mathbf{D}_x \\ \mathbf{Y} &= \mathbf{C}\mathbf{X} \end{aligned} \quad (1)$$

각 항의 물리적 의미는 다음과 같다.

$\mathbf{X} = [x_t^T \ x_b^T]^T (\in \mathbf{R}^{12})$ 는 상부 플랫폼의 6자유도 속도 성분으로 구성된 상태벡터이다.

$\mathbf{U}_v (\in \mathbf{R}^6)$ ($\mathbf{U}_v = [F_{vx}^T \ F_{vy}^T \ F_{vz}^T \ M_{\theta x}^T \ M_{\theta y}^T \ M_{\theta z}^T]^T$)은 시스템의 각 자유도 방향에 작용하는 제어입력

벡터이고 6자유도에 해당하는 힘과 토크로 구성된다.

$Y = \dot{x}_t (\in \mathbb{R}^6)$ 은 시스템의 출력벡터로서 측정 가능한 6자유도 속도 성분을 포함한다.

$F_t (\in \mathbb{R}^6)$ 은 상부 플랫폼에서 발생하는 외란을 나타내며, $A, B_v, C, M_T, A_1, A_2, D_1, D_2$ 는 공칭 시스템 모델을 구성하는 기준 계수 행렬이다.¹⁶⁾

3. 제어계 설계

본 연구의 목적은 외란에 의해 유발되는 진동을 효과적으로 억제함으로써 상부 플랫폼에 탑재된 고정밀 장비가 안정적으로 동작하도록 하는 것이다. 이러한 안정성 확보는 특히 미세한 진동에도 민감한 마이크로 현미경, 반도체 제조 공정의 고정밀 장비 운용 환경에서 매우 중요하다.

본 시스템에서 적용된 모든 VCM은 상부 및 하부 플랫폼에 분리 배치되며, 각 VCM의 구동은 액추에이터 자체의 축방향력에 의해 구동된다. VCM은 물리적으로 다른 자유도를 구속하지 않도록 설계되었으며, 외부 구조적 연결 없이 자체적인 리니어 가이드 특성만을 활용한다. 따라서 각 VCM은 해당 방향의 운동에 대해서만 힘을 전달하고, 다른 방향의 운동은 구속하지 않아 상부 플랫폼의 6자유도 운동을 보장한다. 이로써 제어대상인 AVIS는 6자유도의 복합적인 운동 특성을 지니게 되며, 시스템 간 상호 간섭 억제와 함께 전체 시스템의 강인성 확보가 요구된다.

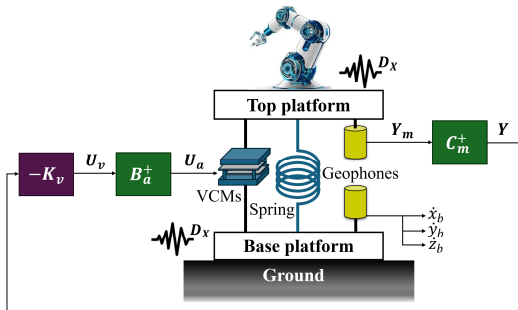


Fig. 2 Schematics diagram of the proposed output-feedback control system

이를 해결하기 위해 본 연구에서는 출력 피드백 기반의 최적 제어를 설계하였다. 제한된 제어기는 외란에 대한 강인한 억제 성능과 자유도 간 상호 간섭작용의 최소화를 통해 시스템 전체의 정밀도와 안정성을 향상시키는 것을 목표로 한다.

Fig. 2는 6자유도 AVIS를 위한 출력 피드백 제어계 구조를 나타낸다. 이때 제어입력은 다음과 같은 피드백 법칙에 따라 구성된다.

$$U_v = -K_v Y \quad (2)$$

여기서, $K_v (\in \mathbb{R}^{6 \times 6})$ 는 최적 이득행렬이며, 다음 조건을 만족해야 한다.¹⁷⁾

$$\begin{aligned} 0 &= A_c^T P + P A_c + C^T K_v^T R K_v C + Q \\ 0 &= A_c S + S A_c^T + X_E \\ K_v &= R^{-1} B_v^T P S C^T (C S C^T)^{-1} \end{aligned} \quad (3)$$

따라서 식 (2)의 제어 법칙은 다음의 이차 성능지표를 최소화하는 방식으로 도출된다.

$$J = E \int_0^\infty (X^T Q X + U_v^T R U_v) dt \quad (4)$$

이 성능지수를 최소화할 때의 최적값은 다음과 같다.

$$J = tr(P X_B) \quad (5)$$

여기서, $R (\in \mathbb{R}^{6 \times 6})$ 는 제어입력에 대한 가중치 행렬이며 $R > 0$ 을 만족한다. $Q (\in \mathbb{Q}^{12 \times 12})$ 는 상태에 대한 출력 가중치 행렬이며, $Q \geq 0$ 를 만족한다. 두 행렬은 시스템의 제어 에너지와 상태 억제 성능 간의 균형을 반영하여 설정된다.

또한 식 (3)에서 $A_c = A - B_v K_v C$ 는 페루프시스템 행렬이고, 식 (5)에서 $X_B = E[X(0)X(0)^T]$ 로 초기 상태의 공분산 행렬을 나타낸다. 참고로 최적 이득 행렬 계산 알고리즘은 Table 1에 정리하였다.¹⁸⁾

Table 1 Solution algorithm

Step	
1. Initialize	Set $k = 0$ Determine gain K_{v0} so that $A - B_v K_{v0} C$ is asymptotically stable
2. k^{th} iteration	Set $A_k = A_k = A - B_v K_{vk} C$ Solve for P_k and S_k in $0 = A_k^T P_k + P_k A_k + C^T K_{vk}^T R K_{vk}^T C + Q$ $0 = A_k S_k + S_k A_k^T + X_E$ Set $J_k = tr(P_k X_E)$ Evaluate the gain update direction: $\Delta K = R^{-1} B_v^T P S C^T (C S C^T)^{-1} - K_{vk}$ where a is chosen so that $A - B_v K_{v(k+1)} C$ is asymptotically stable $J_{k+1} = \frac{1}{2} tr(P_{k+1} X_E) \leq J_k$ If J_{k+1} and J_k are close enough to each other $\rightarrow$ Step 3 Otherwise, set $k = k + 1$ and go to back 2
3. Terminate	Set $K_v = K_{v(k+1)}$, $J = J_{k+1}$ Stop

제안된 AVIS 시스템은 6자유도 제어를 이론적으로는 6개의 센서 및 액추에이터만으로도 제어가 가능하지만, 제어 성능 향상과 구조적 강건성 확보를 위해 8개의 VCM과 8개의 속도 센서를 채택하였다. 이는 특히 플랫폼 주변부에서 발생하는 비대칭 외란을 효과적으로 억제하고, 회전 운동 제어(roll, pitch, yaw)의 관측성을 높이기 위한 목적이다. 또한 과잉구동(over-actuation) 구조는 할당 행렬의 조건수 개선과 센서 및 액추에이터 고장 시에도 시스템이 정상 작동을 유지할 수 있는 내결함성(fault tolerance)을 제공한다. 따라서 제어입력은 6개의 출력에 의해 정의되지만, 실제 시스템에서는 8개의 VCM과 8개의 속도 센서를 사용되므로, 각 VCM에 대한 실제 제어입력 값을 계산해야 한다. 이 과정에서 지오폰(geophone) 센서를 통해 획득한 속도 신호는 6자유도 속도로 변환되어야 한다.

이에 따라 8개의 액추에이터에 대한 실제 제어입력 U_a 는 다음과 같이 계산된다.

$$U_a = B_a^+ U_v, B_a^+ = B_a^T (B_a B_a^T)^{-1} \quad (6)$$

B_a 는 제어입력을 할당하기 위한 행렬이며, B_a^+ 는 무어-펜로즈 유사역행렬(pseudo-inverse)로 정의되며, 입력/출력 수보다 많은 센서나 액추에이터를 사용하는 과잉 구동 시스템에서 주로 활용된다.

실제 센서로부터 획득한 속도 신호 Y_m 으로부터 시스템의 6자유도 속도 출력 Y 는 다음 식으로 환산하여 구해진다.

$$Y = C_m^+ Y_m, C_m^+ = (C_m^T C_m)^{-1} C_m^T \quad (7)$$

여기서, C_m 은 센서 배치에 따른 출력 할당행렬이며, C_m^+ 는 그 유사역행렬이다. 해당 계산에 사용된 U_a, Y_m, B_a, C_m 에 대한 상세한 정의 및 구성 방식은 앞선 연구에서 제시된 바 있다.¹⁶⁾

비교 평가를 위해 전통적인 비례-미분(PD: Proportional-Derivative) 제어기도 함께 설계하였다. 따라서 PD 제어기의 제어입력은 식 (8)과 같이 정의된다.

$$U_v = K_P \dot{x}_t + K_D \ddot{x}_t \quad (8)$$

여기서, K_P 와 K_D 는 위치 오차를 측정하지 않고, 속도 센서를 통해 측정된 값을 기반으로 제어를 수행하였다. 속도 항에 대한 비례 이득 K_P 가 속도 항에 대한 미분 이득 K_D 를 적용한 방식으로 속도-가속도 피드백 기반의 제어 방식이다. 본 연구에서는 Matlab의 PID 이득 조정 툴을 이용하여 시행착오 방식으로 적절한 이득값을 선택하였다. 최종적으로 선정된 이득값은 다음과 같다.

$$K_P = \text{diag}[100, 80, 700, 10, 10, 10], \quad (9)$$

$$K_D = \text{diag}[0.3, 0.3, 0.3, 0.3, 0.3, 0.3]$$

4. 실험연구

Fig. 3에 나타난 바와 같이, 본 연구에서 사용된 실험 장치는 상부 및 하부 플랫폼으로 구성된 능동형 제진시스템이다.(Fig. 1 참조) 제진 시스템은

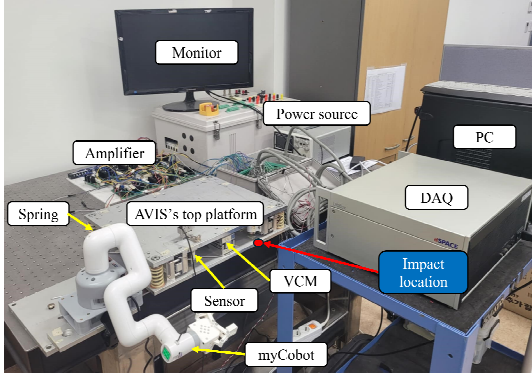


Fig. 3 Experiment setup

기계적 스프링, 센서 및 액추에이터 외에도 신호 증폭기, 데이터 수집 장치(DAQ), 전원 공급 장치 등으로 구성하였다.

상부 및 하부 플랫폼의 운동은 지오픈 센서를 이용하여 측정되며, 이 센서로부터 획득된 신호는 제어기의 피드백 신호로 활용된다. VCM은 제어 입력에 따른 구동력을 생성하는 액추에이터로 사용되며, 센서로부터 수집된 데이터를 기반으로 dSPACE DS6101 장치가 신호를 처리하고 증폭기를 통해 VCM을 제어한다. 하부 플랫폼으로 외란을 가하기 위한 장치로는 myCobot-280이 사용되었으며, 전체 시스템에 필요한 전력은 별도의 전원 공급 장치를 통해 공급된다.

실험은 수동형 제진시스템, 전통적인 PD 제어기를 적용한 AVIS, 그리고 제안된 출력 피드백 최적 제어를 적용한 AVIS, 총 세 가지 조건에서 수행되었다. 실험 시나리오는 Fig. 3과 같이 하부 플랫폼의 특정 지점에 x_b 방향으로 로봇을 이용해 충격력을 인가하는 방식으로 설계하였다. 로봇 암은 사전에 학습되어 있어 각 조건에서 동일한 위치와 동일한 세기의 충격력이 반복적으로 가해지도록 하였다.

AVIS에 대한 시스템 파라미터는 앞선 연구를 통해 제시하였으며,¹⁶⁾ 이차 성능지수 해석을 위해 Matlab의 LQR 함수를 활용하였다. 이때 가중치 행렬 Q 와 R 은 제어 성능과 물리적 제한을 동시에 고려하여 각각 다음과 같이 설정하였다.

$$Q = \text{diag}[4400, 900, 5000, 90, 90, 240, \dots, 4400, 900, 5000, 90, 90, 240] \quad (10)$$

$$R = \text{diag}[1.5, 0.9, 0.8, 0.85, 0.85, 0.85]$$

이때, 가중치 행렬 Q 는 플랫폼의 형상과 진동 억제에 우선순위를 고려하여 상태 변수별로 차등 적용하였다. 각 자유도에 대해 위치와 속도 항에는 동일한 비중을 두었으며, 이 중에서도 병진 방향에는 더 높은 가중치를 부여하였다. 또한 제어 입력 가중치 행렬 R 은 각 제어입력 축의 특성을 반영하여 비대칭적으로 구성하였다. x_t -축은 상부 플랫폼의 폭이 짧고 민감도가 낮아 제어입력을 줄이기 위해 상대적으로 큰 가중치를 부여하였다. 반대로 z_t -축은 외란이 크게 작용하고 감쇠가 우선적으로 요구되므로 작은 가중치를 설정하였다. 회전 방향의 경우 제어 권한 확보는 중요하지만, 과도한 입력을 방지해야 하므로 중간 정도의 가중치를 부여하였다.

이러한 설정을 통해 최적의 이득행렬 K_v 는 다음과 같이 도출되었다.

$$K_v = \begin{bmatrix} 50.314 & 0 & 0.0012 & 0 & 0.013 & 0 \\ 0 & 28.004 & 0 & -0.015 & 0 & -0.5918 \\ 0.0023 & 0 & 68.351 & 0 & 0.0241 & 0 \\ 0 & -0.016 & 0 & 1.283 & 0 & -2 \times 10^{-4} \\ 0.023 & 0 & 0.025 & 0 & 2.771 & 0 \\ 0 & -0.627 & 0 & 0.001 & 0 & 9.801 \end{bmatrix} \quad (11)$$

이에 따라 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과에 대해 설명한다.

Fig. 4는 하부 플랫폼에 충격력을 인가한 경우 상부 플랫폼 중심에서 발생하는 진동에 대한 제진 성능을 비교한 결과를 나타낸 것이다.

주요 제어방향인 x_t 축에서는 충격 이후 수동형 시스템의 경우(청색 점선), 진동 안정 시간이 약 5.5초로 가장 길게 나타났다. PD 제어기를 적용한 경우(적색 파선)에는 약 1.7초 만에 안정화되었으

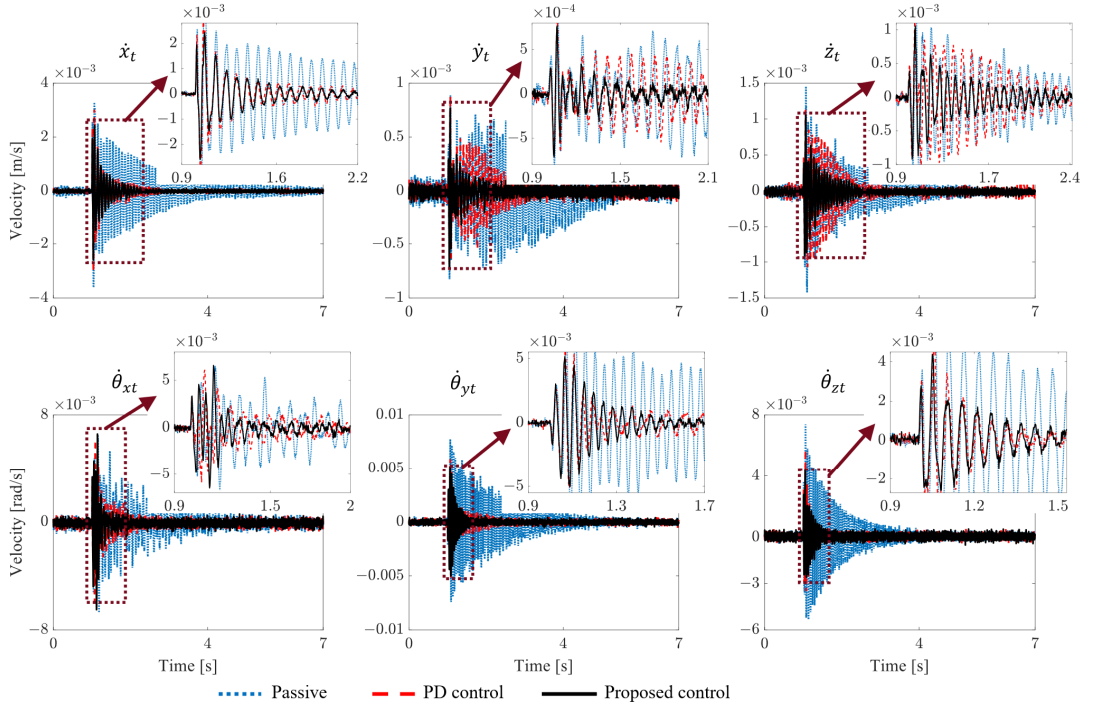


Fig. 4 Velocity responses of 6-DoF motion at the platform center

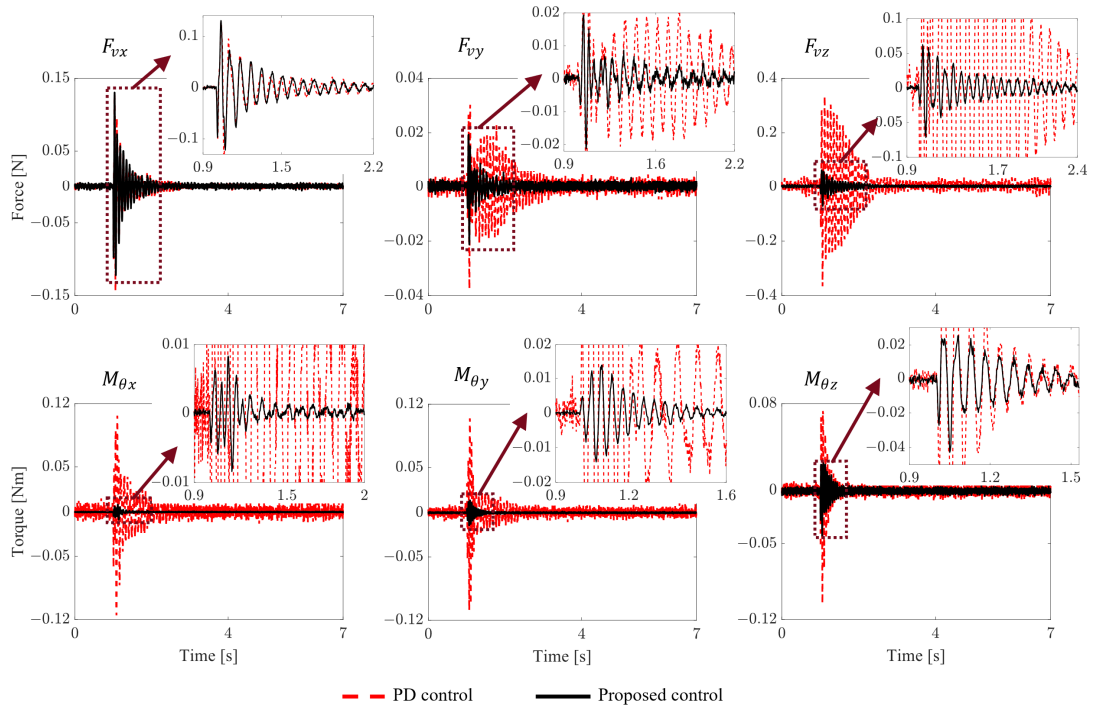


Fig. 5 Control effort of 6-DoF AVIS

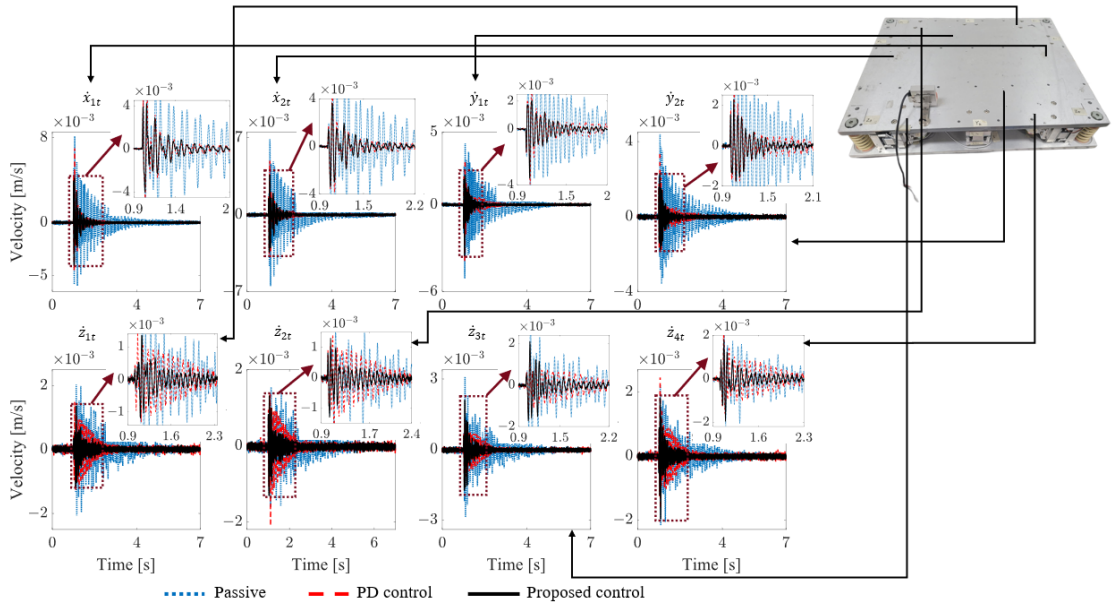


Fig. 6 Velocity Responses at the Edge of the Top Platform

며, 제안된 제어를 적용한 시스템(흑색 실선)은 약 1.3초로 가장 짧은 안정 시간을 보였다. 한편, 축 간 상호간섭이 발생하는 방향에서는 PD 제어기의 경우, 진동 소멸 시간(oscillation time)이 가장 짧은 경우 $\dot{\theta}_{xt}$ 에서 약 0.7초, 가장 긴 경우 $\dot{z}_t$ 에서 약 2.1초로 나타났다. 반면, 제안된 제어를 적용한 시스템은 $\dot{\theta}_{xt}$ 에서 0.7초, $\dot{z}_t$ 에서 1.5초로 모든 방향에서 더 짧은 진동 소멸 시간을 나타내어 우수한 축 간 상호 간섭 억제 성능을 확인할 수 있었다.

진폭 측면에서 비교하면, 수동형 시스템은 최대 속도가 3.3 mm/s로 가장 크게 나타났으며, PD제어를 적용한 시스템은 3.0 mm/s로 약간 감소하였다. 반면, 제안된 제어를 적용한 시스템은 최대 속도가 2.6 mm/s로 가장 낮아 진폭 억제 성능이 가장 우수한 것으로 나타났다. 이들 속도는 모두 주 제어 방향인 x_t 방향의 측정값이지만, 다른 방향에서도 동일한 수준의 성능을 보였다.

축 간 상호 간섭작용이 발생하는 방향에서는, PD 제어기의 경우 병진 운동 중 최소 속도는 $\dot{y}_t$ 에서 0.88 mm/s이며, 회전 운동 중 최대 속도는

$\dot{\theta}_{xt}$ 에서 0.006 rad/s로 나타나, 전반적으로 PD 제어기보다 낮은 진폭이 나타났다.

따라서 전체 진동 소멸 시간과 최대 진폭 측면 모두에서 제안된 제어가 가장 우수한 성능을 보였다.

Fig. 5는 Fig. 4에서 제시된 상부 플랫폼 중심의 6자유도 속도에 대응되는 제어입력(구동력 및 토크)을 나타낸 결과이다.

제어입력은 시스템 성능을 결정하는 핵심 요소 중 하나이다. 대부분의 운동 방향에서 PD 제어기는 제안된 제어기에 비해 더 큰 제어력을 더 오랜 시간 동안 인가하는 경향을 보였다. 반면, 제안된 제어시스템은 상대적으로 작은 제어입력으로도 효과적인 진동 억제와 축 간 상호작용 보상 기능을 수행할 수 있었으며, 이는 액추에이터의 효율적인 운용을 가능하게 한다. 이러한 특성은 단기적으로는 에너지 절약 및 하드웨어의 열 발생 억제에 기여하고, 장기적으로 VCM의 수명 연장에도 긍정적인 영향을 미칠 수 있다.

Fig. 6과 Fig. 7은 상부 플랫폼 가장자리 지점에서 측정된 속도 응답 및 액추에이터의 제어입력 분포를 각각 나타낸다.

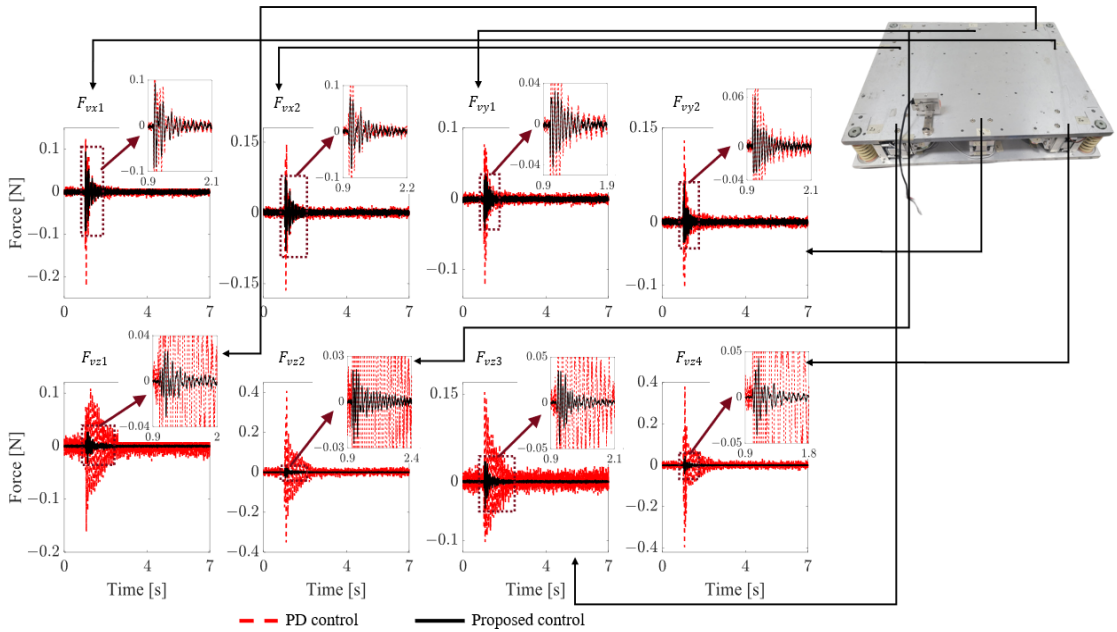


Fig. 7 Distributed control efforts from edge actuators

Fig. 6의 결과에 따르면, 제안된 제어기는 모든 자유도에서 진동 피크 속도가 수동형 제진시스템 및 PD 제어기에 비해 더 작게 나타났으며, 안정 시간 또한 짧아 우수한 진동 억제 성능을 보인다. 특히 수직 방향인 z_i 축 응답에서 진동 감쇠 효과가 두드러지게 관찰되었다.

또한 Fig. 7에서 확인할 수 있듯이 PD 제어기는 진동 억제 성능에도 불구하고 제어입력의 크기가 불규칙하게 분포하여 액추에이터에 과도한 부담을 줄 수 있으며, 이는 시스템의 수명을 단축시킬 가능성이 있다. 반면, 제안된 제어기는 상대적으로 작은 제어입력만으로도 우수한 진동 억제 성능을 달성하여 입력 에너지의 효율적 사용이라는 측면에서도 뛰어난 결과를 보여 주었다.

5. 결 론

본 연구에서는 6자유도 능동형 제진시스템에 대해 출력 피드백 기반의 최적 제어를 설계하고 실험적 검증을 수행하였다. 제안된 제어기는

외부로부터 유입되는 외란의 영향을 효과적으로 차단하고, 각 자유도 간 상호 간섭을 억제함으로써 상부 플랫폼의 안정성을 확보한다. 실험은 하부 플랫폼의 x_b 방향으로 충격력을 인가하는 방식으로 수행되었으며, 그 결과 제안된 제어시스템은 수동형 시스템 및 기존 PD제어기 대비 우수한 진동 억제 성능과 상호 간섭 억제 효과를 나타내었으며, 이를 통해 시스템의 전체 안정성이 크게 향상됨을 확인하였다. 향후 연구에서는 제어입력의 최적화를 포함하여, 다양한 방향의 기초부 외란 및 상부 플랫폼에서 발생하는 외란에 대한 억제 성능을 실험적으로 검증할 계획이다.

후 기

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the ` , and under Project BK21 FOUR (Smart Convergence and Application Education Research Center).

Author contributions

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

References

1. M. Picher, S. Mazzucco, S. Blankenship and R. Sharma, 2015, "Vibrational and Optical Spectroscopies Integrated with Environmental Transmission Electron Microscopy", *Ultramicroscopy*, 150, 10-15.
(<https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2014.11.023>)
2. D. J. Inman, 2017, *Vibration with Control*, John Wiley & Sons.
3. M. Pitkin, S. Reid, S. Rowan and J. Hough, 2011, "Gravitational Wave Detection by Interferometry (Ground and Space)", *Living Review in Relativity*, 14(5).
(<https://doi.org/10.12942/lrr-2011-5>)
4. A. Preumont, 2018, "Vibration Control of Active Structures", Springer Nature, 246.
(https://doi.org/10.1007/978-94-007-2033-6_1)
5. G. Genta, 2009, "Vibration Dynamics and Control", *Noise Control Engineering Journal*, 57(2).
(<https://doi.org/10.1007/978-0-387-79580-5>)
6. M. R. Hatch, 2000, *Vibration Simulation Using MATLAB and ANSYS*, CRC Press.
7. S. Pamukcu and L. Cheng, 2017, *Underground Sensing: Monitoring and Hazard Detection for Environment and Infrastructure*, Academic Press.
8. T. Wu, D. You, H. Gao, P. Lain, W. Ma and X. Zhou et al., 2023, "Research Status and Development Trend of Piezoelectric Accelerometer", *Crystals*, 13(9), 1363.
(<https://doi.org/10.3390/cryst13091363>)
9. F. Claeysen, N. Lhermet and T. Maillard et al., 2003, "Magnetostrictive Actuators Compared to Piezoelectric Actuators", *Proc. European Workshop on Smart Structures in Engineering and Technology*, 4763, 194-200.
(<https://doi.org/10.1117/12.508734>)
10. H. I. Ali, S. Bahari, B. M. Noor, S. M. Bashi and M. H. Marhaban, 2009, "A Review of Pneumatic Actuators (Modeling and Control)", *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 3(2), 440-454.
11. P. Zhang, 2010, *Advanced Industrial Control Technology*, Elsevier.
12. D. Jiang, J. Li, X. Li, C. Deng and P. Liu, 2020, "Modeling Identification and Control of a 6-DOF Active Vibration Isolation System Driving by Voice Coil Motors with a Halbach Array Magnet", *Journal of Mechanical Science and Technology*, 34(2), 617-630.
(<https://doi.org/10.1007/s12206-019-1208-y>)
13. D. H. Lee, Y. B. Kim, S. Chakir, T. Huynh and H. C. Park, 2021, "Noninteracting Control Design for 6-DoF Active Vibration Isolation Table with LMI Approach", *Applied Sciences*, 11(16), 7693.
(<https://doi.org/10.3390/app11167693>)
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", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, 44, 843-853.
(<https://doi.org/10.3795/KSME-A.2020.44.11.843>)
15. T. N. Nguyen, D. H. Lee, T. Huynh and Y. B. Kim, 2024, "A High-Precision Active Vibration Isolation Control System: Experimental Study", *Applied Sciences*, 14(17), 7966.
(<https://doi.org/10.3390/app14177966>)
16. T. N. Nguyen, T. Huynh, D. H. Lee and Y. B. Kim, 2024, "Design of Robust Decoupling

- Controller for 6-DoF Active Vibration Isolation System”, Journal of Power System Engineering, 28(3), 21-32.
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2024.28.3.021>)
17. F. L. Lewis, D. L. Vrabie and V. L. Syrmos, 2012, “Optimal Control”, John Wiley & Sons.
(<https://doi.org/10.1002/9781118122631>)