

## 백스테핑 기법을 이용한 항공기용 이중화 비대칭형 직렬 전기-정유압 구동기의 위치제어

김대연<sup>1,†</sup>, 박형준<sup>1</sup>, 김상석<sup>1</sup>, 김대현<sup>1</sup>, 김상범<sup>1</sup>, 이준원<sup>1</sup>, 최종윤<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한화에어로스페이스(주) 항공기계R&D센터

<sup>2</sup>국방과학연구소 항공기술연구원 3부

### Position Control of Dual Redundant Asymmetric Tandem Electro-Hydrostatic Actuator for Aircraft based on Backstepping Technique

Daeyeon Kim<sup>1,†</sup>, Hyung Jun Park<sup>1</sup>, Sang Seok Kim<sup>1</sup>, Dae Hyun Kim<sup>1</sup>, Sang Beom Kim<sup>1</sup>, Junwon Lee<sup>1</sup> and Jong Yoon Choi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Aero Mechanical R&D Center, Hanwha Aerospace

<sup>2</sup>3rd Directorate, Aerospace Technology Research Institute, Agency for Defense Development

#### Abstract

The electro-hydrostatic actuators (EHA) are widely used in various industrial fields since they can independently execute the function of the hydraulic power source and have high efficiency. Particularly, in the aviation field, the EHA is mainly designed as dual redundant asymmetric tandem actuator to mitigate failure and minimize installation space. However, aviation EHAs designed in the form of dual redundant asymmetric tandem actuator have the disadvantage of decreased durability performance due to the occurrence of force fighting. In this paper, the controller is designed based on backstepping technique to improve control performance and reduce force fighting for aviation EHA. The augmented state observer is proposed to estimate the states required for control. Through simulation, it was verified that the proposed controller had superior control performance and significantly reduces the force fighting compared to the general PI controller.

#### 초 록

전기-정유압 구동기(EHA)는 독립적으로 유압 동력원을 운용할 수 있고, 효율이 높다는 장점으로 다양한 산업분야에서 사용되고 있다. 특히 항공분야에서는 고장 대비 및 장착공간의 최소화를 위해 이중화 비대칭형 직렬 구동기 형태로 설계된 EHA를 주로 사용하고 있다. 하지만 이중화 비대칭형 직렬 구동기 형태로 설계된 항공용 EHA는 포스 파이팅(force fighting)현상이 발생하여 내구성능이 감소한다는 단점이 있다. 본 논문에서는 항공용 EHA의 제어성능 향상 및 포스 파이팅 문제를 해결하기 위해 대표적인 비선형 제어 기법인 백스테핑을 기반으로 제어를 설계하였고, 제어에 필요한 상태를 추정하기 위해 추가 상태 관측기를 제안하였다. 시뮬레이션을 통한 성능 검증으로 제안한 제어기는 일반적인 PI제어기에 비해 제어성능이 우수하고, EHA의 포스 파이팅 현상을 현저히 감소시킨다는 것을 확인할 수 있었다.

**Key Words** : Backstepping control(백스테핑 제어), Nonlinear control(비선형 제어), Electro-hydrostatic actuator(전기-정유압 구동기), Asymmetric tandem actuator(비대칭형 직렬 구동기)

## 1. 서 론

유압 시스템은 큰 하중을 낼 수 있으며, 중량대비 출력 힘이 높다는 장점이 있어 중장비, 공작기계, 항공 우주 등의 산업분야에서 널리 사용되고 있다.

특히 항공분야에서는 조종사가 직접 조종면을 작동

하는 단순한 기계적 연결로 구성된 유압 시스템에서 기계적 연결을 제거하고 이를 전기 제어 밸브로 대체한 FBW(fly-by-wire) 비행조종면 작동 시스템을 적용함으로써 항공기의 구조 안전성이 증가됐고, 정확한 비행 조정이 가능하게 되었다. 하지만 비례제어밸브 기반의 FBW 비행조종면 작동 시스템은 에너지 효율이 낮을 뿐만 아니라 중앙 동력원으로부터 에너지를

전달받기 위한 유압배관 설치에 따른 중량증가와 누유가 필연적으로 발생한다는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 중앙 동력원의 동력 공급 없이 전기만으로 작동할 수 있는 PBW(power-by-wire) 비행조종면 작동 시스템이 비교적 최근 개발되었다. 항공분야에서 PBW 비행조종면 작동 시스템은 다중화된 제어기와 함께 2개의 전기/유압 시스템에 의해 독립적으로 작동하도록 설계되어 중복성(redundancy)을 확보한다. 따라서 하나의 전기 동력원에 고장이 발생하더라도 제어기가 고장이 발생한 유압 시스템을 바이패스(bypass)하도록 하여 정상적인 시스템만으로 구동기가 동작할 수 있다. PBW를 기반으로 하는 전기-정유압 구동기(EHA; electro-hydrostatic actuator)는 전기모터, 유압 펌프, 유압 실린더, 축압기 및 다양한 유압밸브를 일체화 하여 독립적으로 동력원을 운용할 수 있어 일반적인 유압 구동기에 비해 효율이 높고, 복잡한 유압배관을 제거할 수 있다는 장점이 있다[1-2].

항공분야에서는 한번의 사고만으로도 많은 인적 물적 손실이 발생하기 때문에 구동장치의 고장을 대비하여 두 개 이상의 유압 실린더를 직렬로 연결하고 유압 시스템을 이중화한 형태의 이중화 직렬 구동기(Dual Redundant Tandem Actuator)를 사용하여 안정성을 확보한다. 이때 양로드형(double rod type) 유압 실린더와 단로드형(single-rod type) 유압 실린더를 연결함으로써 구동장치의 직경 및 길이를 최소화할 수 있으며, 각 챔버(chamber)에 독립적인 유압 동력원을 연결함으로써 하나의 유압 시스템에 고장이 있더라도 다른 시스템으로 구동기를 정상 작동시킬 수 있다. 이러한 장점으로 현재 항공용 EHA는 대부분 이중화 직렬 구동기 형태로 설계되어 있다. 하지만 설계적으로 이중화 직렬 EHA는 양로드형 유압 실린더의 특성과 단로드형 유압 실린더의 특성을 모두 가지며 독립적인 2개의 유압 동력원으로 인해 입력이 2개인 복잡한 시스템이 된다. 따라서 기존의 PID제어만으로는 정밀한 제어가 어렵다. 또한 외력이 없더라도 각 피스톤에 각각 다른 힘이 상시 작용하는 포스 파이팅(force fighting) 현상이 발생하게 된다[2-6].

최근까지 EHA의 정밀한 제어와 관련하여 다양한 연구들이 이루어지고 있다. 산업분야에서 대부분의 EHA 제어에 적용되어 왔던 PID제어는 정밀한 시스템 모델링 없이도 괜찮은 성능을 보여주지만 사용자가 시행착오 방식으로 적절하게 이득을 조정하여 사용해야 한다는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 fuzzy-PID를 이용한 EHA 제어가 제안되었다. 하지만 fuzzy-PID제어는 사전에 사용자가 퍼지 규칙을 정의해야 한다는 단점이 있다. 또한 EHA의 비선형성을 고려하여 슬라이딩 모드 컨트롤(sliding mode control)

기법을 사용한 EHA 제어가 제안되었다. 슬라이딩 모드 컨트롤 기반의 제어기는 외란에 강건하다는 특성이 있지만 특유의 채터링(chattering) 현상이 생긴다는 단점이 있었다. 이후 EHA의 비선형성과 모델의 불확실성을 모두 고려한 적응 백스테핑 제어(adaptive backstepping control)기반 제어가 제안되었다. 적응 백스테핑 제어기법에 기반한 제어기는 불확실한 파라미터를 온라인으로 추정하여 좋은 제어성능을 보여주었다[7-12].

현재까지 EHA 비선형 제어에 대한 연구는 하나의 유압 실린더에 하나의 유압 동력원만 가지는 EHA에만 집중되어 있어 항공용으로 주로 사용되는 이중화 직렬 EHA의 제어에 대한 연구는 부족한 실정이다.

본 논문에서는 위치 및 압력 상태 외에는 상태를 측정할 수 없는 일반적인 항공용 EHA의 알 수 없는 상태를 추정하기 위해 축소 차수 관측기(reduced-order observer)에 외력 추정이 추가된 형태의 추가 상태 관측기(augmented state observer)를 설계하였다. 설계된 관측기를 통해 추정한 상태를 기반으로 백스테핑 제어기를 설계하였으며 설계된 제어기는 시뮬레이션을 통해 성능을 검증하였다[13-16].

## 2. EHA 시스템 모델링

### 2.1 이중화 직렬 EHA의 구성

이중화 직렬 EHA는 Fig. 1과 같이 양로드 및 편로드형 유압 실린더, 유압펌프, 전기모터, 축압기 및 다양한 유압밸브로 구성된다.

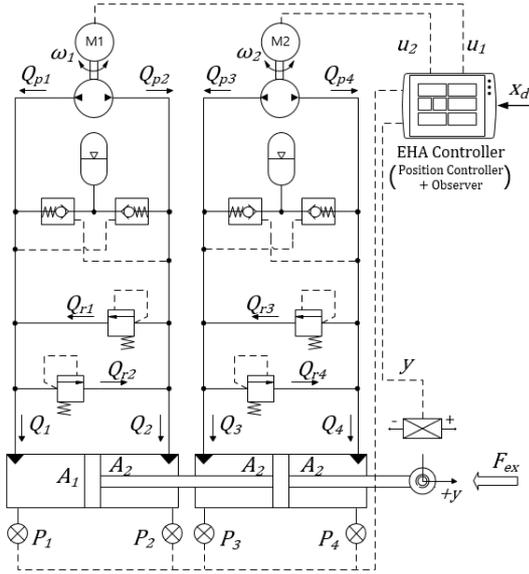
각각의 전기모터는 전기신호를 받아 유압펌프를 회전시키며, 유압펌프에 의해 생성된 유량 및 압력으로 외력을 이겨내고, 유압 실린더의 위치를 조정한다. 이때 유압 실린더의 작동방향 및 위치제어는 전기모터의 방향 및 속도제어를 통하여 구현된다[12, 16].

### 2.2 수학적 모델링

이중화 직렬 EHA의 피스톤 운동 방정식은 뉴턴 제 2법칙에 따라 식(1)과 같이 나타낼 수 있다[17, 18].

$$m\ddot{y} = -ky - b\dot{y} - d + P_1A_1 - P_2A_2 + P_3A_2 - P_4A_2 \quad (1)$$

여기서  $m$ 은 등가 질량,  $y$ 는 피스톤의 위치,  $k$ 는 강성,  $b$ 는 댐핑 계수(damping coefficient),  $d$ 는 외력,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$ 는 각 챔버의 압력,  $A_1$ ,  $A_2$ 는 피스톤의 유효 단면적을 의미한다.



**Fig. 1** The Structure of Dual Redundant Asymmetric Tandem EHA

위의 운동방정식에서 만약  $y$ ,  $\dot{y}$ ,  $\ddot{y}$  이 영에 수렴한 상태고 외력이 없다고 가정하면 물리적으로  $F_{net} = P_1A_1 - P_2A_2 + P_3A_2 - P_4A_2$  은 항상 영에 수렴한다. 하지만 이것이 수압 면적이 다른 각 유압 실린더에 작용하는 힘의 합,  $F_{net,c1} = P_1A_1 - P_2A_2$  와  $F_{net,c2} = P_3A_2 - P_4A_2$  이 각각 영에 수렴한다는 것을 의미하지는 않는다. 이와 같이 전체 합력은 영에 수렴하나 각 유압 실린더에 작용하는 힘의 합은 영에 수렴하지 않는 현상을 포스 파이팅이라고 하며 포스 파이팅은 비대칭형 직렬 구동기의 내구 수명을 낮추는 가장 큰 요인 중 하나이다. 내구성이 구동기 성능의 중요한 지표 중 하나인 항공분야에서는 구동기의 포스 파이팅 현상을 최소화하는 것이 매우 중요하다[19].

유압 실린더 및 회로에서 외부 누유가 없다고 가정하면 각 챔버의 압력은 연속 방정식을 이용하여 식(2)~(5)와 같이 나타낼 수 있다[12, 17-18].

$$\dot{P}_1 = \frac{\beta_e}{V_1 + A_1y} (Q_1 - A_1\dot{y} - C_{i1}(P_1 - P_2)) \quad (2)$$

$$\dot{P}_2 = \frac{\beta_e}{V_2 - A_2y} (Q_2 + A_2\dot{y} + C_{i1}(P_1 - P_2)) \quad (3)$$

$$\dot{P}_3 = \frac{\beta_e}{V_2 + A_2y} (Q_3 - A_2\dot{y} - C_{i2}(P_3 - P_4)) \quad (4)$$

$$\dot{P}_4 = \frac{\beta_e}{V_2 - A_2y} (Q_4 + A_2\dot{y} + C_{i2}(P_3 - P_4)) \quad (5)$$

여기서  $\beta_e$ 는 유효 체적 탄성 계수,  $C_{i1}$ ,  $C_{i2}$ 는 각 챔버의 내부 누유 계수,  $V_1$ ,  $V_2$ 는 각각의 챔버의 체적을 의미한다.

EHA 시스템에서 유로에 의한 손실이 없고 정상작동 상태라고 가정하면 미소 유량 손실 및 릴리프 밸브(relief valve)에 의한 유량  $Q_{r1} \sim Q_{r4}$ 는 무시할 수 있다. 따라서 각 챔버로 유입되는 유량  $Q_1 \sim Q_4$ 는 식(6)~(7)과 같이 나타낼 수 있다[17-18].

$$Q_1 = -Q_2 = Q_{p1} + Q_{r1} - Q_{r2} = D_p\omega_1 - k_l(P_1 - P_2) \quad (6)$$

$$Q_3 = -Q_4 = Q_{p2} + Q_{r3} - Q_{r4} = D_p\omega_2 - k_l(P_3 - P_4) \quad (7)$$

여기서  $D_p$ 는 펌프 유량 계수,  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ 는 각각의 모터의 각속도,  $Q_{p1}$ ,  $Q_{p2}$ 는 각 펌프로부터 토출되는 유량,  $k_l$ 은 펌프 내부 누유 계수를 의미한다.

식(2)~(5)에서 내부 누유 계수는 다른 인자들에 비해 매우 작은 값이므로 무시할 수 있다고 가정하고, 식(1)~(7)을 이용하면 식(8)과 같은 이중화 직렬 EHA의 상태 방정식을 유도할 수 있다. 여기서 상태변수들은  $[x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]^T \triangleq [y, \dot{y}, P_1, P_2, P_3, P_4]^T$ 이며 제어 입력  $[u_1, u_2]^T \triangleq [\omega_1, \omega_2]^T$ 로 정의한다[18].

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{m}(A_1x_3 - A_2(x_4 - x_5 + x_6) - kx_1 - bx_2 - d) \\ \dot{x}_3 &= \frac{\beta_e}{V_1 + A_1x_1}(-A_1x_2 - k_l(x_3 - x_4) + D_pu_1) \\ \dot{x}_4 &= \frac{\beta_e}{V_2 - A_2x_1}(A_2x_2 + k_l(x_3 - x_4) - D_pu_1) \\ \dot{x}_5 &= \frac{\beta_e}{V_2 + A_2x_1}(-A_2x_2 - k_l(x_5 - x_6) + D_pu_2) \\ \dot{x}_6 &= \frac{\beta_e}{V_2 - A_2x_1}(A_1x_2 + k_l(x_3 - x_4) - D_pu_1) \end{aligned} \quad (8)$$

식(8)을 간단하게 표현하기 위해 새로운 상태변수 및 입력을  $\bar{x}_3 = \left[ \frac{A_1x_3 - A_2x_4}{m}, \frac{A_2x_5 - A_2x_6}{m} \right]^T$ ,  $u = [u_1, u_2]^T$ 와 같이 정의하면 EHA의 상태 방정식을 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{m}(-kx_1 - bx_2 - d) + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}^T \bar{x}_3 \\ \dot{\bar{x}}_3 &= \begin{bmatrix} -\frac{N_1(x_1)}{D_1(x_1)} \\ -\frac{N_2}{D_2(x_1)} \end{bmatrix} x_2 + \begin{bmatrix} -\frac{N_3}{D_1(x_1)} \\ -\frac{N_4}{D_2(x_1)} \end{bmatrix} (x_3 - x_4) \\ &+ \begin{bmatrix} \frac{N_5}{D_1(x_1)} & 0 \\ 0 & \frac{N_6}{D_2(x_1)} \end{bmatrix} u \end{aligned} \quad (9)$$

여기서,

$$\begin{aligned}
 D_1(x_1) &= \frac{m}{\beta_e}(V_1 + A_1x_1)(V_2 - A_2x_1) \\
 D_2(x_1) &= \frac{m}{\beta_e}(V_2 + A_2x_1)(V_2 - A_2x_1) \\
 N_1(x_1) &= A_1^2(V_2 - A_2x_1) \\
 &\quad + A_2^2(V_2 + A_2x_1) \\
 N_2 &= 2A_1^2V_2 \\
 N_3 &= k_l(A_1V_2 + A_2V_1) \\
 N_4 &= 2k_lA_2V_2 \\
 N_5 &= D_p(A_1V_2 + A_2V_1) \\
 N_6 &= 2D_pA_2V_2
 \end{aligned} \quad (10)$$

식(8) 및 식(9)를 통해 EHA의 위치는 모터로 구동되는 펌프의 속도에 의해 조정된다는 것을 알 수 있다. 따라서 본 논문의 목표는 주어진 위치 기준 궤적을 시스템이 잘 추종하도록 하는 모터 속도 제어입력을 설계하는 것이다.

### 3. 제어기 및 관측기 설계

#### 3.1 제어기 설계

2장에서 유도한 EHA 시스템의 상태 방정식을 기반으로 백스테핑 제어기를 설계하였다. 먼저, EHA 시스템의 추종오차를 식(11)과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned}
 z_1 &\triangleq x_1 - x_{1d} \\
 z_2 &\triangleq x_2 - x_{2d} \\
 z_3 &\triangleq \bar{x}_3 - x_{3d}
 \end{aligned} \quad (11)$$

여기서  $x_{1d}$ ,  $x_{2d}$ ,  $x_{3d}$ 는 각 상태를 제어하기 위한 실제 또는 가상의 제어입력을 의미한다. 본 논문에서는 식(12)~(15)와 같이 제어입력을 설계하였으며, Lyapunov 함수를 이용하여 안정도를 판별하였다.

$$x_{2d} = \dot{x}_{1d} - k_1z_1 \quad (12)$$

$$\begin{aligned}
 x_{3d} &= \left( \dot{x}_{2d} - z_1 + \frac{1}{m}(kx_1 + bx_2 + d) \right. \\
 &\quad \left. - k_2z_2 \right) \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned}
 u_1 &= \frac{D_1(x_1)}{N_5}(\dot{x}_{3da} - k_3z_{3a} - z_2) + \frac{N_1(x_1)}{N_5}x_2 \\
 &\quad + \frac{k_l}{D_p}(x_3 - x_4)
 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned}
 u_2 &= \frac{D_2(x_1)}{N_6}(\dot{x}_{3db} - k_3z_{3b} - z_2) + \frac{A_2}{D_p}x_2 \\
 &\quad + \frac{k_l}{D_p}(x_5 - x_6)
 \end{aligned} \quad (15)$$

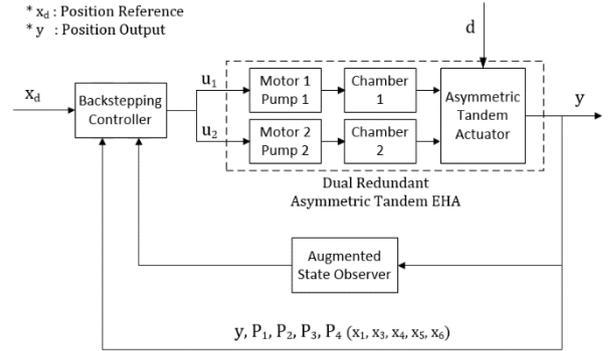


Fig. 2 The Block Diagram of Proposed Controller

여기서  $x_{3d} \triangleq [x_{3da}, x_{3db}]^T$ ,  $z_3 \triangleq [z_{3a}, z_{3b}]^T$ 으로 정의하며  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ 는 임의의 양의 실수이다.

증명: 1단계 Lyapunov 함수는 아래와 같다.

$$V_1 = \frac{1}{2}z_1^2 \quad (16)$$

식(16)을 시간에 대하여 미분하고 식(12)를 대입하면 아래와 같다.

$$\dot{V}_1 = z_1\dot{z}_1 = -k_1z_1^2 + z_1z_2 \quad (17)$$

위 식을 통해  $z_2$ 가 영에 수렴하면,  $\dot{V}_1 \leq 0$ 이 항상 성립하므로  $z_1$ 이 수렴한다는 것을 알 수 있다. 따라서 다음 단계에서  $z_2$ 를 가능한 작게 만들어 준다.

2단계 Lyapunov 함수를 다음과 같이 정의한다.

$$V_2 = \frac{1}{2}z_1^2 + \frac{1}{2}z_2^2 \quad (18)$$

식(18)을 시간에 대하여 미분하고 식(13) 및 식(17)을 대입하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_2 &= -k_1z_1^2 + z_2(z_1 + \dot{z}_2) \\
 &= -k_1z_1^2 \\
 &\quad + z_2 \left( z_1 + \frac{1}{m}(-kx_1 - bx_2 - d) \right. \\
 &\quad \left. + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}^T \bar{x}_3 - \dot{x}_{2d} \right) \\
 &= -k_1z_1^2 - k_1z_2^2 + z_2 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}^T z_3
 \end{aligned} \quad (19)$$

위 식에서  $z_3$ 가 영에 수렴하면  $\dot{V}_2 \leq 0$ 이 항상 성립하므로  $z_2$  또한 수렴한다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 다음 단계에서는  $z_3$ 를 가능한 작게 만들어 준다.

3단계 Lyapunov 함수를 다음과 같이 정의한다.

$$V_3 = \frac{1}{2}z_1^2 + \frac{1}{2}z_2^2 + \frac{1}{2}z_3^T z_3 \quad (20)$$

식(20)을 시간에 대하여 미분하고 식(14)~(15) 및 식(19)를 대입하면 아래 식이 성립한다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &= -k_1 z_1^2 - k_2 z_2^2 \\ &\quad + z_3^T \left( \dot{z}_3 + z_2 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \right) \\ &= -k_1 z_1^2 - k_2 z_2^2 - k_3 z_3^T z_3 \leq 0 \end{aligned} \quad (21)$$

따라서 EHA 시스템의 상태  $x$ 는 전역 지수적으로 제어입력  $x_d = [x_{1d}, x_{2d}, x_{3d}]^T$ 에 수렴한다.

### 3.2 관측기 설계

3.1절에서 제안한 제어기는 모든 상태에 대한 정보가 있다는 전제하에 설계되었다. 하지만 본 논문에서는 위치 및 압력 상태 정보만 이용할 수 있다고 가정했기 때문에 속도 및 외력을 추정할 수 있는 관측기가 필요하다. 설계된 관측기의 구조는 아래와 같다[14].

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_1 &= l_1(x_1 - \hat{x}_1) + \hat{x}_2 \\ \dot{\hat{x}}_2 &= l_2(x_1 - \hat{x}_1) + \frac{1}{m}(-kx_1 - b\hat{x}_2 - \hat{d}) \\ &\quad + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}^T \bar{x}_3 \\ \dot{\hat{d}} &= l_3(x_1 - \hat{x}_1) \end{aligned} \quad (22)$$

여기서  $l_1, l_2, l_3$ 는 관측기 이득이며  $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{d}$ 는 각각 추정 위치, 추정 속도, 추정 외력을 의미한다.

추정 오차는 아래와 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \tilde{x}_1 &= x_1 - \hat{x}_1 \\ \tilde{x}_2 &= x_2 - \hat{x}_2 \\ \tilde{d} &= d - \hat{d} \end{aligned} \quad (23)$$

EHA 시스템의 상태방정식과 식(22)를 이용하면 상태 추정 오차는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\tilde{x}} = (A_o - LC)\tilde{x} \quad (24)$$

여기서,

$$\begin{aligned} A_o &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{b}{m} & -\frac{1}{m} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ L &= [l_1 \quad l_2 \quad l_3]^T \\ C &= [1 \quad 0 \quad 0] \\ \tilde{x} &= [\tilde{x}_1 \quad \tilde{x}_2 \quad \tilde{d}]^T \end{aligned} \quad (25)$$

행렬  $A_o$ 와  $C$ 는 관측 가능하기 때문에  $A = (A_o - LC)$ 를 Hurwitz하게 만드는 행렬  $L$ 이 존재한다.

3.1절에서 제안한 제어법칙은 속도와 외력을 포함하고 있다. 식(13)~(15)에 추정 속도와 외력을 대입하면 제어법칙은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x_{3d} &= \left( \dot{x}_{2d} - z_1 + \frac{1}{m}(kx_1 + b\hat{x}_2 + \hat{d}) \right. \\ &\quad \left. - k_2(z_2 + \tilde{x}_2) \right) \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix} \\ u_1 &= \frac{D_1(x_1)}{N_5}(\dot{x}_{3da} - k_3 z_{3a} - (z_2 + \tilde{x}_2)) \\ &\quad + \frac{N_1(x_1)}{N_5} \hat{x}_2 + \frac{k_l}{D_p}(x_3 - x_4) \\ u_2 &= \frac{D_2(x_1)}{N_6}(\dot{x}_{3db} - k_3 z_{3b} - (z_2 + \tilde{x}_2)) \\ &\quad + \frac{A_2(x_1)}{D_p} \hat{x}_2 + \frac{k_l}{D_p}(x_5 - x_6) \end{aligned} \quad (26)$$

최종적으로 제안한 제어기는 Fig. 2와 같은 구조를 가진다.

### 3.3 페루프 안정도 분석

상태추정 오차를 고려한 합성 Lyapunov 함수는 아래와 같이 주어진다.

$$V_a = \frac{1}{2}z_1^2 + \frac{1}{2}z_2^2 + \frac{1}{2}z_3^T z_3 + \tilde{x}^T P \tilde{x} \quad (27)$$

$V_a$ 를 시간에 대하여 미분하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_a &= -(k_1 z_1^2 + k_2 z_2^2 + k_3 z_3^T z_3) - J z_3 \tilde{x}_2 \\ &\quad - \left( \frac{b}{m} + k_2 \right) z_2 \tilde{x}_2 - \frac{1}{m} z_2 \tilde{d} - \tilde{x}^T Q \tilde{x} \end{aligned} \quad (28)$$

여기서  $J = [J_a, J_b] = \left[ \frac{N_1(x_1)}{D_1(x_1)}, \frac{N_2}{D_2(x_1)} \right]$ 이다. 관측기의 오차는 (24)와 같이 선형이기 때문에 양의 정부호 행렬  $Q$ 와  $P$ 가 항상 존재한다.

$e = [z_1, z_2, z_{3a}, z_{3b}]^T$ 으로 정의된 오차 행렬과 추정오차 행렬  $\tilde{x}$ 를 이용하면  $\dot{V}_a$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{V}_a = - \begin{bmatrix} e \\ \tilde{x} \end{bmatrix}^T \Phi \begin{bmatrix} e \\ \tilde{x} \end{bmatrix} \quad (29)$$

여기서,

$$\begin{aligned}\Phi_1 &= \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_3 \end{bmatrix} \\ \Phi_2 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}\left(\frac{b}{m} + k_2\right) & \frac{1}{2m} \\ 0 & \frac{1}{2}J_a & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}J_b & 0 \end{bmatrix} \\ \Phi_3 = Q &= \begin{bmatrix} q_1 & 0 & 0 \\ 0 & q_2 & 0 \\ 0 & 0 & q_3 \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (30)$$

여기서  $Q$ 를 양의 정부호 행렬로 만들기 위한 조건은 아래와 같다.

$$q_1, q_2, q_3 > 0 \quad (31)$$

$\Phi_1$ 이 양의 정부호 행렬이고 식(32)가 성립하면 수어 보수(Schur complement)에 의해  $\Phi$ 은 양의 정부호 행렬이다. 따라서 식(33)이 성립하며  $Q$ 의 성분  $q_1, q_2, q_3$ 는 식(34)의 조건을 만족하여야 한다[14].

$$\Phi_3 - \Phi_2^T \Phi_1^{-1} \Phi_2 \quad (32)$$

$$\begin{bmatrix} q_1 & 0 & 0 \\ 0 & q_2 - a_1 & -a_2 \\ 0 & -a_2 & q_3 - a_3 \end{bmatrix} > 0 \quad (33)$$

$$\begin{aligned}q_1 &> 0, \\ q_2 &> a_2, \\ q_3 &> a_3\end{aligned}\quad (34)$$

여기서,

$$\begin{aligned}a_1 &= \frac{\left(\frac{k_2}{2} + \frac{b}{2m}\right)^2}{k_2} + \frac{J_a^2 + J_b^2}{4k_3} \\ a_2 &= \frac{\left(\frac{k_2}{2} + \frac{b}{2m}\right)}{2k_2m} \\ a_3 &= \frac{1}{2k_2m^2}\end{aligned}\quad (35)$$

$A$ 가 Hurwitz하기 때문에 식(32)와 식(34)의 조건을 만족하는 행렬  $Q$ 가 항상 존재한다. 따라서  $\dot{V}_a$ 는 항상 음의 정부호 행렬이 되고, 상태  $x$ 는 전역 지수적으로 제어입력  $x_d$ 에 수렴한다[14].

Table 1 Parameters for Simulation

Param.	Value	Unit	Description
$m$	5.5	kg	Equivalent mass
$\beta_e$	14000	bar	Effective Bulk modulus
$k$	1000	N/m	Stiffness
$b$	2000	N·s/m	Damping coefficient
$A_1$	0.0043	m <sup>2</sup>	Effective area 1
$A_2$	0.0036	m <sup>2</sup>	Effective area 2
$V_1$	$2.5 \times 10^{-4}$	m <sup>3</sup>	Chamber Volume 1
$V_2$	$2.1 \times 10^{-4}$	m <sup>3</sup>	Chamber Volume 2
$D_p$	$8.2 \times 10^{-7}$	m <sup>3</sup> /rad	Pump Displacement
$k_l$	$9.0 \times 10^{-13}$	m <sup>5</sup> /N	Pump leakage coefficient
$k_1$	6000	-	Controller gain 1
$k_2$	8000	-	Controller gain 2
$k_3$	9000	-	Controller gain 3
$l_1$	2000	-	Observer gain 1
$l_2$	$1.2 \times 10^6$	-	Observer gain 2
$l_3$	$-2.8 \times 10^9$	-	Observer gain 3
$\omega_{max}$	13000	rpm	Maximum angular velocity of motor
$P_{max}$	31	MPa	Maximum pressure of EHA
$P_{min}$	3.4	MPa	Minimum pressure of EHA

#### 4. 시뮬레이션 결과

제안한 제어기의 성능을 확인하기 위해 상용 프로그램인 Matlab/Simulink를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였으며 시뮬레이션에 사용된 파라미터 값들은 Table 1에 정리하였다. Table 1에서  $\omega_{max}$ 는 모터가 낼 수 있는 최대 각속도를 의미하며  $P_{max}$ ,  $P_{min}$ 은 각각 EHA 시스템에서 허용하는 최고압력과 최저압력을 의미한다.

통상적으로 EHA 시스템은 축압기와 릴리프 밸브를 유압회로에 포함시킨다. 여기서 축압기는 시스템에 필요한 유량을 순간적으로 공급하며 캐비테이션(cavitation)을 방지하고 릴리프 밸브는 너무 높은 압력으로부터 시스템을 보호하기 위한 용도이다. 본 논문에서는 축압기와 릴리프 밸브를 수학적 모델에 직접적으로 포함시키진 않았지만 모델의 최저압력과 최고압력을 제한함으로써 이를 보상해 주었다.

본 논문에서는 아래와 같이 2가지 종류의 위치 기준 신호를 인가하고, 순간적인 외력 변화 시 각 챔버의 압력 차에 대한 보상이 가능한 백스테핑 제어기(BSC; back stepping controller)의 위치제어 추종 성능을 확인하기 위해 15 kN의 외력을 각각 10 s 및 2 s에 계단 입력으로 주었다. 제안한 백스테핑 제어기는 산업 전반에서 두루 사용되는 PI제어기와 비교하여 성능을 검증하였다. PI제어기는 계단 입력/응답 시 오버슈트(overshoot)가 1% 이하이고, 정상상태에서 안정한 최대 이득으로 설정하였다. 이때 제어이득은 각각  $k_p = 20$ ,  $k_i = 10$ 이며, 정착시간(settling time)은 최대 스트로크(stroke) 기준 약 0.18 s였다.

동일한 방법으로 백스테핑 제어기의 제어 이득을 결정하였으며, 정착시간(settling time)은 PI제어기와 동일하게 최대 스트로크(stroke) 기준 약 0.18 s였다.

시뮬레이션 결과는 Fig. 3 ~ Fig. 6에 나타내었다.

Case 1:  $(1 - e^{-10t}) \cdot 50 \cdot \sin(0.1 \cdot 2\pi t)$  mm

Case 2:  $(1 - e^{-10t}) \cdot 50 \cdot \sin(0.5 \cdot 2\pi t)$  mm

외력이 없는 경우(Case 1: 0~10 s, Case 2: 0~2 s) 제안한 제어기는 제어입력을 잘 추종했으며 관측기의 상태 추정 오차 또한 영에 수렴하는 것을 알 수 있다. 하지만 외력이 입력되는 순간(Case 1: 10 s Case 2: 2 s)에 순간적으로 관측기의 속도 추정오차가 크게 상승한다. 이는 추정 외력 오차가 순간적으로 상승하면서 그 영향으로 속도 추정 오차 또한 커지는 것이라고 할 수 있다. 추정 오차가 커짐에 따라 위치 오차 또한 순간적으로 상승하지만 시간이 지남에 따라 안정되는 것을 확인할 수 있다.

PI제어기와 비교했을 때, 제안한 제어기는 외력이 있는 경우와 없는 경우 모두 우수한 성능을 보여주었다. 특히 주목해야 할 점은 각 챔버의  $\bar{x}_3$  상태가 매우 다르다는 점이다. PI제어기는 각 유압 실린더의  $\bar{x}_3$  상태를 수렴하게 하는 별도의 제어 로직이 없기 때문에  $F_{net} = F_{net,c1} + F_{net,c2} = -d + P_1A_1 - P_2A_2 + P_3A_2 - P_4A_2$ 은 물리적으로 영에 수렴하지만 수압 면적이 다른 각 유압 실린더에 작용하는 힘의 합,  $F_{net,c1} = P_1A_1 - P_2A_2$ 와  $F_{net,c2} = P_3A_2 - P_4A_2$ 는 수렴하지 않는다. 이는 외력이 없더라도 각 피스톤에 각각 다른 힘이 상시 작용하는 포스 파이팅 현상이 항상 발생하는 것을 의미한다.

직렬 구동기에서 포스 파이팅 현상을 보상하기 위한 별도의 장치 없이 PI제어를 사용하는 경우, Fig. 3, Fig. 4의 (c)에서 PI 커브와 같이  $u_1$ ,  $u_2$  지령이 항상 동일하게 입력된다. 하지만 피스톤의 유효면적은 비대칭적이기 때문에 유효면적 차이에 의한 각 피스톤에 작용

하는 힘 차이가 발생하게 된다. 이러한 힘 차이를 제거하기 위해 특별한 장치를 사용하지 않는 이상 힘 평형을 이루기 위해 각 챔버의 압력은 Fig. 3, Fig. 4의 (d)에서 PI 커브와 같이 일정 압력에서 수렴하지 않고 최대 압력까지 상승하게 된다. 하지만 백스테핑 제어기는 새로운 상태  $\bar{x}_3$ 를 정의하고  $\bar{x}_3$ 이 수렴하도록 설계되었다. 따라서 Fig. 3, Fig. 4의 (c)에서 BSC 커브 처럼 비선형적인 각각 다른 제어신호  $u_1$ ,  $u_2$ 가 입력되어 동일한 제어신호를 입력하는 PI제어기에 비해 포스 파이팅 현상이 현저하게 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

또한 Fig. 3, Fig. 4의 (a)에서 확인할 수 있듯이 입력 주파수가 높을수록 제안한 제어기의 기준 신호 추종 성능이 PI제어기 대비 우수한 것을 확인할 수 있다.

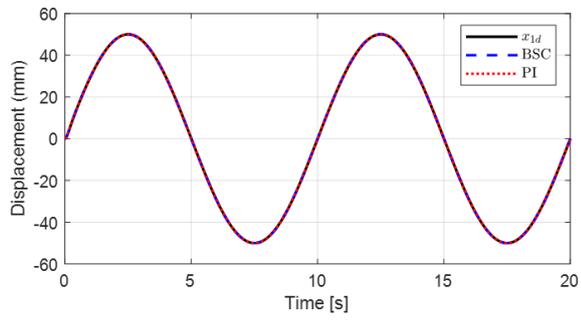
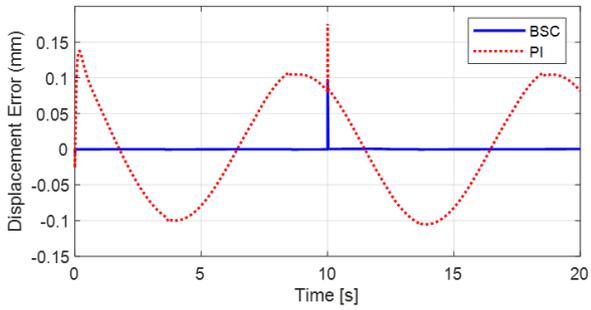
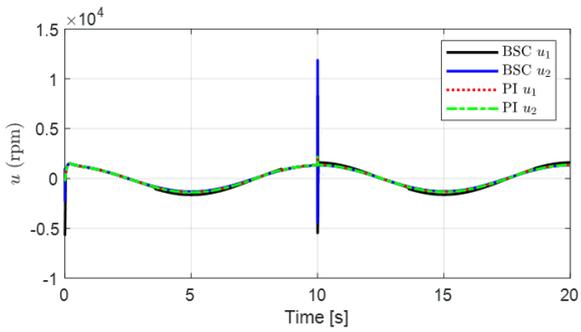
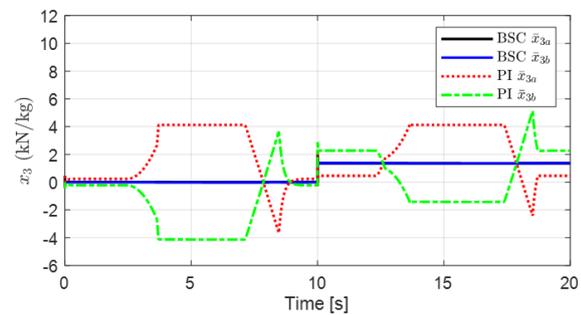
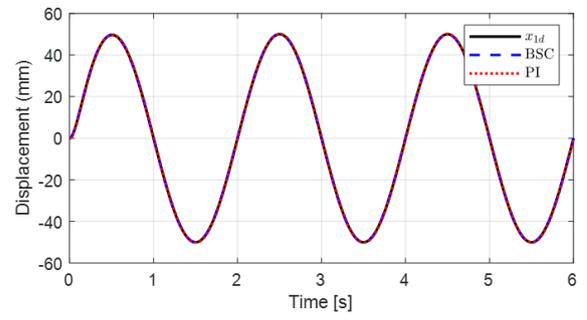
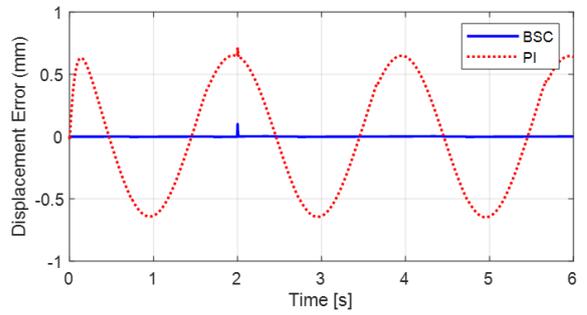
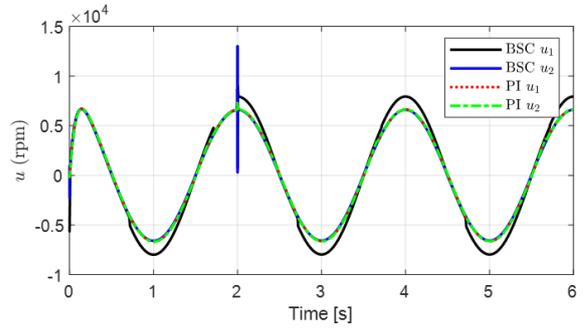
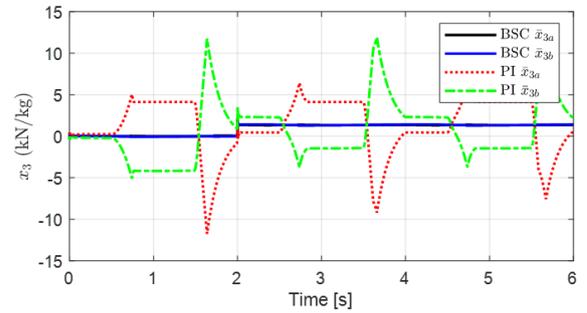
## 5. 결론

현재 적용되어 있는 대부분의 항공기용 EHA는 PI제어를 이용하여 구동기의 위치를 제어한다. 하지만 이중화 비대칭형 직렬 EHA를 PI제어 기법으로 제어하면 피스톤의 유효면적의 비대칭성으로 인해 필연적으로 포스 파이팅이 발생하여 구동기의 내구성능 저하가 발생한다. 본 논문에서는 이러한 단점을 보완하고 비선형성이 큰 유압구동기의 위치제어 성능 향상을 위해 대표적인 비선형 제어방식 중 하나인 백스테핑 기법을 적용한 제어기를 설계하였다. 또한 제어에 필요한 속도와 부하 힘을 추정하기 위한 추가상태 관측기를 제안하였고, EHA 시스템과 제어기의 폐루프 안정도를 Lyapunov 안정도 이론을 이용하여 증명하였다.

시뮬레이션을 통해 관측기에서 추정된 값이 주어진 실제 값에 잘 부합하고, EHA 시스템이 주어진 위치를 잘 추종하는 것을 확인할 수 있었으며 이중화 비대칭형 직렬 EHA 동작 중 발생하는 포스 파이팅 현상이 현저히 줄어드는 결과를 확인 할 수 있었다. 또한 산업현장에서 주로 사용되는 PI제어기와 비교를 통해 제안한 제어기 성능의 우수함을 확인하였다.

본 논문에서 제안한 백스테핑 제어기는 성능 면에서 PI제어기에 비해 우수하나 제어 입력이 일반적인 PI제어기에 비해 매우 복잡하고 다양한 센서의 정보를 기반으로 제어 입력을 산출해야 하므로 일반적인 PI제어기 대비 연산량이 크게 증가한다. 또한 관측기가 추정한 상태를 기반으로 EHA를 제어하기 때문에 실제 시험 환경에서는 관측기의 추정 성능에 따라 제안된 제어기의 성능도 크게 영향을 받을 것으로 예상된다.

추후 다양한 형태의 외란 시뮬레이션과 시험을 통해 설계된 제어기 및 관측기의 성능을 검증할 예정이다.

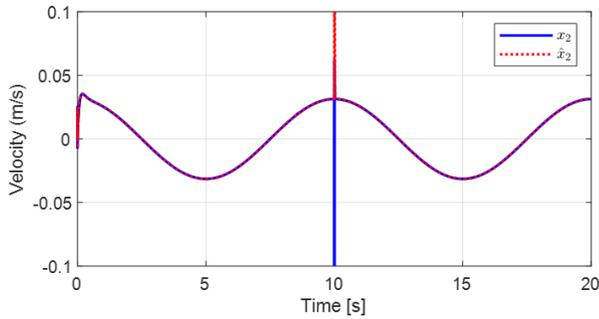
(a) Case 1: Displacement reference  $x_{1d}$  and actual  $x_1$ (b) Case 1: Tracking error  $x_{1d} - x_1$ (c) Case 1: Control signal  $u$ (d) Case 1:  $\bar{x}_3$  of each chamber**Fig. 3** Case 1: Controller Simulation Results(a) Case 2: Displacement reference  $x_{1d}$  and actual  $x_1$ (b) Case 2: Tracking error  $x_{1d} - x_1$ (c) Case 2: Control signal  $u$ (d) Case 2:  $\bar{x}_3$  of each chamber**Fig. 4** Case 2: Controller Simulation Results

## 후 기

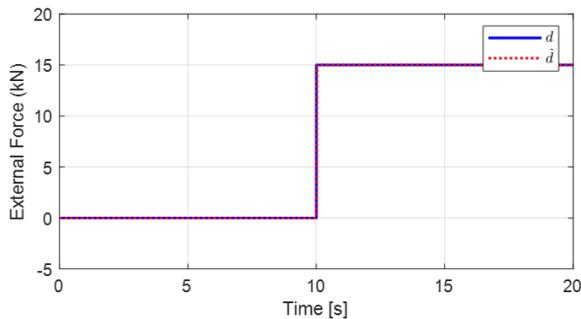
해당 논문은 국방과학연구소 '19년 산학연주관 핵심 기술(시험개발) 연구개발과제 "Electro-Hydrostatic 액츄에이터(EHA) 개발"의 일환으로 수행된 것입니다.

## References

- [1] N. Alle, S. S. Hiremath, S. Makaram, K. Subramaniam and A. Talukdar, "Review on electro hydrostatic actuator for flight control," *International Journal of Fluid Power*, vol. 17, no. 2, pp. 125-145, Apr. 2016.
- [2] G. Yoon, H. Park and K. Jang, "The State of the Art and Application of Actuator in Aerospace," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, vol. 17, no. 6, pp. 89-102, Dec. 2010.
- [3] S. R. Lee and Y. S. Hong, "Synchronous Control of an Asymmetrical Dual Redundant EHA," *Journal of Drive and Control*, vol. 13, no.2, pp. 1-9, June 2016.
- [4] S. R. Lee and Y. S. Hong, "Control-performance Improvement of Dual EHAs," *Journal of Drive and Control*, vol. 13, no.3, pp. 32-38, Sep. 2016.
- [5] Y. S. Hong, S. S. Kim, D. H. Kim, S. B. Kim and K. H. Choi, "Design of a Hydraulic Circuit for an Asymmetrically Dualized Electro-Hydrostatic Actuator," *Control-performance Improvement of Dual EHAs,* *Journal of Aerospace System Engineering*, vol. 8, no. 2, pp. 7-12, Jun. 2014.
- [6] Y. S. Hong, S. S. Kim, D. H. Kim, S. B. Kim and K. H. Choi, "Improvement of a Hydraulic Circuit for an Electro-Hydrostatic Actuator Equipped with a Single Rod Cylinder," *Journal of Aerospace System Engineering*, vol. 8, no. 1, pp. 1-6, Aug 2014.
- [7] J. Fan, D. Ling, Z. Tang and Z. Pei, "Study on nonlinear PID control for electro-hydrostatic actuator," *Proceedings of 2014 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference*, Yantai, China, pp. 1317-1320, Aug. 2014.
- [8] Qian Zhang and Bingqiang Li, "Feedback linearization PID control for electro-hydrostatic actuator," *2011 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC)*, Dengleng, China, pp. 358-361, Aug. 2011.
- [9] Ji Xinjie and Li Shengjin, "Design of the fuzzy-PID controller for new vehicle active suspension with electro-hydrostatic actuator," *2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, Xian, China, pp. 3724-3727, May 2009.
- [9] J. M. Lee, S. H. Park and J. S. Kim, "Design and Experimental Evaluation of a Robust Position Controller

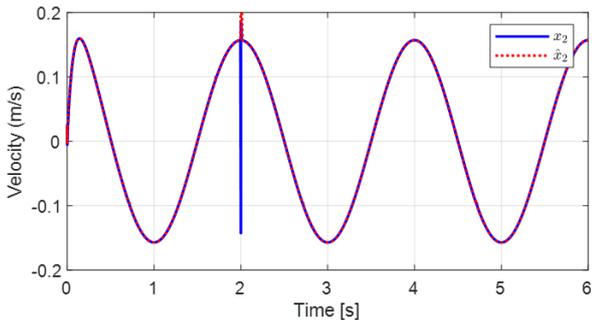


(a) Case 1: Actual  $x_2$  and estimated  $\hat{x}_2$

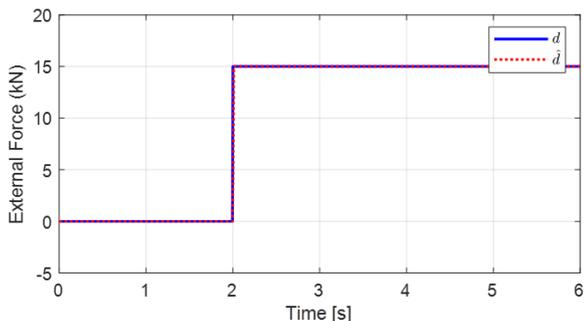


(b) Case 1: Actual  $d$  and estimated  $\hat{d}$

**Fig. 5** Case 1: Observer Simulation Results



(a) Case 2: Actual  $x_2$  and estimated  $\hat{x}_2$



(b) Case 2: Actual  $d$  and estimated  $\hat{d}$

**Fig. 6** Case 2: Observer Simulation Results

- for an Electrohydrostatic Actuator Using Adaptive Antiwindup Sliding Mode Scheme," *The Scientific World Journal*, vol. 2013, Jul. 2013.
- [10] S. Zhengqiang, T. Zhiyong and P. Zhongcai, "Sliding Mode Control for Electrohydrostatic Actuator," *Journal of Control Science and Engineering*, vol. 2014, Sep. 2014.
- [11] I. S. Seo, J. M. Shin, H. M. Kim and J. S. Kim, "Adaptive position control scheme with neural networks for electrohydrostatic actuator systems," *2010 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Xian, China, pp. 501-506, Aug. 2010.
- [12] K. K. Ahn, D. N. C. Nam and M. Jin, "Adaptive Backstepping Control of an Electrohydraulic Actuator," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 19, no. 3, pp. 987-995, June 2014.
- [13] M. Bodson, J. N. Chiasson, R. T. Novotnak and R. B. Rekowski, "High-performance nonlinear feedback control of a permanent magnet stepper motor," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 1, no. 1, pp. 5-14, Mar. 1993.
- [14] D. Shin, W. Kim and C. C. Chung, "Position control of a permanent magnet stepper motor by MISO backstepping in semi-strict feedback form," *2011 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, Budapest, Hungary, pp. 808-813, Jul. 2011.
- [15] D. Won, W. Kim, "Disturbance observer based backstepping for position control of electro-hydraulic systems," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 13, no. 2, pp. 488-493, Feb. 2015.
- [16] G. H. Jun and K. K. Ahn, "Extended-State-Observer-Based Nonlinear Servo Control of An Electro-Hydrostatic Actuator," *Journal of Drive and Control*, vol. 14, no. 4, pp. 61-70, Dec. 2017.
- [17] Herbert E. Merritt; "Hydraulic control systems," J. Wiley, 1967.
- [18] K. McCullough, "Design and characterization of a dual electro-hydrostatic actuator," PhD Thesis, 2011.
- [19] Y. Fu, Y. Pang, H. Liu and Y. Zhang, "Force Fighting Research of Dual Redundant Hydraulic Actuation System," *2010 International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application*, Changsha, China, pp. 762-766, Oct. 2010.