



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학위논문

공압 시스템의 위치 제어 및 고장 허용 제어에  
관한 연구

A Study on Position Control and Fault Tolerance  
Control of Pneumatic Systems

울 산 대 학 교    대 학 원  
건 설 기 계 공 학 과  
곽 경 신

# 공압 시스템의 위치 제어 및 고장 허용 제어에 관한 연구

지 도 교 수 안 경 관

이 논문을 공학석사 학위 논문으로 제출함

2022년 02월

울 산 대 학 교 대 학 원  
건 설 기 계 공 학 과  
곽 경 신

곽경신의 공학석사학위 논문을 인준함

심사위원	안 경 관	
심사위원	이 병 룡	
심사위원	박 기 서	

울 산 대 학 교 대 학 원

2022년 02월

## 국문요약

현대의 산업에서는 고 정밀성, 반복 작업, 대량생산, 위험 작업 등의 요구되는 요소들이 증대됨에 따라 기계의 사용이 필수화 되었다. 기계의 사용이 없이는 수익을 내는 것이 매우 힘들거나 혹은 목적을 달성하는 것 자체가 불가능한 경우가 대다수이다. 이러한 상황들로 인하여 기계 시스템은 점점 발달되며 복잡해지고 있다. 이러한 기계 장비들은 센서와 액추에이터의 조합으로 이루어지며, 이에 대한 작동 방식이나 제어 방법에 대한 연구가 활발히 진행되었다.

기계 시스템의 제어는 물론 알고리즘을 수행하는 제어기도 중요하지만, 시스템의 물리량을 측정하는 센서의 사용은 필수적이다. 고성능의 센서일수록 제어의 성능도 향상되며, 따라서 지금에 이르러서의 센서는 매우 정밀하지만 동시에 복잡한 구조를 갖고 있다. 이러한 복잡한 구조는 반드시 고장의 우려를 증대시킬 수밖에 없는데, 따라서 이에 대한 대책의 필요성이 대두되고 있다. 센서의 고장은 육안으로 판별할 수 없으며, 보통 그 사용되는 수가 많기 때문에 점검을 통한 예방이 매우 어렵다. 센서 고장으로 인한 시스템의 제어 불능은 심각한 안전 위협을 초래하거나 막대한 손실을 초래할 수 있다. 따라서 센서의 이런 고장 상황 시에도 이를 판별하고 대처하는 방안이 필요하다.

본 논문에서는 공압 로드리스 실린더를 특정하여 모델링하며, 모델링된 시스템을 기반으로 한 고장 진단 및 고장 허용 제어 전략을 제안하였고, 도출된 결과는 다음과 같다.

1. 공압 로드리스 실린더에 대한 수학적인 모델링 과정을 수행하고, 완성된 시스템 모델의 타당성을 확인하였다.
2. 시스템 제어를 위한 백스테핑 기반 제어기를 설계하였으며, 확장 상태 관측기를 설계하여 시스템 상태 값을 추정하고 제어 성능을 향상시켰다.
3. System Reconfiguration Scheme 개념을 적용한 고장 허용 제어(FTC) 알고리즘을 추가하여, 센서의 이상 상황에도 제어 목표를 달성할 수 있게 하였다.
4. 최종적으로 구축된 제어 시스템을 MATLAB/Simulink 프로그램을 통하여 구축하였고, 시뮬레이션 수행을 통해 제안한 제어 전략이 잘 수행되었음을 검증하였다.

# 목 차

I. 서 론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 동향	2
1.3 연구 목적	3
II. 배경이론	4
2.1 제어기	4
2.1.1 Back stepping 제어	4
2.2 확장 상태 관측기	5
III. 모델링 및 시뮬레이션 결과	6
3.1 공압 실린더 모델링	6
3.2 확장 상태 관측기 설계	8
3.3 제어기 설계	8
3.3.1 Back stepping 제어기 설계	8
3.3.2 고장 허용 제어 알고리즘 설계	10
3.4 시뮬레이션 검증	11
3.4.1 센서 정상 조건	12
3.4.2 센서 비정상 조건(노이즈)	18
3.4.2.1 FTC 기법 미 사용시	18
3.4.2.2 FTC 기법 사용시	24
3.4.3 센서 비정상 조건(고장)	29
3.4.3.1 FTC 기법 미 사용시	29
3.4.3.2 FTC 기법 사용시	35
IV. 결론 및 향후과제	40
참고문헌	41
Abstract	43

# I. 서 론

## 1.1 연구 배경

과거로부터 현재까지의 산업 구조의 변화를 살펴보면 사람의 수작업에서 시작되었으나, 지금은 거의 모든 분야에서 기계에 의한 작업으로 대체되고 있다. 이는 현대 산업에서 요구되는 정밀성, 반복적인 작업, 대량생산 등의 요소에 따라 기계의 사용이 없이는 수익을 창출하거나 목적을 달성하는 것이 불가능해졌기 때문이다. 이러한 추세로 인해 현대 산업에서 쓰이는 생산 설비나 기계 장비는 점차 고도로 발달되고 있으며, 동시에 복잡해지고 있다.

많은 기계 장비는 다양한 액추에이터와 센서로 이루어져 있다. 따라서 복잡한 기계 시스템을 이해하기 위해서는 먼저 액추에이터와 센서에 대하여 아는 것이 중요하다. 액추에이터란 기계 장치에서의 구동부를 의미하며, 대표적으로는 병진운동을 수행하는 실린더와 회전운동을 수행하는 모터를 들 수 있다. 따라서 기계는 다양한 액추에이터들의 조합으로써 복잡하고 유연한 움직임을 구현할 수 있다. 센서는 위치나 압력, 또는 온도 등의 물리적인 값들을 전기적 신호로 변환하여 우리가 알고 이용할 수 있게 해주는 장치이며, 이를 통하여 기계의 제어를 수행하게 된다.

현대의 제어에서 사용되는 센서는 매우 정밀해야 하며 데이터를 실시간으로 검출하기 때문에 비용이 높고 구조가 매우 복잡하다. 복잡한 구조는 센서의 고성능을 실현하기 위하여 필연적이지만, 고장이 발생할 확률을 현저히 높이는 원인이 되기도 한다. 센서의 고장은 기계의 작동에 문제를 일으켜 생산 차질로 인한 경제적인 손실을 일으킬 수 있으며, 심하면 제어 불가능한 기계 장치로 인한 인명 피해가 생길 위험성도 있다. 따라서 기계의 정기적인 안전 점검과 고장에 대한 예방의 중요성은 점차 중요해지고 있지만, 특히 센서의 경우는 크기가 작고 육안으로 점검하는 것이 불가능하며, 보통 사용되는 개수도 많으므로 일일이 확인하는 것은 매우 어렵다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위하여 기계 시스템의 내부적인 차원에서의 센서 고장 판별과, 고장 상황 시에도 안정적인 제어 목적을 달성하기 위한 연구의 필요성이 대두되고 있다.

## 1.2 연구 동향

직동형 실린더 형태의 액추에이터에 관한 가장 기본적인 제어는 대상물에 대한 힘을 제어하는 것과, 입력 궤도(Reference Trajectory)에 대한 추종을 수행하는 위치 제어라고 할 수 있다. 이러한 힘 제어와 위치 제어를 수행하기 위하여 많은 제어 전략들이 제시되고 연구되어 왔다. 시스템의 제어를 위해서는 실시간으로 데이터를 수집할 수 있는 센서가 매우 중요하다. 따라서 제어의 안정성을 보장하기 위해서는 시스템의 고장을 판별하고, 나아가 고장 시에도 초기의 목적을 달성할 수 있는 제어 전략을 수립하는 것이 중요하다.

고장 진단(Fault Detection)과 관련된 연구는 해마다 그 수가 증가하고 있는 추세를 보인다. 고장 진단을 수행하기 위한 기법은 크게 두 가지로 볼 수 있는데, 하나는 수학적 모델 기반의 진단 방법이다. 이는 정확성이 높고 시스템 변수만 변경해주면 다른 시스템에도 확장시킬 수 있는 장점을 가진다. 그러나 일반적으로 시스템 모델의 변수를 확정하는 것은 어려운 문제이며, 복잡한 시스템일수록 적용이 어렵다는 한계점을 가진다.

또 다른 방법으로는 데이터 기반의 진단 방법이 있다. 이는 머신 러닝(Machine Learning)이나 딥 러닝(Deep Learning) 기법 등을 통하여 학습된 데이터로부터 시스템의 이상이나 고장 여부를 판단하게 된다. 따라서 복잡한 시스템의 수학적 모델링을 필요로 하지 않으므로 다양한 시스템에 비교적 쉽게 적용이 가능하지만, 학습을 시키는 과정이 까다롭고 많은 데이터량을 필요로 하게 된다.

기존에 연구되어온 고장 허용 제어(Fault Tolerance Control) 전략은 보통 Actuator Fault의 경우를 상정한 경우가 대부분이며, 아주 제한적인 경우에만 Sensor Fault에 대해 다루고 있다. 따라서 본 연구에서는 공압 시스템의 수학적 모델을 구축하고 이를 기반으로 하여 간단한 알고리즘을 통해 센서의 고장 여부를 판단하게 되며, 여기에 고장 허용 제어 기법을 응용하여 본래의 목적을 달성하는 제어 전략을 제안한다.

Amirreza Tootchi는 두가지 종류로, 외부 장애물에 의한 액추에이터에 가해지는 외란 또는 실린더 내부나 피스톤의 마모등으로 인한 Actuator Fault 상황시에도 강건성과 안정성을 보장하는 Fault Tolerance Control의 제어전략을 검증하였다. [1]

Xifeng Gao는 PCM(Pneumatic Continuum manipulator)에서 탄성 물질에 축적되는 데미지에 의해 발생할 수 있는 Actuator Fault 항목을 고려하여 제어의 안정성을 검증하였다. [2]

Hoai An Trinh은 유압 실린더 시스템에서 발생하는 Internal Leakage에 대하여 Actuator Fault로 정의하여 이를 보상해 줌으로써 강건하고 안정적인 제어 알고리즘을 검증하였다. [3]

Christopher Edwards는 Sliding Mode FDI(Fault Detection and Isolation)를 통한 Sensor fault의 추정값을 통해 센서의 faulty measurement를 보정하여 페루프 제어의 안정적인 성능을 검증하였다. [4]

### 1.3 연구 목적

작업에 사용되는 액추에이터중 가장 많은 비율을 차지하는 것은 직동형의 실린더이다. 실린더는 크게 유압 작동식과 공압 작동식으로 나눌 수 있다. 유압 시스템은 동력밀도가 높아 큰 힘을 필요로 하는 생산 공정이나 건설 현장 등에서 매우 중요하게 사용된다. 공압 실린더는 유압 시스템과 비교해서 반응과 동작이 빠르고 가벼운 구조를 가진다. 또한 대기중의 공기를 압축하여 사용하므로 누설 유량 발생 시에도 환경적인 문제가 없다. 그러나 공기의 큰 압축성으로 인해 정밀한 위치제어가 어렵다는 단점이 있다. 따라서 공압 시스템의 제어에서는 안정성이 보장된 제어 알고리즘과 더불어 부하 마찰이나 외력의 적절한 보상을 통한 정밀한 제어 성능을 획득하는 것이 중요하다.

본 논문에서는 공압 작동식 로드리스 실린더와 비례제어밸브로 이루어진 공압 시스템의 정밀한 위치 추종 제어(Position Tracking Control) 목적을 달성하기 위하여 수학적 모델링을 수행하였고, 백스텝핑 기반의 적용이 용이한 제어 알고리즘과 더불어 상태 확장 관측기를 설계하여 외란을 보상해 줌으로써 높은 성능을 보장하는 제어 전략을 제시하였다. 또한 센서 고장 상황 내에서도, 설계한 관측기로부터 얻은 추정 값을 사용함으로써 본래의 제어 목적을 달성하는 고장 허용 제어(Fault Tolerance Control) 개념의 제어 전략을 구성하였다. 최종적으로는 본 논문에서 제안한 제어 전략에 대해 시뮬레이션을 수행함으로써 그 타당성을 검증하였다.

## II. 배경이론

### 2.1 제어기

제어기란 센서로부터 시스템의 물리량에 대한 정보를 수집하며, 입력된 정보를 기반으로 하여 액추에이터가 원하는 동작을 수행할 수 있도록 하는 장치 혹은 시스템이라고 할 수 있다. 고 수준의 제어 성능과 안정성을 보장하기 위하여 구성하는 폐루프 기반의 제어 알고리즘에서는 적절한 제어 기법의 설계가 매우 중요한데, 이러한 제어기가 정확히 작동하기 위해서는 센서의 기능이 매우 핵심적이다. 따라서 시스템의 제어에서 고 성능의 센서는 필수적인데, 만일 센서에 문제가 생기면 소기의 목적을 달성할 수 없게 된다. 그러므로 이러한 문제를 해결하기 위해서는 센서 고장 상황 시에도 제어 목적을 지속할 수 있는 제어 전략의 수립이 필요하다.

본 논문에서는 공압 액추에이터의 위치 추종 제어를 목적으로 하며, 이를 달성하기 위하여 현재까지 PID Control, Backstepping Control, Sliding mode control 등의 많은 제어 전략이 제안되어왔다. 이번 연구에서는 Backstepping 기반의 강건하면서도 시스템 제어에 용이한 제어전략을 선택하였고, 확장 상태 관측기(Extended State Observer)를 설계하여 시스템의 파라미터들을 정밀하게 추정함으로써 외란과 모델링 오차의 보정을 통해 보다 정밀한 제어 성능을 얻고, 또한 센서 고장 상황 시에도 지속적인 제어 수행이 가능한 제어전략을 구현한다.

#### 2.1.1 Back stepping 제어

백스테핑 제어는 외란이나 모델링 불확실성 등에 대해 강건성을 갖는 제어 기법으로서, 설계자가 알고있는 안정된 시스템으로부터 시작하여 각 서브시스템을 안정시키기 위한 새로운 제어 입력을 이후의 시스템에서 되돌아 얻는 방식이 반복되며, 이러한 재귀적인 구조를 갖는 특성로 인해 백스테핑 제어라고 한다.

낮은 차수의 서브시스템의 일반적인 형태는 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{x} = f_x(x) + g_x(x)u_x(x) \quad (1)$$

여기서  $x \in R^n$  는  $n > 1$ 인 시스템 상태 변수 벡터를 나타낸다. 이 서브시스템은  $u_x(x)$ 인 어떠한 제어 입력에 의해 안정화되어지며, 따라서  $u_x(x)$ 의 제어 입력이 결정되어야 한다. 먼저  $u_1(x, z_1)$ 의 제어 입력에 의해 시스템은 다음과 같이 나타난다.

$$\dot{z}_1 = f_1(x, z_1) + g_1(x, z_1)u_1(x, z_1) \quad (2)$$

식 (2)와 같이 제어 입력  $u_1(x, z_1)$ 에 의하여 시스템이 안정됨으로써  $z_1$ 이 목표하는 제어 입력  $u_x$ 을 따라가도록 해야 한다. 이러한 일련의 제어 과정은 다음과 같은 Lyapunov function candidate에 기반 한다.

$$V_1(x, z_1) = V_x(x) + \frac{1}{2}(z_1 - u_x(x))^2 \quad (3)$$

여기서 제어 입력  $u_1$ 은  $\dot{V}_1$ 을 0이 아닌 음의 값으로 유계시키도록 설계한다. 따라서 식 (3)으로부터  $V_1$ 이 양수임을 알 수 있고, 적절한 제어 입력  $u_1$ 에 의해  $\dot{V}_1$ 이 0이 아닌 음의 값이 되므로 시간이 흐름에 따라  $z_1$ 이  $u_x$ 을 따라가게 될 것이다. 마찬가지로  $u_2(x, z_1, z_2)$ 의 제어 입력에 의해 시스템은 다음과 같이 나타난다.

$$\dot{z}_2 = f_2(x, z_1, z_2) + g_2(x, z_1, z_2)u_2(x, z_1, z_2) \quad (4)$$

식 (4)와 같이 제어 입력  $u_2(x, z_1, z_2)$ 을 통해 시스템을 안정시켜  $z_2$ 가 목표하는 제어 입력  $u_1$ 을 따라가도록 한다.  $V_2$ 에 대한 Lyapunov function candidate를 세우면 다음과 같다.

$$V_2(x, z_1, z_2) = V_1(x, z_1) + \frac{1}{2}(z_2 - u_1(x, z_1))^2 \quad (5)$$

제어 입력  $u_2$ 를  $\dot{V}_2$ 이 0이 아닌 음의 값으로 유계시키도록 설계하면, 결국 시간이 흐름에 따라  $z_2$ 가  $u_1$ 을 따라가게 된다.

이러한 제어 알고리즘의 설계 과정은 실제 제어 입력인  $u$ 가 정해질 때 까지 반복된다.

## 2.2 확장 상태 관측기

제어 시스템에서 상태 관측기(State Observer)는 시스템의 제어 입력과 출력을 비교하여 실제 시스템의 내부 상태를 추정하는 역할을 한다. 이를 통하여 실제로 측정하기 어렵거나 측정이 불가능한 시스템의 상태를 간접적으로 알 수 있기 때문에, 제어 문제를 해결하기 위해 유용하게 사용될 수 있다.

확장 상태 관측기는 기존의 상태 관측기에서 확장 시킨 개념의 관측기라고 할 수 있다. 확장 상태 관측기에서는 기존의 시스템 상태에 포함되어있는 외란이나 모델링되지 않은 불확실성에 대한 항을 새로운 시스템의 한 변수로 확장시킨다. 따라서 이러한 외란이나 불확실성은 기존의 시스템 변수에서 분리되어 완전한 하나의 상태 변수로서 추정이 가능하다. 이렇게 추정된 값을 제어 알고리즘에서 보상해 줌으로써 더 정밀한 제어 목적을 달성하는 것이 가능하다.

### Ⅲ. 모델링 및 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안하는 공압 시스템의 센서 고장 허용 제어전략에 대해 MATLAB/Simulink 프로그램 시뮬레이션 구축을 통하여 제어전략의 타당성을 검증하였다.

#### 3.1 공압 실린더 모델링

시뮬레이션을 수행하기 위하여 목표로 하는 공압 실린더의 모델링 과정을 거쳤으며, 그 형상은 Fig. 3-1과 같다.

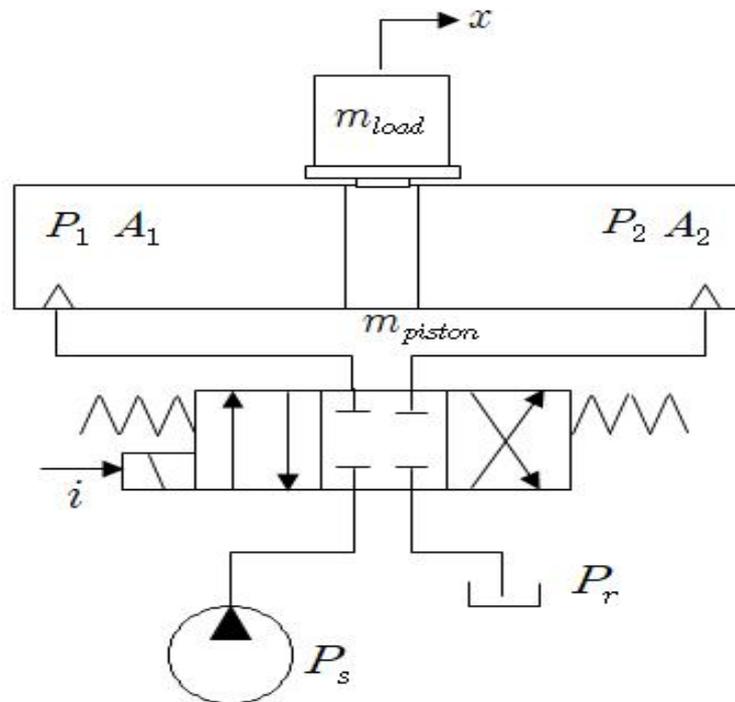


Fig. 3-1 로드리스 공압 실린더 모델링 형상

먼저, 뉴턴의 제 2법칙에 근거하여 실린더의 운동방정식을 기술하면 다음과 같다.

$$m\ddot{x} = P_1A_1 - P_2A_2 - b\dot{x} - F_C\text{sgn}(\dot{x}) + d \quad (6)$$

여기서  $m = m_{piston} + m_{load}$  는 총 질량,  $x$ 는 피스톤의 변위,  $b$ 는 점성마찰계수(viscous friction coefficient),  $F_C$ 는 쿨롱마찰력(Coulomb friction force),  $d$ 는 시스템에 가해지는 외란을 말한다.

열역학적 특성을 고려하면, 챔버 내부의 압력 방정식은 [5]에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{P}_{(1,2)} = \frac{KRT}{V_{(1,2)}} q_{(1,2)} - \frac{K\dot{V}_{(1,2)}}{V_{(1,2)}} P_{(1,2)} \quad (7)$$

위 식에서 1,2는 각 챔버의 특성을 나타내며,  $P$ 는 압력,  $K$ 는 공기의 비열비(specific heat ratio),  $R$ 은 기체 상수(gas constant),  $T$ 는 공기의 절대온도를 나타낸다.

먼저 시스템의 상태 변수를  $X = [x_1, x_2, x_3]^T = [x, \dot{x}, P_L]^T$  으로 정의하며, 식 (6)과 식 (7)을 종합하면 시스템의 상태 공간 방정식은 최종적으로 다음과 같다.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{m}(-bx_2 + A_c x_3 - F_C \text{sgn}(x_2) + d) \\ \dot{x}_3 = \frac{1}{V_t}(\dot{q}_L RT - A_c \text{sgn}(x_2) x_2 x_3) \end{cases} \quad (8)$$

여기서  $P_L = P_1 - P_2$  의 부하 압력이며,  $A_c = A_1 = A_2$  의 실린더 단면적이다. 또한,  $\dot{q}_L = K_{sp} u$  으로 근사할 수 있다.

$$\begin{cases} \rho = \frac{P_s - \text{sgn}(x_3) x_3}{RT} \\ K_{sp} = \frac{C_s \rho \cdot 0.2 \times 2000 \times 10^{-3}}{60} \end{cases} \quad (9)$$

위의 수식에서,  $\text{sgn}$  함수는 다음과 같이 정의된다.

$$\text{sgn}(y) = \begin{cases} 1, & \text{if } y \geq 0 \\ -1, & \text{if } y < 0 \end{cases} \quad (10)$$

### 3.2 확장 상태 관측기 설계

측정되지 않는 시스템의 내부 변수 및 외란을 추정하기 위하여 확장 상태 관측기를 설계하였다. 우선 시스템에 가해지는 외란  $d$ 에 대하여  $x_4 = d$ 로서 독립된 하나의 시스템 상태 변수로 확장시킬 수 있다. 외란항의 미분을  $h$ 로 두면, 확장된 시스템은 다음과 같이 나타난다.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{m}(-bx_2 + A_c x_3 - F_C \operatorname{sgn}(x_2) + x_4) \\ \dot{x}_3 = \frac{1}{V_t}(\dot{q}_L RT - A_c \operatorname{sgn}(x_2) x_2 x_3) \\ \dot{x}_4 = h \end{cases} \quad (11)$$

확장된 시스템으로부터, 선형의 확장 상태 관측기를 설계할 수 있다. [6]을 고려하여, 확장 상태 관측기의 방정식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 + 4\omega_0(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{x}}_2 = \frac{1}{m}(-b\hat{x}_2 + A_c \hat{x}_3 - F_C \operatorname{sgn}(\hat{x}_2) + \hat{x}_4) + 6\omega_0^2(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{x}}_3 = \frac{1}{V_t}(\dot{q}_L RT - A_c \operatorname{sgn}(\hat{x}_2) \hat{x}_2 \hat{x}_3) + 4\omega_0^3(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{x}}_4 = \omega_0^4(x_1 - \hat{x}_1) \end{cases} \quad (12)$$

여기서  $\omega_0$ 는 양의 값을 갖는 상수이며, 관측기를 튜닝하는 역할을 한다.

### 3.3 제어기 설계

본 절에서는 공압 로드리스 실린더 시스템 모델링과 확장 상태 관측기를 통하여 백스테핑 제어 알고리즘에 외란을 보상해 줌으로써, 안정적이며 정밀한 위치 추종 제어가 가능한 제어기를 설계하였다. 또한, 확장 상태 관측기를 통해서 실린더 내부 압력의 추정값을 입력받아, 압력 센서의 고장 여부 판별과 고장 상황 시에도 제어를 지속할 수 있는 ‘시스템 재구성 방식 (System Reconfiguration Scheme)’의 고장 허용 제어전략을 적용하였다.

#### 3.3.1 Back stepping 제어기 설계

본 제어기 설계 단계에서는 제어 알고리즘의 안정성을 보장하기 위하여 Lyapunov function candidate 기반의 설계 과정을 적용하였다.  $x_1$ 의 추종오차에 대해  $z_1 = x_1 - x_{1d}$ 라고 정의한다.  $V_1$ 에 대한 Lyapunov function candidate를 세우면 다음과 같다.

$$\dot{V}_1 = \frac{1}{2} \dot{z}_1^2 = z_1 \dot{z}_1 = z_1 (x_2 - \dot{x}_{1d}) \quad (13)$$

시스템 상태 변수  $x_2$ 에 대한 가상의 제어 입력을  $\alpha_1$ 으로 정의하고, 다음과 같이 나타낸다.

$$\alpha_1 = \dot{x}_{1d} - k_1 z_1 \quad (14)$$

위 식에서  $k_1$ 은 피드백 상수이며, 양의 값을 갖는다. 다음으로  $x_2$ 의 추종오차에 대해  $z_2 = x_2 - \alpha_1$  라고 정의하고,  $V_2$ 에 대한 Lyapunov function candidate를 세우면 다음과 같다.

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + \frac{1}{2} \dot{z}_2^2 = -k_1 z_1^2 + z_1 z_2 + z_2 (\dot{x}_2 - \dot{\alpha}_1) \quad (15)$$

마찬가지로, 상태 변수  $x_3$ 에 대한 가상의 제어 입력을  $\alpha_2$ 으로 정의하면 다음과 같다.

$$\alpha_2 = \frac{1}{A_c} [m(\dot{\alpha}_1 - z_1 - k_2 z_2) + b x_2 + F_C \operatorname{sgn}(x_2) - x_4 - z_1] \quad (16)$$

$k_2$ 는 양의 값을 갖는 피드백 상수이다. 마지막으로,  $x_3$ 의 추종오차에 대해  $z_3 = x_3 - \alpha_2$  로 정의하며,  $V_3$ 에 대한 Lyapunov function candidate를 세우면 다음과 같다.

$$\dot{V}_3 = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 + \frac{1}{2} \dot{z}_3^2 = -k_1 z_1^2 - k_2 z_2^2 + \frac{A_c}{m} z_2 z_3 + z_3 (\dot{x}_3 - \dot{\alpha}_2) \quad (17)$$

따라서 실제 제어 입력  $u$ 는 다음과 같다.

$$u = \frac{1}{K_{sp} RT} [V_t(\dot{\alpha}_2 - k_3 z_3 - \frac{A_c}{m} z_2) + A_c \operatorname{sgn}(x_2) x_2 x_3] \quad (18)$$

### 3.3.2 고장 허용 제어 알고리즘 설계

본 연구에서 고장 허용 제어(FTC) 기법으로서 적용한 방법은 System Reconfiguration Scheme의 개념이다. 이는 센서로부터 측정된 실제 시스템 압력의 값과 시스템 모델 기반의 확장 상태 관측기로부터 추정된 압력의 값을 모두 사용한다. 시스템 제어에서는 기본적으로 측정 압력 값을 입력 값으로써 사용하나, 이 측정값이 추정된 값과 일정 수준 이상 차이가 나게 되면 측정값을 버리고 추정된 값을 선택함으로써, 제어 시스템을 재구성하는 과정을 거친다. 따라서 압력 센서에 노이즈가 발생하거나, 혹은 압력 센서에 고장이 발생하여 측정값이 0이 되는 상황에서도 원래의 제어 목표를 달성할 수 있다.

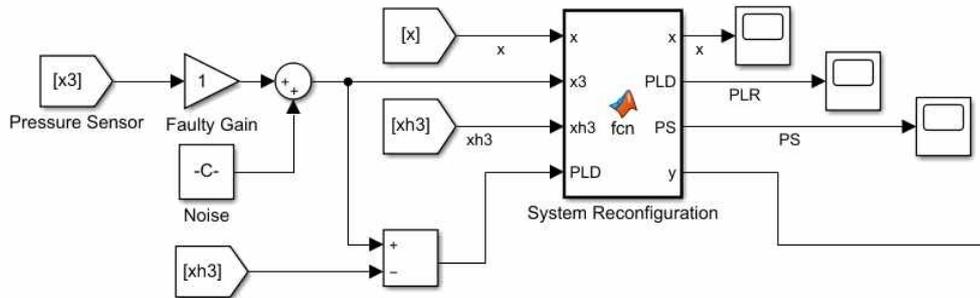


Fig. 3-2 시스템 재구성 알고리즘 도식도

```
function [x,PLD,PS,y] = fcn(x,x3,xh3,PLD)
if PLD >= -0.5e5 && PLD <= 0.5e5
    x(3) = x3;
    PS = 1;
else
    x(3) = xh3;
    PS = -1;
end

x = [x(1); x(2); x(3)];
y = x;
```

Fig. 3-3 시스템 재구성 알고리즘 구성

### 3.4 시뮬레이션 검증

본 절에서는 MATLAB/Simulink 프로그램을 통해 공압 시스템의 모델링을 수행하여 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션의 구성도와 사용한 파라미터는 다음과 같다.

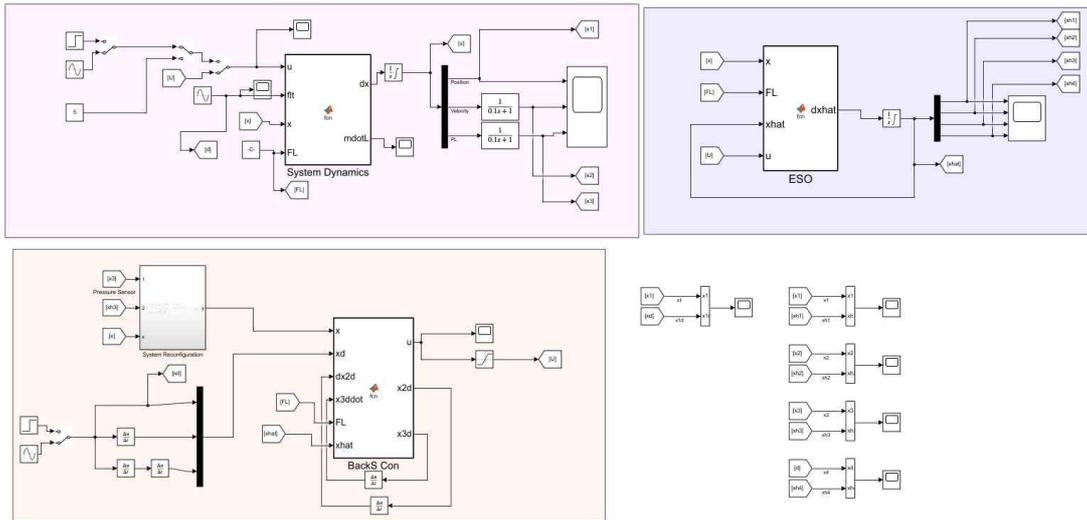


Fig. 3-4 공압 시스템 시뮬레이션 구성도

Table 3-1 시뮬레이션 파라미터 값

Parameter	Value
$b$	$80 [N/m \cdot s^{-1}]$
$m$	$10 [kg]$
$A_c$	$5.027 \times 10^{-3} [m^2]$
$R$	$287 [J/kg \cdot K]$
$T$	$293 [K]$
$C_s$	$0.95$
$F_C$	$98 [N]$
$L$	$0.68 [m]$
$V_t$	$0.0034 [m^3]$
$P_s$	$6 \times 10^5 [Pa]$

### 3.4.1 센서 정상 조건

○ Sine Wave

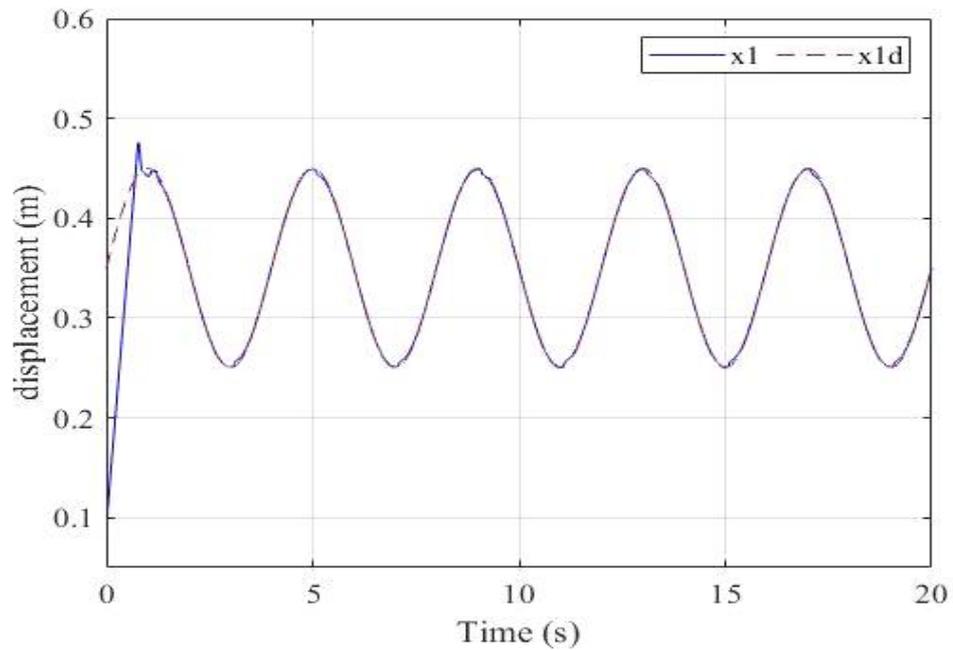


Fig. 3-5 센서 정상 조건시의 위치 추종 선도

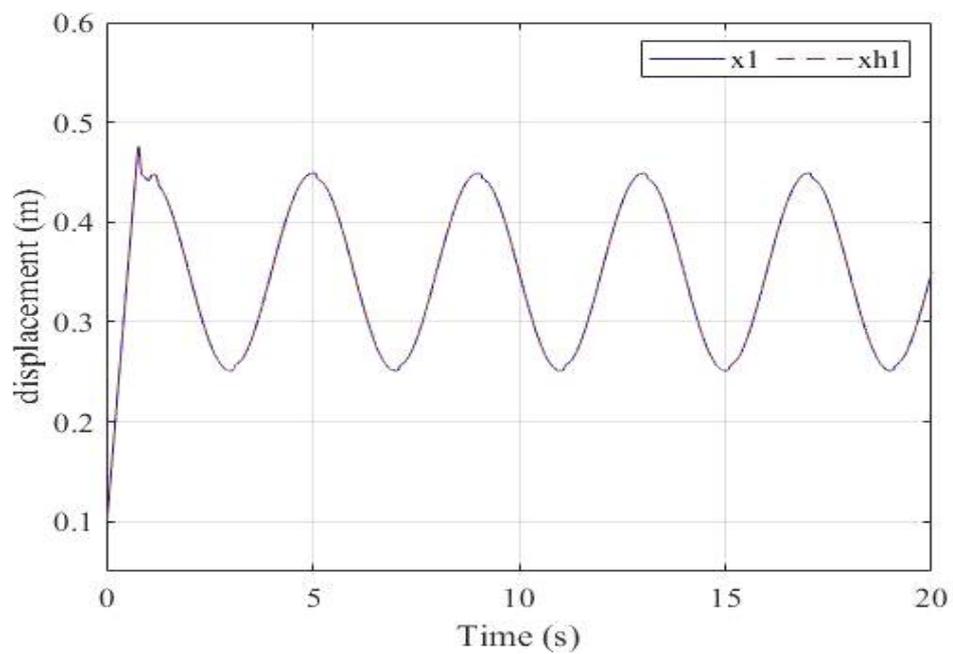


Fig. 3-6 센서 정상 조건시의 위치 추정 선도

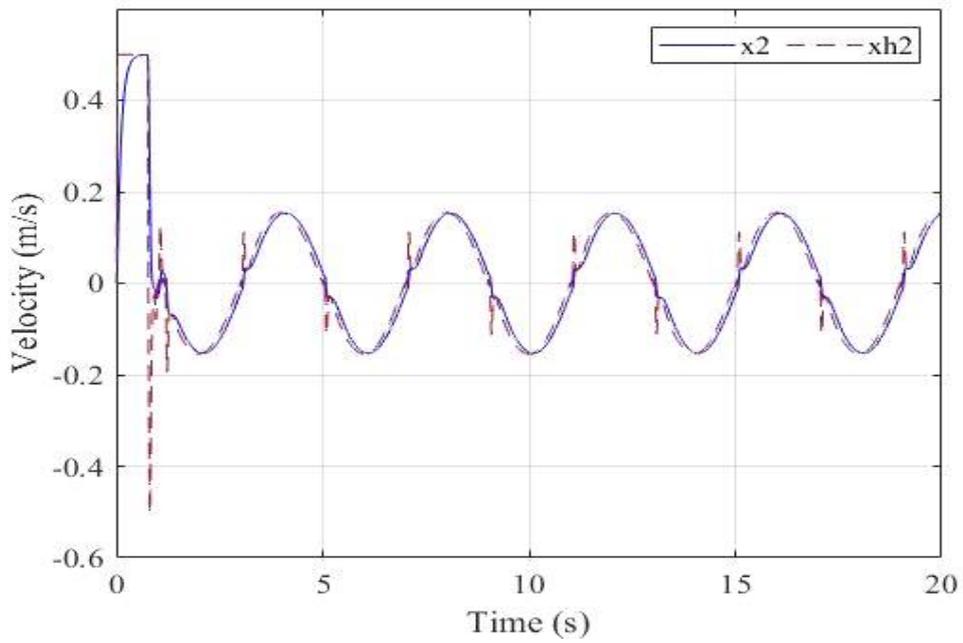


Fig. 3-7 센서 정상 조건시의 속도 추정 그래프

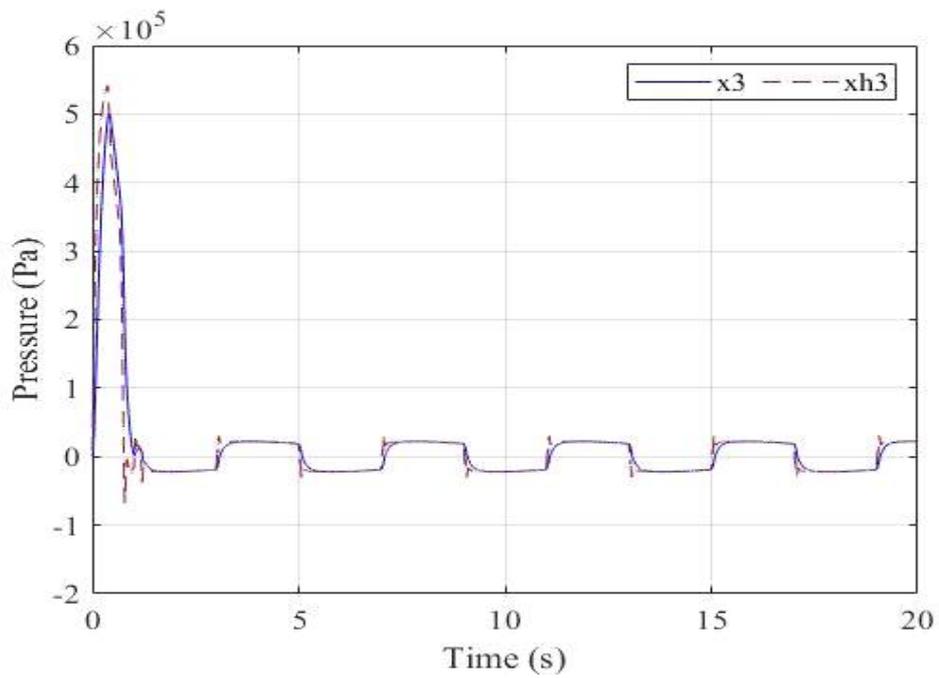


Fig. 3-8 센서 정상 조건시의 압력 추정 그래프

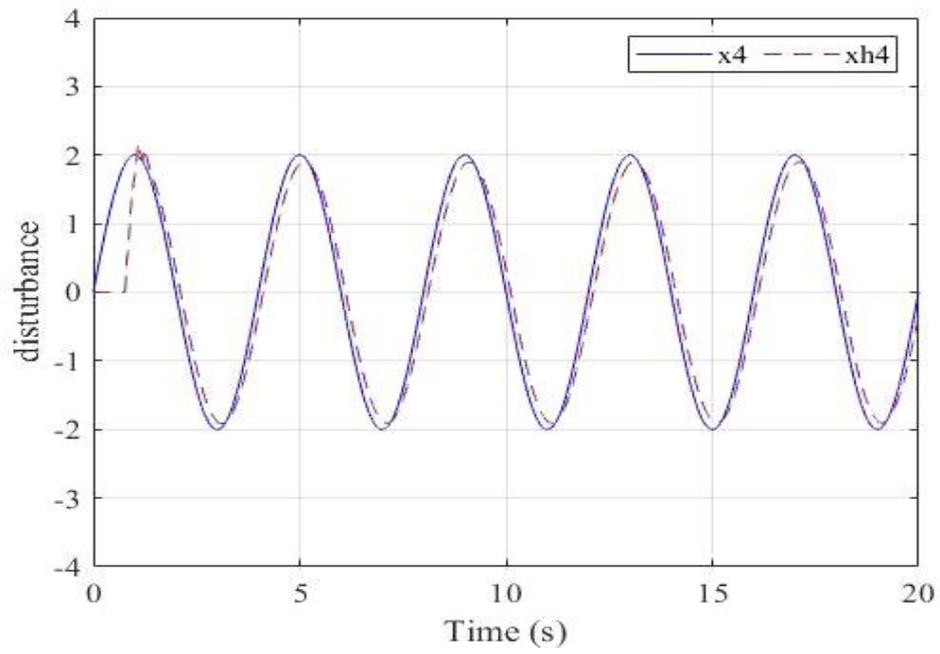


Fig. 3-9 센서 정상 조건시의 외란 추정 그래프

○ Step

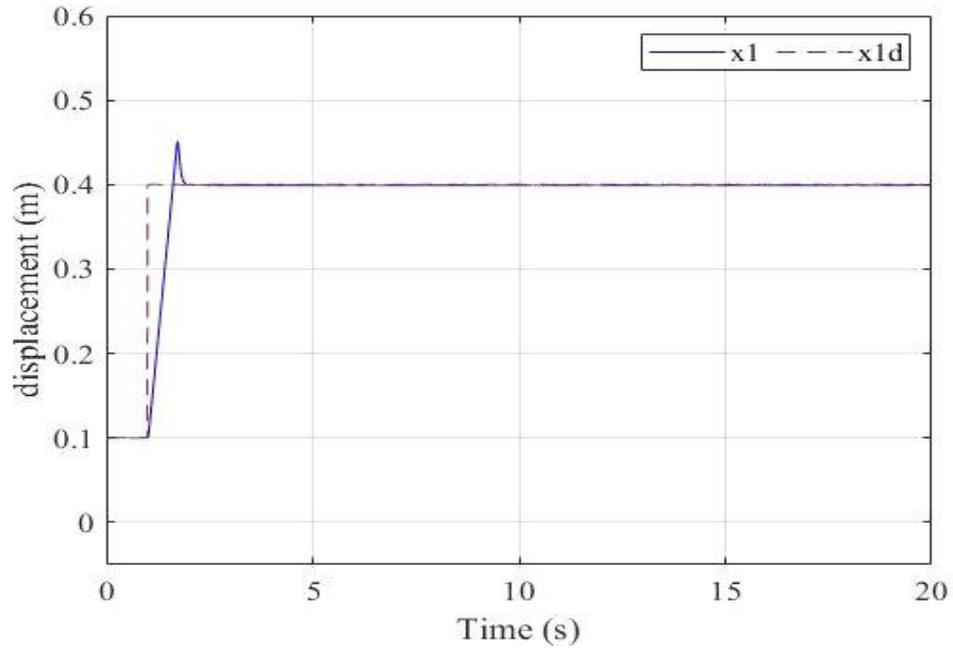


Fig. 3-10 센서 정상 조건시의 위치 추종 선도

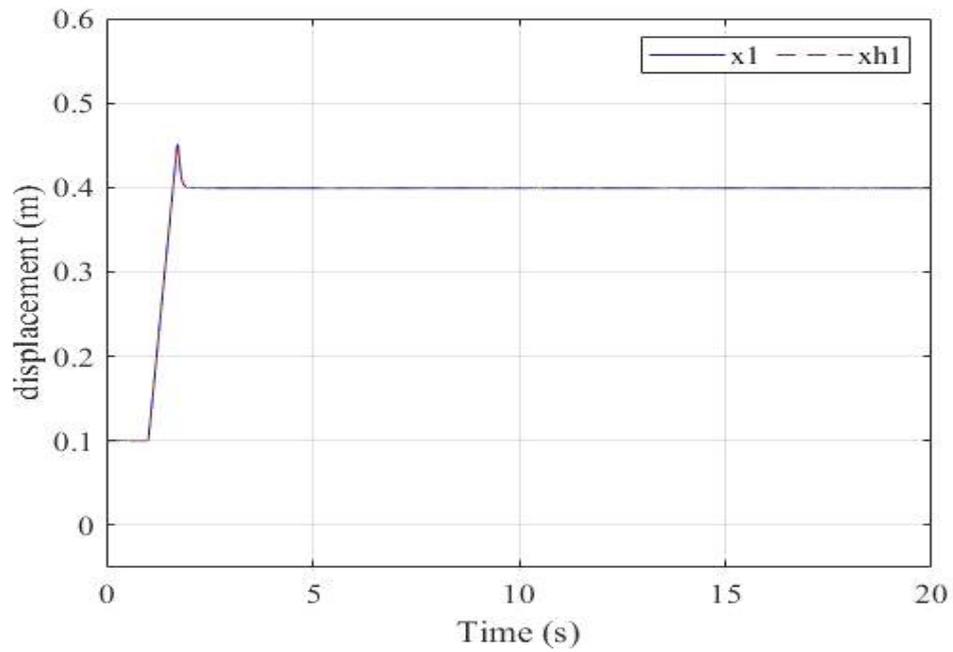


Fig. 3-11 센서 정상 조건시의 위치 추정 선도

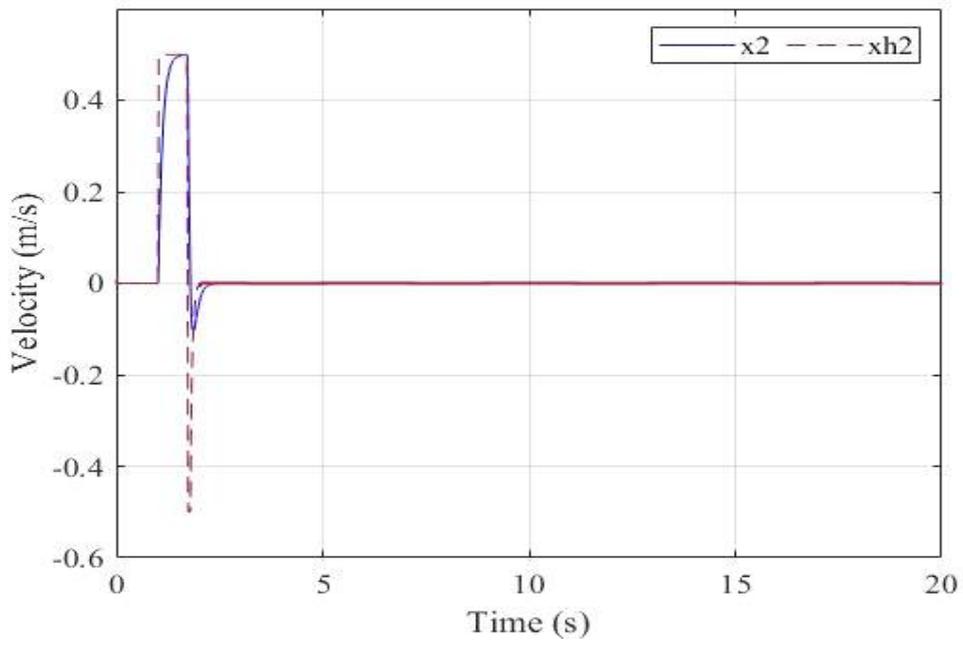


Fig. 3-12 센서 정상 조건시의 속도 추정 선도

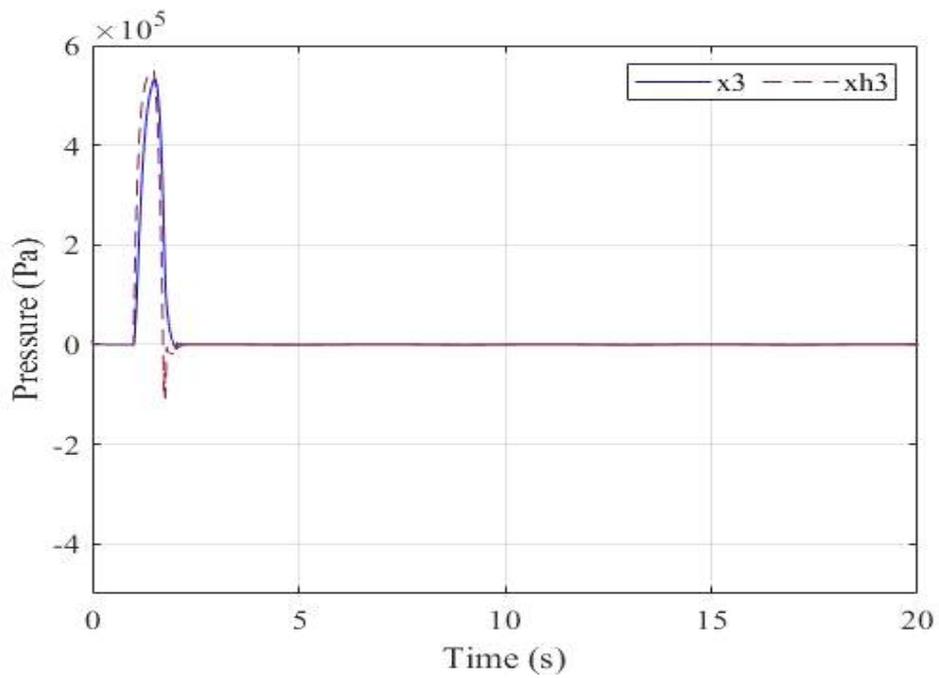


Fig. 3-13 센서 정상 조건시의 압력 추정 선도

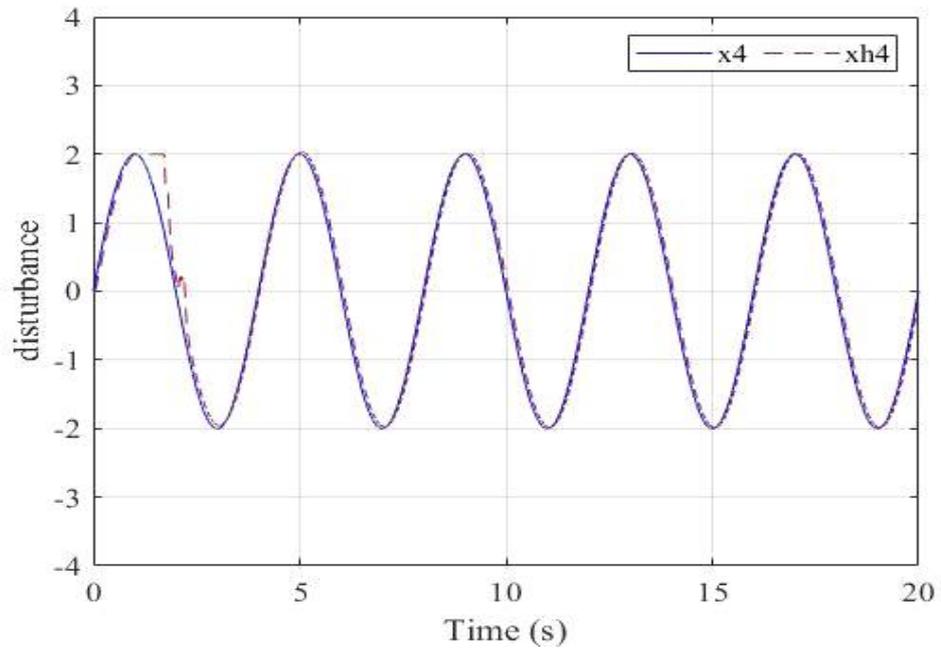


Fig. 3-14 센서 정상 조건시의 외란 추정 선도

### 3.4.2 센서 비정상 조건(노이즈)

센서에 노이즈가 인가되어 측정값이 부정확한 상황을 가정하였다. 노이즈의 수준은 본래의 압력값에 + 2 bar가 되도록 설정하였다. 이 경우의 시뮬레이션 결과는 다음과 같다.

#### 3.4.2.1 FTC 기법 미 사용시

○ Sine Wave

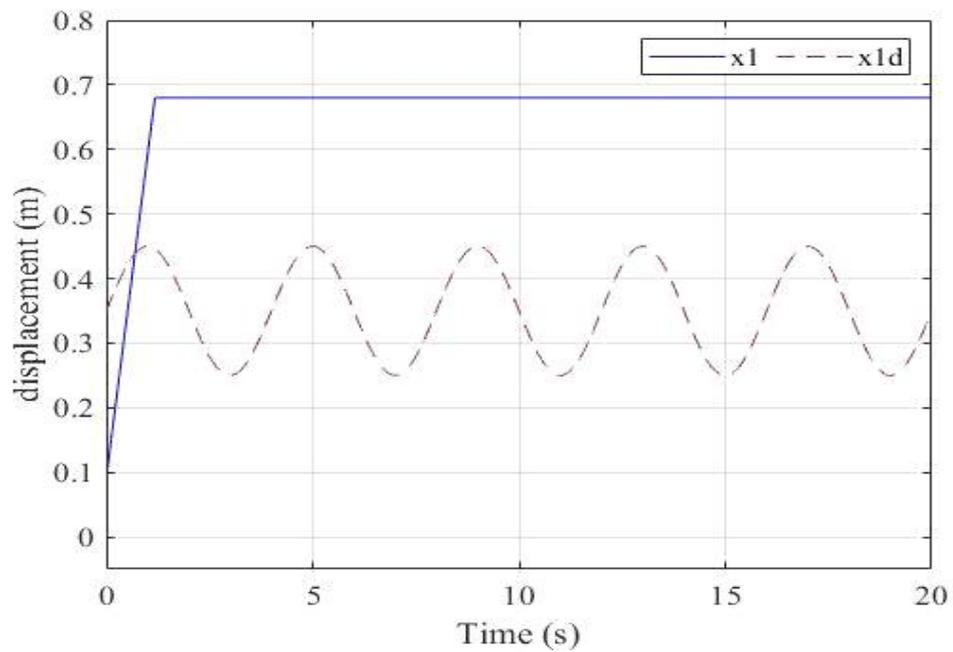


Fig. 3-15 센서 노이즈 조건시의 위치 추종 그래프

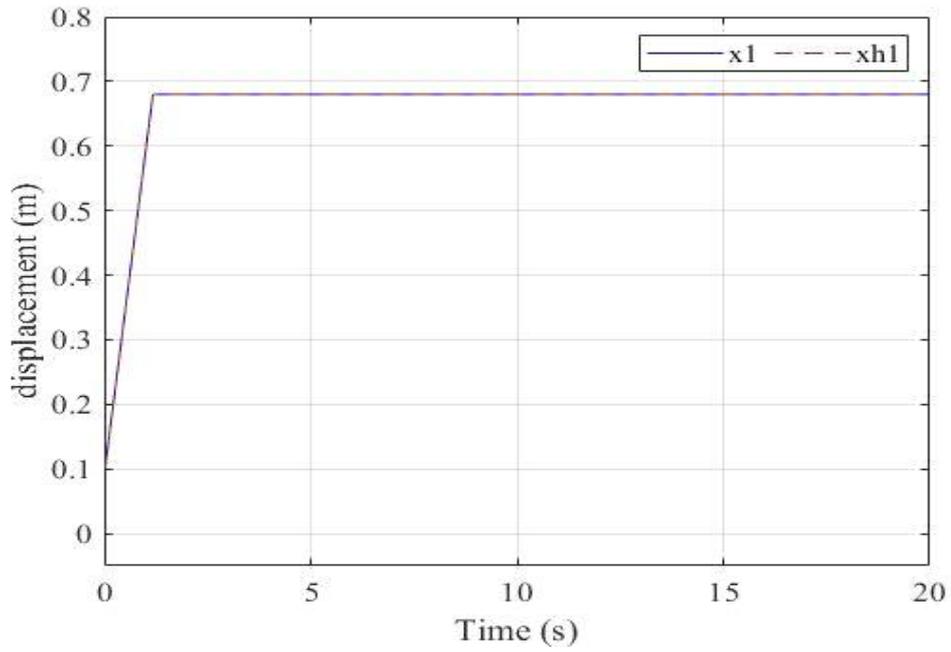


Fig. 3-16 센서 노이즈 조건시의 위치 추정 그래프

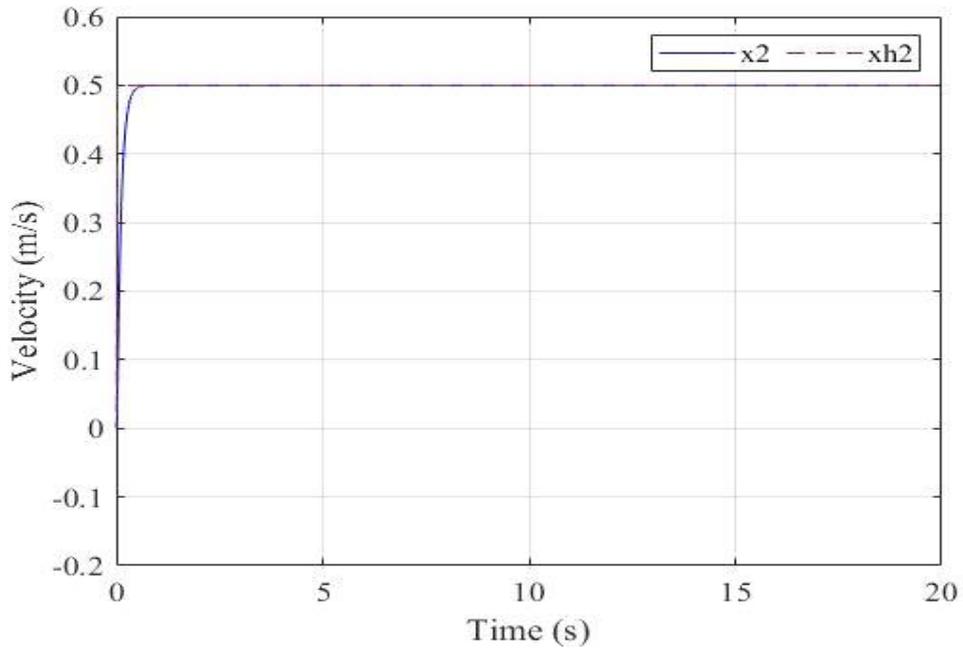


Fig. 3-17 센서 노이즈 조건시의 속도 추정 그래프

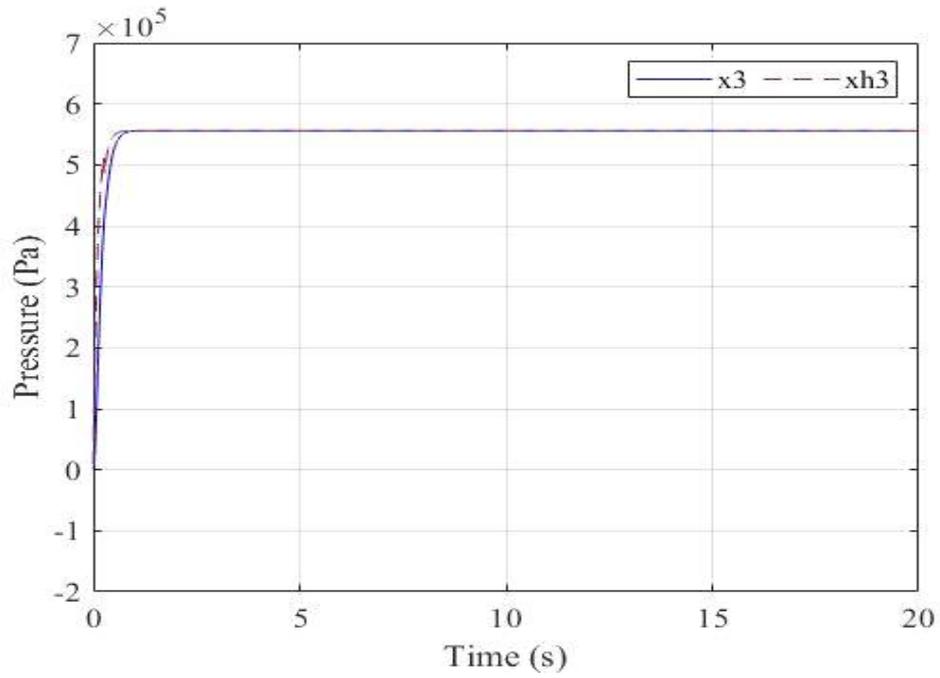


Fig. 3-18 센서 노이즈 조건시의 압력 추정 그래프

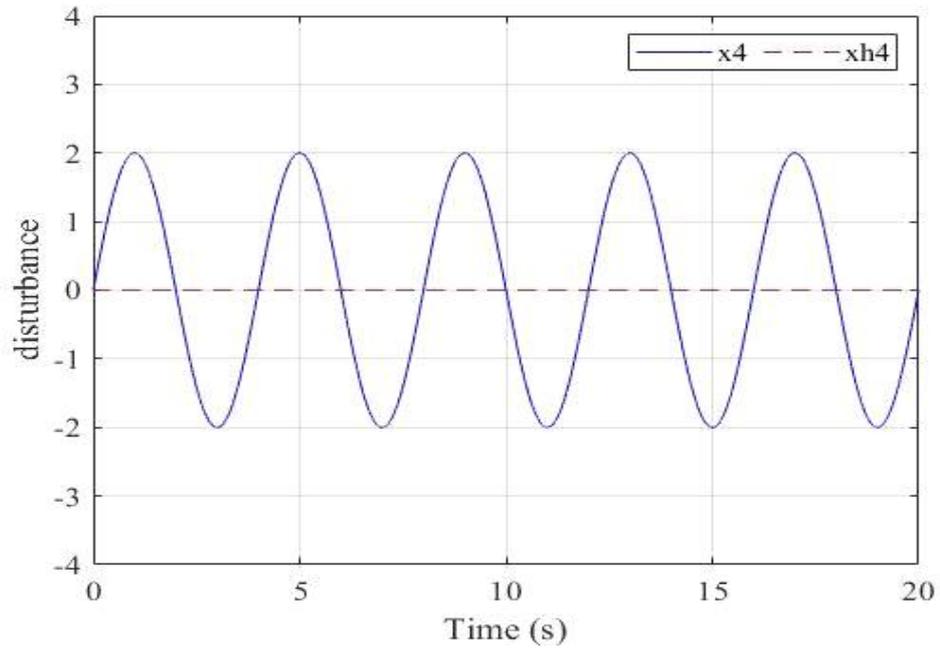


Fig. 3-19 센서 노이즈 조건시의 외란 추정 그래프

○ Step

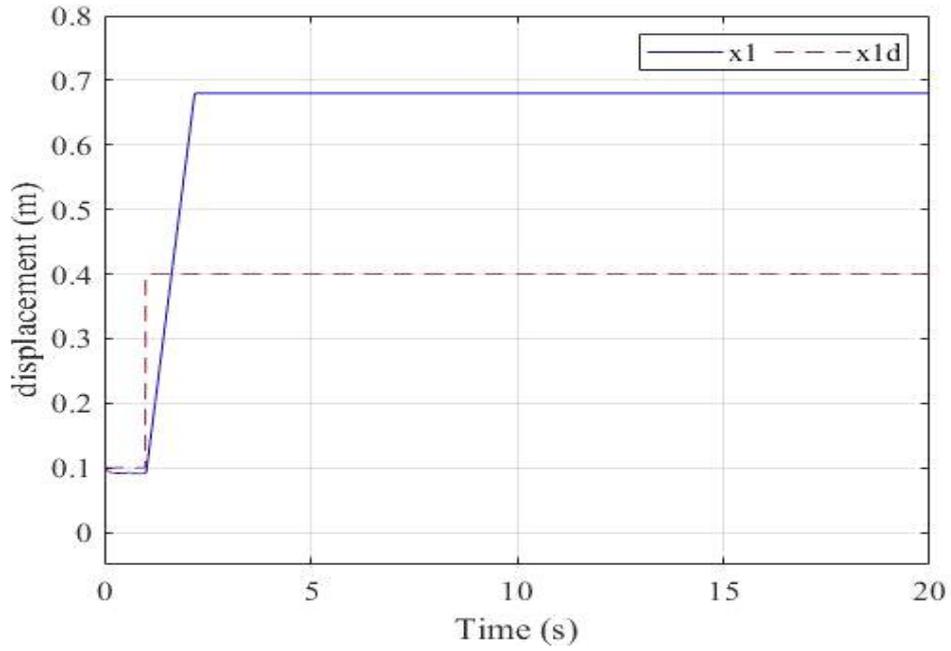


Fig. 3-20 센서 노이즈 조건시의 위치 추종 그래프

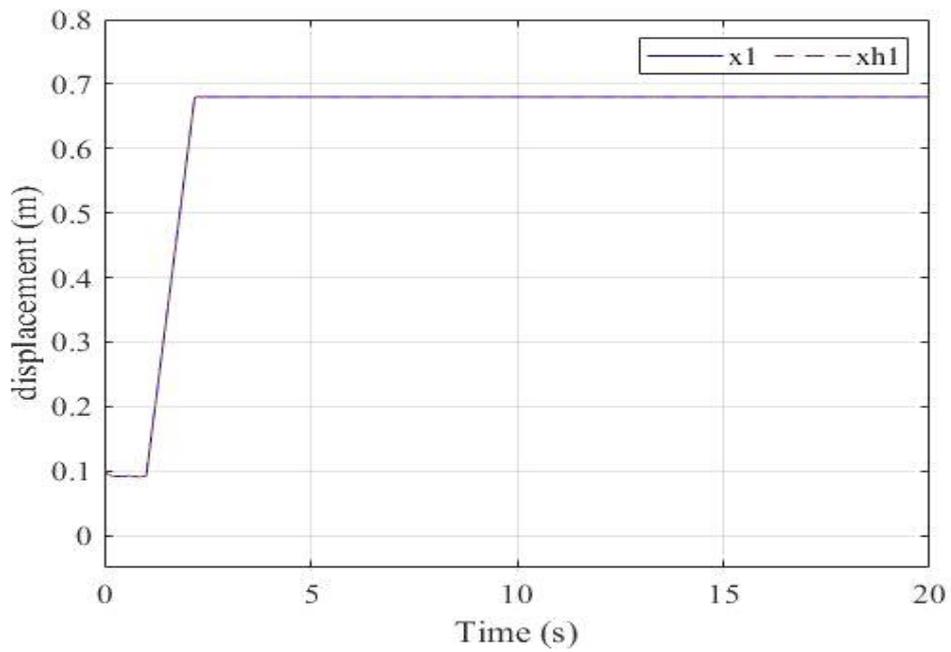


Fig. 3-21 센서 노이즈 조건시의 위치 추정 그래프

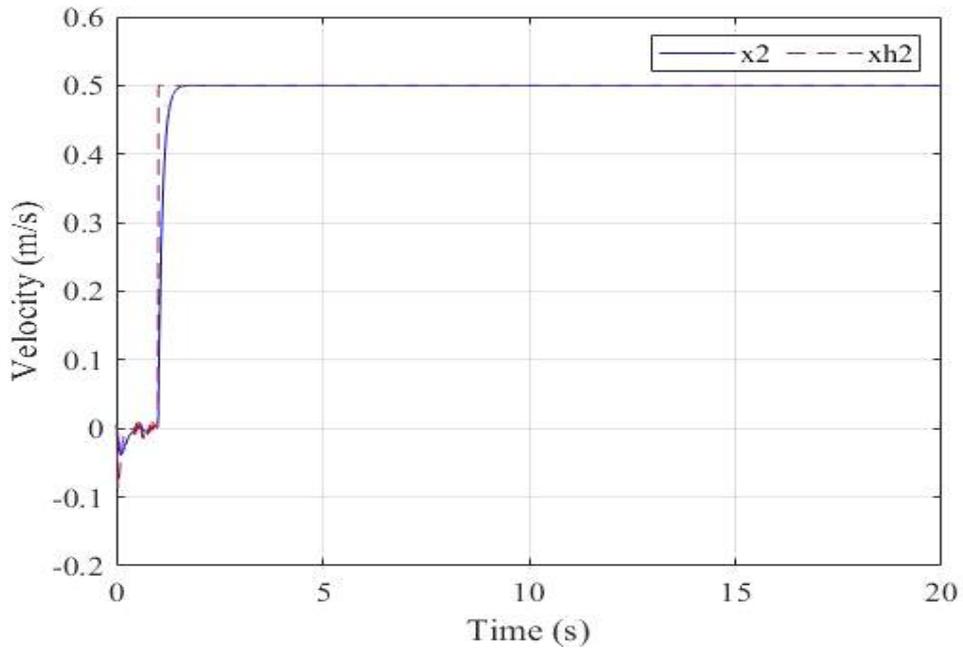


Fig. 3-22 센서 노이즈 조건시의 속도 추정 그래프

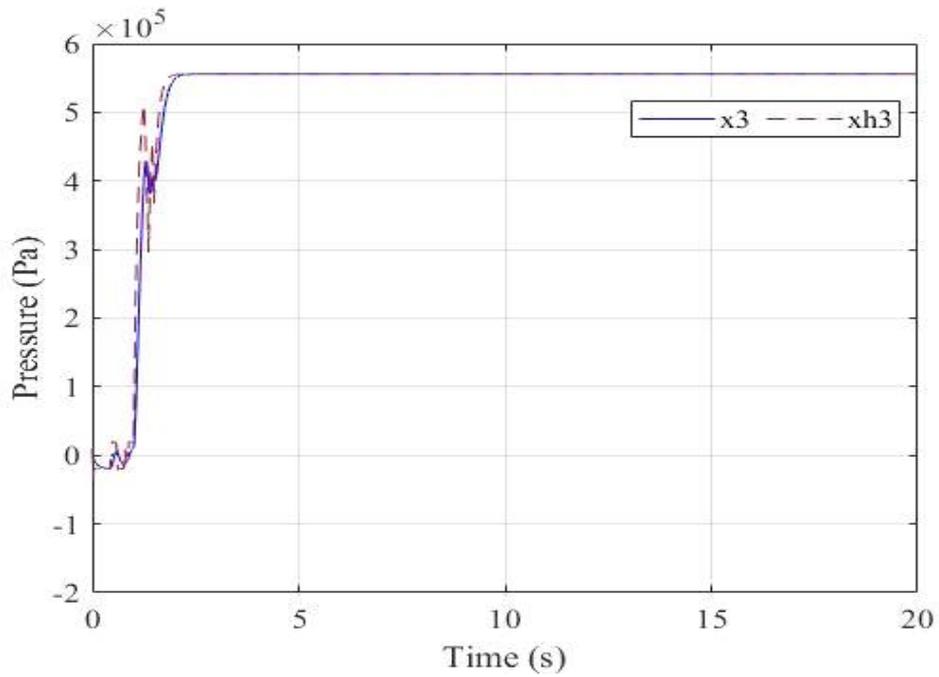


Fig. 3-23 센서 노이즈 조건시의 압력 추정 그래프

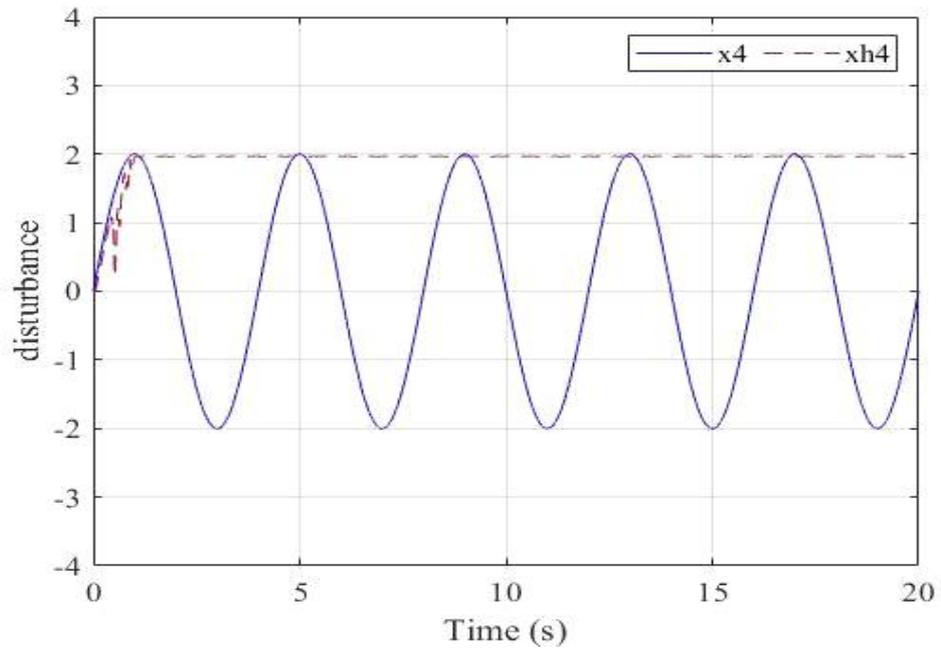


Fig. 3-24 센서 노이즈 조건시의 외란 추정 그래프

### 3.4.2.2 FTC 기법 사용시

#### ○ Sine Wave

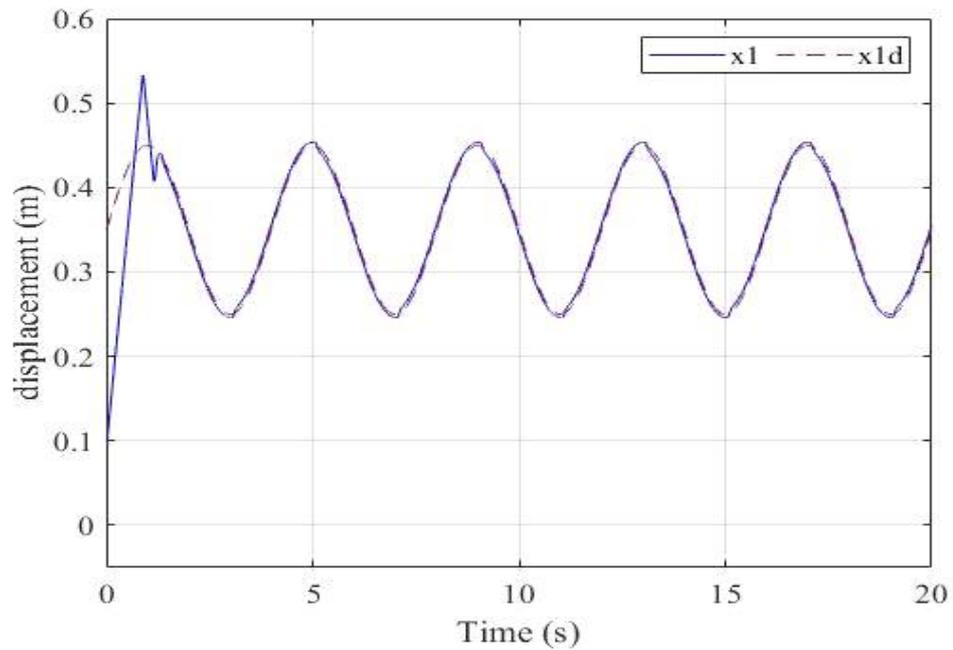


Fig. 3-25 센서 노이즈 조건(FTC 사용)시의 위치 추종 그래프

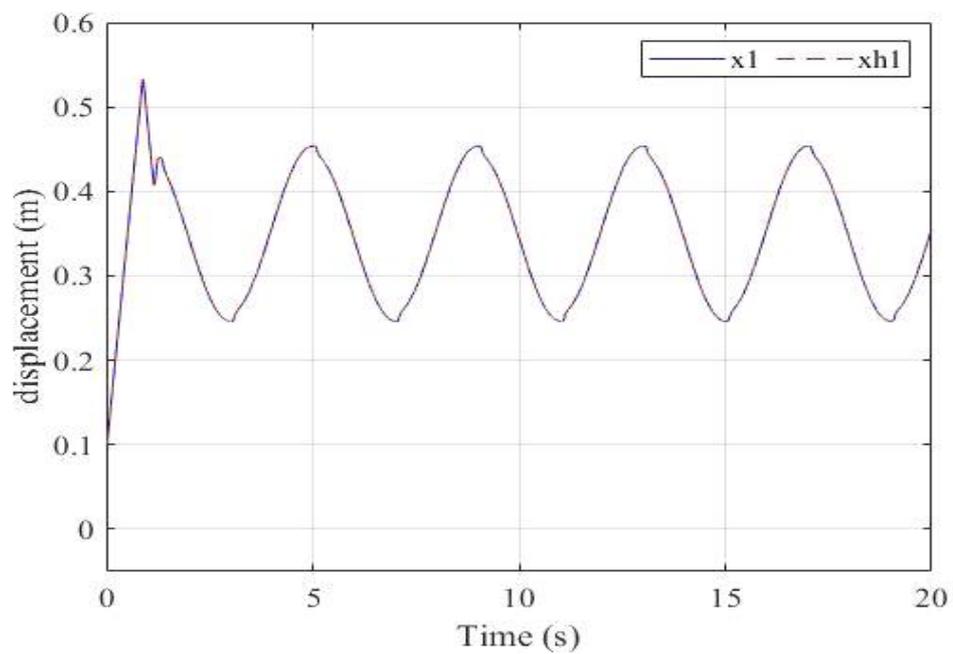


Fig. 3-26 센서 노이즈 조건(FTC 사용)시의 위치 추정 그래프

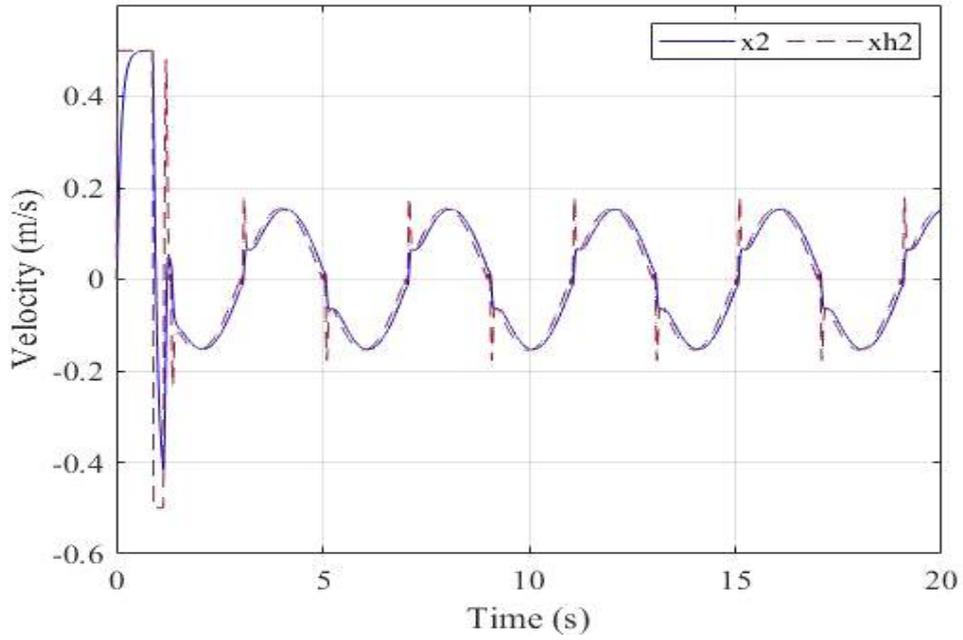


Fig. 3-27 센서 노이즈 조건(FTC 사용)시의 속도 추정 그래프

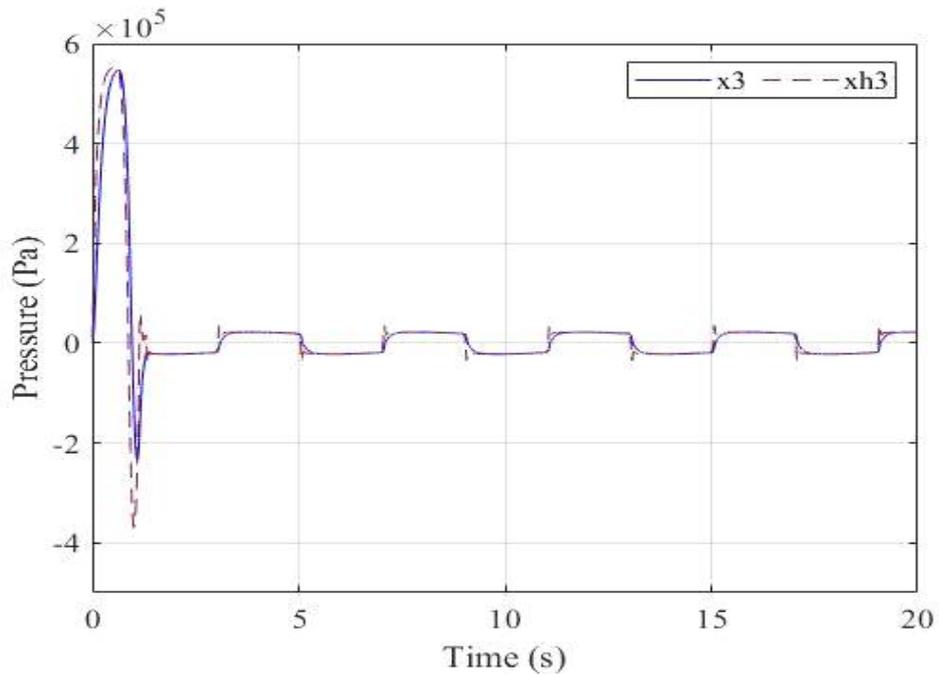


Fig. 3-28 센서 노이즈 조건(FTC 사용)시의 압력 추정 그래프

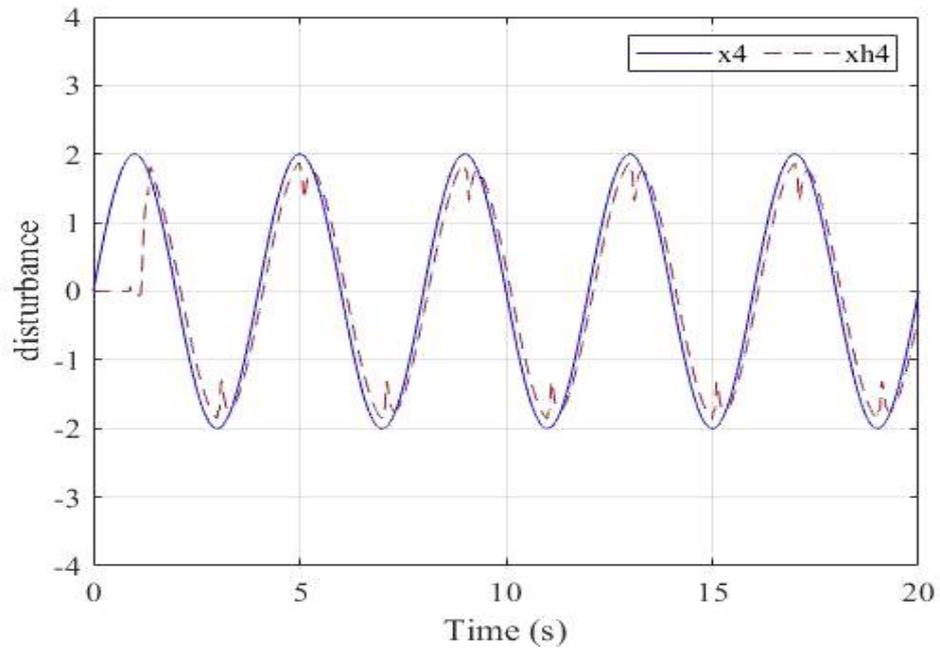


Fig. 3-29 센서 노이즈 조건(FTC 사용)시의 외란 추정 그래프

○ Step

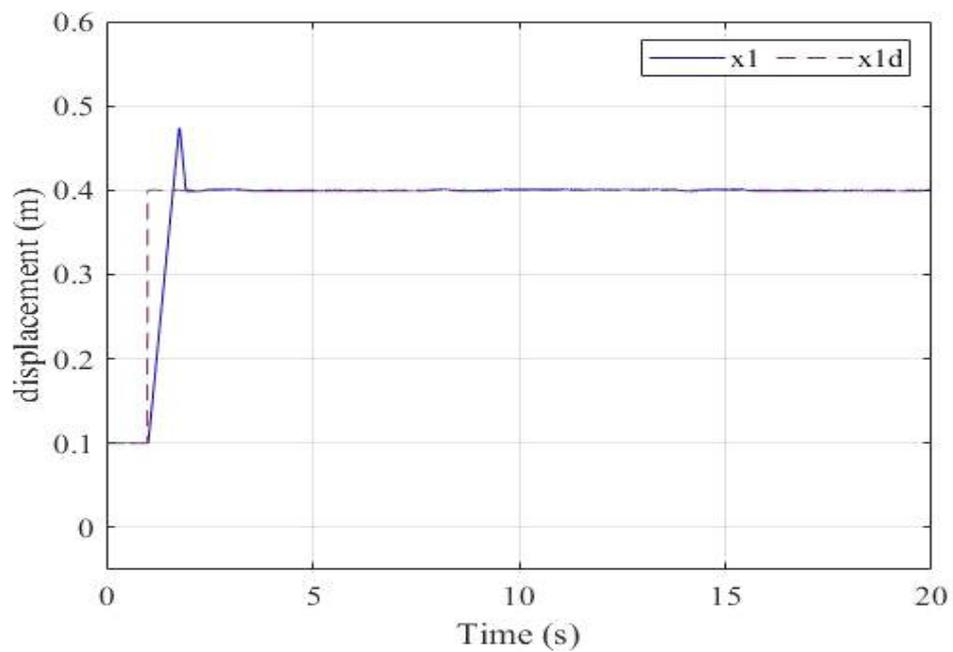


Fig. 3-30 센서 노이즈 조건(FTC 사용)시의 위치 추종 그래프

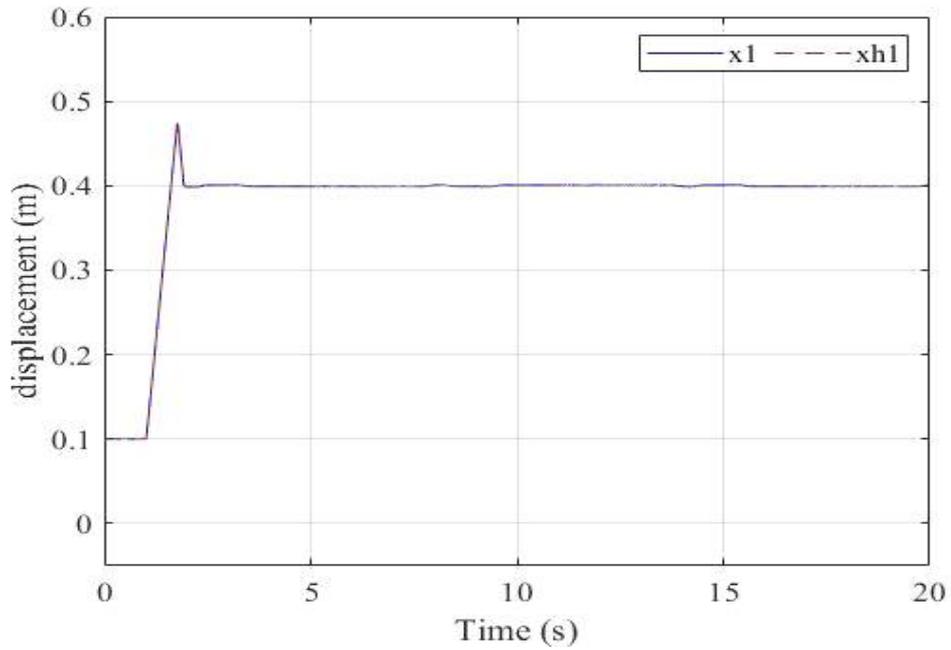


Fig. 3-31 센서 노이즈 조건(FTC 사용)시의 위치 추정 그래프

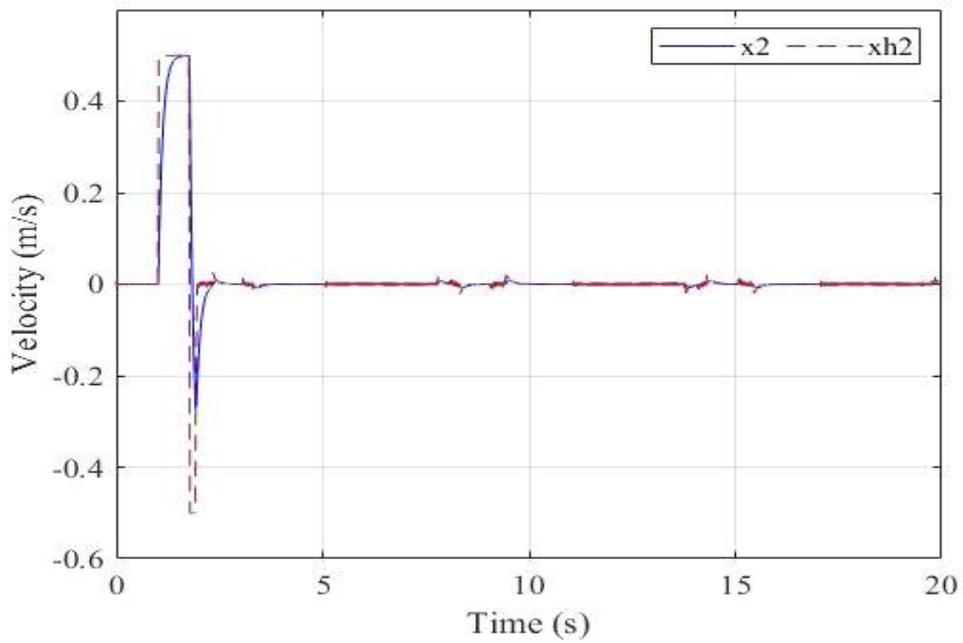


Fig. 3-32 센서 노이즈 조건(FTC 사용)시의 속도 추정 그래프

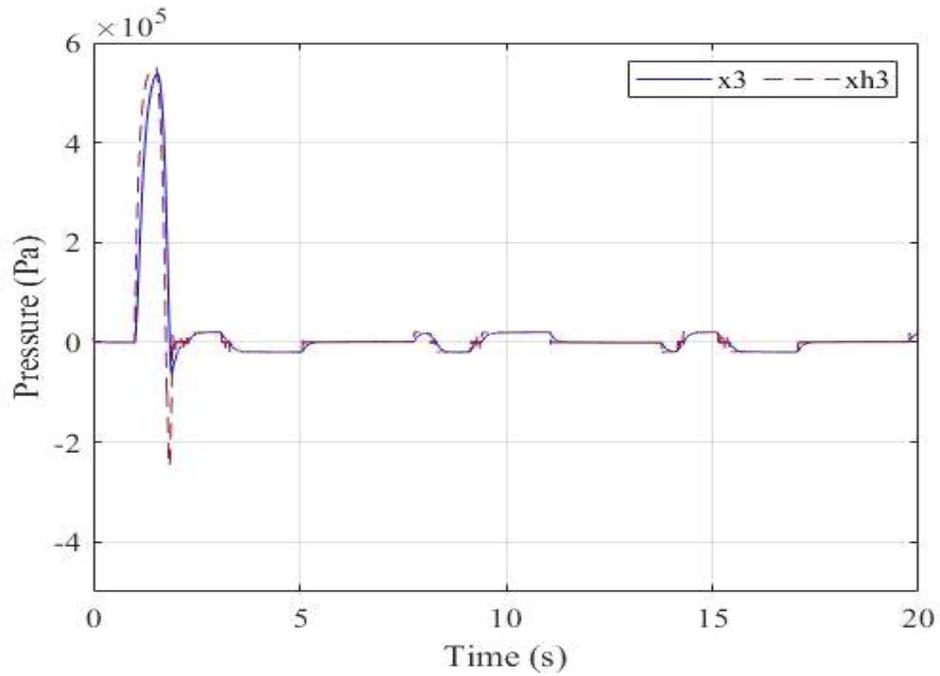


Fig. 3-33 센서 노이즈 조건(FTC 사용)시의 압력 추정 그래프

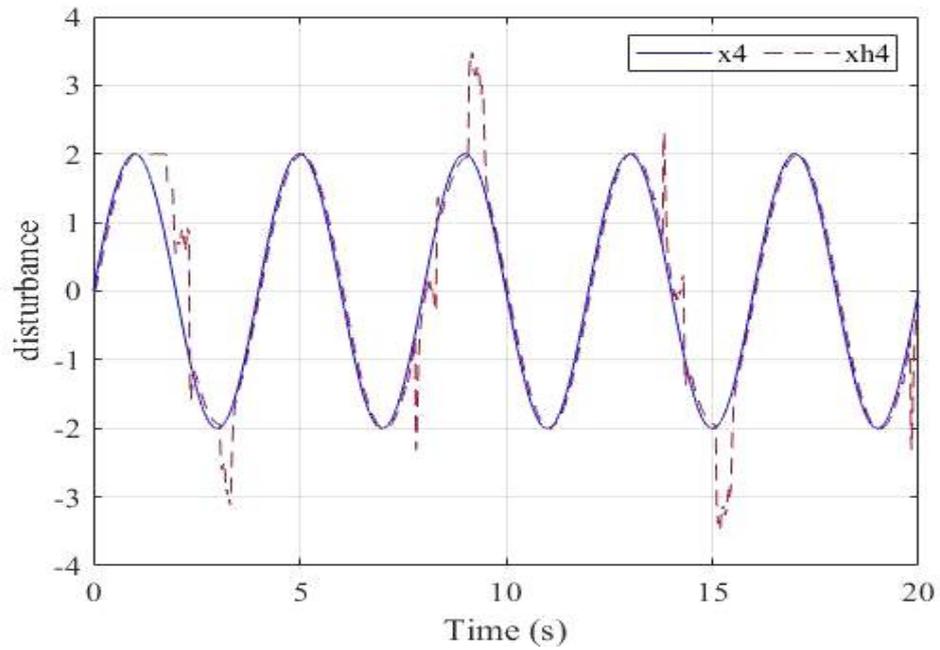


Fig. 3-34 센서 노이즈 조건(FTC 사용)시의 외란 추정 그래프

### 3.4.3 센서 비정상 조건(고장)

센서가 정상적으로 작동되지 않아 측정값이 0이 되는 상황을 가정하였다. 이 경우에서의 시뮬레이션 결과는 다음과 같다.

#### 3.4.3.1 FTC 기법 미 사용시

○ Sine Wave

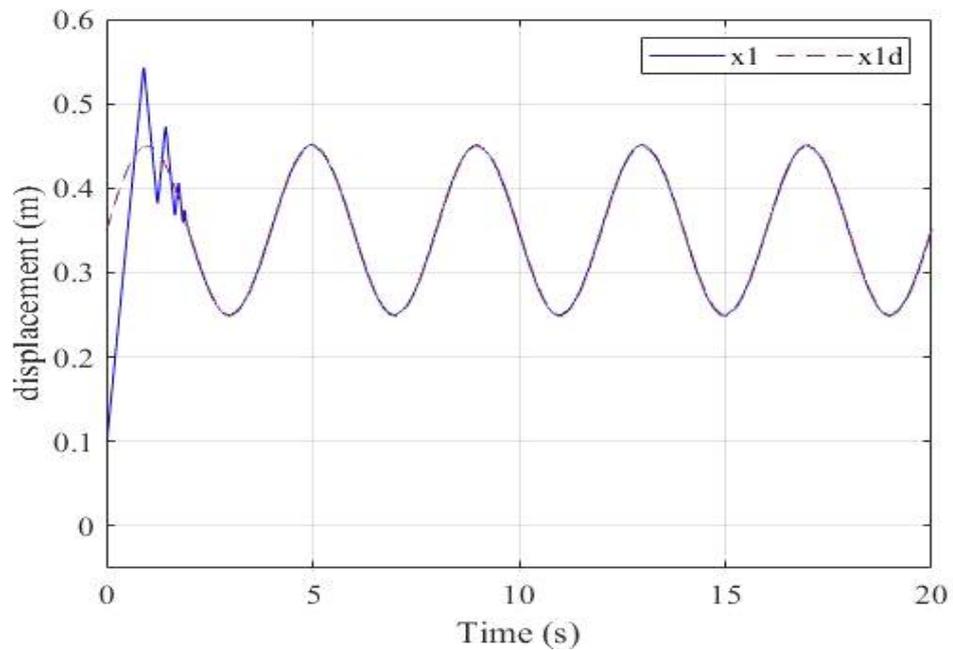


Fig. 3-35 센서 고장 조건시의 위치 추종 그래프

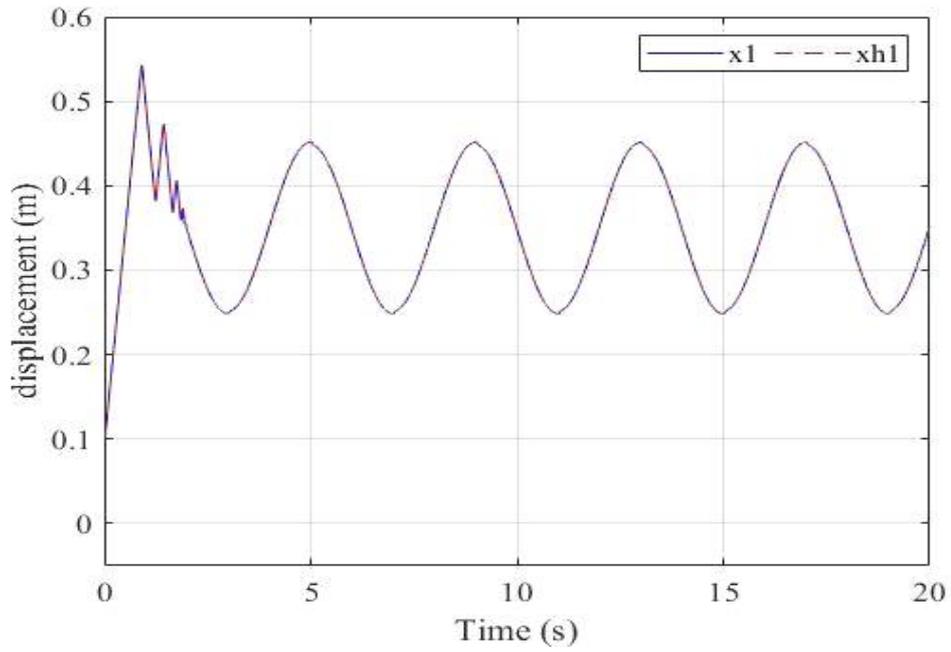


Fig. 3-36 센서 고장 조건시의 위치 추정 그래프

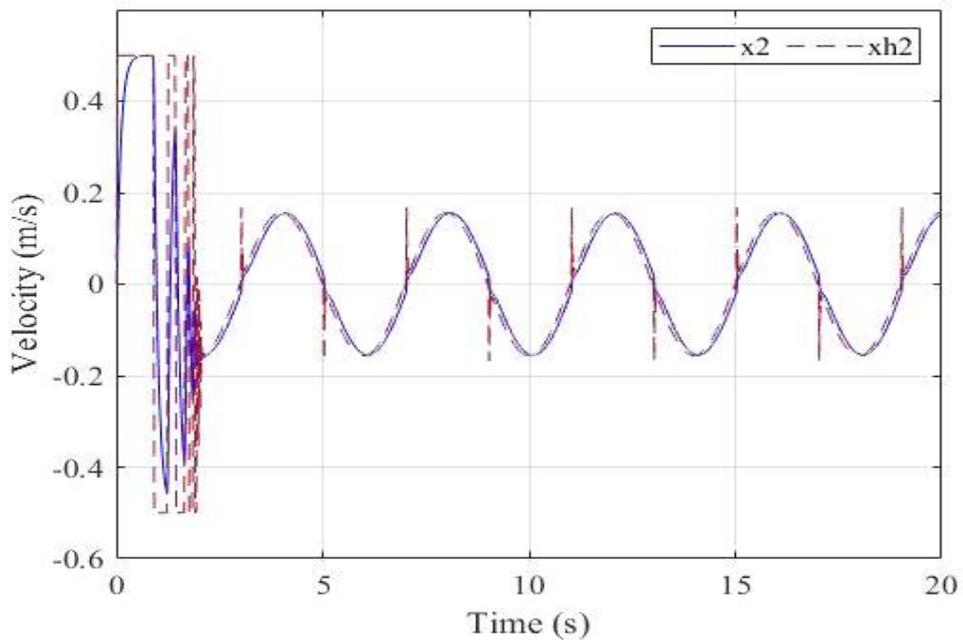


Fig. 3-37 센서 고장 조건시의 속도 추정 그래프

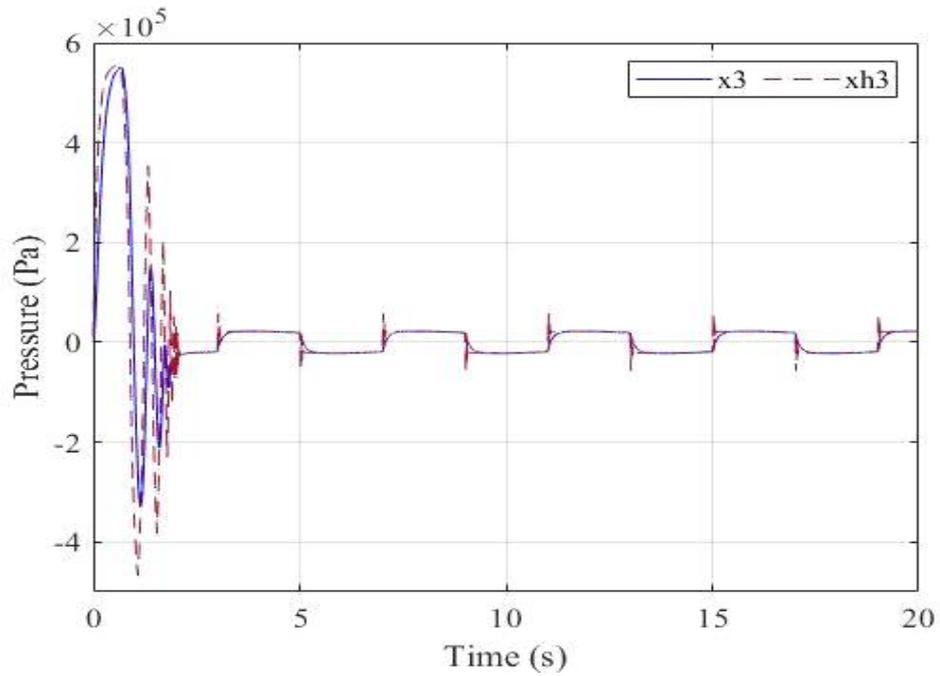


Fig. 3-38 센서 고장 조건시의 압력 추정 그래프

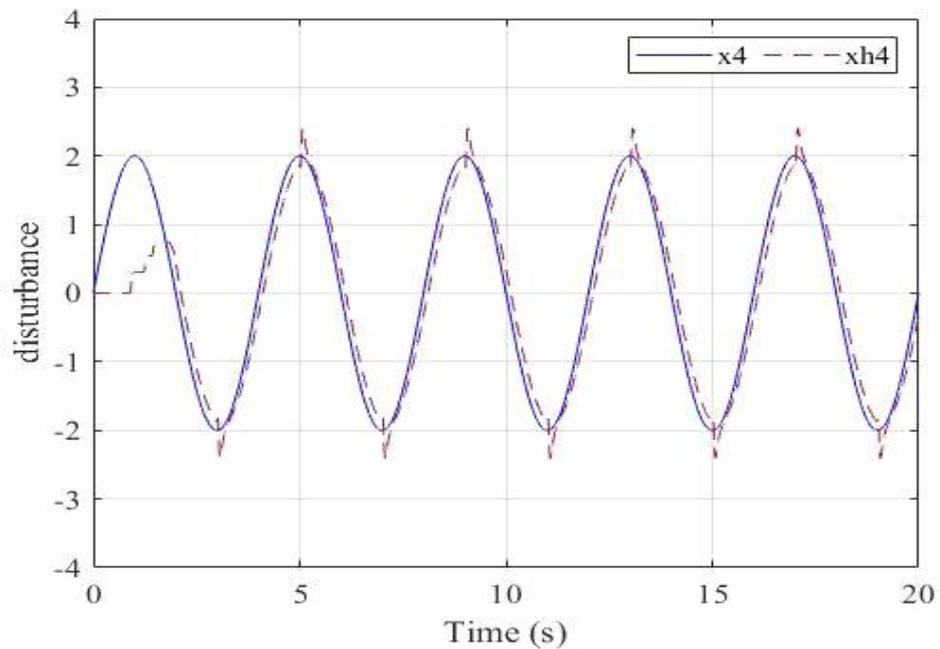


Fig. 3-39 센서 고장 조건시의 외란 추정 그래프

○ Step

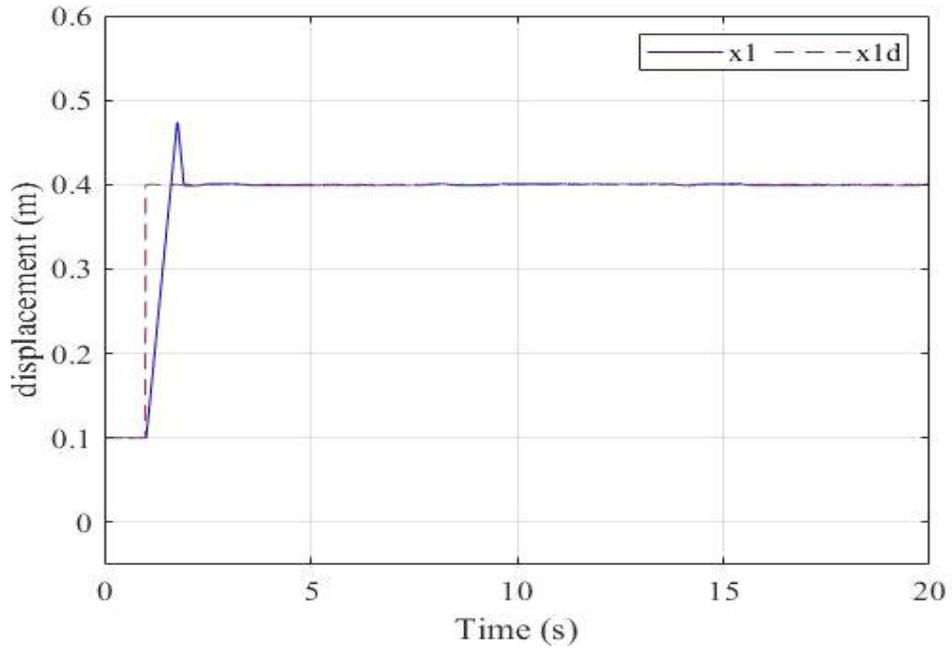


Fig. 3-40 센서 고장 조건시의 위치 추종 그래프

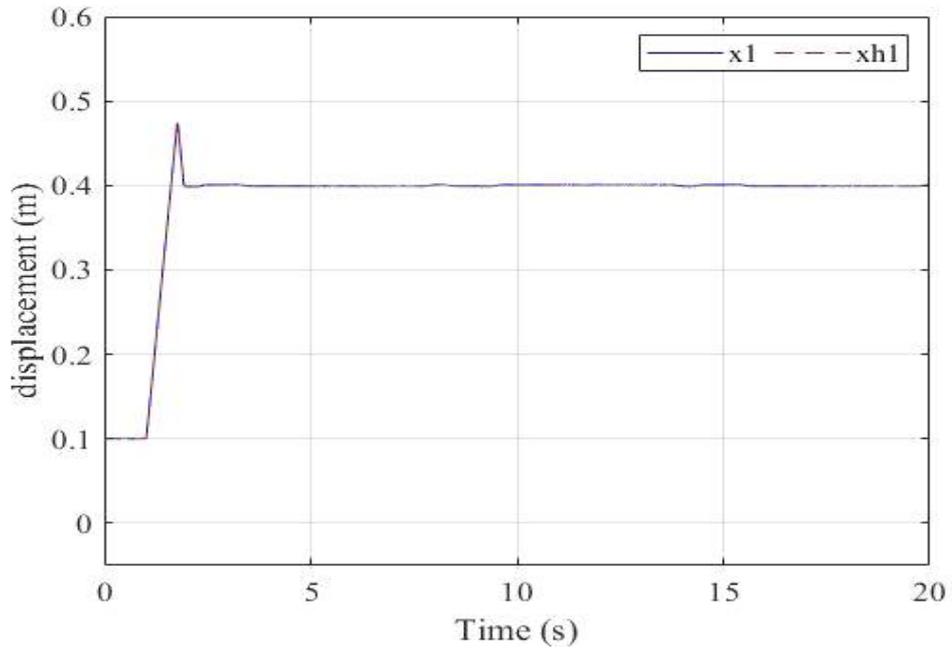


Fig. 3-41 센서 고장 조건시의 위치 추정 그래프

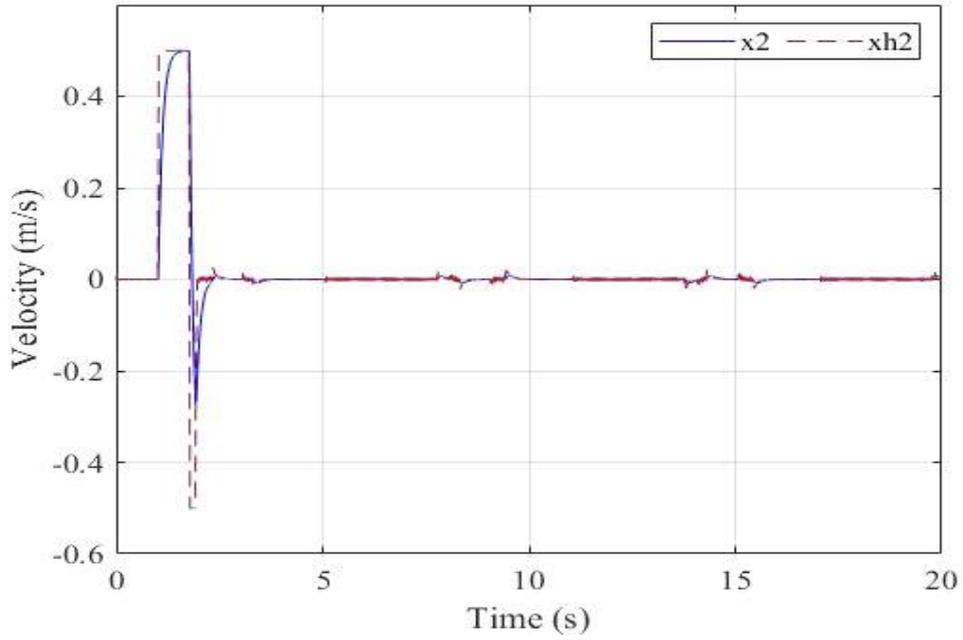


Fig. 3-42 센서 고장 조건시의 속도 추정 그래프

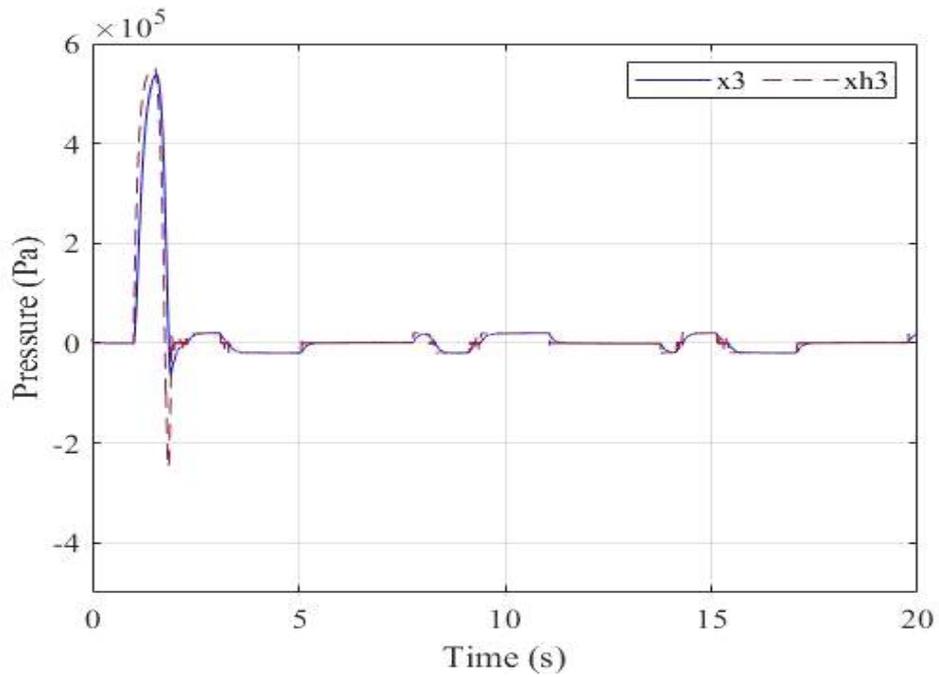


Fig. 3-43 센서 고장 조건시의 압력 추정 그래프

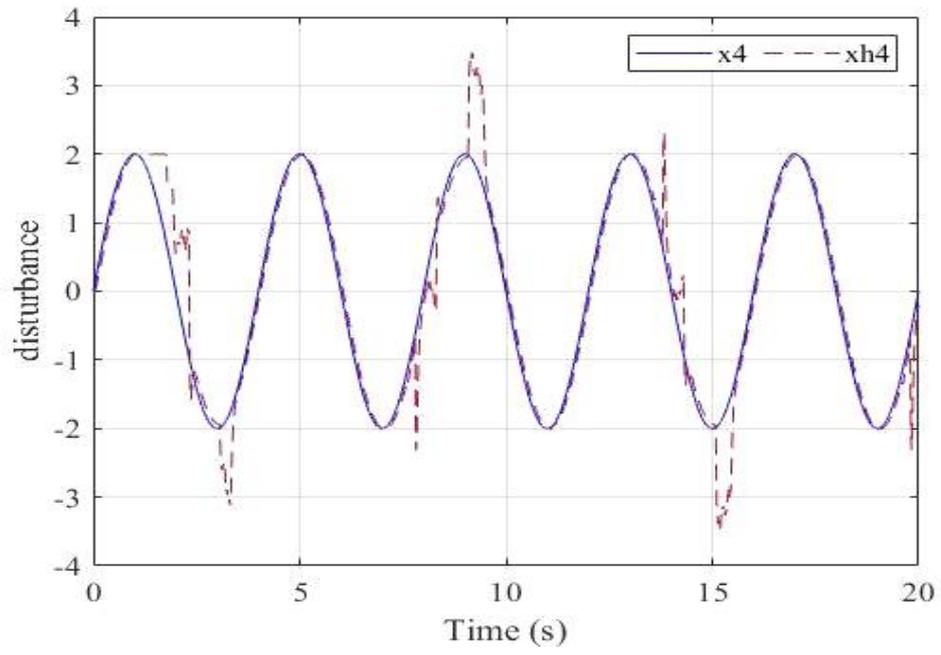


Fig. 3-44 센서 고장 조건시의 외란 추정 그래프

### 3.4.3.2 FTC 기법 사용시

○ Sine Wave

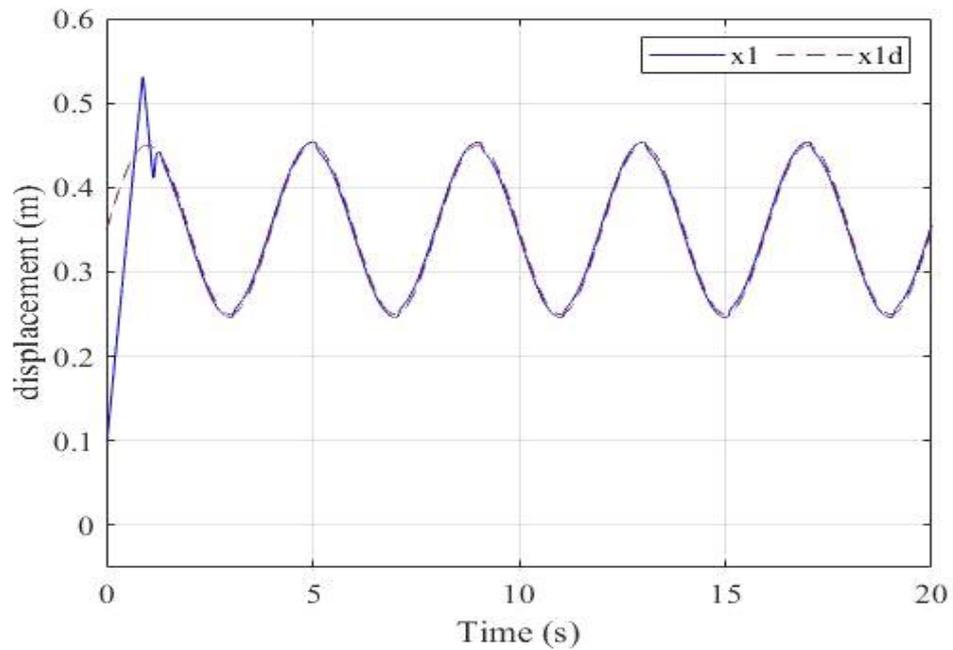


Fig. 3-45 센서 고장 조건(FTC 사용)시의 위치 추종 그래프

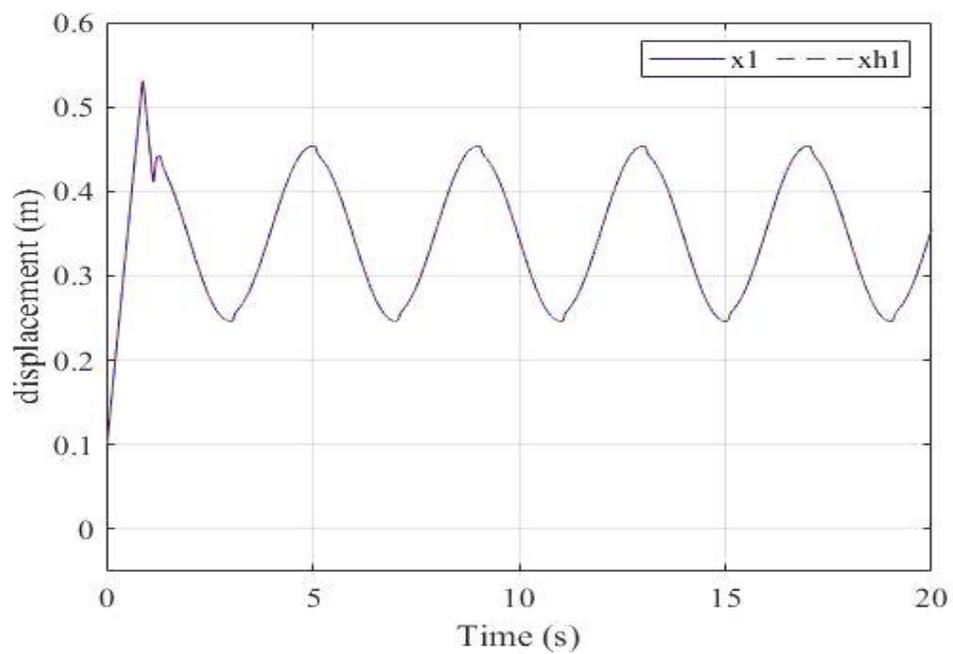


Fig. 3-46 센서 고장 조건(FTC 사용)시의 위치 추정 그래프

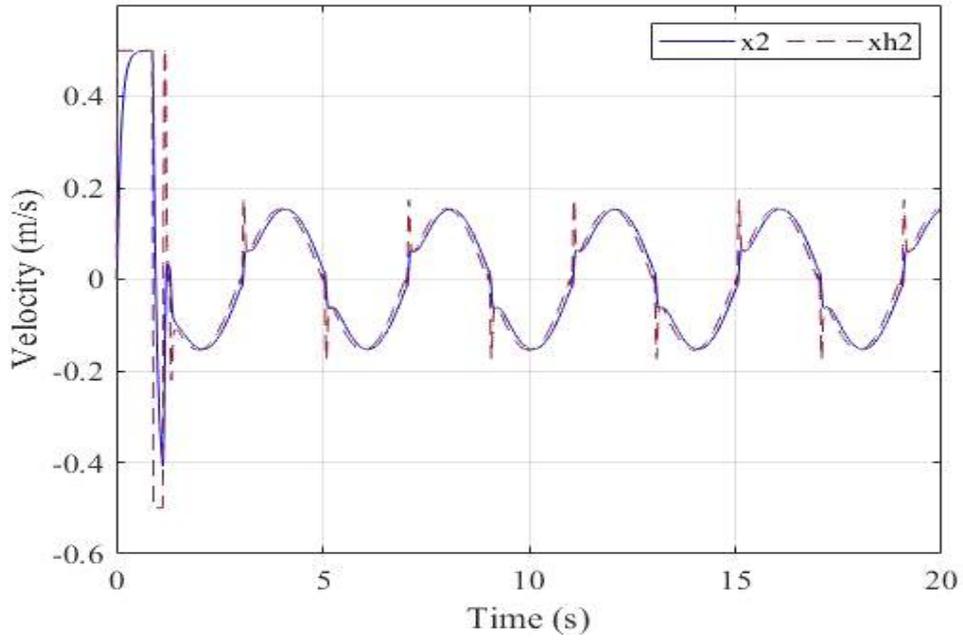


Fig. 3-47 센서 고장 조건(FTC 사용)시의 속도 추정 그래프

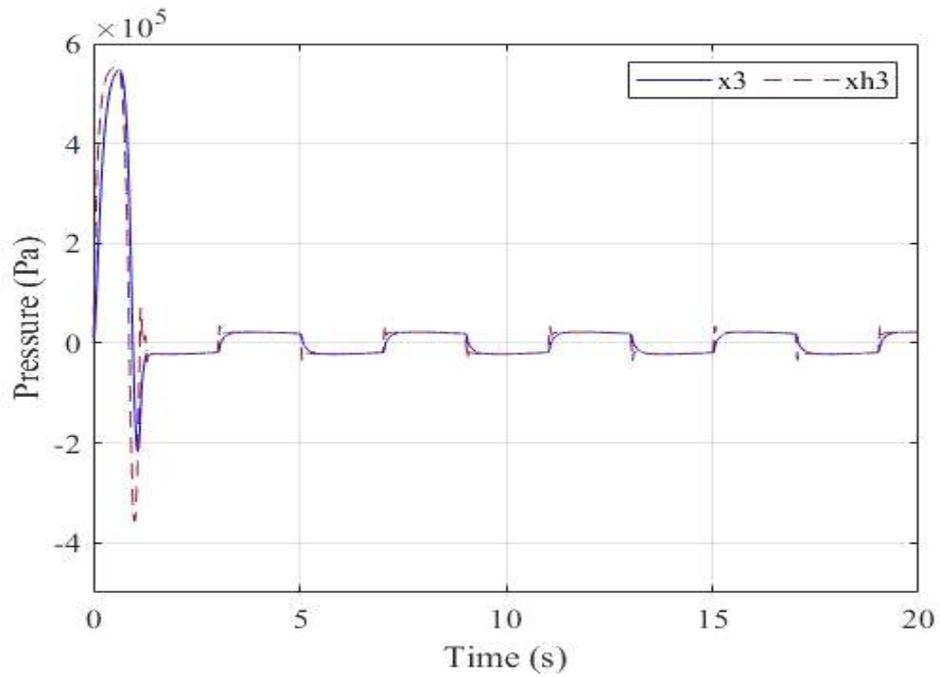


Fig. 3-48 센서 고장 조건(FTC 사용)시의 압력 추정 그래프

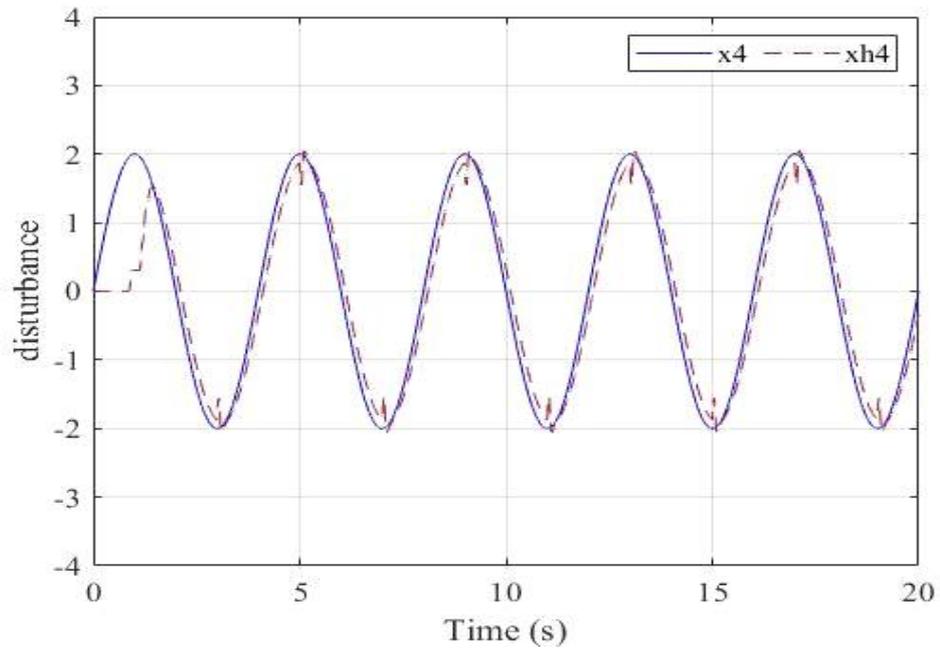


Fig. 3-49 센서 고장 조건(FTC 사용)시의 외란 추정 그래프

○ Step

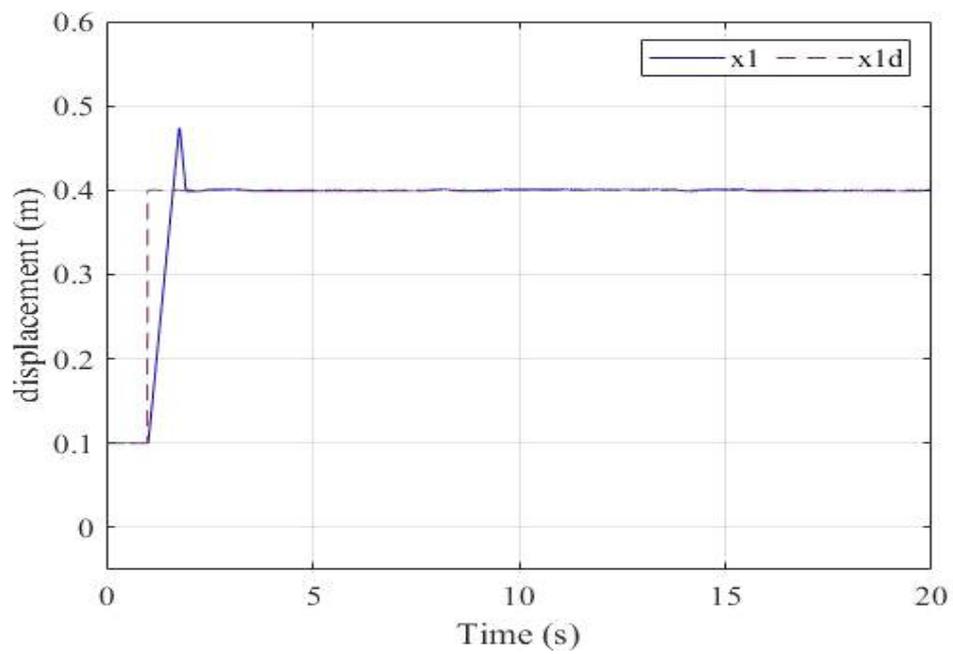


Fig. 3-50 센서 고장 조건(FTC 사용)시의 위치 추종 그래프

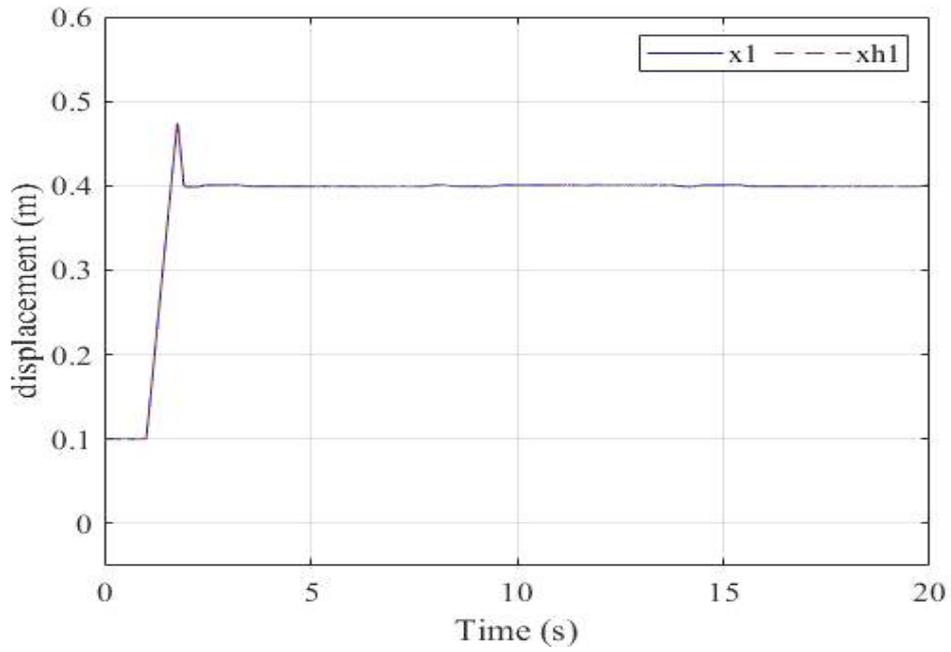


Fig. 3-51 센서 고장 조건(FTC 사용)시의 위치 추정 그래프

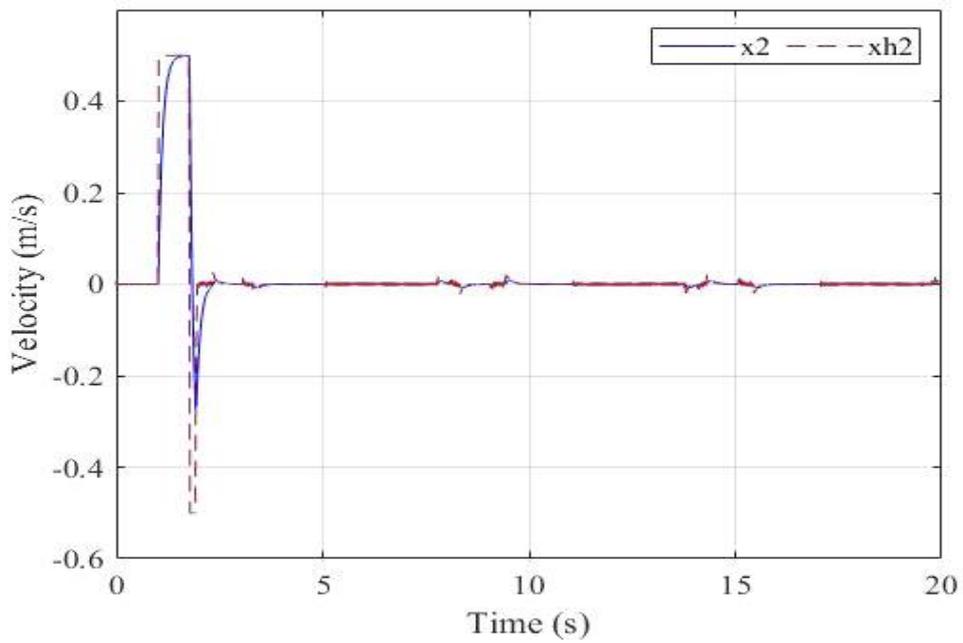


Fig. 3-52 센서 고장 조건(FTC 사용)시의 속도 추정 그래프

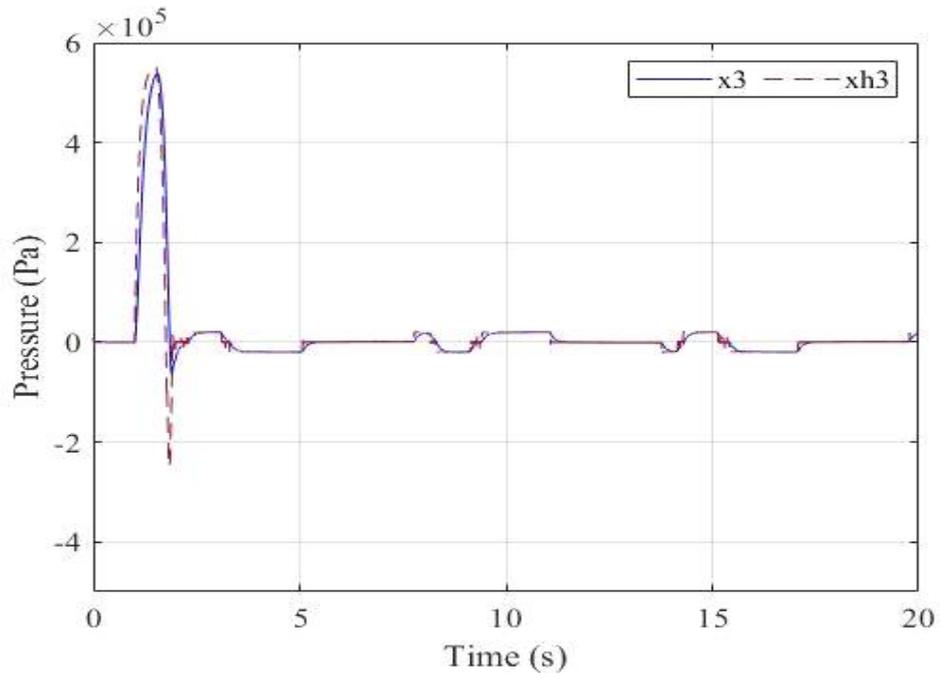


Fig. 3-53 센서 고장 조건(FTC 사용)시의 압력 추정 그래프

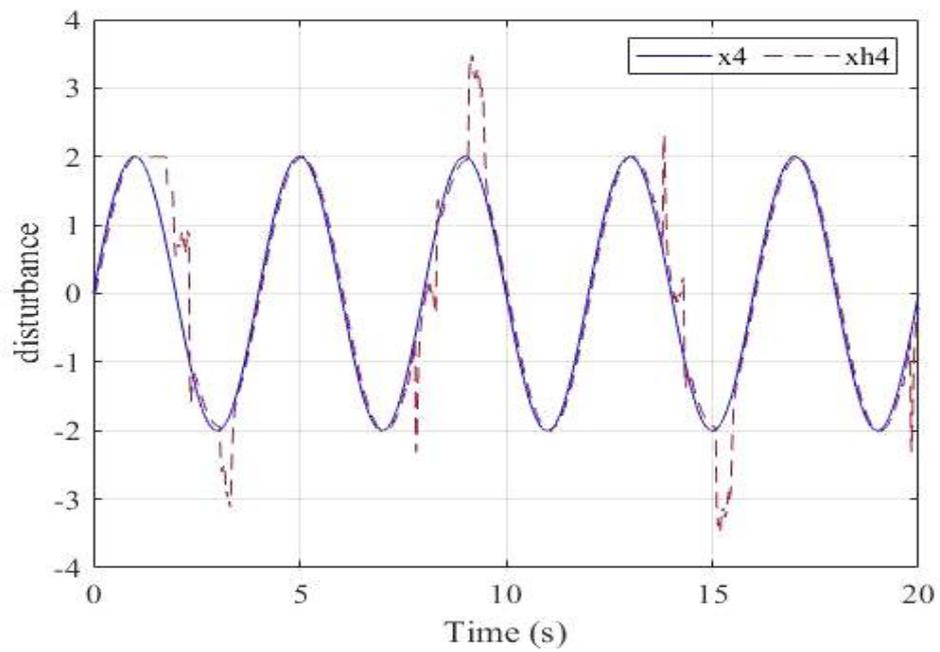


Fig. 3-54 센서 고장 조건(FTC 사용)시의 외란 추정 그래프

## IV. 결론 및 향후과제

본 논문에서는 대표적인 공압 액추에이터인 로드리스 실린더 시스템의 제어에 유리한 백스테핑 제어 기반의 강건 제어를 수행하였으며, 확장 상태 관측기를 설계하여 외란 톨을 보상함으로써 정밀한 위치 추종 제어가 가능했을 뿐만 아니라, 시스템 압력 값을 추정하여 센서 이상 발생 시에도 원래의 제어 목적을 수행할 수 있는 FTC 기법의 제어전략을 제시하였다.

시뮬레이션 결과, 센서의 고장이 없는 정상적인 상태에서는 위치가 정밀하게 추종되고 있음을 알 수 있었다. 확장 상태 관측기에서 추정한 외란 값도 실제 시뮬레이션 상에서의 입력값을 잘 추종하였고, 이를 제어기에서 보상해 줌으로써 높은 성능의 제어 성능을 보장할 수 있음을 확인하였다. 또한, 시스템 재구성 전략 개념의 고장 허용 제어 알고리즘을 사용하여 센서 이상 상황 발생시에도 본래의 제어목표를 충분히 수행할 수 있음을 검증하였다.

하지만 시뮬레이션을 통한 검증을 하였더라도 이것이 실제 시스템의 거동을 완전히 나타낼 수는 없음은 자명하다. 따라서 약간의 시스템 모델 조정 및 파라미터와 게인의 튜닝 등을 통하여 실제 로드리스 공압 실린더에 적용해 봄으로써 위치 추종 제어 성능을 검증하고, 또한 고장 허용 제어전략 또한 잘 작동되는지 확인하는 절차가 필요할 것으로 보인다. 그러므로 이후의 연구에서는 제안된 제어 알고리즘의 실차 테스트를 우선적으로 진행하고자 한다. 또한, 본 연구에서는 센서의 고장 탐지(Fault Detection) 기법에 대해서 자세히 다루지는 않았으며, 어떠한 센서가 고장이 났는지 알고 있다는 전제하에 system reconfiguration scheme 기반의 FTC만을 중점적으로 전개하였다. 따라서 후속 연구에서는 시스템 모델 기반의 센서 고장 탐지 기법을 적용하여 어느 센서에 고장이 생기는지 예측할 수 없는 상황에서도 FTC 제어를 수행할 수 있도록 하는 제어전략을 새롭게 제안하고자 한다.

## 참 고 문 헌

- [1] Tootchi, A., & Chaibakhsh, A. (2018, October). Fault Tolerant Control for Trajectory Tracking of a Pneumatic Servo Positioning System. In 2018 6th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (IcRoM) (pp. 53-58). IEEE.
- [2] Gao, X., Zhang, J. X., & Hao, L. (2021). Fault-Tolerant Control of Pneumatic Continuum Manipulators Under Actuator Faults. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*.
- [3] Trinh, H. A., Truong, H. V. A., & Ahn, K. K. (2020, December). Fault estimation and fault-tolerant control for the pump-controlled electrohydraulic system. In *Actuators* (Vol. 9, No. 4, p. 132). Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [4] Edwards, C., & Tan, C. P. (2006). Sensor fault tolerant control using sliding mode observers. *Control Engineering Practice*, 14(8), 897-908.
- [5] Gulati, N., & Barth, E. J. (2009). A globally stable, load-independent pressure observer for the servo control of pneumatic actuators. *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, 14(3), 295-306.
- [6] Zheng, Q., Gaol, L. Q., & Gao, Z. (2007, December). On stability analysis of active disturbance rejection control for nonlinear time-varying plants with unknown dynamics. In 2007 46th IEEE conference on decision and control (pp. 3501-3506). IEEE.
- [7] Pandian, S. R., Takemura, F., Hayakawa, Y., & Kawamura, S. (2002). Pressure observer-controller design for pneumatic cylinder actuators. *IEEE/ASME Transactions on mechatronics*, 7(4), 490-499.
- [8] Wang, J., Wang, D. J. D., Moore, P. R., & Pu, J. (2001). Modelling study, analysis and robust servocontrol of pneumatic cylinder actuator systems. *IEE Proceedings-Control Theory and Applications*, 148(1), 35-42.
- [9] Bone, G. M., & Ning, S. (2007). Experimental comparison of position tracking control algorithms for pneumatic cylinder actuators. *IEEE/ASME Transactions on mechatronics*, 12(5), 557-561.

- [10] Zhao, L., Yang, Y., Xia, Y., & Liu, Z. (2015). Active disturbance rejection position control for a magnetic rodless pneumatic cylinder. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(9), 5838-5846.
- [11] Shih, M. C., & Tseng, S. I. (1995). Identification and position control of a servo pneumatic cylinder. *Control Engineering Practice*, 3(9), 1285-1290.
- [12] Korondi, P., & Gyeviski, J. (2006, September). Robust position control for a pneumatic cylinder. In *2006 12th International Power Electronics and Motion Control Conference* (pp. 513-518). IEEE.
- [13] Wang, J., Wang, J. D., Daw, N., & Wu, Q. H. (2004). Identification of pneumatic cylinder friction parameters using genetic algorithms. *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, 9(1), 100-107.

## Abstract

In modern industry, as the required factors such as high precision, repetitive work, mass production, and hazardous work increase, the use of machines has become essential. Without the use of machines, it is very difficult to make a profit or in most cases, it is impossible to achieve the purpose itself. Due to these circumstances, the mechanical system is becoming more and more developed and complicated. These mechanical devices are consist of a combination of sensors and actuators, and research on the operation method and control method has been actively conducted.

In the control of the mechanical system, the controller that performs the algorithm are important, but the use of a sensor that measures the physical quantity of the system is essential. The higher the performance of the sensor, the better the control performance. Therefore, the current sensor is very precise but has a complex structure at the same time. Such a complex structure inevitably increases the risk of fault, and therefore the need for countermeasures is emerging. The fault of the sensor cannot be detected with the naked eye, and it is very difficult to prevent it through inspection because the number of commonly used sensors is large. Out of control of the system due to sensor fault can result in serious safety threats or huge losses. Therefore, there is a need for a method to detect and cope with such a sensor fault situation.

In this paper, a pneumatic rodless cylinder is specifically modeled, and a fault diagnosis and failure tolerance control strategy based on the modeled system is proposed, and the results are as follows.

1. The mathematical modeling process for the pneumatic rodless cylinder was performed, and the validity of the completed system model was confirmed.
2. A backstepping-based controller for system control was designed, and an extended state observer was designed to estimate the system state value and improve control performance.
3. By adding a fault tolerance control (FTC) algorithm that applied the System Reconfiguration Scheme concept, it was possible to achieve the control goal even in the fault situation of the sensor.

4. The final constructed control system was built through the MATLAB/Simulink program, and it was verified that the proposed control strategy was well performed through simulation.