

Research Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2015.19.2.017>

## 구동한계를 고려한 ON/OFF 형식 구동시스템의 구동위치 제어기법 설계

박정우<sup>a,\*</sup> · 박익수<sup>a</sup> · 박동창<sup>a</sup> · 황기영<sup>a</sup>

### Design of Control Method for ON/OFF Type Actuation System Considering Actuation Limit

Jungwoo Park<sup>a,\*</sup> · Iksoo Park<sup>a</sup> · Dongchang Park<sup>a</sup> · Kiyoung Hwang<sup>a</sup>

<sup>a</sup>The 4<sup>th</sup> R&D Institute, Agency for Defense Development, Korea

\*Corresponding author. E-mail: [jwpark12@add.re.kr](mailto:jwpark12@add.re.kr)

#### ABSTRACT

In this paper, it is accomplished to design a control method for such an actuation system of simplified ON/OFF mechanism with actuation command limit. First of all, based on experimental data, the modeling works for nonlinear/linear actuation dynamics are performed, which are govern by PWM command as a control input. Using the linearized model, a classical PI control method is designed to satisfy the aimed control performance requirements, and a control algorithm is proposed to realize the required control performance in the effective control region through resolving the issue for the PWM command limit which reduces the control performance. Finally, through control simulations, the design method is verified and the corresponding control performance improvement is evaluated.

#### 초 록

본 논문에서는 ON/OFF 작동과 같이 단순화된 구동 메커니즘을 가지면서도 구동 명령 한계가 있는 시스템의 구동 위치 제어 기법 설계를 수행하였다. 가장 먼저 구동기 시뮬레이터를 이용하여 고려되는 구동기의 PWM 명령을 입력으로 하는 비선형/선형 구동 동역학 모델링을 수행 하였다. 선형화된 모델을 이용하여 목표로 하는 제어 성능 요구조건을 만족시키기 위한 고전적인 PI 제어기법을 설계하였으며, PWM 제어명령 한계에 따른 제어 성능 감소를 해소하기 위한 제어 알고리즘을 제안하여 유효 제어 범위 내에서 설계된 제어 성능이 구현되도록 하였다. 최종적으로 제어 시뮬레이션을 통해 설계 방법을 검증하고 해당 제어기법 적용에 따른 성능 개선 정도를 평가하였다.

Key Words: PWM(펄스 폭 변조), Actuator Dynamic Modeling(구동기 동역학 모델링), Duty Ratio Control(충격 계수제어)

Received 29 December 2014 / Revised 11 March 2015 / Accepted 15 March 2015

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2014년도 추계학술대회(2014. 12. 17-19, 강원랜드 호텔) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

#### 1. 서 론

현대 무기체계의 고정밀 고성능 제어를 위해

고안되는 제어 기법이 고도화됨에 따라 제어 명령을 구현하기 위한 구동 시스템 또한 발전을 거듭해 왔다. 그럼에도 불구하고 기존의 장치를 그대로 이용하면서 기법변경만으로도 성능을 개선하고자 하는 노력 또한 지속되어 왔다.

제어 목적이 되는 기계장치의 크기와 복잡성이 증가함에 따라 이를 제어하기 위한 구동기의 구동성과 제어 정밀성은 떨어지게 되어 구동 옵션이 상대적으로 감소하게 된다. 보다 신뢰도 높고 정밀한 제어를 위해서는 투입 에너지 대비 성능이 일정한 경향을 가지는 서보 모터(servo motor)와 같은 전자식 구동장치가 사용될 수 있으나 높은 구동력을 얻기 위해 필요한 전기력의 손실이 크며, 기본적으로 출력되는 구동력이 유공압 구동 시스템에 비해 작다. 반면 구동 한계에 보다 여유가 있는 유공압 시스템은 유공압 시스템의 형상 및 구동 방식에 따른 복잡한 구동 비선형성을 모델링하고 이를 정밀 구동을 위한 제어기법 설계에 활용[1]해야 하는 어려움이 있다. 또한, 구동기의 작동을 위한 입출력 유량을 정밀 제어하는 별도의 제어기(일반적으로 유로 면적 제어를 위한 유공압 밸브 위치 제어기)가 설계되지 않았을 경우에는 ON/OFF 형식의 전기적 신호가 구동 입출력 유로를 개방/폐쇄하는 직접적 이산화 구동 방식을 고려한 제어기법을 설계해야 한다.

ON/OFF 작동과 같이 단순화된 구동 메커니즘을 이용한 구동 위치 제어 기법은 다양한 PWM(Pulse Width Modulation) 제어기법을[2-5] 통해서 구현될 수 있다. 하지만 PWM 제어 방식은 제어 입력 값 한계와 구현에 따른 응답 특성의 비선형성으로 PWM을 이용한 제어기법 설계 및 시스템 응답 특성 해석이 어렵다. 이를 해결하기 위해 제어 계인 선정 및 제어 시스템 해석 관련 연구[6,7]들이 진행되어 오고 있지만 강인 제어 관점의 안정성 해석이 대부분으로써 제어 계인 설정에 따른 주파수 응답 특성 등 고전적인 시스템 응답 특성에 대한 정보를 획득하기 어려웠다.

본 논문에서는 ON/OFF 작동 형식 유압 구동기를 이용한 제어시스템의 제어 기법 개념설계

연구를 수행하여 ON/OFF 작동 형식 구동 성능을 개선하기 위한 PWM 제어기법을 설계하였다. PWM 제어기법은 참고문헌[3,5]에서 소개된 평균 모델(Averaging Model) 관점의 제어기법 설계에 착안하여 이산화 비선형 구동 모델을 연속 시간 선형 모델식으로 근사화 하였다. 제어 알고리즘은 구동 입력 포화에 따른 설계 제어성능의 감소를 최소화하기 위해 스위칭 제어 기법을 고려하였다. 구동 입력 포화의 경우 ON/OFF 명령이 지속되도록 설정하고, 제어 입력 포화가 발생하지 않는 영역 내에서는 앞서 근사화된 모델 수식을 통한 구동 제어명령을 비례적분 제어기를 통해 산출하고 이를 다시 모델 관계식을 통해 PWM Duty Ratio(DR)를 결정하는 제어 알고리즘을 고려하였다. 이를 통해 구동 포화가 영역 외에서의 제어 응답 특성은 선형 제어기 설계에 따른 예측 성능과 동일하게 구현될 수 있었다.

## 2. 시스템 정의

본 논문에서는 유압 구동시스템의 위치 제어 목적 달성을 위한 제어 시스템 및 구조를 고려하였다. ON/OFF 신호에 따라 HP(Hydraulic Pump)로부터 공급되는 유압을 압력 제어장치(Pressure Control Unit, PCU)가 VSA(Variable Stroke Actuator)에 공급되는 두 갈래의 공급 압력 차( $\Delta P_i = P_{Hi} - P_{Li}$ )를 형성하여 VSA가 인장 및 수축 구동을 수행하게 된다(Fig. 1). 구동

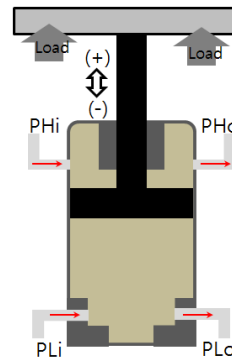


Fig. 1 Conceptual drawing of VSA.

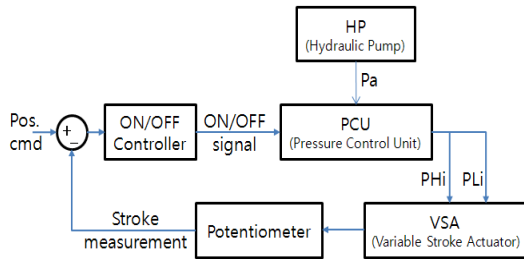


Fig. 2 Block diagram of control structure for position controller.

기 제어를 위한 제어 구조는 Fig. 2와 같으며, 인장 및 수축구동 정도를 측정장치를 통해 피드백 받도록 하였다.

ON/OFF 제어기(ON/OFF Controller)는 명령 대비 측정치 차이에 따른 PWM 제어 신호를 생성하는 로직을 포함하고 있으며, PWM 신호를 구성하는 Carrier Frequency(CF) 및 DR을 조절하여 생성한 ON/OFF 신호를 압력 제어장치를 통해 구동기 작동을 위한 공급 압력을 구현하게 된다. 참고로 구동기 제어장치의 ON 신호는 구동기 행정의 수축을 OFF는 인장을 위한 신호로 정의하였다.

### 3. 제어 성능 개선 가능성 검토 및 제어 방식 선정

#### 3.1 제어 성능 개선 가능성 검토 시험

구동기의 구동 특성을 파악하고 PWM 제어를 통한 구동 행정 위치 제어 가능성을 파악하기 위해 임의의 PWM 신호에 대한 구동기 응답 특성을 살펴보았다. 이는 다양한 PWM 신호 명령에 따른 구동 특성을 살펴봄으로써 PWM 제어를 통해 제어 준연속성 및 진동과 같은 불안정성을 해소할 수 있는 지에 대한 고찰을 수행하기 위함이다.

먼저, CF 0.5 Hz, DR 24%(PWM 명령 시간의 ON 신호 점유율이 24%임을 의미함)의 PWM 명령에 의한 구동기의 개회로 응답 특성은 Fig. 3과 같다. 구동 명령에 따른 구동 지연은 크게 나타나지 않고 있고 CF 0.5 Hz 명령에 따른 주파수 응답이 명령과 거의 일치함을 확인할 수 있

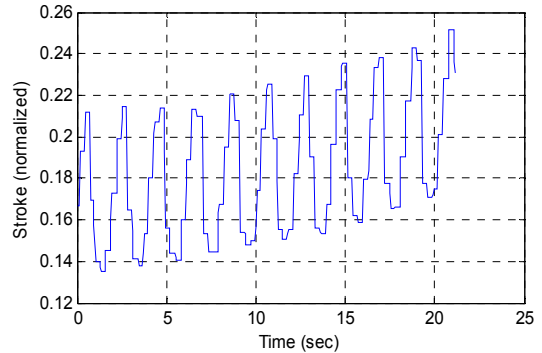


Fig. 3 Actuation stroke for CF 0.5 Hz and DR 24%.

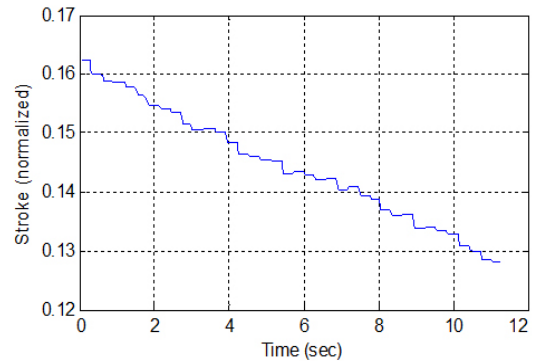


Fig. 4 Actuation stroke for CF 4.0 Hz and DR 23%.

었다. 인장과 수축에 따른 구동력 혹은 구동 속도 차이에 따라 DR이 50%일 경우에는 매우 빠른 속도로 평균 행정거리가 줄어드는 경향을 시험을 통해 확인하였다.

한편, Fig. 4는 동등한 구동 부하 조건 하에서 CF를 4 Hz, DR을 23%로 설정하여 얻은 결과이다. CF가 0.5 Hz인 경우에 비해 진동폭이 매우 작아졌음을 확인할 수 있었으며, VSA 인장에 보다 유리한 DR임에도 VSA가 수축되고 있는 결과를 획득하였다. CF가 커짐에 따라 구동응답의 진동 폭이 줄어드는 이유는 구동 응답 대역폭이 넓지 않다는 증거이며, 상대적으로 고주파수 대역의 CF를 이용한 PWM 제어를 수행한다면 보다 정밀한 제어명령 추종성능을 획득할 수 있을 것으로 판단하였다.

앞선 두 결과의 경향성과 고찰을 통해 고주파수 대역의 CF의 PWM을 통해 구동장치를 작동

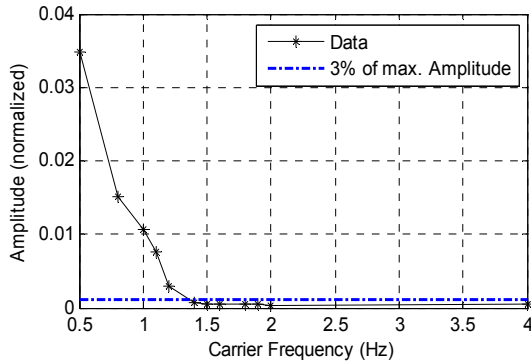


Fig. 5 Amplitude of response with CF(Hz).

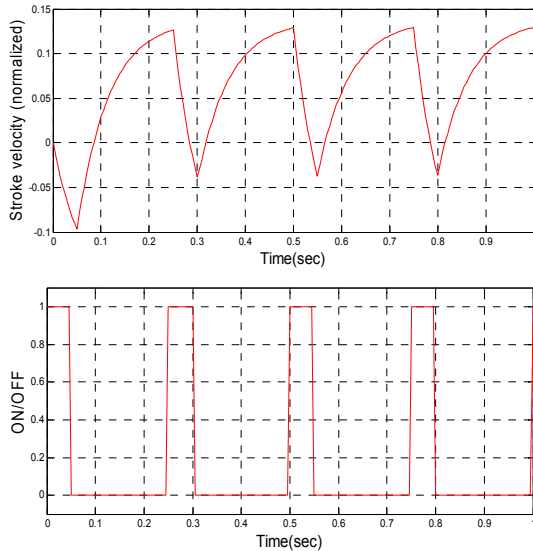


Fig. 6 Example stroke velocity under DR 20%.

시킨다면 보다 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단되지만 임의의 큰 수치의 CF를 사용할 경우 PCU 내부 밸브의 구동부하를 유도하거나 빠른 모드 전환으로 인한 구동지연 효과로 구동 속도가 감소할 수 있다. 다수의 시험을 통해 CF에 따른 구동 응답 진동폭과 사용 가능성을 살펴보았으며 시험을 통해 획득한 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

### 3.2 제어 방법 선정

제어 목적을 달성하기 위해 CF를 제어 변수로 고려할 경우 특정 가진 진동수 대역에서 오히려

Table 1. Control scheme for PWM parameter.

PWM parameter	Control scheme	Value
CF	fixed	4 Hz (fixed)
DR	variable	determined by control logic

시스템 안정성을 해칠 위험이 있다. 뿐만 아니라 CF를 제어 변수로 고려하게 되면 제어명령 산출 알고리즘이 상대적으로 복잡해진다. Fig. 6을 통해 확인할 수 있듯이 CF는 특성 주파수 대역 이상의 범주에서는 구동장치 응답 특성에는 큰 성능개선이 없으므로 특정 값으로 고정하여 사용하고 DR을 유일한 제어변수로 고려한다면 보다 간단하면서도 제어 성능을 만족시키는 로직 구현이 가능할 것으로 예상된다. 따라서 본 논문에서는 CF 값을 앞선 시험을 통해 검증된 주파수 값인 4 Hz로 고정하고 DR만을 제어 로직을 통해 변화시켜 제어 목적을 달성하는 방법을 고려하였다(Table 1 참조).

## 4. 구동기 모델링

### 4.1 구동기 동역학 모델

VSA의 구동 시험을 통해 획득한 데이터를 이용하여 구동기 동역학을 모델링 하였다. 구동기 동역학 모델은 각 구동 환경에 따른 ON/OFF 작동조건에서의 구동기의 정상상태 속도와 정상상태 속도까지의 시간 1차 지연 시상수  $\tau$  기반의 구조로 고려되었다.

다수의 구동 시험을 통해 ON 혹은 OFF 구동 신호에 따른 수축 및 인장 방향의 정상상태 구동 속도는 구동기 구동 압력( $P_a$ )과 구동기 행정 부하( $P_{Load}$ )의 함수로 근사화 할 수 있었다. 또한 인장 및 수축의 모드 전환에 따른 정상상태 구동 속도 도달을 위한 구동지연 또한 구동기 내외의 부하 조건들에 대한 함수관계로 가정하고, 구동지연 동역학을 1차 지연 함수라고 가정할

Table 2. Actuator model parameters.

Model Parameter	Notation	Variation (Operation status)
Time constant	$\tau$	$\tau_p(\text{OFF}) / \tau_n(\text{ON})$
Steady State velocity	$v_{fss}$	$v_{pss}(\text{OFF}) / v_{nss}(\text{ON})$

때 Eq. 1과 같은 동역학 모델 수식으로 표현 될 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{\tau} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{\tau} \end{bmatrix} v_{fss} \quad (1)$$

여기서,  $x$ 는 구동기의 행정 거리,  $\tau$ 는 1차 구동 지연에 따른 시상수로 인장 및 수축에 따른 시상수  $\tau_p, \tau_n$ 로 구분될 수 있으며,  $v_{fss}$ 는 ON/OFF 구동조건에 따른 정상상태 속도 값이다.  $v_{fss}$  또한 인장 방향 정상상태 속도 및 수축 방향 정상상태 속도  $v_{pss}, v_{nss}$ 로 구분되며 구동 내외의 부하 조건에 따라 그 값이 결정된다. 앞서 설명된 구동 모델 매개변수를 정리하면 Table 2와 같다.

#### 4.2 구동기 모델 특성 해석

특정 공급압력 및 하중조건 하에서 OFF 및 ON 신호에 따른 구동 정상상태 속도  $v_{pss}, v_{nss}$  및 정상상태 도달 변수인 시상수  $\tau_p, \tau_n$ 는 고정된다. 구동기는 초기 속도 및 위치에서 시작하여 DR에 따른 ON/OFF 신호 반복에 따라 인장(+), 수축(-)을 반복하며 구동 평균 값이 정상상태로 수렴하게 된다.

##### 4.2.1 DR에 따른 정상상태 속도

ON/OFF 명령에 따른 구동기 작동의 하나의 수치 시뮬레이션 예로써 Fig. 6과 같은 VSA 속도 변화 결과를 얻을 수 있었다. 만약  $i$ 번째 사각파 PWM 신호 주기 내의 최저 속도 peak를

$v_{low}^i$ , 최고 속도 peak를  $v_{high}^i$ 라고 한다면,  $v_{low}^i$  및  $v_{high}^i$ 에 대한 일반화된 식은 Eq. 1을 이용하면 Eq. 2와 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} v_{low}^{i+1} &= \left(1 - e^{-\frac{1}{\tau_n} \frac{DR_n}{f}}\right) (v_{nss} - v_{high}^i) + v_{high}^i \\ v_{high}^{i+1} &= \left(1 - e^{-\frac{1}{\tau_p} \frac{DR_p}{f}}\right) (v_{pss} - v_{low}^{i+1}) + v_{low}^{i+1} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $f$ 는 CF이고,  $DR_p$  및  $DR_n$ 은 인장 및 수축 구동을 위한 한 주기 내의 구동 시간 점유율로서 0~1(0 ~ 100%)의 값을 가지며 둘의 합은 1로 정의된다(Eq. 3).

$$DR_p = 1 - DR_n = 1 - \frac{DR}{100} \quad (3)$$

편의를 위해  $1 - e^{-\frac{1}{\tau_p} \frac{DR_p}{f}} = A$ ,  $1 - e^{-\frac{1}{\tau_n} \frac{DR_n}{f}} = B$ 라고 한다면 Eq. 2는 Eq. 4와 같은 수열로 정의될 수 있다.

$$\begin{aligned} v_{high}^{i+1} &= k_1 + k_2 v_{high}^i \\ v_{low}^{i+1} &= k_3 + k_4 v_{low}^i \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,  $k_1, k_2, k_3, k_4$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} k_1 &= A(1-B)v_{pss} + Bv_{nss} \\ k_3 &= B(1-A)v_{nss} + Av_{pss} \\ k_2 &= k_4 = (1-A)(1-B) = e^{-\left(\frac{DR_n}{\tau_n} + \frac{DR_p}{\tau_p}\right)\frac{1}{f}} \end{aligned} \quad (5)$$

Eq. 5의  $k_2 = k_4$ 값은 항상 1보다 작은 값을 가지므로, Eq. 4 수열의 무한급수를 구하면 최종적으로 정상상태 최대/최소 peak 속도를 계산할 수 있다(Eq. 6).

$$\begin{aligned} \lim_{i \rightarrow \infty} v_{high}^{i+1} &= \lim_{i \rightarrow \infty} \left( k_1 \frac{1 - k_2^i}{1 - k_2} + k_2^i v_{high}^1 \right) = \frac{k_1}{1 - k_2} \\ \lim_{i \rightarrow \infty} v_{low}^{i+1} &= \lim_{i \rightarrow \infty} \left( k_3 \frac{1 - k_4^i}{1 - k_4} + k_4^i v_{low}^1 \right) = \frac{k_3}{1 - k_4} \end{aligned} \quad (6)$$

## 4.2.2 DR에 따른 평균 구동 속도

CF에 따른 속도 변화 경향은 앞서 기술된 바와 같이 하나의 명령 주기 내에서 최고/최소 peak 값을 가지게 되며 변화해 간다. 이는 ON/OFF 구동의 이산화 동역학 특성으로서 보다 정량적인 해석을 위해 매 주기별 평균 속도를 계산하고자 하였다. 평균속도를 계산하기 위한 수식적 표현은 Eq. 7과 같다.

$$\bar{v}^i = f \left( \int_0^{\frac{DR_n}{f}} v_n^i(t) dt + \int_0^{\frac{DR_p}{f}} v_p^i(t) dt \right) = f(I_1^i + I_2^i) \quad (7)$$

여기서,  $\bar{v}^i$ 는  $i$  번째 주기에서의 평균속도를 의미하고,  $v_n^i(t)$  및  $v_p^i(t)$ 는 각각 ON/OFF 명령에 따른 속도 프로파일을 의미한다.  $I_1^i$ 과  $I_2^i$ 는  $i$  번째 주기 내에서의 구동 ON/OFF 명령에 따른 속도 적분량을 의미한다. 수식 전개를 통해서  $I_1^i$ 과  $I_2^i$ 는 다음과 같이 유도된다.

$$I_1^i = v_{nss} \frac{DR_n}{f} + (v_{nss} - v_{high}^{i-1}) \left( \tau_n e^{-\frac{1}{\tau_n} \frac{DR_n}{f}} - \tau_n \right) \quad (8)$$

$$I_2^i = v_{pss} \frac{DR_p}{f} + (v_{pss} - v_{low}^{i-1}) \left( \tau_p e^{-\frac{1}{\tau_p} \frac{DR_p}{f}} - \tau_p \right)$$

Eq. 7과 8을 통해서 평균속도  $\bar{v}^i$ 는 이전 주기 속도 peak 값들( $v_{high}^{i-1}$ 과  $v_{low}^{i-1}$ )과의 내연적 함수 관계에 놓여있으며,  $\tau_p$ 와  $\tau_n$ , 그리고 DR에 따라 함수의 계수들이 변경되는 수식구조를 가지고 있다. 평균속도  $\bar{v}^i$ 는 다음의 보다 구체화된 조건 하에서 보다 의미 있는 수식관계로 정리될 수 있는데, 하나의 예로써, 속도 peak 값들이 충분히 수렴하여  $v_{low}^\infty$ ,  $v_{high}^\infty$ 와 같고  $\tau_p$ 와  $\tau_n$ 이 동일하다는 가정을 할 경우 평균속도 수식은 ON/OFF 구동 점유율에 따른 선형 관계로 유도된다.

$$\bar{v}^\infty = (v_{pss} - v_{nss}) DR_p + v_{nss} \quad (9)$$

$$= (v_{nss} - v_{pss}) DR_n + v_{pss}$$

Eq. 9는 DR 명령에 따른 정상상태 속도를 알

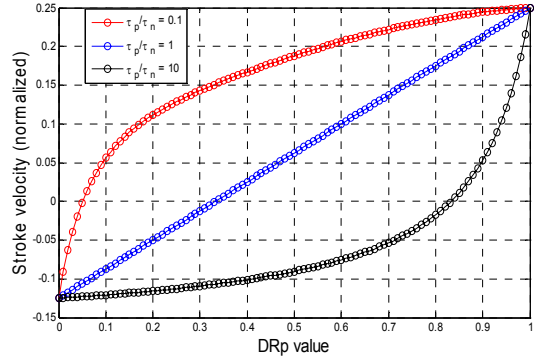


Fig. 7 Stroke velocity w.r.t  $DR_p$ , with varied ratio of  $\tau_p$  to  $\tau_n$ .

고 있는 값들을 이용하여 손쉽게 계산할 수 있음을 보여준다. 또한, 이러한 선형적 관계식을 통해 DR이 직접적인 제어입력으로 드러나는 동역학 모델 수식에서의 근사화도 가능할 것으로 사료된다. Fig. 7은  $\tau_p$ 와  $\tau_n$  비율에 따라 변하는 DR 대비 구동기 행정 속도 프로파일을 보여주고 있다.  $\tau_p$ 가  $\tau_n$ 보다 작을 경우 인장명령(OFF)에 따른 속도 응답이 보다 빠르므로  $\tau_p/\tau_n=1$ 의 경우보다 평균 구동 속도가 큰 값을 가지는 것을 알 수 있다.  $\tau_p$ 가  $\tau_n$ 보다 클 경우에는 보다 작은 평균 구동 속도 값을 가진다.

한편, DR을 고정하였을 경우 Eq. 8의  $I_1^i$ 와  $I_2^i$ 는 각각  $v_{high}^{i-1}$ 과  $v_{low}^{i-1}$ 만의 함수가 되고,  $v_{high}^{i-1}$  및  $v_{low}^{i-1}$ 은 Eq. 5의  $k_2(=k_4)$ 에 대한 다음의 수식관계를 따른다(Eq. 10).

$$I_1^i = C_{11} + C_{12}k_2^{i-1} \quad (10)$$

$$I_2^i = C_{21} + C_{22}k_2^{i-1}$$

여기서,  $C_{**}$ 는 상수이며, 이를 다시 정리하면  $\bar{v}^i$ 는  $k_2$  함수로 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{v}^i = D_0(k_2^{i-1} - 1) + \bar{v}^{-1} \quad (11)$$

여기서,  $D_0$ 는  $(C_{12} + C_{22})f$ 에 해당하는 상수이므로, Eq. 11을 통해  $\bar{v}^i$ 는 결국 매 주기마다 지수

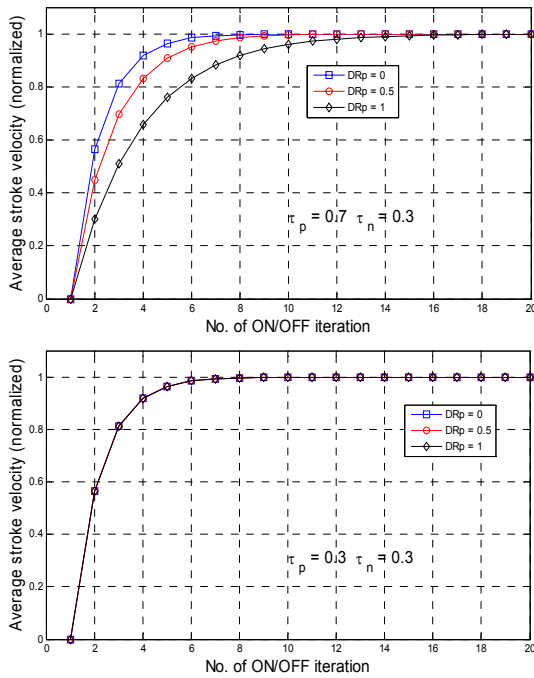


Fig. 8 Averaged velocity results w.r.t ON/OFF iteration : a) case for  $\tau_p \neq \tau_n$  (top), b) case for  $\tau_p = \tau_n$  (bottom).

승 감소 관계에 따라 정상상태 값으로 수렴해 가게 됨을 확인할 수 있다.

#### 4.3 평균 모델 정의

제어성능 분석의 편의를 위해 앞서 기술된 이산화된 구동기 동역학 모델(Eq. 1)를 거시적인 관점의 평균화된 모델로 재정의 하였다. 제안하는 모델은 속도 변화율의 평균화된 모델 구조를 가정하였다(Eq. 12).

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{\tau_{avr}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{\tau_{avr}} \end{bmatrix} v_{avrss} \quad (12)$$

여기서,  $v_{avrss}$ 는 구동환경 및 DR 명령에 따른 정상상태 평균 속도이며 Eq. 7의  $\bar{v}^\infty$ 와 동일하다.  $\tau_{avr}$ 는 Eq. 7의 ON/OFF 명령 주기에 따른 순차적인 계산을 통해  $\bar{v}^i$ 의  $\bar{v}^\infty$ 로의 수렴 성능을 1차 지연 응답으로 가정하였을 때 도출되는 평

균속도 응답 시상수이다. 이러한 가정이 타당한 이유는 Eq. 11을 통해서 확인할 수 있듯이 평균속도  $\bar{v}^i$ 는 1차 지연 함수에 따른 응답 특성과 동일한 지수 수렴 특성을 가지기 때문이다.

Fig. 8은 DR 점유율 조건 및  $\tau_p$ 와  $\tau_n$  비율에 따른  $\bar{v}^i$ 에 대한 수치계산 결과이다. Fig. 8a는  $\tau_p$ 와  $\tau_n$ 이 같이 않을 경우의 결과이며, DR 점유율이 달라짐에 따라  $\bar{v}^i$  궤적이 달라짐을 확인할 수 있었다. Fig. 8b는  $\tau_p$ 와  $\tau_n$ 이 같을 경우이며, 결과에서 알 수 있듯이 DR 점유율이 달라짐에 따라  $\bar{v}^i$  궤적이 달라지지 않는 결과를 확인할 수 있다. 이는  $\tau_p$ 와  $\tau_n$ 이 같을 경우,  $k_2$ 의 지수 항의 값이 DR과 관계없이 일정한 값을 가지기 때문이다. 따라서  $\tau_p$ 와  $\tau_n$ 이 같거나 거의 비슷한 경우 대표  $\tau_{avr}$ 를 결정하여 속도 모델 동특성을 모델링할 수 있다. 만약,  $\tau_p$ 와  $\tau_n$ 값이 차이가 많이 나는 경우에는 DR 점유율에 따른  $\tau_{avr}$ 의 계획법 산출 혹은 수식적 관계를 통한 추정식을 추가 고려해야 할 것으로 사료된다.

### 5. 제어기법 설계

#### 5.1 구동 모델 정의

제어기법 설계를 위해 특정 운용 환경 아래에서의 모델 파라미터들을 정의하였다. 대표 운용 구동 압력( $P_u$ )과 구동기 행정 부하( $P_{Load}$ )를 고정 한 후 구동 데이터베이스를 통해서 획득한 Eq. 1의 모델 파라미터는 Table 3과 같다.

Table 3의 구동 명령에 따른 속도 응답 시상수  $\tau_p$ 와  $\tau_n$ 는 동일하였으며, 정상상태 속도는 행정 수축 방향이 보다 큰 것으로 관측되었다. 인장 및 수축에 따른 속도 응답 시상수가 동일하므로 DR 점유율에 따른 평균속도 응답 지연 특성 또한 동일하며, 구동 속도 명령에 따른 해당 DR 점유율 명령은 선형의 관계에서 계산될 수 있다. Table 3에서 주어진 모델 요소들을 이용하여 계산된 평균속도와 DR 점유율 관계식 및 평균속도 응답 시상수는 Eq. 13과 같다.

Table 3. Model parameter determination.

Parameter	Value	Remark
$\tau_p$	0.065 (sec)	-
$\tau_n$	0.065 (sec)	
$v_{pss}$	0.14 (-)	normalized
$v_{nss}$	-0.18 (-)	normalized

$$\begin{aligned} \bar{v}^i &= 0.32DR_p - 0.18 \\ \tau_{avr} &= 0.1359 \end{aligned} \quad (13)$$

## 5.2 PI 제어기 설계

구동 한계를 가진 시스템의 설계는 고전적인 PID 제어기 구조를 이용한 제어 명령 산출방법 [2,3], 혹은 ON/OFF 제어 특성을 이용한 비선형 제어기법인 SMC(Sliding Mode Control)[4,5] 등을 통해 가능하다. 본 논문에서는 제어법칙에 따른 피제어변수의 수렴성 이외에도 수렴 및 고전적인 응답 특성을 설계 요구조건으로 수용할 수 있는 선형 PI 제어기 구조를 고려하였다.

Eq. 12의 선형화된 모델 수식을 이용하여 명령  $r$ 과 구동기 행정거리  $x$ 의 차이에 따른 구동 속도 명령  $v_{avrss}$ 를 PID 제어기를 통해 결정하였다.  $v_{avrss}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{avrss} = (r-x)(K_p + \frac{K_i}{s} + sK_d) \quad (14)$$

Eq. 12와 14를 통해  $r$ 에 대한  $x$  응답 특성은 Eq. 15와 같이 정리될 수 있다.

$$\frac{x}{r} = \frac{s^2K_d + K_p s + K_i}{\tau s^3 + (1 + K_d)s^2 + K_p s + K_i} \quad (15)$$

본 연구에서는 외란 신호에 취약하여 시스템 불안을 야기할 수 있는 미분 이득( $K_d$ )을 제외한 PI 제어구조를 고려하였다. PI 제어 이득은 경험적 방법을 통해 계단 입력에 대한 Settling time과 Overshoot 등의 응답 특성을 고려하여 결정

Table 4. PI control gain.

Gain type	Value
Proportional, $K_p$	2.4
Integral, $K_i$	0.01

Table 5. Expected response characteristics.

Item	Value
Settling time	1.047 (sec)
Overshoot	0.509 (%)

하였으며, 결정된 제어 이득과 제어 이득에 따른 시스템 예상 응답특성은 각각 Table 4, 5와 같다.

한편, 실제 일반화된 제어기법의 적용에서는 다수의 설계점에서 설계 요구조건을 만족하는 각각의 제어기 이득 데이터베이스에 기반한 이득 계획법(Gain Scheduling Law) 적용을 통해 특정 조건에서의 제어 이득을 산출하게 된다.

## 5.3 구동한계를 고려한 제어 알고리즘 설계

설계된 제어기를 통해 산출되는 제어 구동 명령은 오차의 크기와 변화 경향에 따라 구동 한계 이상의 값이 될 수 있다. 본 논문에서 고려하는 실질적인 제어명령인 PWM DR 또한[0, 100%] 범위 내에서 정의된다. 일반적으로 구동 명령이 구동 한계를 많이 초과하면 할수록 제어 시스템 응답은 제어 이득이 작아지는 것과 비슷한 특성을 보이게 되며, 적분 이득에 따라 누적된 제어 오차가 제어시스템 성능 안정성에도 영향을 주게 된다. 이는 곧 설계된 제어 이득과 성능은 제어명령이 포화되지 않는 영역 내에서만 유효함을 의미한다.

본 논문에서는 앞서 기술된 제어 입력 포화에 따른 제어 성능 감소를 방지하기 위해 다음과 같은 방법을 제안한다. 먼저, 제어 영역을 두 부분으로 나누고 영역 내에서의 각각의 제어법칙을 설계하였다. 먼저, 제어 영역은 다음과 같이 설정하였다.



■ 제어 영역 설정

1) Region 1 :  $x_l < x < x_h$

$$v_{pss} > K_p(r-x), \Rightarrow x > r - \frac{v_{pss}}{K_p} = x_l$$

$$v_{nss} > K_p(r-x), \Rightarrow x < r - \frac{v_{nss}}{K_p} = x_h$$
(16)

2) Region 2 : Region 1 이외의 영역

Region 1은 비례 이득에 따른 제어명령이 모델을 통해 추정되는 최대 명령 한계를 넘지 않는 영역이다(Eq. 16). Region 2는 Region 1 이외의 영역으로 설정하였다. 한편, 각 영역에서의 제어법칙은 Table 6과 같으며, 조건에 따라 PI 제어방식 및 ON/OFF 제어방식을 상황에 따라 변환(switching)하여 적용하도록 구현하였다. 한편, PI 제어 성능 감소를 막기 위해 Region 2 및 Region 1의 입력 포화 조건 하에서는 성능 감소를 야기할 수 있는 적분 제어 이득의 적분량을 초기화(zero setting)하는 방법을 적용하였다. DR 명령 포화 발생 시 적분제어 이득에 의한 적분량을 초기화 하는 방법은 Region 1을 비례제어 이득에 의한 관계식으로만 정의한 이유와 동일 시된다.

결국, 이와 같은 방법을 통해 PI 제어방식을 적용하는 구간에서는 Table 5의 성능을 유지할 수 있으며, 그 외의 구간에서는 ON/OFF 입력을 통해 빠르게 PI 제어 구간으로 수렴하도록 하였

다. 앞서 기술된 제어 알고리즘을 흐름도로 나타내면 Fig. 9와 같다.

5.4 시뮬레이션

제어 알고리즘 검증을 위한 제어 시뮬레이션 구조는 Fig. 10과 같으며, MATLAB SIMULINK로 구현하였다.

시뮬레이션은 본 연구에서 제안되는 제어 알고리즘 구현에 따른 성능 개선 정도를 확인하기 위해 동일 조건에서 위치 오차 부호에 따른 ON/OFF 제어만을 고려하였을 경우와 본 연구에서 제안하는 제어 알고리즘 구현의 경우로 나

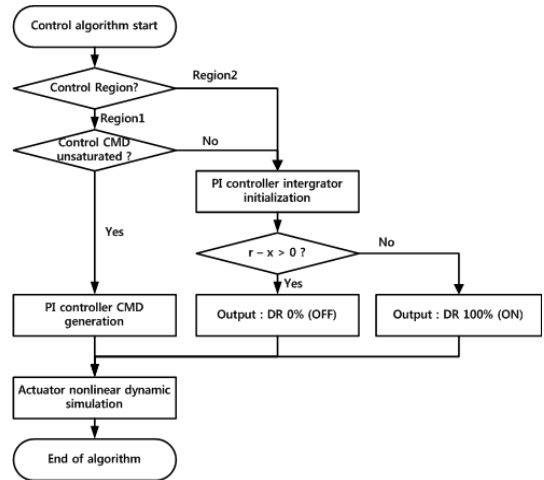


Fig. 9 Flow diagram of control algorithm.

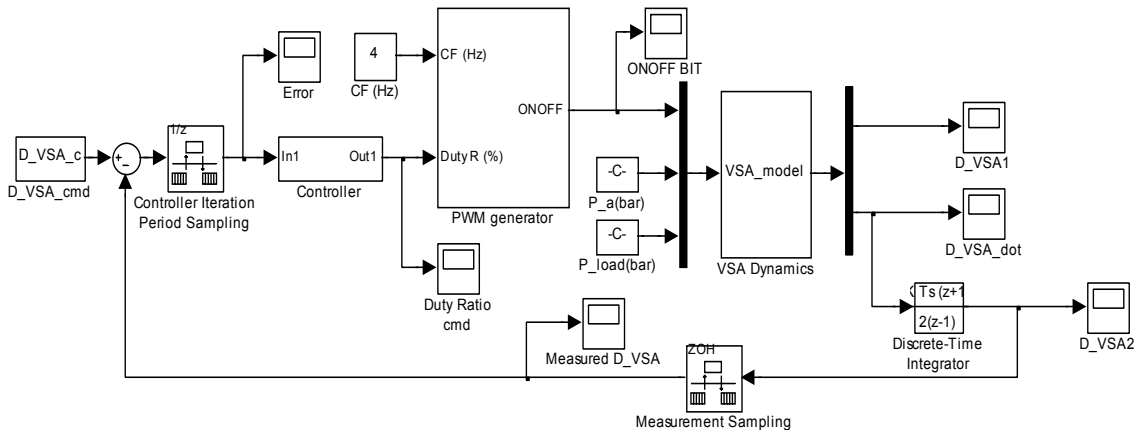


Fig. 10 Control simulation structure with nonlinear actuation dynamics.

Table 6. Control strategy.

Division	Control method	Condition
Region 1	PI control	Input unsaturation
	ON/OFF control	Input saturation
Region 2	ON/OFF control	-

Table 7. Simulation condition.

Item	Specification	Note
Simulation objective	Position command tracking	Step Command
Initial condition	$x(0) = 0.75$	-
	$\dot{x}(0) = 0.00$	

누어서 수행하였다.

시물레이션을 위한 제어 목적 및 상태 변수들의 초기 조건은 Table 7과 같다.

■ 시물레이션 결과

1) Discretized ON/OFF control only

VSA 위치오차 부호에 따른 이산화된 ON/OFF 제어 방식을 이용하여 획득한 결과는 Fig. 11과 같다. 대략 2.2초 부근에서 ON/OFF 명령 변환이 최초 발생하였다. 제어 명령 0.4 기준 대략 -0.04 ~ 0.03 진폭 및 1 Hz 수준의 진동 응답특성을 보여주고 있다.

2) PI + ON/OFF control

본 연구에서 제안하는 제어 알고리즘을 적용한 시물레이션 결과는 다음과 같다.

Fig. 12는 행정 위치 및 DR 명령을, Fig. 13은 ON/OFF bit 변화에 따른 속도 변화 결과를 보여준다. 행정 위치가 Region 1 안으로 들어오기 까지 대략 1.6초 동안은 ON 명령(DR 100%)을 통해 행정 위치가 줄어들었으며, 이후 PI 제어가

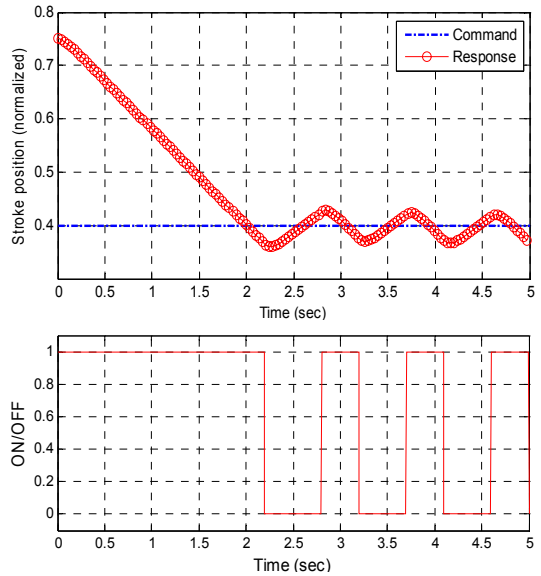


Fig. 11 Simulation results for ON/OFF control only : stroke position (top), ON/OFF BIT command (bottom).

로 전환되어 제어 오차가 줄어들면서 DR 값이 바뀌는 모습을 볼 수 있다. 제어 오차는 명령 대비  $\pm 0.005$  이내의 진동 응답특성을 보여주고 있으며, 이는 ON/OFF 제어만을 적용했을 경우의 12.5% 오차 수준이다. 또한, PI 제어가 적용 시점 이후의 평균 거동 응답특성은 예상 응답 성능 수준을 만족하고 있는 것으로 보인다.

6. 결론 및 고찰

본 연구에서는 ON/OFF 형식 유공압 구동기의 제어기법 설계 연구를 수행하였다. ON/OFF 구동 시험 데이터를 이용하여 구동특성을 모델링 하고, 모델식 기반의 구동 특성 해석을 통해 ON/OFF 구동의 평균 구동 모델을 도출하였다.

도출된 평균 구동 모델은 PWM 신호의 DR에 따른 정상상태 속도 변수를 입력으로 하는 단일 선형화 모델 구조를 가지며, 이를 이용한 PI 제어기 설계를 수행하였다. 또한, 실제 제어 입력인 PWM DR의 포화에 따른 PI 제어 성능 감소를 방지하기 위하여 제어영역을 구분하고, 제어

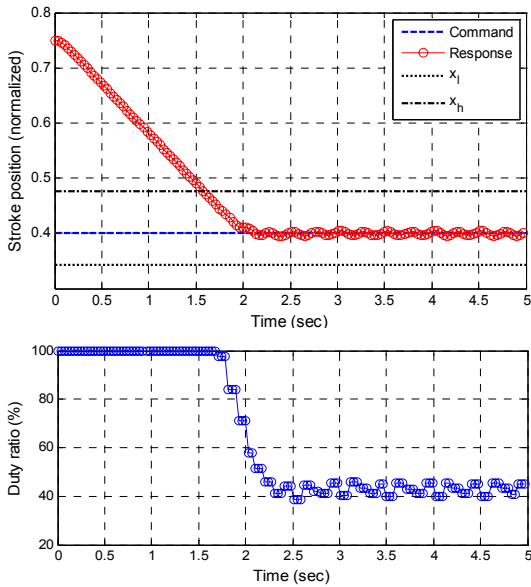


Fig. 12 Simulation results for PI + ON/OFF control : stroke position(top), duty ratio(bottom).

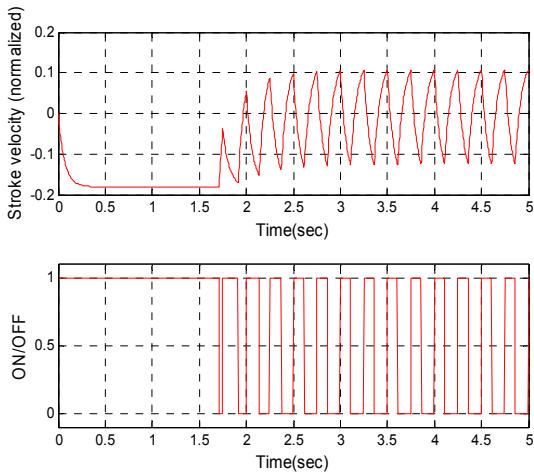


Fig. 13 Simulation results for PI + ON/OFF control : stroke velocity (top), ON/OFF BIT command (bottom).

입력 포화가 발생하지 않는 구역에 제한하여 PI 제어기를 적용하는 알고리즘을 제안하였다. 시뮬레이션 결과 오차 부호에 따른 ON/OFF 구동 제어방식 오차 대비 제안된 제어 알고리즘을 통한 오차는 대략 12.5% 수준으로 성능 개선이 이루어졌음을 확인할 수 있었다.

향후 연구에서는 실제 구동 시험을 통해 제안된 제어 알고리즘 적용에 따른 동특성 데이터를 분석하여 제안된 제어 알고리즘의 검증을 수행할 예정이다.

### References

1. Šulc, B. and Jan, J.A., "Non Linear Modeling and Control of Hydraulic Actuators," *Acta Polytechnica*, Vol. 42, No. 3, pp. 41-47, 2002.
2. Najjari, B., Barakati, S.M., Mohammadi, A., Fotuhi, M.J., Farahat, S. and Bostanian, M., "Modelling and Controller Design of Electro-Pneumatic Actuator Based on PWM," *International Journal of Robotics and Automation*, Vol. 1, No. 3, pp. 125-136, 2012.
3. Barth, J., Zhang, J. and Goldfarb, M., "Control Design for Relative Stability in a PWM - Controlled Pneumatic System," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 125, Issue 3, pp. 504-508, 2003.
4. Hejrati, B. and Najafi, F., "Accurate Pressure Control of a Pneumatic Actuator with a Novel Pulse Width Modulation-Sliding Mode Controller using a Fast Switching On/Off Valve," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, Vol. 227, No. 2, pp. 230-242, 2012.
5. Shen, X., Zhang, J., Barth, E.J. and Goldfarb, M., "Nonlinear Averaging Applied to the Control of Pulse Width Modulated Pneumatic Systems," *Proceedings of the 2004 American Control Conference*, Boston, MA., U.S.A., pp. 4444-4448, June-July, 2004.

- 
6. Bezzaoucha, S., Marx, B., Maquin, D. and Ragot J., "Linear Feedback Control Input under Actuator Saturation : a Takagi-Sugeno Approach," *2nd International Conference on Systems and Control(ICSC)*, Marrakech, Morocco, June 2012.
  7. Fang, H., Lin, Z. and Hu, T., "Analysis of Linear Systems in the Presence of Actuator Saturation and L2 Disturbances," *Automatica*, Vol. 40, Issue 7, pp. 1229-1238, 2004.