

근사적 모델 역변환을 활용한 전기-유압 액추에이터의 적응 위치 제어기 설계

Adaptive Position Controller Design of Electro-hydraulic Actuator Using Approximate Model Inversion

이 경 하¹, 백 승 국¹, 구 자 춘⁺

Kyeong Ha Lee¹, Seung Guk Baek¹, Ja Choon Koo⁺

Abstract An electro-hydraulic actuator (EHA) is widely used in industrial motion systems and the increasing bandwidth of EHA position control is important issue. The model-inverse feedforward controller is known to extend the bandwidth of system. When the system has non-minimum phase (NMP) zeros, direct model inversion makes system unstable. To overcome this problem, an approximate model-inverse method is used. A representative approximate model inversion method is zero phase error tracking control (ZPETC). However, if zeros locate right half plane of z-plane, the approximate inverse model amplifies the high-frequency response. In this paper, to solve the problem of ZPETC, an adaptive model-inverse control is proposed. The adaptive algorithm updates feedforward term in real-time. The effectiveness of the proposed adaptive model-inverse position control strategy is verified by comparison with typical proportional-integral (PI) control and feedforward control by experiments. As a result, the proposed adaptive controller extends the bandwidth of EHA position control.

Keywords Electro-hydraulic Actuator, Adaptive Control, Approximate Model Inversion, ZPETC

1. 서 론

유압 시스템은 빠른 응답과 높은 출력을 낼 수 있어 로보틱스, 동적 시뮬레이션, 피로 테스트 등 많은 산업 현장에서 사용되고 있다^{1,2}. 이에 따라 퍼지 제어(fuzzy control), 슬라이딩 모드 제어(sliding mode control), 반복 제어(iterative control), 강인 제어(robust control) 등 전기-유압 액추에이터(EHA: electro-hydraulic actuator)의 위치제어에 관한 많은 연구가 진행 되고있지만^{3,4,5,6} 실제

산업현장에서는 설계와 구현이 간단한 PID (proportional-integral-derivative) 제어기를 가장 많이 사용하고 있다⁷.

PID 제어기는 높은 비선형성을 가진 유압 시스템의 위치 제어에 간단히 적용할 수 있다는 장점이 있지만 고주파 영역에서의 실시간 위치제어를 하기에는 대역폭 (band width)이 충분하지 않다. 이 논문에서는 전기-유압 액추에이터의 고대역폭 위치제어를 위해 이러한 PID 제어기의 좁은 대역폭을 모델 역변환(model inversion)을 활용하여 보상하는 피드포워드 제어기(feedforward controller)에 관하여 기술하고, 피드포워드 제어기를 설계할 때 시스템 모델의 non-minimum phase (NMP) 영점(zero) 위치로 인한 근사 모델 역변환(approximate model inversion) 방법과 이 방법의 문제를 실시간 적응제어를 통해 해결하는 내용을 다룬다.

Received : Mar. 14. 2016; Revised : Apr. 7. 2016; Accepted : Apr. 7. 2016

※This work described in this paper was fully supported by Construction & Transportation Technology Advancement Research Program from Korea Agency for Infrastructure technology Advancement (15CTAP-C098408-01)

[†]Corresponding author: Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea (jkoo@skku.edu)

¹Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University (kyungha90@skku.edu)

모델 기반의 피드포워드 제어기 또는 적응 제어기를 설계하기 위해 유압시스템의 모델이 필요하다. 유압 시스템의 모델을 얻기 위해서는 이론적으로 모델을 도출하는 방법^[8]과 실험적으로 모델을 도출하는 방법이 있다. 시스템의 불확실한 파라미터들 때문에 실험적 모델 도출이 더 일반적인 방법이다. 실험적 모델을 얻기 위한 system identification 방법들로는 least mean squares (LMS) 방법^[9,10]과 recursive least squares (RLS) 방법^[11,12,13], 상태공간 모델^[14,15] 등이 연구에서 주로 활용되고 있다.

이 논문에서는 RLS 방법을 사용하여 PID 제어기가 포함된 폐루프(closed-loop) 시스템의 모델을 도출하였다. 이를 위해 0.1 Hz에서 50 Hz의 주파수 성분을 가진 랜덤 신호를 기준 신호(reference signal)로 하여 폐루프 시스템에 인가하고, 얻어진 입력력 데이터와 RLS 방법을 사용하여 선형 이산 전달함수를 도출하였다.

만약 도출된 선형 이산 전달함수의 영점이 z-domain의 단위원(unit circle) 바깥에 존재할 때 단순 모델 역변환을 구하면 전달함수의 NMP 영점들이 불안정한 극점(pole)이 되므로 시스템이 불안정해진다. NMP 영점들은 빠른 샘플링타임(sampling time)이나^[16] 신호 전달 지연^[17] 등으로 인하여 생긴다. NMP 전달함수의 근사적 모델 역변환을 구하기 위해서 가장 많이 쓰이는 방법은 zero phase error tracking control(ZPETC) 방법^[18,19]이다. 하지만 영점이 단위원 바깥이면서 z-plane의 우방면(양의 실수)에 존재한다면 ZPETC 방법은 고주파 영역에서 신호를 증폭시키기 때문에 안정적인 사용이 어렵다^[20]. 우리는 이 문제를 해결하기 위해 고정된 피드포워드 제어기를 사용하는 것이 아닌, 기준 신호와 시스템의 상태에 따라 파라미터를 업데이트하는 적응제어기를 설계함으로써 해결하였다.

이 논문에서는 유압 액추에이터의 실시간 고대역폭 위치제어를 위해 RLS 방법을 사용하여 실시간으로 폐루프 시스템의 모델을 추정함과 동시에 ZPETC 방법으로 근사적 모델 역변환을 구하여 피드포워드 제어기를 업데이트하는 적응제어에 관하여 다루며 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 전기-유압 액추에이터의 수학적 모델을 제시하고, 3장에서 실험적 모델의 system identification에 관해 다룬다. 4장에서는 ZPETC를 통한 근사적 모델

역변환의 문제점과 이를 해결하기 위한 적응제어기에 관하여 이야기한다. 제안된 적응 제어기의 성능을 5장에서 실험을 통해 검증한다. 마지막으로 6장의 결론을 통해 논문을 마무리 짓는다.

2. 전기-유압 액추에이터 모델링

일반적인 전기-유압 액추에이터는 Fig. 1과 같이 피스톤과 서보밸브(servo-valve)로 구성되어 있다. 서보밸브와 전기-유압 액추에이터의 유량은 다음과 같이 표현된다.

$$Q_1 = c_d w x_v \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_s - P_1)} \quad (1)$$

$$Q_2 = c_d w x_v \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_2 - P_0)} \quad (2)$$

c_d 는 유량계수, x_v 는 서보밸브 스푼(spool)의 변위, w 는 오리피스(orifice)의 면적 gradient, ρ 는 오일밀도를 의미하며 P_s 는 작동유의 공급 압력, P_0 는 귀환압력, P_1 , P_2 는 챔버(chamber)1과 2의 압력을 나타낸다.

내부 배관과 실린더의 변형을 무시하고 피스톤이 중립위치에 있다고 가정하여 각각의 챔버에 대한 연속방정식(continuity equation)을 유도하면 다음과 같다.

$$Q_1 - C_{ip}(P_1 - P_2) - C_{ep}P_1 = \frac{dv_1}{dt} + \frac{v_1}{\beta_e} \frac{dP_1}{dt} \quad (3)$$

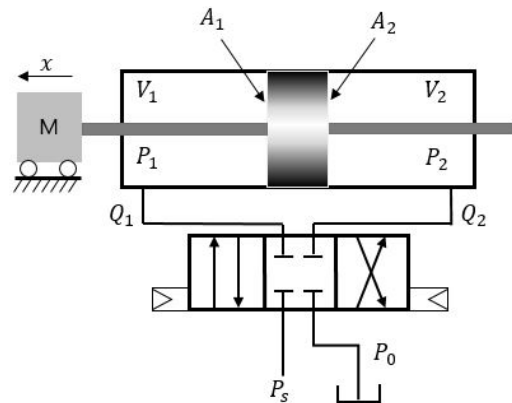


Fig. 1. Electro-hydraulic actuator

$$C_{ip}(P_1 - P_2) - C_{ep}P_2 - Q_2 = \frac{dV_2}{dt} + \frac{V_2}{\beta_e} \frac{dP_2}{dt} \quad (4)$$

V_1 와 V_2 는 챔버1과 챔버2의 부피이고 C_{ip} 는 실린더 내부 누수계수, C_{ep} 는 실린더 외부 누수계수, β_e 유효 벌크모듈러스(effective bulk modulus)이다. 최종적인 전기-유압 액추에이터의 운동방정식은 다음과 같다.

$$A_p(P_1 - P_2) = M_t \frac{d^2x}{dt^2} + B_p \frac{dx}{dt} + Kx + F_L \quad (5)$$

A_p 는 피스톤의 유효면적, M_t 는 피스톤과 피스톤에 걸리는 부하의 총 질량, B_p 는 점성 감쇠계수, K 는 스프링 상수, F_L 은 외부 부하이다.

3. System Identification

이 장에서는 실험적으로 모델을 구하기 위한 RLS 방법과 실험을 위한 장비 구성 및 실험 방법에 대해 기술하고 도출된 모델과 실제 시스템의 응답을 비교한다.

3.1 Recursive Least Squares 방법

RLS 방법은 실험적으로 모델을 도출하는 방법들 중 하나로 cost function을 최소화하는 선형 이산 전달함수의 계수들을 회귀적으로 찾아가는 알고리즘이다. 일반적으로 RLS 방법은 LMS 방법보다 더 빠른 수렴속도를 가진다. 시스템을 추정하기 위한 이산 선형 전달함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_mz^{-m}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_nz^{-n}} \quad (6)$$

식 (6)의 계수들은 측정 데이터와 추정 결과값의 차이로부터 계산된다.

$$y(k) - h^T \hat{\Theta} = e(k) \quad (7)$$

식 (7)의 변수들은 다음과 같다.

$$h^T = [-y(k-1) \dots -y(k-n) u(k) \dots u(k-m+1)]$$

$$\hat{\Theta}^T = [a_1 \dots a_n \ b_0 \dots b_m]$$

오차 제곱의 합을 최소화하는 계수를 찾기 위해 ‘Matrix Inversion Lemma’와 망각인자(forgetting factor) λ 를 적용하면 최종적으로 RLS 알고리즘을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{\Theta}_{k+1} = \hat{\Theta}_k + \frac{P_k h_{k+1} (y_{k+1} - h_{k+1}^T \hat{\Theta}_k)}{\lambda + h_{k+1}^T P_k h_{k+1}} \quad (8)$$

$$P_{k+1} = \frac{1}{\lambda} \left(P_k - \frac{P_k h_{k+1} h_{k+1}^T P_k}{\lambda + h_{k+1}^T P_k h_{k+1}} \right) \quad (9)$$

여기서 P 는 공분산계수 이다. 식 (8)과 (9)를 반복하며 회귀적으로 이산 선형 전달함수의 계수들을 찾아나간다.

3.2 실험 장비 구성

실험에 사용한 유압 시스템은 Fig. 2와 같이 KNR사의 유압 액추에이터와 유압펌프, Moog사의 서보밸브, 피스톤의 변위를 측정하기 위한 LVDT로 구성된다. 액추에이터의 동작 범위는 80 mm이고 NI-CompactRio를 사용하여 LVDT의 아날로그 신호를 받고 제어알고리즘을 계산하여 실시간으로 유압 액추에이터를 제어하였다. 샘플링 타임은 1 ms이다. 유압 펌프 200 bar의 작동유를 공급한다.

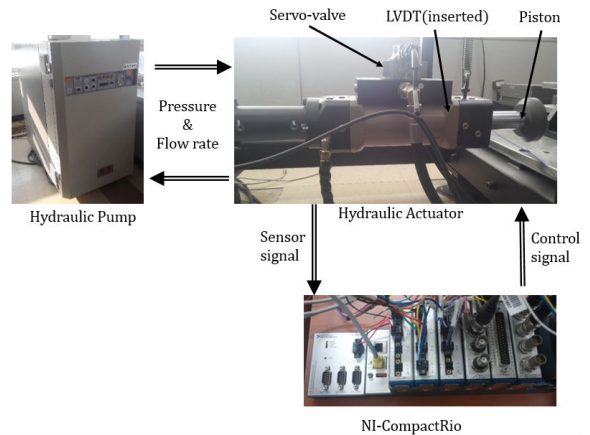


Fig. 2. Experimental set

3.3 실험을 통한 모델 도출

피드포워드 제어기 설계를 위해 Fig. 3의 블록 다이어그램에서 페루프 부분의 모델을 실험을 통해 구한다.

피드백 제어기로 PI 제어기를 선정하고 ‘Ziegler-Nichols method’를 사용하여 튜닝 하였다. 튜닝된 페루프 시스템에 0.1 Hz에서 50 Hz의 주파수 성분을 가진 랜덤 신호를 기준 위치로 인가하여 시스템의 입출력 데이터 얻었다. 얻어진 데이터와 RLS 방법을 사용하여 페루프 시스템의 3차 이산 선형 전달함수를 다음과 같이 구하였다.

$$\hat{H}_d(z) = \frac{-0.05595 + 0.233z^{-1} - 0.3649z^{-2} + 0.2221z^{-3}}{1 - 1.614z^{-1} + 0.5384z^{-2} - 0.1095z^{-3}} \quad (10)$$

Fig. 4는 추정된 전달함수와 실제 시스템에 같은 입력

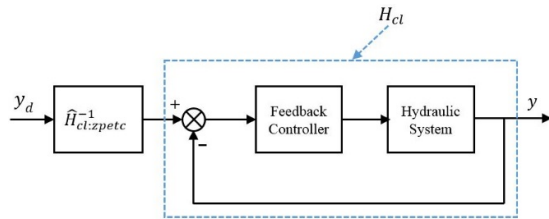


Fig. 3. Block diagram of feedforward controller

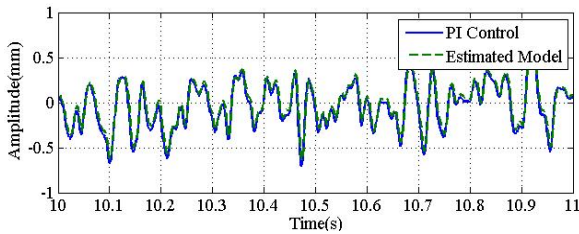


Fig. 4. Time response of EHA and estimated transfer function

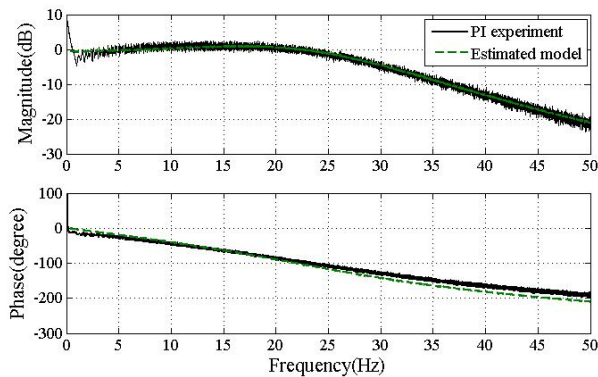


Fig. 5. Frequency response of EHA and estimated transfer function

을 주었을 때 1초 동안의 시간응답을 비교한 것이고 Fig. 5는 주파수 응답을 비교한 것이다. 이를 통해 추정된 3차 전달함수가 주어진 페루프 시스템을 잘 모사하고 있음을 알 수 있다.

4. 근사적 모델 역변환을 통한 피드포워드 제어

3장에서 페루프 시스템을 RLS를 통하여 3차 전달함수로 추정하였다. 하지만 추정된 3차 전달함수의 영점이 빠른 샘플링 속도나 데이터 전달 지연 등으로 인하여 Fig. 6과 같이 z-domain에서 단위원 바깥에 존재하기 때문에 단순 모델 역변환을 구하면 NMP 영점이 불안정한 극점으로 바뀌면서 시스템 역시 불안정해 진다.

이러한 NMP의 근사적 모델 역변환을 구하기 위한 몇 가지 방법이 있는데, 이 장에서는 계산이 간단하고 효과적인 위상 지연 보상으로 인해 많이 쓰이는 ZPETC 방법을 사용하여 NMP 전달함수의 근사적 모델 역변환을 구하고 이를 피드포워드 제어기로 활용하는 방법을 다룬다.

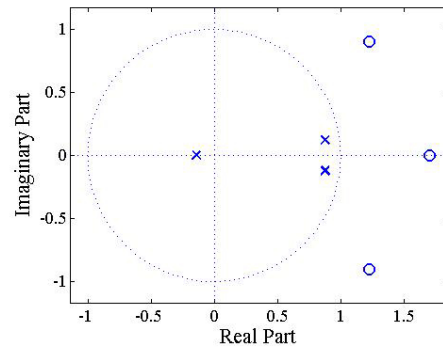


Fig. 6. Poles and zeros of estimated model

4.1 Zero Phase Error Tracking Control (ZPETC)

이산 전달함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{B_s(z)B_u(z)}{A(z)} \quad (11)$$

식 (11)에서 분자항을 NMP 부분($B_u(z)$)과 minimum phase (MP) 부분($B_s(z)$)으로 나누면 아래와 같다.

$$A(z) = z^n + a_1z^{n-1} + \dots + a_n$$

$$B_s(z) = b_{s0}z^m + b_{s1}z^{m-1} + \dots + b_{sm}$$

$$B_u(z) = b_{u0}z^r + b_{u1}z^{r-1} + \dots + b_{ur}$$

ZPETC를 적용하면 NMP 전달함수의 근사적 역변환 모델을 다음과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 $B_u^f(z)$ 는 $B_u(z)$ 의 계수들을 flipping하여 얻는다^[18].

$$\hat{H}^{-1}(z) = \frac{A(z)B_u^f(z)}{B_s(z)B_u(1)^2} \quad (15)$$

4.2 피드포워드 제어기 설계

Fig. 3에서 볼 수 있듯이 피드백 제어기가 포함된 페루프 시스템(H_d) 앞에 페루프 시스템의 모델 역변환을 추가하여 페루프 시스템의 응답을 보상하는 피드포워드 제어기를 설계한다. NMP 영점의 존재로 인해 ZPETC를 통한 근사적 모델 역변환으로 설계한 피드포워드 제어의 결과는 다음과 같이 imaginary term이 없으며 이상적으로 출력의 위상 지연이 없음을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{x_d(z)}{x(z)} &= H_d(z)\hat{H}_{d:zpetc}^{-1}(z) \\ &= \frac{B_s(z)B_u(z)}{A(z)} \frac{A(z)B_u^f(z)}{B_s(z)B_u(1)^2} = \frac{B_u(z)B_u^f(z)}{B_u(1)^2} \end{aligned} \quad (16)$$

3장에서 추정된 3차 전달함수의 근사적 모델 역변환을 ZPETC를 사용하여 구하면 다음과 같으며 이는 피드포워드 제어기로 사용되어 페루프 시스템의 부족한 응답 크기와 위상 지연을 보상한다.

$$\hat{H}^{-1}(z) = \frac{70.9438z^{-6} - 231.0486z^{-5} + 300.7336z^{-4} - 192.9847z^{-3} + 56.1549z^{-2} - 1.4700z^{-1} - 1.9572}{0.3761} \quad (17)$$

4.3 ZPETC 피드포워드 제어기 평가

ZPETC 방법을 이용하여 얻어진 근사적 모델 역변환을 활용한 피드포워드 제어기를 적용하기 전, 후의 시간

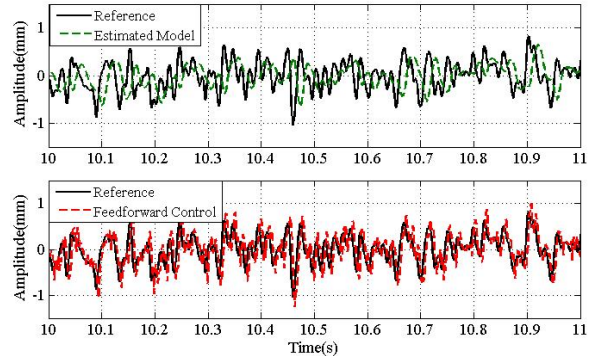


Fig. 7. Time response of estimated model (upper) and feedforward controller applied model (lower)

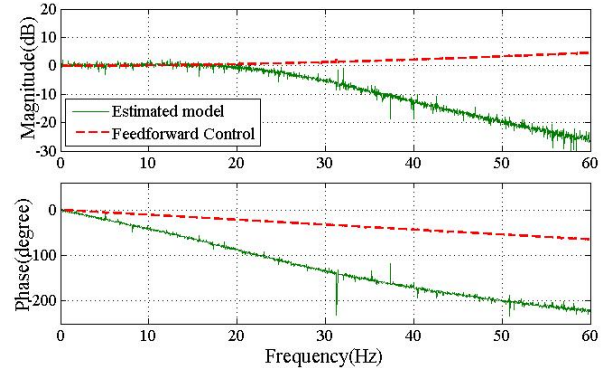


Fig. 8. Frequency response of estimated model (upper) and feedforward controller applied model (lower)

및 주파수 응답 성능을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 시뮬레이션은 MATLAB/Simulink를 이용하였다. 샘플링 타임은 실험과 동일한 1 ms이며 0.1 Hz에서 50 Hz의 랜덤 신호를 기준 입력으로 하였을 때 시간응답과 주파수 응답은 다음과 같다. 각각 Fig. 7과 Fig. 8에 나타나있다. Fig. 7의 시간 응답결과를 보면 피드포워드 제어기를 추가했을 때가 그렇지 않을 때 보다 기준입력을 더 잘 추종하고 있는 것으로 보인다. 또한 Fig. 8의 주파수 응답을 살펴보면 추정모델의 경우, 약 20 Hz에서 -90°의 위상지연이 나타나는 반면 피드포워드 제어기를 추가했을 때 위상 지연이 보상되어 20 Hz에서 -30°의 위상지연을 보인다. 하지만 응답 크기의 경우, 피드포워드 제어기를 적용했을 때 주파수가 커짐에 따라 점점 증가하는 것으로 나타난다. 이는 NMP 영점이 z-plane의 우방면에 존재할 경우 ZPETC로는 이 영점의 영향을 없애지 못하기 때문이다^[20].

5. 적응 제어기

4장에서 나타난 바와 같이, NMP 영점이 z-plane의 우방면에 존재하는 전달함수의 근사적 모델 역변환을 구하기 위하여 ZPETC 방법을 사용하면 고주파 영역에서 시스템의 응답 크기를 증폭시키는 문제가 발생한다. 이 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 실시간으로 시스템을 추정하고 피드포워드 제어기를 업데이트하는 적응 제어기를 제안한다. 제어기의 블록 다이어그램은 Fig. 9와 같다.

적응 제어기는 페루프 시스템(H_p)으로 들어가는 입력과 출력 데이터에 실시간으로 RLS 방법을 적용하여 모델을 추정함과 동시에 ZPETC 방법으로 근사적 모델 역변환을 구하여 피드포워드 제어기를 업데이트 한다. 입력 신호의 특성에 따라 추정되는 시스템이 달라지며 유압 시스템은 작동유의 온도 변화로 인하여 시스템 거동이 변하기 때문에 적응 제어를 통한 피드포워드 제어기의 실시간 업데이트는 ZPETC 방법으로 인한 고주파에서의 응답 크기의 증폭 해결뿐만 아니라 유압시스템과 같은 시변 시스템과 외란에 대한 위치 제어성능을 향상시킨다.

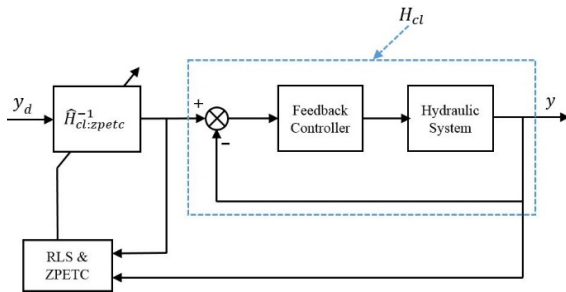


Fig. 9. Block diagram of adaptive controller

6. 실험 결과

이번 장에서는 제안된 적응 제어의 위치제어 성능을 실험을 통하여 검증 한다. 실험에 사용된 장비 구성은 3장에서 system identification을 위해 사용한 구성과 같으며 피드백 제어기의 파라미터 또한 그대로 사용하였다. 적응 제어기의 초기 근사적 모델 역변환 제어기는

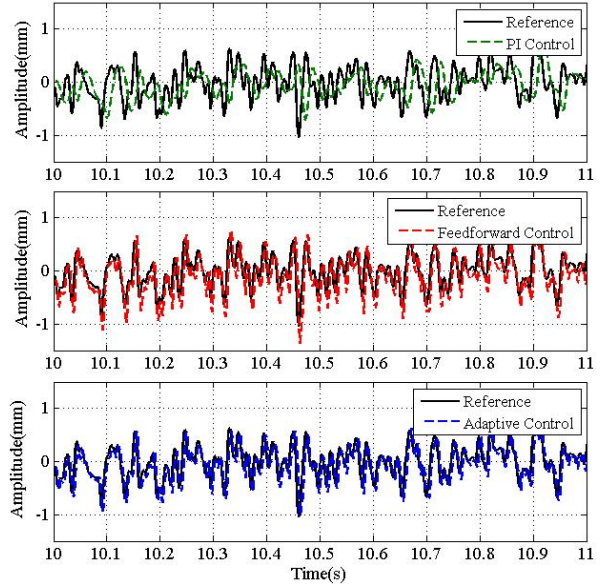


Fig. 10. Time response of PI control (top), feedforward control (middle) and adaptive control (bottom)

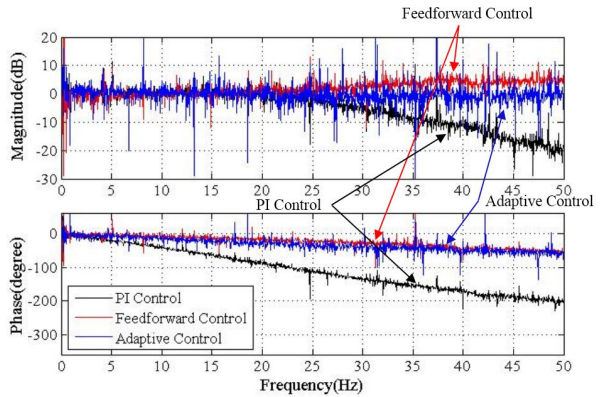


Fig. 11. Frequency response of adaptive control (blue line) and feedforward control (red line)

4장에서 설계된 제어기를 사용하였다. 실험은 PI 제어기, 피드포워드 제어기, 적응 제어기에 대해 0.1 Hz에서 50 Hz의 랜덤 신호를 reference로 하고 1 ms의 샘플링 타임으로 진행되었다. Fig. 10은 PI제어와 근사적 모델 역변환을 적용한 피드포워드 제어기 및 제안된 적응 제어기의 시간응답을 나타내고, Fig. 11은 위의 세가지 제어기에 따른 주파수 응답 특성을 비교한 것이다.

Fig. 10에서, 피드포워드 제어기를 적용할 경우, PI 제어기만을 사용했을 때 보다 시간 지연이 줄지만 응답 신호의 크기가 reference보다 크게 나타난다. 적응 제어

기를 적용하면 시간지연 뿐만 아니라 reference 신호의 크기 또한 더 잘 추종하는 것을 볼 수 있다. Fig. 11에 나타난 제어기 별 주파수 응답 특성을 살펴보면, PI 제어만을 사용할 때 주파수 응답의 크기는 약 15 Hz에서 -3 dB 이며 약 20 Hz에서 -90°의 위상지연을 보인다. 피드포워드 제어기만을 사용 했을 경우, 위상지연은 50 Hz에서 약 -60°로 크게 개선 되지만 시뮬레이션 결과와 Fig. 10에서 확인 할 수 있듯이 주파수가 증가함에 따라 응답의 크기도 점차적으로 증가하는 문제가 발생한다. 이는 유압 시스템의 위치 제어 시 시스템을 불안정하게 하거나 과도한 입력으로 인해 시스템에 무리가 될 수 있다. 이를 해결하기 위해 제안된 적응 제어기를 사용하여 실시간으로 피드포워드 제어기를 업데이트 해준 결과, 위상지연이 50 Hz에서 약 -60°로 피드포워드 제어기와 비슷하며 주파수가 증가하여도 응답의 크기가 일정하게 유지된다.

실험을 통해 제안된 적응 제어기가 PI 제어기의 성능 한계를 보상하며 피드포워드 제어기의 응답 증폭 문제를 해결하여 전기-유압 액추에이터의 위치 추종 성능을 향상 시킨다는 것을 확인하였다.

7. 결 론

이 논문에서는 전기-유압 액추에이터의 고대역폭 위치 제어를 위해 피드백 제어의 성능을 보상하고, 근사적 모델 역변환을 활용한 피드포워드 제어기의 문제를 해결하는 적응 제어기를 제안하였다. 영점이 z-domain의 단위원 바깥에 있는 NMP 시스템을 ZPETC 방법으로 근사적 모델 역변환을 구하여 피드포워드 제어기로 사용하면 고주파 영역에서 응답이 증폭되는 문제가 발생한다. 제안된 적응 제어기는 실시간으로 시스템의 입출력 데이터와 RLS 방법을 이용하여 시스템의 추정 이산 전달함수 모델을 구하고 ZPETC 방법으로 근사적 모델 역변환을 구하여 피드포워드 제어기를 업데이트함으로써 ZPETC를 활용한 피드포워드 제어기만을 사용하였을 때의 문제를 극복한다. 또한 실험을 통하여 제안된 적응 제어기가 피드백 제어기의 성능 한계를 보상하고 ZPETC 방법으로 구한 피드포워드 제어기의 문제를 해

결하여 전기-유압 액추에이터의 위치 제어 대역폭을 확장하는 것을 확인하였다.

References

- [1] H.E. Merrit, Hydraulic Control Systems, Wiley, 1967.
- [2] M. Jelali and A. Kroll, Hydraulic Servo-systems- Modeling, Identification and Control, Springer, 2004.
- [3] E. Detiek and U. uperl, "An Intelligent Electro-Hydraulic Servo Drive Positioning," Journal of Mechanical Engineering, vol. 57, no. 5, pp. 394-404, 2011.
- [4] Y. Lin, "Controller Design for Hydraulic Position Control Systems," Ph.D thesis, University of Saskatchewan, 2011.
- [5] L. Li, U. Poms and T. Thurner, "Accurate position control of a servo-hydraulic test cylinder by iterative learning control technique," UKSim-AMSS 8th European Modelling Symposium on Computer Modelling and Simulation, pp. 297-302, 2014.
- [6] M. Karpenko and N. Sepehri, "On quantitative feedback design for robust position control of hydraulic actuators," Control Engineering Practice, vol. 18, pp. 289-299, 2010.
- [7] S. Fu, S. Lu, and G. Kai, "Characteristics and control technology research of three-stage electro-hydraulic servo valve," Journal of Applied Science and Engineering Innovation, vol. 2, pp. 43-45, 2015.
- [8] S.M. Kim, Y.J. Choi and W.K. Chung, "Design of Torque Servo for Impedance Control of Double Vane Rotary Hydraulic Actuator System," Journal of Korea Robotics Society, vol. 5, no. 2, pp.160-168, 2010.
- [9] B. Widrow and E. Walach, Adaptive Inverse Control - A signal processing approach, WILEY INTERSCIENCE, 2007.
- [10] S.O. Haykin, Adaptive filter theory, Prentice Hall, 5 ed., 2013.
- [11] G. Shen, Z.C. Zhu, L. Zhang, Y. Tang, C.F. Yang, J.S. Zhao, G.D. Liu and J.W. Han, "Adaptive feed-forward compensation for hybrid control with acceleration time waveform replication on electro-hydraulic shaking table," Control Engineering Practice, vol. 21, pp. 1128-1142, 2013.
- [12] R. Krmeta, S. Anti and D. Stojanovi, "Recursive least squares method in parameters identification of dc motors models," Facta Universitatis(NIS), SER.: ELEC. ENERG., vol. 18, no. 3, pp. 467-478, 2005.
- [13] D. Wang and F. Ding, "Input-output data filtering based recursive least squares identification for CARARMA

- systems,” Digital Signal Processing, vol. 20, pp. 991-999, 2010.
- [14] J.D. Cuyper and M. Verhaegen, “State space modeling and stable dynamic inversion for trajectory tracking on an industrial seat test rig,” Journal of vibration and control, vol. 8, no. 7, pp. 1033-1050, 2002.
- [15] M. Verhaegen, “Identification of the deterministic part of mimo state space models given in innovations form from input-output data,” Automatica, vol. 30, pp. 61-74, 1994.
- [16] K.J. strm, P. Hagander, and J. Sternby, “Zeros of sampled systems,” Automatica, vol. 20, pp. 31-38, 1984.
- [17] J.A. Butterworth, L.Y. Pao and D.Y. Abramovitch, “Fitting discrete-time models to frequency responses for systems with transport delay,” Proc International Mechanical Engineering Congress and Exposition, vol. 7, pp. 1321-1328, 2011.
- [18] B.P. Rigney, J.A. Butterworth, L.Y. Pao and D.Y. Lawrence, “Model inversion architectures for settle time applications with uncertainty,” Proc IEEE conf dec ctrl, pp. 6518-6524, 2006.
- [19] M. Tomizuka, “Zero phase error tracking algorithm for digital control,” Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, vol. 100, pp. 65-68, 1987.
- [20] J.A. Butterworth, L.Y. Pao, and D.Y. Abramovitch, “Analysis and comparison of three discrete-time feedforward model-inverse control techniques for nonminimum-phase systems,” Mechatronics, vol. 22, pp. 577-587, 2012.



이 경 하

2014 성균관대학교 기계공학부(공학사)

2014 ~ 현재 성균관대학교 기계공학부 석박
통합과정

관심분야: 유압시스템 제어, 로봇 제어, 인공지능



백 승 국

2008 성균관대학교 기계공학부(공학사)

2010 성균관대학교 기계공학부(공학석사)

2016 성균관대학교 기계공학부(공학박사)

2016 ~ 현재 성균관대학교 기계공학부 박사후
연구원

관심분야: 유압시스템 제어, 반복 제어, 비선형 시스템



구 자 춘

1989 한양대학교 기계공학과(공학사)

1992 University of Texas at Austin 기계공학과
(공학석사)

1997 University of Texas at Austin 기계공학과
(공학석사)

1997 ~ 2001 IBM Advisory Engineer

2001 ~ 현재 성균관대학교 기계공학부 교수

관심분야: 유압시스템 제어, 동역학 해석, 로봇 시스템