

외란과 모델 불확실성에 강인한 DC모터의 속도 제어용 H-infinity 제어기 설계

정태영* · 김동근¹

부경대학교 실습선 교수, ¹부경대학교 대학원 냉동공조공학과 대학원생

H-infinity controller design for robust speed control against disturbance and model uncertainty of DC motors

Tae-Young JEONG* and Dong-Geun KIM¹

Professor, Training Ship, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

¹Student, Graduate School of Refrigeration and Air-conditioning Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

This paper describes the design of H-infinity controller for robust control of a DC motor system. The suggested controller can ensure robustness against disturbance and model uncertainty by minimizing H-infinity norm of the transfer function from exogenous input to performance output and applying the small gain theorem. In particular, the controller was designed to reduce the effects of disturbance and model uncertainty simultaneously by formalizing these problems as a mixed sensitivity problem. The validity of the proposed controller was demonstrated by computer simulations and real experiments. Moreover, the effectiveness of the proposed controller was confirmed by comparing its performance with PI controller, which was tested under the same experimental condition as the H-infinity controller.

Keywords: DC motor, H-infinity control, Model uncertainty, Robust control, Mixed sensitivity problem, Disturbance rejection

서론

DC모터의 정밀한 서보제어는 선박 발전기의 부하 및 회전 속도 조정용 가버너 모터(governor motor)와 가변 피치 프로펠러 시스템의 구동 장치 등에 필수적인 기술이다. 또한, 로봇과 같은 다양한 자동화 산업 분야에서도 널리 적용되고 있다. DC모터의 서보제어는 위치나 속도 또는 토크를 목표값에 추종하도록 정확히 제어해야 하므로 제어대상의 수학적 모델의 불확실성이나, 부하 변동을 포함한 외란, 잡음 등에 강인한 제어 성능을 가져야 한다. 이러한 제어 강인성은 기존의 PID (Proportional-

Integral-Derivative) 제어로는 달성하기가 어렵다(Han et al., 2017; Ahmed, 2012; Damiano et al., 2004).

강인 제어(robust control) 기법에서 모델 기반 설계의 경우, 슬라이딩모드 제어(SMC; Sliding Mode Control)와 H_∞ (H-infinity) 제어, 그리고 μ -합성(μ -synthesis) 제어 등이 사용되고 있다(Doyle et al., 1988; Dursun and Durdu, 2016). SMC는 설계가 쉽고, 외란과 파라미터 불확실성에 강인한 제어 성능을 갖는다(Hanifi, 2003; Liu and Wang, 2011; Vadim et al., 2009; Maheswararao et al., 2011; Nazanin and Yazdi, 2013). DC모터 시스템

*Corresponding author: tyjeong@pknu.ac.kr, Tel: +82-51-629-5998, Fax: +80-51-629-5989

을 대상으로 SMC와 PI의 속도 제어 성능을 비교한 연구 결과에서는 SMC가 PI 제어기보다 부하 변동 및 모델의 파라미터 변동에 더 강인함이 입증되었다(Han and Jeong, 2018; Venkatesh et al., 2016). 하지만 SMC는 외란인 부하 인가 시, 미소한 정상상태오차가 발생하는 문제가 있어 외란 관측기(DOB; Disturbance Observer)를 갖는 SMC가 제안되었으며 제안된 DOB 기반의 SMC는 외란으로써 계단형 부하와 모터 파라미터 변동에 대한 시뮬레이션으로 그 유효성이 확인되었다(Jeong, 2019). 그러나 설계된 DOB가 모터 파라미터들이 정확하고 변동하지 않을 경우, 강인한 제어 성능을 보장하지만 이들 파라미터가 불확실하거나 변동될 경우, 제어의 열화(deterioration)현상이 발생한다. 특히, DOB에 사용된 관성모멘트나 베어링 마찰 계수 등의 파라미터는 시스템 특성에 따라 변화하므로 이에 대한 대책이 반드시 요구된다.

본 논문에서는 DC모터의 서보제어를 위해 파라미터 불확실성과 외란에 강인한 H_∞ 제어기를 설계하고, 시뮬레이션과 실험을 통해 그 타당성을 검증한다. H_∞ 제어기의 원리는 외란을 포함한 외부 입력으로부터 목표 제어량까지의 전달함수를 구하고, 그 주파수 전달함수의 최대 이득값인 H_∞ 놈(norm)을 최소화함으로써 외란의 영향을 억제한다(Zhou and Doyle, 1998). 이 방식에서 외란과 잡음은 가중함수를 통한 루프 정형(loop shaping)을 통해 감도함수와 상보감도함수를 최적화함으로써 그 영향이 감소되고, 소이득 정리(small gain theorem)를 통해 모델 불확실성에 대한 제어계의 안정성도 확보할 수 있다(Glover and McFarlane, 1992). H_∞ 제어는 이들을 혼합감도 문제(mixed sensitivity problem)로 정식화하여 외란과 모델 불확실성에 대해 강인성을 갖도록 설계한다. H_∞ 와 μ -합성 제어기에 의한 선박용 대형 디젤 기관의 강인 속도 제어에 관한 기존의 연구에서는 강인 성능에 관한 다양한 분석이 이루어졌으나 시뮬레이션 결과만 제시되었을 뿐 실험을 통한 타당성 검증이 결여되었다(Hwang et al., 2011). 또한, 가장 우수한 성능을 보여준 μ -합성 제어기는 고차의 제어기여서 마이크로프로세서(microprocessor)로 구현하기에는 실용성이 떨어진다는 문제도 발생한다. 본 논문에서는 DC모터를 대상으로 설계한 H_∞ 제어기의 강인성을 시뮬레이션과 실험을 통해 분석하고, PI 제어기와의 성능 비교를 통해 그 유효성을 검증한다.

재료 및 방법

DC모터의 상태 공간 모델링

Fig. 1은 서보모터에 널리 사용되는 타여자 방식의 전기자 전압 제어형 DC모터의 등가 모델이다. DC모터의 전기계 동특성은 식 (1), 기계계의 동특성은 식 (2)와 같다(Kim, 2010).

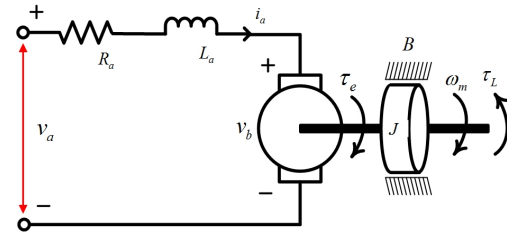


Fig. 1. Equivalent model of a DC motor.

$$L_a \frac{di_a(t)}{dt} + R_a i_a(t) = v_a(t) - v_b(t) \quad (1)$$

$$J \frac{d\omega_m(t)}{dt} + B\omega_m(t) = \tau_e(t) - \tau_L(t) \quad (2)$$

식 (1), (2)에서 L_a, R_a 는 전기자의 인덕턴스 및 저항, B, J 는 베어링 마찰계수와 모터 축의 관성모멘트를 각각 나타낸다. 출력 변수인 $i_a(t), \omega_m(t)$ 는 전기자 전류와 모터의 회전 속도, 입력 변수인 $v_a(t), v_b(t)$ 는 전기자 입력 전압과 역기전력 $v_b(t) = K_e \omega_m(t)$ 이고, K_e 는 역기전력 상수이다. $\tau_e(t), \tau_L(t)$ 는 각각 모터의 전자기적 토크와 외란 토크이며, $\tau_e(t) = K_t i_a(t)$ 이고, K_t 는 토크상수이다.

전기자 전압 제어의 제어 입력 $u(t)$ 를 $u(t) = v_a(t)$ 로 하여, 식 (1)과 식 (2)를 $\ddot{\omega}_m(t)$ 에 대하여 정리하면 식 (3)과 같이 된다. 이때, 부하 토크 τ_L 은 미지의 외란이므로 제어 모델에서는 $\tau_L = 0$ 으로 하고, 시간함수 t 의 표기를 생략하여 $u(t)$ 를 u 와 같이 표기한다.

$$\ddot{\omega}_m = - \left(\frac{JR_a + L_a B}{JL_a} \right) \dot{\omega}_m - \frac{R_a B + K_e K_t}{JL_a} \omega_m + \frac{K_t}{JL_a} u \quad (3)$$

식 (3)에서 상태변수 x_1 과 x_2 를 $x_1 = \omega_m, x_2 = \dot{x}_1 = \dot{\omega}_m$ 으로 각각 정의하면 상태 공간 모델의 상태방정식은 식

(4), 출력방정식은 식 (5)와 같이 유도된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\left(\frac{R_u B + K_t K_v}{J L_u}\right) - \left(\frac{R_u}{L_u} + \frac{B}{J}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_t}{J L_u} \end{bmatrix} u \quad (4)$$

$$y = [1 \ 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

H_∞ 제어기 설계

Fig. 2는 H_∞ 제어의 블록도이며, 여기에서 G는 제어 대상, w와 u는 각각 외란을 포함한 외부 입력과 제어 입력이고, z와 y는 제어량과 관측 출력을, K는 피드백 제어기를 나타낸다.

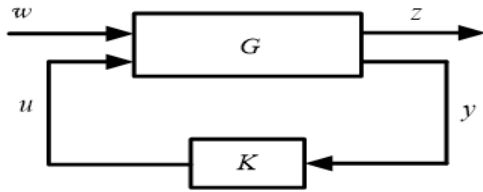


Fig. 2. H_∞ control framework.

H_∞ 제어는 식 (6)으로 정의된 제어대상 G에 대하여 외란을 포함한 외부 입력 w에서 제어량 z까지의 주파수 전달함수인 식 (7)의 G_{zw}(jω)의 H_∞ 놈 식 (8)의 ||G_{zw}||_∞를 최소화하는 제어기 K를 구하는 문제이고, 이때 σ̄는 최대 특이치(singular value)이다.

$$\begin{bmatrix} z \\ y \end{bmatrix} = G \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$G_{zw} = G_{11} + G_{12}K(I - G_{22})^{-1}G_{21} \quad (7)$$

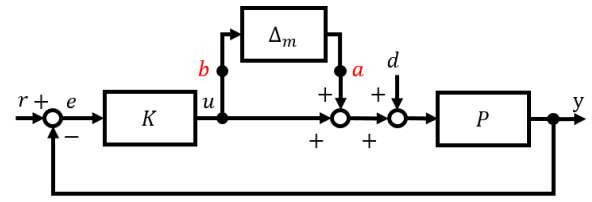
$$\|G_{zw}\|_{\infty} = \sup \bar{\sigma}\{G_{zw}(j\omega)\}, \forall \omega \quad (8)$$

외란과 모델 불확실성에 대해 강인성을 갖는 H_∞ 제어기를 설계하기 위해 우선 각 입력들이 출력에 미치는 전달함수들을 도출하기 위해 블록도를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a)는 목표값 r, 외란 d와 곱셈형 모델링 오차 Δ_m을 갖는 피드백 제어계를, Fig. 3(b)는 모델 불확실성 Δ_m의 영향을 감소시키기 위해 소이득 정리를 적용하고자 (a)를 간략화한 그림이다.

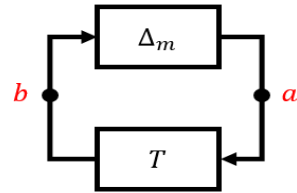
Fig. 3(a)에서 각 입력(목표값, 외란)들이 출력 y에 미치는 영향은 식 (9), Fig. 3(b)에서 점 a부터 점 b까지의 전달함수 T는 그림 (a)로부터 식 (10)과 같이 유도된다.

$$y = \frac{PK}{1+PK}r + \frac{P}{1+PK}d \quad (9)$$

$$T = \frac{PK}{1+PK} \quad (10)$$



(a) feedback control system with d and Δ_m



(b) simplified block diagram of (a)

Fig. 3. Feedback control system with disturbance and modeling error.

외란 d가 출력에 미치는 영향을 줄이려면, 식 (9)에서 외란과 출력의 전달함수(y/d)인 P̃_s = P/(1+PK)의 제어기 이득 K는 크게, 모델 불확실성 Δ_m의 영향을 줄이려면, 식 (10)의 K는 작게 설계해야 한다. 이러한 상충 조건을 만족시키기 위해 주파수 루프 정형(loop shaping)이 사용되기 때문에 H_∞ 제어기는 적절한 가중 함수 w_i의 설계를 통해 외란과 모델의 불확실성에 대해 강인성을 가진다. 먼저 외란은 식 (9)의 P̃_s 크기를 최소화시키는 가중함수 w₁을 선정, 식 (11)이 만족하도록 설계한다. 여기에서 반복계수(iteration coefficient) γ는 작을수록 외란에 대해 큰 강인성을 갖게 된다.

$$\|w_1 \tilde{P}_s\|_{\infty} < \gamma, \forall \omega \quad (11)$$

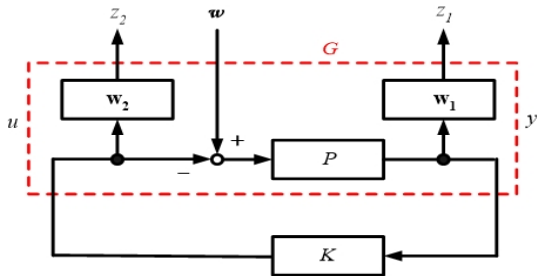
모델 불확실성 Δ_m 에 대한 강인성은 Fig. 3(b)에 소이득 정리 $\|\Delta_m T\|_\infty < 1; \forall \omega$ 를 적용한다. 여기에서, 모델링 오차 Δ_m 은 정확한 계산이 불가능하므로 Δ_m 의 최대 변동 범위와 최대 특이값 $\bar{\sigma}\{\Delta_m(j\omega)\}$ 를 고려하고, $\bar{\sigma}\{\Delta_m(j\omega)\} < |w_2(j\omega)|; \forall \omega$ 를 만족하는 가중함수 w_2 를 선정하여, 식 (12)가 만족하도록 설계한다.

$$\|w_2 T\|_\infty < 1, \quad \forall \omega \quad (12)$$

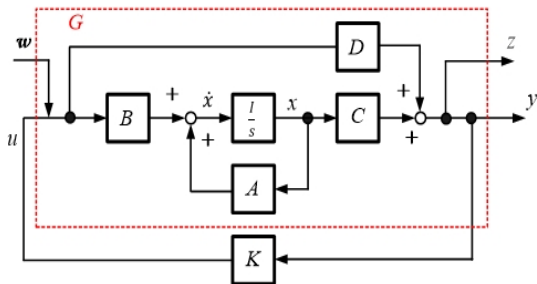
외란 d 와 모델 불확실성 Δ_m 의 강인성 조건인 식 (11)과 식 (12)는 다음 식 (13)의 혼합 감도함수로 정식화 된다. Fig. 4(a)는 혼합 감도함수를 도식화한 것이다.

$$\left\| \frac{1}{\gamma} w_1 \tilde{P}_s \right\|_\infty < 1 \quad (13)$$

식 (13)의 혼합 감도함수는 γ -반복법(γ -iteration)을 이용하여 MATLAB 함수(hinfsyn)를 통해 구할 수 있다.



(a) weighting functions



(b) generalized plant G

Fig. 4. Mixed sensitivity problem.

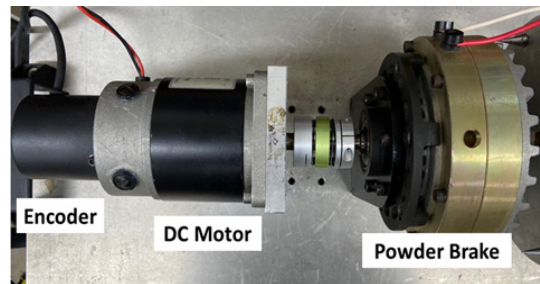
여기에서 식 (6)의 확장된 제어대상 G 는 식 (14)와 같다. Fig. 4(b)는 가중함수를 포함한 제어대상 G 와 그것의 입·출력 관계를 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ z \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ w \\ u \end{bmatrix} \quad (14)$$

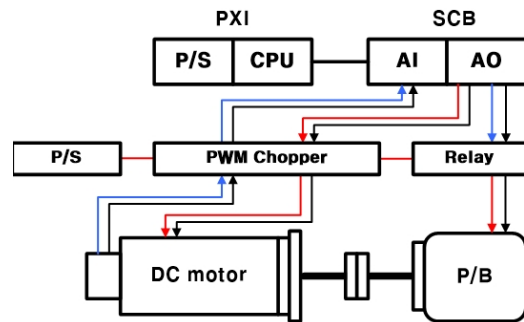
DC모터 속도 제어를 위한 H_∞ 제어기 설계

Fig. 5는 DC모터의 속도 제어 실험장치, Table 1은 사용된 DC모터의 정격 및 파라미터 값을 나타낸다.

실험장치는 크게 DC모터와 부하 인가 장치인 파우더 브레이크(powder brake), Matlab 기반의 실시간 제어장치인 PXI와 가변 전압 공급용 PWM 초퍼(chopper)의 4 부분으로 구성된다. 파우더 브레이크는 정격 토크 2.94 N·m, 정격 전류 0.68 A의 것으로 PXI의 CPU에 저장된 프로그램에 의해 정해진 시점에 AO (analog output)와 릴레이(relay)를 통해 제어된다. PWM 초퍼는 DC 75 V의 전원 전압(P/S)을 공급받아 PXI로부터 AO를 통해 지령된 제어 입력에 따라 변조된 전압을 DC모



(a) DC motor with powder brake



(b) DC motor control system

Fig. 5. DC motor and control system configuration.

Table 1. Rated values and parameters of the tested DC motor

Parameter	Symbol	Value	Unit
Rated power	P	200	W
Rated current	I_r	3.3	A
Rated voltage	V_r	75	V
Rated torque	T_r	0.637	N·m
Rated speed	ω_r	3,000	rpm
Armature resistance	R_a	1.53	Ω
Armature inductance	L_a	0.0018	H
Back EMF constant	K_e	0.216	V/rad
Torque constant	K_t	0.216	N·m/A
Inertia	J	1.76×10^{-5}	$\text{Kg}\cdot\text{m}^2$
Friction coefficient	B	2.5×10^{-4}	N·m·s/rad

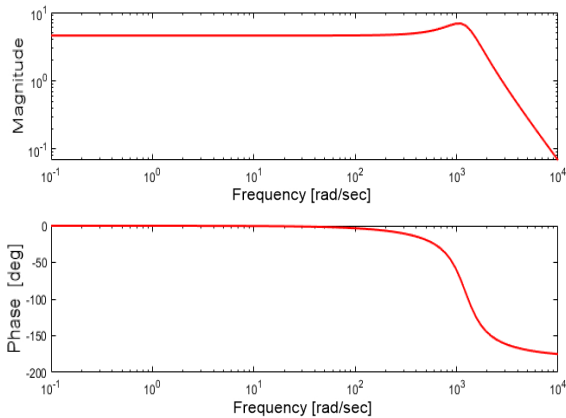


Fig. 6. Bode plot of the controlled system.

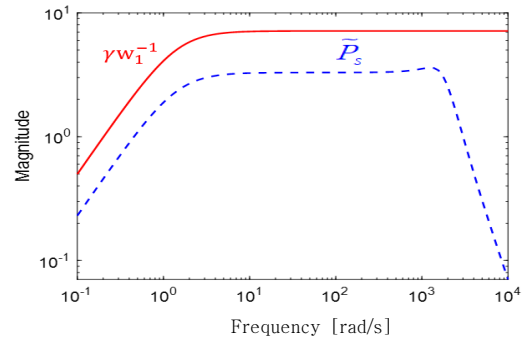
터에 공급한다. DC모터의 속도는 모터에 장착된 엔코더(encoder)를 통해 PWM 초퍼와 SCB의 AI를 거쳐 PXI에 입력된다. 실험에서 제어 주기는 10 μs 로 설정하였다.

우선 제어대상의 동특성을 파악하고, 반복 시행하여 식 (13)의 가중함수 $w_i (i = 1, 2)$ 를 식 (15)와 같이 설계한다. Fig. 6은 제어대상의 주파수 응답을 나타내는 보드선도이다. 1,000 rad/s 부근에서 공진 주파수가 발생하고 있다.

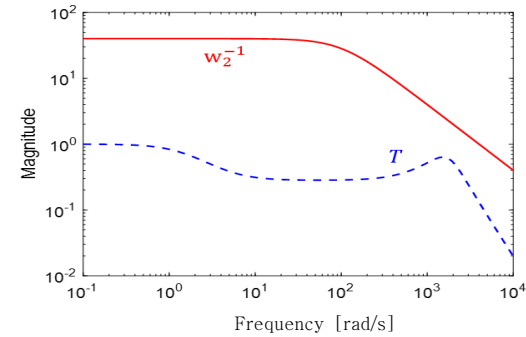
$$\begin{cases} w_1 = \frac{1000(0.7s + 1)}{5000s + 1} \\ w_2 = \frac{100(s + 100)}{s + 400000} \end{cases} \quad (15)$$

식 (15)의 가중함수를 통해 최종적으로 설계된 제어기 K 의 전달함수는 식 (16)과 같다. 이때 γ 는 1.016이다.

$$K = \frac{4905s^3 + 1.965 \times 10^9 s^2 + 1.217 \times 10^{12} s + 6.124 \times 10^{12}}{s^4 + 1.188 \times 10^4 s^3 + 7.059 \times 10^9 s^2 + 1.414 \times 10^{13} s + 4.954 \times 10^8} \quad (16)$$



(a) weighting function W_1



(b) weighting function W_2

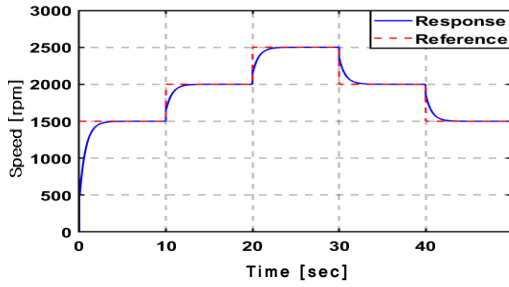
Fig. 7. Bode plot of the designed weighting functions.

그리고, 식 (13)은 감도함수에 대한 보드선도인 Fig. 7로부터 만족되고 있음을 알 수 있다.

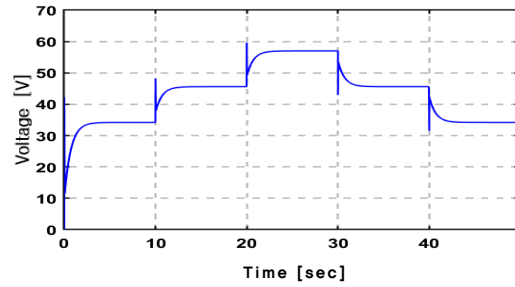
결과 및 고찰

설계한 H_∞ 제어기의 성능을 확인하기 위해 무부하 및 부하 상태에 대한 속도 제어 성능을 시뮬레이션으로 확인하였다. 무부하 시 속도 목표값은 0~2,500 rpm까지 10초 간격으로 500 rpm씩 계단형으로 상승시킨 뒤 다시 그 역순으로 하강시켰다. 부하 상태의 경우는 가혹한 조건으로 선정하여 2,500 rpm 목표값을 인가한 후, 10초 시점에 각각 정격 부하의 50%와 100% 외란을 계단 함수 형태로 인가하였다. 제어 주기는 실험과 동일한 조건인 10 μs 로 설정하였다.

Fig. 8은 설계된 H_∞ 제어기에 의한 무부하 시의 속도 응답과 제어입력의 시뮬레이션 결과이고, Fig. 9와 Fig. 10은 외란 부하를 정격부하 대비 50%와 100%씩 각각 인가한 경우의 속도 응답과 제어입력에 대한 시뮬레이

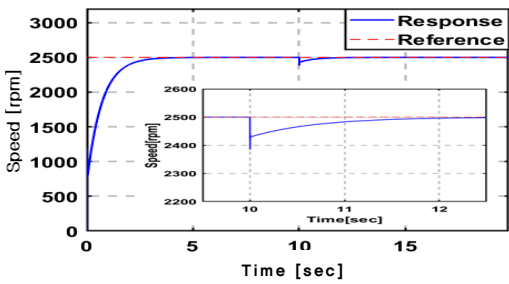


(a) speed response

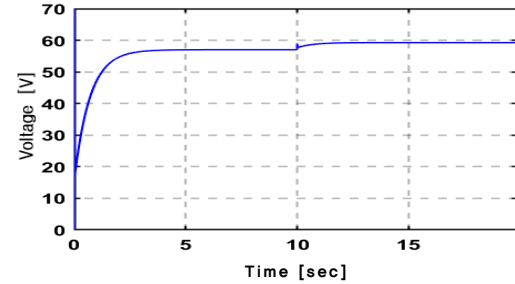


(b) control input

Fig. 8. Simulation results under no-load condition.

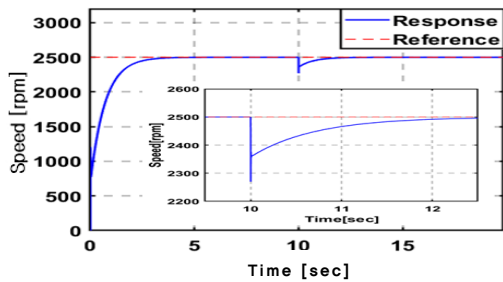


(a) speed response

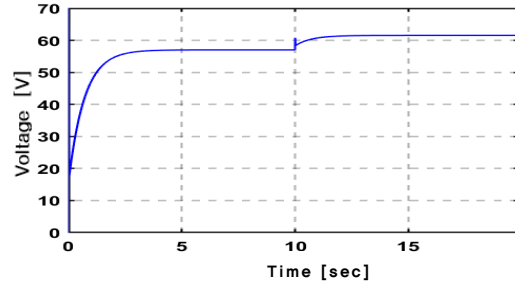


(b) control input

Fig. 9. Simulation results under 50% load condition.



(a) speed response



(b) control input

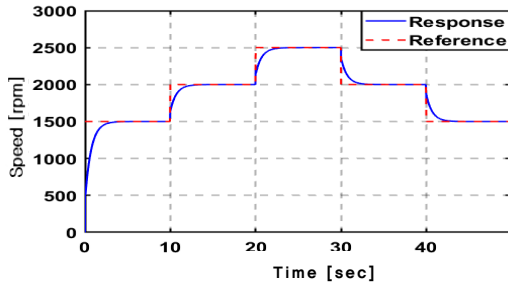
Fig. 10. Simulation results under 100% load condition.

선 결과이다. Fig. 9(a)와 Fig. 10(a)는 부하 인가 시점 이후에 발생하는 속도 오차를 정확히 확인하기 위해 부하 인가 직후의 상태를 확대한 그림을 포함시켰다. 그림에서 볼 수 있듯이 무부하 시와 부하 인가 시에도 정상상태오차 없이 정확하게 속도 목표값에 추종하는 결과를 보여준다. 다만, 50%와 100% 스텝 부하 인가 시에는 언더슈트가 각각 4.6%, 9.2% 발생하였다.

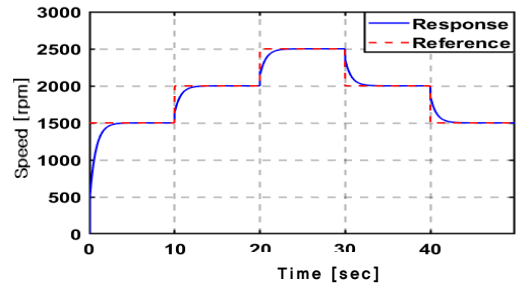
Fig. 11은 모터의 파라미터 R 과 L 을 실제값보다 80%, 100%씩 동시에 증가시킨 경우의 시뮬레이션 결과

이다. 두 경우 모두 정상상태오차 없이 정확히 속도 목표값을 추종함을 보여준다. 그리고, 외란을 80%와 100% 인가한 상태에서 R 과 L 을 공칭값의 80%, 100% 동시에 증가시킨 경우의 시뮬레이션 결과에서도 동일하게 안정적인 제어 상태를 확인하였다. 따라서 본 논문에서 설계한 H_{∞} 제어기는 외란과 파라미터 변동에 강인한 제어 성능을 갖고 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 12는 본 논문에서 제안한 H_{∞} 제어기의 유효성을 검증하기 위해 일반적으로 사용되고 있는 PI 제어기의 시

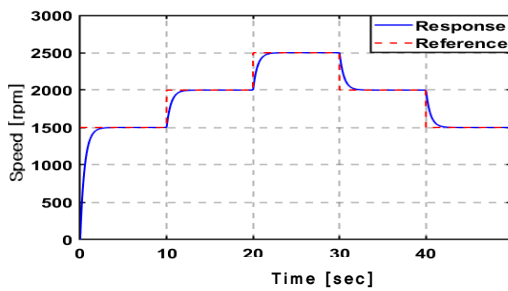


(a) 80% variation of R and L

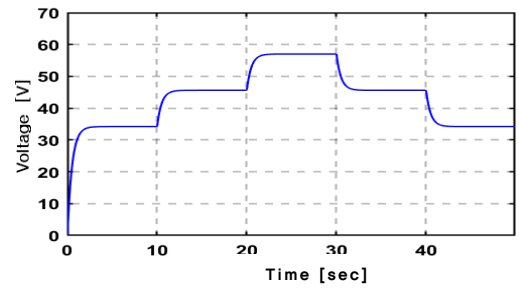


(b) 100% variation of R and L

Fig. 11. Simulation results under parameter variation.

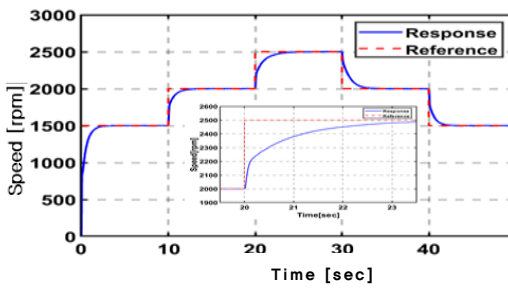


(a) speed response

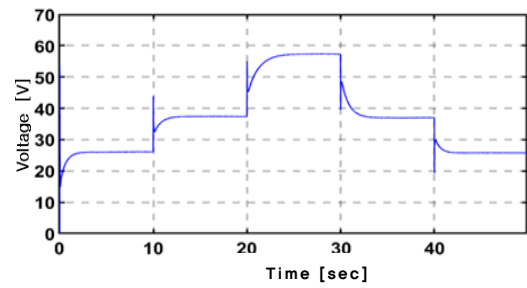


(b) control input

Fig. 12. Simulation results of PI controller.

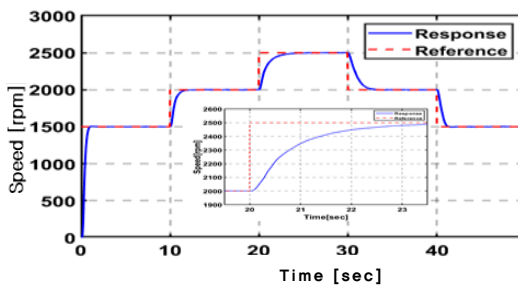


(a) speed response

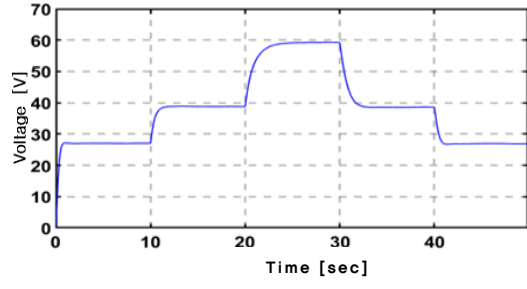


(b) control input

Fig. 13. Experimental results of H_∞ controller.

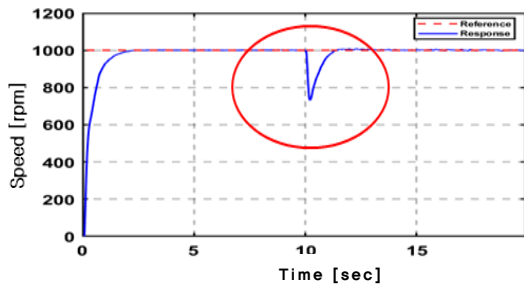


(a) speed response

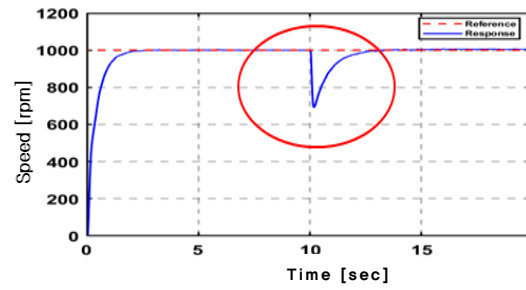


(b) control input

Fig. 14. Experimental results of PI controller.

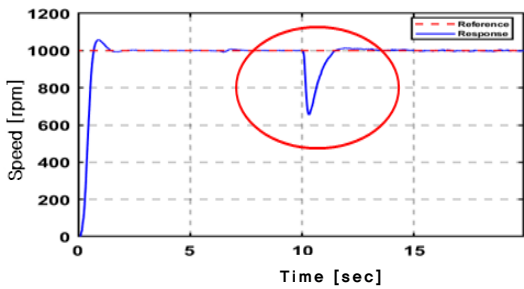


(a) 50% load

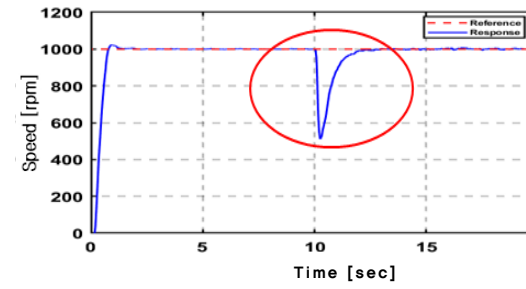


(b) 100% load

Fig. 15. Experimental results for H_∞ controller under stepwise load torque.

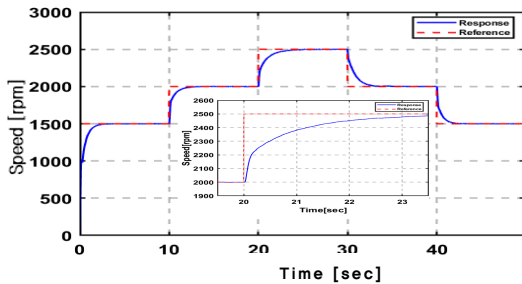


(a) 50% load

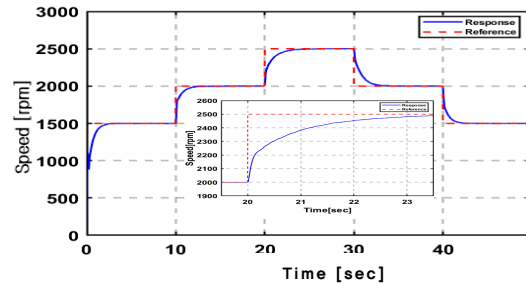


(b) 100% load

Fig. 16. Experimental results for PI controller under stepwise load torque.



(a) 80% variation of R and L



(b) 100% variation of R and L

Fig. 17. Experimental results for H_∞ controller under parameter variation.

물레이션 결과이다. PI 제어기의 이득은 무부하 시, H_∞ 제어기와 동일한 과도 및 정상 특성을 갖도록 MATLAB 튜너를 이용해 비례 및 적분 이득을 4.96×10^{-4} , 0.429로 각각 설정하여 시뮬레이션 하였다.

Fig. 13과 Fig. 14는 무부하 시의 H_∞ 제어기 및 PI 제어기에 대한 실제 실험 결과이다. Fig. 13(a)와 Fig. 14(a)에는 2,000~2,500 rpm의 속도 응답을 정확하게 확인할 수 있는 그림을 삽입하였다.

실험 결과 두 제어기에 의한 속도 응답은 모두 정상상

태오차 없이 목표값에 정확히 추종하였으며, 과도 성능도 거의 일치함을 보여준다. 이를 통해 강인 성능 비교 대상으로 설계한 PI 제어기는 적절하게 설계되었음을 알 수 있다. 두 제어기에 의한 강인 성능은 외란 인가 시와 모터 파라미터 변동 시의 속도 응답 성능을 정량적으로 분석함으로써 비교하였다.

Fig. 15와 Fig. 16은 1,000 rpm에서 10초 시점에 스텝상의 외란 토크를 인가한 경우의 H_∞ 제어기와 PI 제어기의 성능 실험 결과를 각각 나타낸다. H_∞ 제어기는

50% 외란의 경우에는 언더슈트가 약 26.9%, 100% 외란의 경우에는 약 31% 발생하였지만 정상상태오차 없이 정확히 속도 목표값에 추종하는 특성을 보였다. PI 제어기 역시 정상상태오차가 없었지만 50% 외란의 경우에는 언더슈트가 약 34.5%, 100% 외란의 경우에는 약 48.8% 발생하였다. 결과적으로 H_∞ 제어기가 PI 제어기보다 외란 토크에 더 강인한 제어 성능을 보였다.

Fig. 17은 모터 파라미터인 R 과 L 이 실제값의 80%, 100%씩 동시에 증가시킨 경우의 H_∞ 제어기의 속도 제어 성능 실험 결과로 속도 응답이 정상상태오차 없이 정확히 속도 목표값에 추종하는 특성을 보였다.

이 결과들을 통해 설계한 H_∞ 제어기는 외란이나 모터 파라미터 변동에 의한 모델 불확실성 상태에서도 정상상태오차없이 정확히 속도 목표값을 추종함으로써 제어의 강인성이 확인되었다.

결론

본 논문에서는 부하 외란 및 모터 파라미터 변동을 포함한 모델 불확실성을 갖는 DC모터의 강인한 속도 제어를 위해 H_∞ 제어기를 설계하였다. 제안한 H_∞ 제어기의 유효성을 시뮬레이션과 실제 실험을 통해 확인하였다. 또한, 강인 제어 성능 비교를 위해 널리 사용되고 있는 PI 제어기를 설계한 후, H_∞ 제어기와 동일한 조건으로 실험을 수행하였고, 그 결과 본 논문에서 제안한 H_∞ 제어기의 유효성이 검증되었다. 본 연구의 주요 결과들을 요약하면 다음과 같다.

(1) 제안한 H_∞ 제어기는 외란인 부하 토크를 정격 부하의 50%, 100% 인가한 상황에서도 정상상태오차 없이 정확히 속도 목표값을 추종하였다.

(2) 제안한 H_∞ 제어기는 모터의 파라미터 R 과 L 이 실제값의 80%, 100%씩 동시에 변동하는 경우에도 정상상태오차 없이 정확히 속도 목표값을 추종하였다.

(3) 제안한 H_∞ 제어기는 1,000 rpm 속도에서 스텝상의 외란 50%, 100% 인가 실험을 한 결과, 과도 특성인 속도 응답의 언더슈트가 약 26.9%와 31% 각각 발생하였다. 이는 비교 대상인 PI 제어기의 약 34.5%와 48.8%에 비해 7.6%와 17.8%가 각각 더 개선된 것으로 나타나 H_∞ 제어기의 강인성이 확인되었다.

(4) 외란 인가 시 속응성 면에서는 PI 제어기가 미소하게 우수한 것으로 나타났으며, H_∞ 제어기의 속응성을 개

선하기 위해서는 제어 주기를 빠르게 설정할 수 있는 고성능 마이크로프로세서의 사용이 필요할 것으로 생각된다.

(5) 본 논문에서 설계한 H_∞ 제어기는 향후 대표적인 SMC 제어기와 μ -합성 제어기의 성능 비교 후속 연구를 통해 DC모터의 강인한 속도 제어에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사사

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2021년)에 의하여 연구되었음.

References

- Ahmed AHO. 2012. Performance comparison of sliding mode control and conventional PI controller for speed control of separately excited direct current motors. *Journal of Science and Technology*, 13, 74-80.
- Damiano A, Gatto GL, Marongiu I and Pisano A. 2004. Second-order sliding-mode control of DC drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 51, 364-373. <https://doi.org/10.1109/tie.2004.825268>.
- Doyle JC, Glover K, Khargonekar PP and Francis BA. 1988. State-space solutions to standard H2 and H ∞ control problems. *American Control Conference*, 1691-1696.
- Dursun EH and Durdu A. 2016. Speed control of a DC motor with variable load using sliding mode control. *International Journal of Computer and Electrical Engineering* 8, 219-226. <https://doi.org/10.17706/ijcee.2016.8.3.219-226>.
- Glover K and McFarlane D. 1992. A loop shaping design procedure using H ∞ -synthesis. *IEEE Transactions on Automatic control* 37, 759-769. <https://doi.org/10.1109/9.256330>.
- Han CH, Jeong TY, Jung YM and Jeong SK. 2017. Robust speed controller design for DC motors based on sliding mode control. *Conference of Korean Society for Power System Engineering*, 148-149.
- Han CH and Jeong SK. 2018. Comparison of robustness of sliding mode and PI control in DC motor speed control system with periodic loads. *Journal of the Korean Society for Power System Engineering* 22, 23-31. <https://doi.org/10.9726/kpspe.2018.22.3.023>.
- Hanifi G. 2003. Sliding mode speed control for DC drive systems. *Mathematical and Computational Applications*

- 8, 377-384. <https://doi.org/10.3390/mca8030377>.
- Hwang SK, Lee YC, Kim CH and Jung BG. 2011. Design of robust speed controllers for marine diesel engine. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 35, 820-828. <https://doi.org/10.5916/kosme.2011.35.6.820>.
- Jeong TY. 2019. Robust speed control for DC motor based on sliding mode with a disturbance observer. *J Korean Soc Fish Ocean Technol* 55, 402-410. <https://doi.org/10.3796/KSFOT.2019.55.4.402>.
- Kim SH. 2010. Electric motor control: DC, AC, and BLDC motors. Bogdoo, 54-111.
- Liu J and Wang X. 2011. Advanced sliding mode control for mechanical systems. Springer, 81-96. https://doi.org/10.1007/978-3-642-20907-9_3.
- Maheswararao CU, Kishore Babu YS and Amaresh K. 2011. Sliding mode speed control of a DC motor. *Communication Systems and Network Technologies (CSNT), International Conference on IEEE*, 387-391. <https://doi.org/10.1109/csnt.2011.86>.
- Nazanin A and Yazdi MH. 2013. Sliding mode controller for DC motor speed control. *Global Journal of Science Engineering and Technology*, 11, 45-50.
- Vadim U, Guldner J and Shi J. 2009. Sliding mode control in electro-mechanical systems. CRC press, 224-237.
- Venkatesh T, Tarun kumar M, Jayanthi B, Ramesh B and Chaitanya P. 2016. Speed control of DC motor and performance is compared with PID and SMC controller. *International Journal of Engineering Science and Computing* 6, 4071-4075. <https://doi.org/10.4010/2016.934>.
- Zhou K and Doyle JC. 1998. *Essentials of robust control*. Prentice hall, 50-63.
-
2022. 06. 03 Received
2022. 07. 22 Revised
2022. 08. 12 Accepted