



## 주기성 부하를 갖는 DC모터 속도제어 시스템의 SMC와 PI제어의 강인성 비교

# Comparison of Robustness of Sliding Mode and PI Control in DC Motor Speed Control System with Periodic Loads

한창호\* · 정석권\*\*†

Chang-Ho Han\* and Seok-Kwon Jeong\*\*†

(Received December 18 2017, Revision received 21 February 2018, Accepted 27 February 2018)

**Abstract:** This paper deals with the sliding mode control (SMC) design and its robustness against periodic loads and parameter variation for a DC motor speed control system in the cam-index devices. Design process of the sliding mode for the DC motor speed control system is clarified in detail. Particularly, in order to reveal robust control performance of the SMC clearly, a PI current controller is designed in addition to the conventional PI speed controller using the frequency response method. The robust control performance of the SMC is evaluated by comparing the simulation results of the PI controller. The simulation results showed that the SMC had more robust performance than the PI control, especially in the case of imposing periodic loads and parameter variation.

**Key Words :** Sliding Mode Control(SMC), PI control, DC Motor System, Speed Control, Robustness

### 1. 서 론

공장자동화시스템에서 연속 회전운동을 간헐운동으로 변환하는 캠-인덱스(cam-index) 장치나 공작기계용 오일쿨러는 주기성 외란 부하에 대한 제어계의 강인성이 특히 요구된다. 뿐만 아니라 이들 장치는 모델의 파라미터 불확실성이 커 기존의 PID 제어로는 강인한 제어 성능을 얻기가 어렵다.<sup>1-3)</sup> 슬라이딩모드 제어(SMC; Sliding Mode Control)는 외란과 파라미터 불확실성에 강인한 제어 성능을 갖는 것으로 보고되고 있으며 다양한 분야에 적용되고 있다. 특히, AC모터나 DC모터

제어용 전력변환장치로 인버터(inverter)나 초퍼(chopper)를 사용하면서 그 사용 범위가 점차 확대되고 있다.

SMC의 강인한 제어 성능을 확인하기 위해 DC 모터시스템의 속도제어계에 SMC와 PI제어를 적용하여 두 제어법의 제어 성능을 비교, 분석한 논문들이 일부 발표되었다.<sup>3-8)</sup> 하지만 그 대부분은 PI계인 설계 과정을 명확하게 밝히지 않았거나, 개인 설계의 복잡성을 피하기 위해 전류제어기를 배제하고 속도제어기만을 적용한 결과여서 두 제어기 간의 엄밀한 성능 평가로 보기는 힘들다. 무엇보다도 단순한 계단(step)형 부하만을 고려하였

\*\*† 정석권(교신저자) : 부경대학교 냉동공조공학과

E-mail : skjeong@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6181

\*한창호 : 부경대학교 대학원 냉동공조공학과

\*\*† Seok-Kwon Jeong(corresponding author) : Department of Refrigeration and Air-conditioning Engineering, Pukyong National University.

\*Chang-Ho Han : Graduate School of Refrigeration and Air Conditioning Engineering, Pukyong National University.

으므로 복잡한 주기성 부하가 인가될 경우의 제어 성능을 비교한 자료는 부족한 실정이다.

따라서 본 논문은 주기성 부하와 모델의 파라미터 불확실성 하에서도 강인한 제어 성능을 갖는 SMC를 캠-인덱스 장치 구동용 DC모터시스템의 속도제어계에 적용한다. 동일한 속도제어계를 대상으로 PI제어기를 설계하고 시뮬레이션을 통해 제어기의 강인성을 비교한다. 특히 본 연구에서는 SMC와 PI제어기의 엄밀한 제어 성능 비교를 위해 PI제어기의 경우, 속도제어기(ASR; Automatic Speed Regulator)뿐만 아니라 전류제어기(ACR; Automatic Current Regulator)를 주파수응답법(FRM; Frequency Response Method)으로 설계하였다. 이렇게 설계된 PI 및 SMC 두 제어기에 계단형 부하를 인가한 시뮬레이션을 통해 두 제어기의 계인 설계가 타당함을 밝힌다. 마지막으로 SMC와 PI제어기에 주기성 부하를 인가한 경우 및 모델의 파라미터가 변동한 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 비교함으로써 SMC의 강인한 제어 성능을 검토한다.

## 2. SMC 및 PI로직 기반의 DC모터시스템 속도제어계 설계

### 2.1 SMC 기반 DC모터 속도제어계 설계

SMC는 모델의 불확실성, 파라미터의 변동과 외란에 강인한 제어(robust control) 기법 중 하나이다. Fig. 1은 SMC의 개념도이다. SMC 설계는 주목하고 있는 상태변수를 설계자가 설계한 슬라이딩 평면(sliding surface) 상에 머물도록 슬라이딩 평면의 기울기와 제어입력  $u(t)$ 를 설계하는 것이 핵심 내용이다.

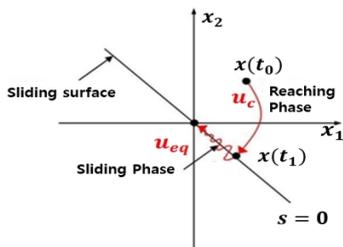


Fig. 1 Phase plane of sliding mode control

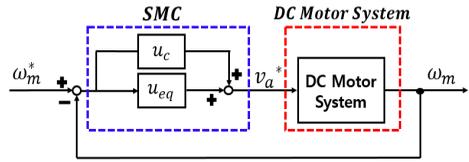


Fig. 2 Block diagram of DC motor speed control based on the SMC

Fig. 2는 SMC에 기반한 DC모터 속도제어계의 개략적인 블록선도이다.

SMC의 설계 방법은 크게 5단계로 구분된다. 첫째, 제어대상의 상태공간모델(state space model)을 구축한다. 둘째, 원하는 응답을 갖도록 슬라이딩 평면을 설계한다. 셋째, 제어입력  $u(t)$ 를 설계하고, 넷째, 도달조건(reaching condition)을 확인한다. 이때, 도달조건을 만족한다면 안정성도 만족된다.<sup>9)</sup> 안정성 평가는 Lyapunov의 second method가 적용된다. 마지막 단계에서는 채터링(chattering) 현상을 억제하기 위한 방법을 적용하고, 시뮬레이션을 통해 제어 성능을 검증한다.

Fig. 3은 DC모터 모델의 등가 회로도이다. DC모터의 전기계 동특성은 식 (1), 기계계의 동특성은 식 (2)와 같이 유도된다.

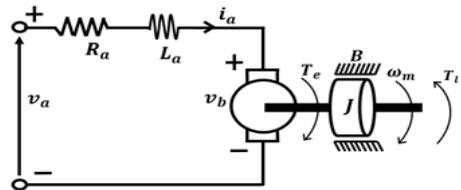


Fig. 3 Equivalent circuit of a DC motor

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

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

여기서 상수인  $L_a, R_a$ 는 전기자의 인덕턴스 및 저항,  $B, J$ 는 베어링 마찰계수와 관성모멘트를 각각 나타낸다. 출력변수인  $i_a(t), \omega_m(t)$ 는 전기자전

류와 모터의 회전속도, 입력변수인  $v_a(t), v_b(t)$ 는 전기자전압과 역기전력으로서  $v_b(t) = K_e \omega_m(t)$ 이다. 이때  $K_e$ 는 역기전력상수이다. 그리고  $T_e(t), T_l(t)$ 는 모터의 전자기적토크와 외란토크로서  $T_e(t) = K_t i_a(t)$ 이고  $K_t$ 는 토크상수이다.

전기자전압제어를 가정하여  $u(t) = v_a(t)$ 로 두고 식 (1)과 식 (2)를  $\ddot{\omega}_m(t)$ 에 대하여 정리하면 식 (3)과 같이 된다. 이때, 외란 부하  $T_l$ 은  $T_l = 0$ 으로 둔다. 또한 이하에서는 시간함수들을 편의상 독립변수  $t$ 를 생략하여  $u(t)$ 를  $u$ 와 같이 기술한다.

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

식 (3)에서 상태변수  $x_1$ 과  $x_2$ 를  $x_1 = \omega_m, x_2 = \dot{x}_1$ 으로 정의하고, 상태방정식을 유도하면 식 (4)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\left(\frac{R_a B + K_e K_t}{J L_a}\right) & -\left(\frac{R_a}{L_a} + \frac{B}{J}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_t}{J L_a} \end{bmatrix} u \quad (4)$$

속도서보계의 SMC를 설계하기 위해 속도 제어편차  $e$ 를 식 (5)와 같이 정의한 후, 식 (4)가 2차계이므로 슬라이딩 라인을 식 (6)과 같이 설계한다.

$$e = x_1 - x_d \quad (5)$$

$$s = c e + \dot{e} \quad (6)$$

여기서  $x_1$ 은 모터의 현재 회전속도,  $x_d$ 는 회전속도 지령값,  $c$ 는 Hurwitz의 안정조건을 만족시키는 값으로  $c > 0$ 이다. 이  $c$ 값이 클수록 지령값에 대한 추종속도가 빨라지지만<sup>10)</sup> 동시에 제어입력의 증가를 초래하므로 최대 허용 전류값을 넘지 않도록 설계한다.

일반적으로 SMC의 제어입력  $u$ 는 도달법칙(reaching law)인 식 (7)로부터 유도할 수 있다.<sup>11)</sup>

$$\dot{s} = -M \operatorname{sgn}(s), \quad M > 0 \quad (7)$$

여기서 부호함수(signum function)인  $\operatorname{sgn}(s)$ 는 식 (8)과 같이 정의되고, 식 (7)에 식 (4) ~ 식 (6)을 대입하여  $u$ 에 대해 풀면 제어입력  $u$ 는 식 (9)와 같이 유도된다.

$$\operatorname{sgn}(s) = \begin{cases} \frac{|s|}{s} \text{ or } \frac{s}{|s|}, & s \neq 0 \\ 0, & s = 0 \end{cases} = \begin{cases} -1, & s < 0 \\ 0, & s = 0 \\ 1, & s > 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$u = \frac{J L_a}{K_t} \left\{ \left( \frac{R_a}{L_a} + \frac{B}{J} - c \right) x_2 + \frac{R_a B + K_e K_t}{J L_a} x_1 + \ddot{x}_d + \dot{c} x_d \right\} - \frac{J L_a}{K_t} M \operatorname{sgn}(s) \quad (9)$$

식 (9)에서 우변 제1항은  $s = 0, \dot{s} = 0$ 을 만족하고, 슬라이딩 모션을 유지시키기 위한 등가제어입력  $u_{eq}$ 에 해당한다. 제2항은 식 (7)의 우변항과 같이 스위칭을 통해 특정 상태변수를 슬라이딩 라인 위에 도달시키는 가변제어 입력  $u_c$ 에 해당한다. 이때, 식 (9)의 제2항의 계수  $J L_a M / K_t$ 은 식 (7)에서  $M > 0$ 인 큰 값이므로 일반적으로 큰 양수  $K$ 로 설계한다. 본 논문에서는 이  $K$ 를 모터의 정격전압으로 설정하였다.

설계된 SMC의 안정성은 Lyapunov의 제2방법인  $V > 0, \dot{V} < 0$ 을 사용하여 확인 가능하다. 양의 한정(positive definite)함수인  $V$ 를  $V = s^2/2$ 으로 정의하고, 그 미분인  $\dot{V}$ , 즉  $s\dot{s}$ 이  $s\dot{s} < 0$ 을 만족하면 시스템은 점근적안정(asymptotically stable)하게 된다.  $s$ 의 범위와 식 (7)에서 정의된  $\dot{s}$ 을 통해 점근안정조건을 확인해 보면, 항상  $s\dot{s} < 0$ 이 만족된다.

SMC의 단점은 식 (9)의 불연속항 제어입력  $u_c$ 로 인한 제어량의 채터링 발생 문제다. 이 문제를 해결하기 위해 실제 시뮬레이션에서는 부호함수 ‘sgn’ 대신 포화함수(saturation function) ‘sat’를 사용한다.

## 2.2 PI 로직 기반 DC모터 속도제어계 설계

SMC의 외란 및 파라미터 불확실성에 대한 제어 강인성을 비교하기 위해 동일 제어대상에 대해 PI제어기를 설계한다.

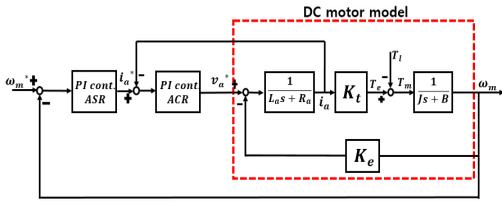


Fig. 4 Block diagram of DC motor speed control based on a PI controller

Fig. 4는 PI제어기 기반의 DC모터 속도제어계를 나타낸 블록선도이다. DC모터의 엄밀한 속도제어를 위해서는 속도제어기와 더불어 전류제어기가 필수적이다. 따라서 PI제어기의 경우에 네개의 제어기 계인을 설계해야만 한다. 본 논문에서는 이 제어기의 계인들을 주파수응답법으로 설계한다.<sup>12)</sup>

우선 전류제어기의 비례계인  $K_{pc}$ , 적분계인  $K_{ic}$ 는 식 (10)의 전류제어기 차단주파수  $\omega_{cc}$ 를 이용하여 식 (11)과 같이 설계한다. 적분기의 누적오차로 인한 적분 포화를 방지하기 위해 안티와인드업(anti-windup)계인  $K_{ac}$ 는 비례계인을 이용하여  $K_{ac} = 1/K_{pc}$ 로 설계한다.<sup>12)</sup>

$$\omega_{cc} = \frac{1}{20} f_{sw} \quad (10)$$

여기서  $f_{sw}$ 는 전력변환장치의 스위칭 주파수로서, 제어주기가  $T_s$ 일 경우  $f_{sw} = 1/T_s$ 로 주어진다.

$$\begin{cases} K_{pc} = L_a \omega_{cc} \\ K_{ic} = R_a \omega_{cc} \end{cases} \quad (11)$$

속도제어기의 PI계인  $K_{ps}$ ,  $K_{is}$ 는 속도제어계의 차단주파수  $\omega_{cs}$ 를 이용하여 식 (12)와 같이 설계하고, 안티와인드업 계인  $K_{as}$ 는 전류제어기와 마찬가지로  $K_{as} = 1/K_{ps}$ 로 설계한다.<sup>12)</sup>

$$\begin{cases} K_{ps} = J \omega_{cs} / K_t \\ K_{is} = J \omega_{cs}^2 / 5 K_t \end{cases} \quad (12)$$

### 3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

Table 1은 본 연구에서 사용한 실제 DC모터의 파라미터이다. 모터의 정격전력  $P_r$ 은 200 W, 정격전압  $V_r$ 은 75 V, 정격전류  $I_r$ 은 3.3 A이고, 정격토크  $T_r$ 은 0.637 N·m이다. 모터의 최대 허용전류는 16 A이다.

Table 2는 시뮬레이션에서 사용된 SMC의 설계인자와 PI계인을 나타내며, SMC의 설계인자  $\phi$ 는 포화함수의 경계층 두께(boundary layer thickness)를 의미하며 200으로 정하였다. 제어주기는 스위칭소자인 MOSFET을 고려하여 100 kHz로 선정하였다.

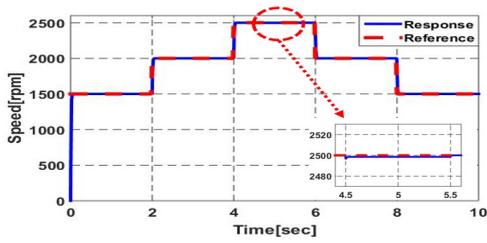
시뮬레이션에서는 먼저 계단형 부하를 인가하여 설계한 각 계인들의 타당성을 검토하였다. 캠인덱스 장치에 가장 많이 사용되는 주기성 부하로 진폭이 0.51 N·m, 주파수가 5 Hz와 10 Hz인 정현파함수를 인가하여 외란에 대한 강인성을 검토하였다. 파라미터 변동을 고려한 시뮬레이션은  $R_a$ 값을 공칭값의 2배로 설정하고, 위에 언급한 주기성 부하를 인가하였다. 속도지령은 1,500, 2,000, 2,500 rpm으로 각각 계단형으로 증·감시켰다.

Table 1 Parameters of a DC motor

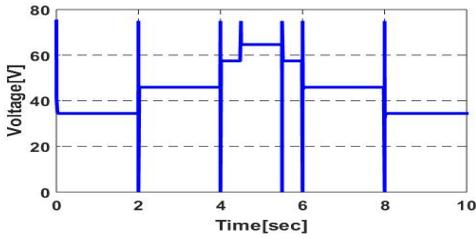
Parameter	Symbol	Value	Unit
Rated speed	$\omega_r$	3,000	rpm
Armature resistance	$R_a$	1.53	$\Omega$
Armature inductance	$L_a$	0.0018	H
E.M.F constant	$K_e$	0.216	V/rad
Torque constant	$K_t$	0.216	N·m/A
Inertia	$J$	$1.76 \times 10^{-5}$	$\text{Kg} \cdot \text{m}^2$
Friction coefficient	$B$	$2.5 \times 10^{-4}$	$\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s/rad}$

Table 2 Design factors and controller gains in simulations

Design factor	SMC	PI controller				
		Controller	Gain			
$c$	$K$	$\phi$	$K_p$	$K_i$	$K_a$	
			Current	8.8	7,500	0.1136
125	75	200	Speed	0.815	163	3.69

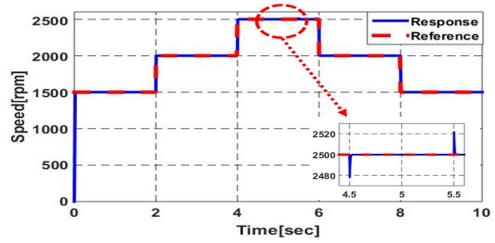


(a) Speed response

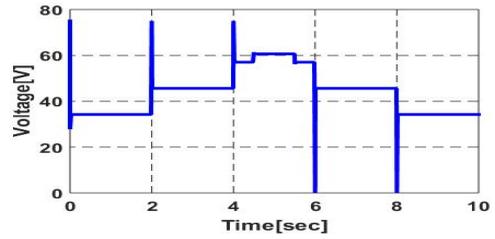


(b) Voltage reference

Fig. 5 Results of SMC under step load

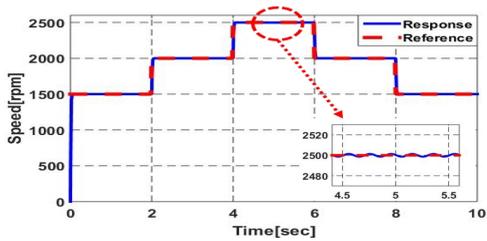


(a) Speed response

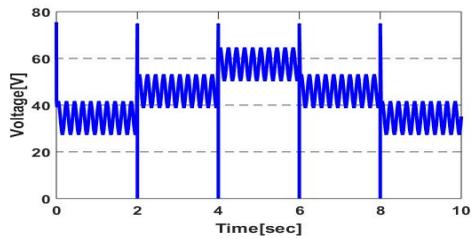


(b) Voltage reference

Fig. 6 Results of PI control under step load

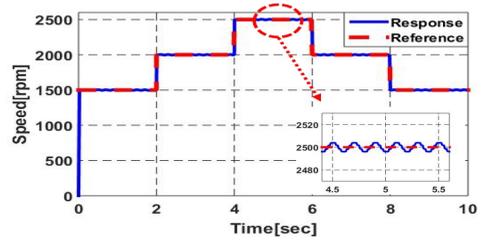


(a) Speed response

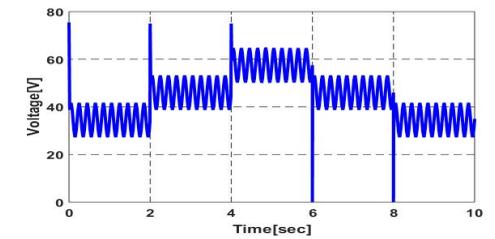


(b) Voltage reference

Fig. 7 Results of SMC under periodic load with 5 Hz



(a) Speed response



(b) Voltage reference

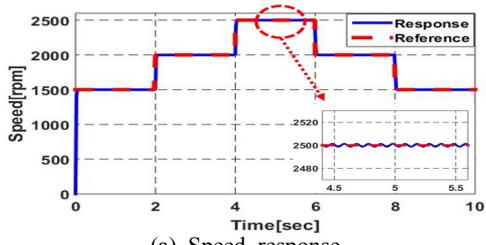
Fig. 8 Results of PI control under periodic load with 5 Hz

Fig. 5와 Fig. 6은 SMC와 PI제어기로 설계한 각 계인들의 타당성을 확인하고자 구간 4.5~5.5 sec에 크기 0.51 N·m의 계단형 부하를 인가한 경우의 시뮬레이션 결과이다. 속도응답은 전 속도 영역에서 지령값을 잘 추종하고 있음을 보였다. 외란 부하의 영향으로는 Fig. 5의 SMC의 경우, 부하가 인가된 구간에서 0.7 rpm의 정상상태오차와 미소한 오버슈트(0.14%) 및 언더슈트(0.01%)가 발생하였다.

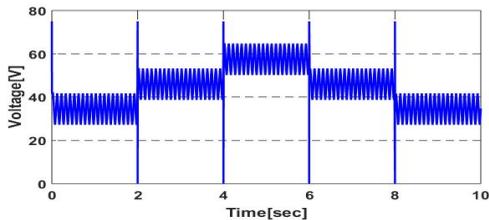
Fig. 6의 PI제어기는 계단형 외란이 인가된 경우에도 정상상태오차는 발생하지 않은 반면, 미소한 오버슈트(0.9%)만 발생하였다. 이 결과들로부터 SMC와 PI제어에서 발생한 정상상태오차와 오버슈트는 그 값이 무시될 수 있을 정도로 미미하므로 설계된 두 제어기의 계인값이 타당함을 알 수 있다.

Fig. 7과 Fig. 8은 SMC와 PI제어를 적용한 DC

주기성 부하를 갖는 DC모터 속도제어 시스템의 SMC와 PI제어의 강인성 비교

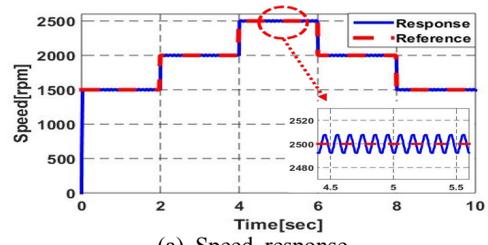


(a) Speed response

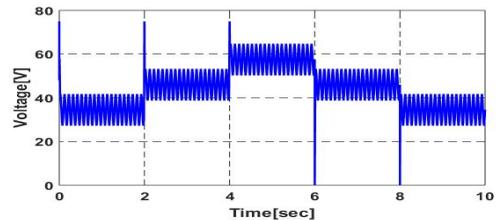


(b) Voltage reference

Fig. 9 Results of SMC under periodic load with 10 Hz



(a) Speed response



(b) Voltage reference

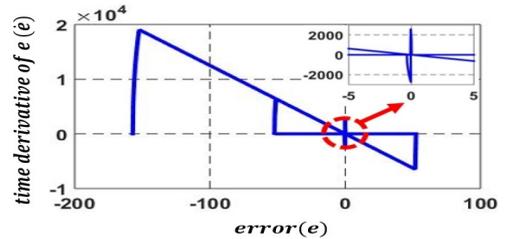
Fig. 10 Results of PI control under periodic load with 10 Hz

모터 속도제어계에 주기성 부하를 인가했을 때의 속도응답과 전압지령을 각각 나타낸다. 주기성 부하는 크기가  $0.51 \text{ N}\cdot\text{m}$ , 주파수가  $5 \text{ Hz}$ 인 정현파를 인가하였다. Fig. 7의 SMC 응답에서는 속도의 정상상태오차는 최대  $\pm 0.7 \text{ rpm}$ 이 발생하였고, 오버슈트는 발생하지 않았다. Fig. 8은 PI제어를 적용한 경우의 속도응답으로 속도의 정상상태오차는 최대  $\pm 4 \text{ rpm}$ 으로 SMC를 적용한 경우보다 약 6배 큰 오차가 발생하였다. 오버슈트와 언더슈트의 경우는 허용오차 범위 이내였으며, SMC와 비교하였을 때 유의할만한 성능 차이를 보이지 않았다.

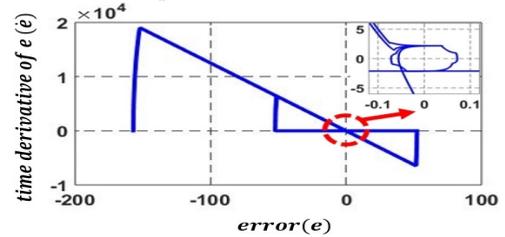
Fig. 9와 Fig. 10은 SMC와 PI제어를 적용한 DC모터 속도제어계에 크기는 Fig. 7 및 Fig. 8과 동일하고, 주파수만을  $10 \text{ Hz}$ 로 변경한 주기성 부하를 인가하였을 때의 속도응답과 전압지령을 각각 보여준다. Fig. 9의 SMC의 경우, 정상상태오차는 최대  $\pm 0.7 \text{ rpm}$ 이 발생하였고, 오버슈트와 언더슈트는 발생하지 않았다. Fig. 10의 PI제어에서도 오버슈트와 언더슈트는 발생하지 않았지만 정상상태오차는 최대  $\pm 8 \text{ rpm}$ 으로 PI제어를 적용한 경우가 SMC를 적용한 경우보다 약 11배 큰 오차가 발생하였다.

Fig. 11은 SMC가 적용된 Fig. 5, Fig. 7, Fig. 9의 위상평면(phase plane)을 나타낸다. 이때, 슬라이딩

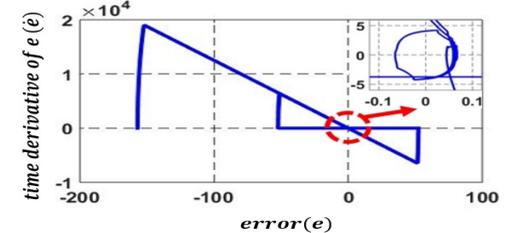
라인의 기울기는 식 (6)의 기울기인  $-125$ 를 가진다.



(a) Step disturbance ( $0.51 \text{ N}\cdot\text{m}$ )



(b) Periodic disturbance ( $5 \text{ Hz}, 0.51 \text{ N}\cdot\text{m}$ )



(c) Periodic disturbance ( $10 \text{ Hz}, 0.51 \text{ N}\cdot\text{m}$ )

Fig. 11 Phase planes of SMC with various disturbances

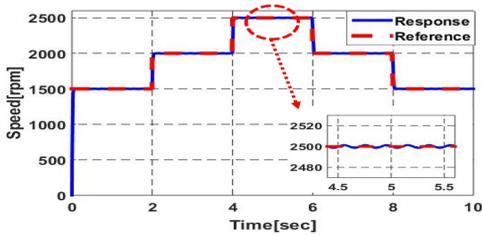
Fig. 11(a)는 Fig. 5의 위상평면으로서 계단형 부하가 인가되었을 때 정상상태를 나타내는 원점에서 제어편차가 발생한 후 원점으로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 다음으로 Fig. 11(b)는 Fig. 7의 위상평면으로서 주기성 부하(5 Hz, 0.51 N·m)를 인가하였을 때 제어편차가 원점으로 수렴하지 않고, 원점 부근에서 일정 크기의 타원을 그리는 것을 볼 수 있는데 이는 정상상태오차가 발생함을 의미한다. Fig. 11(c)는 Fig. 9의 위상평면으로 제어편차가 원점으로 수렴하지 않으므로 이 또한 주기성 부하(10 Hz, 0.51 N·m) 인가시에 정상상태오차가 발생함을 알 수 있다. Fig. 11(b)와 Fig. 11(c)의 확대된 그래프를 보면 주기성 부하의 주파수 크기에 따라  $\dot{e}$ 의 크기는 변하지만, 제어편차  $e$ 의 크기는 동일하다. 이는 SMC가 주기성 부하의 주파수 변화에 강인함을 의미한다.

Fig. 12와 Fig. 13은 DC모터 속도제어계에 주기성 부하 인가와 더불어 DC모터의 파라미터가 변동될 경우, SMC와 PI제어기의 속도응답을 각각 보여준다. 이때, 파라미터는 모터의 전기자저항  $R_e$ 의 공칭값을 강제로 2배 증가시켰다. SMC의 경우 파라미터 변동에도 속도응답은 지령값을 잘

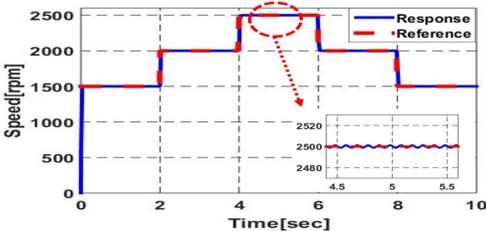
추종함으로써 제어기의 강인성을 유지했다. 반면에 PI제어기의 경우, 정상상태오차는 Fig. 8과 Fig. 10의 결과와 유사하지만 최대오버슈트가 약 1% 발생하였다. 이를 통해 SMC는 파라미터 변동시에도 강인한 제어 성능을 보임을 확인하였다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 캠-인덱스 장치와 같이 주기성 부하 및 파라미터 변동을 포함하는 DC모터 속도 제어계의 강인한 제어 성능 확보를 위해 SMC를 설계하였고, 제어 성능 비교를 위해 FRM으로 PI제어기를 설계하였다. 특히 각 제어기의 주요 파라미터들의 설계 과정을 명확히 기술하였고, PI제어기의 경우 속도제어기와 더불어 전류제어기를 동시에 설계함으로써 SMC와의 엄밀한 제어 성능 비교가 가능하도록 하였다. 설계된 SMC와 PI제어에 계단형 부하를 인가하고 Matlab 시뮬레이션을 통해 설계된 계인의 타당성을 확인하였다. 주기성 부하 인가 및 파라미터 변동시 두 제어기의 제어 성능 비교를 통해 SMC의 강인성을 검토하였다. 또한, SMC의  $e$ 와  $\dot{e}$ 로 설계된 위상평면을 통해 상

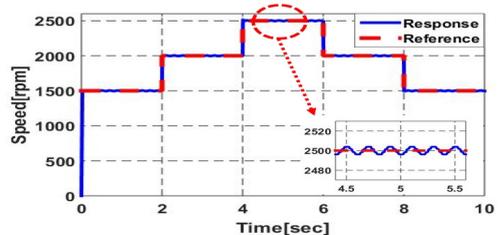


(a) Periodic disturbance (80% of rated torque, 5 Hz)

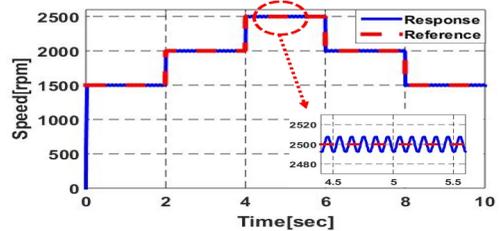


(b) Periodic disturbance (80% of rated torque, 10 Hz)

Fig. 12 Parameter variation on SMC



(a) Periodic disturbance (80% of rated torque, 5 Hz)



(b) Periodic disturbance (80% of rated torque, 10 Hz)

Fig. 13 Parameter variation on PI control

태변수의 초기값이 슬라이딩 라인에 도달한 후 원점으로 수렴하는 것을 보였다. 시뮬레이션을 통해 얻은 주요 결과들을 요약하면 다음과 같다.

1) SMC와 PI제어로 구성된 제어계에 계단형 부하를 인가하였을 때 SMC의 경우 미소한 정상상태오차가 발생하였고, PI제어의 경우 정상상태오차가 발생하지 않았지만 부하 인가 시점과 해제 시점에서 언더슈트와 오버슈트가 미소하게 발생하였다. 하지만 그 값은 약 1% 정도로 두 제어기 모두 양호한 제어 성능을 보였다.

2) 주기성 부하를 인가하였을 때, SMC는 인가된 주파수 범위 내에서는 동일한 제어 성능을 보였다. 반면에 PI제어기는 정상상태오차가 인가된 주파수에 비례하여 증가하였다.

3) 위상평면의 수렴점인 원점 부근에서 제어편차의 시간 변화율  $\dot{e}$ 은 주파수에 비례하여 커지지만 제어편차  $e$ 의 크기는 주파수에 관계없이 일정하게 나타남을 관측할 수 있었다. 이를 통해 주기성 부하에 대한 SMC의 강인성은 위상평면 분석으로도 가능함을 확인할 수 있다.

4) 주기성 부하 인가 및 파라미터 변동을 수반하는 경우에도 SMC는 강인한 성능을 유지했다. 반면에 PI제어기는 외란 주파수 크기에 따라 정상상태오차가 비례하여 커지고, 파라미터 변동에 대해서는 약 1% 정도의 미소한 최대오버슈트가 발생하였다. 이는 SMC의 게인이 제어대상의 파라미터와 무관하게 설정되는 반면에 PI제어기의 게인은 모델의 파라미터에 의존하기 때문인 것으로 보인다.

이로부터 SMC가 PI제어보다 주기성 부하나 파라미터 변동에 더 강인한 제어 성능을 가짐을 확인하였다. 본 논문에서 설계한 SMC는 향후 주기성 부하를 갖는 오일쿨러시스템 등의 강인한 제어기로도 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 2017년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 에너지인력양성사업으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다.

(No. 20164010200940)

## References

1. Chang-Ho Han, Tae-Young Jeong, Young-Mi Jung, and Seok-Kwon Jeong, 2017, "Robust Speed Controller Design for DC Motors Based on Sliding Mode Control", Conference of Korean Society for Power System Engineering, pp. 148-149.
2. Guldemir Hanifi, 2003, "Sliding Mode Speed Control for DC Drive Systems", Mathematical and Computational Applications, Vol. 8, No. 3, pp. 377-384. (DOI:10.3390/mca8030377)
3. Damiano Alfonso, Gatto L. Gianluca, Marongiu Ignazio and Pisano Alessandro, 2004, "Second-Order Sliding-Mode Control of DC Drives", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 51, No. 2, pp. 364-373. (DOI:10.1109/TIE.2004.825268)
4. Dursun Emre Hasan and Akif Durdu, 2016, "Speed Control of a DC Motor with Variable Load Using Sliding Mode Control", International Journal of Computer and Electrical Engineering, Vol. 8, No. 3, pp. 219-226. (DOI:10.17706/ijcee.2016.8.3.219-226)
5. Afrasiabi NAZANIN and M. HAIRI Yazdi, 2013, "Sliding Mode Controller for DC Motor Speed Control", Global Journal of Science Engineering and Technology, Vol. 11, pp. 45-50.
6. Maheswararao Ch Uma, YS Kishore Babu, and K. Amaresh, 2011, "Sliding Mode Speed Control of a DC Motor", Communication Systems and Network Technologies (CSNT), International Conference on IEEE, pp. 387-391. (DOI:10.1109/CSNT.2011.86)
7. Ahmed and Aamir Hashim Obeid, 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, Vol. 13, No. 2, pp. 74-80.
8. T. Venkatesh, M. Tarunkumar, B. Jayanthi, and B. Ramesh, 2016, "Speed Control of DC Motor and Performance is Compared with PID and SMC Controller", International Journal of Engineering Science, Vol. 6, No. 4, pp. 4071-4075. (DOI:10.4010/2016.934)
  9. Perruquetti Wilfrid and Jean-Pierre Barbot, 2002, "Sliding Mode Control in Engineering", CRC Press, pp. 34-36.
  10. Utkin. I. Vadim, Jürgen. Guldner, and Jingxin. Shi, 2009, "Sliding Mode Control in Electro-mechanical Systems", CRC press, pp. 224-237.
  11. Liu Jinkun and Xinhua Wang, 2011, "Advanced Sliding Mode Control for Mechanical Systems", Springer, pp. 9-20.
  12. Kim Sang-Hoon, 2010, "Electric Motor Control: DC, AC, and BLDC Motors", Bogdoo, pp. 54-111.