

비선형 다이내믹 인버전을 이용한 전자식 스로틀 제어

양 인 석¹⁾ · 송 무 근²⁾ · 이 동 익^{*2)}경북대학교 국방수중통신/탐지특화연구센터¹⁾ · 경북대학교 IT대학 전자공학부²⁾

Nonlinear Dynamic Inversion Based Control for Electronic Throttle

Inseok Yang¹⁾ · Moo-Geun Song²⁾ · Dongik Lee^{*2)}¹⁾Underwater Communication/Detection Research Center, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea²⁾School of Electronics Engineering, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

(Received 18 November 2010 / Revised 23 September 2011 / Accepted 29 September 2011)

Abstract : “Throttle-by-Wire” is an electronic throttle system in which mechanical cables and hydraulics are replaced by a fieldbus network, electric motors and sensors. It is crucial for an electronic throttle to design a controller that can offer an accurate and fast reference tracking performance in the presence of nonlinearities, such as friction in the gearbox and “limp-home” nonlinearity. This paper presents a nonlinear dynamic inversion based control algorithm for electronic throttle systems. Using the proposed method, the specified control performance can be achieved by canceling inherent nonlinear characteristics of the electronic throttle system. The control performance is investigated through a set of simulation results.

Key words : Electronic throttle(전자식 스로틀), Nonlinear dynamic inversion(비선형 다이내믹 인버전), Throttle-by-Wire(스로틀-바이-와이어)

Nomenclature

B_m	: motor damping constant, Nms/deg	R_{af}	: focal point of airflow on plate, m
B_t	: throttle damping constant, Nms/deg	R_p	: throttle plate radius, m
D	: spring offset, Nm	T_a	: torque due to airflow, Nm
F_{fr}	: friction constant, Nm	T_{fr}	: friction, Nm
J_m	: motor inertia, kgm ²	T_l	: load torque, Nm
J_t	: throttle moment of inertia, kgm ²	T_m	: torque applied by motor, Nm
K_b	: back emf constant, Vs/deg	T_{sp}	: torque due to returning spring, Nm
K_{sp}	: spring constant, Nm/deg	T_g	: torque transmitted form gear, Nm
K_t	: motor torque constant, Nm/A	e_a	: motor voltage, V
N	: gear ratio	i_a	: armature current, A
L_a	: armature inductance, H	θ_m	: armature angular position, deg
R_a	: armature resistance, Ω	θ_0	: limp-home position, deg
		θ	: throttle plate angular position, deg
		w	: throttle plate angular velocity, deg/sec

*Corresponding author, E-mail: dilee@ee.knu.ac.kr

Subscripts

cmd : command signal

des : desired signal

1. 서론

전자 및 통신 기술의 발전에 힘입어 기존 차량의 기계적 연결을 센서, 전기모터, 필드버스(fieldbus) 등으로 대체하는 ‘X-by-Wire(XbW)’ 시스템에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.¹⁾ 여기서 X는 적용 대상의 명칭으로 대체할 수 있는데, 본 논문에서 다루는 스로틀 시스템의 경우 Throttle-by-Wire(TbW) 시스템이라고 부른다. TbW 시스템은 기존의 기계식 스로틀과 비교하여 다양한 장점을 갖는다. 기능적 측면에서는 연비, 엔진토크, 운전성 등이 개선될 수 있으며, 제어기술 측면에서는 스로틀 밸브 제어, 공회전 속도 제어, TCS(Transaction Control System) 제어, 정속주행 제어 등의 개별 제어 요소들을 통합적으로 제어할 수 있다.²⁾

스로틀은 엔진으로 유입되는 공기의 양을 조절하는 장치로 정밀한 제어성능이 요구되지만, 빠른 동특성과 강한 비선형 특성으로 인해서 제어가 매우 어려운 시스템이다.³⁾ 특히 스로틀에 작용하는 저항과 ‘limp-home’ 등의 비선형 특성을 고려한 정밀제어는 중요한 주제가 되고 있으며, 현재까지 SMC(Sliding Mode Control),^{2,4)} MPC(Model Predictive Control),⁵⁾ TDC(Time Delay Control)⁶⁾ 등 다양한 제어기법들이 소개되고 있다. 그러나 위 방법들은 모델 선형화를 통하여 설계되는 방법이므로 미분 불가능한 비선형성을 포함한 시스템에 적용하는데 한계가 있다. 또한 비선형 시스템에 일반적으로 적용되는 gain scheduling의 경우, 각 평형점에 적합한 이득값을 모두 저장하게 되어 메모리 및 연산속도 측면에서 어려움이 따른다.

본 논문에서는 스로틀 시스템의 빠르고 정확한 제어성능을 확보하되, 상기 문제점을 보완할 수 있도록 비선형 다이내믹 인버전(Nonlinear Dynamic Inversion, NDI) 기법을 적용한 제어기를 제안한다. NDI 기법은 모델 역변환을 적용하여 기준시스템의 동특성을 상쇄한 뒤 특정한 요구성능을 만족하도록

제어기를 설계하는 방법으로써, 단순한 구조에도 불구하고 우수한 제어성능을 제공한다.⁷⁾ 특히 모델 역변환을 이용하는 과정에서 비선형 시스템의 평형점에 따른 gain scheduling을 필요로 하지 않는다. 이러한 장점들로 인해 우주선, 항공기, 미사일 등과 같은 시스템을 중심으로 NDI 제어기에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.⁷⁻⁹⁾ 본 논문에서는 NDI 기법을 적용하여 비선형 특성이 강한 스로틀 시스템을 위한 정밀 제어기를 제안한다. NDI 기법의 적용시, 역변환을 통해 시스템이 갖는 기준 동특성을 상쇄시키게 되는데, 이 때 시스템의 특성에 따라 역행렬이 존재하지 않을 수 있다. 이러한 경우를 대비하여 multi-time scale 기법을 이용하여 제어기를 설계하였으며, 시뮬레이션을 통하여 제안된 방법의 효용성을 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 서론에 이어 2장에서 전자식 스로틀 시스템의 모델링을 설명하고, 이 모델을 기반으로 설계한 NDI 제어기를 3장에서 제시한다. 4장에서는 시뮬레이션을 통하여 설계한 NDI 기반 스로틀 제어기의 성능을 평가하며, 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

2. 전자식 스로틀 모델

스로틀은 밸브의 개폐 각도를 조절하여 차량 엔진으로 유입되는 공기의 양을 제어하는 장치이다.^{3,10)} 과거에 사용되던 기계식 스로틀 장치에서는 가속페달과 직접 기계적으로 연결된 페달의 위치에 따라 밸브의 위치가 결정되었으나, 현재 차량에서 이용되고 있는 전자식 스로틀 장치에서는 ECU(Engine Control Unit)의 명령값을 따라 ETC(Electric Throttle Controller)에 의해 밸브 개폐각도가 제어된다(Fig. 1). 먼저 ECU는 센서로 측정된 가속페달의 가압상태와 위치정보를 바탕으로 엔진으로 유입될 공기의 양을 계산하고, 그 결과에 따른 스로틀 밸브의 개폐각을 결정하여 ETC에 전송한다.

Fig. 2에 나타난 것과 같이 전자식 스로틀 장치는 DC모터, 기어박스, 스로틀 평면 그리고 복귀스프링(returning spring) 등으로 구성된다. DC모터는 ECU로부터 인가된 밸브위치 명령값을 만족시킬 수 있도록 스로틀 평면을 구동한다. DC모터로 구동되는

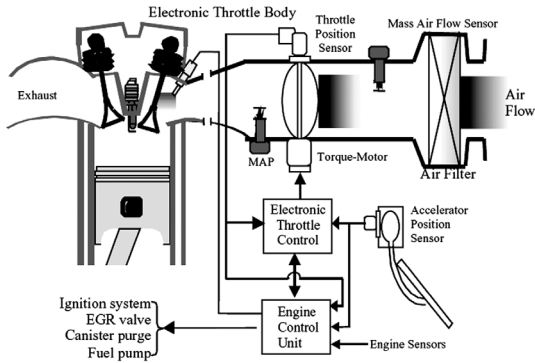


Fig. 1 Structure of engine control system with electronic throttle¹¹⁾

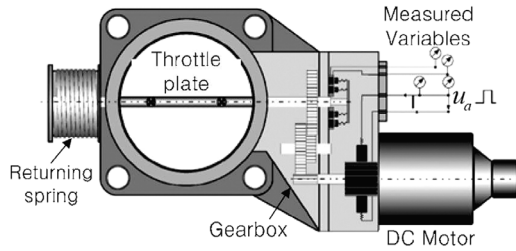


Fig. 2 Structure of electronic throttle¹²⁾

스로틀 시스템의 모델은 다음과 같다.

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a = e_a - K_b \frac{d\theta_m}{dt}, \quad (1)$$

$$J_m \frac{d^2\theta_m}{dt^2} + B_m \frac{d\theta_m}{dt} = T_m - T_v, \quad (2)$$

$$J_t \frac{d^2\theta}{dt^2} + B_t \frac{d\theta}{dt} = T_g - T_a - T_{sp} - T_{fr}. \quad (3)$$

모터로부터 인가된 토크는 $T_m = K_t i_a$, 그리고 기어박스의 기어비는 $N = \theta_m / \theta = T_g / T_t$ 의 관계가 성립되므로, 식 (1)-(3)은 다음의 관계가 성립한다.

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{L_a} \left(e_a - K_b N \frac{d\theta}{dt} - R_a i_a \right), \quad (4)$$

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{1}{J} \left(N K_t i_a - T_a - T_{sp} - T_{fr} - B \frac{d\theta}{dt} \right), \quad (5)$$

여기서, J 와 B 는 각각 $J = N^2 J_m + J_t$ 그리고 $B = N^2 B_m + B_t$ 이다. 스톱 밸브에 작용하는 힘은 공력(T_a), 스프링 반력(T_{sp}) 그리고 마찰력(T_{fr})으

로 나누어지며, 그 특성은 다음과 같다.

공력: 스톱 밸브를 통해 이동하는 공기에 의해 스톱 밸브 평면에 반력(T_a)이 생성된다.¹¹⁾ T_a 는 엔진 내부와 대기압과의 압력차(ΔP), 스톱 밸브 평면의 넓이(A_p) 및 스톱 밸브 개폐각(θ)의 함수로 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} T_a(\theta) &= R_{af} F_a \cos\theta \\ &= R_{af} \Delta P A_p \cos^2\theta \\ &= R_{af} \Delta P (\pi R_p^2) \cos^2\theta. \end{aligned} \quad (6)$$

스프링 반력: 복귀스프링은 스톱 밸브 고장에 대처하기 위해 사용되는 장치로서, 고장이 발생하여 DC모터가 구동되지 않을 경우 스톱 밸브를 공회전 위치로 복귀시키는 역할을 한다.³⁾ Fig. 3에서 볼 수 있는 것처럼, 입력이 인가되지 않은 스톱 밸브는 개폐각이 limp-home(LH) 위치(θ_0)가 될 때까지 지속적으로 스프링의 영향을 받게 된다. 그 결과 DC모터 등에 고장이 발생하더라도 지속적인 공기유입이 가능하여 엔진이 꺼지는 것을 방지할 수 있게 된다. 복귀스프링의 특성은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{sp}(\theta) = K_{sp}(\theta - \theta_0) + D \text{sign}(\theta - \theta_0), \quad (7)$$

여기서, $\text{sign}(\theta - \theta_0)$ 는 다음의 함수를 의미한다.

$$\text{sign}(\theta - \theta_0) = \begin{cases} 1, & \theta - \theta_0 > 0 \\ 0, & \theta - \theta_0 = 0 \\ -1, & \theta - \theta_0 < 0. \end{cases} \quad (8)$$

마찰력: 저항은 베어링, 기어부 등 기계적인 요소들 사이에서 발생하는 힘으로 스톱 밸브 움직임을 방해하는 요소이다. 본 논문에서는 쿨롱마찰력 모델을 가정한다.

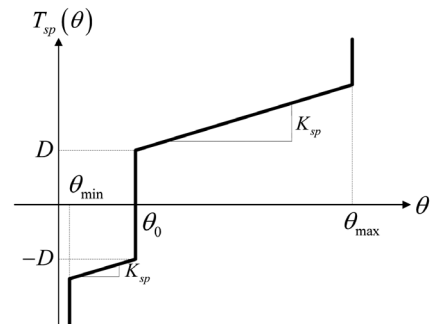


Fig. 3 Nonlinear characteristic of returning spring

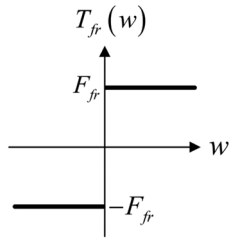


Fig. 4 Coulomb friction

$$T_{fr}(w) = F_{fr} \text{sign}(w). \quad (9)$$

만약 스톱 밸브의 상태 변수와 입력을 각각 $x = [x_1, x_2, x_3]^T = [\theta, d\theta/dt, i_a]^T$ 와 $u = [e_a]$ 로 가정하여, 식 (4), (5)를 상태방정식으로 표현하면, 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ f_2(x_1, x_2, x_3) \\ \frac{1}{L_a}(-k_{ip}Nx_2 - R_a x_3) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_a} \end{bmatrix} u, \quad (10)$$

여기서, $f_2(x_1, x_2, x_3)$ 는 다음과 같다.

$$f_2(x_1, x_2, x_3) = \frac{1}{J}[-R_{of}\Delta P(\pi R_p^2)\cos^2 x_1 - K_{sp}(x_1 - \theta_0) + D\text{sign}(x_1 - \theta_0) - F_{fr}\text{sign}(x_2) - Bx_2 + NK_i x_3]. \quad (11)$$

3. Nonlinear Dynamic Inversion (NDI) 기반 스톱 밸브 제어기 설계

NDI 기법은 모델 역변환을 이용하여 기준시스템의 동특성을 상쇄한 후에 특정한 요구성능을 만족하도록 만드는 제어 기법으로서, 선형 및 비선형 시스템에 모두 적용이 가능하다. 일반적으로 NDI는 Fig. 5와 같이 두 개의 루프로 구성된다. 여기서 내부루프는 플랜트의 역변환을 통하여 동특성을 제거하는 과정으로써 NDI제어기가 적용되는 곳이다. 반면에 외부루프는 시스템에 요구되는 성능을 만족하기 위한 제어기가 적용되는 위치이며 추종시스템의 요구사항에 따른 요구동특성(desired dynamics)을 생성하는 단계이다.

3.1 내부루프 설계

다음과 같은 시불변 비선형 시스템을 고려하자.

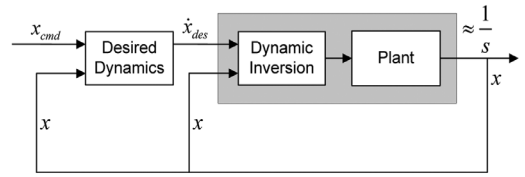


Fig. 5 Structure of nonlinear dynamic inversion based controller

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u, \quad (12)$$

여기서, $x \in R^n$ 은 상태변수, $u \in R^m$ 는 제어입력이다. 만약 시스템이 affine이면, 제어입력은 다음과 같은 형태로 표현 가능하다.

$$u = g^{-1}(x) [\dot{x} - f(x)], \quad (13)$$

여기서, $g^{-1}(x)$ 은 $g(x)$ 의 역행렬이며, 의사역행렬(pseudo-inverse)을 포함한다. 그러나 시스템의 특성에 따라 역행렬이 존재하지 않을 수 있으므로, 항상 식 (13)을 보장할 수는 없다. 이와 같은 경우, multi-time scale 기법을 이용하여 NDI를 설계한다 (Fig. 6). 식 (13)에서, 기준 동적 특성을 요구동특성으로 대체하면 다음과 같다.

$$u = g^{-1}(x) [\dot{x}_{des} - f(x)], \quad (14)$$

여기서, \dot{x}_{des} 는 시스템의 요구성능에 따라 설계된 상태 정보이며, 요구동특성을 설계하는 과정에서 규칙이 정해진다. 식 (14)로부터, 내부루프를 통하여 다음과 같은 동특성을 얻게 된다.

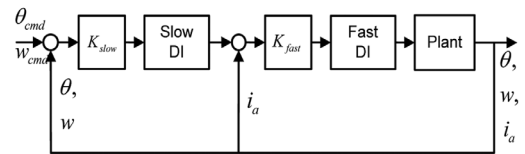


Fig. 6 Structure of two-time scale based NDI controller

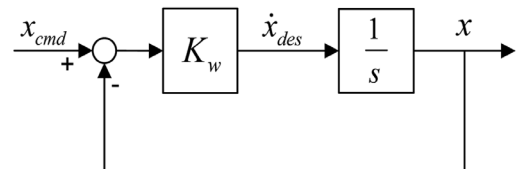


Fig. 7 Desired dynamics in proportional control form⁷⁾

$$\dot{x}_{des} = \dot{x} = \frac{1}{s} \quad (15)$$

식 (15)로부터, 결과적으로 기준 시스템의 동특성은 제거되고, 원하는 성능을 추종하도록 시스템 특성이 변경됨을 알 수 있다.

3.2 외부루프 설계

본 단계에서는 시스템 요구성능에 따른 요구동특성을 생성하는 과정으로, 요구조건에 따라 다양한 형태로 설계할 수 있다. 예를 들면, 강인성 확보를 위하여 H_∞ 또는 μ -synthesis 제어를 적용하거나, 비례-적분 제어기(PI controller)를 적용할 수 있다. 본 논문에서는 Fig. 7과 같이 요구동특성 블록을 비례제어기 형태로 설계하였다. Fig. 7로부터, 시스템의 동특성은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_{des} &= K_w(x_{cmd} - x) \\ \Rightarrow \frac{x}{x_{cmd}} &= \frac{K_w}{s + K_w} \end{aligned} \quad (16)$$

여기서, K_w 는 제어이득 상수이며, 시스템의 유일한 극점이 된다. 따라서 시스템의 동특성은 요구동특성에서 설계된 조건에 종속됨을 알 수 있다.

본 논문에서는 Fig. 6과 같은 two-time scale 구조를 사용한다. Two-time scale과 같은 다중루프 구조에서 내부루프는 액추에이터에 직접적으로 영향을 받아 빠르게 동작하는 루프이며, 외부루프는 각 상태들 사이의 간섭현상의 영향으로 동작하는 루프이다.

결과적으로 NDI 제어기는 다음과 같이 설계된다.

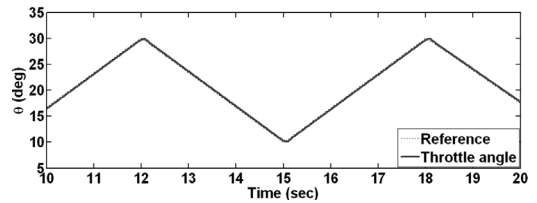
$$\begin{aligned} u &= \left(\frac{1}{L_a}\right)^{-1} \left[\dot{x}_{3,des} - \frac{1}{L_a}(-k_b N x_2 - R_a x_3) \right], \\ x_3 &= \left(\frac{1}{NK_t}\right)^{-1} \left[\dot{x}_{2,des} - \frac{1}{J}(-R_{af} \Delta P (\pi R_b^2) \cos^2 x_1 \right. \\ &\quad \left. - K_{sp}(x_1 - \theta_0) + Dsign(x_1 - \theta_0) - F_{fr} sign(x_2) - Bx_2) \right]. \end{aligned} \quad (17)$$

4. 시뮬레이션 결과

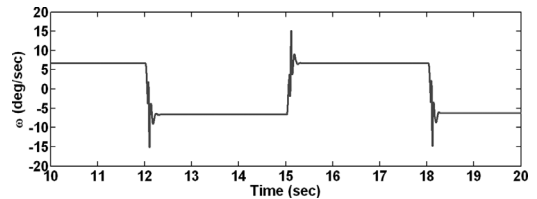
앞서 3장에서 설계한 NDI 기반 스로틀 제어기의 성능을 확인하기 위하여 Matlab/Simulink 를 이용한

Table 1 Parameters used for simulation of throttle system

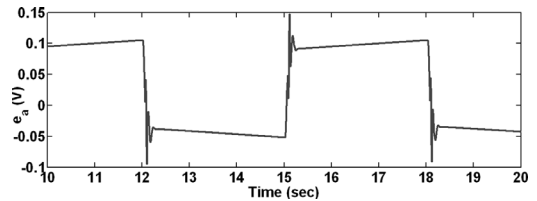
Parameter	Value	Parameter	Value
L_a	4.5×10^{-4} H	K_{sp}	7.5×10^{-3} Nm/deg
R_a	0.5 Ω	θ_0	5 deg
J_m	2.43×10^{-4} kgm ²	D	0.08 Nm
B_m	5.45×10^{-6} Nms/deg	R_p	0.0015 m
K_b	2.3×10^{-3} Vs/deg	R_{af}	0.002 m
K_t	1.141 Nm/A	F_{fr}	0.1 Nm
J_t	0.005 kgm ²	N	4
B_t	5.93×10^{-5} Nms/deg		



(a) Angular position



(b) Angular velocity



(c) Input voltage

Fig. 8 Simulation results with triangular reference input

시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 스로틀 시스템 모델의 파라미터 값은 Table 1과 같다.

Fig. 8, 9는 가속페달을 주기적으로 조작하는 상황을 가정하였다. Fig. 8은 스로틀 각도 목표치는 진폭 20도, 바이어스 20도, 주기 16초를 갖는 삼각파를 추종하는 결과이며, Fig. 9는 진폭 10도, 바이어스 20

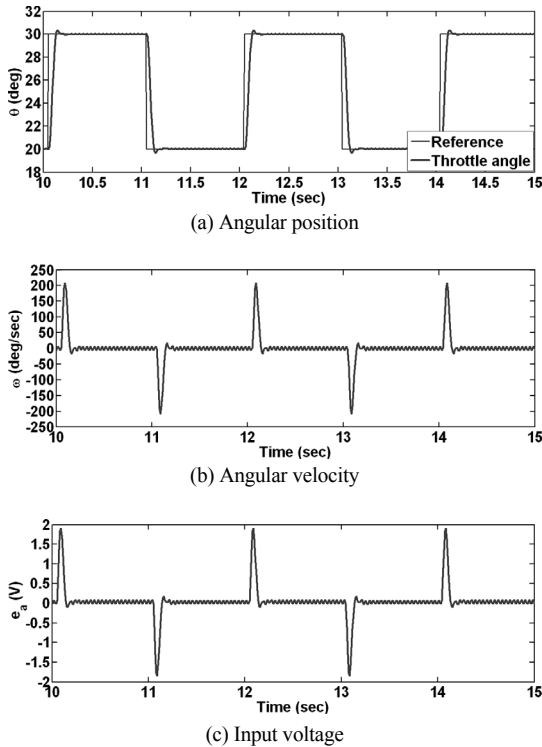


Fig. 9 Simulation results with square reference input

도, 주기 2초를 가지는 구형파에 대한 스로틀 위치 제어 결과를 나타낸다.

Fig. 8(c)에서 스로틀 평면의 개폐 방향이 바뀌는 순간(12, 15, 18초)에 마찰력의 영향을 보상하기 위하여 입력이 인가되고 있음을 볼 수 있다. 여기서 인가된 입력의 최대 전압은 0.15V를 넘지 않으며, 스로틀 밸브의 최대 각속도는 20deg/sec를 넘지 않는다(Fig. 8(b)). 또한 Fig. 8(a)로부터 NDI를 이용하여 빠르고 정확한 위치 제어 성능이 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 9(a)에서 인가된 입력에 대하여 0.2초안에 정상상태에 도달함을 볼 수 있다. 이때 최대 전압은 2V를 넘지 않으며, 최대 각속도는 약 200deg/sec가 된다. Fig. 9로부터, 갑작스런 입력의 변화에도 NDI 기반 제어기를 이용하여 빠르고 정확한 위치제어 성능을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 비선형 다이내믹 인버전을 이용한

스로틀 밸브 각위치 제어 방법을 제안하였다. 제한된 방법은 역변환을 통해 시스템이 갖는 기준 동특성을 상쇄시킨 뒤 새로운 동특성을 추종하도록 제어함으로써 gain scheduling을 적용하지 않고도 비선형성이 강하게 포함된 스로틀 시스템의 제어사양을 만족시킬 수 있도록 설계하였다. 제한한 방법의 제어성을 분석하기 위해서 다양한 기준입력 신호에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과를 통해서 비선형 특성이 강한 스로틀 시스템을 정밀하고 신속하게 제어할 수 있음을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2008-331-D00181).

References

- 1) H. T. Dorissen and K. Dürkopp, "Mechatronics and Drive-by-Wire Systems Advanced Non-contacting Position Sensors," Control Engineering Practice, Vol.11, No.2, pp.191-197, 2003.
- 2) Y. J. Kim, A Fault-tolerant Throttle Valve Using Sliding Mode Control, M. S. Thesis, Kyungpook National University, Gyeongbuk, 2009.
- 3) S. T. Jin, J. J. Kang and W. T. Lee, "Electronic Throttle Body Model Allowing for Non-linearity of DC Motor Driver," Transactions of KSAE, Vol.16, No.1, pp.71-77, 2008.
- 4) Ü. Özgüner, S. Hong and Y. Pan, "Discrete-time Sliding Mode Control of Electronic Throttle Valve," Proc. of the 40th IEEE Conf. Decision and Control, pp.1819-1824, 2001.
- 5) M. Vašak, M. Baotić, I. Petrović and N. Perić, "Electronic Throttle State Estimation and Hybrid Theory Based Optimal Control," 2004 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp.323-328, 2004.
- 6) J.-B. Song and K.-S. Byun, "Throttle Actuator Control System for Vehicle Traction Control," Mechatronics, Vol.9, pp.477-495, 1999.
- 7) J. Georgie and J. Valasek, "Evaluation of

- Longitudinal Desired Dynamics for Dynamic-inversion Controlled Generic Reentry Vehicles,” *J. Guid. Cont. Dyna*, Vol.26, No.5, pp.811-819, 2003.
- 8) P. Smith and A. Berry, “Flight Test Experience of a Non-linear Dynamic Inversion Control Law on the VAAC Harrier,” *AIAA 2000-3914*, 2000.
 - 9) S. Cho, S.-H. Kim and D.-G. Choe, “Robust Missile Autopilot Design Using Dynamic Inversion and PI Control,” *International Control Conference (ICC2006)*, Glasgow, Scotland, UK, 2006.
 - 10) J. J. Kang and W. T. Lee, “The Design and Implementation of a Fault Diagnosis on an Electronic Throttle Control System,” *Transactions of KSAE*, Vol.15, No.6, pp.9-16, 2007.
 - 11) R. Conatser, J. Wagner, S. Ganta and I. Walker, “Diagnosis of Automotive Electronic Throttle Control Systems,” *Control Engineering Practice*, Vol.12, pp.23-30, 2004.
 - 12) R. Isermann, “Diagnosis Methods for Electronic Controlled Vehicles,” *Vehicle System Dynamics*, Vol.36, No.2-3, pp.77-117, 2001.