

〈논 문〉

시간지연제어에 기초한 스로틀액츄에이터 시스템의 제어

송재복* · 변경석**

(1997년 3월 5일 접수)

Control of Throttle Actuator System Based on Time Delay Control

Jae-Bok Song and Kyeong-Seok Byeon

Key Words : Throttle Actuator System(스로틀액츄에이터 시스템), Time Delay Control(시간지연제어), Variable Reference Model(가변기준 모델), DC Motor Drive(직류모터 드라이브)

Abstract

Accurate positioning of the throttle valve of a gasoline engine is required to implement various systems such as traction control system(TCS), cruise control system and drive-by-wire system. In this research, position control system has been developed for the throttle actuator system that uses one throttle actuation for small volume and DC servo motor for fast response. In order to drive the DC motor, PWM signal generator and PWM amplifier were built and interfaced to the motor and controller. Also, time delay control(TDC) law has been used as a basic control algorithm. A method of varying the reference model of the TDC according to the size of change in target throttle angle is proposed here. The simulation and experimental results show that both overshoot prevention and fast response are achieved by the TDC technique with this variable reference model.

1. 서 론

차량의 엔진에 장착되어 있는 스로틀밸브는 보통 가속기 페달과 케이블을 통해 연결되어 운전자의 조작에 따라 엔진에 흡입되는 공기량을 조절함으로써 궁극적으로 엔진의 출력을 직접 조절해 주는 역할을 수행한다. 최근에 이러한 스로틀밸브의 개도(opening)를 액츄에이터를 사용하여 정확하고 신속하게 제어해 주는 시스템이 사용되기 시작하였는데, 대표적인 경우로 저마찰 노면에서의 차량의 가속성능 및 고속 선회시에 차량의 선회 안정성을 향상시키는 구동력제어 시스템(traction control system ;

TCS), 운전자가 설정한 속도로 차량의 속도를 계속 유지해 주는 정속주행제어(cruise control) 시스템 등이 있다. 또한, 미래에는 가속기 페달과 스로틀밸브 사이의 기계적인 케이블을 대신에 운전자의 가속기 페달조작을 센서로 감지하여 액츄에이터를 통해서 스로틀밸브를 직접 조절해 주는 DBW(drive-by-wire) 시스템이 도입될 전망이다, 이 때에도 액츄에이터에 의한 스로틀밸브의 정확한 제어가 중요하게 된다.

현재 국내에 장착되고 있는 스로틀액츄에이터를 살펴보면 다음과 같다. 우선 그랜저에 사용되는 스로틀액츄에이터는 미쓰비시에서 제작한 모델로 진공액츄에이터를 사용하는데, 솔레노이드밸브의 듀티제어를 통해서 진공액츄에이터에 인가되는 부압을 조절하며, 이 결과로 얻어지는 다이어그램의 상

*회원, 고려대학교 기계공학과

**회원, 고려대학교 대학원 기계공학과

하운동을 통해서 스로틀밸브의 개도를 제어하는 방식이다.⁽¹⁾ 이 방식은 흡기 다기관에서의 부압을 동력원으로 사용할 수 있다는 장점이 있으나, 액츄에이터의 응답이 신속하지 못하다는 단점이 존재한다. 한편, 마르샤에는 운전자에 의해 조작되는 주 스로틀바디 외에 Hella에서 제작한 DC 모터로 구동되는 보조 스로틀바디가 장착되어 있다.⁽²⁾ 이 방식은 진공액츄에이터를 사용하는 시스템에 비해서 응답이 신속하다는 장점이 있는 반면에, 2개의 스로틀 밸브가 존재함으로써 부피가 커지고, 스로틀바디의 단가가 상승하며, 2개의 스로틀밸브가 동시에 작동하므로 제어알고리즘이 다소 복잡해질 수 있다는 단점이 있다.

한편, 외국 차량의 경우를 특히자료로 분석해 보면, 도요타 차량은 주로 DC 또는 스텝모터에 의해서 구동되는 보조 스로틀밸브방식을 채택하고 있으며, 미쓰비시 차량은 주로 주 스로틀밸브 방식을 채택하고 있다. 또한, GM 차량의 경우 DC 모터에 의해서 구동되는 보조 스로틀방식이나 주 스로틀방식을 채택하고 있다.

한편, 이러한 스로틀액츄에이터를 구동하기 위한 제어로직에 대해서는 알려진 정보가 거의 없는 실정이다. 본 연구에서는 다음과 같이 스로틀액츄에이터에 대한 제어로직을 개발하였다. 우선 차량의 제어 시스템에 적용될 수 있는 제어기법은 쉽게 적용이 가능하도록 간단하면서도 시스템의 비선형성, 운전영역에 따른 시스템 파라미터의 변화 및 외란 등에 대해서도 강인하고 효과적인 제어성능을 나타낼 수 있어야 한다. 이러한 관점에서 PID 제어기법을 고려할 수 있는데, 이 방식은 수십 년간 그 성능 및 효용성이 증명된 기법이므로 차량에 적용하기는 가장 적합한 알고리즘이다. 단지 한 가지 단점은 스로틀밸브의 전 운전영역에 걸쳐서 각기 다른 이득값을 사용해야만 최적의 성능을 나타낼 수 있다는 점이다. 따라서 본 연구에서는 PID 제어기법 대신에 시간지연제어(time delay control, TDC) 기법을 사용하고자 한다. 이 기법은 플랜트에 미지의 동역학과 외란이 존재하는 상황에서도, 과거의 몇 샘플링주기 동안의 시스템의 입·출력정보를 이용하여 미지의 동역학과 외란의 항들을 제거하고, 기준 모델에 의해 주어진 원하는 동역학으로 치환함으로써 플랜트의 상태변수가 원하는 궤적, 즉 기준 모델을 정확하게 추종하도록 하는 제어기법이다.

스로틀액츄에이터 시스템의 위치제어도 다른 경우와 마찬가지로 신속한 응답성과 정확성이 요구된다. 즉, 스로틀액츄에이터를 조절할 때 상황에 따라서 스로틀개도의 변화가 큰 경우와 작은 경우가 발생하는데, 어느 경우든 제어의 목적은 오버슈트가 없이 신속히 원하는 개도로 이동하는 것이다. 그러나 오버슈트의 방지 및 응답의 신속성은 서로 상충되는 조건이므로, 이에 적절하게 대처하여야 한다. 본 연구에서는 TDC 알고리즘의 기준 모델을 가변시키 줌으로써, 이 두 조건을 적절히 만족시켜 주는 방법에 대해서 살펴보기로 한다.

본 연구에서는 앞서 언급한 스로틀액츄에이터 시스템의 정확하고, 신속하며, 저렴한 위치제어 시스템을 개발하는 것을 목표로 하고 있다. 2장에서는 본 연구의 대상이 되는 스로틀액츄에이터 시스템의 구조와 기능을 살펴본 다음, 액츄에이터인 직류서보모터를 구동하는 PWM 구동 시스템의 구성에 대해서 간략히 언급한다. 3장에서는 본 연구의 주제어알고리즘인 TDC에 대해서 간략히 알아보고, 가변기준 모델을 어떻게 구성하는가에 대해서 고찰해 본다. 4장에서는 개발된 위치제어 시스템의 성능을 여러 관점에서 고찰해 보고, 5장에서 결론을 도출하기로 한다.

2. 스로틀액츄에이터 시스템의 모델링

2.1 스로틀액츄에이터의 구조 및 기능

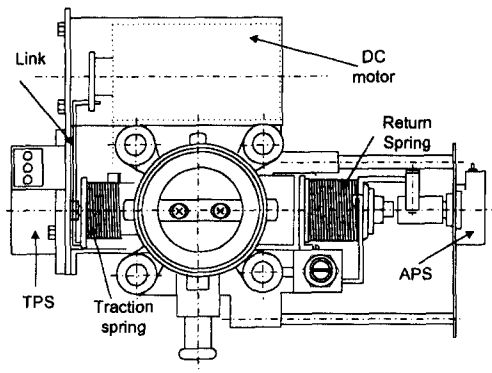
Fig. 1의 (a)는 본 연구의 대상이 되는 스로틀액츄에이터 시스템의 구조를, (b)는 모터와 스로틀밸브 간에 동력을 전달하는 4절 링크를 각각 나타낸 것이다. Fig. 2는 스로틀액츄에이터의 작동방식 및 스로틀개도의 정의를 나타낸 것이다. Fig. 1에서 보듯이 스로틀밸브의 우측은 운전자의 가속페달 조작과 직결되어 있는데, 가속페달을 끝까지 밟으면 스로틀밸브가 전개상태(즉, 스로틀개도 90°)로 열리며, 페달을 놓으면 리턴 스프링에 의해서 스로틀밸브는 전폐상태(즉, 스로틀개도 0°)로 되 돌아온다. 한편, 스로틀밸브의 좌측은 하단의 그림에서 보듯이 직류모터와 4절 링크로 연결되어 있다. 스로틀액츄에이터는 앞서 언급한 바와 같이 여러 용도에 사용될 수 있지만, 여기서는 스로틀밸브의 제어가 가장 복잡한 경우인 TCS의 경우에 대해서 살펴보기로 한다. 이 경우에는 가속기 페달에 의해 설정된 스로틀밸브개도를 한계로 밸브를 더 열

어 주지는 못하지만, 전폐상태와 이 한계 내에서는 직류모터의 구동에 의해서 스로틀밸브를 임의의 각도로 조정할 수 있는 구조로 되어 있으며, 더 이상 TCS 제어를 수행할 필요가 없게 되면 모터에 공급되는 전원이 차단되며, Fig.1의 트랙션 스프링에 의해서 스로틀밸브는 운전자의 가속기 페달에 의해 설정한 각도로 복귀하게 된다.

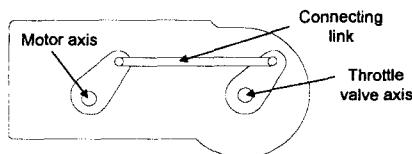
스로틀액추에이터 구동부에 있어서 가장 중요한 점은 TCS 제어기에서 요구되는 각도로 스로틀밸브를 정확하고도 신속하게 위치시켜 주는 위치제어 시스템을 구성하는 일이다. 이를 위해서 일반적인 직류모터의 위치제어 알고리즘을 사용할 수 있는데, 한 가지 어려운 점은 트랙션 스프링에 의한 토크는 일정한 크기를 가지는 부하토크가 아니라, 밸브를 닫는 방향으로는 운동을 방해하는 방향으로, 밸브를 여는 방향으로는 운동을 도와주는 방향으로 작용하며, 그 크기는 스프링의 회전각도에 비례하여 달라진다는 점이다. 또한, 스로틀액추에이터 기구부의 4절 링크에서 기인하는 백래시와 마찰 등도 정확한 제어를 어렵게 하는 요소로 작용한다.

2.2 액추에이터 제어 시스템의 구조 및 기능

Fig. 3은 스로틀액추에이터 위치제어 시스템을 개략적으로 나타낸 블록선도이다. 이 시스템은 크



(a) Appearance of MTA system



(b) 4-bar linkage

Fig. 1 Appearance of throttle actuator and 4-bar linkage

게 제어부, PWM 신호발생부, PWM 증폭기, 모터, 측정부 및 기타 인터페이스부로 구성되어 있다. 이중 제어부는 디지털제어방식으로 마이크로 프로세서에서 프로그램으로 구현된다. 측정부는 모터의 각 위치를 측정하는 부분으로, 비접촉식의 TPS(throttle position sensor)에 의해서 측정된다. 인터페이스부는 측정된 아날로그신호를 마이크로 프로세서에서 사용할 수 있는 디지털신호로 변환하는 A/D 변환기와 산출된 제어신호를 PWM 신호 발생부의 입력신호로 주기위한 D/A 변환기로 구성되어 있다. 실제 실험에서는 편의상 제어부는 마이크로 프로세서 대신에서 PC를, 인터페이스부는 데이터수집 보드를 사용하였다.

직류모터를 구동하는데 필요한 PWM 모터 구동 회로는 Fig. 3에서와 같이 크게 PWM 신호발생회로, MOSFET을 사용한 H-브리지회로 및 기타 인터페이스회로로 구성되어 있다. 우선 디지털제어를 수행하므로 제어기부분은 아날로그 회로가 아닌 컴퓨터 알고리즘으로 처리된다. 이 때, 제어기의 출력신호는 부호와 크기로 분리되는데, 부호는 모터의 회전방향을 결정하는 2진 신호로 변환되며, 크기는 D/A 변환기에 의해서 아날로그신호로 변환

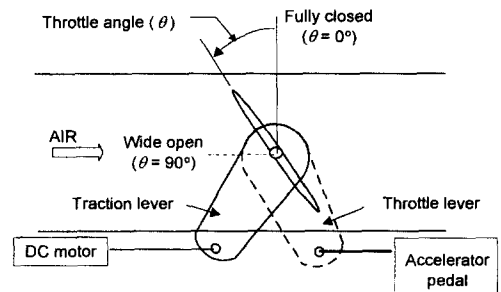


Fig. 2 Operation of throttle actuator and definition of throttle angle

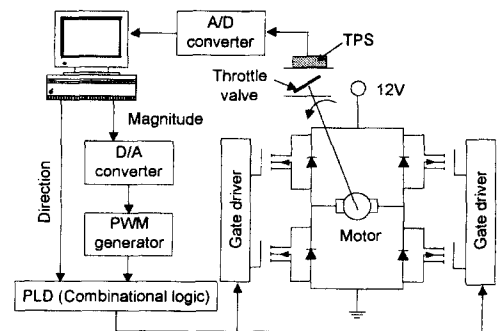


Fig. 3 Schematics of DC motor drive system

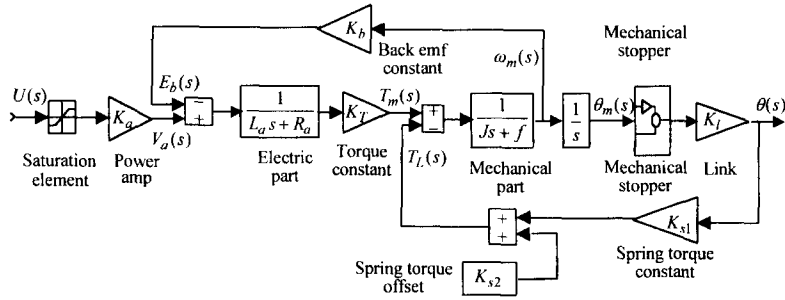


Fig. 4 Modeling of throttle actuator system based on Simulink package.

된다. 이렇게 변환된 아날로그신호는 PWM 신호 발생회로인 LM3524로 입력되어 입력된전압에 비례하는 듀티비를 갖는 구형파가 발생된다. 이 때, PWM 주파수는 10 kHz로 선정하였다. 이와 같이 발생된 방향신호 및 PWM 신호는 프로그램 가능한 논리소자(PLD)인 GAL16V8에 기억되어 있는 조합논리의 입력으로 사용된다.

Fig. 3에서 H-브리지회로는 4개의 N채널 MOS-FET으로 구성되어 있다. N채널 MOSFET을 구동하려면 게이트전압이 소스전압보다 높아야 하는데, H-브리지 하단의 FET는 공급전압을 사용하여 구동시킬 수 있으나, 상단의 FET는 별도로 게이트 전압을 높여주는 회로가 필요하므로 이 목적으로 차지컴프회로가 내장된 게이트 드라이버 IR2110를 사용하였다. 한편, 스로틀액츄에이터에 사용되는 직류모터는 차량의 배터리에서 공급되는 전압을 사용하기 위해서 정격전압이 12 V로 다소 낮게 설계되어 있는 외에는 일반 직류서보모터와 거의 동일하다.

2.3 스로틀액츄에이터 시스템의 모델링

제어 시스템을 구성하기에 앞서 먼저 스로틀액츄에이터 시스템에 대한 모델링이 필요하게 된다. Fig. 4는 SIMULINK에 기초하여 나타낸 스로틀액츄에이터 시스템의 모델로, 크게 직류서보모터에 대한 모델과 리턴 스프링 및 링크 등의 기구부에 대한 모델로 나눌 수 있다. 직류서보모터에 대한 모델링은 많은 문헌에서 취급되므로 여기서는 생략하기로 하고, (3) 기구부 모델링에 대해서만 간략히 살펴 보기로 한다.

스토퍼(stopper)는 스로틀밸브가 TCS의 경우에는 전쇄(0°)와 가속기 페달에 의해서 설정된 개도내에서만 이동할 수 있다는 점을 모델링한 것으로,

여기서는 자세한 내부 모델링은 생략하기로 한다. 모터의 각위치 θ_m 과 스로틀개도 θ 사이의 4절 링크에 의한 관계를 단순히 비례상수 K_l 로 모델링하였다.

$$\theta(s) = K_l \theta_m(s) \tag{1}$$

또한, 리턴 스프링에 의한 부하토크는

$$T_L(s) = K_{s1} \theta(s) + K_{s2} \tag{2}$$

과 같이 나타낼 수 있는데, 스프링토크의 오프셋 K_{s2} 는 스로틀개도가 0°일 때에 발생하는 스프링 토크를 의미한다.

이제 Fig. 4에 기초하여 제어기의 출력신호 $u(t)$ 와 스로틀개도 $\theta(t)$ 사이의 관계를 구한 다음, 이를 상태공간으로 표시해 보자. 모터의 각 위치 $\theta_m(t)$ 는 Fig. 4의 블록도로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\theta_m = \frac{1}{s(Js + f)} (T_m - T_L) \tag{3}$$

직류모터에서는 보통 전기자의 인덕턴스 L_a 값이 매우 작으므로, 이를 무시하면 모터토크는

$$T_m = \frac{K_T (V_a - E_b)}{L_a s + R_a} = \frac{K_T}{R_a} (K_a U - K_b s \theta_m) \tag{4}$$

로 되며, 식 (1), (2) 및 (4)를 식 (3)에 대입하고 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} -\frac{J}{K_l} \theta s^2 + \left(\frac{f}{K_l} + \frac{K_T K_b}{K_l R_a} \right) \theta s + K_{s1} \theta + K_{s2} \\ = \frac{K_T K_a}{R_a} U \end{aligned} \tag{5}$$

식 (5)를 역라플라스변환하여 미분방정식을 구하면

$$\ddot{\theta}(t) = -\frac{1}{J} \left(f + \frac{K_T K_b}{R_a} \right) \dot{\theta}(t) - \frac{K_l K_{s1}}{J} \theta(t)$$

$$-\frac{K_i K_{S2}}{J} + \frac{K_a K_T K_L}{J R_a} u(t) \quad (6)$$

이 된다. 한편, 상태변수를 $x_1(t) = \theta(t)$ 및 $x_2(t) = \dot{\theta}(t)$ 와 같이 스로틀개도 및 그의 미분치인 스로틀밸브의 각속도로 정의하면 상태공간에서의 모델링은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{K_i K_{S1}}{J} & -\frac{1}{J} \left(f + \frac{K_T K_b}{R_a} \right) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} \\ &+ \begin{Bmatrix} 0 \\ \frac{K_a K_T K_L}{J R_a} \end{Bmatrix} u + \begin{Bmatrix} 0 \\ -\frac{K_i K_{S2}}{J} \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

3. 시간지연제어법칙

이 절에서는 일반적인 시간지연제어(TDC) 기법에 대해 간략히 살펴본 다음, 스로틀액츄에이터 제어 시스템에 적용시키기 위해서 단순화된 TDC 법칙과 응답의 정확성과 신속성을 위해서 기준 모델을 가변시키는 방식에 대해서 살펴 보기로 한다.

3.1 TDC 법칙의 개요

먼저 다음의 비선형 시변 플랜트를 고려하여 보자.^(4,5)

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), t) + \mathbf{h}(\mathbf{x}(t), t) \\ &+ \mathbf{B}(\mathbf{x}(t), t) \mathbf{u}(t) + \mathbf{d}(t) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, $\mathbf{x}(t)$, $\mathbf{u}(t)$, $\mathbf{d}(t)$, $\mathbf{f}(\mathbf{x}, t)$ 및 $\mathbf{h}(\mathbf{x}, t)$ 는 상태벡터, 제어벡터, 미지의 외란벡터, 기지의 동역학벡터 및 미지의 동역학벡터를 각각 나타낸다. 이 때, $n \times r$ 제어행렬 $\mathbf{B}(\mathbf{x}, t)$ 은 잠정적으로 알고 있다고 가정하며, 모든 상태변수와 그의 미분치인 $\dot{\mathbf{x}}(t)$ 는 측정가능하거나 추정할 수 있다고 가정한다. 한편, 일반적인 비선형 시변 시스템을 나타내는 다음과 같은 기준 모델을 고려하자.

$$\dot{\mathbf{x}}_m(t) = \Phi(\mathbf{x}_m(t), \mathbf{r}(t)) \quad (9)$$

이 때, $\mathbf{x}_m(t)$ 와 $\mathbf{r}(t)$ 는 기준 모델의 상태벡터와 기준 입력벡터를 각각 나타낸다.

오차벡터를 $\mathbf{e}(t) = \mathbf{x}_m(t) - \mathbf{x}(t)$ 라 정의하면, 원하는 오차 동역학은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\mathbf{e}}(t) = \mathbf{A}_e \mathbf{e}(t) \quad (10)$$

여기서, \mathbf{A}_e 는 오차 시스템 행렬이다. 모든 고유치가 s -평면상의 좌반평면에 위치하도록 행렬 \mathbf{A}_e 를

선정하면, 시간이 경과함에 따라 오차벡터가 0으로 수렴하게 되어 오차 동역학 (10)은 점근적으로 안정되게 된다. 식 (10)을 (8)에 대입하여 정리하면 다음 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \mathbf{B}(\mathbf{x}(t), t) \mathbf{u}(t) &= -\mathbf{f}(\mathbf{x}(t), t) - \mathbf{h}(\mathbf{x}(t), t) - \mathbf{d}(t) \\ &+ \dot{\mathbf{x}}_m(t) - \mathbf{A}_e \mathbf{e}(t) \end{aligned} \quad (11)$$

이 때, 제어입력의 수(r)와 방정식의 수(n)가 같으면 $\mathbf{B}(\mathbf{x}, t)$ 의 역행렬을, 같지 않으면 의사역행렬 $\mathbf{B}^+ = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T$ 를 사용하면, 식 (11)에 대한 근사해가 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \mathbf{u}(t) &= \mathbf{B}^+(\mathbf{x}, t) \{-\mathbf{f}(\mathbf{x}(t), t) - \mathbf{h}(\mathbf{x}(t), t) \\ &- \mathbf{d}(t) + \dot{\mathbf{x}}_m(t) - \mathbf{A}_e \mathbf{e}(t)\} \end{aligned} \quad (12)$$

이 때, $\mathbf{h}(\mathbf{x}(t), t) + \mathbf{d}(t)$ 는 미지의 함수이므로 이 미지함수의 추정치인 $\hat{\mathbf{h}}(\mathbf{x}(t), t) + \hat{\mathbf{d}}(t)$ 를 사용하여야 한다. 시간지연(time delay) L 이 충분히 작고 $\mathbf{h} + \mathbf{d}$ 가 연속함수라면, 이 함수의 추정치는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{h}}(\mathbf{x}(t), t) + \hat{\mathbf{d}}(t) &\approx \mathbf{h}(\mathbf{x}(t-L), t-L) + \mathbf{d}(t-L) \\ &= \dot{\mathbf{x}}(t-L) - \mathbf{f}(\mathbf{x}(t-L), t-L) \\ &+ \mathbf{B}(\mathbf{x}(t-L), t-L) \mathbf{u}(t-L) \end{aligned} \quad (13)$$

즉, 미지의 함수에 대한 추정치가 과거의 측정치, 상태변수 및 제어입력에 대한 정보로부터 구해지게 된다. 이때 시간지연은 플랜트 자체의 특성이나 측정 등에 의해 발생하는 전달지연(transportation delay)과는 완전히 다른 개념임에 유의하여야 한다.

한편, 많은 경우에 행렬 $\mathbf{B}(\mathbf{x}(t), t)$ 가 미지이거나 불확실하므로, 이 경우에 추정치인 $\hat{\mathbf{B}}(t)$ 를 사용하면, TDC 법칙은 식 (12)와 (13)으로부터 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \mathbf{u}(t) &= \hat{\mathbf{B}}^+(\mathbf{x}(t), t) \{-\mathbf{f}(\mathbf{x}(t), t) - \dot{\mathbf{x}}(t-L) \\ &+ \mathbf{f}(\mathbf{x}(t-L), t-L) \\ &+ \hat{\mathbf{B}}(t-L) \mathbf{u}(t-L) \\ &+ \dot{\mathbf{x}}_m(t) - \mathbf{A}_e \mathbf{e}(t)\} \end{aligned} \quad (14)$$

제어법칙 (14)는 시간지연 L 을 샘플링주기 T_s 와 동일하거나 정수배로 취함으로써 이산제어 시스템으로 쉽게 구현할 수 있다.

3.2 스로틀액츄에이터 제어 시스템을 위한 TDC 제어기

2.3절에서의 스로틀액츄에이터 시스템에 대한 모델링으로부터 이 시스템은 단일 입출력을 가진 2차 지연 시스템으로 모델링될 수 있음을 알았다. 그러므로 위에서 유도한 TDC 법칙을 다음과 같이 단순화시킬 수 있다. 이 때, 상태변수는 앞서와 같이 $x_1(t) = \theta(t)$ 및 $x_2(t) = \dot{\theta}(t)$ 와 같이 스로틀 개도 및 그의 미분치인 스로틀 밸브의 각속도로 선정한다. 한편, 2차 시스템에 대한 기준 모델은

$$\begin{cases} \dot{x}_{m1} \\ \dot{x}_{m2} \end{cases} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_n^2 & -\zeta\omega_n \end{bmatrix} \begin{cases} x_{m1} \\ x_{m2} \end{cases} + \begin{cases} 0 \\ \omega_n^2 \end{cases} r(t) \quad (15)$$

와 같이 선정하는데, 여기서, ω_n 과 ζ 는 기준 모델의 고유진동수 및 감쇠비를 나타내며, $r(t)$ 는 기준 신호로 스로틀액츄에이터 시스템에서는 TCS 제어기로부터 주어지는 계단형태의 신호이다. 오차 행렬도 다음과 같이 기준 모델과 유사한 형태로 선정할 수 있다.

$$A_e = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_{ne}^2 & -2\zeta_e\omega_{ne} \end{bmatrix} \quad (16)$$

또한, 제어행렬의 추정치는 $\hat{B}(t) = \{0 \ \hat{b}\}^T$ 로 주어지는데, 이 때의 \hat{b} 는 식 (7)의 모델링으로부터 다음과 같이 근사적으로 구해질 수 있다.

$$\hat{b} = \frac{K_a K_r K_f}{J R_a} \quad (17)$$

이로부터 식 (14)의 TDC 제어법칙은 다음과 같이 단순화될 수 있다.

$$\begin{aligned} u(t) = & \frac{1}{\hat{b}} \{-\dot{x}_2(t-L) + \hat{b}u(t-L) + \dot{x}_{m2}(t) \\ & + \omega_{ne}^2(x_{m1}(t) - x_1(t)) \\ & + 2\zeta_e\omega_{ne}(x_{m2}(t) - x_2(t))\} \quad (18) \end{aligned}$$

여기서, $x_1(t)$ 는 TPS를 통해 측정된 스로틀개도이고, $x_2(t)$ 와 $\dot{x}_2(t-L)$ 는 측정된 스로틀개도를 수치미분하여 추정된 스로틀밸브의 각속도이다.

3.3 가변기준 모델에 근거한 TDC 알고리즘

스로틀액츄에이터 시스템의 위치제어도 다른 경우와 마찬가지로 신속한 응답성과 정확성이 요구된다. 또한 스로틀액츄에이터 시스템의 특성상 스로틀밸브가 움직일 수 있는 범위가 제한되어 있으므로, 이들 제한 근처에서의 오버슈트는 기계적 충동

을 수반하여 소음과 동시에 기계에 손상을 가져올 수 있다. 따라서 오버슈트가 발생하지 않도록 하는 것이 중요한 제어기 설계 기준이 된다. 이러한 오버슈트는 보통 스로틀개도의 큰 변화가 요구될 때 신속한 응답을 얻기위해서 제어입력을 충분히 크게 하기 때문에 발생하므로, 응답속도를 느리게 하면 오버슈트를 어느 정도 방지할 수 있다. 그러나 이 경우에는 오버슈트가 별 문제점이 되지 않는 스로틀개도의 작은 변화에 대해서도 응답성이 저하되는 단점을 갖게 된다. 따라서 스로틀개도의 변화량에 따라서 액츄에이터가 추종해야 하는 기준 모델을 적절히 변화시키 주면, 오버슈트의 방지와 신속한 응답성을 모두 얻을 수 있게 된다.

따라서 본 연구에서는 TDC 제어기의 설계에서 기준 모델을 가변시키는 비교적 단순한 방법을 제안하고자 한다. 식 (15)의 기준 모델에서 기준 입력벡터 $r(t)$ 는 대부분의 경우 계단형태의 신호로 주어지며, 고유진동수 ω_n 과 감쇠비 ζ 에 의해서 실제 플랜트출력 $\mathbf{x}(t)$ 가 추종해야 하는 기준 상태 $\mathbf{x}_m(t)$ 가 구해진다. 여기서는 오버슈트의 방지 및 계산의 편의를 위해서 임계 감쇠(즉, $\zeta=1$)의 경우를 고려하기로 한다. 또한, 오차 동역학의 고유진동수와 감쇠비는 시스템이 안정될 수 있는 값을 선정하여 사용하는데, 이 조건에 대해서는 뒤에서 논의된다. 따라서 가변기준 모델과 관련된 설계변수는 단지 ω_n 이 된다. 동일한 $r(t)$ 에 대해서 ω_n 값이 커지면 다소 급하게 변화하는 기준 모델이 되며, 작아지면 느리게 변화하는 기준 모델이 된다. Fig. 5는 ω_n 을 200 rad/sec로 고정시키고 목표 스로틀개도를 임의로 변화시키는 실험을 수행한 결과인데, 스로틀개도의 변화량이 작은 경우에는 오버슈트 없이 목표값을 신속하게 추종해 가지지만, 변화량이 큰 경우에는 불가피하게 오버슈트가 발생하게 된다. 그림에 표시되지는 않았지만, ω_n 을 충분히 작게 하면 오버슈트는 방지할 수 있지만, 응답성이 느려짐을 알 수 있다. 반면에, Fig. 6은 ω_n 을 100 rad/sec로 고정시킨 채로 Fig. 5와 동일한 목표 스로틀개도에 대해서 실험을 수행한 결과인데, 변화량이 큰 경우에도 오버슈트는 발생하지 않지만, 오버슈트가 별 문제가 되지 않는 변화량이 작은 경우에도 응답이 매우 느림을 쉽게 알 수 있다. 따라서 스로틀개도의 변화량에 따라서 ω_n 을 적절히 변화시킨다면 전체 운전영역에 걸쳐서 오버슈트방지와 신속한 응답성이라는 두 가지 목표를 달성할 수 있

게 된다. 물론 여러 실험을 거쳐서 각 운전영역에 적합한 ω_n 을 선정할 다음, 참고표(look-up table)의 형태로 저장하여 사용할 수도 있지만, 많은 실험을 반복해야 할 뿐만 아니라 매번 참고표를 보강하여 사용해야 한다는 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 단순하지만 체계적인 방법으로 ω_n 을 산출할 수 있는 방법을 제안하기로 한다.

우선 스톱스택츄에이터 시스템이 낼 수 있는 최고 속도와 최고 가속도는 개루프실험에서 최대 입력(즉, 100% 듀티비)을 인가해 준 상태에서 시스템의 출력을 측정함으로써 쉽게 구할 수 있다.⁽⁶⁾ Fig. 7은 PWM 모터 구동회로에서 모터로 입력되는 전압의 듀티비를 변화시키면서 스톱스택츄의 응답을 살펴본 것이다. 듀티비를 100%로 해서 최대의 전류를 흐르게 했을 때 전개상태에서 전폐상태로 가는 데 약 30 msec정도가 소요됨을 알 수 있으며, 이로부터 스톱스택츄에이터의 최고가속도와 최고속도를 산출해 보면 가속도는 약 $0.2/msec^2$ 이 되고 속도가 약 $3.0/msec$ 가 된다. 이러한 최고가속도와 최고속도는 스톱스택츄에이터 구동부의 응답 한계이므로, 이러한 한계를 고려해서 위치제어 시스템의 사양을 결정하여야 한다.

최고가속도와 최고가속도를 알면 현재 위치에서 원하는 위치까지의 도달시간을 계산할 수 있다. 도달시간을 계산하기 위한 기준으로 Fig. 8의 사다리꼴 및 삼각형 속도 프로파일을 선정한다. 이들 프로파일은 실제로 가장 널리 사용되며 계산이 단순하다는 장점이 있다.

먼저 위의 개루프실험에서 구한 최고가속도 및

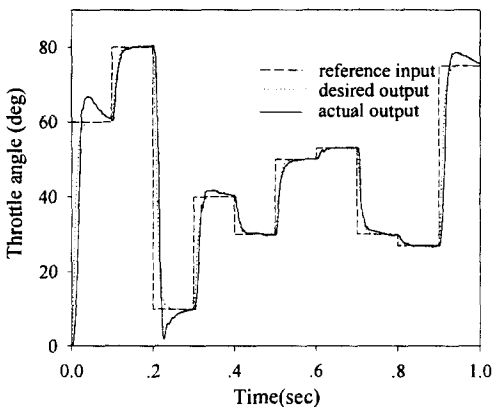


Fig. 5 Experimental results of throttle angle responses with natural frequency fixed at 200 rad/sec

속도를 참고하여 속도 프로파일의 가속도(또는 감속도) α 와 최고속도 ω_0 을 결정한다. 이동해야 될 스톱스택츄의 변화량이 $\Delta\theta$ 으로 주어질 경우에 가감속에 소요되는 시간은 $2t_a=2\omega_0/\alpha$ 가 되며, Fig. 8에서 속도 대 시간곡선의 면적이 바로 각위치에 해당하므로 가감속 구간동안에 이동각도는

$$\theta_a = \omega_0^2 / \alpha \tag{19}$$

이 된다. 따라서 만약 $|\Delta\theta| > |\theta_a|$ 인 경우에는 가감속구간 외에도 최고속도 ω_0 로 속도가 유지되는 정

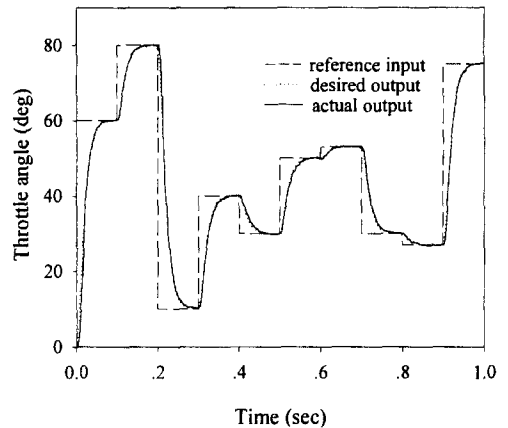


Fig. 6 Experimental results of throttle angle responses with natural frequency fixed at 100 rad/sec

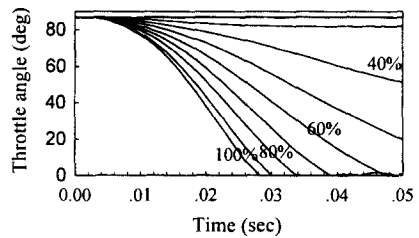


Fig. 7 Responses of throttle actuator system for various duty ratios

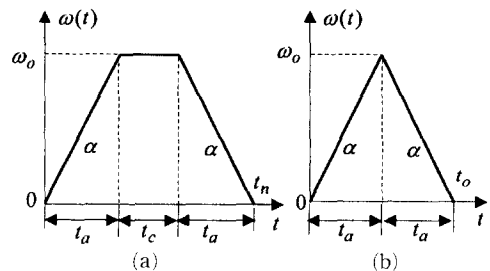


Fig. 8 Velocity profiles; (a) Trapezoidal, (b) Triangular

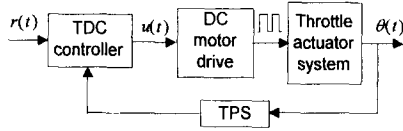


Fig. 9 Block diagram of throttle actuator position control system

속 구간이 존재하여야 하므로 사다리꼴의 속도 프로파일에 해당되는 반면에, $|\Delta\theta| \leq |\theta_a|$ 인 경우에는 정속구간이 존재하지 않는 삼각형의 속도 프로파일에 해당된다.

우선 사다리꼴 속도 프로파일의 경우 도달시간 t_0 는 다음과 같이 계산된다.

$$t_0 = 2t_a + t_c = \frac{2\omega_0}{\alpha} + \frac{\Delta\theta - \theta_a}{\omega_0} = \frac{\omega_0}{\alpha} + \frac{\Delta\theta}{\omega_0} \quad (20)$$

삼각형 프로파일의 경우에는 우선 ω_n 가 미리 설정한 최고속도와는 다른 값으로 되며, 삼각형의 면적이 스톱개도의 변화량 $\Delta\theta$ 라는 조건으로부터 도달시간 t_0 는 다음과 같이 된다.

$$t_0 = 2\sqrt{\Delta\theta/\alpha} \quad (21)$$

한편, 2차 시스템에서는 2% 정착시간으로 $t_s|_{2\%} = 4/\zeta\omega_n$ 이라는 관계를 보통 사용하는데, 여기서는 이 정착 시간 대신에 도달시간 t_0 를 대입하여 다음과 같이 ω_n 을 산출한다.

$$\omega_n = 4/t_0 \quad (22)$$

위의 방법으로 기준 모델의 고유진동수를 가변시켜 스톱개도의 변화량이 클 때는 작은 고유진동수를 갖는 느린 기준 모델을 선정함으로써 오버슈트를 방지할 수 있고, 변화량이 작을 때는 큰 고유진동수를 선정함으로써 빠른 기준 모델을 얻어 신속한 응답을 얻을 수 있다.

마지막으로, 본 연구에서 제안한 가변기준 모델을 갖는 TDC 알고리즘에 대한 안정성에 대해서 고찰해 보기로 하자. 일반적인 TDC 법칙에 대한 안정성 해석은 문헌⁽⁵⁾에 상세히 기술되어 있는데, 이 문헌에서는 안정성을 위한 여러 충분조건을 열거하고 있다. 이 중 기준 모델과 관련된 조건으로 기준 모델이 안정하여야 한다는 것이 있다. 식 (15)와 같은 2차 시스템으로 구성된 기준 모델은 고유진동수가 어떠한 값을 가지더라도 안정하므로, 제안된 가변 기준 모델을 갖는 TDC 알고리즘도 안정하다는 것을 알 수 있다.

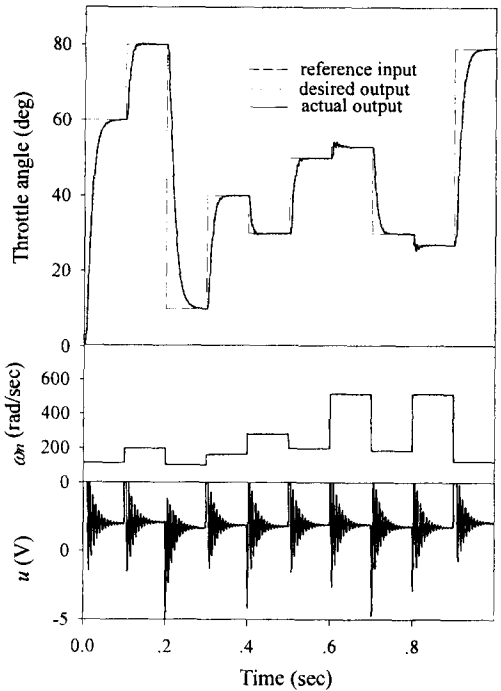


Fig. 10 Simulation results of throttle angle responses with variable natural frequencies

4. 시뮬레이션 및 실험

Fig. 9는 TDC에 기초한 스톱개도추출에이터 시스템의 블록선도를 보여 준다. 이 블록선도에서 직류 모터 드라이브는 Fig. 3의 전자회로에 해당하며, 스톱개도추출에이터 시스템은 직류모터 및 기구부 구성되는 Fig. 4에 해당한다. 또한, TDC 제어기는 위에서 설명한 가변기준 모델을 포함한 제어기로 TCS 제어기 또는 정속주행 제어기로부터의 기준 신호 $r(t)$ 와 TPS로부터 측정하는 스톱개도 및 스톱개도의 각속도를 피드백 받아서 필요한 제어 신호 $u(t)$ 를 산출해 내는 역할을 수행해 준다.

Fig. 10은 가변기준 모델을 사용한 경우에 대한 TDC 제어 시스템의 응답을 보여 주는 시뮬레이션 결과이다. 이때 샘플링주기는 1 msec로 선정하였다. 식 (18)에서 \hat{b} 은 TDC 제어기의 중요한 설계 변수인데, 여기서는 식 (17)에 기초하여 근사적으로 구하였다. 그림에서 보듯이 스톱개도의 변화가 큰 경우에는 기준 모델의 고유진동수가 작게 선정되고, 변화가 작은 경우에는 크게 선정된다는 것을 알 수 있다. 특히, 매우 작은 개도변화에 대해

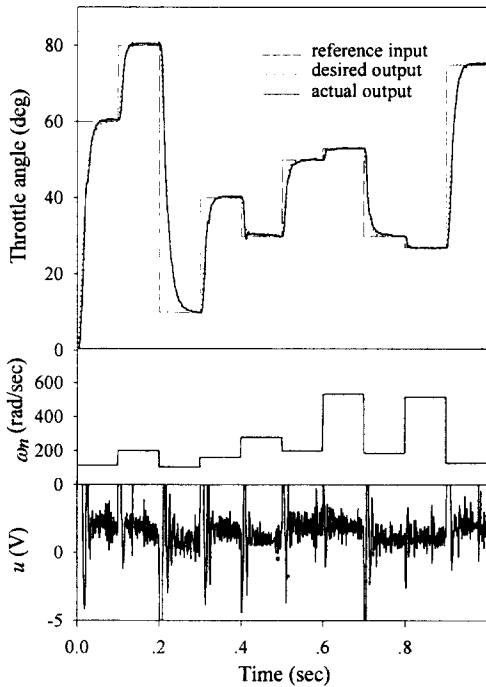


Fig. 11 Experimental results of throttle angle responses with variable natural frequencies

서는 고유진동수가 600 rad/sec 정도까지 크게 설정되었지만, 오버슈트는 발생하지 않았다. 이러한 가변 고유진동수에 의해서 개도의 변화가 큰 경우에도 오버슈트가 발생하지 않으며, 변화가 작은 경우에는 매우 신속하게 목표값에 도달하게 됨을 볼 수 있다.

Fig. 11는 Fig. 10과 동일한 상황에 대한 실험결과로서 샘플링주기는 시뮬레이션과 마찬가지로 1 msec로 선정하였다. 응답은 시뮬레이션의 경우와 거의 유사하게 나타났지만, 제어신호는 진동이 더 심한 것을 볼 수 있다. 이는 실제 실험에서 스로틀개도의 측정은 TPS를 통해서 수행되는데, 이 때 불가피하게 어느 정도의 측정잡음이 발생하게 되며, 이것이 제어기의 오차로 나타나기 때문에 제어기의 출력신호가 진동이 발생하게 되는 것이다. 그러나 이러한 잡음이 제어성능에는 큰 영향을 미치지 않음을 스로틀개도의 실험결과로부터 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 시간지연제어 기법을 이용하여 가

솔린 엔진의 출력조절에 사용되는 스로틀 액츄에이터 시스템의 위치제어 시스템을 개발하였다. 차량에 사용되는 제어 시스템의 특성을 감안하여 가능한 한 단순한 알고리즘과 저렴한 하드웨어를 사용하여 위치제어 시스템의 정확성 및 신속성을 확보하도록 노력하였다. 이 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 복잡한 수학적 모델링 없이 간단한 개루프 실험으로부터 얻은 결과를 이용해 제어 시스템이 추종할 수 있는 기준 모델을 가변할 수 있는 방법을 제시하였다.

(2) 기준 모델의 고유진동수를 스로틀개도의 변화량에 따라 적절히 가변시킴으로써 큰 개도변화량에 보통 수반되는 오버슈트를 제거할 수 있었으며, 작은 개도변화시에는 신속한 응답성을 얻을 수 있었다.

(3) TDC를 사용함으로써 단일의 제어기 설계 파라미터를 사용하여 스로틀액츄에이터의 모든 운전 영역에 걸쳐서 만족할 만한 제어 성능을 얻을 수 있었다.

참고문헌

- (1) 현대자동차, 1993, 그랜저 정비교육교재, pp. 2.1~2.31.
- (2) 현대자동차, 1995, 마르샤 정비지침서-샤시편, pp. 58B1~58B31.
- (3) Kuo, B. C. and Tal, J., 1978, *DC Motors and Control Systems*, SRL Publishing Co.
- (4) Youcef-Toumi, K. and Ito, O., 1990, "A Time Delay Controller for Systems With Unknown Dynamics," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 112, No. 1, pp. 133~142.
- (5) Reddy, S., 1992, *Theory of Time Delay Control and Application to Magnetic Bearings*, Doctoral Thesis, MIT.
- (6) 송재복, 김효준, 민덕인, 1996, "PID 제어에 기초한 스로틀액츄에이터의 위치제어 시스템 개발," 한국자동차공학회 추계학술대회 논문집, pp. 190~197.