〈논 문〉 SAE NO. 97370062

TCS용 스로틀 액츄에이터 제어 시스템

Control System of Throttle Actuator for TCS

송 재 복*, 김 효 준**, 민 덕 인**
J. B. Song, H. J. Kim, D. I. Min

ABSTRACT

Accurate positioning of a throttle valve is required to implement the traction control system (TCS) which improves acceleration performance in slippery roads. In this research, position control system is developed for the main throttle actuator(MTA) system which uses one throttle actuation for small volume and DC servo motor for fast response. In order to drive DC motor, PWM signal generator and PWM amplifier were built and interfaced to the motor and controller. Digital PID control law is used as basic control algorithm. In order to prevent overshoot and improve accuracy, velocity profiles are generated and implemented whenever the target throttle angle is given from the TCS controller. Thanks to velocity profiles, the control performance was very good and only one set of PID gains was used to cover the entire operating range. Also, the resolution of position is about 0.4°, which is better than that of stepping motor also used as throttle actuator in some products. The response time of the developed system is also fast enough to implement the engine control based TCS algorithm.

주요기술용어 : Throttle Position Control(스로틀 위치 제어), Main Throttle Actuator System(주 스로틀 액츄에이터 시스템), TCS(구동력 제어 시스템), Velocity Profile(속도 프로파일), PID Control(PID 제어)

1. 서 론

최근에 전자 및 제어 공학의 비약적인 발전에 힘입어 이를 이용하여 차량의 동적 성능을 향상시키려는 연구가 많이 진행되어 왔다. 이 중의 하나가 저마찰 노면에서의 차량의 가속 성능 및 고속 선회시에 차량의 선회 안정성을 향상시키는 구동력 제어시스템(Traction Control System, TCS)이며, ABS와 더불어 그 보급이 점차 확산

* 정회원, 고려대학교 기계공학과
** 고려대학교 기계공학과 대학원

되어가고 있는 추세이지만, 아직 국산화되지 않아서 전량 외국에서 수입하고 있는 실정이다. 이러한 TCS는 크게 엔진 제어 TCS 방식(이하 ETCS라 칭함)과 브레이크 제어 TCS 방식으로 나눌 수 있는데, ETCS 방식이란 스로틀 밸브, 연료 분사량 또는 점화 진각의 조절 등을 통해서 엔진에서 발생하는 토크량을 제어함으로써 구동 특성을 향상시키는 방식이다. 이 중에서 연료 분사량 또는 점화 진각의 조절방식은 배기가스에 영향을 미칠 수 있으므로, 스로틀 밸브의 조절을 통해서 엔진출력을 제어하는 방식을 주로 사용한다.

스로트 제어 방식은 주 스로틀(Main Throttle) 방식과 보조 스로트(Sub-Throttle) 방식의 두 가지로 분류된다. 주 스로틀 제어 방식에서는 운전자의 가속 페달 조작에 의한 스로틀 개도의 조절과 TCS 작동시에 TCS 제어를 위한 스로틀 개도의 조절이 동일한 하나의 스로틀 밸브를 통해서 수행되므로 다소 복잡한 메커니즘의 스로틀 바디의 설계가 필요하게 된다는 단점이 있지만, 하나의 스로틀 밸브만을 사용함으로써 경량화 및 단가의 저렴화 등을 꾀할 수 있다. 또한, TCS 제어 알고리즘은 스로틀 개도가 하나이므로 비교적 단순하게 되며, ECU와 별도의 인터페이스가 필요없게 되므로 기존의 차량에도 쉽게 장착할 수 있다는 장점이 있다. 반면에, 보조 스로틀 방식에서는 기존의 스로틀 바디 뒤에 새로운 보조 스로틀 바디를 하나 더 장착하여, 평상시에는 보조 스로틀 개도를 전개(Wide Open) 상태로 유지하다가 TCS 작동시에는 액츄에이터에 의해서 적절히 보조 스로틀 개로를 조절하는 방식으로 작동한다. 유사한 형태의 스로틀 바디 2개를 조합하는 형태이므로 구조 및 제작이 간단하지만, 부피가 커지며 2개의 스로틀 밸브의 개도를 동시에 고려하여야 하므로 TCS 제어 알고리즘이 다소 복잡해진다. 또한, 보조 스로틀 밸브의 개도에 대한 정보가 ECU로 들어가야 하므로 기존의 ECU를 변경시켜야 하는 문제점 등이 발생한다.

현재 국내에 장착되고 있는 스로틀 액츄에이터를 살펴보면 다음과 같다. 우선 그랜저에 사용되는 TCS는 주 스로틀 제어와 점화 진각제어를 병행하는데,[1] 주 스로틀 개도의 조절을 위해서 진공액츄에이터를 사용한다. 이 시스템에서는 솔레노이드 밸브의 듀티 제어를 통해서 진공 액츄에이터에 인가되는 부압을 조절하며, 이 결과로 얻어지는 다이어프램의 상하운동을 통해서 스로틀 밸브의 개도를 제어하는 방식이다. 이 방식은 흡기 다기관에서의 부압을 동력원으로 사용할 수 있다는 장점은 있으나, 액츄에이터의 응답이 신속하지 못하다는 단점이 존재한다. 따라서 이 방식에서는 신속하게 엔진 토크 출력을 변화시킬 수 있는 점화 진각 제어를 병행한다. 한편, 마르샤에 장착되는 TCS에서는 주 스로틀 외에 DC 모터로 구동되는 보조 스로틀 바디가 장착되어 있다.[2] 즉, 주 스로틀 밸브의 개도는 운전자의 가속 페달 조작에 의해서, 보조 스로틀 밸브의 개도는 TCS 제어기에 의해서 각각 독립적으로 조절된다. 이 방식은 진공 액츄에이터를 사용하는 시스템에 비해서 응답이 신속하다는 장점이 있는 반면에, 2개의 스로틀 밸브가 존재함으로써 부피가 커지고, 스로틀 바디의 단가가 상승하며, 2개의 스로틀 밸브가 동시에 작동하므로 TCS 제어 알고리즘이 복잡해지는 단점이 있다. 한편, 외국 차량의 경우를 특허 자료로 분석해 보면, 토요타 차량은 주로 DC 또는 스텝 모터에 의해서 구동되는 보조 스로틀 밸브 방식을 채택하고 있으며, 미쓰비시 차량은 주로 주 스로틀 밸브 방식을 채택하고 있다. 또한, GM 차량의 경우 DC 모터에 의해서 구동되는 보조 스로틀 방식이나 주 스로틀 방식을 채택하고 있다.

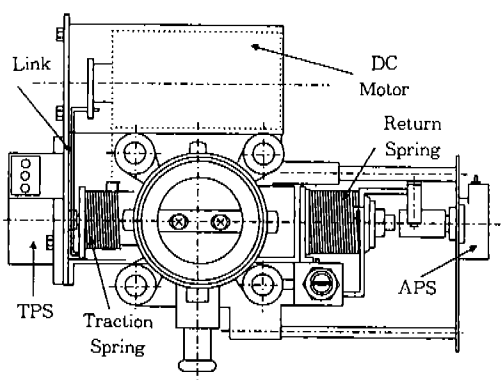
본 연구에서는 보조 스로틀 밸브 없이 주 스로틀 밸브만을 사용하며, DC 서보 모터를 액츄에이터로 하는 주 스로틀 액츄에이터(Main Throttle Actuator;MTA) 시스템을 대상으로 스로틀 개도를 정확하고도 신속하게 조절하는 위치 제어 시스템을 개발하고자 한다. 이 MTA 시스템은 국내 회사에서 개발 및 제작되었으며, 본 연구팀과 연계해서 개량을 통해서 성능을 계속 향상시키고 있는 중이다. 2장에서는 본 연구의 대상이 되는 MTA 시스템의 구조와 기능을 살펴본 다음, MTA 시스템의 액츄에이터인 DC 서보 모터를 구동하는 PWM 구동 시스템의 구성에 대해서 간략히 언급한다. 3장에서는 속도 프로파일

에 기초한 위치 제어 알고리즘에 대해서 설명한 다음, 4장에서는 개발된 위치 제어 시스템의 성능을 여러 관점에서 고찰해 보고, 5장에서 결론을 도출하기로 한다.

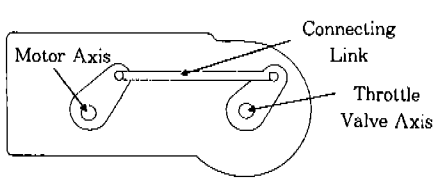
2. 스로틀 액츄에이터 제어 시스템

2.1 스로틀 액츄에이터의 구조 및 기능

Fig.1의 (a)는 본 연구의 대상이 되는 MTA 시스템의 구조를, (b)는 모터와 스로틀 밸브 간에 동력을 전달하는 4절 링크(4-Bar Linkage)를 각각 나타낸 것이다. Fig.2는 MTA의 작동 방식 및 스로틀 개도(Throttle Angle)의 정의를 나타낸 것이다. Fig.1에서 보듯이 스로틀 밸브의 우측은 운전자의 가속 페달 조작과 직결되어 있는데, 가속 페달을 끝까지 밟으면 스로틀 밸브가 전개 상태(즉, 스로틀 개도 90°)로 열리며 페달을 놓으면 리턴 스프링에 의해서 스로틀 밸브는 전폐 상태(즉, 스로틀 개도 0°)로 되돌아온다. 가속 페달에 의한 스로틀 밸브의 각도는 APS



(a) Appearance of MTA System



(b) 4-Bar Linkage

Fig.1 Appearance of MTA and 4-Bar Linkage

(Accelerator Position Sensor)에서 측정된다. 한편, 스로틀 밸브의 좌측은 하단의 그림에서 보듯이 DC 서보 모터와 4절 링크로 연결되어 있는데, 운전자의 가속 페달 조작에 의해서 설정되는 스로틀 개도를 TCS 엔진 제어(이하 ETCS라 칭함)의 필요에 따라 운전자의 의지와 상관없이 적절히 조절해 주는 역할을 수행한다. 이때, 가속페달에 의해 설정된 스로틀 밸브 개도를 한계로 밸브를 더 열어주지는 못하지만, 전폐 상태와 이 한계내에서는 DC 모터의 구동에 의해서 스로틀 밸브를 임의의 각도로 조정할 수 있는 구조로 되어 있다. 더 이상 ETCS를 수행할 필요가 없게 되면 Fig.1의 트랙션 스프링에 의해서 스로틀 밸브는 운전자의 가속 페달에 의해 설정한 개도로 복귀하게 된다. 최종적인 스로틀 밸브의 개도는 TPS(Throttle Position Sensor)에 의해서 측정된다.

MTA 구동부에 있어서 가장 중요한 점은 ETCS 제어기에서 요구되는 개도로 스로틀 밸브를 정확하고도 신속하게 위치시켜 주는 위치 제어시스템을 구성하는 일이다. 이를 위해서 일반적인 DC 서보 모터의 위치 제어 알고리즘을 사용할 수 있는데, 한가지 어려운 점은 트랙션 스프링에 의한 토크는 일정한 크기를 가지는 부하토크가 아니라, 밸브를 닫는 방향으로는 운동을 방해하는 방향으로, 밸브를 여는 방향으로는 운동을 도와 주는 방향으로 작용하며, 그 크기는 스프링의 회전각도에 비례하여 달라진다는 점이다. 또한, MTA 기구부의 4절 링크에서 기인하는 백래시

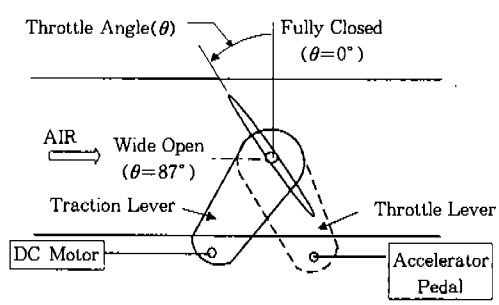


Fig.2 Operation of MTA and Definition of Throttle Angle

와 마찰 등도 정확한 제어를 어렵게 하는 요소로 작용한다.

2.2 액츄에이터 제어 시스템의 구조 및 기능

Fig.3는 MTA 위치 제어 시스템을 개략적으로 나타낸 블록 선도이다. 이 시스템은 크게 제어부, PWM 신호 발생부, PWM 증폭기, 모터, 측정부 및 기타 인터페이스부로 구성되어 있다. 이 중 제어부는 디지털 제어 방식으로 마이크로프로세서에서 프로그램으로 구현된다. 측정부는 모터의 각위치를 측정하는 부분으로서, 비접촉식의 TPS에 의해서 측정된다. 인터페이스부는 측정된 아날로그 신호를 마이크로 프로세서에서 사용할 수 있는 디지털 신호로 변환하는 A/D 변환기와 산출된 제어 신호를 PWM 신호 발생부의 입력 신호로 주기위한 D/A 변환기로 구성되어 있다. 실제 실험에서는 제어부는 마이크로 프로세서 대신에서 PC를, 인터페이스부는 데이터 수집 보드를 사용하였다.

DC 모터를 구동하는 데 필요한 PWM 모터 구동 회로는 Fig.3에서와 같이 크게 PWM 신호 발생 회로, MOSFET을 사용한 H-브리지 회로 및 기타 인터페이스 회로로 구성되어 있다. 우선 디지털 제어를 수행하므로 제어기 부분은 아날로그 회로가 아닌 컴퓨터 알고리즘으로 처리된다. 이 때, 제어기의 출력 신호는 부호와 크기로 분리되는데, 부호는 모터의 회전방향을 결정하는 2진 신호(Direction)로 변환되며, 크기는 D/A

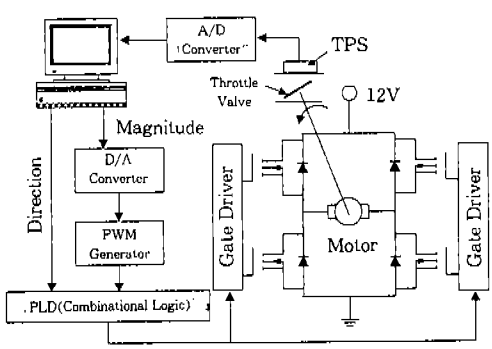


Fig.3 Schematics of MTA Position Control System

변환기에 의해서 아날로그 신호로 변환된다. 이렇게 변환된 아날로그 신호는 PWM 신호발생 회로인 LM3524로 입력되어 입력된 전압에 비례하는 듀티비를 갖는 구형파가 발생된다. 이 때, PWM 주파수는 10kHz로 선정하였다. 이와 같이 발생된 방향 신호 및 PWM 신호는 프로그램가능 논리 소자(PLD)인 GAL16V8에 기억되어 있는 조합 논리의 입력으로 사용된다. 본 연구에 사용된 조합 논리는 여러 PWM 구동 방식 중에서 제한된 단극 방식(Limited Unipolar Mode)[3]을 구현하도록 구성하였다.

Fig.3에서 H-브리지 회로는 4개의 N채널 MOSFET으로 구성되어 있다. N채널 MOSFET를 구동하려면 게이트 전압이 소스전압보다 높아야 하는데, H-브리지 하단의 FET는 공급 전압을 사용하여 구동시킬 수 있으나, 상단의 FET는 별도로 게이트 전압을 높여주는 회로가 필요하므로 이 목적으로 차지 펌프 회로가 내장된 게이트 드라이버 IR2110을 사용하였다. 한편, MTA에 사용되는 DC 모터는 차량의 배터리에서 공급되는 전압을 사용하기 위해서 정격 전압이 12V로 다소 낮게 설계되어 있는 외에는 일반 DC 서보 모터와 거의 동일하다.

3. 위치 제어 알고리즘의 개발

본 연구에서는 우선 MTA에 사용되는 DC 서보 모터의 각종 파라미터를 실험을 통해서 구한 다음, 이를 기초로 하여 대상 DC 모터에 대한 모델을 수립하였다. 그리고, 앞에서 언급한 PWM 모터 구동 회로와 연결하여 모터, 트랙션 스프링 및 기타 기구부에 대한 운동 특성 및 한계 등에 대해서 실험적으로 고찰하였다. 또한, 스텝 형태로 주어지는 스로틀 기준 위치에 기인한 오버슈트를 방지하기 위해서, 가감속을 고려하는 속도 프로파일을 사용하였는데, 이에 대해서 간략히 설명한다.

3.1 MTA용 DC모터의 모델링 및 특성

일반적으로 모터의 위치 또는 속도 제어 알고리즘의 개발에 있어서 가장 선행되어야 할 사항

은 사용할 모터의 특성을 파악하고, 명세서나 실험 등을 통해서 모터의 각종 파라미터를 구해내는 작업이다. DC 모터의 모델링에 대해서는 여러 문헌에 자세히 수록되어 있으므로, 여기서는 필요한 부분만 간략히 언급하기로 한다. Fig.4는 DC모터의 모델을 나타내는 블록 선도로서, 모터의 각 위치 $\theta_m(t)$는 모터에 인가되는 전기자 전압 $v_a(t)$와 부하토크 $T_L(t)$를 입력으로 하여 다음과 같은 전달 함수로 표현할 수 있다.

$$\theta_m(s)=\frac{K_T v_a(s)-(L_a s+R_a)T_L(s)}{s[L_a J_s^2+(JR_a+L_a b)s+(R_a b+K_T K_b)]} \quad (1)$$

여기서, K_T와 K_b는 토크 상수와 역기전력(Back Emf) 상수, L_a와 R_a는 모터 전기자의 인덕턴스와 저항, J와 b는 모터의 관성 모멘트와 베어링에서의 점성 마찰 계수, v_a와 i_a는 전기자 전압 및 전기자 전류, e_b는 역기전력, T_m은 모터에서 발생하는 토크를 각각 나타낸다. 한편, 많은 경우에 전기자 인덕턴스 값은 매우 작으므로 무시되고, 따라서 식 (1)은 2차 시스템의 특성을 보여준다.

이 경우에 부하토크 $T_L(t)$는 주로 Fig.1의 MTA의 트랙션 스프링에 의해서 발생한다. 이 스프링은 ETCS 비작동시에 트랙션 레버가 원점에 위치하도록 하는 리턴 스프링의 역할을 수행하지만, ETCS 작동시에는 스로틀 레버가 밸브를 닫는 방향으로 움직일 때는 운동을 방해하는 방향으로(즉, $T_L>0$), 밸브를 여는 방향으로 움직일 때는 운동을 도와주는 방향으로(즉, $T_L<0$) 작용하며, 그 크기는 양 방향 모두 스프링의 변형 정도에 비례하여 변한다. 따라서 모터에는 일정한 크기를 갖지 않고 계속 가변하는 부하 토크가 작용하게 되며, 이 점이 제어를 어렵게 하는 요인이 된다.

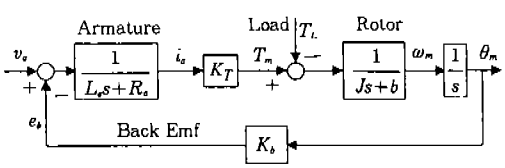


Fig.4 Block Diagram of DC Motor

한편, MTA 기구부의 4절 링크의 연결부에서 불가피하게 약간의 백래시가 존재하며, 기구부의 각 부분에서 마찰이 존재하지만, 이는 수학적인 모델이나 수치로 표시하기에는 어려움이 있다. 하지만, 이러한 백래시와 마찰은 실제 제어시에는 제어 성능을 저하시키는 작용을 한다.

3.2 MTA 시스템의 응답특성

Fig.5는 PWM 모터 구동회로에서 모터로 입력되는 전압의 듀티비를 변화시키면서 스로틀 개도의 응답을 살펴본 것이다. 이때, 가속 페달이 끝까지 눌러져서 스로틀 밸브가 전개된 상태(스로틀 개도 87°에 해당, Fig.2 참조)를 초기상태로 하였으므로, 모터에 전원이 공급되지 않으면 스로틀 개도는 전개 상태에 있고, 모터에 공급되는 전압의 듀티비가 증가하여 모터의 회전각이 커지면 궁극적으로 스로틀 밸브가 전폐된 상태(스로틀 개도 0°에 해당)에 도달하게 되고 더 이상 회전할 수 없게 된다. 모터가 회전하기 위해서는 트랙션 스프링에 의한 부하 및 기구부의 마찰 등에 의한 토크를 이겨내야 하므로, 약 20 % 이하의 듀티비에서는 스로틀 밸브가 거의 움직이지 않는다. 그리고 큰 듀티비를 가진 경우에 대해서도 처음 약 3~5msec 동안은 스로틀 밸브가 거의 응답을 보이지 않는데, 이는 트랙션 스프링에 의한 부하 토크와 밸브 기구부의 마찰을 극복하는 데 필요한 토크를 모터가 발생시키

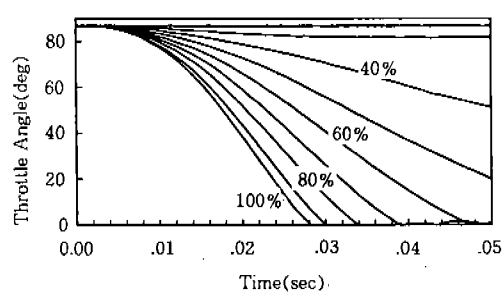


Fig.5 MTA Responses for Various Duty Ratios

기 위해서는 어느 정도 시간이 소요되기 때문이다. 그러나 이러한 지연은 모터에 전원이 공급되지 않다가 처음으로 공급되는 초기상태에 주로 현저하며, 일단 모터에 전원이 공급된 상태에서 매 샘플링 순간마다 새로운 이동 명령에 의해서 움직일 때는 이러한 지연의 크기는 약간 줄어들게 된다.

듀티비를 100%로해서 최대의 전류를 흐르게 했을 때 전개 상태에서 전폐 상태로 가는데 약 30msec 정도가 소요됨을 알 수 있으며, 이로부터 MTA의 최고 가속도와 최고 속도를 산출해 보면 가속도는 약 0.2°/msec²이 되고 속도가 약 3.0°/msec가 된다. 이러한 최고 가속도와 최고 속도는 MTA 구동부의 응답 한계이므로, 이러한 한계를 고려해서 위치 제어시스템의 사양을 결정하여야 한다.

3.3 위치 제어 알고리즘

일반적으로 DC 모터에 기초한 위치 제어는 여러 알고리즘에 의해서 수행될 수 있는데, 여기서는 성능이 우수하면서도 마이크로 프로세서에서 쉽게 구현할 수 있는 PID 제어방식을 채택하였다. Fig.6은 위치 피드백을 갖는 PID 제어기의 블록 선도이다. TPS에 의해서 측정되는 실제 스로틀 개도가 ETCS 제어기에서 설정한 목표 스로틀 개도와 비교되어 위치 오차가 산출되며, 이 오차에 근거하여 PID 제어가 수행된다. 여기서, PID 제어 법칙은 마이크로 프로세서에 의해서 처리될 수 있는 디지털 방식으로 구현된다.[4]

위치 오차 : $e_p(k)=\theta_r(k)-\theta_t(k)$ (2)

제어 신호 :

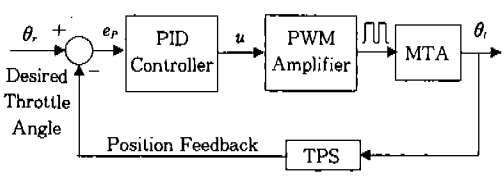


Fig.6 Block Diagram of MTA Position Control System

$$U(z)=\left[K_P+\frac{K_I}{1-z^{-1}}+K_D(1-z^{-1})\right]E_p(z) \quad (3)$$

$$u(k)=u(k-1)+(K_P+K_I+K_D)e_p(k) -(K_P+2K_D)e_p(k-1)+K_De_p(k-2) \quad (4)$$

여기서, K_P, K_I 및 K_D는 각각 비례 이득, 적분 이득 및 미분 이득을 나타내며, θ_r 및 θ_t는 스로틀 밸브의 원하는 개도(즉, 목표 스로틀 개도) 및 실제 개도를 나타낸다. 식 (3)은 디지털 PID 제어법칙을 전달함수 형식으로 나타낸 것이며, (4)는 실제로 프로그램에서 구현되는 차분 방정식의 형태로 표현한 것이다. 여기서, 계산된 제어 신호 $u(k)$의 크기는 모터 제어의 매 샘플링 주기마다 D/A 변환기를 통해서 아날로그 전압 신호로 변환되어 PWM 발생회로로 입력되며, PWM 발생기의 듀티비는 이 전압 신호에 비례해서 결정된다.

3.4 속도 프로파일의 결정

3.4.1 속도 프로파일이 필요한 이유

서보 시스템에서 위치 제어를 수행할 때, 일반적으로 기준 입력으로는 스텝 함수가 많이 사용된다. TCS용 MTA에서도 TCS 제어의 매 샘플링 순간마다 TCS 제어기에서 계산한 스로틀 개도값이 주어지므로, 전체적으로는 스텝 함수의 형태의 기준 입력이 주어진다. 그러나 스텝으로 변하는 기준 입력은 순간적으로 값이 변하기 때문에, 기준 입력과 실제 출력 사이의 차이인 오차가 순간적으로 커지며, 이러한 오차에 근거하여 산출되는 제어 신호도 상당히 커지게 된다. 따라서 액츄에이터의 포화 현상을 초래하거나 큰 오버슈트를 갖는 응답을 발생시키는 등의 문제점이 발생하기 쉽다.

MTA 시스템의 스로틀 밸브의 운동은, 하한으로는 개도 0°에서의 물리적인 스토퍼(Stopper)에 의해서, 상한으로는 운전자의 가속 페달 조작에 의해서 설정된 스로틀 밸브의 위치에 의해서 제한을 받는다. 따라서 이러한 물리적인 한계 위치에 도달할 때, 스로틀 밸브가 스토퍼와 충돌하게 되어 소음을 유발하고 액츄에이터에 무리한

힘을 가하게 된다. 한편, ETCS의 제어 방식을 고찰해 보면[5], ETCS 제어가 필요한 상황을 만나면 우선 운전자에 의해서 과도하게 열려있는 스로틀 밸브를 급격히 닫아서 과도한 엔진 토크를 저감시킨다. 이때, 스로틀 밸브가 전폐 상태 근처로 급격히 움직이게 되는 경우가 많은데, 만약 오버슈트가 존재한다면 필연적으로 스로틀 밸브가 스토퍼와 충돌하게 된다. 이는 듀티비에 따른 MTA의 응답을나타낸 Fig.5에서 쉽게 관찰할 수 있다. 즉, 듀티비가 60% 이상인 경우에 시간이 경과하면 스로틀 밸브가 스토퍼와 충돌하며 더 이상 회전을 할 수 없게 되는데, 이는 소음을 유발하며 차후의 제어 시스템의 성능을 저하시키게 되므로 반드시 피하여야 한다.

이러한 오버슈트나 포화현상은 결국 짧은 순간에 너무나 급격히 모터를 회전시키려는 데서 기인하는 것이므로 스텝 형식의 기준 입력을 부드럽게 변하는 기준 입력으로 변환시켜 주면 피할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 목적으로 MTA의 특성에 기초한 가감속을 고려한 속도 프로파일을 사용하였다. 이러한 목적에 흔히 사용되는 속도 프로파일로는 사다리꼴 속도 프로파일과 삼각형 속도 프로파일이 있다.[6] Fig.7에 나타난 사다리꼴 속도 프로파일은 가속 구간, 정속 구간, 감속 구간으로 구성되어 있으며, Fig.8에 나타난 삼각형 속도 프로파일은 단지 가속 구간과 감속 구간으로만 구성되어 있다. 삼각형 프로파일은 사다리꼴 프로파일의 특수한 경우로 생각할 수 있다.

3.4.2 속도 프로파일의 결정

먼저 위치 제어 시스템의 특성을 고려하여 가속도 α_a, 최고 속도 ω_o 및 감속도 $\alpha_d(>0)$값을 결정하는데, 대부분의 경우에 가속도 α_a와 감속도 α_d는 동일한 값을 사용한다. 이러한 가속도 및 최고 속도의 값은 위에서 언급한 개루프 시험 등을 통해서 액츄에이터가 달성할 수 있는 값으로 설정한다.

이동해야 될 목표 각위치가 θ_n으로 주어진 경우에 가속 시간 t_a 및 감속 시간 t_d는

$$t_a=\frac{\omega_o}{\alpha_a},\ t_d=\frac{\omega_o}{\alpha_d} \tag{5}$$

로 구해지며, Fig.7과 Fig.8에서 속도 대 시간곡선의 면적이 바로 각위치에 해당하므로 가속 및 감속 구간 동안에 이동한 각도는

$$\theta_o=\frac{1}{2}t_a\omega_o+\frac{1}{2}t_d\omega_o \tag{6}$$

이 된다. 따라서 만약 $\theta_n>\theta_o$인 경우에는 가감속 구간 외에도 최고 속도 ω_o로 속도가 유지되는 정속 구간이 존재하여야 하므로 사다리꼴의 속도 프로파일에 해당되는 반면에, $\theta_n<\theta_o$인 경우에는 정속 구간이 존재하지 않는 삼각형의 속도 프로파일에 해당된다.

우선 사다리꼴 속도 프로파일을 살펴 보자. 이때, 정속 구간 시간 t_c는

$$t_c=\frac{\theta_n-\theta_o}{\omega_o}=\frac{\theta_n-\frac{1}{2}t_a\omega_o-\frac{1}{2}t_d\omega_o}{\omega_o} \tag{7}$$

로 구할 수 있으며, 따라서 총 시간 t_n은

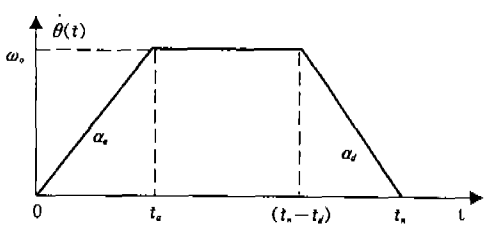


Fig.7 Trapezoidal Velocity Profile

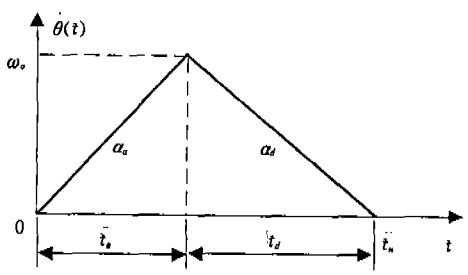


Fig.8 Triangular Velocity Profile

$$t_n = t_a + t_d + t_d = \frac{1}{2}t_a + \frac{1}{2}t_d + \frac{\theta_n}{\omega_o} \quad (8)$$

와 같이 구해진다. 가속, 정속 및 감속 시간을 알고 있으므로 Fig.7과 같이 임의의 시간에서의 속도를 알 수 있으며, 이 속도 프로파일의 면적으로부터 임의의 시간에서의 각 위치를 산출할 수 있다.

$$0 < t \le t_a : \quad \theta(t) = \frac{1}{2}\alpha_a t^2 \quad (9)$$

$$t_a < t \le (t_n - t_d) : \theta(t) = \frac{1}{2}\alpha t_a^2 + \omega_o(t - t_a) \quad (10)$$

$$(t_n - t_d) < t \le t_n : \theta(t) = \theta_n - \frac{1}{2}\alpha_d(t_n - t)^2 \quad (11)$$

다음에는 삼각형 속도 프로파일을 생각해 보자. 우선 Fig.8의 속도 프로파일로부터

$$\theta_n = \frac{1}{2}t_n\omega_o + \frac{1}{2}t_d\omega_o \quad (12)$$

$$\omega_o = \alpha_a t_a = \alpha_d t_d \quad (13)$$

을 쉽게 유도할 수 있으며, 이로부터 총 시간 t_n은

$$t_n = t_a + t_d = \sqrt{\frac{2\theta_n}{\alpha_a(1+\frac{\alpha_a}{\alpha_d})}} + \sqrt{\frac{2\theta_n}{\alpha_d(1+\frac{\alpha_d}{\alpha_a})}} \quad (14)$$

이 된다. 이 때, 임의의 시간에서의 각위치는 다음과 같다.

$$0 < t \le t_a : \theta(t) = \frac{1}{2}\alpha_a t^2 \quad (15)$$

$$t_a < t \le t_n : \theta_n - \frac{1}{2}\alpha_d(t_n - t)^2 \quad (16)$$

ETCS의 수행시에 ETCS는 약 50msec, 모터 제어는 약 1~2msec의 샘플링 주기로 제어가 수행된다. 그러므로 매 50msec마다 ETCS 제어기에 의해서 목표 스로틀 개도(θ_n)가 주어지면 식 (6)에 의해서 θ_o가 산출되며, 이에 따라 속도 프로파일의 형태가 결정된다. 그 다음에는 모터 제어의 매 샘플링 주기마다의 목표가 되는 스로틀 개도가 식 (9)~(11) 또는 (15), (16)에 의해서 계산되며, 모터 제어기는 이 값을 기준 입력으로 하여 PID 제어를 수행하게 된다.

4. 실험결과 및 고찰

위치 제어 알고리즘의 개발을 체계적으로 하기 위해서, 앞서 수행한 DC 모터의 모델링 및 제어 방식, 속도 프로파일 등을 이용하여 다양한 시뮬레이션을 수행하였다. 또한, 시뮬레이션에서 구한 제어기 파라미터 등을 이용하여 여러 다양한 실험을 수행하였다. 여기서는 시뮬레이션과 실험결과를 중심으로 MTA 위치 제어 시스템의 성능을 고찰해 보기로 한다.

4.1 속도 프로파일의 효과

먼저 속도 프로파일을 사용하지 않고 PID 제어를 수행하는 Fig.9의 경우를 살펴보자. 목표 개도 77°에 대해서 PID 제어기를 튜닝한 Fig.9 (a)의 경우에는, 목표 개도 77°는 잘 추종하지만, 다른 목표 개도는 잘 추종하지 못함을 알 수 있다. 특히, 목표 개도가 7°인 경우에는 큰 오버슈트에 의해서 스로틀 밸브가 0°의 스토퍼와 충돌하게 되며 목표 개도에 도달하지 못함을 알 수 있다. 목표 개도 7°에 대해서 PID 제어기를 튜닝한 Fig.9(b)의 경우에는 (a)에서와 같은 큰 문제점은 없으나, 이 경우에도 튜닝한 목표 개도 이외의 개도에 대해서는 제어 성능이 그다지 우수하지 않음을 알 수 잇다.

따라서, 속도 프로파일을 사용하지 않는 경우에는 목표 개도마다 서로 다른 PID 이득값들을 사용하여야만 원하는 제어성능을 얻을 수 있는데, 이를 위해서는 이득 스케쥴링(Gain Scheduling)의 기법이 요구되며, 각 경우의 이득값을

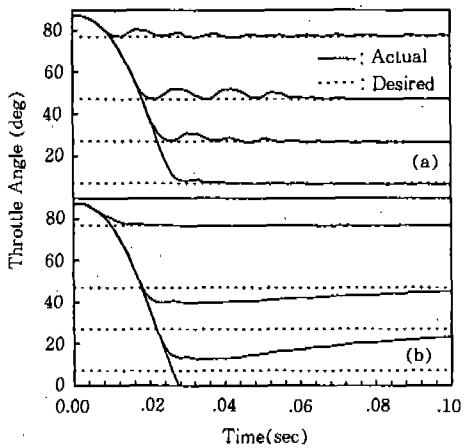


Fig.9 Throttle Angle Responses for PID Control Without Velocity Profiles : (a) PID Gains are Tuned for About 70° Change in Throttle Angle, and (b) PID Gains are Tuned for About 7° Change in Throttle Angle

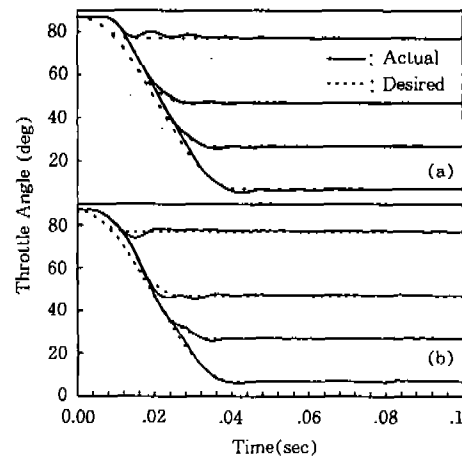


Fig.10 Throttle Angle Responses for PID Control with Velocity Profiles : (a) Simulation Results, and (b) Experimental Results

메모리에 저장하였다가 적절한 보간을 거쳐서 사용하여야 하는 번거로움이 따르게 된다.

이번에는 속도 프로파일을 사용한 경우를 살펴보자. Fig.10은 속도 프로파일의 사용시에 위치 피드백을 갖는 PID 위치 제어 시스템의 제어성능을 나타낸 실험 결과로, (a)는 시뮬레이션 결과를, (b)는 실험 결과를 나타낸다. 초기에 스로틀 밸브의 전개상태(87°)로부터 시작하여 각각 77°, 47°, 27°, 7°를 목표 스로틀 개도로 주었을 때의 스로틀 개도의 응답을 보여준다. 모든 경우에 대해서 거의 오버슈트 없이 신속하게 정상 상태에 도달함을 알 수 있다. 목표 개도가 77° 및 7°인 경우의 정착 시간(Settling Time)이 약 10 및 35msec 정도인데, 이러한 응답 속도는 외국산 제품에서의 40msec 미만이라는 응답 속도 사양[2]을 충분히 만족시키는 수치이다. 여기서는 수록하지 않았지만, 다양한 범위의 실험을 통해서 약 1°의 변화에 대해서는 5msec, 85°의 변화에 대해서는 약 38msec 정도의 시간이 소요됨을 확인할 수 있었다.

이때, 단지 한 조의 PID 이득값(즉, 비례, 적분 및 미분 이득)만이 사용되었다. 이 때, 사용된 PID 이득값은 우선 시뮬레이션 상에서 P 제어, PI 제어, PID 제어의 순서로 이득값을 순차적으로 조정하면서 응답 특성을 파악하였으며, 이 때 일반적으로 PID의 각 이득이 응답에 미치는 정성적인 경향에 기초함으로써 튜닝 시간을 단축하였다. 그리고 실제 실험에서의 최적의 이득값은 시뮬레이션 상에서 구한 이득값과 어느정도 차이가 발생하므로, 시뮬레이션에 구한 이득값을 기초로 하여 실험 상에서 이득값을 정밀 조정하였다. 그러나 속도 프로파일을 사용한 경우에는 최종적으로 사용한 이득값의 약 10~15% 범위 내에서는 이득값 변동에 따른 응답 특성의 변화가 그다지 크지 않다는 점을 여러 실험을 통해서 관찰할 수 있었다.

속도 프로파일 사용 시에는 단지 한 조의 이득값만으로 모든 영역에서 우수한 제어 성능을 얻을 수 있으므로, 제어 시스템의 구현 측면에서 훨씬 바람직하다. 이는 기준 입력의 스텝 변화를 한번에 달성하려고 시도하지 않고, 사다리꼴이나 삼각형 속도 프로파일에 의해서 매 샘플링 시간마다 기준 입력이 조금씩 변화하는 상황으로 전환하였기 때문이다. 즉, 기준 입력의 변화가 큰 경우(87°−70°=80°)나 작은 경우 (87°−77°

=10°)나 상관 없이 매 샘플링 주기마다 달성해야 하는 기준 입력의 변화량이 큰 차이가 없기때문에 단지 한 조의 PID 이득값만을 사용하여도 모든 경우에 대해서 잘 적용되는 것이다.

Fig.11은 스로틀 개도의 변화가 큰 경우부터 작은 경우까지를 다 포함하는 랜덤하게 변하는 기준 입력에 대한 MTA의 응답을 나타낸 것으로, (a)는 시뮬레이션 결과를, (b)는 실험 결과를 나타낸다. 스로틀 개도가 목표 개도를 매우 정확하게 추종하고 있음을 알 수 있다.

4.2 MTA 위치 제어 시스템의 분해능

MTA 위치 제어 시스템에서 비교적 정확하게 추종할 수 있는 목표 스로틀 개도의 최소값이 바로 분해능이 되는데, 이는 ETCS 제어에서 상당히 중요하다. 즉, 엔진의 스로틀 밸브개도가 작은 영역에서는 스로틀 개도의 1° 차이에 의해서도 엔진의 출력 토크값이 달라지기 때문이다.

Fig.12의 (a), (b), (c) 및 (d)는 목표 스로틀개도가 각각 1.0°, 0.8°, 0.4° 및 0.2°의 크기로 변화할 때의 MTA의 응답을 고찰한 것이다. 이 그림에서 스로틀 밸브와 직결되어 스로틀 개도를 측정하는 TPS의 출력은 어느 정도의 잡음을 포함하고 있음을 알 수 있다. 이는 모터 구동 회로는 특성상 고속으로 스위칭되는 PWM 회로를 내포하고 있어서 잡음이 발생할 소지가 많이 있으며, TPS에 의한 스로틀 개도의 측정 신호는 아날로그 신호이므로 이러한 잡음에 민감하기 때문이다. 따라서 신호 대 잡음비(S/N 비)를 고려하여야 하는데, 0.4° 이상의 경우에서는 S/N 비가 비교적 양호하여 스로틀 개도의 변화가 잡음의 크기보다는 더 크지만, 0.2°의 경우에는 기준 입력 변화가 잡음에 묻혀서 식별이 잘 안된다. 그러나 이경우에도 평균적으로는 기준 입력을 추종하고 있음을 알 수 있다. 이 그림에서 개도 변화에 상관 없이 잡음의 정도는 동일하지만, 그래프의 범위가 다르기 때문에 작은 개도에서 잡음이 심한 것으로 보인다는 점에 유의하여야

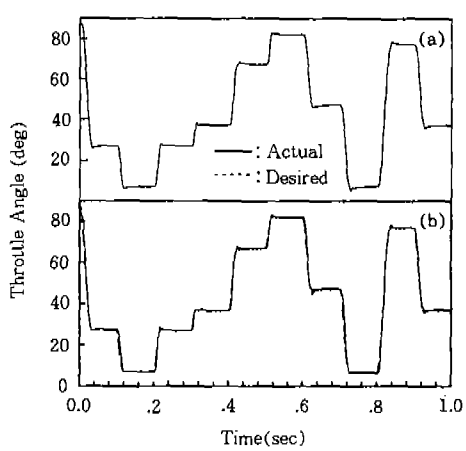


Fig.11 Responses of Throttle Angle for Random Inputs : (a) Simulation Results, and (b) Experimental Results

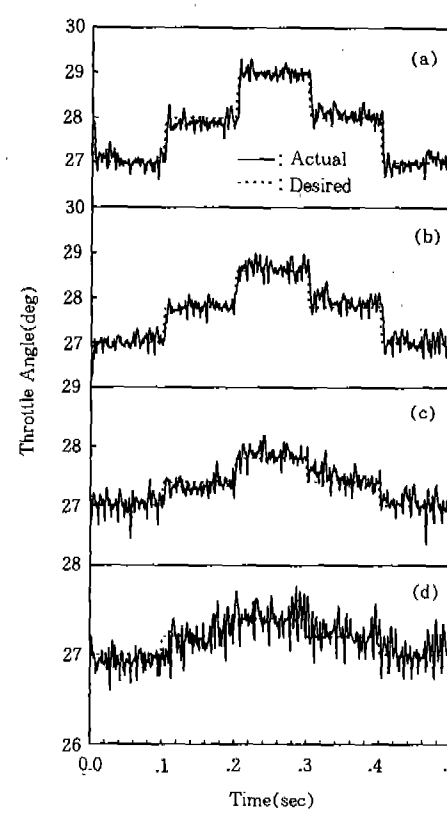


Fig.12 Resolutions of MTA Position Control Systems(Change in Target Throttle Angle : (a) 1.0°, (b) 0.8°, (c) 0.4° and (d) 0.2°)

한다. 또 한가지 주의할 점은 이러한 잡음은 단지 TPS에서의 센서 잡음일 뿐이며, 실제 스로틀 밸브가 이렇게 목표 개도 주위에서 빠르게 진동하는 것은 아니라는 점이다. 실제로 엔코더를 사용하여 측정한 스로틀 개도의 응답은 거의 이러한 잡음을 보여주지 않음을 확인하였다. 이러한 관찰로부터 개발된 MTA의 분해능은 대략 0.4° 정도라고 판단할 수 있다.

보조 스로틀 밸브를 사용하는 스로틀 바디의 경우에는 흔히 스텝 모터를 사용한다. 일반적인 스텝 모터는 1회전당 200펄스를 갖는데, 해프-스테핑(Half-Stepping)을 수행하면 0.9°(=360°/400)의 분해능을 얻을 수 있다. 물론 마이크로 스테핑을 수행하면 훨씬 더 분해능을 높일 수 있지만, 특수한 구동 회로를 사용하여야 하며 가격이 고가이므로 차량에서는 사용할 수 없다. 따라서 위에서 살펴본 DC 서보 모터의 분해능인 0.4°는 스텝 모터의 분해능의 약 절반에 해당함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 보조 스로틀 밸브없이 주 스로틀 밸브만으로 TCS 엔진 제어를 수행할 수 있도록 개발된 주 스로틀 액츄에이터(MTA)에 대한 위치 제어 시스템을 개발하였으며, 시뮬레이션과 실험을 통해서 성능을 평가해 보았다. 이 연구를 통해서 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1) 주 스로틀 밸브만을 사용함으로써 주 스로틀과 보조 스로틀을 병행해서 사용하는 트윈(Twin) 스로틀 바디에 비해서 경량화되고 제어 알고리즘의 구현이 용이해졌다. 또한, 부압을 이용한 진공 액츄에이터를 사용하는 시스템에 비해서 훨씬 응답성이 향상된 제어 성능을 얻을 수 있었다.
2) 스로틀 개도가 전개상태에서 전폐 상태로 이동하는데에 약 38msec 정도가 소요되며, 5° 미만의 개도를 이동하는 데는 약 5~6msec 정도가 소요되는데, 이는 외국산 제품에서의 최대 응답 시간 40msec 미만이라는 사양을 충분히 만족시킨다.
3) 스로틀 액츄에이터의 위치 제어 시스템은 모든 스로틀 개도의 범위에 걸쳐서 정확성을 보여주었으며, 약 0.4° 정도의 분해능을 가짐으로써 스테핑 모터를 사용하는 경우에 비해서 약 2배의 분해능을 얻을 수 있었다.
4) 속도 프로파일을 사용함으로써 제어성능을 향상시켰을 뿐만 아니라, 전체 스로틀의 동작 영역에서 단일의 PID 이득값으로 사용함으로써 제어 알고리즘을 단순화시켰다.

참 고 문 헌

1. 현대자동차, Grandeur 정비교육교재, pp. 2.1~2.31, 1993.
2. 현대자동차, 마르샤 정비지침서-샤시편, pp. 58B1-58B31, 1995.
3. B. C. Kuo and J. Tal, DC Motors and Control Systems, SRL Publishing Co., 1978.
4. K. Ogata, Discrete-Time Control System, Prentice-Hall, 1987.
5. 장종호, 송재복, "스로틀 조절 방식에 의한 차량의 직진 슬립 제어 시뮬레이션", 한국자동차공학회 추계학술대회 논문집, 한국자동차공학회, pp. 414~420, 1995.
6. K. Ogata, System Dynamics, 2nd Ed., Prentice-Hall, 1992.