

터보차저 디젤엔진의 공기 순환계 모델링 및 모델기반 슬라이딩 모드 제어

윤영식^{*1)}·최세범¹⁾·고민석²⁾ 임지훈²⁾

한국과학기술원 기계공학과¹⁾·두산인프라코어 기술원²⁾

Simplified Turbocharged Diesel Engine Air Path Modeling and Control Using Sliding Mode Controllers

Youngsik Yoon^{*1)} · Seibum Choi¹⁾ · Minseok Ko²⁾ · Jihoon Lim²⁾

^{*1)} Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 373-1 Guseong-dong
Yuseong-gu, Daejeon, 305-701, Korea

²⁾ 39-3, Sunghok-Dong, Suji-Gu, Yongin-Si, Gyeonggi-Do, 448-795, Korea Doosan Institute of Technology

Abstract : Recently, the emission of hazardous materials (NO_x and PM) in diesel engine is a critical issue. The regulations with respect to the NO_x and PM are getting stricter, increasingly. Not only the emission problem but also fuel efficiency is considered as a serious issue to develop new turbocharged diesel engines. Thus, currently diesel engines are equipped with exhaust gas recirculation (EGR) and variable geometry turbocharger (VGT).

Basically, the diesel engine with EGR and VGT is a highly nonlinear system as well as a Multi-input and multi-output (MIMO) system. Moreover, since EGR and VGT are powered by exhaust gas, severe coupling effect exists. However, conventional Electric Control Unit (ECU) ignores this severe coupling effect and controls the turbocharged diesel engine by using independent single-input single-output (SISO) control methods. Hence, the model based MIMO control method is required not only to treat the coupling effect of EGR and VGT, but also to improve the performance of the engine operation with high fuel economy and low emission level.

In this paper, three different model based sliding mode control approaches are proposed to regulate intake manifold pressure (MAP) and exhaust manifold pressure (EXMAP), simultaneously, by controlling exhaust gas recirculation (EGR) flow rate and turbine flow rate. The first approach is high performance robust controller design using nonlinear sliding surface. The second approach is extended input-output linearization for sliding mode control. The third approach is using proportional integral sliding mode control (PISMC) method into turbocharged diesel engine.

Key words: Diesel engine(디젤엔진), Exhaust Gas Recirculation (EGR), Variable Geometry Turbocharger (VGT), Model Based Control (모델기반제어), Sliding Mode Control (슬라이딩모드제어)

Nomenclature

F: bunt gas fraction, [-]

m: mass, kg

* 윤영식, E-mail: zerotypel@kaist.ac.kr

p : pressure, kpa
 P : power, KW
 R : ideal gas constant, kJ/kg · K
 T : temperature, K
 V : volume, m^3
 W : mass flow rate, kg/s
 τ : time constant, sec
 η : efficiency, [-]
 c_p : specific heat at constant pressure, kJ/kg · K
 c_v : specific heat at constant volume, kJ/kg · K
 γ : specific heat ratio
 μ : $\gamma - 1 / \gamma$

Subscripts

a : ambient
 c : compressor
 d : desired value
 e : engine(cylinder)
 EGR : exhaust gas recirculation
 VGT : variable geometry turbocharger
 f : fuel
 i : intake manifold
 ref : reference
 t : turbine
 x : exhaust manifold

1. 서 론

최근 디젤엔진 개발에서 질소산화물(NO_x)와 매연(PM)으로 대표되는 유해 배기가스의 처리문제가 큰 이슈화 되고 있다. 연소과정에서 질소산화물의 발생을 줄이기 위해 연소실로 되돌아가는 EGR의 양을 증가시키면 더 많은 매연이 발생하게 된다. 이와 반대로, 매연의 발생을 억제하기 위하여 흡기 매니폴드로 들어가는 공기의 양을 증가시키면 더 많은 질소산화물이 생성된다. 그러므로 이와 같은 현상을 해결하고자 EGR 및 VGT의 동시제어가 요구된다. EGR 및 VGT 액추에이터 제어를 통하여 흡기매니폴드로 유입되는 EGR 및 공기의 양을 효과적으로 조절하게 되면 유해 배기가스의 저감과 더불어 연료 효율 향상을 기대할 수 있다⁵⁾.

터보차저가 장착된 디젤엔진은 다중입력 다중출력(MIMO) 시스템인 동시에 강한 비선형성⁸⁾⁻¹⁰⁾을 띄고 있다. 이와 같은 시스템의 EGR 및 VGT를 동

시 제어하기 위하여 Polytopic form³⁾⁴⁾이 제안되었고, Regular form을 이용한 슬라이딩모드 제어기법²⁾이 사용되었다. 또한 비선형 제어 기법인 Extended Input-output linearization to sliding mode control⁵⁾도 제안되었다.

슬라이딩모드 제어기법은 많은 장점들을 가지고 있다. 첫째로 슬라이딩모드 제어는 과도구간에서의 반응에 강경한 특성을 가지고 있다. 둘째로 불확실성(Uncertainty)에 강경한 특성을 가지고 있다.

본 연구에서는 슬라이딩모드 제어기법을 이용하여 터보차저 디젤엔진의 공기 순환계 모델을 제어하였다. 첫 번째로 High performance robust controller design using nonlinear sliding surface 기법¹⁾을 이용하여 제어하였다. 두 번째로 흡기 매니폴드의 압력과 배기 매니폴드의 압력을 출력으로 하여 Extended Input-output linearization to sliding mode control 기법을 사용하여 제어하였다. 마지막으로 비례적분 슬라이딩 모드제어기법⁷⁾을 사용하여 제어하였다.

본 논문은 다음과 같은 순서로 구성되었다. 2장에서는 터보차저 디젤엔진의 공기 순환계 모델을 구성하는 7차 모델과 3차의 모델을 다룬다, 3장에서는 각 작동구간에서의 상태량 및 출력의 목표 값을 정하는 방법과 3차의 모델을 이용하여 High performance robust controller design using nonlinear sliding surface 방법, Extended Input-output linearization to sliding mode control 방법, 그리고 비례 적분 슬라이딩모드 제어 기법을 이용한 제어기 설계 과정에 대하여 다루도록 하겠다. 4장에서는 선정된 작동구간에 대한 정보와 제안된 서로 다른 세 가지의 모델기반 슬라이딩모드 제어기법을 통한 시뮬레이션 수행 결과를 제시하도록 한다. 결론은 5장을 통해 소개된다.

2. 터보차저 디젤엔진 공기 순환계 모델

본 장에서는 두 가지 터보차저 디젤엔진 공기순환계 모델에 대해서 서술하도록 하겠다. 7차 모델은 각 작동구간에서 상태량 및 출력의 목표 값을 설정하는데 사용된다. 7차 모델에서 측정하기 어려운 상태량을 생략하고, 온도의 변화가 다른 상태량에 비하여 느리게 변화한다는 가정하에 도출한 3차 모델은 모델 기반 제어를 구성하는 용도로 사용

된다.

2.1 7차 모델

터보차저 디젤엔진의 공기순화계 모델을 나타내는 7차 모델의 경우 단열조건을 가정한 상태에서 질량 및 에너지 평형 방정식에 기반하고 있다. 그러므로 흡기 및 배기 매니폴드의 용적은 온도 및 작동 조건에 따라 변화되지 않는다고 가정한다. 흡기 및 배기 매니폴드 내에서의 질량 유량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{m}_i = W_{ci} + W_{egr} - W_{ie} \quad (2.1)$$

$$\dot{m}_x = W_{ex} - W_{egr} - W_{xt} \quad (2.2)$$

여기서 W_{ci} 는 압축기로부터 흡기 매니폴드로 유입되는 공기의 양을 나타낸다. W_{egr} 은 배기 매니폴드로부터 흡기 매니폴드로 다시 유입되는 연소의 가스를 나타내는 EGR 가스의 양을 나타낸다. W_{ie} 는 피스톤의 상하 운동을 통한 펌핑작용에 의해 흡기 매니폴드에서 연소실로 이동하는 혼합기의 질량유량을 나타내며, W_{ex} 는 연소실에서 배기 매니폴드로 이동하는 연소가스의 양을 나타낸다. W_{xt} 는 배기 매니폴드로부터 터빈으로 이동하는 연소가스의 질량유량을 나타낸다.

흡기 매니폴드 및 배기 매니폴드에서의 압력에 관한 특성은 다음과 같이 나타낼 수 있다. 이상기체 상수는 변하지 않는다고 가정한다.

$$\dot{p}_i = \frac{\gamma R}{V_i} (T_c W_{ci} + T_x W_{egr} - T_i W_{ie}) \quad (2.3)$$

$$\dot{p}_x = \frac{\gamma R}{V_x} (T_e W_{ex} - T_x (W_{egr} + W_{xt})) \quad (2.4)$$

흡기 및 배기 매니폴드에서 연소가스의 조성을 나타내는 Burnt gas mixture dynamics는 대기 중 (Ambient)에서의 연소가스 조성이 0이라는 가정하에 다음과 같이 나타낸다.

$$\dot{F}_i = \frac{-W_{ci} F_i + W_{egr} (F_x - F_i)}{m_i} \quad (2.5)$$

$$\dot{F}_x = \frac{W_{ex} (F_e - F_x)}{m_x} \quad (2.6)$$

압축기의 출력을 나타내는 식은 터빈에서 압축기로 출력의 전달을 나타내며 터빈에서 압축기로의 출력의 전달시간을 의미하는 시상수를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{P}_c = \frac{1}{\tau} (-P_c + \eta_{im} P_t) \quad (2.7)$$

여기서 η_{im} 은 터보차저의 기계적인 효율을 나타낸다.

2.2 3차 모델

터보차저 디젤엔진의 공기 순환계를 나타내는 7차 모델의 경우 복잡하고 많은 상태량들을 포함하고 있다. 그러므로 7차 모델을 기반으로 하여 제어기를 구성하기에는 상당한 어려움이 따른다. 그러므로 흡기 매니폴드에서의 기체의 흐름에 중점을 둔 Reduced order model이라고 불리는 3차 모델²⁾이 제안되었다. 3차 모델은 크게 흡기 매니폴드와 배기 매니폴드의 동특성을 나타내는 식과 압축기 출력 (Power)의 동특성을 나타내는 식으로 구성된다. 흡기 및 배기 매니폴드의 압력을 나타내는 식은 이상기체 방정식을 미분하여 도출되었고, 다른 상태량에 비하여 상대적으로 느리게 변화하는 온도는 고정값으로 간주하였다.

$$\dot{p}_i = k_1 \left(\frac{\eta_c}{c_p T_a} \frac{P_c}{\left(\frac{p_i}{p_a} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1} + W_{egr} - k_e p_i \right) \quad (2.8)$$

$$\dot{p}_x = k_2 (k_e p_i + W_f - W_{egr} - W_{xt}) \quad (2.9)$$

$$\dot{P}_c = \frac{1}{\tau} \left(-P_c + \eta_t \eta_m c_p T_x \left(1 - \left(\frac{P_a}{P_x} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right) W_{xt} \right) \quad (2.10)$$

위의 식에서 $k_1 = R_a T_i / V_i$ 이고, EGR 및 VGT 액추에이터의 구동을 통하여 직접적으로 제어하는 값인 EGR 유량과 터빈을 통해 흐르는 유량을 각각 입력으로 설정하였다.

3. 제어기 설계

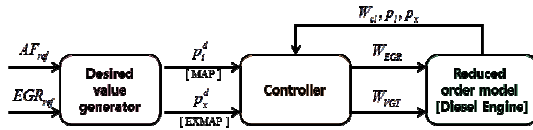


Fig. 1 Block diagram of closed loop system

3.1 작동 구간에서 상태량의 목표 값 설정

디젤 엔진의 작동 성능을 결정하는 요소는 연소실에서의 공연비(Air to fuel ratio)와 배기 매니폴드에서 흡기 매니폴드로 재순환 배기가스인 EGR의 분율(EGR fraction)이다. 언급된 두 가지 요소는 엔진의 회전수와 연소실에 공급되는 연료량의 함수⁵⁾로 정의된다.

$$AF_{ref} = AF_{ref}(N, W_f^d), \quad EGR_{ref} = EGR_{ref}(N, W_f^d) \quad (3.1)$$

공연비의 목표 값은 최적화된 엔진의 교정 맵을 통하여 결정되고, EGR 분율의 목표값은 최대 연료 효율과 최소 질소산화물 생성을 고려하여 정한다. 식(3.1)은 다음과 같이 수식적으로 표현 될 수 있다.

$$AF_{ref} = \frac{W_{ci}^d}{W_f^d} \quad (3.2)$$

$$EGR_{ref} = \frac{W_{egr}^d}{W_{ci}^d + W_{egr}^d}$$

식(3.2)를 사용하여 새로운 계수인 β 를 정의한다.

$$\beta = AF_{ref}(1 - EGR_{ref}) + (AF_s + 1)EGR_{ref} - 1 \quad (3.3)$$

식(3.3)을 사용하여 압축기를 거쳐 흡기 매니폴드로 유입되는 공기량의 목표 값과 EGR의 목표 유량 값을 계산 할 수 있다.

$$W_{ci}^d = \frac{W_f^d}{2} \left[\beta + \sqrt{\beta^2 + 4(1 - EGR_{ref})AF_{ref}} \right] \quad (3.4)$$

$$W_{egr}^d = \frac{EGR_{ref}}{1 - EGR_{ref}} W_{ci}^d \quad (3.5)$$

식(2.8)-(2.10) 와 식(3.3)-(3.5)를 사용하여 정상상태에서 각 상태량의 목표 값을 계산한다.

$$p_i^d = \frac{W_{ci}^d + W_{egr}^d}{k_e} \quad (3.6)$$

$$p_x^d = p_a \left[1 - \frac{W_{ci}^d}{W_{ci}^d + W_f^d} \cdot \frac{T_a}{T_x \eta_t \eta_m \eta_c} \left(\left(\frac{p_i^d}{p_a} \right)^\mu - 1 \right) \right]^{-\frac{1}{\mu}} \quad (3.7)$$

$$P_c^d = \frac{W_{ci}^d T_a c_p}{\eta_c} \left[\left(\frac{p_i^d}{p_a} \right)^\mu - 1 \right] \quad (3.8)$$

3.2 목표 출력 값의 설정

일반적으로 디젤엔진 제어를 위한 출력 값으로 압축기를 통해 흡기 매니폴드로 들어가는 공기의 유량과 흡기 매니폴드에서의 압력을 선택한다. 그 이유는 이와 같은 출력이 MAF와 MAP를 통하여 직접적으로 측정 할 수 있는 상태량이기 때문이다. 본 연구에서는 3.4절에서 소개될 Extended Input-output linearization to sliding mode control 방법의 Internal dynamics의 안정성을 고려하여 기존의 MAP와 배기 매니폴드의 압력센서인 EXMAP를 사용하여 흡기 및 배기 매니폴드에서의 압력을 출력으로 사용하였다.

$$y = \begin{bmatrix} y_1 = p_i - p_i^d \\ y_2 = p_x - p_x^d \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

3.3 High performance robust controller design using nonlinear sliding surface

일반적으로 작은 댐핑 계수는 빠른 응답특성을 보

이지만 큰 오버슈트를 발생시킨다. 이와 반대로 댐핑 계수가 크면 반응 속도는 느려지지만 상대적으로 작은 크기의 오버슈트가 나타나게 된다. 하지만 High performance robust controller design using nonlinear sliding surface 방법을 사용하게 되면 댐핑계수를 목표 값을 추종함에 따라 변화시켜 빠른 응답특성과 작은 오버슈트를 동시에 달성할 수 있다. 초기에는 댐핑계수를 작게하여 빠른 응답특성을 유도하고 출력이 목표 값으로 갈수록 댐핑계수를 증가시켜 오버슈트를 줄이는 방법이다.

식(2.8)-(2.10)을 이용하여 터보차저 디젤엔진 모델을 나타내는 3차 식을 다음과 같은 상태공간방정식의 형태로 변환한다.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x, u) \\ y &= Cx\end{aligned}\quad (3.10)$$

여기서 $x \in \mathbb{R}^n$, $u \in \mathbb{R}^m$ and $y \in \mathbb{R}$.

본 절에서 제안하는 제어 기법을 사용하기 위해서는 식(3.10)의 형태로 나타나는 비선형 디젤엔진 모델을 선택한 작동구간에서 선형화 시켜야 한다. 선형화 과정은 Simulink Control Design Toolbox을 통해 수행되었으며, 상태공간 방정식 형태의 모델은 다음과 같이 Regular form 형태로 변환되었다.

$$\dot{z}_1(t) = A_{11}z_1(t) + A_{12}z_2(t) \quad (3.11)$$

$$\dot{z}_2(t) = A_{21}z_1(t) + A_{22}z_2(t) + B_2u(t) \quad (3.12)$$

$$y = C_1z(t) \quad (3.13)$$

여기서 $z_1 \in \mathbb{R}^{n-m}$, $z_2 \in \mathbb{R}^m$ 그리고 $C_1 = C(Tr)^{-1}$ 비선형 슬라이딩 표면은 다음과 같이 설정한다.

$$e_1(t) = z_1(t) - z_{1d}(t) \quad (3.14)$$

$$e_2(t) = z_2(t) - z_{2d}(t) \quad (3.15)$$

$$s(z, t) = c_1^T e = \begin{bmatrix} F - \psi(y, r)A_{12}^T P & I_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1(t) \\ e_2(t) \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

위의 식에서 비선형 슬라이딩 표면을 구성하기 위한 비선형 함수를 다음과 같이 설정한다.

$$\psi(y, r)_i = -\frac{\beta_i}{1-e^{-1}} \left(e^{-\left(1-\left(\frac{y-y_0}{r-y_0}\right)^2\right)} - e^{-1} \right) \quad (3.17)$$

여기서 β_i 는 튜닝 파라미터로써 출력이 목표 값에 도달하면 가지게 되는 최종 비선형 함수의 값이다. 식(3.17)과 같은 비선형 함수는 시스템의 페루프 댐핑계수를 처음에는 작은 댐핑계수를 가지고 목표 출력 값으로 갈수록 댐핑계수를 증가시키는데 이용된다.

슬라이딩모드 영역에서 시스템은 다음과 같이 나타내진다.

$$s(z, t) = 0 \quad (3.18)$$

그러므로 식(3.18)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$e_2(t) = -\left(F - \psi(y, r)A_{12}^T P\right)e_1(t) \quad (3.19)$$

식(3.11) 과 식(3.18)에서

$$\dot{e}_1(t) = A_{11}e_1(t) + A_{11}z_{1d}(t) + A_{12}e_2(t) + A_{12}z_{2d}(t) - \dot{z}_{1d}(t) \quad (3.20)$$

$$\dot{z}_{1d}(t) = A_{11}z_{1d}(t) + A_{12}z_{2d}(t) \quad (3.21)$$

그리고 식(3.20)와 식(3.21)을 이용하여 정리하면,

$$\dot{e}_1(t) = \left(A_{11} - A_{12}F + A_{12}\psi(y, r)A_{12}^T P\right)e_1(t) \quad (3.22)$$

출력 값이 설정한 출력의 목표 값에 다다르게 되면 식(3.22)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{e}_1(t) = \left(A_{11} - A_{12}\left(F + \beta A_{12}^T P\right)\right)e_1(t) \quad (3.23)$$

$$K_2 = F + \beta A_{12}^T P \quad (3.24)$$

위의 식에서 최종 댐핑 계수를 결정하는 K_2 는 극 배치방법(Pole placement)을 통하여 계산된다.

식(3.24)을 이용하고, 충분히 작은 $\varepsilon > 0$ 을 정의하면,

$$A_{12}^T P - \frac{K_2 - F}{\beta} = H \quad (3.25)$$

$$\|H\| \leq \varepsilon$$

Schur complement를 사용하여 식(3.25)를 선형 방정식으로 바꾸게 되면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon I & H \\ H & \varepsilon I \end{bmatrix} > 0 \quad (3.26)$$

Matlab/Simulink의 LMI toolbox를 사용하여 다음의 조건과 식(3.26)을 만족하고, ε 의 값을 최소화하는 적절한 P 의 값을 계산한다.

$$P > 0 \quad (3.27)$$

$$P(A_{11} - A_{12}F)^T + (A_{11} - A_{12}F)P < 0 \quad (3.28)$$

그리고 Lyapunov 함수를 다음과 같이 설정한다.

$$V = \frac{1}{2} s^T s \quad (3.29)$$

$$\dot{V} = s^T \dot{s} \quad (3.30)$$

$$\dot{V} = s^T \left[c^T A_{reg} z + B_2 u - \frac{d}{dt} \psi(y, r) A_{12}^T P z_1(t) + \rho_{d2} - c^T \dot{z}_d \right] \quad (3.31)$$

$$\dot{V} < 0 \quad (3.32)$$

식(3.31)와 Lyapunov 안정성을 나타내는 식(3.32)를 만족하는 제어입력의 식을 도출하면 다음과 같다.

$$u = -B_2^{-1} \left(-c^T \dot{z}_d + c^T A_{reg} z + Ks + Q \cdot \text{sat}(s, \phi) - \frac{d}{dt} \psi(y, r) A_{12}^T P z_1(t) \right) \quad (3.33)$$

여기서 Q 는 불확실성의 최대값보다 큰 값으로 정한다.

$$\|Q\| \geq \|\rho_{d2}\| \quad (3.34)$$

3.4 Extended Input-output linearization to sliding mode control

3.3절을 통해 소개된 방법과는 달리 본 절에서는 시스템의 비선형적 특성을 그대로 유지한 상태에서 식을 전개하여 제어입력에 관한 식을 도출해 내도록 한다.

슬라이딩 표면을 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} S_1 &= p_i - p_i^d \\ S_2 &= p_x - p_x^d \end{aligned} \quad (3.35)$$

식(2.8)-(2.9), 식(3.5)-(3.6) 그리고 식(3.9)으로부터

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= k_1 \left(W_{ci} - k_e (\bar{y}_1 + p_i^d) \right) + k_1 u_1 = \dot{S}_1 = -\lambda_1 \cdot \text{sat}(S_1, \phi) \\ \dot{y}_2 &= k_2 \left(k_e (\bar{y}_1 + p_i^d) + W_f \right) - k_2 u_1 - k_2 u_2 = \dot{S}_2 = -\lambda_2 \cdot \text{sat}(S_2, \phi) \end{aligned} \quad (3.36)$$

위의 식에서 변수 λ_1 과 λ_2 는 슬라이딩 모드를 강화하도록 설정된다.

식(3.36)으로부터 제어입력과 관련된 식을 도출하게 되면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u_1 &= -(W_{ci} - k_e p_i) - k_1^{-1} \lambda_1 \cdot \text{sat}(S_1, \phi) \\ u_2 &= W_{ci} + W_f + k_1^{-1} \lambda_1 \text{sgn}(S_1) + k_2^{-1} \lambda_2 \cdot \text{sat}(S_2, \phi) \end{aligned} \quad (3.37)$$

이렇게 도출된 제어입력의 효용성을 증명하기 위하여 시스템의 Zero dynamics를 검사해야 한다. Zero dynamics는 입력을 통하여 시스템의 출력을 0으로 유지 할 때의 Internal dynamics를 의미한다.

$$\begin{aligned} \bar{y}_1 &= \bar{y}_2 = \dot{\bar{y}}_1 = \dot{\bar{y}}_2 = 0 \\ \dot{\bar{y}}_1 &= k_1 \left(W_{ci} - k_e (\bar{y}_1 + p_i^d) \right) + k_1 u_1 = 0 \\ \dot{\bar{y}}_2 &= k_2 \left(k_e (\bar{y}_1 + p_i^d) + W_f \right) - k_2 u_1 - k_2 u_2 = 0 \end{aligned} \quad (3.38)$$

$$u_{1z} = -W_{ci} + k_e p_i, \quad u_{2z} = W_f + W_{ci} \quad (3.39)$$

식(3.36)에서 상대차수(Relative degree)가 [1 1]이고, 제어기 구성을 위한 Reduced order model의 총 시스템 차수가 3차이다. 그러므로 출력을 흡기 및 배기 매니폴드의 압력으로 정의하였을 때 1차의 Internal dynamics가 존재하게 된다. 여기서 상대차수란 입력이 분명하게 나타날 때까지 출력을 시간에 대하여 미분한 총 횟수를 의미한다. 식(3.39)에서 도출한 입력을 식(2.10)에 넣어 Internal dynamics의 안정성을 검증하게 되면 다음과 같다.

$$\dot{P}_{cz} = \frac{1}{\tau} \left(-P_{cz} + \eta_l \eta_m c_p T_x \left(1 - \left(\frac{P_d}{P_x} \right)^\mu \right) (W_f + W_{ci}) \right) \quad (3.40)$$

그러므로 시스템의 Zero dynamics가 안정적 이므로 식(3.37)을 통해 구성된 제어기는 의미가 있다고 할 수 있다.

3.5 비례 적분 슬라이딩 모드 제어기(PISMIC)

슬라이딩모드 제어기법의 장점 중 하나는 불확실성에 강건하다는 점이다. 3.3절과 같이 시스템을 선형화 하게 되면 선형화 과정에서 불확실성이 생성될 수 있다. 또한 3.3절에서 생성된 불확실성의 경우 부정합 시스템의 불확실성(Unmatched uncertainty)이므로 입력을 통해서 효과적으로 제거할 수 없는 문제점을 가지고 있다. 그러므로 이러한 문제를 해결하기 위하여 비례 적분 슬라이딩모드 제어기법을 사용하였다. 그리고 제어기의 우수성을 증명하기 위해서 일반적인 슬라이딩모드 제어기법을 사용한 경우와 비교를 수행하였다.

3.4절과 마찬가지로 출력을 식(3.9)와 같이 설정하고, 터보차저 디젤엔진의 Reduced order model을 식(3.10)과 같이 나타내었다. 기존의 시스템은 비선형성을 가지고 있는데 작동구간에서의 선형화 과정을 거치게 되면서 불확실성이 발생하게 된다. 이러한 불확실성은 기존의 시스템과 선형화 과정 후의 시스템의 반응성 차이로 정의된다.

$$f(x, u) - (Ax + Bu) = Fw \quad (3.41)$$

선형화 과정에서의 불확실성을 고려하여 시스템의 상태공간 방정식을 다시 서술하게 되면 다음과 같다.

$$\dot{x}_l = Ax + Bu + f(x, u) - (Ax + Bu) \quad (3.42)$$

슬라이딩 표면을 설정하고, Lyapunov 안정성을 만족시키는 일반적인 슬라이딩 모드 제어 입력을 구하게 되면 다음과 같다.

$$s = y - y_d \quad (3.43)$$

$$\dot{V} = s\dot{s} = s(CAx + CBu + CFw - \dot{y}_d) < 0 \quad (3.44)$$

$$u = -(CB)^{-1} (CAx + Ks + Q \cdot \text{sat}(s, \phi) - \dot{y}_d) \quad (3.45)$$

Q 는 앞에서와 마찬가지로 불확실성의 최대값을 고려하여 정의한다.

$$\|Q\| \geq \|CFw\| \quad (3.46)$$

비례 적분 슬라이딩 모드 제어기의 경우 슬라이딩 표면을 설정할 때 기존의 슬라이딩 표면에 오차를 적분하는 요소를 추가하여 다음과 같이 설계한다.

$$s = y - y_d + \lambda \int_0^t (y - y_d) d\tau \quad (3.47)$$

이와 같은 경우, Lyapunov 안정성을 만족시키는 제어 입력은 다음과 같이 도출된다.

$$u = -(CB)^{-1} (CAx + Ks + Q \cdot \text{sat}(s, \phi) - \dot{y}_d + \lambda(y - y_d)) \quad (3.48)$$

4. 시뮬레이션 결과

3장에서 제안된 서로 다른 세가지 제어기법을 시스템에 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 정상상태 응답특성을 살펴보기 위하여 Table 1²⁾의 작동구간 1에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 과도상태의 응답특성을 살펴보기 위하여 Fig. 2와 같이 작동구간을 변화시켜 시뮬레이션을 수행하였다.

첫 번째로 제안된 방법인 High performance robust controller design using nonlinear sliding surface 기법을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였고, 제안된 방법과는 달리 선형적인 슬라이딩 표면을 갖는 제어기와 비교를 통하여 제안된 제어기의 성능을 평가하였다. Fig. 3은 시간이 지남에 따라 슬라이딩 표면이 0으로 수렴하는 것을 보여주고, Fig. 4는 설정한 출력이 목표 값으로 수렴하는 것을 보여준다. 하지만 Fig. 3와 Fig. 4를 통하여 슬라이딩 표면은 0으로 수렴하지만 모델에서 나오는 출력 값이 목표 출력 값을 완전히 추종하지 못하고 일정한 오차가 발생하는 결과를 확인할 수 있다. 이러한 오차는 시스템을 선형화하는 과정에서 나타나는 불확실성에 기인한다. 또한 선형화 과정에서 발생한 불확실성은 부정합 시스템의 불확실성(Unmatched uncertainty)이므로 제어입력을 통해서 효과적으로 제거할 수 없다, 그러므로 제안된 제어기를 통한 결과가 목표 출력 값

을 완벽하게 추종하지 못하는 결과를 보이는 것이다.

두 번째로 제안된 제어기법은 Extended Input-output linearization to sliding mode control이다. 이 방법은 시스템을 해당 작동구간에서 선형화시키지 않고 비선형 식을 그대로 사용하여 제어기를 구성하였다. 그러므로 선형화 과정에서 발생할 수 있는 불확실성 인자를 근본적으로 제거하였다. 그 결과 Fig. 5와 Fig. 6에서 확인할 수 있듯이 슬라이딩 표면은 시간이 지남에 따라 0으로 수렴하고, 출력으로 설정한 각 상태량은 목표 값을 잘 추종하는 것을 알 수 있다. 과도응답 특성을 보기 위하여 Fig. 2와 같이 작동 구간을 1에서 2로 변화시켰다가 다시 1로 돌아오는 궤적을 구성하였다. 그리고 이러한 궤적을 목표 값으로 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 비록 과도구간에서 약간의 오버슈트와 언더슈트가 발생하기는 하지만 전반적으로 목표 값을 잘 추종하고 있는 것을 Fig. 7을 통하여 확인할 수 있다.

세 번째로 제안된 제어기법은 비례 적분 슬라이딩 모드 제어기법이다. 이 기법은 기존의 슬라이딩 표면 구성에 적분요소를 추가하였고, 선형화 과정에서 발생한 불확실성을 고려하였다. 그리고 불확실성을 제어입력을 통하여 제거하여 목표 값을 보다 잘 추종할 수 있도록 설계하였다. 이렇게 설계된 제어기와 기존의 일반적인 슬라이딩 표면을 사용하는 제어기를 비교하여 비례 적분 슬라이딩 모드 제어기의 우수성을 검증하였다. 시뮬레이션은 정상상태와 과도상태에 대하여 각각 수행되었다. 그 결과 일반적인 슬라이딩 표면을 갖는 제어기는 과도상태뿐만 아니라 정상상태 응답특성에서도 목표 값을 추종하지 못하는 결과를 보였다. 하지만 비례 적분 슬라이딩모드 제어기법의 경우 정상상태와 과도상태 모두에서 목표 값을 잘 추종하는 것을 Fig. 8과 Fig. 9을 통하여 확인할 수 있다.

Table 1 Operating points used in simulation

Parameter	Operating point1	Operating point2
Engine speed	2000rpm	2000rpm
AF_{ref}	45	22.5
EGR_{ref}	0.4	0.1
W_f	2.2/3600(kg/s)	6.3/3600(kg/s)

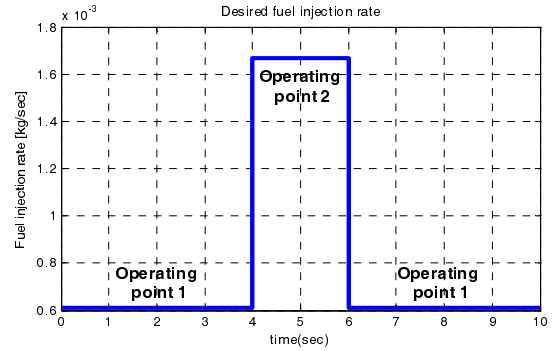


Fig. 2 Transient response trajectory

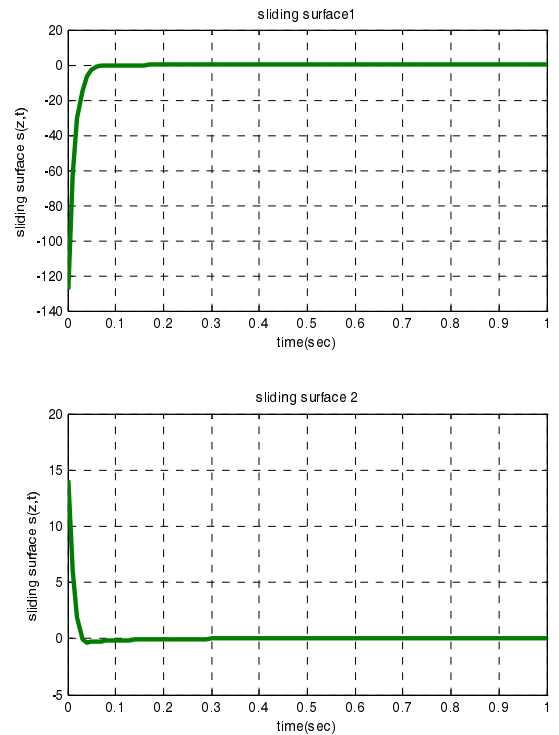


Fig. 3 Sliding manifolds of high performance robust controller design using nonlinear sliding surface at the operating point 1

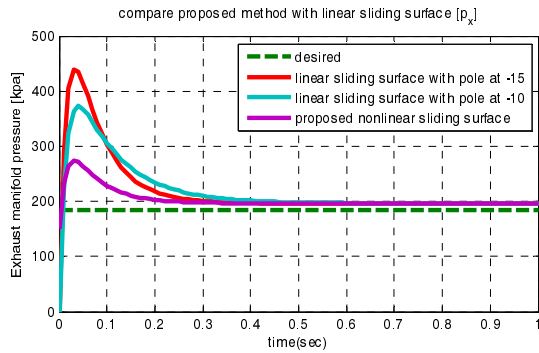
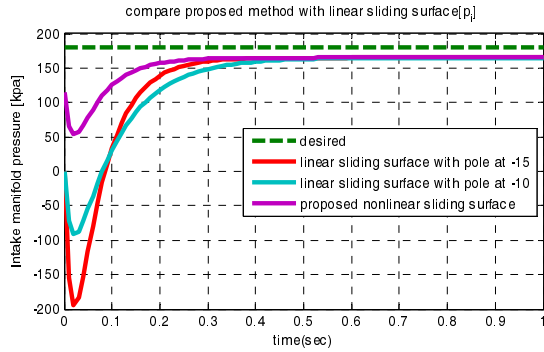


Fig. 4 Steady state output regulation response of high performance robust controller design using nonlinear sliding surface at the operating point 1

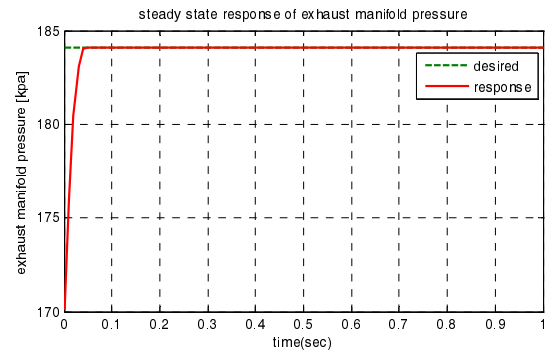
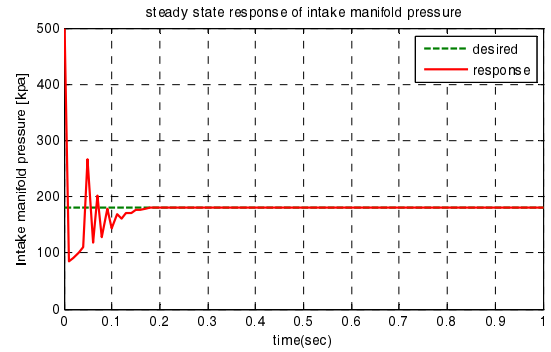


Fig. 6 Steady state output regulation response of extended input-output linearization to sliding mode control at the operating point 1

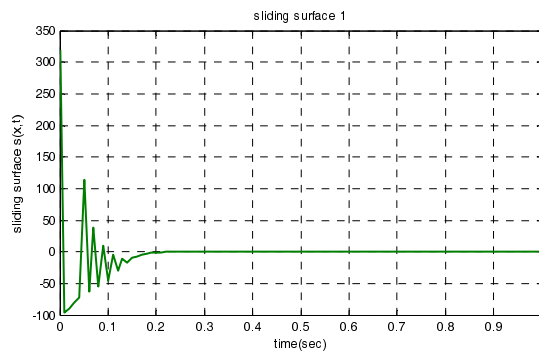
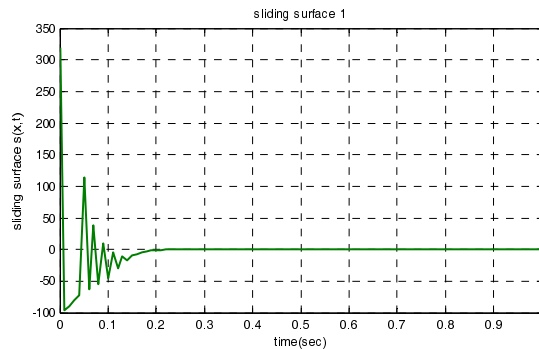


Fig. 5 Sliding manifolds of extended input-output linearization to sliding mode control at the operating point 1

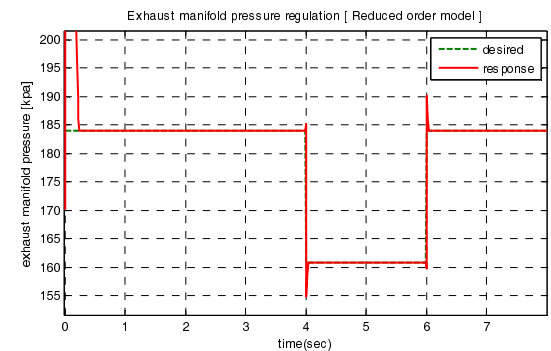
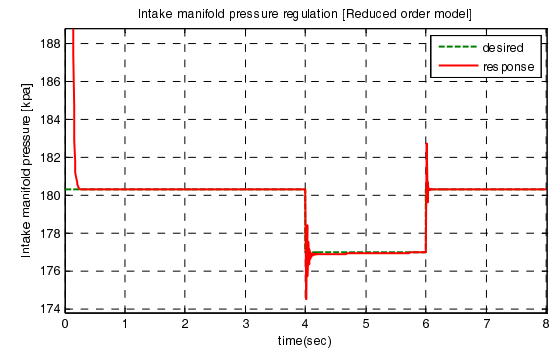


Fig. 7 Transient output regulation response of extended input-output linearization to sliding mode control

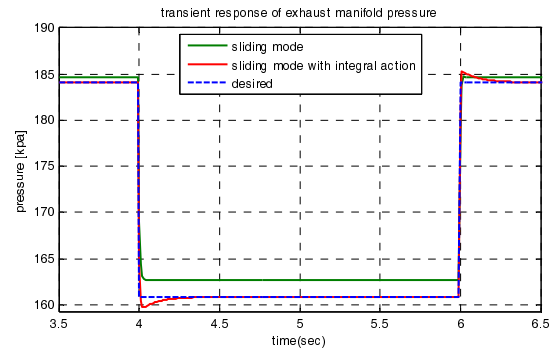
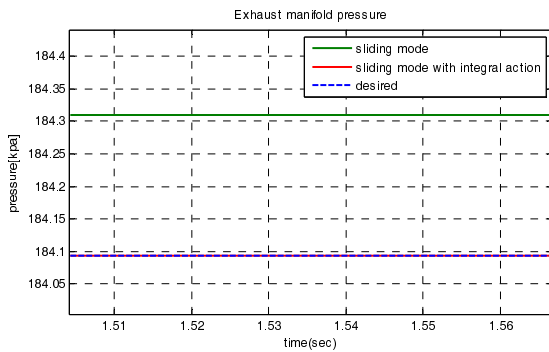
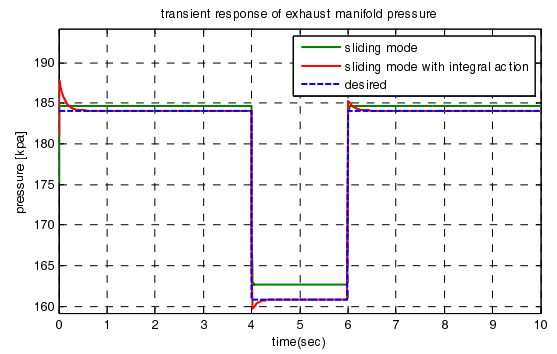
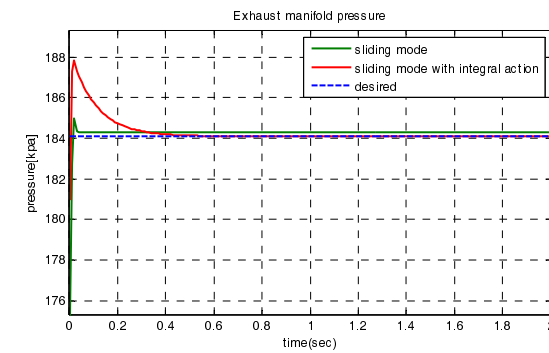
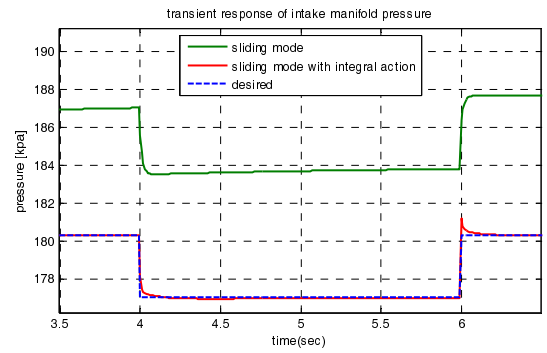
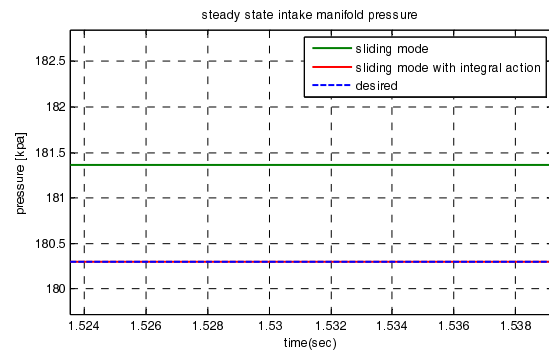
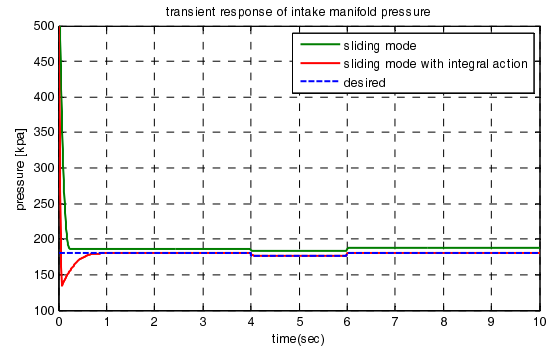
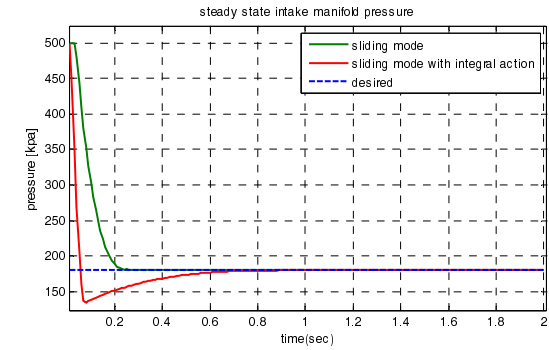


Fig. 8 Steady state output regulation response of PI sliding mode control

Fig. 9 Transient output regulation response of PI sliding mode control

5. 결론

현재 사용되고 있는 EGR 및 VGT의 커플링 효과를 무시한 SISO 기반의 PID 제어기의 경우 EGR 및 VGT를 독립적으로 제어하기 때문에 강화되는 배기가스 규제에 적극적으로 대응하기에는 한계가 있다. 그래서 제안된 것이 연소가스에 영향을 받는 EGR 및 VGT의 커플링 효과를 고려한 MIMO 모델기반 제어기이다. 이러한 제어기를 이용하면 보다 정확하게 터보차저 디젤엔진의 연소과정을 제어할 수 있으므로 강화되는 배기가스 규제에 유연하게 대처할 수 있으며 연비 향상의 효과도 기대할 수 있다. 이와 더불어 연소실로 유입되는 EGR의 양을 증가시켜 중저부하 운전영역에서 PM과 NO_x를 동시에 저감시킬 수 있는 저온연소 모드를 구현하여 멀티모드 운행을 실현할 수도 있다.

본 연구에서는 터보차저 디젤엔진의 공기 순환계 모델을 단순화시킨 Reduced order model을 토대로 모델기반 제어기를 구성하였다. 또한 슬라이딩 모드 제어기법을 이용한 서로 다른 제어기를 구성하여 정상상태와 과도상태에 대하여 각각 시뮬레이션할 수 행하였다.

References

- 1) Bandyopadhyay, B., Deepak, F., Kim, K. S., "Sliding Mode Control Using Novel Sliding Surfaces", Springer, 2009.
- 2) Utkin, V., Chang, H.-C., Kolmanovski, I., and Cook J., "Sliding Mode Control for the Variable Geometry Turbocharged Diesel Engines," Proceedings of the 2000 American Control Conference, Chicago, June, pp. 584-588, 2000.
- 3) Bengea, S., DeCarlo, R., Corless, M., and Rizzoni, G., "A Polytopic System Approach for the Hybrid Control of a Diesel Engine using VGT/EGR", Technical Report, Purdue University, 2002.
- 4) Bengea, S., DeCarlo, R., Corless, M., and Rizzoni, G., "A Polytopic System Approach for the Hybrid Control of a Diesel Engine using VGT/EGR," Technical Report, Purdue University, 2002.
- 5) Upadhyay, D., "Modeling and Model based Control Design of the VGTEGR System for Intake Flow Regulation in Diesel Engines", Ph.D. dissertation, Ohio State University, Columbus Ohio, 2001.
- 6) Upadhyay, D., Utkin, V., Rizzoni, G. "Multivariable Control Design For Intake Flow Regulation Of A Diesel Engine Using Sliding Mode", IFAC Congress, Transportation and Vehicles, Control of Advanced Engines, 2002.
- 7) Koshkouei, A. J., Burnham, K., "Control of DC Motors Using Proportional Integral Sliding Mode", Control Theory and Applications Centre, Coventry University, Coventry CV1 5FB, UK
- 8) Jung, M., "Mean-Value Modeling and Robust Control of the Airpath of a Turbocharged Diesel Engine", PhD thesis, University of Cambridge, 2003.
- 9) Wang, J., "Robust Nonlinear Control with Singularity Avoidance for Diesel Engines having Multiple Combustion Modes", Proceedings of the American Control Conference, 4401-4406, 2007.
- 10) Wang, J., "Hybrid Robust Air-path Control for Diesel Engines Operating Conventional and Low Temperature Combustion Modes", IEEE Transactions on Control Systems Technology, 16, 2008.
- 11) BC. Glenn, "Coordinated Control of The Turbo Electrically Assisted Variable Geometry Turbocharged Diesel Engine with Exhaust Gas Recirculation", PhD thesis, The Ohio State University, 2005
- 12) Junyoung Huh, Jineun Chung, Youngwook Jin, et al., "Coordinate Control of EGR and VGT in the Diesel Engine", KSAE, Vol. 16, No. 4, pp.159-164, 2008.