

EGR과 VGT가 장착된 디젤엔진 제어를 위한 적응 기법의 개발

김수영¹⁾ · 진호민^{*2)} · 최세범³⁾ · 고민석⁴⁾

한국과학기술원 기계공학과^{1)*2)3)} 두산인프라코어 기술원⁴⁾

Development of an Adaptation Law for Controlling EGR & VGT Based Diesel Engine

Sooyoung Kim¹⁾ · Hyomin Jin^{*2)} · Seibum Choi³⁾ · Minseok Ko⁴⁾

^{1)*2)3)}Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 335 Gwahangno, Yuseong-gu, Daejeon 305-701, Republic of Korea

⁴⁾39-3, Sungbok-Dong, Suji-Gu, Yongin-Si, Gyeonggi-Do, 448-795, Korea Doosan Institute of Technology

Abstract : 본 연구는 ‘EGR(exhaust gas recirculation) & VGT(variable geometry turbine) 시스템이 적용된 디젤 엔진 제어를 위한 적응 기법의 개발’에 관한 것이다. 자동차 매연에 대한 환경규제가 점점 심해지고 있는 상황에서 디젤 엔진의 개발이 자동차에 친환경성을 접목시키기 위한 하나의 해답이 될 수 있다. 물론 환경규제를 맞추는 것만이 목표가 아니라 본래 디젤이 가지고 있던 장점(좋은 연비, 높은 토크 등)들은 유지될 수 있도록 제어를 하는 것이다. 엔진 제어를 하기 위해서는 제어의 대상이 되는 엔진에 대한 모델링과 제어기 설계 과정이 필요하다. 본 연구에서는 모델링과 제어기 설계 자체보다는 제어가 적절하게 이뤄지게 하기 위한 적응 기법(adaptation law)을 설계하는 것에 초점을 맞췄다. 본 연구에서 사용된 엔진 모델은 중형 6기통 디젤엔진 air management system 모델이다. 본 모델은 MATLAB의 simulink를 통해 구현되었으며 제어의 대상이 되는 플랜트로서 본 논문 후반부에서 시뮬레이션을 하는데 이용될 것이다.

디젤 엔진 air management system은 크게 압축기(compressor), VGT, 흡기 매니폴드(intake manifold), 실린더, 배기 매니폴드(exhaust manifold), EGR 등 6개의 파트로 이루어져 있다. 제어를 위해 위 시스템의 주요 열동역학적 특성만을 나타내는 모델링을 수행하였고, 그 자세한 내용에 대해서는 2장에서 다룰 것이다.

3장에서는 2장에서 다룬 3차 엔진 모델을 기반으로 제어기를 구성하고 전체적인 제어 알고리즘 구조에 대해 설명하도록 하겠다. 본 연구에서 다루는 제어기는 모델 기반(model-based)이라는 특징이 있는데 본 연구를 통틀어 가장 중요한 개념이자 본 연구의 주제인 적응 제어 기법과 밀접한 관련이 있다. 엔진 제어에 있어서 기존의 제어기들은 실험결과 값이나 튜닝을 기반으로 하는 맵 기반의 제어기가 대부분이었지만, 본 연구에서는 맵 기반 제어기에 비해 모델 기반 제어기가 가지고 있는 강점들을 부각시켜 연구를 진행하였다.

4장에서는 기존의 제어 시스템이 가지고 있는 문제점을 분석하고 엔진의 파라미터 에러를 줄여주는 적응 기법에 대해 다룬다. 엔진 모델 식에는 수많은 파라미터들이 포함되어 있는데 이런 파라미터 값이 가지고 있는 오차가 제어 성능에 악 영향을 미친다. 이 파라미터 값들이 실제 값을 추정할 수 있도록 적용되는 것이 바로 적응 기법이며, 이 장에서 새로운 적응 기법을 설계하는 과정을 다룰 것이다.

마지막으로 5장에서는 최종 시뮬레이션 결과를 담을 것이다. 제안된 적응 기법이 적용 되지 않았을 때의 시뮬레이션 결과와의 비교를 통해, 새롭게 설계된 적응 기법의 효과와 타당성을 검증하도록 하겠다.

Key words : Adaptive Control(적응 제어), Diesel Engine Control(디젤 엔진 제어), Model-based Control(모델 기반 제어), Exhaust Gas Recirculation(배기가스 재순환 장치)

* 김수영, E-mail: westkllr@kaist.ac.kr

1. 서론

Nomenclature

AF_{ref}	: Reference for air to fuel ratio
EGR_{ref}	: Reference for EGR fraction
F_i	: Air fraction in intake manifold
F_x	: Air fraction in exhaust manifold
m_i	: Intake manifold mass
m_x	: Exhaust manifold mass
η_m	: Turbocharger mechanical efficiency
η_c	: Compressor efficiency
η_t	: Turbine efficiency
η_{vol}	: Volumetric efficiency
p_a	: Ambient pressure
p_c	: After compressor pressure
p_i	: Intake manifold pressure
p_t	: After turbine pressure
p_x	: Exhaust manifold pressure
P_c	: Compressor power
P_x	: Turbine power
T_a	: Ambient temperature
T_i	: Intake manifold temperature
T_x	: Exhaust manifold temperature
W_{EGR}	: EGR mass flow rate
W_{ic}	: Mass flow rate from intake manifold to cylinder
W_{ci}	: Mass flow rate from compressor to intake manifold
W_f	: Injected fuel mass flow into cylinder
W_{ex}	: Mass flow rate from cylinder to exhaust manifold

Subscripts

AF	: Air to Fuel ratio
EGR	: Exhaust gas recirculation
VGT	: Variable geometry turbine
$SISO$: Single input single output system
$MIMO$: Multi input multi output system

오늘날에는 디젤, 가솔린, LPG, LNG, 전기, 수소 등에다가 전기와 기름을 함께 쓰는 하이브리드 동력원까지 정말 많은 종류의 자동차 동력원이 존재한다. 자동차가 본격적으로 보급된 지도 벌써 오랜 시간이 흘렀지만 지금도 수많은 사람들이 경제적이고 성능 좋은 자동차를 고르기 위해 고민을 하고 있다. 또한 기상이변, 지구온난화 등 환경문제가 대두되고 있는 상황에서 자동차의 매연에 대한 환경규제는 점점 심해지고 있는 추세이다. 이러한 상황에서 ‘좋은 자동차 동력원’이라 함은 경제성과 친환경성을 모두 갖춘 에너지원이라고 할 수 있다.

요즘에는 ‘클린 디젤’이라는 말이 굉장히 유명하다. 이 명칭은 디젤 엔진의 친환경적인 특성을 따서 지어진 것인데 사실 기존의 디젤엔진은 가솔린엔진에 비해 연비는 좋았지만 매연 발생과 소음 등이 심해서 사람들의 외면을 받고는 하였다. 그러나 엔진 기술의 발달로 디젤엔진은 친환경적인 ‘클린 디젤’로 다시 태어났으며 단점이었던 소음이나 내구성 등도 많이 개선되었다. 장기적인 미래를 내다봤을 때는 전기나 하이브리드, 신재생에너지 등 다른 친환경적인 에너지가 자동차에너지 시장을 주도할 가능성도 크다. 그러나 현재로서는 디젤 엔진이 이미 많이 보편화된 엔진이고 기술의 발달로 디젤이 친환경성과 경제성을 모두 갖추게 되었으므로 많은 사람들이 적어도 가까운 미래까지는 디젤자동차가 자동차 시장을 이끌어 나갈 것으로 내다보고 있다.

본 연구는 ‘EGR & VGT 시스템이 적용된 디젤 엔진 제어를 위한 적응 기법의 개발’에 관한 것이다. 환경 규제가 점점 심해지고 성능 좋은 자동차의 수요는 계속 올라가는 상황에서 이러한 디젤 엔진 제어 알고리즘의 개발은 두 마리 토끼를 모두 잡기 위한 하나의 좋은 대안이 될 수 있다. 엔진 제어를 위해서는 제어의 대상이 되는 디젤 엔진 air management system 모델에 적절한 제어기를 설계하여야 한다. 본 논문에서는 모델의 부정확한 파라미터 값들에 대한 적응기법을 설계하여 미리 설계된 제어기의 제어성능을 높이는 것에 연구의 초점을 맞추었다.

2. 시스템 모델링

연구에서 사용될 엔진 모델은 중형 6기통 디젤 엔진의 air management system 모델이다. 그림 1에 나타난 바와 같이 디젤 엔진 air management system은 크게 압축기, VGT, 흡기 매니폴드, 실린더, 배기 매니폴드, EGR 등 6개의 파트로 이루어져 있다. 제어의 대상이 되는 엔진 시스템의 모델링을 위해 시스템 내에서 순환되는 공기 및 연소가스의 열·동역학적 특성에 대한 모델링을 수행하였고 크게 단열조건 하에서 열역학 방정식, 에너지 보존 법칙, 그리고 질량 보존의 법칙을 기반으로 수행하였다. 여기서 EGR은 배기가스 재순환 시스템으로 배기가스를 엔진 반응에 재사용함으로써 질소산화물과 같은 배출 가스를 줄이는 역할을 하고 VGT는 가변 현상 터빈으로서 배기가스의 양에 따라 터빈의 형상을 조절하여 효율적으로 작동할 수 있는 터빈이다. VGT를 이용하면 엔진의 출력이나 연비 등이 향상될 수 있다. 모델은 MATLAB의 simulink를 통해 구현되었으며 제어의 대상이 되는 플랜트의 역할을 하게 된다. 모델링을 할 때 사용한 대표적인 가정들을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 플랜트 모델링을 위한 가정

<ul style="list-style-type: none"> -Mean value model -Adiabatic condition -Constant manifold volume -No changes in ideal gas constant and Specific heat capacity ratio -No pressure drop in cooler -No residual mass in EGR path
--

2.1 감소 차수 모델(reduced order model)

위 엔진 모델은 복잡한 수식들로 이루어져 있고 차수도 너무 높은 coupled 시스템이라 적절한 제어를 설계하기 위한 분석이 매우 어렵다. 효율적인 제어 설계와 ECU(electronic control unit)의 구현을 위해 주요 dynamics들만 남기고 간소화한 감소 차수 모델(3차 모델)을 설계하였다.

다른 상태량에 비해 센서로 측정이 어려운 산소 분율(fraction), 잔류가스 질량 등의 상태량은 모두 생략하고 동일한 작동구간에서 흡기 및 배기 매니폴드 내에서의 온도 변화는 없다고 가정하였다.

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

$$\dot{p}_x = k_2 (k_e p_i + W_f - W_{EGR} - W_{VGT}) \quad (2)$$

$$\dot{P}_c = \frac{1}{\tau_{tc}} \left(-P_c + \eta_i \eta_m c_p T_x \left(1 - \left(\frac{p_a}{p_x} \right)^\mu \right) W_{VGT} \right) \quad (3)$$

where $\mu = (\gamma - 1) / \gamma$

$$k_1 = RT_i / V_i, W_{ci} = \frac{\eta_c}{c_p T_a} P_c \left(\left(\frac{p_i}{p_a} \right)^\mu - 1 \right)^{-1}$$

$$k_2 = RT_x / V_x, k_e = (\eta_v NV_d) / (120 RT_i)$$

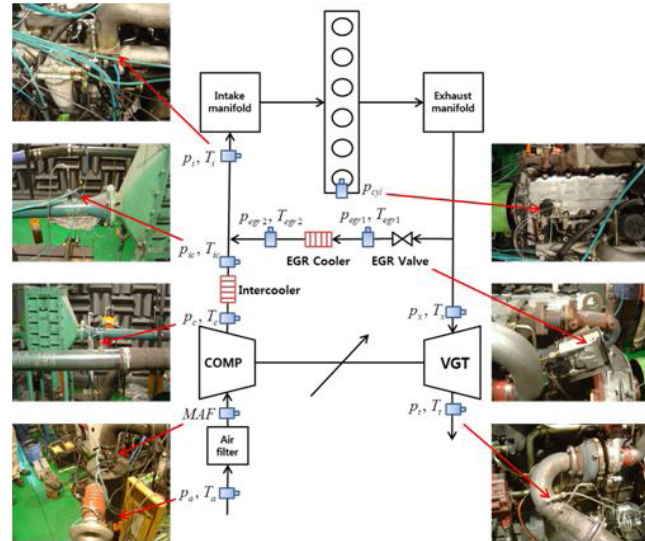


Fig. 1 디젤 엔진 air management system 모델 다이어그램

식(1), (2)는 질량보존의 법칙과 이상기체 방정식을 이용해 각각 흡기 및 배기 매니폴드의 압력 및 유량 dynamics를 나타낸 것이다. 식(3)은 터빈과 압축기로 구성된 터보차저의 dynamics를 나타내는 식이다.

3. 모델 기반 제어기

2장에서 디젤 엔진의 air management system을 대표하는 3가지 상태량에 관해 감소 차수 모델을 설계하였다. 그런데 이 3가지 상태량을 제어하기 위한 입력의 개수는 2개뿐 (VGT 유량과 EGR 유량)이므

로 under-actuated system의 특성을 갖게 된다. 따라서 우리가 다루는 디젤 엔진 모델은 EGR과 VGT의 커플링 효과를 가지고 있는 비선형 다입력-다출력(MIMO) under-actuated system으로서 제어 관점에서 매우 복잡한 시스템이라고 할 수 있다. 이러한 특성을 가지고 있는 엔진 모델에 대하여 제어를 용이하게 하기 위하여 모델 기반 제어를 설계하고 under-actuated system의 단점을 극복하기 위해 적응 기법을 설계하였다.(4장 관련)

본 논문에서는 모델의 부정확성에 크게 영향을 받지 않는 슬라이딩 모드(sliding mode) 제어를 사용하였고 그 자세한 설계 과정은 본 연구의 초점에서 벗어나므로 논외로 하겠다. (본 연구에 사용된 제어기에 관한 자세한 설계 과정은 [1]을 참고 바람)

3.1 모델 기반 제어기의 특성

본 연구에서 디젤엔진을 제어할 때 다루는 제어기는 모델을 기반으로 하는 모델 기반이라는 특징이 있다. 엔진 제어에 있어서 기존의 제어기들은 실험 결과 값이나 튜닝을 기반으로 하는 맵 기반의 제어기가 대부분이었다.

표2는 엔진 제어 분야에서 기존의 맵 기반 제어기와 모델 기반 제어기와의 특징 비교를 나타낸 것이다. 엔진 제어에서는 과도 상태 제어가 필수적인데 맵 기반 제어기를 사용했을 경우에는 각 운전 구간에 대하여 튜닝을 하는 방법으로 제어를 한다는 단점이 있다. 문제는 엔진 기술이 발달할수록 엔진 내에 존재하는 액추에이터의 개수가 점점 더 늘어난다는 것이다. 액추에이터의 수가 늘어나면 튜닝해야 하는 운전 조건의 수는 기하급수적으로 늘어난다. 따라서 엔진이 발달할수록 튜닝을 해야 하는 기존의 제어방법은 한계가 드러나게 되는 것이다. 따라서 본 연구의 제어기는 이러한 고려사항을 반영하여 모델 기반으로 설계가 되었다.

모델 기반 제어를 다룰 때에는 한 가지 명심해야 할 점이 있다. 바로 모델 기반 제어기의 기반이 되는 모델이 정확해야 한다는 것인데 모델이 정확하지 않으면 제어기의 성능을 발휘할 수 없기 때문이다. 따라서 모델을 더 정확하게 하는 기타 제어이론들이 적용될 수 있다. 본 연구의 주제인 적응기법의 설

계도 모델 기반의 특성을 가진 제어기와 깊은 관련이 있다고 강조하고 싶다.

Table 2 맵 기반 제어기와 모델 기반 제어기의 특성 비교

Conventional controllers (맵 기반 제어기)	New trendy controllers (모델 기반 제어기)
•SISO 시스템	•MIMO 시스템
•반복적인 Trial & error 제어 설계 과정	•피드포워드 제어와 피드백 제어 동시 가능
•파라미터 값들에 대한 근사 계산 과정 필요	•예측(Predictive) 제어
• 피드포워드 제어 - 정상상태 제어만 가능 - 과도상태 제어는 맵 기반의 반복적인 튜닝과정 필요	•파라미터 값 계산 과정이 간단
	•VGT 제어와 EGR valve 제어의 커플링 효과 - 고난이도의 제어 전략 필요 - 모델을 기반으로 하여 과도상태 제어를 하는 것이 가능

3.2 제어를 위한 desired value 생성 과정

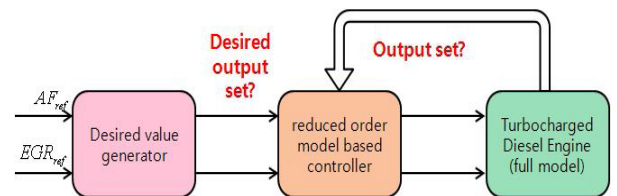


Fig. 2 Control scheme

그림2에서 보면 왼쪽으로 AF와 EGR라는 파라미터의 레퍼런스 값을 입력으로 받고 있는 'desired value generator'라는 블록이 있다. 이 블록은 일반적인 제어 알고리즘에서는 나타나지 않는 부분인데 이 부분이 본 연구에서 가장 중요한 부분이다. 앞에 입력 값 AF는 Air to fuel ratio(공연비) 값을 의미하며, EGR은 흡기매니폴드로 들어가는 전체 기체 중에 EGR 가스가 차지하는 비율을 의미하는데 이 두 값은 환경규제의 범위 내에서 엔진이 제어되도록 설정해주는 레퍼런스 값을 의미한다. 즉, 이 두 레퍼런스 값을 시스템에 넣어줘서 이 값을 잘 따라가도록 제어를 한다면 친환경적인 엔진이 되는 것이다. 그런데 문제는 이 AF값과 EGR값은 센서로 직접 측정을 하기 어렵다는 단점이 있다. 출력 값을 센서로

측정을 하지 못하면 피드백 시스템을 적용하기가 어렵기 때문에 다른 조치를 취해야만 하는데 이를 위해서 desired value generator라는 블록이 존재하는 것이다. 이 블록은 AF와 EGR값 대신에 센서로 측정이 용이하며 AF, EGR값과 역학적으로 연관이 되어 있는 다른 상태량들을 찾아내서 그 상태량들의 desired value을 레퍼런스로 넣어주는 역할을 한다. 여기서 AF, EGR값으로부터 다른 상태량들을 뽑아낼 때는 앞에서 언급한 플랜트 모델과 감소 차수 모델의 식을 이용하는데 그 계산과정을 그림3에 나타

$$\begin{aligned}
 EGR_{ref} &= \frac{W_{EGR}^d}{W_c^d + W_{EGR}^d} \\
 AFR_{ref} & \\
 \beta &= AFR_{ref}(1 - EGR_{ref}) + (AF_s + 1)EGR_{ref} - 1 \\
 W_a^d &= \frac{W_f^d}{2} \left[\beta + \sqrt{\beta^2 + 4(1 - EGR_{ref})AF_{ref}} \right] \\
 W_{EGR}^d &= \frac{EGR_{ref}}{1 - EGR_{ref}} W_{ci}^d \\
 p_i^d &= \frac{p_i^d}{p_a} p_a \\
 P_c^d &= \frac{W_{ci}^d T_a C_p}{\eta_c} \left(\left(\frac{p_i^d}{p_a} \right)^\mu - 1 \right) \\
 P_x^d &= P_a \left(1 - \left(\frac{P_c^d}{\eta_m \eta_t T_x^d C_p W_{VGT}^d} \right) \right)^{\left(-\frac{1}{\mu} \right)}
 \end{aligned}$$

내었다.

Fig. 3 desired value 계산 과정

각 수식을 이루고 있는 변수들은 모두 디젤 엔진 air management system의 특성을 나타내는 것들이지만 본 연구에서는 모델링의 과정을 설명하는 것이 목적이 아니므로 더 자세한 설명은 역시 참고 문헌 [1]을 참고하길 바란다. 그림3의 계산 과정을 통해 새롭게 정해진 출력 상태량들은 다음과 같다.

- (1) W_{ci}^d : 압축기 유량 속도 목표값
- (2) p_i^d : 흡기 매니폴드 압력 목표값
- (3) p_a^d : 배기 매니폴드 압력 목표값
- (4) P_c^d : 압축기 출력 목표값

본 연구의 제어시스템은 입력이 두 개인 시스템이므로 제어의 타겟이 되는 출력 상태량을 보통 2개

선택해서 제어를 해야 하는데 센서로 측정하기 힘든 AFR과 EGR값 대신에 위의 4개의 상태량 중에서 2개를 택하여 직접 제어를 하게 된다. 선택된 2개의 상태량을 직접 제어하면서 다른 주요 상태량들도 필요한 수준까지 제어가 되도록 하는 것이다.

4. 적응기법의 설계 및 적용

본 연구의 목적은 큰 에러를 발생시키는 파라미터 값들을 바로 잡아서 최종적으로 시스템의 제어 성능을 높이는 것이라고 할 수 있다. 이 때 우리가 알고자 하는 파라미터 값을 우리가 알고 있는 상태량, 파라미터 값을 통해서 추정을 해야 하는데 이런 방법을 통해 제어를 하는 것을 적응 제어(adaptive control)라고 한다. 2장에서 수행된 엔진 모델의 물리적인 특성을 충분히 이해하고 그 이해를 바탕으로 적응기법을 설계 및 적용하여 시뮬레이션 에러를 줄이는 것이다.

4.1 적응기법 설계의 필요성

앞 절에서 강조했다시피, 엔진 제어를 위해서는 모든 상태량들을 직접 제어할 수 없으므로 전체 시스템에 지배적인 영향을 가지고 있는 주요 상태량들만 제어 출력으로 선택하여야 한다. 본 논문에서 적절한 제어 출력으로 선택한 상태량들은 흡기 매니폴드 압력(p_i), 배기 매니폴드 압력(p_x), 압축기 유량 속도(W_{ci}) 총 3개의 상태량이다. p_i , W_{ci} 는 지금까지 많은 논문에서 좋은 엔진 제어를 위해 주로 제어 출력으로 선택되는 상태량으로 알려져 왔다. 그리고 p_x 의 경우에는 우리 제어기의 internal dynamics의 안정성을 보장받기 위해 반드시 제어를 해야 한다. 모델 기반 제어기의 특성상 제어를 해야 하는 상태량이라고 할 수 있다[1]. 따라서 제어가 잘 되는지 시뮬레이션을 하기 위해서는 위 3개의 상태량에 대해서 시뮬레이션을 수행하면 된다.

한편, 현재 시스템의 문제점은 한마디로 말해 엔진 제어가 제대로 되지 않는다는 것이다. 정확히 말하면 엔진의 위의 3가지 상태량에 대하여 시뮬레이션 결과를 보면 항상 출력으로 선택되지 않은 하나의 상태량에 대해서 상당한 정상 상태 오차가 발생

한다는 것이다. 본 논문에서는 그 오차의 원인을 제어기 자체에 있다고 생각하지 않고 그림2의 **desired value generator** 블록에서 에러가 발생한다고 보고 있다. 그림3에 나타난 과정을 거쳐서 최종 출력 상태량이 도출되는 과정을 보면, 모델 수식 자체가 근사식인데 일단 계산 과정 자체가 너무 많아서 에러가 상당히 있기도 하다. 그러나 에러의 가장 큰 요인이 되는 것은 따로 있다. 식 중간, 중간에 존재하는 압축기 효율 η_c 같은 파라미터들은 원래 시간, 환경에 따라 계속 변하는 값들이지만 이 **desired value** 계산 과정에서는 편의를 위해 모두 상수로 가정하였고 이런 가정이 시뮬레이션 결과에 가장 큰 악영향을 끼친다고 보고 있다. 이 파라미터 값들이 상수가 아니라 실시간 상황에 맞게 실제 값을 추종할 수 있다고 하면 **desired value generator** 블록에 존재하는 에러를 줄일 수 있고 결국에는 시뮬레이션에서 정상 상태에서의 오차를 줄일 수 있다고 생각하는 것이다. 이 가정이 성립할지 여부는 5장의 최종 시뮬레이션 결과에서 증명하도록 하겠다.

4.2 적응기법이 적용 안 된 시스템의 시뮬레이션 결과

다음은 본 연구가 전혀 수행되지 않은 기존 시스템의 시뮬레이션 결과이다. 흡기 및 배기 매니폴드 압력 p_i, p_x 두 상태량을 제어 출력 상태량으로 잡고 슬라이딩 모드 제어를 설계하여 시스템에 적용하였다. 시뮬레이션은 흡기매니폴드 압력(p_i), 배기 매니폴드 압력(p_x), 압축기 유량 속도(W_{ci})의 3가지 상태량에 대해 실행하였으며, 시뮬레이션의 기반이 되는 데이터는 NRTC(Non-road Transient cycle) 데이터이다.

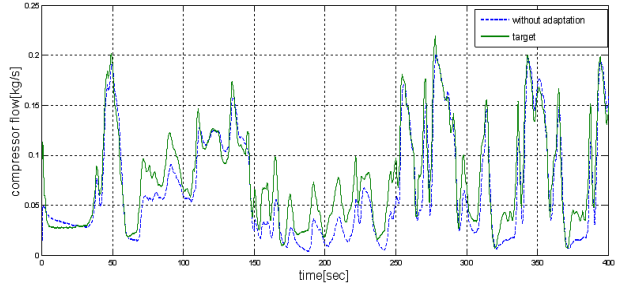
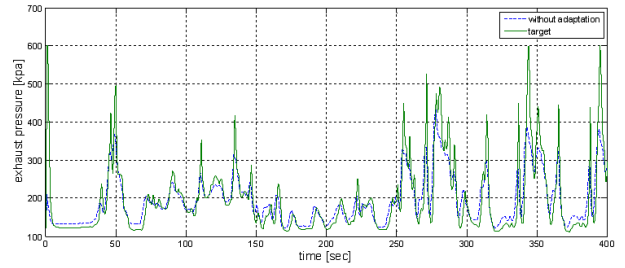
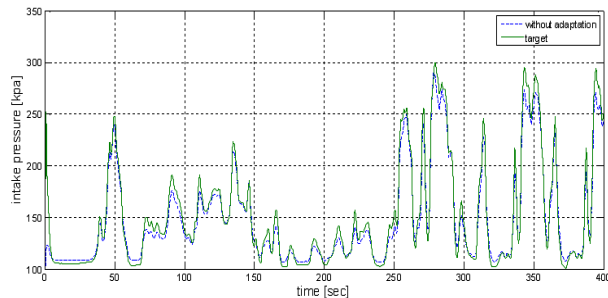


Fig. 4 적응 기법이 적용 안 된 시뮬레이션 결과

결과를 보면 직접 제어하는 상태량인 p_i, p_x 에 대해서는 제어가 상당히 잘 되고 있는 것을 확인할 수 있지만 나머지 상태량인 W_{ci} 에 대해서는 결과가 좋지 않은 것을 알 수 있다. 앞의 두 시뮬레이션 결과를 비교해보면 제어 출력으로 잡힌 두 상태량은 직접 제어가 되므로 시뮬레이션 결과가 좋고 나머지만 상태량에 대해서는 제어가 어느 정도 이상 되지 않는 것을 확인할 수 있다. 이것은 두 개의 입력으로 3개의 상태량을 동시에 제어하려다 보니 어려움이 발생한다고 볼 수 있으며, 이 부분을 적응 기법을 이용해 극복하려는 것이 바로 본 연구의 목적이다.

4.3 새로운 적응기법 설계

앞 절에서 다룬 시뮬레이션 결과의 문제점을 극복하기 위해 적응기법을 통해 직접 제어의 대상이 아닌 W_{ci} 까지 비교적 정확하게 제어를 하는 방법을 생각해보았다.

지금 현재 적용된 제어기가 시스템의 압력 체계를 기반으로만 설계되었기 때문에 유량에 관해서는 어떤 직접적인 제어를 하지 못한다고 해석할 수 있다. 적응기법을 설계하기 위해 출력 상태량으로 잡힌 p_i, p_x 에 대한 수식들을 살펴볼 필요가 있다. 그 수식들은 모두 2장에서 언급했던 엔진 모델에 대한 수식들로서 모두 시스템의 물리적인 특성을 담고

있다. 따라서 이 수식들을 잘 살펴보고 우리가 제어하고자 하는 W_{α} (압축기 유량)이 다른 파라미터들과 어떤 물리적인 관계가 있는지 확인하는 것이다. 그 후에 유량과 직접적인 관계가 있는 파라미터에 적응 기법을 적용해 좋은 결과를 도출할 수도 있다.

2장에서 언급된 (1) 식은 3차식 모델 식 중 흡기매니폴드 p_i 에 관한 식이다. 이 식에 존재하는 파라미터들 중에서 본 연구에서는 η_c (압축기 효율)의 실제 값을 추정하여 제어에 이용해보기로 하였다. 앞에서 언급했다시피 η_c 는 운전 조건이나 환경에 따라 계속 변하는 값인데 여기서는 상수로 가정되어 제어 시스템에 에러를 일으킨다.

2장에서 다른 모델링 식을 이용하여 η_c 에 대한 적응 기법을 도출해내는 과정은 다음과 같다.

Defining sliding surface S_1, S_2 :

$$S_1 = p_i - p_{id}, S_2 = p_x - p_{xd}$$

$$\dot{S}_1 = \dot{p}_i - \dot{p}_{id}$$

$$= \frac{k_1 \eta_c}{c_p T_a} \left(\left(\frac{p_i}{p_a} \right)^\mu - 1 \right)^{-1} (P_c - P_{cd}) + k_1 (W_{EGRd} - W_{EGR}) - k_1 k_c (p_i - p_{id})$$

Let $MAX = \eta_c, \hat{MAX} = \hat{\eta}_c$

defining $\tilde{MAX} = MAX - \hat{MAX}$.

Defining Lyapunov function V_1 :

$$V_1 = \frac{1}{2} (S_1^2 + \frac{1}{a_1} \tilde{MAX}^2)$$

$$\dot{V}_1 = S_1 \dot{S}_1 - \frac{1}{a_1} \tilde{MAX} \dot{\tilde{MAX}}$$

$$= -\lambda S_1^2 + \tilde{MAX} \left(\frac{k_1 P_c}{c_p T_a} \left(\left(\frac{p_i}{p_a} \right)^\mu - 1 \right)^{-1} S_1 - \frac{1}{a_1} \dot{\tilde{MAX}} \right)$$

$$\therefore \dot{\tilde{MAX}} = a_1 \frac{k_1 P_c}{c_p T_a} \left(\left(\frac{p_i}{p_a} \right)^\mu - 1 \right)^{-1} S_1 \quad (4)$$

앞에서 변수 MAX 를 η_c 로 정의를 했었기 때문에

(4) 식은 $\dot{\eta}_c$ 에 대한 추정 값으로 볼 수 있다.

4.4 적응기법의 적용

적응기법을 도출해내는 것도 중요하지만 더욱 중요한 것은 이렇게 뽑아낸 η_c 의 추정 값을 어디에 적용할 것인가이다. 전체 시스템의 역학적인 부분을 고려하여 다음과 같이 두 부분에 적용하였다.

(1) 압축기 유량 추정 desired value \hat{W}_{α} 의 생성

우리가 제어하기 원하는 나머지 상태량인 W_{α} 값은, 현재 시스템에서는 단순히 센서로 측정해서 제어로 피드백 되는 식으로 구성이 되어있었다. 이상적인 상황에서는 센서로 측정한 값이 정확하고 그 값이 제어로 들어가서 피드백 루프를 구성하므로 제어가 잘 되어야 할 것이다. 그러나 실제 시뮬레이션을 해보면 현재 시스템의 출력 상태량이 압력 상태량들로만 설정돼 있어서 압력을 정확히 맞추려다 보면 다른 물리량에 대한 제어 능력이 상당히 떨어질 수가 있다. 이러한 값을 보정하기 위해 (4) 식으로부터 압축기 출력의 추정 desired value \hat{P}_c 를 구하고 이 \hat{P}_c 값을 이용하여 \hat{W}_{α} 값을 구하였다. 그림 3에 있는 desired value 계산 과정 중에서 P_c^d 에 관한 식을 이용하여 구해낸 보정된 \hat{W}_{α} 값을 센서로 측정한 W_{α} 값 대신에 제어로 보내주는 조치를 취하였다.

(2) 배기매니폴드 압력 desired value p_x^d 의 보정

이 부분은 그림 2의 desire value generator블록을 보정해준 것이다. 위의 과정에서 구해낸 \hat{P}_c 값을 이용해 좀 더 정확한 배기매니폴드 desired value p_x^d 을 계산하도록 수정을 하였다. 그림3의 식들 중 p_x^d 에 관한 식을 보정한 것이다.

5. 시뮬레이션 결과

5.1 적응기법이 적용된 최종 시뮬레이션

최종 시뮬레이션 결과에는 4장에서 설계한 적응기법을 적용한 시뮬레이션 결과를 나타내었는데, 직접적인 비교를 위해 4.2절의 시뮬레이션 결과(같은 제어기를 사용했지만 적응 기법은 적용하지 않은 결과)와 함께 나타내었다.

\hat{x}_i : i번째 운전 조건에서의 desired value

적용 기법을 적용했을 때와 적용하지 않았을 때의 제어 성능을 비교하려면 표3의 에러 값의 차이 보면 알 수 있다. 결과를 보면 적응기법을 통하여 압축기 유량에 대한 제어 에러가 15%넘게 줄어든 것을 알 수 있다. 흡기 매니폴드의 압력과 배기 매니폴드의 압력에 대해서는 에러가 조금(1%미만) 증가한 것을 알 수 있는데 거의 비슷한 수준이다. 이 두 상태량에 대한 에러의 작은 증가는 압축기 유량을 잘 제어하기 위한 일종의 trade-off라고 볼 수 있다. 결과적으로, 2개의 입력으로 3개의 상태량을 모두 작은 에러 수준에서 제어할 수 있게 되었고 앞에서 제어기와 엔진 모델링 자체 보다는 desired value generator에서 많은 오차가 발생했을 거라고 가정한 것이 어느 정도 타당한 가정이었다고 생각할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 디젤 엔진의 air management system에 대한 모델링을 수행하고 그 모델을 기반으로 하여 제어기를 설계하였다. 모델 기반이라는 제어기의 특성 때문에 적응기법을 설계 및 적용하여 파라미터 에러를 줄이면 제어 성능이 더 좋아질 것이라 가정하였고, 최종 시뮬레이션에서 이를 증명하였다. 제어 입력이 2개고 제어해야할 상태량은 3개인 under-actuated system이었는데 결과적으로 적응기법을 통해 3가지 상태량 모두 만족하는 수준에서 제어할 수 있게 되었다.

2장에서는 제공된 데이터를 기반으로 하여 EGR과 VGT 시스템을 갖춘 중형 6기통 디젤 엔진에 대하여 모델링을 수행하였다. 또한 제어기 설계를 용이하게 하기 위해 주요 dynamics만 놓고 간소화시킨 감소 차수 모델을 설계하였다. 3장에서는 전반적인 시스템 제어기에 대해 다루면서, 모델 기반 제어기는 모델의 정확도에 매우 의존하기 때문에 같은 시스템이라면 모델이 더 정확 할수록 제어 성능도 좋아지는 특성을 갖고 있다고 강조하였다. 4장에서는 본 논문의 가장 주요한 부분인 적응기법의 설계 과정을 다루었는데, 제어 출력으로 선정된 상태량들의 desired value 계산 과정에서 발생하는 오차가 제어 성능을 떨어뜨린다고 생각하였다. desired value 계산 과정에서 큰 에러를 발생시키는

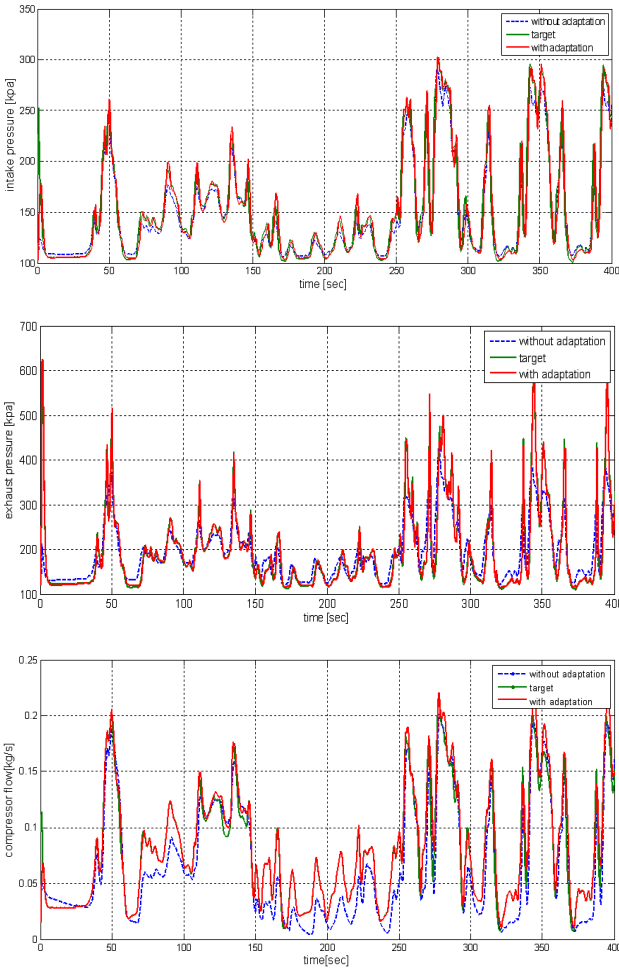


Fig. 5 최종 시뮬레이션 결과 (초록색은 타겟, 파란 점선은 적응기법 적용 이전, 빨간색이 적응기법 적용 후의 결과)

Table 3 최종 시뮬레이션 에러 비교

output	적용 기법 적용 전 오차 (%)	적용 기법 적용 후 오차 (%)
p_i	4.4	5.1
p_x	2.0	3.0
W_{ci}	21.5	6.19

에러는 각 운전 조건에 대하여 에러의 절대 값을 구한 뒤 평균 내는 방식으로 구했는데 다음과 같은 수식으로 계산되었다.

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\hat{x}_i - x_i|}{\hat{x}_i} \times 100 (\%) \quad (5)$$

where n : 전체 운전 조건 개수

x_i : i번째 운전 조건에서의 실제 값

파라미터(η_c)에 대해 적응기법을 적용하였고 5장의 시뮬레이션 결과, 제어 성능을 매우 높일 수 있었다. 이와 같은 적응 기법의 적용은 시스템 모델의 정확도를 높이는 과정이라고 생각할 수 있으며 결과적으로 모델 기반 제어기의 성능을 높였다고 말할 수 있는 것이다.

사실 MATLAB 시뮬레이션 검증을 통과했다고 해서 제어기를 바로 실제 엔진에 적용할 수 있는 것은 아니다. 이상적인 경우에서 실험한 시뮬레이션과 실제 상황에서 구동되는 엔진은 매우 다르기 때문이다. 실제 엔진에 적용하기 전에 HiLS (hardware in loop simulation) 실험 과정을 거쳐서 먼저 검증을 받는 것이 좋다. 검증 안 된 제어기를 실제 엔진에 적용했다가는 엔진이 망가질 수 있기 때문에 실제 엔진과 거의 비슷한 가상의 엔진 시스템을 만들어서 실험을 할 수 있게 만들어 놓은 것이 바로 HiLS이다. 제안된 제어 알고리즘을 HiLS 시스템에 적용하여 계속해서 보완을 하는 과정이 필요하다. 이렇게 HiLS 검증 과정을 충분히 거친 뒤에 실제 엔진 실험에 적용해보며 제어기를 검증해야 한다. 이와 같은 과정들은 향후 해결해야 할 과제들이다.

“본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 IT융합 고급인력과정 지원사업의 연구결과로 수행되었음(NIPA-2013-H0401-13-1008)”

References

- 1) Youngsik Yoon, "A Study of Turbocharged Diesel Engine Modeling and Robust Model based Sliding Mode Controller Design", M.S. thesis, KAIST, 2011.
- 2) Atkinson, C., Allain, M., Kalish, Y., and Zhang, H., "Model-Based Control of Diesel Engines for Fuel Efficiency Optimization", SAE Technical Paper 2009-01-0727, 2009.
- 3) M. Ammann, N.P. Fekete, L. Guzzella and A.H. Glatfelder, "Model Based Control of the VGT and EGR in a Turbocharged Common-rail Diesel Engines: Theory and Passenger Car Implementation", SAE Technical Paper 2003-01-0357, 2003.
- 4) M. Jung, "Mean-value Modeling and Robust Control of the Airpath of a Turbocharged Diesel Engine," Ph.D. dissertation, Cambridge University, Cambridge, U.K., 2003.
- 5) J. Wang, "Hybrid Robust Air-path Control for Diesel Engines Operating Conventional and Low Temperature Combustion Modes", IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 16, no. 6, pp. 1138-1151, 2008.
- 6) J. Wang, "Robust Nonlinear Control with singularity Avoidance for Diesel Engines having multiple Combustion Modes", pp. 4401-4406, Proceedings of the American Control Conference, 2007.
- 7) D. Upadhyay, "Modeling and Model based Control Design of the VGT-EGR System for Intake Flow Regulation in Diesel Engines", Ph. D. Dissertation, Ohio State University, Columbus Ohio, May, 2001.