승용디젤엔진 EGR 및 VGT 제어시스템의 동적특성을 고려한 Decoupler 설계 연구

홍 승 우¹⁾ · 박 인 석²⁾ · 손 정 원¹⁾ · 선 우 명 호^{*3)}

한양대학교 자동차공학과¹⁾ · 한양대학교 자동차 전자제어연구소²⁾ · 한양대학교 미래자동차공학과³⁾

Dynamic Decoupler Design for EGR and VGT Systems in Passenger Car Diesel Engines

Seungwoo Hong¹⁾ · Inseok Park²⁾ · Jeongwon Sohn¹⁾ · Myoungho Sunwoo^{*3)}

¹⁾Department of Automotive Engineering, Graduate School, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²⁾Automotive Control and Electronics Laboratory, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

³⁾Department of Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received 7 October 2013 / Revised 10 November 2013 / Accepted 10 November 2013)

Abstract : This paper proposes a decoupler design method to reduce interaction between exhaust gas recirculation (EGR) and variable geometry turbocharger (VGT) systems in passenger car diesel engines. The EGR valve and VGT vane are respectively used to control air-to-fuel ratio (AFR) of exhaust gas and intake pressure. A plant model for EGR and VGT systems is defined by a first order transfer function plus time-delay model, and the loop interaction between these systems is analyzed using a relative normalized gain array (RNGA) method. In order to deal with the loop interaction, a design method for simplified decoupler is applied to this study. Feedback control algorithms for AFR and intake pressure are composed of a compensator using PID control method and a prefilter. The proposed decoupler is evaluated through engine experiment, and the results successfully showed that the loop interaction between EGR and VGT systems can be reduced by using the proposed decoupler. Furthermore, it presents stable performance even off from the designed operating point.

Key words : Diesel engine(디젤엔진), Decoupler(디커플러), Air-to-fuel ratio control(공연비 제어), Intake pressure control(흡입공기압력 제어), Exhaust gas recirculation(배기가스 재순환)

Nomenclature

N_e	: engine speed, [rev/min]
W_f	: fuel injection quantity, [mg/str]
P_{int}	: pressure of intake manifold, [kPa]
P_{exh}	: pressure of exhaust manifold, [kPa]
u_{EGR}	: lift position of EGR valve, [% , close]
u_{VGT}	: vane position of VGT actuator [% , close]
AFR_{exh}	: air-to-fuel ratio of exhaust gas [-]
λ	: stoichiometric air-to-fuel ratio [-]

1. 서론

자동차 배기규제가 점차 강화됨에 따라, 배기가스 저감을 위한 많은 기술들이 승용디젤엔진에 적용되고 있다. 연료분사시스템에 적용된 고압 연료 분사 기술과 흡배기시스템에 적용된 EGR(Exhaust Gas Recirculation)과 VGT(Variable Geometry Turbocharger) 기술은 배기가스 저감뿐만 아니라 연비향상에 큰 역할을 하고 있다.

EGR과 VGT는 연소실내로 흡입되는 공기의 압력 및 유량을 제어함으로써 배기 및 연비성능을 결

*Corresponding author, E-mail: msunwoo@hanyang.ac.kr

정하는 중요한 기술이다. EGR은 연소 후 발생하는 배기가스를 재순환시킴으로써 연소온도를 낮추고 질소산화물(NOx)의 발생을 억제한다. 하지만 연소실내로 과도한 배기가스의 유입은 불안정한 연소를 야기하므로 정밀제어 기술이 필요하다.¹⁾ VGT는 배기가스에너지를 이용하여 보다 많은 양의 공기를 연소실에 공급하기 위한 기술로, 흡입공기압력을 제어함으로써 엔진의 출력향상을 통한 연비향상에 기여한다.²⁾

재순환 하는 배기가스 유량과 흡입공기의 압력을 조절하기 위하여 EGR 밸브와 VGT의 베인(Vane) 액추에이터를 각각 사용한다. EGR 시스템을 통해 재순환되는 배기가스 유량은 배기와 흡기 매니폴드 사이의 압력비와 EGR 밸브 개도량에 의한 유효면적(Effective area)에 의해 결정된다. 흡입공기 압력은 VGT를 통해 컴프레서로 전달되는 배기가스 에너지를 이용하여 조절되며, 배기매니폴드의 압력과 vane 액추에이터의 유효면적에 의해서 결정된다.

EGR과 VGT 제어 시스템은 비선형적인 특성을 갖고 있을 뿐만 아니라, 흡기와 배기매니폴드를 사이에 두고 물리적인 경로를 독립적으로 형성하고 있기 때문에 서로 강하게 cross-coupling되는 특성을 지니고 있다.³⁾ 이러한 특성을 무시하고 독립적인 제어알고리즘을 설계할 경우, 제어이득의 캘리브레이션에 어려움이 있을 뿐만 아니라⁴⁾ 예기치 않은 왜란으로 인하여 제어기의 불안정성(instability)을 초래할 수 있다.⁵⁾

따라서 이전 연구에서도 EGR과 VGT시스템의 cross-coupling 특성을 상쇄하기 위해서 많은 연구가 수행되었다. Sliding mode 제어기와 LPV 모델기반 H-infinity제어기를 설계하여 EGR과 VGT 시스템을 제어하였고,^{6,7)} 인공 Neural network 을 적용하여 EGR과 VGT 시스템의 비선형성 및 상호작용을 극복하기 위한 제어알고리즘 설계연구가 수행되어 왔다.⁸⁾ 이러한 제어기 설계방법은 cross-coupling특성과 비선형성을 다루기에 적합하지만, 제어기 성능이 모델의 정확성에 크게 의존적이고, 연산부하가 커서 실제 차량에 적용하기에는 어려움이 존재한다.

이 연구에서는 EGR과 VGT 시스템의 cross-coupling 특성을 효과적으로 다루기 위한 decoupler 설계기법

을 제안하였다. 제어인자는 배기가스 공연비와 과급압력으로 선정하였고, Wang et al. 이 제안한 simplified decoupler 설계 기법을 적용하였다.⁹⁾ Simplified decoupler는 구현이 간단하고 모델오차에 강건성을 가지는 장점이 있어⁴⁾ 비선형적인 특성을 갖는 디젤 엔진의 흡배기시스템 제어에 적합하다. 공연비와 과급압력의 피드백제어기는 PID(Proportional-integral-derivative) 구조를 사용함으로써 on-line캘리브레이션과 쉬운 구현이 가능하도록 설계하였다.

이 논문의 구조는 다음과 같다. 2장에서는 승용디젤엔진에 적용되고 있는 EGR과 VGT 시스템을 소개하고, 모델 파라미터 식별을 통한 cross-coupling 특성을 분석하였다. 3장에서는 제어알고리즘 구조와 decoupler설계 방법에 대해 설명한다. 4장에서는 제안된 제어기를 엔진 실험을 통해 검증하고, 5장에서는 요약 및 결론과 함께 끝을 맺는다.

2. 시스템 특성 분석

2.1 대상 시스템 소개

이 연구의 대상시스템은 고압 EGR과 VGT가 장착된 2.2리터 승용디젤 엔진 시스템이다. Fig. 1에서 도시하고 있는 바와 같이 엔진의 흡입공기상태를 제어하기 위하여 EGR 밸브와 VGT 액추에이터가 사용되었다. EGR 밸브는 DC 모터에 의해 동작하며, EGR 가스 유로의 단면적을 제어함으로써 흡기 매니폴드로 유입되는 EGR 가스 유량을 조절한다. VGT는 터빈의 베인 위치를 제어함으로써 컴프레서에 전달되는 출력을 조절하며, 흡입공기 압력을 결정하는 주요 인자이다.

이 연구에서는 흡입공기상태를 제어하기 위하여 흡기매니폴드 압력(P_{int})과 배기가스로부터 측정되는 공연비(AFR_{exh})를 사용하였다. EGR 가스 유량을 제어하기 위해 일반적으로 흡기유량센서가 사용되지만 이 연구에서는 배기가스의 공연비를 제어인자로 선택함으로써 인젝터 공차 및 노후화에 강인하게 대응할 수 있도록 하였다.¹¹⁾ 제어입력으로 EGR 밸브의 개도량과 VGT 베인위치를 사용하였으며, 문제의 복잡성을 줄이기 위하여 플랜트모델은 시간 지연을 가진 1차전달함수로 근사화시켜서 (1)과 같이 정의하였다.

Fig. 1 Schematics of EGR and VGT Systems¹⁰⁾

$$\begin{bmatrix} AFR_{exh} \\ P_{int} \end{bmatrix} = G(s)U(s) \\ = \begin{bmatrix} \frac{K_{11}}{\tau_{11}s+1} \cdot e^{-sT_{d,11}} & \frac{K_{12}}{\tau_{12}s+1} \cdot e^{-sT_{d,12}} \\ \frac{K_{21}}{\tau_{21}s+1} \cdot e^{-sT_{d,21}} & \frac{K_{22}}{\tau_{22}s+1} \cdot e^{-sT_{d,22}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{EGR} \\ u_{VGT} \end{bmatrix} \quad (1)$$

where K is a static gain, τ is a time constant, and T_d is a time delay.

2.2 플랜트 모델 파라미터 분석

플랜트 파라미터 분석을 위해 운전조건을 고정된 상태(엔진회전 속도: 1750 rpm, 연료 분사량: 20 mg/str)에서 EGR 밸브 리프트 위치와 VGT 베인을 변경하면서 실험을 수행하였다. 정적 이득(K)을 도출하기 위해 EGR 밸브는 70~100%, VGT 베인은 70~95% 구간에서 5% 단위로 액추에이터를 변경하였다. Fig. 2는 플랜트 모델의 정적이득을 도시하고 있으며, VGT 베인과 EGR 밸브가 닫힐수록 정적 이득은 큰 경향을 나타내고 있다.

플랜트 모델의 시상수와 시간지연 파라미터를 분석하기 위하여 EGR 밸브와 VGT 베인의 주요 동작 영역 안에서 24가지 패턴의 스텝변화 실험을 수행하였다. 실험결과로부터 정적이득, 시상수 및 시간지연 파라미터를 분석하였고, 각 파라미터들은 VGT 베인과 EGR 밸브위치에 따라서 불확실성을 나타내었지만 실험결과를 평균하여 Table 1과 같이 플랜트 파라미터로 정의하였다.

2.3 Cross-coupling 특성분석

EGR/VGT 시스템은 두 개의 입력과 두 개의 출력

Fig. 2 Static gains of EGR and VGT systems at Ne = 1750rpm, Wf = 20mg/str

Table 1 Plant parameter at Ne = 1750[rpm], Wf = 20[mg/str]

Model	Parameter	Value	Model	Parameter	Value
G11(s)	K_{11}	0.435	G12(s)	K_{11}	-0.125
	τ_{11}	0.465		τ_{11}	0.374
	T_d	0.183		T_d	0.137
G21(s)	K_{11}	0.765	G22(s)	K_{11}	0.715
	τ_{11}	0.816		τ_{11}	0.962
	T_d	0.428		T_d	0.122

을 가진 다변수입출력시스템이다. Fig. 3은 EGR 밸브는 고정하고, VGT 베인을 스텝으로 변경한 결과를 도시하고 있고, Fig. 4에서는 VGT 베인을 고정하고 EGR 밸브를 스텝으로 변경한 조건에서의 실험 결과를 도시하고 있다. VGT 베인이 닫히는 경우 컴프레서에 전달되는 파워가 증가하여 흡기압력이 증가하였지만, EGR 가스 유량의 증가로 인하여 공연비가 감소하는 결과를 얻었다. EGR 밸브가 열릴 때는 증가된 EGR 가스 유량으로 인하여 공연비는 감소하였지만, 터빈에 전달되는 배기가스 에너지가 감소하여 흡기압력이 감소하였다. 이러한 실험결과로부터 EGR과 VGT 시스템이 강한 cross-coupling 특성을 갖고 있음을 확인할 수 있다.

EGR과 VGT 시스템의 상호영향은 relative normalized gain array (RNGA) 기법을 이용하여 분석하였다.¹²⁾ 이 방법을 사용하면 다변수입출력 시스템의 입력과 출력간의 상호영향을 정량적으로 분석할 수 있다. 이 연구에서 제시된 EGR과 VGT 시스템의 플랜트

Fig. 3 Step response of VGT vane

Fig. 4 Step response of EGR valve

모형을 사용하여 RNGA를 (2)와 같이 얻을 수 있다.

$$\Phi = \begin{bmatrix} 0.6704 & 0.3296 \\ 0.3296 & 0.6704 \end{bmatrix} \quad (2)$$

(2)에서 off-diagonal 성분은 cross-coupling 특성을 나타내는 인자로, 이 값으로부터 EGR과 VGT 시스템간의 상호영향이 크게 있음을 알 수 있다.

3. 공연비와 흡기압력 제어알고리즘 설계

3.1 제어알고리즘 구조

EGR과 VGT 시스템 제어알고리즘 구조는 Fig 5에서 도시하고 있다. 연료분사량과 엔진회전속도에 따라서 공연비와 흡기압력의 목표 값이 결정되고, 이들 목표 값을 추종하기 위하여 각각의 제어알고리즘에서 prefilter ($F(s)$)와 피드백 보상기($C(s)$)가 설계되었다. Decoupler($D(s)$)는 공연비와 흡기압력 제어 루프사이의 상호 영향을 상쇄하는 역할을 하며, 최종적으로 EGR 밸브 리프트 위치와 VGT 베인 위치를 결정한다.

3.2 동적특성을 고려한 Decoupler 설계

Decoupler는 cross-coupling 특성을 야기하는 플랜트의 off-diagonal 성분을 제거하는 역할을 한다. (3)과 같이 simplified decoupler ($D(s)$) 설계 방법을 2개의 입력과 출력을 가진 플랜트($G(s)$)에 적용하면,¹³⁾ off-diagonal 성분이 제거된 유효 개루프 전달함수 (Effective open loop transfer function, $G_{eff}(S)$)를 얻을 수 있다.

이러한 simplified decoupler 설계방법을 시간지연을 가진 1차 전달함수로 정의된 플랜트에 적용하였을 때, (4)와 같은 decoupler 전달함수를 유도할 수 있다. 하지만 (4)의 전달함수에서 시간지연성분이 음의 값을 갖는 경우, decoupler는 미래의 입력을 요구하는 비인과(non-causal) 시스템이 된다. 일반적인 경우에 미래의 제어입력은 예측할 수 없기 때문에 (4)의 decoupler는 구현이 불가능하다.

Fig. 5 Controller structure of air-to-fuel ratio and intake pressure

$$Y(s) = G(s)D(s)U(s) = G^{eff}(s)U(s)$$

$$\begin{bmatrix} y_1(s) \\ y_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_{12} \\ d_{21} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} g_{11}^{eff} & 0 \\ 0 & g_{22}^{eff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\text{where } g_{11}^{eff} = g_{11} - \frac{g_{21}(s)g_{12}(s)}{g_{22}(s)}, \quad g_{22}^{eff} = g_{22} - \frac{g_{21}(s)g_{12}(s)}{g_{11}(s)}$$

$$D(s) = \begin{bmatrix} I & -\frac{K_{12}(I+t_{11}s)}{K_{11}(I+t_{12}s)}e^{-(T_{d12}-T_{d11})s} \\ -\frac{K_{21}(I+t_{22}s)}{K_{22}(I+t_{21}s)}e^{-(T_{d21}-T_{d22})s} & I \end{bmatrix} \quad (4)$$

따라서 이 연구에서는 decoupler 전달함수가 비인 과시스템이 되는 문제를 해결하기 위하여 Wang et. al.이 제안한 설계 방법을 적용하였다.⁹⁾ (5)의 decoupler 설계방법은 시간지연을 가진 1차플랜트에 적용할 수 있으며, 구현이 간단하고 모델오차에 강건한 장점을 갖고 있다.⁴⁾ 이 설계방법을 EGR과 VGT 시스템에 적용하면, (6)과 같은 decoupler 전달함수를 구할 수 있다.

$$D(s) = \begin{bmatrix} e^{-v(T_{d22}-T_{d21})s} & -\frac{K_{12}(I+t_{11}s)}{K_{11}(I+t_{12}s)}e^{-v(T_{d12}-T_{d11})s} \\ -\frac{K_{21}(I+t_{22}s)}{K_{22}(I+t_{21}s)}e^{-v(T_{d21}-T_{d22})s} & e^{-v(T_{d11}-T_{d12})s} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\text{where } v(T_d) = \begin{cases} T_d, & \text{if } T_d \geq 0 \\ 0, & \text{if } T_d < 0 \end{cases}$$

$$D(s) = \begin{bmatrix} e^{-0.0795s} & \frac{-1.029s-1.07}{1+0.8164s} \\ \frac{0.1336s+0.2874}{1+0.3743s} & e^{-0.0459s} \end{bmatrix} \quad (6)$$

3.3 보상기와 Prefilter 설계

공연비와 흡기압력의 피드백 제어알고리즘을 설계하기 위하여 quantitative feedback theory(QFT) 기법을 적용하였다.¹⁴⁻¹⁶⁾ QFT기법을 이용하여 제어이득의 offline설계가 가능하며, 제어기 구조는 Fig. 6과 같이 보상기(C(s))와 pre-filter(F(s))로 구성되어 있다. 공연비와 흡기압력제어알고리즘의 보상기는 (7)과 같은 PID 구조로 설계하였고, loop shaping과

Fig. 6 QFT based controller structure

정을 거쳐서 제어 이득을 결정하였다. Prefilter는 페루프 응답을 제어기 사양에 충족시키기 위하여 설계되었으며, 공연비와 흡기압력 제어 알고리즘의 prefilter($F_1(s)$, $F_2(s)$)는 각각 3차와 2차 전달함수를 사용하여 (8)과 같이 설계하였다.

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (7)$$

$$F_1(s) = \frac{b_1 s + 1}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + 1} \quad (8)$$

$$F_2(s) = \frac{1}{c_2 s^2 + c_1 s + 1}$$

4. 실험결과

4.1 실험환경

이 연구에서 제안된 제어알고리즘은 엔진동력계 환경에서 검증되었고, 대상엔진으로 2.2리터 승용 디젤엔진 시스템이 사용되었다. 대상엔진에는 커먼레일 연료분사 시스템, 고압 EGR, VGT 시스템이 장착되어 있다. 실험환경은 Fig. 7에서 보여주고 있는 것과 같이 대상엔진의 운전조건을 제어하기 위한 동력계 제어시스템과 EMS 내부 연산결과를 모니터링하고 보정하기 위한 캘리브레이션 장비가 사용되었다.

Fig. 7 Experiment environment for engine test

이 연구에서 제안한 EGR과 VGT 시스템의 제어 알고리즘의 구현은 내부적으로 개발된 연구용 엔진 제어기 플랫폼에 탑재되었다. 이 제어기의 소프트웨어는 AUTOSAR-lite구조를 기반으로 하였고, 모 델기반 제어알고리즘 설계방법이 적용되었다.^{17,18)}

4.2 실험결과

설계한 운전조건에서 decoupler의 효과를 검증하기 위하여 공연비와 흡기압력 목표 값 중 하나의 인자만을 스텝으로 변화시킴으로써 제어루프간에 상호영향이 상쇄될 수 있는지를 검증하였다. 또한, 설계된 운전조건 밖에서도 제안된 decoupler가 안정적인 성능을 확보할 수 있는지를 검증하기 위하여 엔진 운전조건을 스텝으로 변경하면서 제어기의 성능을 검증하였다.

제안된 제어기의 성능은 decoupler가 포함되지 않은 PID 기반의 제어알고리즘과 비교하였으며, 이 비교대상 제어기의 제어이득은 QFT 기법을 사용하여 결정하였다.

4.2.1 목표값 스텝 테스트

엔진회전속도 1750 rpm, 연료분사량 20 mg/str의 조건에서 흡기압력은 131 kPa로 고정하고, 공연비 목표값을 26에서 30으로 변화시켰다. Fig. 8에서 알 수 있듯이, 목표 공연비가 증가하였을 때 EGR 밸브는 재순환하는 배기가스 유량이 감소하도록 제어

되었다. EGR 밸브가 닫히게 되면 더 많은 배기가스 에너지가 터빈에 전달되기 때문에, 동일한 흡기압력을 유지하기 위하여 VGT 베인은 열리도록 제어되었다.

Decoupler가 없는 PID제어기는 흡기압력제어시 약 4kPa의 오차를 발생하였고, 제안된 decoupler를 적용한 제어기는 흡기압력이 약 1 kPa의 오차 안에서 제어되었다. Decoupler가 없는 PID제어기는 EGR 밸브 개도량에 따른 흡입 공기압력의 변화 특성을 반영하지 못하기 때문에 과도구간에서 큰 오차를 발생하고 수렴하였다.

Fig. 9는 공연비 목표 값을 고정하고, 흡입공기압력 목표 값을 126에서 131 kPa로 스텝변화시킨 결과이다. 이 조건에서 decoupler를 적용한 제어기는 약 0.6초 빠른 상승시간을 보여주었고, 두 제어기는 공연비 오차를 1이하로 유지하였다. 흡입공기 압력과 공연비의 동적특성을 반영하여 설계한 decoupler는 VGT 베인을 닫으면서 EGR 밸브를 동시에 닫았기 때문에 10초 구간에서 순간적으로 공연비가 증가하였다. 반면에, decoupler가 없는 피드백제어기는 제어 루프간에 상호영향이 고려되지 않았기 때문에, 10초 구간에서 흡기압력 증가에 따라 공연비가 증가하였다.

4.2.2 운전조건 스텝 테스트

제안된 decoupler가 설계된 운전조건(1750 rpm,

Fig. 8 Step test results of AFR_{exh}

Fig. 9 Step test results of P_{int}

Fig. 10 Engine operating condition

Fig. 11 Step test result of engine operating point

20 mg/str) 밖에서도 안정적인 제어성능이 확보되는지를 검증하기 위하여 엔진 운전조건의 스텝테스트를 수행하였다. 엔진 운전조건은 Fig. 10과 같이 1750 rpm에서 연료분사량을 15 mg/str에서 25 mg/str까지 변경하였다. 운전조건 변경에 따라서 공연비와 흡기압력의 목표 값이 결정되었고, 실험결과는 Fig. 11에서 도시하고 있다. 이 실험결과에서 알 수 있듯이 제안된 decoupler가 적용된 제어기는 주변운전조건에서도 안정적인 제어성능을 확보할 수 있었다.

5. 결 론

이 연구에서는 EGR과 VGT 시스템의 상호영향을 상쇄하기 위하여, decoupler를 설계하였다. 공연비와 흡입 공기압력을 제어인자로 사용하였으며, PID 구조를 사용하는 피드백제어알고리즘과 함께 설계되었다. 엔진동력계 실험을 통하여 제안한 제어기를 검증하였고, 효과적으로 EGR과 VGT 시스템간의 상호영향이 상쇄됨을 확인하였다. 또한 엔

진운전조건의 과도구간실험을 통하여 운전조건 변화에도 안정적인 성능을 확보할 수 있음을 검증하였다.

이 연구에서 제시한 EGR과 VGT 시스템의 decoupler를 통해서 제어 루프간에 상호영향이 감소하기 때문에, 피드백 제어기의 제어이득을 쉽게 캘리브레이션할 수 있는 장점이 있다. 또한, simplified decoupler를 설계방법을 적용함으로써, 연산부하가 크게 증가하지 않고 쉽게 구현이 가능하기 때문에 실제 차량에 적용 가능하다.

후 기

이 연구는 지식경제부 산업원천기술개발 사업(No. 10039673, No. 10042633)과 에너지자원기술개발사업(2006ETR11P091C)의 일환으로 수행된 연구결과이며, 2011년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었고(No. 2011-0017495), 교육부의 BK21플러스사업(22A20130000045)의 일환으로 수행되었다.

References

- 1) M. Dürnholz, G. Eifler and H. Endres, "Exhaust-gas Recirculation - A Measure to Reduce Exhaust Emission of DI Diesel Engines," SAE 920725, 1992.
- 2) M. Van Nieuwstadt, I. Kolmanovsky, P. Moraal, A. Stefanopoulou and M. Jankovic, "Experimental Comparison of EGR-VGT Control Schemes for a High Speed Diesel Engine," Control System Magazine, Vol.20, No.3, pp.63-79, 2000.
- 3) J. Wahlström, Control of EGR and VGT for Emission Control and Pumping Work Minimization in Diesel Engines, Ph. D. Dissertation, Linköping University, Linköping, 2006.
- 4) C. Rajapandiyan and M. Chidambaram, "Controller Design for MIMO Processes Based on Simple Decoupled Equivalent Transfer Functions and Simplified Decoupler," Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol.51, No.38, pp.12398-12410, 2012.

- 5) P. A. Pérez and D. A. Sala, *Multivariable Control Systems: An Engineering Approach*, Springer, 2004.
- 6) Y. Yoon, S. Choi, M. Ko and J. Lim, "Simplified Turbocharged Diesel Engine Air Path Modeling and Control Using Sliding Mode Controllers," *KSAE Annual Conference Proceedings*, pp.548-558, 2010.
- 7) V. L. Utkin, C. Hao-Chi, I. Kolmanovsky and J. A. Cook, "Sliding Mode Control for Variable Geometry Turbocharged Diesel Engines," *American Control Conference*, pp.584-588, 2000.
- 8) B. Oh, *Coordinated Control of Diesel Engine Air System Using Artificial Neural Network*, Ph. D. Dissertation, Hanyang University, Seoul, 2011.
- 9) Q.-G. Wang, B. Huang and X. Guo, "Auto-tuning of TITO Decoupling Controllers from Step Tests," *ISA Transactions*, Vol.39, No.4, pp.407-418, 2000.
- 10) L. Eriksson, J. Wahlström and M. Klein, "Physical Modeling of Turbocharged Engines and Parameter Identification," *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, Vol.402, pp.53-71, 2010.
- 11) E. Alfieri, A. Amstutz, C. H. Onder and L. Guzzella, "Model-based Feedback Control of the Air-to-fuel Ratio in Diesel Engines Based on an Empirical Model," *IEEE Conference on Control Applications*, pp.509-514, 2007.
- 12) M.-J. He, W.-J. Cai, W. Ni and L.-H. Xie, "RNGA Based Control System Configuration for Multivariable Processes," *Journal of Process Control*, Vol.19, No.6, pp.1036-1042, 2009.
- 13) E. Gagnon, A. Pomerleau and A. Desbiens, "Simplified, Ideal or Inverted Decoupling?," *ISA Transactions*, Vol.37, No.4, pp.265-276, 1998.
- 14) C. H. Houpis, "Refined Design Method for Sampled-data Control Systems: The Pseudo-continuous-time (PCT) Control System Design," *Control Theory and Applications*, *IEEE Proceedings D*, Vol.132, No.2, pp.69-74, 1985.
- 15) C. H. Houpis, S. J. Rasmussen and M. Garcia-Sanz, *Quantitative Feedback Theory: Fundamentals and Applications*, 2nd Edn., CRC Press, USA, 2006.
- 16) I. Park, S. Hong, J. Shin and M. Sunwoo, "Robust Air-to-fuel Ratio Control Algorithm of Passenger Car Diesel Engines Using Quantitative Feedback Theory," *Transactions of KSAE*, Vol.21, No.3, pp.88-97, 2013.
- 17) I. Park, W. Lee and M. Sunwoo, "Application Software Modeling and Integration Methodology using AUTOSAR-ready Light Software Architecture," *Transactions of KSAE*, Vol.20, No.6, pp.117-125, 2012.
- 18) K. Lee, I. Park, M. Sunwoo and W. Lee, "AUTOSAR-ready Light Software Architecture for Automotive Embedded Control Systems," *Transactions of KSAE*, Vol.21, No.1, pp.68-77, 2013.