

DC 모터방식 EGR 밸브를 적용한 승용디젤엔진의 앞머김 공기량 제어에 관한 연구

오 병 걸¹⁾ · 이 민 광²⁾ · 박 영 섭¹⁾ · 이 강 윤²⁾ · 선 우 명 호^{*2)} · 남 기 훈³⁾ · 조 성 환³⁾

한양대학교 대학원 자동차공학과¹⁾ · 한양대학교 자동차공학과²⁾ · 현대자동차 승용디젤엔진 개발실³⁾

Feedforward EGR Control of a Passenger Car Diesel Engine Equipped with a DC Motor Type EGR Valve

Byounggi Oh¹⁾ · Minkwang Lee²⁾ · Yeongseop Park¹⁾ · Kangyoon Lee²⁾ · Myoungho Sunwoo^{*2)}
Kihoon Nam³⁾ · Sunghwan Cho³⁾

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

²⁾Department of Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

³⁾Advanced Diesel Engine Development Team, Hyundai-Kia Motor Company, 772-1 Jangduck-dong, Hwaseong-si,
Gyeonggi 445-706, Korea

(Received 22 March 2010 / Accepted 18 January 2011)

Abstract : In diesel engines, accurate EGR control is important due to its effect on nitrogen oxide and particulate matter emissions. Conventional EGR control system comprises a PI feedback controller for tracking target air mass flow and a feedforward controller for fast response. Physically, the EGR flow is affected by EGR valve lift and thermodynamic properties of the EGR path, such as pressures and temperatures. However, the conventional feedforward control output is indirectly derived from engine operating conditions, such as engine rotational speed and fuel injection quantity. Accordingly, the conventional feedforward control action counteracts the feedback controller in certain operating conditions.

In order to improve this disadvantage, in this study, we proposed feedforward EGR control algorithm based on a physical model of the EGR system. The proposed EGR control strategy was validated with a 3.0 liter common rail direct injection diesel engine equipped with a DC motor type EGR valve.

Key words : Air charge(공기량), Diesel engine(디젤엔진), EGR(Exhaust Gas Recirculation, 배기가스재순환), Feedforward control(앞머김 제어)

Nomenclature

EFA : effective flow area, cm²
N : engine speed, rev/min
 p_R : pressure ratio
 p_{CR} : critical pressure ratio
 p : pressure, Pa

R : universal gas constant, J/kgK
 ρ : density, kg/m³
 T : temperature, K
 κ : specific heat ratio
 η_V : volumetric efficiency
 \dot{m} : mass flow rate, kg/s
 V : volume, m³

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

Subscripts

- a : air
- c : compressor
- d : displacement
- t : turbine
- EGR : exhaust gas recirculation
- exh : exhaust manifold
- int : intake manifold

1. 서론

디젤엔진은 가솔린엔진 대비 높은 열효율로 인하여 자동차용 엔진으로 많이 사용되고 있다.^{1,2)} 그러나 대기환경에 대한 관심이 증가되면서 입자상 물질(PM: particulate matter)과 질소산화물(NO_x: nitrogen oxide)등과 같은 디젤엔진의 유해 배기배출물이 문제시 되고 있으며, 더 나아가 이산화탄소 배출량에 대한 규제 또한 강화되고 있는 실정이다. 이에 따라 자동차 제조사들은 점차 강화되는 배기규제를 만족하며, 연비를 개선시키고 엔진의 성능을 향상시킬 수 있는 디젤엔진의 개발을 추진 중에 있다. 이러한 기술 개발의 예로는 커먼레일 고압연료분사, VGT(variable geometry turbocharger), EGR(exhaust gas recirculation) 등이 있다.

EGR은 연소가스를 실린더 안으로 재순환시킴으로써 연소 시 NO_x의 생성을 저감하는 기술이다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 EGR율이 증가할수록 NO_x 저감에는 효과적이거나, 과도한 EGR율은 오히려 불완전 연소의 주 원인이 되어 PM(particulate matter) 배출이 증가하게 된다.³⁻⁶⁾ 따라서 엄격한 배기규제를 만족하기 위해서는 엔진의 운행 조건에 최적화된 정밀한 EGR 제어가 뒷받침 되어야만 한다.

현재까지 상용화된 엔진제어시스템에서 채택하고 있는 공기량 제어 알고리즘은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 제어기에서 MAF(mass air flow) 목표값과 MAP(manifold absolute pressure) 목표값을 입력 받아 EGR 및 VGT 액추에이터의 출력을 계산하는 방식이다.⁷⁾

기존의 EGR 제어 알고리즘은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 PI 제어기와 함께 룩업테이블 기반 앞먹임 제어기로 구성되어있다. 앞먹임(feedforward) EGR 제어기에서는 현재 운전 조건인 엔진 회전수, 연료

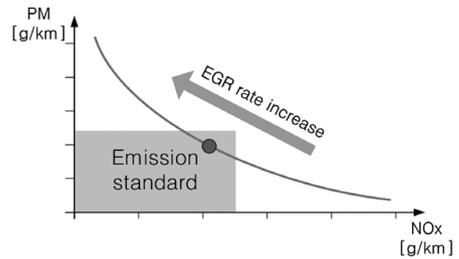


Fig. 1 Effect of EGR rate on NO_x and PM emissions

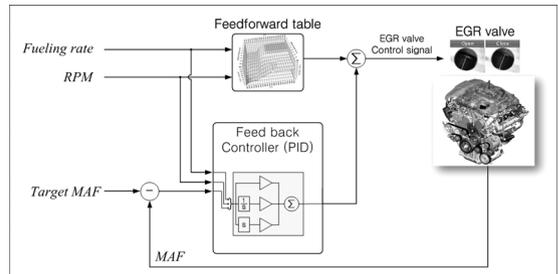


Fig. 2 Conventional EGR control algorithm

분사량을 바탕으로 실험에 의하여 최적화된 룩업테이블에 따라 EGR 밸브 작동 duty ratio를 출력한다. PI 제어 알고리즘에서는 목표 MAF와 현재 센서에서 계측된 MAF간의 차이를 이용하여 제어기 출력을 계산한다.^{7,8)}

기존 EGR 제어 알고리즘에서 사용하는 앞먹임 룩업테이블은 엔진회전속도와 연료분사량에 따라 결정된 EGR 밸브 개도량을 사용한다. 그러나, 실제 EGR 질량유량은 EGR 밸브 개도량 및 밸브 전·후단의 압력, 온도 등과 같은 열역학적 성질(thermodynamic property)에 의하여 결정되기 때문에 보다 빠르고 정밀한 제어를 위해서는 EGR 시스템의 물리적 특성을 고려한 앞먹임 제어를 적용할 필요가 있다.

뿐만 아니라, 기존의 앞먹임 제어용 룩업테이블은 엔진 실험을 통하여 최적화된 값을 도출해야 하기 때문에 수많은 실험을 필요로 한다는 단점이 있다.

이 연구에서는 앞서 언급한 기존 앞먹임 제어 룩업테이블의 단점을 개선하고, 빠르고 정밀한 EGR 제어 시스템을 구현하기 위하여 모델기반 앞먹임 제어 알고리즘을 제안하였다. 모델기반 앞먹임 제어의 첫번째 단계로 디젤엔진 공기유로의 평균값 모델링(mean value modeling)을 수행 하였으며,⁹⁻¹²⁾ 이를 바탕으로 앞먹임 제어 알고리즘을 도출하였

다. 두번째 단계로 모델기반 앞먹임 제어의 타당성을 검증하기 위하여, PI 제어를 단독으로 사용했을 때와 PI제어기에 모델기반 앞먹임 제어를 적용했을 때의 공기량 제어 성능을 비교분석 하였다.

2. Air System 모델

이 연구에서의 제어 대상은 커먼레일 연료분사 시스템이 적용된 3.0 리터 디젤엔진이다. Fig. 3에서 도시한 바와 같이 제어 대상 엔진의 공기유로는 VGT, DC 모터 방식 EGR 밸브,¹³⁾ 인터쿨러 및 EGR 쿨러로 구성되어 있다.

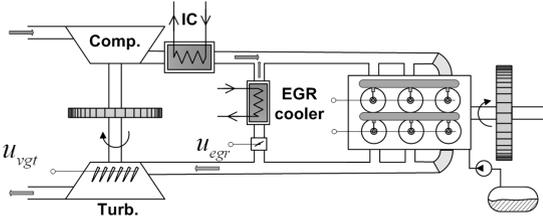


Fig. 3 Air path schematic diagram

서론에서 언급한 바와 같이 실린더 내 흡입된 공기 중 EGR 비율은 NOx 와 PM 배출량에 많은 영향을 미치기 때문에 엔진제어 시스템에서는 정확한 EGR 질량유량을 추정해야 할 필요가 있다.

2.1 EGR 질량유량 모델

EGR 밸브는 배기매니폴드와 흡기매니폴드 사이에 위치하며, 밸브를 통과하는 가스의 질량유량은 식 (1) 오리피스 방정식에서와 같이 밸브 양단의 압력비와 밸브 개도량에 의하여 결정된다. EFA는 effective flow area의 줄임 말로써 일반적으로 밸브 개도량의 함수로 표현된다.^{2,14)}

$$\dot{m}_{EGR} = \frac{EFA \cdot p_{exh}}{\sqrt{R \cdot T_{exh}}} p_R^{1/\kappa} \quad , p_R \geq p_{CR}$$

$$\times \left\{ \frac{2\kappa}{\kappa-1} \left(1 - p_R^{(\kappa-1)/\kappa} \right) \right\}^{1/2}$$

$$\dot{m}_{EGR} = \frac{EFA \cdot p_{exh}}{\sqrt{R \cdot T_{exh}}} k^{1/2} \quad , p_R < p_{CR}$$

$$\times \left\{ \frac{2}{\kappa+1} \right\}^{(\kappa+1)/2(\kappa-1)}$$
(1)

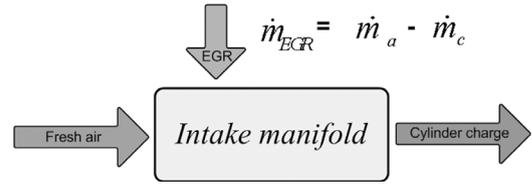


Fig. 4 Steady state EGR mass flow rate

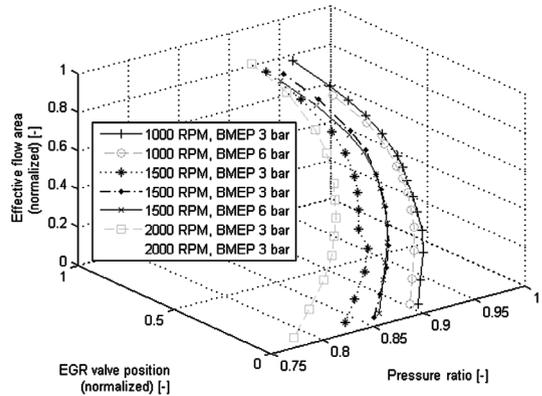


Fig. 5 Effective flow area of the EGR valve

EGR 밸브에 흐르는 질량유량을 구하기 위해서는 밸브의 EFA 모델링이 선행되어야 한다. EGR 밸브 EFA 도출실험은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 컴프레서와 실린더 흡입공기 유량의 차를 이용하여 정상상태 EGR 유량을 구한 후, 식 (1)을 이용하여 EFA를 계산한다. 식 (1)에서 p_R 은 흡기매니폴드와 배기매니폴드간 압력비를 의미한다.

Fig. 5는 엔진 회전속도 1,000 ~ 2,000 RPM, BMEP 3 ~ 6 bar 운전조건에서 계산된 EFA를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 EFA는 EGR 밸브 개도량의 함수로써 나타낼 수 있으며, 이 관계는 식 (2)와 같이 Sigmoidal Weibull 함수로 근사하였다.

$$EFA = f(\text{EGR valve lift}) \quad (2)$$

$$= c_1 - (c_1 - c_2) e^{-c_3 (\text{EGR valve lift})^{c_4}}$$

2.2 실린더 흡입 공기량

실린더 흡입 공기의 질량유량은 준정적 체적효율을 기반으로 하는 속도밀도(speed-density) 계산법을 이용하여 도출하였다. 속도밀도 계산법에서는 엔진의 회전속도, 흡기 매니폴드 압력, 그리고 흡기 매니

폴드 온도를 이용하여 실린더 흡입 공기량을 구한다. 식 (3)은 체적 효율의 정의, 식 (4)는 속도밀도 방법을 이용하여 구한 실린더 유량 모델을 나타내고 있다.¹⁴⁾

$$\eta_V = \frac{m_a}{\rho_{int} V_d} \quad (3)$$

$$\dot{m}_a = \frac{\eta_V \rho_{int} V_d N}{120}, \rho_{int} = \frac{p_{int}}{RT_{int}} \quad (4)$$

엔진시험을 통하여 EGR 유량과 실린더 흡입 공기량 모델을 검증하였다. Fig. 6은 동력계 시험 중 차량속도 15 km/h → 50 km/h 가속 시 센서에서 측정된 MAF와 모델에서 계산된 MAF의 비교 결과를 보여주고 있다. 그래프에서 보는 바와 같이 모델의 추정값과 측정값이 서로 유사한 경향을 보이며, 특히 모델의 추정값은 센서 측정값 보다 빠른 공기유량정보를 제공하고 있다.

3. 공기량 제어 알고리즘

기존의 EGR 제어 알고리즘은 PI 제어와 앞먹임 제어를 동시에 사용하고 있다. 앞먹임 제어는 목표값의 입력에 따라 즉각적인 제어출력이 나오기 때문에 과도 운전구간에서 제어시스템의 빠른 반응을 유도하는 특징이 있다. 반면, PI 제어는 목표값과 센서 측정값 간의 오차를 바탕으로 제어 출력을 계산하기 때문에 앞먹임 제어 보다 상대적으로 반응이 느리지만, 강인한 특성을 가지고 있다.

공기량 제어의 목적은 현재 운전조건에 따라 계산된 목표 공기량을 추종하는 것이다. 공기량 즉, MAF에 가장 많은 영향을 미치는 인자는 EGR 질량 유량으로써, EGR 질량유량은 식 (5)와 같이 EGR 밸브 개도량과, 밸브 전·후단의 온도 및 압력 조건에 관한 함수이다.

$$\dot{m}_{EGR} = f(p_{int}, p_{exh}, T_{exh}, EGR \text{ valve lift}) \quad (5)$$

앞서 언급한 바와 같이 기존의 앞먹임 제어는 EGR 밸브 전·후단의 압력, 온도 등과 같이 EGR 질량유량에 직접적으로 영향을 미치는 열역학적 성질을 사용하지 않고, RPM이나 연료량 즉, 운전조건에 따른 간접적인 영향만을 고려한다는 문제점이 있다. 이로 인하여 보다 최적화된 제어가 어려운 상황이다. 따라서 이 연구에서는 위와 같은 문제점을 해결하기 위하여 EGR 유로의 물리 현상을 고려한 앞먹임 제어 알고리즘을 제안하였다.

Fig. 7은 기존의 룩업테이블 기반 앞먹임 제어와 이 연구에서 제안한 모델기반 앞먹임 제어 알고리즘의 개요도를 비교하고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 기존의 MAF 제어 알고리즘에서는 연료량과 엔진 회전수에 따른 룩업테이블기반 앞먹임 제어를 사용하고 있는 반면, 모델기반 앞먹임 제어 알고리즘은 현재 air-path 조건을 바탕으로, 목표 MAF를 추종하기 위한 EGR 밸브 개도량을 계산한다. EGR 밸브 개도량 계산은 크게 세 개의 서브시스템으로 나

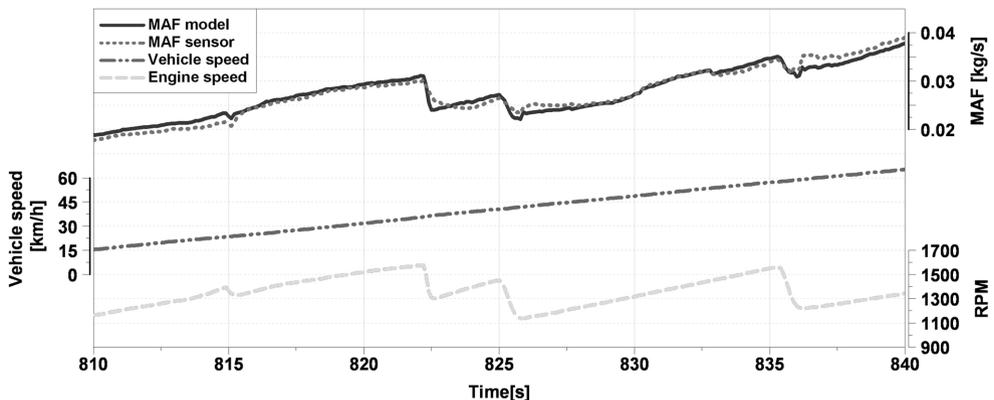


Fig. 6 Mass air flow model validation

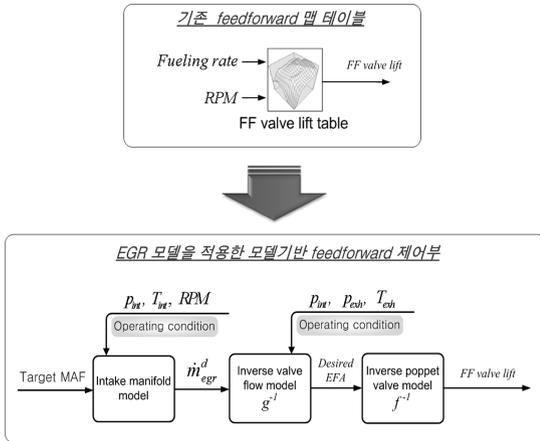


Fig. 7 Model based feedforward control algorithm

는데 각 서브시스템에서 계산하는 내용은 다음과 같다.

3.1 목표 EGR 질량유량 계산

흡기매니폴드 모델에서는 현재 조건에서 목표 MAF를 추종하기 위하여 필요한 EGR 질량 유량을 계산한다. 목표 EGR 질량 유량은 흡기매니폴드 내 질량 보존의 법칙을 이용하여 구한다.

3.2 목표 EFA 계산

EGR 유량 모델은 EGR 밸브 전·후단 온도, 압력 조건과 목표 EGR 질량유량을 바탕으로 현재 필요한 EGR 밸브의 EFA(effective flow area)를 계산한다. 목표 EFA의 계산은 식 (6)에서 보는 바와 같이 EGR 유량 모델을 이용하여 구한다.

$$EFA^{des} = \dot{m}_{EGR}^{des} \times \frac{\sqrt{R \cdot T_{exh}}}{p_{exh} p_R^{1/\kappa} \times \left\{ \frac{2\kappa}{\kappa-1} \left(p_R^{(\kappa-1)/\kappa} \right) \right\}^{1/2}} \quad (6)$$

3.3 EGR 밸브 개도량 계산

모델기반 앞먹임 제어 알고리즘은 최종적으로 EGR 밸브의 개도량을 출력한다. EGR 밸브의 개도량은 Fig. 8에서 보는 바와 같이 EFA와 EGR 밸브 개도량 간의 관계를 실험적으로 구한 후 식 (7)과 같이 curve fitting 식을 이용하였다.

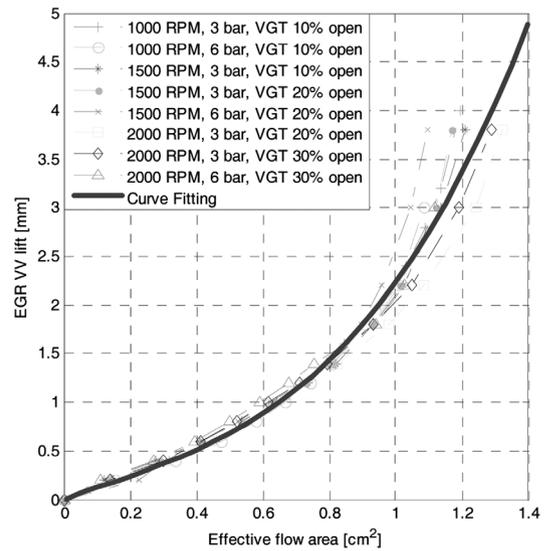


Fig. 8 Relationship between EGR valve lift and EFA

$$EGR \text{ valve lift} = \quad (7)$$

$$c_1 + c_2 EFA + c_3 EFA^2 + c_4 EFA^3$$

3.4 밸브 모델 검증

위 세 단계를 거쳐 계산된 앞먹임 제어 출력값의 타당성을 검증하기 위하여 엔진시험을 수행하였다. Fig. 9는 엔진 동력계 시험을 통하여 측정한 실제 EGR 밸브 개도량과 앞먹임 제어에서 계산된 EGR 밸브 개도량과의 관계를 보여주고 있다. 앞먹임 제어의 출력값이 실제 EGR 밸브 개도량에 가까울수록 모델이 정확하다는 것을 의미한다.

시험 결과 Fig. 9에서 보는 바와 같이 317초에서

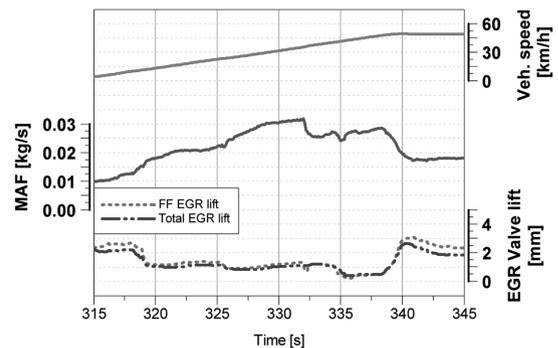


Fig. 9 EGR valve lift model validation result

340초 사이 엔진의 부하와 RPM이 높을수록 feedforward 제어에서 출력하는 EGR 밸브 개도량과 실제 EGR 밸브 개도량 간의 유사한 거동을 확인할 수 있다. 반면, 315초~317초 사이 저부하, 저RPM 영역에서는 실제 개도량과 앞머입 제어 출력값 간의 차이가 증가하는 경향을 보이고 있는데, 이는 저부하 일수록 EGR 밸브 양단의 압력차가 0에 근접하여 모델링 오차가 증가하는 것에서 기인한다.

3.5 EGR 제어 시스템

앞머입 EGR 제어 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 Fig. 10과 같이 두 개의 EGR 제어 시스템을 구성하였다. Fig. 10은 PI 제어를 단독으로 사용했을 때 (a)와 PI제어기에 모델기반 앞머입 제어를 적용했을 때 (b)의 EGR 제어시스템 개요도를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 모델기반 앞머입 제어에서는 EGR 밸브 전·후단의 열역학적 성질을 바탕으로 EGR 밸브의 앞머입 제어 출력을 계산한다.

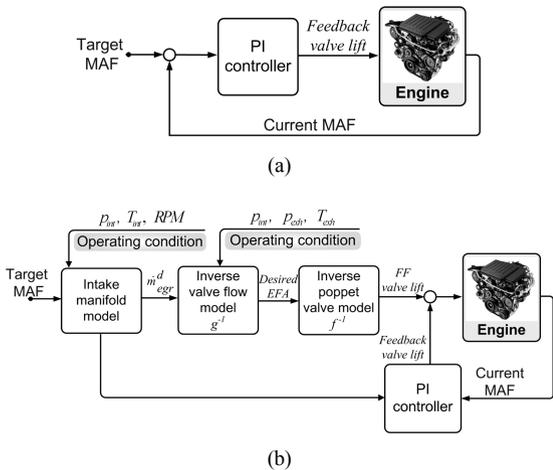


Fig. 10 Schematic diagram of EGR control system (a) feedback control, (b) feedforward + feedback control

4. 실험 결과

이 연구에서는 DC 모터방식 EGR 밸브를 적용한 6기통 3.0 리터 커먼레일 디젤엔진을 이용하여 모델기반 앞머입 제어 알고리즘을 검증하였다. EGR 밸브 제어 알고리즘은 상용 RCP(rapid control proto-

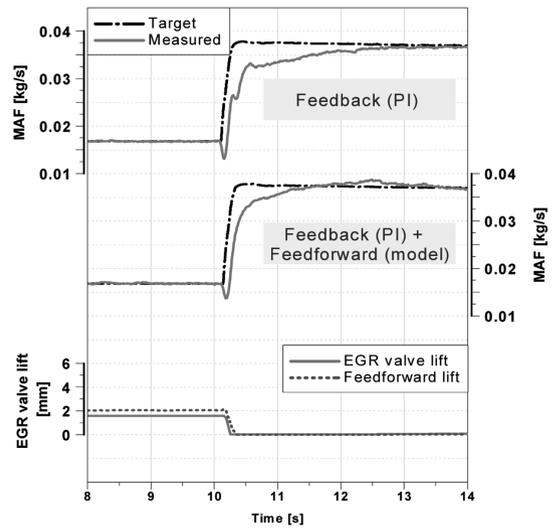


Fig. 11 MAF step response(1,250 rpm)

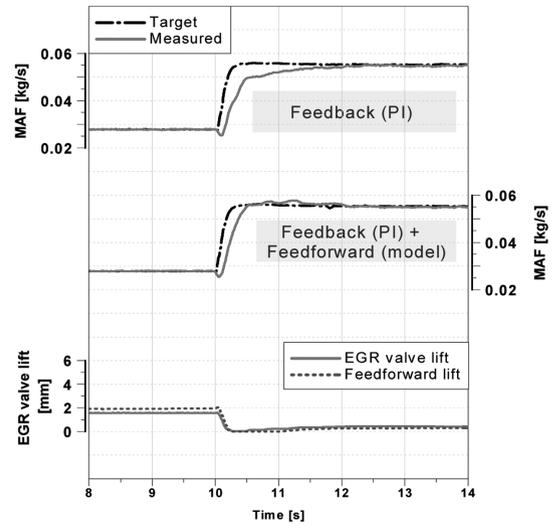


Fig. 12 MAF step response(1,750 rpm)

typing) 도구인 dSPACE 사의 MicroAutoBox를 이용하여 구현하였다. 각 실험 조건 별로 아래와 같이 제어 시스템을 구성 후 목표값 추종 성능을 비교하였다.

- PI 제어
- PI 제어 + 모델기반 앞머입 제어

Fig. 11, 12는 각각 1,250 rpm, 1,750 rpm에서 가속 페달 13% → 33% 계단입력 시 목표 MAF 추종 결과

를 보여주고 있다. 실험 결과에서 보는 바와 같이 PI 제어기에 앞먹임 제어를 적용 했을 경우 PI 제어를 단독으로 사용했을 때보다 평균 상승시간(rise time) 63%, 평균 정착시간(settling time)이 52% 개선되었고, 그래프 하단의 EGR 밸브 개도량 결과에서와 같이, 앞먹임 제어가 EGR 밸브 개도에 지배적인 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

이 논문에서는 승용디젤엔진의 실린더 내 흡입 공기량 제어를 위하여, EGR 밸브의 앞먹임 공기량 제어에 관한 연구를 수행하였다. 이 연구를 통하여 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 질량 보존의 법칙, 속도밀도 방식 공기량 추정법, 오리피스 방정식을 이용하여 승용디젤엔진 공기유로의 평균값 모델링을 수행하였으며, EGR 시스템의 역모델을 바탕으로 앞먹임 제어 알고리즘을 도출하였다.
- 2) EGR 밸브의 앞먹임 제어 알고리즘은 목표 신기 질량유량(MAF) 값을 추종하기 위하여 목표 EGR 질량유량 계산 및 목표 EFA 계산과정을 거쳐 최종적으로 EGR 밸브의 개도량을 계산한다.
- 3) EGR 제어 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 6기통 3.0 리터 커먼레일 디젤엔진을 이용한 동력계 시험을 수행하였으며, PI 제어기에 모델기반 앞먹임 제어 알고리즘을 적용한 결과, PI 제어를 단독으로 제어했을 때보다 평균상승시간 63%, 평균정착시간 52% 개선되었다.
- 4) EGR 시스템의 물리적 의미를 고려한 앞먹임 제어 알고리즘의 적용을 통하여 시스템의 반응성을 개선하였다. EGR 밸브 제어 시 모델을 사용하게 되면 많은 양의 제어기 보정 실험을 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 연구는 (주)현대자동차와 지식경제부에서 후원하는 전략기술인력양성사업, 산업원천기술개발사업, 교육과학기술부에서 후원하는 BK21사업, 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의(No. 2011-0017495) 지원을 받아 수행된 연구임.

References

- 1) H. Zhao, Advanced Direct Injection Combustion Engine Technologies and Development, Woodhead Publishing, Cambridge, pp.3-10, 2010.
- 2) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, New York, pp.491-493, 1988.
- 3) M. Zheng, G. T. Reader and J. G. Hawley, "Diesel Engine Exhaust Gas Recirculation - A Review on Advanced and Novel Concepts," Energy Conversion and Management, Vol.45, pp.883-900, 2004.
- 4) Y. Ham and K. Chun, "Engine Cycle Simulation for the Effects of EGR on Combustion and Emissions in a DI Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.10, No.4, pp.51-59, 2002.
- 5) K. Chun, "EGR Technology," Auto Journal, KSAE, Vol.28, No.6, pp.46-51, 2006.
- 6) Y. Daisho, N. Uchida, K. Morita, S. Shimogata and T. Saito, "Effects of Supercharging and EGR on Diesel Combustion and Emissions," International Symposium COMODIA 94, 1994.
- 7) M. J. Van Nieuwstadt, I. V. Kolmanovsky, P. E. Moraal, A. Stefanopoulou and M. Jankovic, "EGR-VGT Control Schemes: Experimental Comparison for a High-speed Diesel Engine," IEEE Control Systems Magazine, Vol.20, pp.64-79, 2000.
- 8) S. Simani and M. Bonfè, "Fuzzy Modelling and Control of the Air System of a Diesel Engine," Advances in Fuzzy Systems, Vol.2009, No. 450259, 2009.
- 9) N. Chung, S. Kim and M. Sunwoo, "Nonlinear Dynamic Model of a Turbocharged Diesel Engine," SAE 2005-01-0017, 2005.
- 10) E. Hendricks and S. C. Sorenson, "Mean Value Modelling of Spark Ignition Engines," SAE 900616, 1990.
- 11) J. Sun, I. Kolmanovsky, J. A. Cook and J. H. Buckland, "Modeling and Control of Automotive Powertrain Systems: A Tutorial," American Control Conference, Vol.5, pp.3271-3283, 2005.
- 12) O. Grondin, R. Stobart, H. Chafouk and J.

- Maquet, "Modelling the Compression Ignition Engine for Control: Review and Future Trends," SAE 2004-01-0423, 2004.
- 13) H. Kim and S. Park, "A Study on the Characteristics of Linear Solenoid Type and DC Motor Type EGR Valve," Fall Conference Proceedings, KSAE, Vol.1, pp.397-403, 2006.
- 14) P. Yoon and M. Sunwoo, "A Nonlinear Dynamic Engine Modeling for Controller Design," Transactions of KSAE, Vol.7, No.7, pp.167-180, 1999.