

Dual-loop EGR과 VGT가 장착된 디젤엔진 Air-path 시스템에서 저압 EGR 루프의 압력 상태량 추정 방법

김수영^{*1)} · 진호민²⁾ · 최세범³⁾
한국과학기술원 기계공학과^{*1)2) 3)}

An Estimation Method for Pressure States in LP EGR Loop of the Diesel Engine Air-path System with Dual-loop EGR and VGT

Sooyoung Kim^{*1)} · Hyomin Jin²⁾ · Seibum Choi³⁾

^{*1)2)3)} Department of Mechanical Engineering, KAIST, 291 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-701, Korea

Abstract : This paper deals with an estimation method for pressure states such as turbine outlet pressure and compressor inlet pressure in LP (low pressure) EGR (exhaust gas recirculation) loop of a turbocharged diesel engine air-path system. Recently, since concerns about hazardous substances of diesel engine emissions have been raised, diesel engines have been commonly equipped with dual-loop EGR system and VGT. In accordance with the development of the engine configurations, precise control methods have been required. Even though information about pressure states consisting of LP EGR loop are essential for precise control of the air-path system with dual-loop EGR system, mass-produced engines does not include sensors for measuring those pressure states yet. Hence, this paper suggests a simple estimation method of turbine outlet pressure and compressor inlet pressure making best use of mass-produced sensors including MAF (mass air flow) sensor. The estimation method is verified through comparing with experimental data of a 6,000cc heavy-duty diesel engine.

Key words : Diesel Engine Air-path System (디젤엔진 Air-path 시스템), Dual-loop EGR (이중 EGR 시스템), LP EGR (저압 EGR 시스템)

Nomenclature

p_i : intake manifold pressure
 p_x : exhaust manifold pressure
 p_{uc} : compressor inlet pressure
 p_{dt} : turbine outlet pressure
 T_i : intake manifold temperature
 T_x : exhaust manifold temperature
 T_{uc} : compressor inlet temperature
 T_{dt} : turbine outlet temperature
 V_i : intake manifold volume
 V_x : exhaust manifold volume

V_{uc} : compressor inlet volume
 V_{dt} : turbine outlet volume
 R : ideal gas constant
 γ : specific heat ratio
 W_{air} : fresh air flow rate
 W_{HPegr} : HP EGR flow rate
 W_{LPegr} : LP EGR flow rate
 W_{out} : exhaust flow rate
 W_t : turbine flow rate
 W_c : compressor flow rate

Subscripts

i, x : intake manifold, exhaust manifold
 c, uc : compressor, upstream of compressor
 t, dt : turbine, downstream of turbine

* 발표자 김수영, E-mail: westkllr@kaist.ac.kr.

1. 서론

디젤엔진의 배기가스에서 검출되는 유해물질에는 CO (일산화탄소), HC (탄화수소), NO_x (질소산화물), PM (입자상물질) 등이 있다. 현재 세계적으로 디젤엔진의 배기 규제가 강화되고 있으며, 규제에 대응하여 배기가스 후처리 시스템과 EGR (exhaust gas recirculation)과 VGT (variable geometry turbine)같은 많은 엔진 부품들이 개발되었다. 이중에서도 EGR과 VGT의 결합은 PM과 NO_x를 동시에 감축하는데 효과적인 것으로 알려져 있다. 최근에는 EGR의 기능을 효율적으로 사용하기 위해서 EGR 관을 두 개 사용하는 dual-loop EGR 시스템까지 상용화 되었다.

이러한 하드웨어적인 개발에 발맞춰서 디젤엔진 air-path시스템에서의 정밀 제어 기법들이 많이 연구되고 있다. 2000년대 초반부터 시스템의 물리적인 dynamics를 고려해서 제어알고리즘을 설계하는 디젤 엔진의 모델 기반 (model-based)제어에 관한 많은 연구들이 진행되었다. Dual-loop EGR과 VGT가 모두 포함된 디젤엔진의 경우 제어관점에서 봤을 때 시스템 차수가 매우 높으며, single loop EGR 시스템에 비해 아직 많은 연구들이 진행되지 않았다. 특히, LP EGR loop쪽에 제어용 센서가 많이 개발되지 않아서 모델 기반 제어의 적용이 어려운 상황이다. Single-loop EGR 시스템과 비교했을 때 dual-loop EGR시스템은 시스템 차수가 최소 4차 이상 높다. 본 논문은 dual-loop EGR과 VGT가 장착된 디젤엔진 air-path 시스템에서 모델 기반 제어에 필수적인 LP EGR loop의 압력 상태량, 즉 압축기 전단 압력과 터빈 후단 압력을 간단하고도 정확하게 추정할 수 있는 방법에 대해서 다루었다. 압축기 전단 압력은 LP EGR 유량, 압축기 유량 등을 계산하는데 필요하며, 터빈 후단 압력은 터빈 유량을 계산하는데 필수적이다.

2. 시스템 설명

2장에서는 dual-loop EGR과 VGT가 장착된 디젤엔진 air-path 시스템의 설명에 대해 다룰 것이다. 시스템 모델링에 적용되는 주요 dynamics를 기술하고 single-loop EGR 시스템과의 비교를 통해 LP EGR loop의 압력 상태량의 중요성에 대해 다루도록 하겠다.

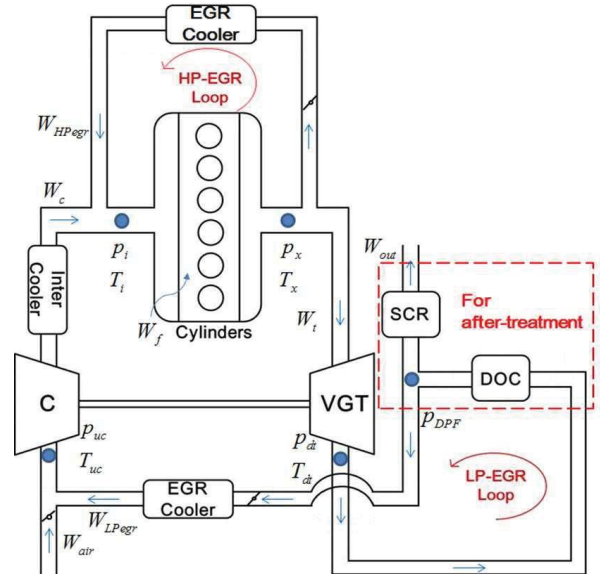


Fig. 1 A schematic of a diesel engine air-path system with dual-loop EGR and VGT

2.1 시스템 작동 원리

Fig.1은 dual-loop EGR과 VGT가 장착된 디젤엔진 air-path를 나타내고 있다. 이 시스템은 EGR이 HP EGR과 LP EGR 두 개의 loop로 장착된 dual-loop EGR 시스템이며 터빈은 날개 각도를 조절할 수 있는 VGT이다. LP EGR loop 부분에는 DOC (diesel oxidation catalyst), SCR (selective catalytic reduction)과 같은 후처리 시스템이 장착 되어 있다. 흡기 스토틀을 통해 신기가 압축기로 유입되고 과급된 신기가 실린더에서 연료와 함께 연소 반응이 일어난다. 연소 반응이 일어난 후에는 배기가스가 HP EGR loop를 통해 재순환되고 나머지 배기가스는 VGT를 작동시키는데 사용된다. VGT는 날개 각도를 배기가스 양에 따라 조정해서 압축기의 과급 효과를 높이는 역할을 한다. 터빈 후단에 배출된 배기가스는 후처리 시스템을 거치게 되는데 이 중 일부는 LP EGR loop로 다시 재순환된다.

2.2 시스템 모델링

Fig.1의 dual-loop EGR 시스템을 표현하는 모델식들 중에서 압력 dynamics (1)-(4)를 나타내었다. 이상기체 방정식과 질량보존의 법칙 등을 통해 시스템의 압력 dynamics는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{p}_i = \frac{R\gamma}{V_i} (T_c W_c + T_x W_{HPegr} - T_i W_{ie}) \quad (1)$$

$$\dot{p}_x = \frac{R\gamma}{V_x} (T_e W_{ex} - T_x W_{HPegr} - T_x W_t) \quad (2)$$

$$\dot{p}_{uc} = \frac{R\gamma}{V_{uc}} (T_a W_{air} + T_{dt} W_{LPegr} - T_c W_c) \quad (3)$$

$$\dot{p}_{dt} = \frac{R\gamma}{V_{dt}} (T_x W_t - T_{dt} W_{LPegr} - T_{dt} W_{out}) \quad (4)$$

위 식에서 $p_\Delta, V_\Delta, T_\Delta, W_\Delta$ 는 순서대로 Δ 의 압력, 부피, 온도, 유량이고 R, γ 는 각각 이상기체 상수, 비열비이다.

식을 보면, 각 압력 dynamics가 유량과 온도에 의해 결정되고 반대로 유량과 온도는 그 부분의 압력에 의해 직접적으로 영향을 받는다. LP EGR loop가 없는 single-loop EGR 시스템의 경우에는 압축기 전단 압력 p_{uc} 와 터빈 후단 압력 p_{dt} 은 dynamics로 표현할 필요 없이 간단히 상수로 처리해도 무난하다. 하지만, LP EGR loop가 추가되면서 dual-loop EGR 시스템에서는 p_{uc} 와 p_{dt} 가 유량 balance에 의한 dynamics를 갖게 된다. 이 두 압력 상대량은 LP EGR loop에 흐르는 유량을 결정하는 물리적으로 가장 중요한 요소이므로 흡기 압력, 배기 압력과 마찬가지로 매우 중요한 물리량이라고 할 수 있다. 본 연구에서 다루는 시스템의 경우, (Fig. 1에서 참조) 후처리 시스템에 DPF없이 DOC만 장착되어 있으므로 후처리 시스템을 지나면서 생기는 압력강하를 무시할 수 있다고 가정하였다.

$$p_{dt} \approx p_{DOC} \quad (5)$$

3. LP EGR loop의 압력 상대량 추정 방법

이번 장에서는 dual-loop EGR 시스템에서 압축기 전단 압력과 터빈 후단 압력을 간단하게 추정하는 방법에 대해 다룬다. Fig. 1을 보면, 압축기 전단 압력과 터빈 후단 압력은 각각 신기 유량 W_{air} , 배기유량 W_{out} 과 물리적으로 연관이 있음을 알 수 있다. W_{air} 는 MAF (mass air flow) 센서 등의 양산 센서로 쉽고 정확하게 측정가능한 물리량이고, W_{out} 은 W_{air} 값과 연료

량의 합으로 쉽게 구해낼 수가 있다.

$$W_{out} \approx W_{air} + W_f \quad (6)$$

추정기 설계에 이용된 시스템은 6,000cc 건설기계용 디젤엔진의 air-path 시스템이다.

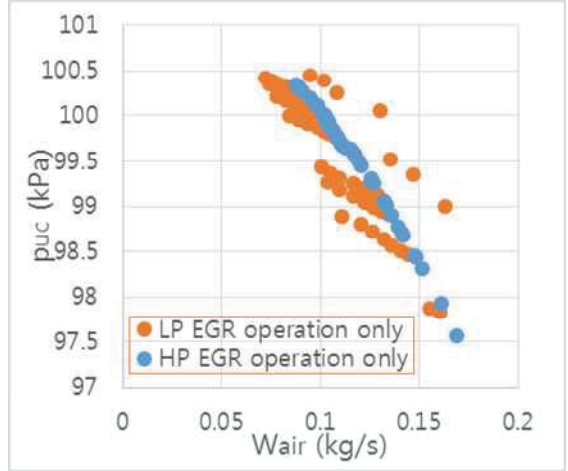


Fig. 2 신기 유량과 압축기 전단 압력과의 관계

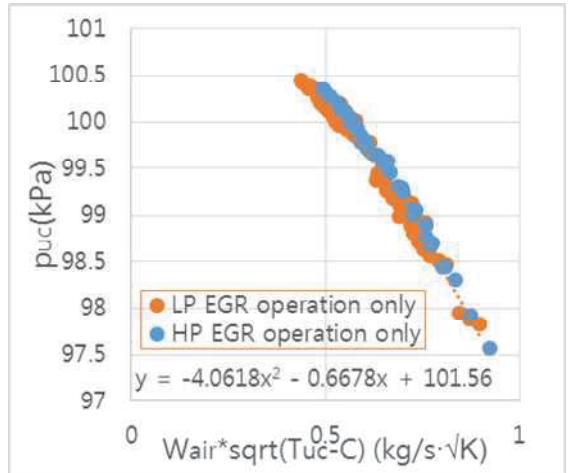


Fig. 3 corrected 물리량과 압축기 전단 압력과의 관계

3.1 압축기 전단 압력 추정

만약 LP EGR operation이 없으면 (single-loop EGR 시스템이면) 흡기 스로틀을 통해 압축기 전단에 유입되는 신기의 양은 압축기 전단 압력에 반비례 할 것을 직관적으로 알 수 있다. 본 연구에서 흡기 스로틀의 개도는 항상 fully 열려있다고 가정하였으므로 압력에만 관계하여 W_{air} 량이 변한다고 할 수 있다. 이와 같은 관계를 Fig. 2

그래프의 푸른색 선에서 확인할 수 있다. 그러나 LP EGR operation이 일어나기 시작하면 압축기 전단에서 LP EGR 유량과 신기 유량이 섞이기 때문에 유량의 온도 등 특성이 변하고 Fig. 2의 주황색 선과 같이 p_{uc} 와 W_{air} 는 불규칙한 특성을 띤다. 이러한 특성 때문에 dual-loop EGR 시스템에서는 신기의 유량만으로 압축기 전단 압력의 변화를 파악하는 것이 어렵게 되었다.

Dual-loop EGR 시스템에서도 압축기 전단 압력을 추정하기 위해서는 압축기 전단의 온도 T_{uc} 의 정보가 필요하다. 이는 LP EGR 유량이 압축기 전단에 유입되면서 변하는 유량의 온도의 특성을 보정해주기 위함이다. T_{uc} 와 W_{air} 의 정보로 p_{uc} 를 추정하기 위해서 다음과 같은 간단한 실험식을 설계하였다.

$$p_{uc} \approx W_{air} \sqrt{T_{uc} - C} \quad (C: \text{constant}) \quad (7)$$

여기서 C는 tuning parameter이다. Fig. 3을 보면 (7)의 corrected 물리량과 p_{uc} 의 관계를 나타낸 것이다. 결과를 보면 2차 다항식으로 쉽게 근사 시킬 수 있을 정도로 같은 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 따라서 T_{uc} 와 W_{air} 의 정보로 p_{uc} 를 쉽게 추정했다고 볼 수 있다.

3.2 터빈 후단 압력 추정

압축기 전단과 마찬가지로 터빈 후단 압력 p_{dt} 같은 경우에는 배기유량 W_{out} 과 물리적으로 상관 관계가 있다. 일반적으로 배기 스로틀의 개도가 일정할 때 p_{dt} 가 증가하면 W_{out} 증가하는 경향을 띠지만 Fig. 4과 같이 p_{dt} 와 W_{out} 의 관계가 불규칙한 경향을 띤다. 그 이유는 역시 HP EGR 유량과 LP EGR 유량의 온도차 때문에 HP EGR operation때와 LP EGR operation때가 각각 다른 경향을 보이는 것이 하나의 큰 요인이다. 터빈 후단 압력을 추정하기 위해 식(7)과 같이 비슷한 실험식을 다음과 같이 설계하였다.

$$p_{dt} \approx W_{out} \sqrt{T_{dt} - C} \quad (C: \text{constant}) \quad (8)$$

여기서 배기유량 W_{out} 은 식(6)으로 쉽게 계산

이 가능하다. 식 (8)은 W_{out} 과 T_{dt} 를 알고 있을 때 p_{dt} 를 추정하는 실험식이다. 이 결과가 Fig. 5에 나타나 있으며 역시 높은 정확도로 2차 다항식에 근사가 가능한 결과임을 알 수 있다.

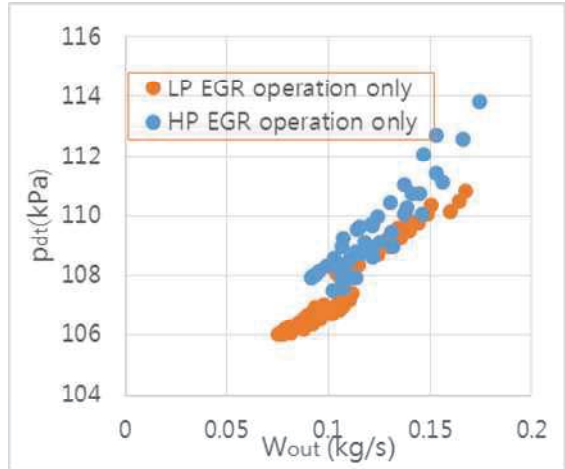


Fig. 4 배기 유량과 터빈 후단 압력과의 관계

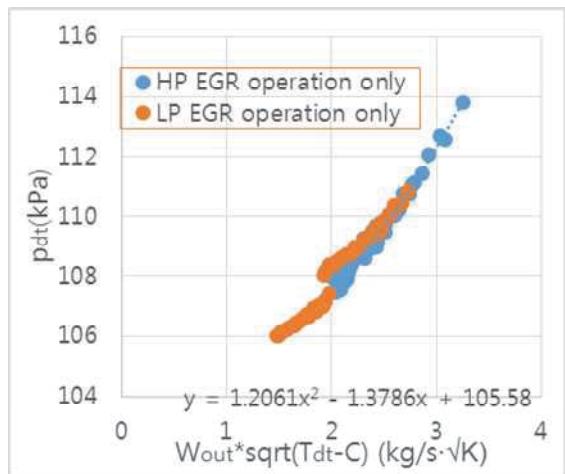


Fig. 5 corrected 물리량과 터빈 후단 압력과의 관계

4. 추정기 성능 검증

식 (7)-(8)과 Fig. 3, 5의 결과를 가지고 압축기 전단, 터빈 후단 압력 추정기의 성능 검증을 수행하였다. 성능 검증은 1400RPM/529Nm, 1400RPM/378Nm, 1800RPM/461Nm, 1800RPM/329Nm 조건 하에서 약 80개의 여러

operating point에서 검증을 하였다. 검증 결과를 Fig. 6-7에 나타내었다.

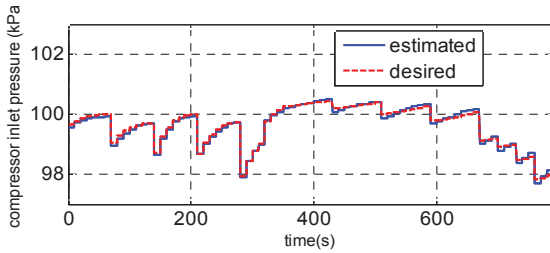


Fig. 6 압축기 전단 압력 추정 성능

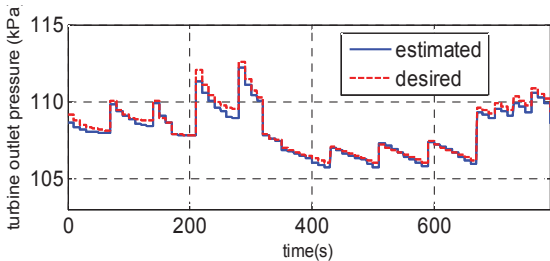


Fig. 6 터빈 후단 압력 추정 성능

두 물리량 모두 최대 오차 1% 미만의 좋은 추정 성능을 보여주고 있다. 결론적으로, 시스템 차수를 높이고 계산량을 많게 하는 dynamics 식을 쓰지 않고 압축기 전단 압력과 터빈 후단 압력을 추정하였다.

5. 결론

압축기 전단 압력은 터빈 후단 압력과 variation이 적고 single-loop EGR 시스템에서는 상수로 간주될 수 있었지만, LP EGR loop가 추가된 dual-loop EGR 시스템에서는 매우 중요한 의미를 가지게 된다. 정석대로라면 이상기체 방정식에 기반한 압력 dynamics 식을 적용하여 모델링을 해야하지만 그럴 경우, 전체 시스템 차수가 너무 올라가고 모델링이 어려워질 수 있다. 대신에, 본 논문에서는 온도 정보와 양산 센서로 쉽게 측정할 수 있는 유량 정보를 이용해 간단하고도 정확하게 압축기 전단 압력과 터빈 후단 압력을 추정할 수 있는 방법을 제안하였다. 추정 방법은 여러 부하 조건과 다양한 operating point에서 검증되었다.

“본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 IT융합 고급인력과정 지원사업의 연구결과(NIPA-2013-H0401-13-1008)와 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2010-0028680)”

References

- 1) Sooyoung Kim, “Pressure and Flow Based Control of a Turbocharged Diesel Engine Air-path System Equipped with Dual-Loop EGR and VGT,” American Control Conference, Portland, OR, USA, June 04-June 06, 2014.
- 2) Youngsik Yoon, "A Study of Turbocharged Diesel Engine Modeling and Robust Model based Sliding Mode Controller Design", M.S. thesis, KAIST, 2011.
- 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 Passeneger Car Implementation “, SAE Technical Paper 2003-01-0357, 2003.
- 4) 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.
- 5) 김수영, 진효민, 최세범, 고민석, “EGR과 VGT가 장착된 디젤엔진 제어를 위한 적응 기법의 개발”, 한국자동차공학회 부문종합 학술대회, pp 60-68, 2013.
- 6) 박정민, 노영창, 김득상, “HiLS용 Heavy-duty Diesel Engine 모델 개발”, 한국자동차공학회 학술대회 및 전시회, pp 219-222, 2013.