

승용 디젤엔진에서 EGR과 VGT의 공동 제어

허 준 영*¹⁾ · 정 진 은²⁾ · 진 영 옥²⁾ · 강 우³⁾ · 정 재 우³⁾

한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부¹⁾ · 한국기술교육대학교 기계정보공학부²⁾ · 자동차부품연구원 첨단동력/IT융합연구센터³⁾

Coordinated Control of EGR and VGT in the Diesel Engine

Junyoung Huh*¹⁾ · Jin-Eun Chung²⁾ · Youngwook Jin²⁾ · Woo Kang³⁾ · Jae-Woo Chung³⁾

¹⁾School of Mechatronic Engineering, Korea University of Technology and Education, Chungnam 330-708, Korea

²⁾School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education, Chungnam 330-708, Korea

³⁾Advanced Power & IT Research Center, KATECH, 74 Yongjeong-ri, Pungse-myeon,

Cheonan-si, Chungnam 330-912, Korea

(Received 14 January 2008 / Accepted 12 March 2008)

Abstract : In diesel engine technology the drive to reduce emissions and fuel consumption with improved performance targets has led to many advances. In particular, Exhaust Gas Recirculation (EGR) and Variable Geometry Turbocharger (VGT) have played a key role in achieving these aims by permitting flexible control of the engine inlet gas charge. The full potential of these devices are difficult to achieve due to limitations in the classical control methods. However, fuzzy logic is particularly appealing due to its simple heuristic nature. The controller used in this work was designed using the Matlab Fuzzy Logic Toolbox. The overall object is to access the potential for emissions and fuel consumption reductions during transient events whilst maintaining and even improving driveability. Classical control methods (PID), as used on production engines, are examined and contrasted with an coordinated control that utilizes fuzzy logic.

Key words : Diesel engine(디젤엔진), EGR(배기가스 재순환), VGT(가변과급기), Fuzzy logic(퍼지 로직), Coordinated control(공동제어)

1. 서 론

지난 10년간 디젤엔진에서는 효율과 출력을 증대시키고 유해 배출물을 최소화시키고자 노력해 왔다. 특히 배기가스 재순환(EGR, Exhaust Gas Recirculation)장치와 가변과급기(VGT, Variable Geometry Turbocharger) 장착은 이 목적을 달성하는데 크게 기여하였다. EGR 장치와 VGT의 정적, 동적거동은 엔진성능과 연료절감, 배기 배출물에 크게 영향을 주기 때문에 최근 많은 연구¹⁾가 수행되어 왔다. Van Nieuwstadt 등²⁾은 EGR-VGT 제어가 연비 향상과 유해 배기가스 감소에 미치는 영향을 보여주고 EGR-

VGT 제어를 향상시키기 위한 다양한 전략이 언급되었다. Shirawaka³⁾등은 향상된 제어에 따른 복잡한 교정을 감소시키기 위한 기준모델 제어를 제시하였다. 이것은 시스템의 일부분이 확인된 모델로 나타낼 수 있다면 제어시스템에서 조정해야 할 파라미터 수가 더 작아진다는 아이디어에 기초한다. Van Nieuwstadt⁴⁾과 Walker⁵⁾등은 VGT와 EGR로부터 흡기 매니폴드의 압력과 공기유량의 MIMO 플랜트에 대하여 선형해석을 행하였다. 그 결과로 저속 저부하 영역에서 정상상태 게인이 심각한 비대각 항을 갖는다는 것을 보였다. 비대각 항은 이 영역에 VGT와 공기유량 사이에 강한 양의 게인 관계를 보인다. 즉, 공기유량을 증가시키기 위하여 VGT 위치는 증

*Corresponding author, E-mail: huh@kut.ac.kr

가(배인 열림)되어야 한다. 그러나 엔진속도와 부하가 증가할 때 비대각 항은 감소되고 결국에는 부호를 바꾼다. 이것의 물리적인 해석은 더 많은 에너지가 배기에서 유용해 질 때, 터빈에서의 질량유량은 과급기의 회전 속도와 압축기 전달에 더 큰 효과를 갖는다는 것이다. 즉, 공기유량 감소를 위하여 VGT 위치를 증가(배인 열림)시켜야 한다. 이 역 계인의 영역은 매우 불확실하므로 해석적인 제어 해를 만들어 내기 어렵다.

Van Nieuwstadt⁴⁾는 저속 저부하 영역에서 공기흐름 응답을 개선하기 위하여 H_{∞} 제어를 사용한 공동제어를 시도하였다. Walker⁵⁾ 등은 저속 저부하에서 상호작용을 줄이기 위해 '대각화 보상기'를 사용하였다. 그리고 동적 보상기가 필요한 페루프 동특성을 얻기 위하여 포함하였다.

한편 퍼지제어는 수학적 모델링이 필요 없는 단순성과 잡음에 대한 강인함으로 인하여 EGR-VGT 공동제어에 적절한 것으로 사료되어 관련 연구가 시도되고 있다. Vaughan 등⁶⁾은 Matlab/Simulink 환경에서 자동차회사에 의해 제공된 평균값 엔진모델을 사용하여 디젤엔진에서 EGR-VGT의 퍼지제어에 대하여 연구하였다.

본 연구에서는 배기량 2.0 L의 소형 디젤엔진에 대하여 저속 저부하 상태에서 공기유량의 천이 동작을 향상시키기 위해 퍼지로직에 의한 EGR-VGT 시스템의 공동제어를 시도하였다. 엔진모델로서는 Imagine에서 제공되는 IFP-Engine Library⁷⁾를 사용하였고, 공동제어 결정 퍼지로직은 Matlab의 퍼지로직 툴박스를 사용하여 설계하였다. 기존의 PID제어와 퍼지로직 제어의 상대적인 성능이 시뮬레이션을 통하여 검토되었다.

2. 엔진 시스템

2.1 EGR과 VGT

EGR은 엔진 실린더 내에서 발생하는 질소산화물(NOx)을 감소시키는 효율적인 방법으로 널리 사용되고 있다. EGR 장치는 배기가스의 일부를 흡기 매니폴드로 유입시켜, 들어오는 신기(fresh air)와 혼합시킨다. 이것은 실린더 내의 산소 농도를 줄여 최고 연소 온도를 낮춘다. 따라서 질소산화물 생성을 억

제한다. EGR 유량은 흡기와 배기 매니폴드 사이에 위치한 EGR 밸브를 개폐하여 조절한다.

한편 기하학적 형상이 고정된 기존의 과급기(turbocharger)는 정해진 엔진 회전수와 부하 조건에서 일정한 압축기 압력비를 제공한다. 그러나 VGT는 터빈 입구에 위치한 배인을 조절하여 유동 면적을 조절하므로 정해진 엔진 조건에서 다양한 압축기 압력비를 제공할 수 있다. 그러므로 VGT는 넓은 엔진 운전조건에 대하여 최적의 흡기압력(boost pressure)을 제공할 수 있다. 엔진에서 연소된 배기가스는 배기 매니폴드를 지나 VGT 터빈을 회전시키면서 배기된다. 이 때 VGT는 배인의 형상을 조정하여 터빈의 회전속도를 조절할 수 있고, 터빈과 연동되어 있는 압축기는 신기 공급을 조절할 수 있게 되어 있다. VGT 작동기를 조작하여 VGT를 닫아서 배인의 통과면적을 작게 하면 배기가스가 VGT 터빈에 집중되므로 터빈의 회전속도를 높여서 신기 공급을 증가시키고 VGT를 열면 반대로 신기 공급이 감소된다. 한편 VGT를 닫으면 배기 매니폴드의 압력이 증가하여 배기 매니폴드와 흡기 매니폴드 사이에 설치되어 있는 EGR 밸브를 통하여 배기가스가 흡기 매니폴드 쪽으로 더 많이 유입된다. 이 때 엔진출력은 낮아진다.

그리고 가속 응답은 추가적으로 요구되는 신기(fresh air)를 얼마나 신속하게 확보 하느냐에 의해 결정된다. EGR 잔류가스로 인하여 적절한 신기 공급에 지연이 생기면 엔진 토크 생성에 차질이 야기된다. 반면에 과도한 흡기 압력은 실린더 헤드에 변형을 가져와 엔진 내구성을 악화시킨다. 따라서 EGR과 VGT 응답 제어는 신속하면서 잘 감쇠되어야 한다. 이와같이 엔진과 VGT의 터빈, 압축기, EGR 밸브를 지나는 가스 유동은 긴밀하게 연동되어 있고, 매우 비선형적이다.

2.2 엔진 모델

일반적으로 엔진제어를 위한 모델링으로 평균값 모델(Mean Value Model)이 많이 사용된다. 이것은 간단하면서도 유용한 정보를 제공한다. 그러나 본 연구에서는 EGR-VGT가 장착된 디젤엔진에 대하여 IMAGINE사의 AMESim/IFP-Engine Library를 사

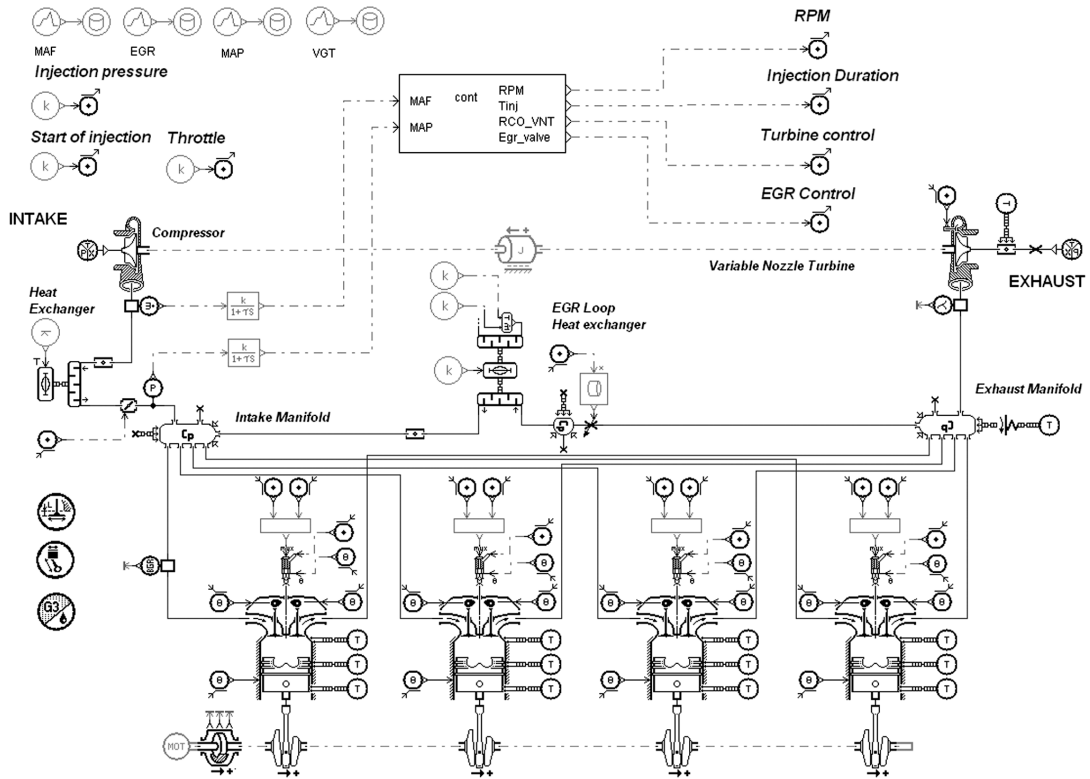


Fig. 1 Flow diagrams of the diesel engine with EGR/VGT in IFP-engine

용하였다. 본 모델에서는 엔진회전수와 연료공급량, 흡기압력, 공기유량, VGT 변위, EGR 변위, 크랭크 회전각 등의 변수들을 글로벌 변수로 선언하여 엔진 전체를 모델링했음에도 불구하고 비교적 간단하게 나타낼 수 있다.

Fig. 1에 사용된 AMESim모델을 나타낸다.

3. 제어기 설계

3.1 PID제어기 설계

VGT와 EGR 시스템을 위한 기존의 제어전략은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 피드퍼워드항을 갖는 PID제어를 사용하고 있다. EGR-VGT시스템이 크게 연동되어 있는 MIMO이지만 두개의 SISO루프로 제어한다. 흡기압력은 VGT작동기의 목표값 조정을 위한 피드백으로 사용된다. 그리고 압축기의 공기 질량유량은 EGR 밸브 작동기의 목표값 조정을 위한 피드백으로 사용된다. 제어기를 위한 흡기압력과 VGT작동기의 설정값, 그리고 압축기의 공기질량유

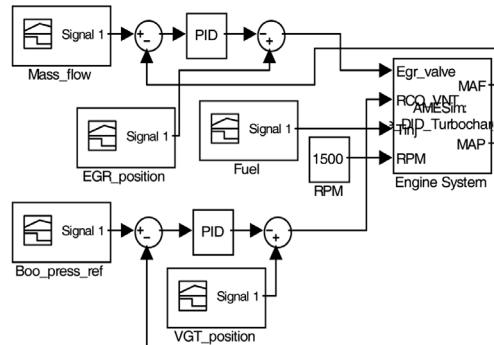


Fig. 2 PID control for EGR-VGT

량과 EGR 밸브의 설정값은 광범위한 엔진 맵으로 정한다. 이 엔진 맵은 고정된 엔진속도와 연료 입력에서 유해 배출물과 연료소모, 운전성, 엔진 내구성에 관한 최적 설정을 위한 VGT작동기와 EGR 밸브 위치를 나타낸다.

클로즈드 루프는 공기유량과 흡기압력의 설정점으로 수렴하도록 EGR-VGT작동기의 위치를 미세

조정 한다. 엔진 맵이 이상적인 경우에는 클로드스 루프 항은 거의 작용을 하지 않을 것이다. 그러나 실제로는 엔진의 크게 비선형적인 특성과 노후화, 구동환경의 변화와 같은 부가적인 요소에 의하여 정상상태오차를 크게 유발된다. 클로드스 루프를 부가하여 VGT와 EGR로의 흡기압력과 공기 질량 유량을 피드백하면 엔진 작동점의 변화에 따른 넓은 범위에서도 원만한 제어가 가능하다.

3.2 공동제어 결정 퍼지로지 설계

저속 저부하에서 터빈으로 향하는 유용한 에너지는 낮고 터보차저 응답은 제한된다. 배기 매니폴더 압력에 대하여 VGT메카니즘이 갖는 모델레이션 효과로 인하여 EGR 밸브를 열린 상태에서 VGT베인 위치의 변화는 터보차저 속도보다 EGR흐름상에 더 큰 효과를 준다. 따라서 저속 저부하 영역에서 공기 흐름은 EGR 단독 제어보다는 EGR-VGT의 공동제어를 하면 더 효과적일 것이다. 그러나 기존의 제어기는 저속, 저부하 작동영역에서 VGT를 단힘상태로 설정하여 EGR 시스템에 영향을 미치는 VGT작동기의 연동된 효과에 의해 야기되는 문제점들을 피한다. 그러나 이것은 두 개의 작동기(EGR, VGT)를 사용하므로써 공기흐름응답을 개선할 수 있는 가능성을 버리는 것이다.

공동제어 퍼지로지 결정의 첫번째 단계는 구조를 결정하는 것이다. 여기서는 저속 저부하영역인지를 판단하여 저속 저부하영역에서는 EGR-VGT의 공동제어를 실시하고, 저속 저부하영역이 아니라면 EGR-VGT의 공동제어를 해제하는 것이다. 따라서 시스템에 대한 입력은 엔진속도(N_{ENG})와 연료 공급(ω_F)임이 분명하다. 출력은 저속 저부하영역 가능성이다. 다음 단계는 입력들과 출력들을 위한 멤버십 함수(MF)를 정의하는 것이다. 저속, 저부하영역을 퍼지로지의 멤버십 함수로 특성화한다. 이 MF들은 명확히 멤버인 경우에 그 값에 1을 주고 명확히 멤버가 아닌 경우에 그 값에 0을 주는 특정 설정에 속하는 주어진 값의 가능성을 정의한다. 예로서 저속을 정의하는 MF를 Fig. 3에 나타낸다. 함수는 2000rpm 이하에서 1의 값을 갖고, 2750rpm 이상에서 0의 값을 갖는다. 2000~2750rpm 구간에서는 선

형적으로 감소한다. 1500rpm의 엔진속도는 저속에 해당하는 1의 가능성을 갖는다. 그럼에도 2500rpm의 값은 저속영역에 있을 가능성이 0.33이다. 저부하 설정을 위한 MF를 Fig. 4에, 출력을 위한 MF를 Fig. 5에 나타낸다.

마지막 단계는 Table 1에 나타낸 바와 같이 퍼지 로직을 위한 룰을 정의하는 것이다. 이는 단지 얻고자 하는 제어동작을 구체적으로 기술하는 것이다.

퍼지로직의 개략도를 Fig. 6에 나타낸다. 여기서 $f(u)$ 는 3개의 입력(MAF error, 퍼지로지 결과값, MAP

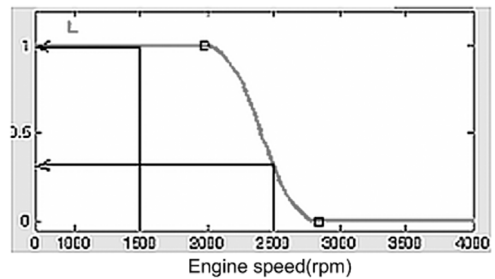


Fig. 3 Low speed membership function

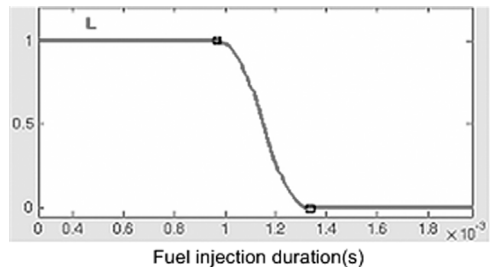


Fig. 4 Low load membership function

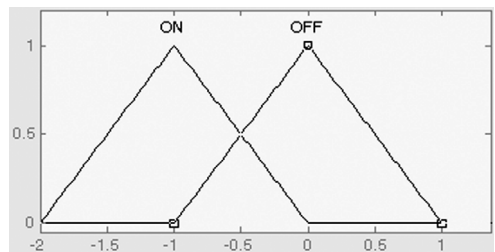


Fig. 5 Output membership function for coordinated action

Table 1 Fuzzy logic controller rules

No.	Rule
1	If (RPM is L)and(Fuel is L) then (CoCon is ON)
2	If it is not then (CoCon is OFF)

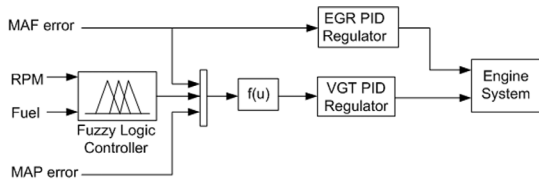


Fig. 6 Schematic of the fuzzy controller

error)을 받아 퍼지로지식 결과값에 따라 공동제어를 행하게 된다.

4. 시뮬레이션

Fig. 7~10에 시뮬레이션 결과를 보인다. 시뮬레이션 시간은 0~20초이며, 5초와 10, 15초에 연료분사 시간을 계단 형상으로 변화시켜 부하의 변동을 나타내었다(Fig. 7). 계단 형상의 오름을 톱인(tip-in)이라고 하고, 계단 형상의 내림을 톱아웃(tip-out)이라 한다.

5초에서의 톱인 시에 엔진으로 들어가는 공기유량은 공연비(AFR)를 유지하기 위하여 증가되어야 한다. 이를 위하여 EGR 밸브를 닫음으로 실린더로 유입되는 배기가스 유량을 감소시킨다. 그러나 이 작동은 배기 압력을 증가시킨다. EGR 밸브를 통한 유량은 밸브 열림 양과 밸브 전후의 압력 차이의 함수이기 때문에 배기 압력을 증가시키는 것은 밸브 닫힘의 작용에 대하여 반대로 작용한다. 이 효과가 EGR 유량을 증가시킬 정도로 급격한 변화를 가져오지 않다고 하더라도, 이것은 EGR 유량의 응답을 천천히 감소시킨다. 이 응답성을 향상시키기 위하여 EGR 밸브가 닫힐 때 배기 압력을 감소시키는 방법이 요구된다. 이것은 VGT 배인을 열어주고 동시에 EGR 밸브를 닫아 줌으로써 얻어질 수 있다.

5초에서의 톱인 시에 흡입 공기유량이 기존의 제어(STD)에 비하여 공동제어(COORD)를 실시했을 때 향상되었음을 볼 수 있다(Fig. 8). 톱인에 대하여 기존제어에서는 VGT 작동기가 정지되어 있지만 공동제어에서는 크게 열리는 것을 볼 수 있다(Fig. 9). VGT의 작동에 의하여 흡기공기유량 오차는 작아졌기 때문에 EGR 작동기의 거동도 공동제어에서는 작아졌다(Fig. 10). 10초에서의 톱아웃 시에 엔진의 저속, 저부하 작동영역에서 흡기공기유량은 공기연료비를 유지하기 위하여 감소되어야 한다. 이것을 위하여 위에서 언급된 같은 이유로 EGR 밸브 열림과

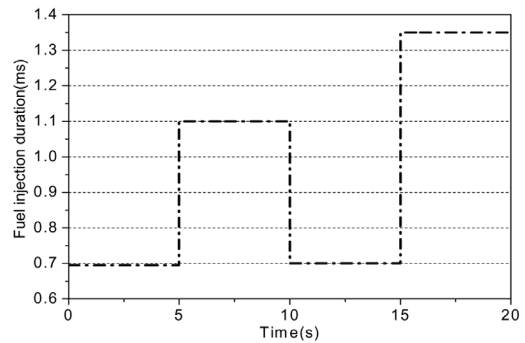


Fig. 7 Fuelling staircase profile

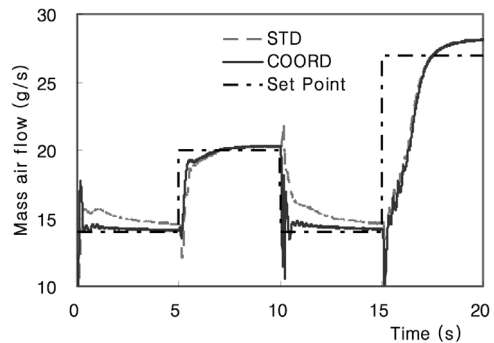


Fig. 8 Mass air flow response

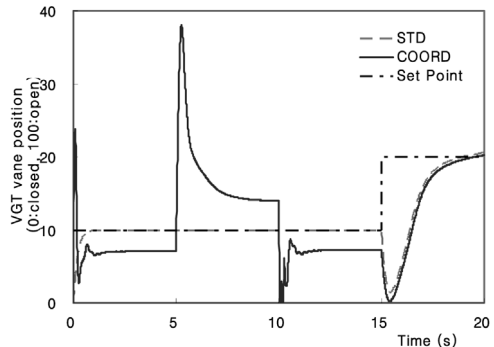


Fig. 9 VGT vane position response

동시에 배기 압력이 증가된다면 EGR 유량은 더 빠르게 증가한다. 이것은 VGT 배인 닫힘에 의하여 얻어질 수 있다. 10초에서의 톱아웃 시에 흡기공기유량이 기존의 제어에 비하여 공동제어를 실시했을 때 향상되었음을 볼 수 있다(Fig. 8).

톱아웃에 대하여 기존제어에서는 VGT 작동기가 정지되어 있지만 공동제어에서는 크게 닫히는 것을 볼 수 있다(Fig. 9). VGT의 작동에 의하여 흡입 공기

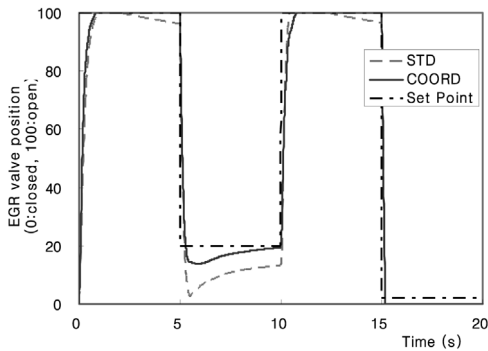


Fig. 10 EGR valve position response

유량 오차는 작아졌기 때문에 EGR 작동기의 거동도 공동제어에서는 완만해졌다(Fig. 10).

저부하, 저속운전영역 밖에서는 다른 제어 시나리오가 요구된다. 배기가스 에너지가 터빈에 의하여 유용한 일을 끌어낼 수 있는 레벨로 증가하면 VGT작동은 흡기 매니폴더 압력에 주도적인 효과를 갖기 시작한다. 따라서 시스템의 공동특성은 독립적인 제어루프가 성공적으로 적용될 수 있도록 감소된다. 팀인의 목적을 달성하는 관점에서 흡입공기유량을 증가시키기 위하여 압력을 올리는 것이다. 이것은 과급기로 가는 에너지 전달을 최대로 하기 위하여 VGT 베인을 닫음으로서 얻어진다. 15초에서의 팀인은 연료분사시간이 0.69 ms에서 1.35 ms로 바뀌면서 저부하 영역을 벗어나게 된다. 따라서 공동제어는 해제되고 VGT 작동기의 거동은 기존제어와 동일하게 닫혔다가 흡기압력오차에 따라 다시 열리는 것을 볼 수 있다(Fig. 9).

5. 결론

간단한 퍼지로지식 공동제어가 엔진 흡배기의 효과적인 제어를 제공할 수 있음을 시뮬레이션을 통하여 아래와 같이 보였다.

- 1) 룰 베이스 구조의 퍼지로지식으로 EGR-VGT작동기의 공동제어가 가능하다.
- 2) 저속 저부하영역의 팀인에서 공동제어로 인하여 VGT작동기 열림과 동시에 EGR작동기 닫힘이 일어나므로 흡입공기흐름 응답을 개선할 수 있다.
- 3) 저속 저부하영역의 팀아웃에서 공동제어로 인하여 VGT작동기 닫힘과 동시에 EGR작동기 열림이

- 일어나므로 흡입공기흐름 응답을 개선할 수 있다.
- 4) 저속 저부하 영역을 벗어날 때 즉시 공동제어는 해제되고 기존의 제어로 복귀가 가능하다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 ‘핵심기반기술개발사업’의 지원으로 수행되었으며 관계 기관에 감사드립니다.

References

- 1) S. Jeong, J. Chung, J. Kang and W. Kang, “The Effect of Control of the VGT and EGR in a Turbocharged Common-Rail Diesel Engine on Emissions under Partial Loads Conditions,” Transactions of KSAE, Vol.15, No.6, pp.151-158, 2007.
- 2) M. Van Nieuwstadt, I. Kolmanovsky, P. Moraal, M. Jankovic and A. Stefanopoulou, “EGR VGT Control Schemes: Experimental Comparison for a High Speed Diesel Engine,” IEEE Control Systems Magazine June 2000, pp.64-79, 2000.
- 3) T. Shirawaka, M. Miura, H. Itoyama, E. Aiyoshizawa and S. Kimura, “Study of Model-based Cooperative Control of EGR and VGT for a Low-temperature, Premixed Combustion Diesel Engine,” SAE 2001-01-2006, 2001.
- 4) M. Van Nieuwstadt, P. Moraal, I. Kolmanovsky and A. Stefanopoulou, “A Comparison of SISO and MIMO Designs for EGR-VGT Control of a High Speed Diesel Engine,” IFAC Workshop Advances in Automotive Control, Ohio USA, 1998.
- 5) D. Walker, “The Design and Implementation of an Integrated Variable Geometry Turbocharger Control Strategy for a Passenger Car Diesel Application,” MSc Thesis, University of Loughborough, 1998.
- 6) R. S. Wijetunge, J. G. Hawley and N. D. Vaughan, “Application of Alternative EGR and VGT Strategies to a Diesel Engine,” SAE 2004-01-0899, 2004.
- 7) IFP-Engine Library, Version 4.3, Imagine, 2005.