

승용 디젤엔진 HIL 시스템의 응답 특성

정진은^{1*}, 노호종²

¹한국기술교육대학교 기계정보공학부, ²서한워너터보시스템즈 기술연구소

Response Characteristics of the HIL System for Passenger Diesel Engine

Jin-Eun Chung^{1*} and Ho-Jong Roh²

¹School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology & Education

²Research Center, Seohan Warner Turbo Systems

요약 본 연구에서는 터보과급기 테스트 벤치, 실시간용 소프트웨어와 DAQ의 HIL 플랫폼, 그리고 Matlab/ Simulink로 작성한 엔진 모델로 구성된 HIL 시스템을 구축하고, HIL 시스템의 정상 작동 여부를 파악하기 위해 연료 공급량을 단계적으로 변화시키는 시뮬레이션을 수행하였다. 연료 공급량을 1.8944 kg/h와 4.7360 kg/h 사이에서 단계적으로 변화시키고, 시스템이 설정된 목표 공연비 32를 추종하는지 여부를 분석하였다. 시뮬레이션의 결과 연료 공급량을 변화시킨 상태에서 20초 정도의 시간이 경과한 후 설정된 목표 공연비에 정상적으로 수렴하였다. 또한 연료 공급량의 변화에 따라 터빈 베인 듀티비와 압축기의 부스트 압력도 적절하게 변화함을 확인하였다. 따라서 본 시스템은 터보과급기 개발 및 성능 개선에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract A HIL(hardware-in-the-loop) system was established and the simulation was carried out to determine whether the system operates normally. The system consists of turbocharger test bench, HIL platform with real time S/W and DAQ, and engine model using Matlab/Simulink. In the simulation the supplied fuel rate is changed step-by-step from 1.8944 kg/h to 4.7360 kg/h. The change of air-fuel ratio is analyzed and observed whether the air-fuel ratio follow the target air-fuel ratio 32. When the supplied fuel rate is changed, the air-fuel ratio is converged to the target air-fuel ratio after about 20 seconds. And the vane duty ratio of turbine and the boost pressure of compressor are also changed properly. Therefore this HIL system can be used to develop the new turbocharger and improve the performance of the modified turbocharger.

Key Words : HIL(hardware-in-the-loop), VGT, Response Characteristics

1. 서론

현재 다양한 동력원으로 사용되고 있는 내연기관은 연료로 탄화 수소계의 화석연료를 사용하고 있으며 국제에너지기구(IEA)는 장기전망 보고서에서 2040년이면 석유가 완전히 고갈될 것이라고 보고하고 있다. 또한 전 세계적으로 대두되고 있는 지구환경문제에 의한 이산화탄소 등 온실가스에 대해 규제치를 강화함에 따라 근래 출시되는 디젤엔진은 유해 배기가스를 최소화하고 출력을 극대화하므로 출력당 배기량을 축소하여 연비를 향상시키

기 위해 터보과급기나 배기가스재순환장치(EGR)같은 부품들이 장착되고 있다. 이러한 부품이 장착될 때마다 엔진의 성능에 영향을 미치는 정도를 실험을 통해 확인하는 데는 많은 시간과 경비를 필요로 하며, 또한 컴퓨터를 통한 시뮬레이션으로 성능을 알아볼 경우 실제과 맞지 않는 부분이 많다.

이러한 어려움을 극복하기 위해 제시되고 있는 것이 HIL(hardware-in-the-loop) 시스템을 이용한 시뮬레이션이다. Raman 등[1]은 승용 차량의 동력구동 시스템에 대한 제어 모듈 개발을 위하여 HIL 시스템을 구축하였고,

본 논문은 한국기술교육대학교 교육연구진흥비의 지원으로 수행되었음.

*교신저자 : 정진은(jechung@kut.ac.kr)

접수일 11년 09월 15일

수정일 (1차 11년 10월 26일, 2차 11년 11월 01일)

게재확정일 11년 11월 10일

Du 등[2]은 대형 디젤엔진용 Waste Gate 터보과급기의 제어기를 개발하는데 HIL 시스템을 사용하였다.

본 연구에서는 가변형 터보과급기가 장착된 승용 디젤 엔진에 대한 HIL 시스템을 구축하고, HIL 시스템의 정상 작동 여부를 파악하기 위해 연료 공급량을 단계적으로 변화시키는 시뮬레이션을 수행하였다. 이때 연료 공급량의 변화에 따라 시스템이 설정된 목표 공연비 추종 여부를 분석하였다.

2. 엔진 모델링

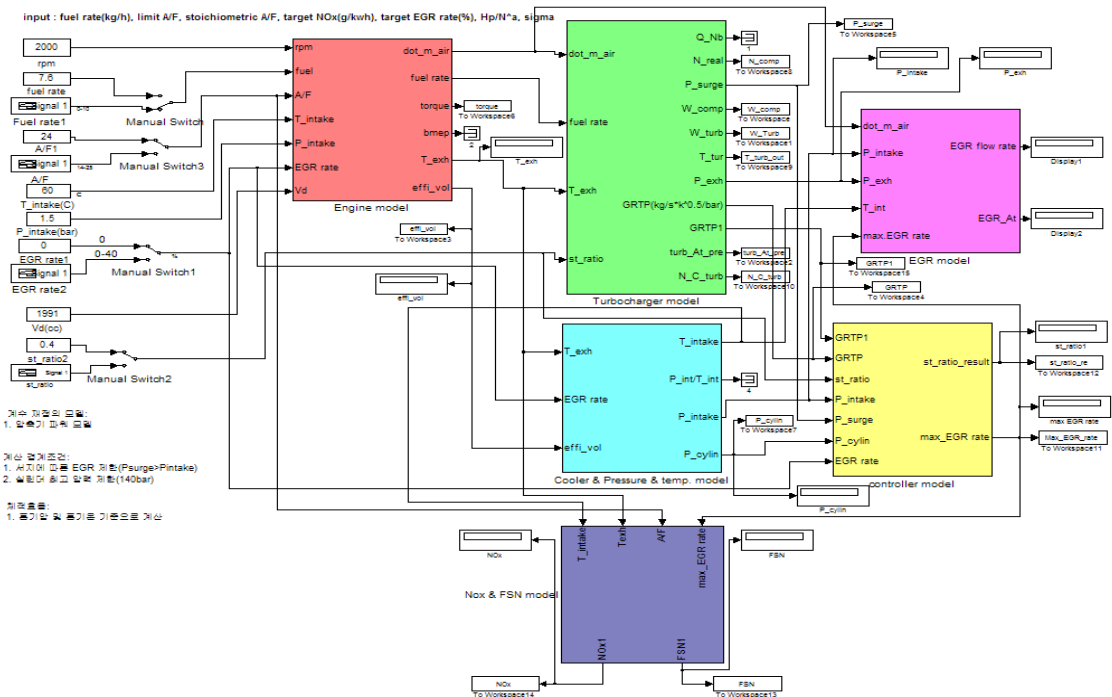
사용된 디젤 엔진 모델의 경우 실시간 계산이 가능하도록 엔진 모델의 복잡성과 성능 변수들 간의 상관 관계를 최대한 간소화시키기 위해 엔진 실험 데이터를 바탕으로 한 평균값 모델을 사용하였다[3]. 디젤엔진 모델은 엔진 모델, 터보과급기 모델, EGR 모델, 쿨러 모델, 배기 가스 모델 그리고 컨트롤 모델 6개의 서브모델로 구성되었다[4].

표 1에 모델의 입력과 출력 변수들을 나타내었고, 그림 1에 Matlab/Simulink로 작성한 모델의 흐름도를 나타내었다.

[표 1] 엔진 모델의 입출력 파라미터
[Table 1] Parameters of engine model

Input Parameter	Output Parameter
1. Engine displacement	1. Torque & bmep
2. Engine speed	2. Volumetric efficiency
3. Target A/F	3. Exhaust manifold temperature and pressure
4. Fuel rate	4. Thermal efficiency
5. Initial intake manifold temperature and pressure	5. Compressor flow performance
6. Target EGR rate	6. Turbine flow performance
	7. Intake manifold temperature and pressure
	8. EGR rate
	9. Peak cylinder pressure
	10. NOx, Smoke number

엔진 모델은 엔진 배기량, 엔진속도 등 기본 자료와 목표 공연비, 연료질량유량 등 입력자료에 근거하여 체적효율을 산출하고, 터보과급기 모델은 과급기로 유입되는 공기질량유량, 온도 및 압력에 근거하여 터빈과 압축기 출력, 압축기 출구 압력 및 터빈 출구 압력을 산출한다. EGR 모델은 잔류가스비율과 체적효율을 이용하여 EGR 율을 산출하고, 쿨러 모델은 열전달모델을 사용하여 흡기 온도를 산출하고, 배기 가스 모델에서는 공연비와 터빈입



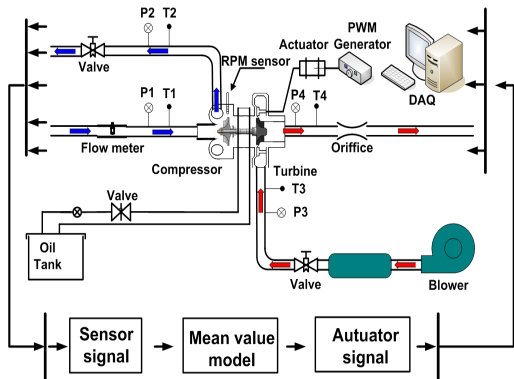
[그림 1] Simulink를 사용한 엔진 모델
[Fig. 1] Engine model using Simulink

구온도에 근거하여 질소산화물과 스모그 배출량을 산출한다. 그리고 컨트롤 모델에서는 제어에 필요한 자료를 산출한다.

3. 터보과급기 HIL 시스템

그림 2에는 HIL 시스템 개략도를 나타내었다. HIL 시스템은 터보과급기 테스트 벤치, HIL 플랫폼(platform) 및 엔진모델 블록의 3부분으로 구성되었다.

터보과급기 테스트 벤치에서는 터보과급기를 통과하는 공기 및 배기가스의 질량유량, 온도와 압력을 측정하여 DAQ 보드에서 신호를 변환하여 엔진 모델로 입력한다. 엔진 모델에서 산출된 과급기의 베인 각도를 DAQ 보드에서 신호 변환하여 과급기로 공급한다. HIL 플랫폼은 실시간으로 센서 신호들을 취득하고 액추에이터 신호를 처리하는 DAQ 보드로 구성되었다. 그리고 엔진모델 블록은 앞절에서 설명한 Matlab/Simulink로 작성된 평균값 엔진 모델링을 포함하고 있다.



[그림 2] HIL 시스템 개략도
[Fig. 2] Configurations of HIL system

그림 3은 터보과급기 테스트 벤치를 보여주고 있다. 테스트 벤치에서는 압축기 전후, 터빈 전후의 압력과 온도, 유량 등을 측정하여 DAQ 보드를 통해 엔진 모델로 전송한다. 엔진 모델에서는 테스트 벤치의 자료에 근거하여 엔진 토크, 압축기와 터빈의 출력, EGR을 등을 산출한다. 산출된 자료에 근거하여 터보과급기 베인 듀티비에 따라 액추에이터인 터보과급기 베인을 작동시킨다. 실시간 계산을 위하여 소프트웨어는 RT-Lab, OS는 QNX를 사용하였다.

표 2는 HIL 시스템을 구성하고 있는 각종 하드웨어와 소프트웨어의 제원을 보여준다.



[그림 3] 터보과급기 테스트 벤치
[Fig. 3] Test bench of turbocharge

[표 2] HIL 시스템 제원
[Table 2] Specifications of HIL system

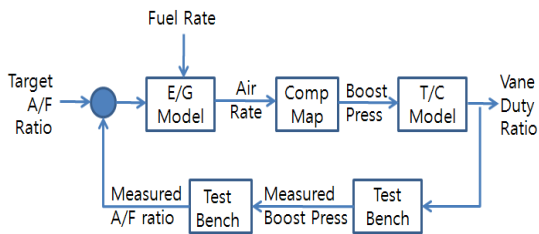
Components	Type	Specifications
Blower	Roots	11 kW, 6.2 Nm ³ /min
Flow meter	Thermal mass	air, 580 Nm ³ /h
	Orifice	6.0 Nm ³ /min
Pressure sensor	NT-3100	-1~5 bar
Temperature sensor	RTD	Pt-100
Signal supply	PWM	140 Hz, 0~100 duty
DAQ board	PCI-6602	Digital I/O
	PCI-6713	Analog out
	PCI-6071E	Analog in
Operating System	RedHawk Linux	QNX
Real time software	Opal-RT	RT-Lab
S/W	Mathworks	Simulink

4. HIL 시스템의 응답 특성

구축된 터보과급기 HIL 시스템의 정상 작동 여부를 파악하기 위하여 공연비를 고정한 상태에서 공급 연료량을 변화시키는 시뮬레이션을 수행하였다. 이때 엔진 모델에서 목표 공연비(target air-fuel ratio)를 설정하고 실제 공연비 추종 상황을 살펴보았다. 이 과정에서 공연비에 대한 시스템의 응답시간을 산출하였고, 측정된 터보과급

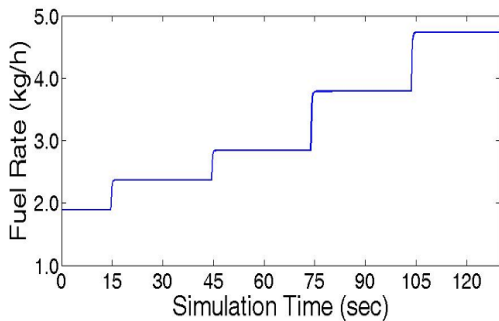
기의 베인 듀티비(vane duty ratio)를 분석하였다.

HIL 시스템에서 공연비를 제어하는 과정은 다음 그림 4과 같다. 가속페달의 개도에 의해 연료량이 결정되면 목표 공연비에 따라 요구되는 공기량이 산출되고 터보과급기 모델의 압축기 성능 선도(compressor performance map)를 이용하여 부스트 압력(boost pressure)이 계산된다[5]. 이를 토대로 터보과급기의 베인 듀티비(vane duty ratio) 신호를 산출한다. 이 신호를 터보과급기 테스트 벤치로 보내고 여기서 부스트 압력과 공연비를 측정한다. 측정된 공연비를 목표 공연비와 비교하여 실제 공연비가 목표 공연비를 추종하도록 피드백(feed back) 제어한다.



[그림 4] 공연비 제어 과정
[Fig. 4] Control process of air-fuel ratio

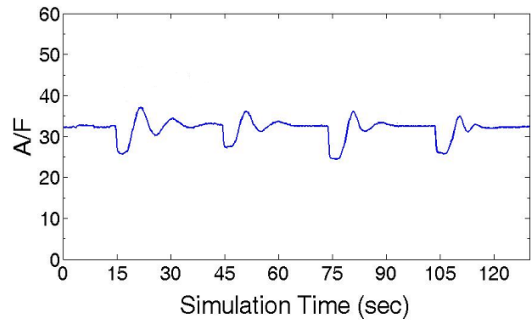
목표 공연비를 32로 설정한 상태에서 시뮬레이션을 수행하였다. 연료 공급량을 그림 5에서와 같이 1.8944 kg/h 으로 유지하다가 2.3680 kg/h, 2.8416 kg/h, 3.7888 kg/h, 4.7360 kg/h 으로 단계적 변화시켰다. 각 단계는 30 초 동안 유지된다.



[그림 5] 연료 공급량의 단계적 변화
[Fig. 5] Change of fuel rate

그림 6에서는 엔진 모델에 입력되는 연료량 변화에 따른 엔진 HIL 시스템의 공연비의 변화 과정을 보여주고 있다. 연료량 증가에 따른 공연비의 변화를 살펴보면, 공급 연료량을 증가시키면 상대적으로 공기가 부족하여 공연비가 농후해진다. 즉, 공연비 값이 낮아진다. 이러한 상

황에서 엔진 모델에서는 증가된 요구 공기량을 산출하고 이에 따라 높은 부스트 압력을 요구한다. 이에 부응하여 터보과급기 테스트 벤치 상의 터보과급기 베인 듀티비를 증가시킨다.



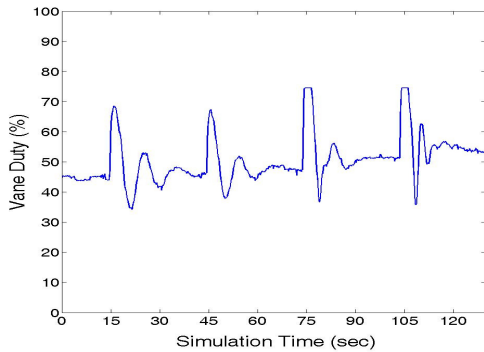
[그림 6] 연료 공급량의 변화에 따른 공연비 변화
[Fig. 6] Change of A/F ratio according to change of fuel rate

따라서 엔진 모델에 흡입되는 공기량이 증가하여 공연비가 희박하여져 공연비 값이 증가한다. 그러나 이 과정이 계속되면 공연비가 설정값 32를 넘게 된다. 이때 다시 공기량을 감소시키기 위해 베인 듀티비가 감소되고 부스트 압력이 낮아지고, 따라서 공연비가 농후해져 값이 감소한다. 이러한 과정을 반복하면서 공연비는 일반적인 피드백 제어에서 나타나는 진동을 보이며 감소하여 안정적으로 설정값 32에 접근한다. 공연비가 설정값에 근접하는데 대략 20초 전후의 시간이 소요되었으며 연료량이 높을수록 시간이 짧아졌다. 엔진 모델에서 제어 인자 산출 시간, DAQ 보드를 통한 신호 입출력 시간, 터보과급기 테스트 벤치에서 신호 측정에 소요되는 시간 등 다양한 지연 요소로 인하여 상당한 시간이 소요되었다. 그리고 연료량이 높은 경우 엔진 회전수가 높아져 유동 속도가 증가하고 관련 인자의 제어 시간이 짧아짐에 따라 공연비 제어 시간이 단축되고 있다.

공연비 변화의 타당성을 검증하기 위해 터보과급기의 베인 듀티비와 부스트 압력의 변화를 관찰하였다.

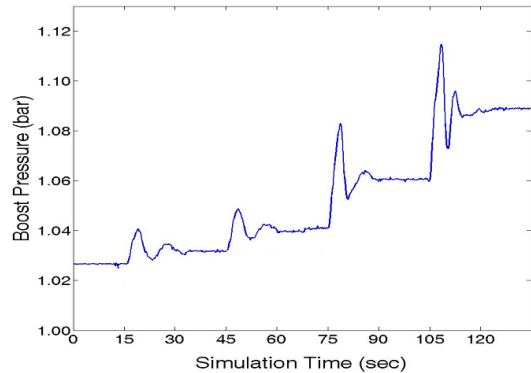
그림 7은 터보과급기 모델에서 산출된 베인 듀티비에 근거하여 터보과급기 테스트 벤치에서 실제 작동되는 베인 듀티비의 변화를 보여주고 있다. 목표 공연비가 32로 정해진 상황에서 연료 공급량이 증가함에 따라 터보과급기는 엔진에 공급되는 공기량을 증가시키기 위해 베인을 닫아야 하고 이를 위해 베인 듀티비는 증가한다. 계속해서 베인 듀티비가 증가함에 따라 공연비는 설정값 32보다 높아지고 공기량을 감소시켜야 하므로 엔진 모델과 터보과급기 모델에서 베인을 열기 위해 듀티비를 감소시

키는 신호를 생성하고 이에 따라 실제 베인 듀티비가 감소하게 된다. 듀티비 제어는 일반적인 피드백 제어의 특징인 진동을 보이며 점점 감소되면서 약 20초 경과 후 초기값으로 수렴하고 하고 있다. 3번째와 4번째 변화에서 너무 급격한 베인 듀티비의 변화는 바람직하지 못한 결과를 초래할 수 있기 때문에 특정값 이상에서는 변화를 차단하는 차단(cutoff) 현상을 피크 근처에서 보이고 있다. 전체적으로 그림 6의 공연비 변화의 결과와 일치되는 양상을 보이고 있다.



[그림 7] 연료 공급량의 변화에 따른 베인 듀티비 변화
[Fig. 7] Change of vane duty ratio according to change of fuel rate

그림 8은 터보과급기 테스트 벤치에서 터보과급기 중 압축기의 측정된 부스트 압력 변화를 보여준다. 연료 공급량이 증가함에 따라 부스트 압력이 급격히 증가함을 보이고 있다. 이것은 터보과급기 듀티비가 증가함에 따라 터빈 출력이 증가하여 압축기 회전수가 증가함에 기인한다. 그러나 과다하게 공기량이 증가함에 따라 베인 듀티비가 감소하게 되고 이에 따라 부스트 압력도 감소한다. 전체적으로 베인 듀티비의 변화 형상과 잘 일치하고 있다. 그러나 어느 정도 시간이 경과한 후 베인 듀티비는 초기값으로 수렴하나 부스트 압력은 초기값보다 높은 값으로 수렴한다. 이것은 연료 공급량이 증가함에 따라 목표 공연비를 맞추기 위해 공기 공급량이 증가해야 하기 때문이다. 그리고 연료 공급량이 증가함에 따라 부스트 압력의 변화가 베인 듀티비의 변화보다 더 큰 값을 보인다. 이것은 연료 공급량이 증가함에 따라 배기 배출량이 많아져 동일한 베인 듀티비 변화에서도 부스트 압력이 크게 변화하기 때문이다.



[그림 8] 연료 공급량의 변화에 따른 부스트 압력 변화
[Fig. 8] Change of boost pressure according to change of fuel rate

5. 결론

터보과급기가 장착된 승용 디젤엔진에 대한 HIL 시스템을 구축하고 연료 공급량을 변화시키는 시뮬레이션을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 터보과급기 테스트 벤치, 실시간용 소프트웨어와 DAQ의 HIL 플랫폼, 그리고 Matlab/ Simulink로 작성한 엔진 모델로 구성된 HIL 시스템의 구축이 가능하였다.
- 2) 연료 공급량을 변화시킨 상태에서 20초 정도의 시간이 경과한 후 설정된 목표 공연비에 정상적으로 수렴하였다.
- 3) 연료 공급량의 변화에 따라 터빈 베인 듀티비와 압축기의 부스트 압력도 적절하게 변화함을 확인하였다.
- 4) 구축된 터보과급기 HIL 시스템은 터보과급기가 장착된 디젤엔진에서 발생하는 현상을 잘 재현하고 있다.
- 5) 따라서 본 시스템은 터보과급기 개발 및 성능 개선에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] S. Raman, N. Sivashankar, W. Milam, W. Stuart, and S. Nabi, "Design and Implementation of HIL Simulators for Powertrain Control System Software Development", Proceedings of the American Control Conference, pp.709-713, 1999
- [2] J. Du, Y. Wang, C. Yang, and H. Wang, "Hardware-in-the-loop simulation approach to testing

- controller of sequential turbocharging system", Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics, pp.2426-2431, 2007
- [3] J. P. Jensen, A. F. Kristensen and S. C. Soren, " Mean Value Modelling of a Small Turbocharged Diesel Engine," SAE 910070, 1991
- [4] J. E. Chung, Y. Jin, D. Jeong, and J. W. Chung, "Prediction of the Transient Performance of the Passenger Diesel Engine with Turbocharger using HIL," Transactions of KSAE, Vol. 17, No. 5, pp.127-132, 2009
- [5] J. W. Chung, Development of Core Technology of the Intake and Exhaust System in the Diesel Engine for Next Generation, pp.35-37, Ministry of Knowledge Economy, 2008
-

정진은(Jin-Eun Chung)

[정회원]



- 1980년 2월 : 서울대학교 공과대학 기계공학과(공학사)
- 1990년 8월 : 서울대학교 대학원 기계공학과(공학박사)
- 1982년 3월 ~ 1991년 2월 : 한국과학기술연구원 연구원
- 1992년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 기계정보공학부 교수

<관심분야>

열유체 시스템, 동력장치, 시스템 신뢰성

노호종(Ho-Jong Roh)

[정회원]



- 2008년 2월 : 한국기술교육대학교 기계공학과(공학사)
- 2010년 2월 : 한국기술교육대학교 대학원 기계공학과(석사과정 수료)
- 2010년 4월 ~ 현재 : 서한워너 터보시스템즈 기술연구소 테스트 엔지니어

<관심분야>

열유체 시스템, 시스템 제어, 동력장치