

## HIL을 이용한 터보과급기 승용 디젤 엔진의 과도 성능 예측

정진은<sup>\*1)</sup> · 진영욱<sup>1)</sup> · 정동영<sup>2)</sup> · 정재우<sup>3)</sup>

한국기술교육대학교 기계정보공학부<sup>1)</sup> · 한국기술교육대학교 대학원 기계공학과<sup>2)</sup> ·  
자동차부품연구원 동력시스템연구센터<sup>3)</sup>

### Prediction of the Transient Performance of the Passenger Diesel Engine with Turbocharger using HIL

Jin-Eun Chung<sup>\*1)</sup> · Youngwook Jin<sup>1)</sup> · Dong-young Jeong<sup>2)</sup> · Jae-Woo Chung<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>School of Mechanical Engineering, Graduate School Korea University of Technology and Education, Chungnam 330-708, Korea

<sup>2)</sup>Department of Mechanical Engineering, Graduate School Korea University of Technology and Education, Chungnam 330-708, Korea

<sup>3)</sup>Power Train System R&D Center, KATECH, 74 Yongjeong-ri, Pungse-myeon, Cheonan-si, Chungnam 330-912, Korea

(Received 10 March 2009 / Accepted 8 May 2009)

**Abstract** : The transient performance of the passenger diesel engine equipped with the variable geometry turbocharger was simulated using HIL(hardware-in-the-loop) system. The system consists of engine model as software, and the turbocharger test bench as hardware. The engine model is mean value model which is programmed by the Simulink of the Mathworks. The turbocharger test bench is composed of a blower, some sensors, and DAQ boards. A real time simulation is possible since the operating system based on the real time is included. The results show the good response for the transient characteristics. Therefore this HIL system can be used for development of the new turbocharger effectively.

**Key words** : HIL(hardware-in- the-loop), Passenger Diesel Engine(승용 디젤 엔진), VGT(가변형 터보과급기)

### 1. 서론

현재 여러 분야에서 동력원으로 이용되고 있는 내연기관은 탄화 수소계의 원유를 사용하고 있다. 그런데 국제에너지기구(IEA)는 장기전망 보고서에서 2040년이면 원유가 완전히 고갈될 것이라고 보고하고 있다. 또한 전 세계적으로 대두되고 있는 지구환경문제에 의한 유해배기가스 규제를 강화하고 있으며 CO<sub>2</sub> 등의 온실가스에 대해 규제가 예상되고 있다. 따라서 근래 출시되는 디젤 엔진은 출력을 극대화하므로 출력당 배기량을 축소하여 연비를 향상시키기 위해 터보과급기를 장착하고 있으며, 유해

배기가스 중 질소산화물을 감소시키기 위하여 배기가스재순환장치(EGR)을 장착하고 있다. 이와 같이 부품이 추가됨에 따라 엔진의 제어<sup>1)</sup>에 상당한 어려움을 겪게 된다. 이러한 상황에서 엔진 설계에는 실험과 컴퓨터 시뮬레이션 방법이 사용되어 왔다. 그러나 실험적 방법은 많은 시간과 비용이 소요되며, 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션 방법은 결과가 실제와 상이할 수 있다는 문제가 있다. 이러한 실험과 컴퓨터 시뮬레이션의 문제점을 극복하기 위해 제시되고 있는 것이 HIL(hardware-in-the loop) 시스템을 이용한 시뮬레이션이다.<sup>2)</sup>

HIL 시스템은 항공우주 분야, 방위산업 분야, 원자력발전 분야, 화공플랜트 분야 등 사고 발생의 위

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

힘이 높은 분야에서 사용되어 왔다. 여기서는 주요 부품은 실제 시스템을 이용하고, 실제 시스템 이외의 시스템은 모델을 사용한다. 이때 실시간 제어를 수행하기 위하여 정확성을 어느 정도 유지하면서도 간단한 모델을 사용한다.

본 연구에서는 터보과급기 테스트벤치,<sup>3)</sup> HIL 플랫폼(platform) 및 엔진 모델로 구성된 HIL 시스템을 구축하고 승용디젤 엔진의 과도 성능을 예측하였다.

사용된 엔진 모델은 2.0L 커먼레일 디젤엔진의 실험자료를 바탕으로 모델링 되었으며, 성능 변수들 간의 상관 관계를 간소화시킨 평균값 모델(mean value model)<sup>4)</sup>을 사용하였고 Mathwork사의 Simulink로 프로그래밍하였다. 평균값 모델의 정확성은 실험 결과와 비교하여 검증하였으며, 엔진의 작동 상태에 따라 연료량 및 공연비를 변화시키면서 시뮬레이션을 수행하여 엔진 작동 상태 변화에 따른 터보과급기가 장착된 디젤 엔진의 과도 성능 변화를 예측하였다.

## 2. 엔진 모델

### 2.1 모델 구성

엔진 모델은 6개 서브 모델(토크 모델, 터보과급기 모델, EGR 밸브 모델, 쿨러 모델, 배기가스 모델, 및 컨트롤 모델)로 구성되었다.<sup>5)</sup>

평균값 모델은 시간 및 공간에 대한 상세 정보를 제공하지 않고 정확성이 많이 부족하나 모델링에 요하는 시간이 짧아 실시간 제어가 필요한 엔진 제어 분야에서 널리 사용되고 있다.

토크, 배기가스온도( $T_e$ ), NOx, Smoke, 터보과급기 압축기 및 터빈 출력에 대한 평균값 모델은 연료의 저발열량  $H_i$ , 연료량  $m_f$ , 엔진회전수  $N_e$ , 당량비  $\lambda$ , 흡기온도  $T_i$ , 흡기압력  $p_i$ , EGR율, 공연비 AF, 질량유량  $\dot{m}$ , 정압비열  $c_p$ , 압축기 효율  $\eta_c$ , 터빈 효율  $\eta_t$ , 비열비  $\gamma$  등의 함수로 사이클 평균값을 제공한다. 여기서 하첨자  $i$ 는 입구 또는 흡입매니폴드,  $e$ 는 출구 또는 배기매니폴드,  $c$ 는 압축기,  $t$ 는 터빈을 의미한다. Table 1에는 사용한 모델의 상수값들을 보여주고 있으며, 이들은 엔진 실험을 수행하여 측정된 값에 근거하여 산출하였다.<sup>5)</sup>

$$Torque = H_i m_f (a_1 + a_2 N_e + a_3 N_e^2) (1 - a_4 \lambda^{a_5})$$

$$T_e = T_i + (b_1 N_e + b_2) \lambda^{-2} + (b_3 N_e + b_4) - (b_5 EGR^2 + b_6 EGR + b_7) - (b_8 p_i^2 + b_9 p_i + b_{10})$$

$$NO_x = (c_1 T_e^2 + c_2 T_e + c_3) + (c_4 T_i^2 + c_5 T_i + c_6) + (c_7 EGR^2 + c_8 EGR + c_9)$$

$$Smoke = (d_1 A F^2 + d_2 A F + d_3) + (d_4 T_i^2 + d_5 T_i + d_6) + (d_7 EGR^2 + d_8 EGR + d_9)$$

$$Power_c = \dot{m} c_{p,c} T_{c,i} \frac{1}{\eta_c} \left[ \left( \frac{p_{c,e}}{p_{c,i}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]$$

$$Power_t = \dot{m}_t c_{p,t} T_{t,i} \eta_t \left[ 1 - \left( \frac{p_{t,e}}{p_{t,i}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]$$

Table 1 Constants of the models

$a_1$	0.4809	$b_1$	0.1626	$c_1$	-0.0012	$d_1$	0.00401
$a_2$	0.0024	$b_2$	24.54	$c_2$	2.04819	$d_2$	-0.24996
$a_3$	-0.00002	$b_3$	0.0761	$c_3$	-179.45	$d_3$	2.39117
$a_4$	0.3	$b_4$	90.657	$c_4$	0.03519	$d_4$	-0.00003
$a_5$	0.5	$b_5$	0.0492	$c_5$	-1.26686	$d_5$	-0.01104
		$b_6$	0.7748	$c_6$	-217.868	$d_6$	2.40296
		$b_7$	-1.8194	$c_7$	2281.72	$d_7$	24.1404
		$b_8$	72.669	$c_8$	-1935.86	$d_8$	0.68475
		$b_9$	-252.74	$c_9$	-39.4261	$d_9$	0.01113
		$b_{10}$	222.98				

### 2.2 모델 검증

본 연구에서 사용된 평균값 엔진 모델을 검증하기 위하여 시뮬레이션과 동일 조건하에서 실험을 수행하였다.

#### 2.2.1 엔진 제원

실험에 사용된 엔진은 터보과급기가 장착된 2.0L 커먼레일 디젤엔진이며 상세한 제원은 Table 2에서 보여준다. 엔진 실험에 사용된 동력계, 배기분석계 및 컨트롤러의 제원은 Table 3과 같다.

Table 2 Specifications of test engine

Specifications	
Type/No. of cylinder	Diesel/4
Fuel supply system	Common rail direct injection
Displacement (cc)	1991
Bore × Stroke (mm)	83×92
Compression ratio	15
Air charging system	VGT(variable geometry turbocharger)
EGR system	HPL(high pressure loop)type

Table 3 Specifications of test system

Specifications	
Dynamometer	AVL, EC type, 160kW
Exhaust gas analyser	Horiba, MEXA 9100DEGR
Smoke meter	AVL 415
Engine controller	TEMS, TDA-8000

2.2.2 시뮬레이션 조건 및 결과

앞 절에서 설명한 디젤엔진에서 실험을 수행하여 측정된 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 시뮬레이션 조건은 Table 4와 같다.

Table 4 Engine condition for simulation

Input parameter	Condition		
	1	2	3
Engine speed (rpm)	2,000	2,000	2,000
A/F	20.3	23.3	23.4
Fuel rate (kg/h)	7.64	7.73	7.73
Intake manifold temperature (°C)	60.7	65.9	70.4
Intake manifold pressure (bar)	1.53	1.81	1.89
Turbine vane duty (%)	60	70	80
EGR rate	0.0	0.3	3.1

Fig. 1은 엔진 토크, Fig. 2는 터빈 전후의 배기가스 온도, Fig. 3은 터빈과 압축기의 출력, Fig. 4는 NOx와 Smoke number를 나타낸다.

엔진의 출력과 배기가스 및 터보과급기 성능에 대한 시뮬레이션의 결과는 전반적으로 실험결과에 잘 일치하지만, 배기가스 온도, Smoke number와 같이 일부에서는 실험 결과와 큰 차이를 보이기도 한다. 그러나 사용된 모델이 실시간 제어를 위하여 계산시간을 최소화 하기 위한 평균값 모델임을 감안하여 적절하다고 판단하였다.

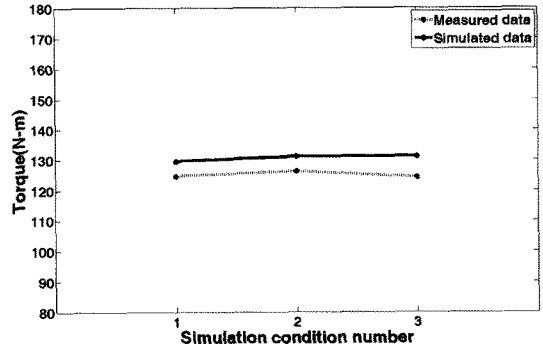


Fig. 1 Comparison of torque between measured data and simulated data

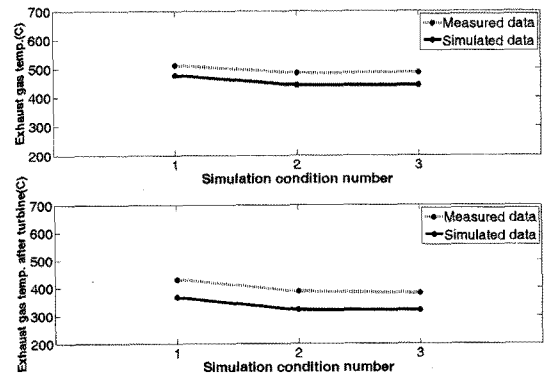


Fig. 2 Comparison of exhaust gas temperature between measured data and simulated data

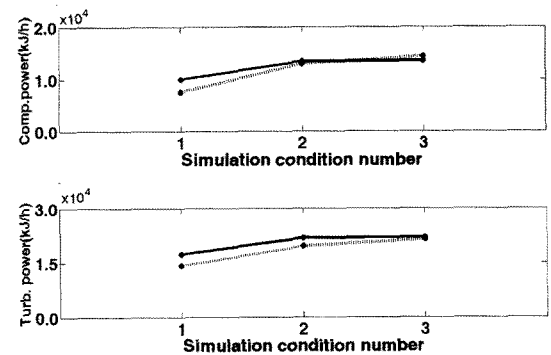


Fig. 3 Comparison of turbocharger power between measured data and simulated data

3. HIL 시스템

HIL 시스템은 가변형 터보과급기를 장착한 테스트 벤치, 실시간으로 센서 신호들을 취득하고 적절한 액추에이터 신호를 발생하는 HIL 플랫폼, Simu-

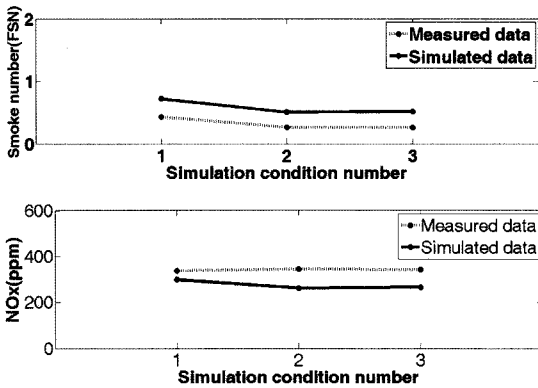


Fig. 4 Comparison of NOx and smoke number between measured data and simulated data

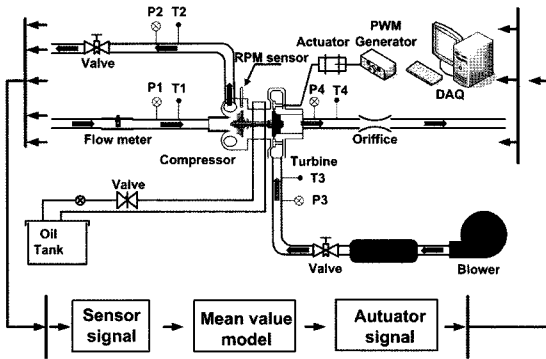


Fig. 5 Configuration of HIL system

link로 작성된 엔진 모델 블록 부분으로 크게 3부분으로 구성되어 있다.

Fig. 5는 본 연구에서 사용된 HIL 시스템의 구성도이고 Table 5는 이들의 구성요소이다. 가변형 터보과급기 테스트 벤치에서 실시간으로 들어오는 센서 신호를 이용하여 터보 과급기 모델에서 성능을 계산한다. 다음 엔진 모델에서 엔진 성능과 배기가스 성분을 계산하고, 이것에 근거하여 액추에이터 신호, 즉 터보과급기 베인 듀티를 산출하여 DAQ 보드를 통하여 테스트 벤치로 송출한다. 여기서 터빈 베인 듀티비 조정, 테스트 벤치의 터빈에 압축공기를 공급하는 송풍기 회전수 조절, 엔진 모델의 초기 값 제공 등과 같은 제어 신호를 주는 부분과 엔진 모델을 통해서 계산되어진 엔진의 성능을 수치적으로 표시한다. 한편, 실시간으로 제어 신호를 주거나 신호의 변화에 따른 엔진이나 터보과급기의 성능을 모니터링 할 수 있다.

Table 5 Specifications of HIL system

Components	Type	Specifications
Blower	Roots	11 kW, 6.2 Nm <sup>3</sup> /min
Flow meter	Thermal mass	air, 580 Nm <sup>3</sup> /h
	Orifice	6.0 Nm <sup>3</sup> /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. 연구 결과

시뮬레이션은 2가지의 경우에 대해 수행하였다. 먼저, 연료량을 고정 한 상태에서의 목표 공연비를 변화시킴으로써 터보과급기의 작동 상태 변화에 따른 공기량 변화 따라 실제 공연비가 목표 공연비를 추종하는지 여부를 판단하여 본 연구에서 사용한 터보과급기의 작동 조건 결정 방법의 타당성을 파악하였다. 다음, 엔진의 갑작스러운 작동 상태 변화 조건인 연료량 변화에 따라 NOx와 smoke를 고려하여 설정된 목표 공연비를 추종하는 과도 과정에서의 엔진 및 터보과급기의 성능 변화를 알아보았다.

첫 번째 시뮬레이션을 위하여 연료량은 8 kg/h로 고정하였으며 요구 공연비는 20에서 25사이에서 임의로 변화시켰다. 이 때 압축기 회전수는 70,000rpm 정도이며 초기 듀티비는 50%로 설정하였다. 요구 공연비를 변화시킬 경우, 요구되는 터빈의 유효개구면적은 터빈 베인 개도 듀티비 설정 알고리즘에 의해 계산된다. 이렇게 변화된 듀티비는 궁극적으로 터빈에 공급되는 에너지를 조절하게 되며 동축으로 물려있는 압축기의 출력 또한 변화하게 된다.

Fig. 6에는 목표 공연비와 측정된 공연비를 보여 주고 있으며 공연비가 바뀌는 시점마다 베인을 조절하는 터보과급기의 액추에이터 작동 시간 지연과 본 시뮬레이션에서 사용한 오픈루프 제어 방식에 의한 지연 오차를 제외하고는 비교적 정확히 목표 공연비를 따라가는 것을 알 수 있으며, 이는 위의 터빈 유효개구면적에 의한 베인 듀티비 설정방법이

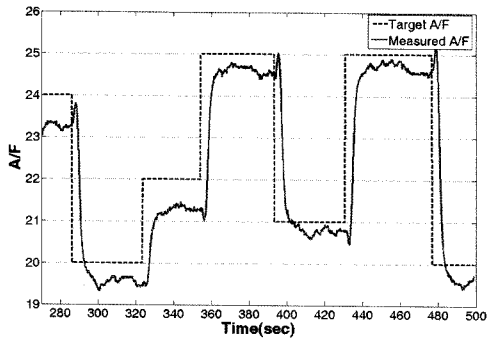


Fig. 6 Measured air fuel ratio according to the change of target air fuel ratio

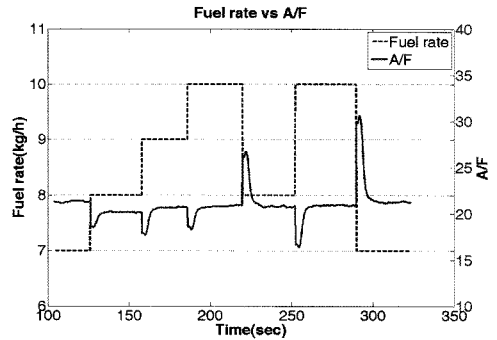


Fig. 8 Air fuel ratio according to the change of fuel rate at the condition of fixed air fuel ratio

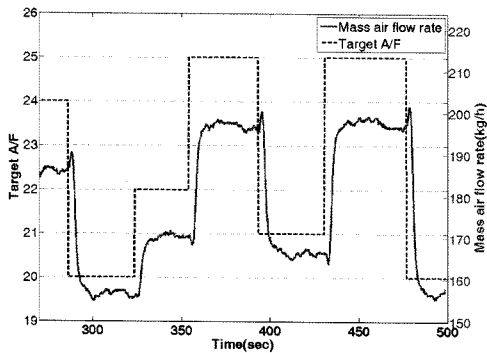


Fig. 7 Air flow rate according to the change of target air fuel ratio

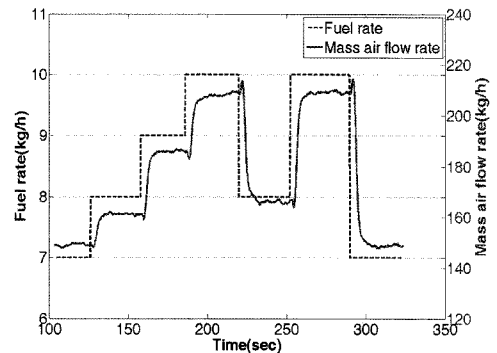


Fig. 9 Air flow rate according to the change of fuel rate at the condition of fixed air fuel ratio

타당함을 보여준다고 할 수 있다.

Fig. 7은 요구 공연비에 따른 공기량의 변화를 보여주고 있으며 Fig. 6의 측정된 공연비와 같은 경향을 보이고 있다.

두 번째 시뮬레이션은 승용 디젤 차량의 과도성능을 예측하기 위하여 급가속과 급감속 상태를 구현하는 것이 필요하다. 이를 위하여 엔진 실험 데이터를 바탕으로 연료량을 7kg/h에서 10kg/h까지 임의로 증가 또는 감소시켰으며 목표 공연비는 NOx와 Smoke의 영향을 고려하여 21로 설정하고 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 8은 연료량 변화에 따른 공연비의 변화를 보여주고 있다. 연료량이 증가할 때 순간적으로 공연비가 농후해지고, 연료량이 감소할 때 순간적으로 공연비가 희박해진다. 연료량의 변화가 큰 경우 공연비의 변화량도 크다. 16까지 감소되거나 30까지 증가하기는 하나, 다음 일정 시간이 경과 후 목표 공

연비 21에 근접함을 보이고 있다. 이러한 시간 지연은 터보 랙(turbo lag)이라는 현상으로 인한 것이다. 다음 터빈 베인의 듀티비를 적절히 조정하므로 공연비가 목표 공연비 21에 근접함을 보인다. 이것으로 본 연구에서 구축한 HIL 시스템이 정상적으로 작동함을 알 수 있다.

또한 연료량이 변함에 따라 공기량 또한 목표 공연비의 설정 값과 토크의 증대 및 배기가스를 고려하여 비례적으로 변해야 한다. Fig. 9는 연료량에 따른 공기량의 변화를 나타내고 있다. 계속적으로 변화하는 실제 공연비가 터빈 베인 설정으로 인하여 목표 공연비로 근접함에 따라 연료량과 공기량은 초기 변화 시의 수렴시간을 제외하면 비례적으로 변화된다는 것을 확인하였다.

Fig. 10은 연료량의 변화에 따른 토크의 변화를 나타내고 있으며 연료량에 비례하여 공기량의 증가로 토크 역시 증가되는 것을 볼 수 있으며, 다만 초

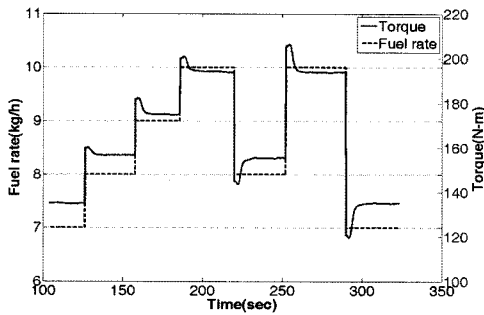


Fig. 10 Torque according to the change of fuel rate at the condition of fixed air fuel ratio

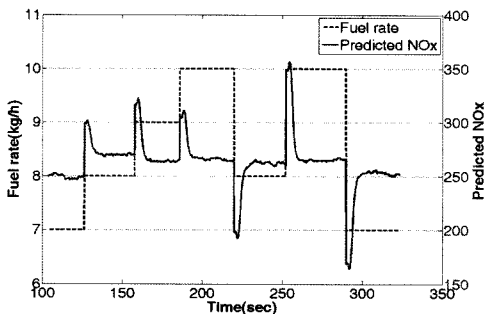


Fig. 11 NOx according to the change of fuel rate at the condition of fixed air fuel ratio

기 연료량의 변화 시 토크에 약간의 변동이 있는 것을 확인 할 수 있으며 이는 터빈 베인의 작동 지연에 따라 순간적으로 공연비가 희박해지거나 농후해져서 발생하는 것이라고 판단이 된다.

Fig. 11은 연료량의 변화에 따른 질소산화물의 변화를 보여주고 있다. 질소산화물의 생성은 연소 온도와 관계가 있으며, 공연비가 농후한 영역에 있을 경우 연소 온도의 상승으로 인하여 질소산화물의 생성이 촉진된다. 공기량이 적어짐에 따라, 즉 순간적으로 공연비가 농후한 영역에 있을 경우 연소 온도의 상승으로 질소산화물의 농도가 높아지는 것을 볼 수 있다. 따라서 이와 같은 갑작스러운 공연비의 변화로 인한 순간적인 질소산화물의 증가를 줄이기 위해서는 터보과급기 액츄에이터의 작동시간 지연을 최소화 하는 것이 필요하며, 이를 제어할 제어기가 적절히 설계되어야 할 것이다.

### 5. 결론

본 연구에서는 터보과급기 테스트벤치, HIL 플랫폼 및 엔진모델로 구성된 HIL 시스템을 구축하고

승용 디젤엔진의 과도 성능에 대한 시뮬레이션을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 테스트 벤치, HIL 플랫폼 및 평균값 엔진 모델로 구성된 터보과급기 HIL 시스템의 구현이 가능하였고, 이러한 HIL 시스템은 새로운 터보과급기 개발시 유용하게 활용될 수 있다.
- 2) 연료량을 고정한 상태에서 목표 공연비를 변경하는 경우, 상당한 시간 지연이 존재하나 비교적 정확하게 목표 공연비를 추종하였다.
- 3) 연료량을 임의로 증가 또는 감소하는 경우, 공연비가 최대 16까지 감소 또는 최대 30까지 증가하는 하나 일정 시간 경과 후 목표 공연비 21를 추종하였다.
- 4) 엔진 작동 변화에 따른 시간 지연은 토크와 NOx 발생에 상당히 큰 영향을 보였다.

### 후 기

본 연구는 지식경제부 자동차기반기술 개발 사업 중 “차세대 디젤 엔진 흡배기시스템의 핵심기술 개발” 과제의 연구결과를 응용하였습니다. 도움을 주신 관계자들에게 감사드립니다.

### References

- 1) L. Gzzella and A. Amstutz, “Control of Diesel Engine,” IEEE Control Systems, 0272-1708/98, pp.53-71, 1998.
- 2) L. Saussol and T. Bourdon, “Integration of a Physical AMESim Engine Model in a Hardware In the Loop Environment,” European AMESim User Conference, SIEMENS, Powertrain Engineering Group, 2006.
- 3) J. E. Chung, D. Y. Jeong, J. W. Chung and W. Kang, “Compressor Performance Prediction of Turbocharger in the Passenger Diesel Engine,” KSAE 2008 Annual Conference Proceedings, pp.275-280, 2008.
- 4) J. P. Jensen, A. F. Kristensen and S. C. Soren, “Mean Value Modelling of a Small Turbocharged Diesel Engine,” SAE 910070, 1991.
- 5) KATECH, Development of Core Technology of the Intake and Exhaust System in the Diesel Engine for Next Generation, Ministry of Knowledge Economy, 2008.