

## 커먼레일 중형 디젤엔진의 개념설계 및 초기 시험개발

김 만 영<sup>\*1)</sup> · 허 행 표<sup>1)</sup> · 김 창 일<sup>1)</sup> · 최 규 훈<sup>2)</sup>

현대자동차 승용디젤엔진시험팀<sup>1)</sup> · 현대자동차 일본기술연구소<sup>2)</sup>

### Development of Medium-Duty Diesel Engine with CP3.3 Common Rail - Concept Study and Initial Experimental Work

Man Young Kim<sup>\*1)</sup> · Haeng Pyo Heo<sup>1)</sup> · Chang Il Kim<sup>1)</sup> · Kyu Hoon Choi<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Passenger Car Diesel Engine Test Team, Hyundai Motor Company, Gyeonggi-do 445-706, Korea

<sup>2)</sup>Japan Technical Center, Hyundai Motor Company, Tokyo, Japan

(Received 17 September 2002 / Accepted 6 February 2003)

**Abstract :** An experimental feasibility study of the E3.9 engine with CP3.3 and EDC7C was conducted to understand the initial performance and the possibility for EURO-III regulation. 1D cycle simulation for concept study was conducted using the BOOST. Also, some basic investigations through such various parameters as injection timing and rail pressure have been carried out to find the feasibility on EURO-III ESC mode. Based on the results, the feasibility of the E3.9 engine for EURO-III characteristics such as performance, emissions, and fuel economy was demonstrated.

**Key words :** Medium-duty diesel engine(중형디젤엔진), Common rail fuel injection(커먼레일 연료분사), DI(직접 분사), Performance(성능), Emission Regulation(배기규제)

### 1. 서론

엔진에서 배출되는 배출가스의 저감은 오늘날 디젤엔진 개발의 가장 중요한 목표가 되고 있다. 디젤엔진의 유해배기가스 배출수준은 지난 20여년 동안 놀라울 정도로 감소하였다. 예를 들어, 북미의 고속도로 주행용 트럭엔진의 경우 입자상물질의 배출은 1970년대의 1~2 g/bhphr에서 1994년의 US94 규제치인 0.1 g/bhphr로 약 1/10 수준으로 감소하였다. 질소산화물 및 탄화수소의 배출의 경우도 입자상물질의 배출과 비슷한 정도의 저감이 이루어졌다.<sup>1)</sup>

한편, 이렇듯 경이로운 디젤엔진의 배출가스 저감은 가솔린엔진에서 처럼 배기가스 후처리장치의 사용을 통해서라기 보다는 연료품질의 개선과 함께

엔진설계의 변경 및 각 시스템의 최적화를 통해서 이루어진 것임은 주목할 만한 일이다. 최근 강화되는 각국의 배기규제에 대응하기 위하여 연료분사 시스템<sup>2)</sup>, 공기흡입 시스템, 그리고 연소계의 최적화 및 전자제어 시스템의 도입과 같은 다양한 신기술을 적용하고 있다.<sup>3)</sup>

특히, 고압연료분사와 전자제어 시스템은 디젤엔진의 개발에 있어서 중요한 수단이 되고 있는 추세로서<sup>4)</sup>, 본 논문에서는 이러한 시스템을 채용하여 EURO-III 및 IV 규제 대응을 위하여 당팀에서 수행 하였던 커먼레일 장착 전자제어 E3.9 l 디젤엔진의 개발이력, 해석 프로그램을 이용한 초기 개념설계 및 최적화, 그리고 성능1호 엔진과의 상관관계를 규명함으로써 커먼레일 장착 전자제어 중형 디젤엔진 개발의 기초자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

\*To whom correspondence should be addressed.  
manykim@hyundai-motor.com

## 2. 본론

### 2.1 엔진 제원 및 특징

본 연구의 대상엔진은 압축비 17.5인 3.9 l 중형 디젤엔진이다. EURO-III 배기규제 대응을 위하여 당사의 중대형 디젤엔진으로서는 최초로 최고 레일 압이 1,350bar인 Bosch의 CP3.3 커먼레일 시스템을 장착하였고, EGR 시스템을 장착할 경우 EURO-IV 규제 대응이 가능하도록 개념설계가 이루어졌다. 아래의 Fig. 1은 흡기측에서 바라본 엔진의 형상을 보여주고 있다.

한편, 성능1호기 엔진의 연소실 형상은 Re-Entrant 타입으로서 아래의 Fig. 2에 단면도를 도시하였다. 분사연료의 도달위치는 연소실 밑부분의 65% 위치로서 안정적인 수준이라 할 수 있다. Fig. 3은 당사의 중대형 양산엔진 및 다임러크라이슬러사, 그리고 미쯔비시의 양산엔진과 비교하였을 때 본 개발 대상엔진인 E3.9 엔진의 배기량에 따른 출력의 위치를 보여주고 있다. 여기에서 E3.9엔진의 출력이 129kW로 도시된 것은 개발사양을 의미한다.

### 2.2 목표 성능

Fig. 4는 E3.9엔진의 목표 성능곡선으로서, 최고 토크는 1,400~1,800rpm 구간에서 나타나며, 최고출력은 2,500rpm에서 나타난다. 본 시험은 두가지 사양, 즉, 고마력 개발사양과 저마력의 양산사양 중에서 Feasibility 시험특성을 고려한 저마력 양산 사양을 기초로 한 것이다.

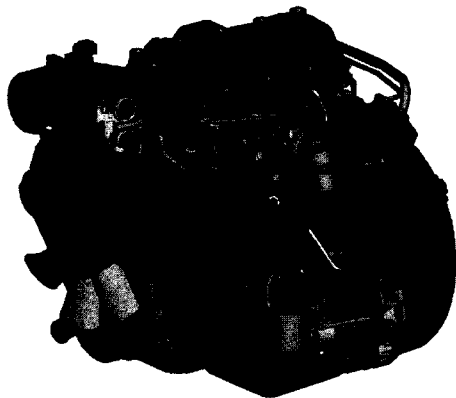


Fig. 1 Intake side view of the E3.9 engine

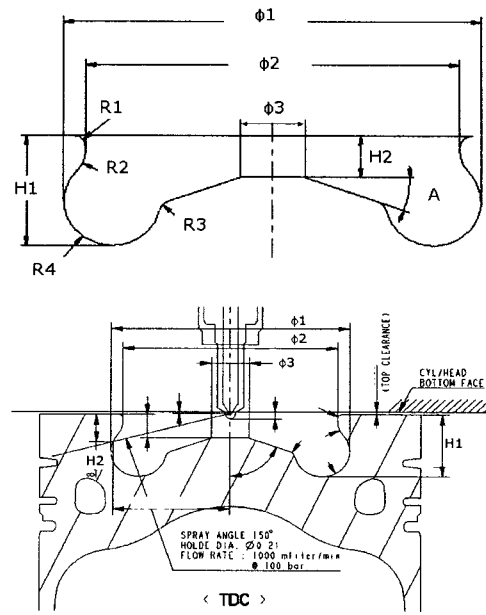


Fig. 2 Schematic of the piston bowl shape and spray penetration

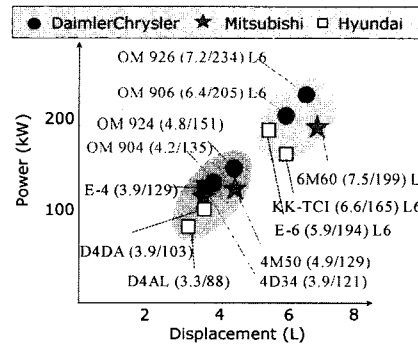


Fig. 3 Performance map of the E3.9 engine with various types of ones

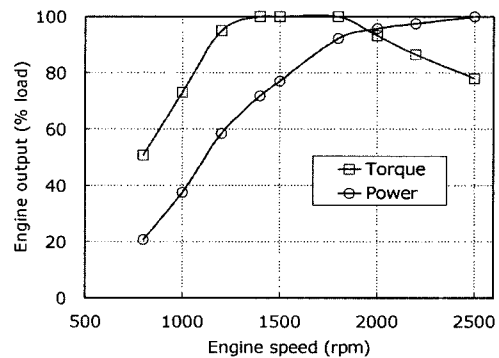


Fig. 4 E3.9 performance curve

### 3. 결과 분석

#### 3.1 전부하 특성 : 1D Cycle Simulation and Experimental Work

E3.9엔진의 초기 개념설계를 위하여 흡배기를 갖는 엔진의 열역학적 과정을 1차원적으로 시뮬레이션 하는 AVL BOOST 프로그램<sup>5)</sup>을 이용한 사이클 시뮬레이션을 진행하였다. Fig. 5는 본 엔진에 대한 시뮬레이션 모델을 나타내고 있다. 신기로 유입되는 공기는 C1 Air Cleaner를 거쳐 Pipe 2를 통하여 압축기 TC1을 거쳐 인터쿨러AC1을 통하여 흡기다기관 P11로 유입된다. 유입된 신기는 실린더 C1~C4에서 연소된 후 배기다기관을 지나 터빈을 거쳐 소음기 P12를 거쳐 대기방출된다. 이와 같은 BOOST 모델의 시뮬레이션 결과를 Fig. 6에 전부하 시험결과와 함께 도시하였다. 전술하였듯이, 최대토크는 1,400~1,800rpm 구간에서 나타나고, 최대출력은 2,500rpm에서 나타난다. 전부하 레일압의 경우, 1,000rpm에서 610bar이며 회전수가 증가할수록 점점 증가하여 2,400rpm에서 1,220bar로서 최고값을 갖는다.

한편, 아래에서 설명하게 될 EURO-III ESC 모드 의 경우, 모드 포인트는 1,500, 1,950, 그리고 2,400rpm으로서 NOx규제대응을 위하여 이 구간에서는 분사시기가 다소 지각되어 있다. 연소계 및 흡배기계 등의 최적화 매칭을 통한 배출가스 규제 대응 및 배출수준을 조절하기 위한 ESC 모드 포인트

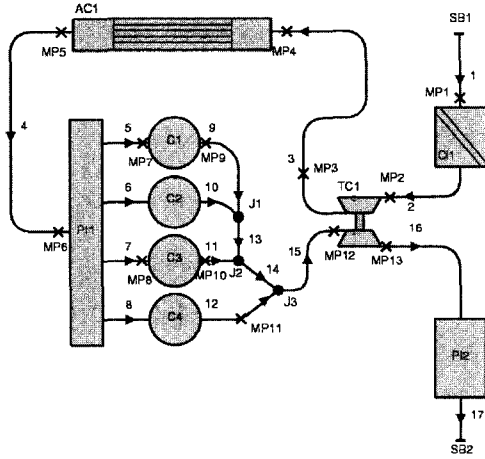


Fig. 5 Calculation model of the BOOST program

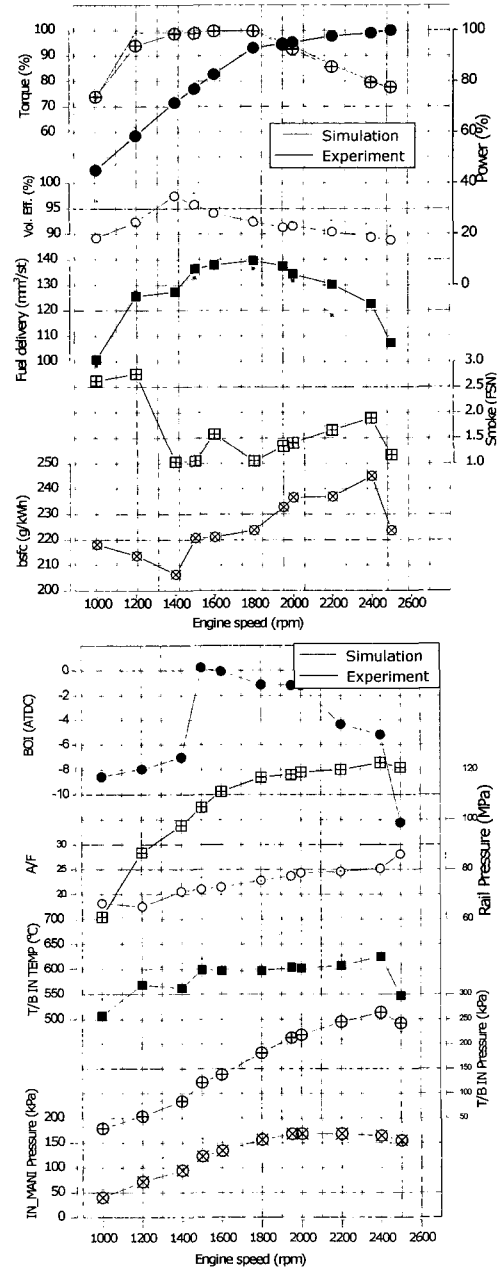


Fig. 6 Full load performance

에서의 분사시기 지각으로 인한 연비개선 연구가 필요함을 알 수 있다. 한편, Smoke의 경우, 저속구간에서 과도하게 배출될 뿐만 아니라 고속구간으로 갈수록 배압이 지나치게 높아지고 있는데, 이는 적절한 공기량 확보 및 성능/연비를 고려한 적절한 터보차저 매칭이 필요함을 보여주는 것이다.

### 3.2 분사시기의 변화에 따른 특성

분사시기는 연소 및 이에 따른 배출가스에 영향을 주는 가장 중요한 인자 중의 하나이다. 엔진의 성능에 영향을 주는 모든 매개변수, 즉, 연비, NOx 및 PM의 배출, 그리고 실린더 최고압력 등은 분사시기의 함수로서, 예를 들어 진각분사의 경우 예혼합연소, 높은 연소온도, 연비의 향상, 그리고 PM의 감소 및 NOx 배출의 증가를 초래한다. 한편, 지연분사의 경우 NOx의 배출은 감소하지만 HC, PM, 그리고 Smoke의 배출은 증가할 뿐만 아니라 연비악화 및 Soot로 인한 윤활유의 열화를 초래한다.

본 연구에서는 이러한 분사시기에 따른 엔진의 특성을 살펴보기 위하여 넓은 범위의 분사시기 변화 시험을 수행하여 최적화를 시도하였다. Fig. 7은 ESC 모드 포인트인 1,950rpm의 전부하에서 레일압이 각각 1,200bar 및 1,000bar일 때의 분사시기 변화에 따른 특성을 나타낸 것이다.

우선, 1,200bar일 때의 결과를 살펴보면, 분사시기를 btdc 12도에서 atdc 0도로 변화시켰을 때 NOx는 약 55.8% 정도 감소하는 반면 PM은 약 2.3배, 그리고 bsfc는 약 18.6% 악화됨을 알 수 있다. 한편, 레일압이 1,000bar인 경우 분사시기를 동일하게 변화시켰을 때 NOx는 약 57.3%정도 감소하는 반면 PM

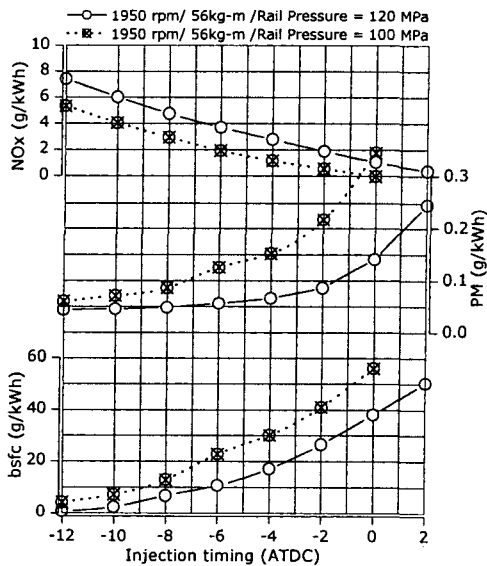


Fig. 7 Effect of injection timing on NOx, PM, and fuel economy

Table 1 PM Emission and fuel consumption with various NOx level and rail pressure

NOx	1,200 bar			1,000 bar		
	Timing	PM	bsfc	Timing	PM	bsfc
2	-3.91	-0.017	-7.1	-3.35	-0.022	-5.7
1	-2.09	-0.01	-4.3	-1.79	-0.014	-3.8
0	0	0	0	0	0	0
-1	2.2	0.019	7.2	1.96	0.037	6.9
-2	4.35	0.084	17.3	4.66	0.084	15.0

은 4.7배, 그리고 bsfc는 레일압이 높을수록 분사시기 지각에 따른 NOx의 감소율은 비슷한 반면 PM과 bsfc의 악화가 상대적으로 적음을 알 수 있다.

한편, Table 1은 Fig. 7의 결과를 동일 NOx 수준의 결과로 재해석한 것으로서, 레일압이 높은 경우 PM은 약 25% 정도 개선되는 반면 bsfc는 약 1.5% 정도 악화되고 있다. 이는 레일압의 증가에 따라 분무의 미립화가 보다 양호해지면서 연소특성이 개선되기 때문이다.

### 3.3 레일압의 변화에 따른 특성

직분식 디젤엔진의 경우 연료 무화의 향상 및 연료가 연소실 전체에 침투하여 흡입공기를 충분히 이용할 수 있도록 하기 위해서 연료를 충분히 높은 압력으로 분사할 필요가 있다. 또한 고압분사는 연료분사율 그리고 분사기간 등과 같은 여러 가지의 다른 매개변수의 변화를 초래한다. 전통적인 PLN (pump-line-nozzle) 분사 시스템과 비교하였을 때 E3.9 엔진에 채택된 커먼레일 시스템의 장점으로, 분사압이 엔진회전수와 부하에 연동되지 않는다는 점과, 분사시기, 분사기간, 그리고 분사율의 제어에 대한 융통성을 들 수 있다. 이 시스템은 또한 NOx 및 엔진소음을 저감시키기 위한 파일릿 분사가 가능할 뿐만 아니라 매연여과장치와 같은 후처리장치의 재생효율을 높이기 위하여 배기온도를 상승시키기 위한 후분사도 가능하다.

Fig. 8은 각각 동일 분사시기에서 1,500rpm 및 2,500rpm의 전부하에서 레일압의 변화에 따른 NOx, PM, 그리고 bsfc의 거동을 보여주고 있다. 레일압을 증가시킬수록 연료의 무화 및 연료/공기의 혼합이 개선되고 이에 따라 연소가 개선됨에 따라 NOx는 점점 증가하고 PM과 연비는 감소하고 있음을 알 수

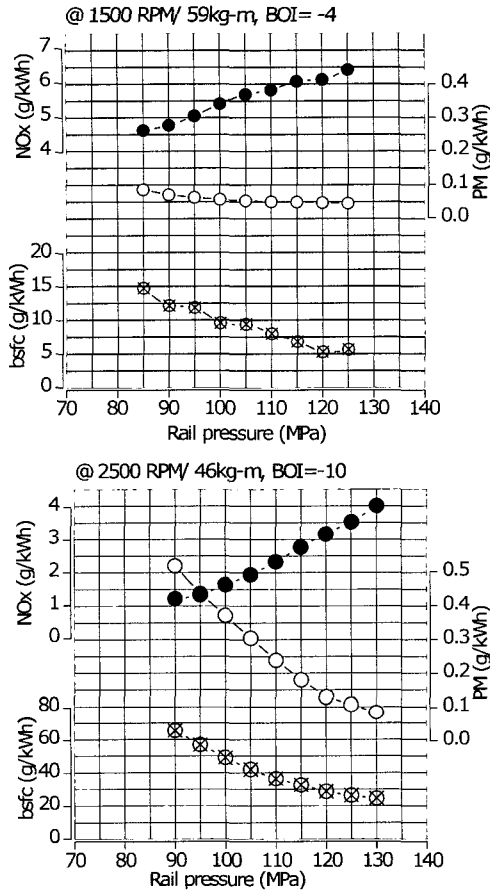


Fig. 8 Effect of rail pressure on NOx, PM, and fuel economy

있다. 즉, 1,500rpm의 우, 레일압을 900bar에서 1,250 bar로 증가시키면 NOx는 약 20.6% 증가하고 PM은 약 37.7%, 그리고 연비는 약 3.3% 정도 개선되고 있으며, 2,500rpm의 경우, NOx는 약 55.8% 정도 악화되지만 PM은 약 79.1%, 그리고 연비는 14.7% 정도 개선되는 효과를 얻을 수 있다. 한편, 레일압 변경에 따른 NOx의 변화 정도는 중속과 고속에서 같지만 PM과 연비의 경우 고속에서 그 변화가 크게 나타남을 알 수 있다.

### 3.4 ESC 모드 특성

E3.9엔진의 개발 가능성 및 특성을 고찰하기 위하여 EURO-III 규제모드인 ESC 모드 각 포인트에서의 엔진특성을 구체적으로 살펴보았다.

Fig. 9는 앞의 분사시기 및 레일압의 변화 시험을

거쳐 최종적으로 ESC 모드로 최적화된 결과를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, NOx와 PM 모두 EURO-III 규제치에 근접하고있으나 향후 개발시 DF 계수를 고려한 개발목표를 만족하기 위해서는 추가적인 노력이 필요함을 알 수 있다. 전술하였듯이 본 시험에서는 적절한 공기량의 매칭, 연소계 최적화, 그리고 기타 부품의 최적화가 진행되지 않은 상태의 결과이므로 개발목표를 만족시키는 것은 충분히 가능하리라 사료된다.

한편, 각 모드 포인트에서의 NOx 및 PM의 배출 기여도를 파악하기 위하여 아래의 Fig. 10과 같은 EM 배출분포도를 살펴보면, PM과 NOx 모두 전부하 포인트에서 많은 양이 배출되고 있으며 이에대

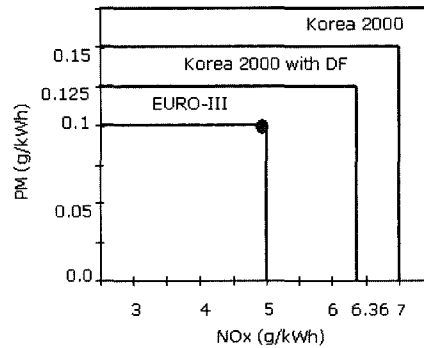


Fig. 9 NOx-PM trade-off of the current E3.9 engine

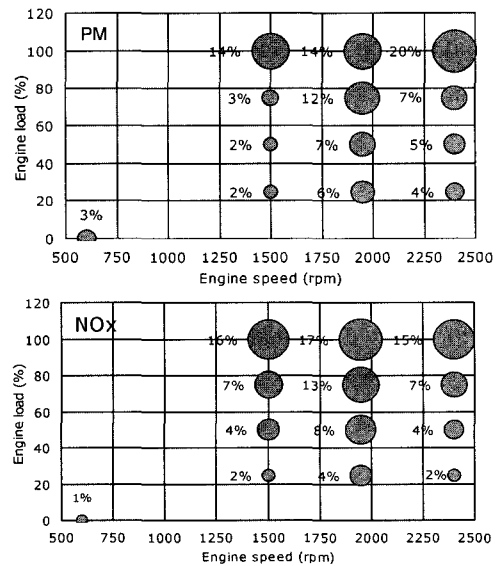


Fig. 10 Contribution of ESC points on PM and NOx

한 개선이 이루어질 경NOx 및 PM의 배출량을 상당량 개선 가능성을 알 수 있다.

#### 4. 결론

일반적으로 현재의 EURO-III 규제대응 방법으로는 연소개선, PM 저감을 위한 전자식 고압연료분사, 그리고 NOx 저감을 위한 EGR 기술이 채택되고 있는 추세이다. 한편, EURO-IV 규제는 EURO-III 규제 대비 NOx는 약 30%, 그리고 PM은 약 80%의 저감을 요구하고 있으며, 이의 대응을 위해서는 전통적인 연소개선 이외에도 배기 후처리기술 및 저유황 연료의 사용을 요구하고 있다.

한편, 이와 같은 Feasibility 시험결과를 분석해 보면, 비록 향후 해결해야 할 과제가 많이 쌓여 있음에도 불구하고, 성능1호기 엔진으로 어떠한 H/W의 사양 변경없이 목표 성능의 확인 및 적절한 연비 수준, 그리고 EURO-III 규제 대응이 가능함을 제시하였음은 주목할 만하다. 또한, 초기 개념 설계시 사용하였던 사이클 시뮬레이션을 적용하여 적절한 시험조건

설정 및 결과예측에 활용할 수 있었다.

한편, 지금까지의 FEASIBILITY 시험에서의 미비점 및 향후 개발시 성능/EM 개발 측면에서 고려해야 할 사항으로는 적절한 공기량 확보를 위한 T/C의 선정, 엔진내구 및 성능개발을 위한 연소압 분석, 연소실 형상 및 노즐 등 연소계 매칭, EURO-IV 대응을 위한 EGR 적용, 그리고 후처리장치 적용을 위한 엔진 매칭 등이 요구된다.

#### References

- 1) T. V. Johnson, "Diesel Emission Control : 2001 in Review," SAE 2002-01-0285, 2002.
- 2) BOSCH, Diesel Accumulator Fuel-Injection System Common Rail, 1999.
- 3) P. Zelenka, H. Aufinger, W. Reczek, W. Cartelieri, "Cooled EGR A Key Technology for Future Efficient HD Diesels," SAE 980190, 1998.
- 4) Y. I. Chung, J. K. Yoon, Automotive and Environments, Hansung University Press, 2000.
- 5) AVL, Boost Manual, Version 4, 1999.