고압/저압 EGR 공급 비율에 따른 디젤 엔진의 연소 및 배기 특성

박 영 수 · 배 충 식*

한국과학기술원 기계공학전공

Combustion and Emissions Characteristics of a Diesel Engine with the Variation of the HP/LP EGR Proportion

Youngsoo Park · Choongsik Bae*

*Division of Mechanical Engineering, School of Mechanical, Aerospace & Systems Engineering,
Korea Advanced Institute of Science & Technology, Daejeon 305-701, Korea
(Received 22 April 2014 / Revised 1 July 2014 / Accepted 4 July 2014)*

Abstract : The effects of high pressure and low pressure exhaust gas recirculation (HP/LP EGR) portion on diesel engine combustion and emissions characteristics were investigated in a 2.2 L passenger-car diesel engine. The portion of HP/LP EGR was varied from 0 to 1 while fixing the mass flow rate of fresh air. The intake manifold temperature was lowered with the increasing of the portion of LP EGR, which led to the retardation of heat release by pilot injection. The lowered intake manifold temperature also resulted in low nitrogen oxide (NO_x) emissions due to decreased in-cylinder temperature and prolonged ignition delay, however, the carbon monoxide (CO) emission showed opposite trend to NO_x emissions. The brake specific fuel consumption (BSFC) was decreased as the portion of LP EGR increased due to lowered exhaust manifold pressure by wider open of turbocharger vane. Consequently, the trade-off relationship between NO_x and BSFC could be improved by increasing the LP EGR portion.

Key words : Diesel engine(디젤 엔진), High pressure exhaust gas recirculation(고압 배기 재순환), Low pressure EGR(저압 배기 재순환), Proportion of high and low pressure EGR(고압/저압 배기 재순환 공급 비율), Variable geometry turbocharger(가변형 터보차저)

Nomenclature

HP EGR : high pressure exhaust gas recirculation
LP EGR : low pressure exhaust gas recirculation
DPF : diesel particulate filter
BSFC : brake specific fuel consumption
PMEP : pumping mean effective pressure
BMEP : brake mean effective pressure
MPRR : maximum pressure rise rate

1. 서론

디젤 엔진은 가솔린 엔진 대비 높은 열효율로 인해 연료 소모율이 낮고 이로 인해 이산화탄소(carbon dioxide, CO₂) 배출량이 낮다는 장점¹⁾이 존재하지만 규제 대상 배기 배출물인 질소산화물(nitrogen oxide, NO_x)과 입자상 물질(particulate matter, PM)로 인해 제약을 받고 있으며 2014년부터 시행 예정인 EURO-6 규제 달성을 위해 NO_x 배출량의 경우 현재 수준의 50% 이상을 추가 저감해야 하는 상황이다. 디젤 엔진의 경우 연료 분사 장치, 흡배기 시스템 및 후처리 장치의 발달로 인해 과거 대비 NO_x와 PM의 배출량이 획기적으로 감소하였으나 계속해서 강화

*Corresponding author, E-mail: csbae@kaist.ac.kr

되고 있는 배기 규제 만족을 위해서는 추가적인 배기 저감 기술이 필요한 실정이다. 배기 가스 재순환(exhaust gas recirculation, EGR)의 경우 디젤 엔진에서 NO_x 저감을 위해 적용되어 온 전통적인 기술²⁾으로써 최근에는 다양한 EGR 레이아웃에 대한 연구가 진행되고 있다. Low pressure (LP) EGR의 경우 여러 EGR 레이아웃 중의 하나로써 high pressure (HP) EGR과는 달리 디젤 입자 필터(diesel particulate filter, DPF) 후단에서 추출한 배기 가스를 터보차저의 컴프레서 전단으로 재순환시키는 방식이다. 기존 연구에 따르면 HP EGR 대비 LP EGR의 장점은 아래와 같다. 첫째, LP EGR이 컴프레서 전단으로 유입되기 전 LP EGR 쿨러뿐만 아니라 인터쿨러를 지나며 냉각되기 때문에 HP EGR 대비 낮은 흡기 매니폴드 온도를 유지할 수 있다. 이로 인해 동일한 EGR 유량 공급 시 NO_x 저감폭이 더 크며^{3,4)} 이러한 큰 NO_x 저감폭을 활용, 연비나 다른 배기 배출물 특성 향상에 활용할 수 있다.⁵⁾ 둘째, LP EGR은 DPF 후단에서 배기 가스를 재순환시키기 때문에 터보차저의 터빈을 지나는 배기 가스 유량에는 영향을 미치지 않게 되어 더 높은 과급 압력 유지가 가능해진다. 이는 곧 PM 배출 저감이 가능함을 의미^{6,7)}하며 다른 한편으로는 터빈의 노즐을 더 개방하는 것이 가능하여 터빈 전단 압력이 낮아짐으로써 펌핑 로스를 줄일 수 있는 것으로 알려져 있다.⁸⁾ 셋째, LP EGR 적용 시 배기 가스와 신기가 컴프레서, 인터쿨러, 흡기 매니폴드를 거치는 과정에서 HP EGR 대비 더 균질한 혼합기를 형성하기 때문에 NO_x/PM 상반 관계를 개선할 수 있는 것으로 알려져 있다.^{9,10)} 하지만 단점도 존재하는데 HP EGR 대비 상대적으로 긴 공급라인으로 인해 응답 속도가 느려 과도 운전 시 NO_x 오버슈트가 발생할 가능성^{8,11)}이 존재하며 배기 가스가 터보 차저의 컴프레서를 지나기 때문에 컴프레서의 내구성이 악영향을 끼칠 우려가 있다.^{4,8,12)}

이렇게 LP EGR과 HP EGR 각각 장단점이 존재하기 때문에 하나의 EGR 전략만을 적용하기 보다는 두 가지 기술 모두 적절히 혼합하여 적용하는 것이 필요한 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 동일한 EGR 유량 공급 조건에서 HP EGR과 LP EGR의 공급 비율 변화가 엔진 연비, 배기 및 연소 특성에 미치는 영향에 대해 살펴보았다.

2. 실험 장치 및 실험 조건

2.1 실험 장치

본 연구에서는 HP EGR 시스템과 LP EGR 시스템이 함께 장착되어 있는 2.2 L 급 승용 디젤 엔진을 사용하였다. 엔진의 자세한 제원은 Table 1과 같다. Fig. 1은 전체 엔진 시스템 개략도를 나타낸 것으로써 기존 HP EGR 쿨러와 HP EGR 밸브 외에 추가로 LP EGR 쿨러, LP EGR 밸브가 장착되어 있으며 터보차저의 컴프레서 전단으로 LP EGR 가스가 재순환되는 구조로 이루어져 있다. HP/LP EGR 공급 비율에 따른 각 유로의 온도 및 압력 변화를 측정하기 위해 각각 7개의 온도 센서와 압력 센서를 장착하고 data acquisition (DAQ) 보드를 이용하여 실시간 측정하였으며 HP/LP EGR 비율 계산을 위해 흡기 매니폴드, 배기 매니폴드 및 인터쿨러 전단에서 CO₂ 농도를 측정하였다. 실린더 내로 유입되는 흡입 공기는 공기 필터 후단에 장착된 공기 유량 센서를 이용하여 측정하였으며 NO_x, 탄화수소(Hydrocarbon, HC), 일산화탄소(carbon monoxide, CO) 및 CO₂의 농도는 HORIBA 사의 MEXA 9100D-EGR 모델을 이용하여 측정하였다. 엔진의 운전 속도 및 부하는 AVL 사의 Alpha 240 동력계에 의해 제어되었으며 엔진의 제어는 Bosch 사의 ECU를 활용하였다. 실린더 내 연소 압력은 Kistler 사의 piezo-type pressure transducer (6056A type)를 이용하여 측정하였으며 100 사이클 동안 취득한 압력데이터를 이용하여 열방출율을 계산하였다.

Table 1 Engine specification

Engine specification	
Displacement vol. [cc]	2,199
Cylinder number	4
Bore x stroke [mm]	85.4 × 96
Compression ratio	16
Max. Power [hp]	200
Max. Torque [kgf·m]	44.5
Turbocharger	VGT (electrically controlled nozzle)
Injection system	Common-rail system with piezo-actuated injector

Fig. 1 The schematic diagram of engine system

2.2 실험 조건

Table 2는 본 연구의 실험 조건을 나타내고 있다. ECU 상에서 HP/LP EGR의 공급 비율 제어가 가능한 중속, 중부하의 3가지 운전 영역에서 실험을 수행하였으며 HP/LP EGR 공급 비율 변화 시 실린더 내로 유입되는 신기량을 고정하고 실험을 진행하였다. HP/LP EGR 공급 비율은 ECU상에 존재하는 전체 EGR을 중 LP EGR의 공급 비율을 제어하는 맵을 이용하였다. 본 연구의 경우 동일한 신기량 조건 하에서 LP EGR 공급 비율을 증가시킬 경우 연소 과정에서 발생한 HC, CO가 DPF를 거치면서 CO₂로 산화되어 컴프레서 전단으로 공급되기 때문에 신기량을 고정하더라도 LP EGR 공급 비율에 따라 전체 EGR율의 편차(±1.5%)가 존재하였다 (LP EGR 만을 적용했을 경우 HP EGR 만을 적용한 경우 대비 약 3% EGR을 증가).

정량적인 HP/LP EGR 공급 비율 계산을 위해 Lim 등¹³⁾이 제시한 흡기/배기 매니폴드 및 컴프레서 후단의 CO₂ 농도를 이용한 HP/LP EGR 공급 비율 계산 방법을 활용하였으며 각 운전 조건 별 HP/LP EGR 각각의 공급 비율을 0~1 사이에서 변화시켰다. 전

체 EGR 율 및 HP/LP EGR 율의 정의는 식 (1)~(4)와 같다. 과급 압력은 터보차저의 노즐 개도 closed-loop 제어를 통해 운전 조건 별로 일정하게 유지하였으며 분사 횟수 (2회 과압릿, 1회 주분사, 1회 후분사), 분사 시기, 분사 압력 또한 일정하게 유지시켜 주었다. 냉각수와 공급되는 디젤 연료의 온도는 각각 80, 40°C로 일정하게 제어되었으며 인터쿨러 후단 온도 또한 운전 조건 별로 일정하게 유지되었다.

$$EGR_1[\%] = \frac{[CO_2]_{intercooler} - [CO_2]_{amb}}{[CO_2]_{ex} - [CO_2]_{amb}} \times 100 \quad (1)$$

where

$$[CO_2]_{intercooler} = [CO_2]_{in \text{ the upstream of intercooler}}$$

$$EGR_2[\%] = \frac{[CO_2]_{in} - [CO_2]_{amb}}{[CO_2]_{ex} - [CO_2]_{amb}} \times 100 \quad (2)$$

(= total EGR rate)

$$LP \ EGR \ portion = \frac{100EGR_1 - EGR_1EGR_2}{100EGR_2 - EGR_1EGR_2} \quad (3)$$

$$HP \ EGR \ portion = \frac{100(EGR_2 - EGR_1)}{100EGR_2 - EGR_1EGR_2} \quad (4)$$

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 HP/LP EGR 공급 비율에 따른 EGR 공급 라인 온도/압력 특성

본 절에서는 HP/LP EGR 공급 비율에 따른 엔진 연소, 배기 특성을 알아보기에 앞서 공급 비율 변화에 따른 EGR 공급 라인의 온도 및 압력 특성에 대해 먼저 설명하고자 한다. Fig. 2는 운전 조건 A에서 HP/LP EGR 공급 비율 변화에 따른 흡기 매니폴드

Table 2 Experimental conditions

Experimental conditions								
Test point	RPM × MPa BMEP	MAF [mg/cycle/cyl]	Total EGR rate [%]	Boost pressure [kPa, abs]	Injection pressure [MPa]	Number of injection	Temperature of intercooler downstream [K]	Pressure downstream of DPF [kPa]
A	2000 × 0.6	490	29 (±1.5%)	138	87	4	313	105.9
		520	25.5 (±1.5%)					
		545	22.3 (±1.5%)					
B	1750 × 1	660	17 (±1.5%)	163	82	4	318	107.2
C	1500 × 0.8	510	20 (±1.5%)	128.5	72.5	4	313	104.9

Fig. 2 Intake manifold temperature variations with respect to the HP/LP EGR proportion (operating condition A)

Fig. 3 Temperature of compressor downstream with respect to the HP/LP EGR proportion (operating condition A)

온도 변화를 나타내고 있다. LP EGR 공급 비율이 증가함에 따라 흡기 매니폴드 온도는 점차 감소하는 결과를 나타내었으며 HP EGR만을 공급했을 경우 대비 LP EGR만을 공급했을 경우 최대 20 K의 온도 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 LP EGR의 경우 이미 배기 가스 온도가 많이 감소한 DPF 후단에서부터 추출된 배기 가스가 LP EGR 쿨러 및 인터쿨러에 이르는 상대적으로 긴 공급 라인을 통과하게 되면서 더 많은 열교환이 발생하였기 때문이다.¹³⁾ Fig. 3은 HP/LP EGR 공급 비율에 따른 터보차저 컴프레서 후단의 온도를 나타내고 있다. 이의 경우 흡기 매니폴드 온도 경향과는 반대로 LP EGR의 공급 비율이 증가함에 따라 컴프레서 후단의 온도가 상승하는 것을 볼 수 있다. 이는 컴프레서 전단으로 대기 온도보다 상대적으로 온도가 높은 LP EGR 가스가 공급되고 압축되었기 때문이다. 따라서 동일한 인터쿨러 후단 온도를 유지하기 위해 간단한

Fig. 4 Required cooling power of intercooler with respect to the HP/LP EGR proportion (operating condition A)

Fig. 5 Pressure drop in intercooler with respect to the HP/LP EGR proportion (operating condition A)

열전달 방정식을 통해 계산한 인터쿨러의 요구 냉각 용량은 Fig. 4와 같다. LP EGR만을 공급할 경우 HP EGR만을 공급했을 때 대비 약 1.7배의 인터쿨러 냉각 용량이 요구되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 운전 조건 A에서 전체 EGR을 별, HP/LP EGR 공급 비율 별 인터쿨러에서의 압력 강하 결과를 나타내고 있는데 HP/LP EGR 공급 비율이 변화함에 따라 열전달량과 인터쿨러를 통과하는 기체의 구성이 변하더라도 압력 강하는 거의 일정한 값을 유지하는 것을 관찰할 수 있다.

3.2 HP/LP EGR 공급 비율에 따른 엔진 연소 특성

Fig. 6은 운전 조건 A, 전체 EGR을 25.5% 조건에서 HP/LP EGR 공급 비율에 따른 연소 압력 및 열방출을 곡선을 나타내고 있다. 열방출을 곡선을 보게 되면 2회의 파일럿 분사에 의한 첫 번째 피크, 주분

Fig. 6 Effects of HP/LP EGR proportion on in-cylinder pressure and heat release rate (operating condition A)

Fig. 7 Effects of HP/LP EGR proportion on mass fraction burned curve (operating condition A)

사에 의한 두 번째 피크, 후분사에 의한 세 번째 피크, 총 3개의 열방출 피크가 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 첫 번째 피크의 경우 LP EGR 공급 비율이 증가함에 따라 발생 위치가 지각되는 것을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 7의 mass fraction burned (MFB) 곡선을 보면 더 뚜렷하게 확인할 수 있는데 Fig. 2에서 언급했듯이 LP EGR 공급 비율이 증가함에 따라 흡기 매니폴드 온도가 감소하게 되고 이로 인해 과일릿 분사된 연료의 착화 지연이 길어졌기 때문이다.¹⁴⁾ 주분사에 의한 두 번째 피크의 경우에도 지연된 첫 번째 피크에 의해 주분사된 연료의 착화지연이 증가함에 따라 피크값이 소폭 상승하는 결과가 나타났다. 이렇게 LP EGR 공급 비율 증가에 따른 주

Fig. 8 Effects of HP/LP EGR proportion on MPRR characteristics (operating condition A)

분사에 의한 열방출을 피크가 증가함에 따라 후분사된 연료의 연소가 더 활발히 발생하게 되었고 그 결과, 세 번째 피크도 소폭 증가하는 결과가 나타났다. 연소상의 대표 인자로 알려져 있는 CA 50의 경우 HP/LP EGR 공급 비율과는 무관하게 373.4 deg로 일정한 값을 나타내었다. Fig. 8은 연소 소음의 대표 인자로 알려져 있는¹⁵⁾ maximum pressure rise rate (MPRR) 변화를 나타내고 있는데 HP/LP EGR 공급 비율과는 상관 없이 약 0.23 MPa/deg의 값을 나타내었다.

이러한 HP/LP EGR 공급 비율이 연소에 미치는 영향을 살펴봤을 때, HP/LP EGR 공급 비율은 과일릿 분사, 주분사 및 후분사에 의한 열방출의 지연이나 피크 값에는 미시적으로 영향을 미쳤으나 CA 50, MPRR 등과 같은 거시적인 특성에는 영향을 미치지 않는 것을 확인할 수 있다.

3.3 HP/LP EGR 공급 비율에 연비 및 배기 특성

Fig. 9는 운전 조건 A에 대해 HP/LP EGR 공급 비율 변화에 따른 brake specific fuel consumption (BSFC) 결과를 나타내고 있다. 3 가지 전체 EGR을 조건 모두 LP EGR 공급 비율이 증가함에 따라 BSFC가 감소하는 경향을 나타내고 있는데 이는 엔진의 펌핑 로스와 밀접한 관련이 있다. Fig. 10에 나타나 있는 엔진의 흡배기 과정 압력-부피 선도를 보게 되면 LP EGR 공급 비율이 증가함에 따라 배기 압력이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과가 나타난 이유는 LP EGR 공급 비율이 증가하게 될 경우

Fig. 9 Effects of HP/LP EGR proportion on BSFC characteristics (operating condition A)

Fig. 10 Effects of HP/LP EGR proportion on pumping loss (operating condition A)

HP EGR 공급 비율이 감소하게 되면서 터보차저의 터빈으로 유입되는 배기 가스의 유량이 증가하게 되고 흡기 압력을 일정하게 유지하고자 터보차저의 노즐이 좀 더 개방되었기 때문이다. 따라서 Fig. 10에서도 알 수 있듯이 동일한 흡기 압력 조건 하에서 LP EGR 공급 비율이 증가함에 따라 배기 압력이 감소하게 되면서 펌핑 로스가 저감되었고 결과적으로 BSFC가 저감되는 결과를 나타내었다.

Fig. 11은 3가지 운전 조건에 대해 HP/LP EGR 공급 비율 변화에 따른 NOx 배출 특성을 나타내고 있다. 일반적으로 NOx 생성량의 경우 흡기 온도가 증가할 경우 증가하는 것으로 알려져 있다. LP EGR 공급 비율이 증가할 경우 Fig. 2에서 언급했던 것처럼 최대 흡기 매니폴드 온도가 20 K 감소함에 따라 3가지 운전 조건 모두 NOx 배출량이 점차 감소하는 것

(a)

(b)

Fig. 11 Effects of HP/LP EGR proportion on NOx emissions (a) operating condition A, (b) operating conditions B and C

으로 나타났다. 또한 실험 조건에서 언급하였듯이 LP EGR 공급 비율이 증가할 경우 CO가 DPF를 거치면서 CO₂로 산화되어 공급되었기 때문에 신기량을 고정하더라도 EGR율이 최대 3% 증가하였다. 이 또한 NOx 배출량 감소에 기여하였다고 볼 수 있다. 본 논문에 나타내지는 않았으나 불완전연소 생성물인 CO의 경우에는 LP EGR 공급 비율 증가에 따른 연소 온도 감소로 인해 배출량이 점차 증가하는 반대의 경향을 나타내었다.

마지막으로 Fig. 12는 3가지 운전 조건에 대해 LP EGR 공급 비율 증가에 따른 NOx와 BSFC의 변화를 나타내고 있다. 일반적으로 알려져 있는 HP EGR 적용 시의 NOx/BSFC 간의 상반관계와는 다르게 LP EGR이 적용됨에 따라 흡기 매니폴드 온도 감소 및 펌핑 로스 감소로 인해 NOx와 BSFC가 동시에 개선되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 12 Effects of HP/LP EGR proportion on NOx and BSFC (operating conditions A,B and C)

4. 결 론

본 연구에서는 HP/LP EGR 시스템이 장착된 2.2 L 승용 디젤 엔진을 이용, HP/LP EGR 공급 비율 변화가 EGR 공급 라인의 온도 및 압력 특성, 연소 특성 및 배기 특성에 미치는 영향에 대해 알아보았다. 주요 결과는 아래와 같다.

- 1) LP EGR의 경우 HP EGR 대비 상대적으로 긴 공급 라인으로 인해 LP EGR 공급 비율 증가 시 흡기 매니폴드 온도가 점차 감소하였다.
- 2) LP EGR 공급 비율 증가 시 컴프레서 후단 온도가 증가하게 됨으로써 인터쿨러에서 요구되는 냉각 용량은 증가하는 결과가 나타났다.
- 3) LP EGR 공급 비율이 증가함에 따라 낮아진 흡기 매니폴드 온도로 인해 파일럿 분사된 연료의 착화 지연이 증가하는 것을 확인하였다.
- 4) LP EGR 공급 비율이 증가하게 될 경우 흡기 압력 유지를 위해 터보차저의 노즐이 좀 더 개방되면서 펌핑로스가 감소하였고 이로 인해 BSFC가 저감되는 결과가 나타났다.
- 5) LP EGR 공급 비율이 증가함에 따라 낮아진 흡기 매니폴드 온도 및 증가된 EGR율로 인해 NOx 배출량이 감소하였다. 결과적으로 LP EGR 공급 비율을 증가시키에 따라 NOx와 BSFC의 동시 개선이 가능하였다.

후 기

본 연구는 산업융합원천기술 개발 사업 [과제번

호 : 10039673] 의 일환으로 수행된 연구로써, 지식경제부의 지원을 받아 수행되었습니다. 지식경제부에 감사의 뜻을 표합니다.

References

- 1) L. Zhang, "A Study of Pilot Injection in a DI Diesel Engine," SAE 1999-01-3493, 1999.
- 2) Y. Jung, J. Jang, J. Park, C. Bae and D. Kim, "Reduction of Exhaust Emissions Using Various Injector Configurations in Low Temperature Diesel Combustion," Transactions of KSAE, Vol.19, No.4, pp.16-23, 2011.
- 3) J. Lujan, B. Pla, S. Moroz and G. Bourgoïn, "Effect of Low Pressure EGR on Gas Exchange Processes and Turbocharging of an HSDI Engine," Proceedings of the Conference on Thermo- and Fluid-dynamics Processes in Diesel Engines (THIESEL 2008), Valencia, Spain, Paper E.2.1, 2008.
- 4) K. Cho, M. Han, R. Wagner and C. Sluder, "Mixed-source EGR for Enabling High Efficiency Clean Combustion Modes in a Light-duty Diesel Engine," SAE Int. J. Engines, Vol.1, No.1, pp.457-465, 2009.
- 5) H. Lee, C. Jo, K. Nam, S. Lee and E. Lee, "Optimization of Low Pressure EGR of V6 3.0l Diesel Engine for CO₂ Reduction," KSAE Annual Conference Proceedings, pp.166-173, 2011.
- 6) G. Zamboni and M. Capobianco, "Influence of High and Low Pressure EGR and VGT Control on In-cylinder Pressure Diagrams and Rate of Heat Release in an Automotive Turbocharged Diesel Engine," Appl. Ther. Eng., Vol.51, Issues 1-2, pp.586-596, 2013.
- 7) A. Maiboom, X. Tauzia, S. Shah and J. Hetet, "Experimental Study of an LP EGR System on an Automotive Diesel Engine Compared to HP EGR with Respect to PM and NOx Emissions and Specific Fuel Consumption," SAE Int. J. Engines, Vol.2, No.2, pp.597-610, 2010.
- 8) D. Heuwerker, W. Glewen, C. Meyer, D. Foster, M. Andrie and R. Krieger, "Effects of Low Pressure EGR on Transient Air System Perfor-

- mance and Emissions for Low Temperature Diesel Combustion," SAE 2011-24-0062, 2011.
- 9) O. Vitek, J. Macek, M. Polasek, S. Schmerbeck and T. Kammerdiener, "Comparison of Different EGR Solutions," SAE 2008-01-0206, 2008.
- 10) M. V. Aken, F. Willems and D. Jong, "App-liance of High EGR Rates with a Short and Long Route EGR System on a Heavy Duty Diesel Engine," SAE 2007-01-0906, 2007.
- 11) S. Reifarth and H. Angstrom, "Transient EGR in a High-speed DI Diesel Engine for a Set of Different EGR-routings," SAE Int. J. Engines, Vol.3, No.1, pp.1071-1078, 2010.
- 12) V. Bermudez, J. Lujan, B. Pla and W. Linares, "Effects of Low Pressure Exhaust Gas Recircu-lation on Regulated and Unregulated Gaseous Emissions during NEDC in a Light-duty Diesel Engine," Energy, Vol.36, Issue 9, pp.5655-5665, 2011.
- 13) G. Lim, Y. Choi, C. Park and J. Park, "Effects of HPL and LPL EGR Gas Mixed Supply on Combustion and Emissions in Automotive Diesel Engine," SAE 2011-01-1831, 2011.
- 14) F. Millo, P. Giacominetto and M. Bernardi, "Analysis of Different Exhaust Gas Recircu-lation Architectures for Passenger Car Diesel Engines," Appl. Energy, Vol.98, pp.79-91, 2012.
- 15) A. Torregrosa, A. Broatch, A. Garcia and L. Monico, "Sensitivity of Combustion Noise and NOx and Soot Emissions to Pilot Injection in PCCI Diesel Engines," Appl. Energy, Vol.104, pp.149-157, 2013.