

저압 EGR을 적용한 디젤엔진의 희석비에 따른 연소 특성 비교[§]

임기훈* · 박준혁** · 최 영***† · 이선엽*** · 김영민***

* 과학기술연합대학원대학교 청정환경시스템공학과 대학원, ** 경원대학교 기계공학과 대학원,

*** 한국기계연구원 그린환경에너지기계연구본부 그린동력연구실

Comparison of Combustion Characteristics On the Basis of the Dilution Ratio in Diesel Engines with LPL EGR

Gihun Lim*, Junhyuk Park**, Young Choi***†, Sunyoup Lee*** and Yongmin Kim***

* Dept. of Environmental System Engineering, Univ. of Science and Technology

** Dept. of Mechanical Engineering, Kyungwon Univ.

*** Engine Research Team, Korea Institute of Machinery and Materials

(Received December 10, 2010 ; Revised February 22, 2011 ; Accepted February 22, 2011)

Key Words: HPL EGR(고압 배기가스재순환), LPL EGR(저압 배기가스재순환), NO_x(질소산화물), PM(입자상 물질), Dilution Ratio(희석비)

초록: 디젤엔진에서 배기가스 재순환(EGR; Exhaust Gas Recirculation)은 선택적 환원 촉매나 NO_x 흡장 촉매에 비해 NO_x 배출 저감을 위한 가장 효과적인 기술이다. 점점 더 강화되어 가는 NO_x 배출 규제를 만족시키기 위해서는 많은 양의 EGR 가스 공급이 필요하다. 저압 EGR은 일정한 과급 압력에서 가변형상 터보차저의 제어와 거의 독립적이기 때문에 EGR 공급 측면에서 보면 저압 EGR이 기존의 고압 EGR에 비해서 더 많은 장점을 갖는다. 본 연구에서는 저압 EGR이 연소 특성에 미치는 영향을 고압 EGR을 적용했을 때와 비교하였다. 각 EGR 루프에 대해 혼합기의 희석 정도에 따른 영향을 분석하기 위해 독립 변수로써 희석비를 사용하였다. 저압 EGR을 적용하였을 때, 고압 EGR을 적용했을 때와 동등한 NO_x 배출량을 유지하면서 연료 소비율과 매연 배출은 고압 EGR의 경우보다 좀 더 낮은 결과를 보였다.

Abstract: Exhaust gas recirculation (EGR) is more effective than selective catalytic reduction (SCR) or lean NO_x trap (LNT) for the reduction of NO_x emissions in diesel engines. A large amount of EGR gas is necessary to satisfy the stringent regulations on NO_x emissions. Low pressure loop (LPL) EGR is almost independent of the variable geometry turbocharger (VGT) at a specific boost pressure, so LPL EGR is better than conventional high pressure loop (HPL) EGR in terms of EGR supply. We compare the influence of HPL EGR and LPL EGR on the combustion characteristics at a constant boost pressure in a diesel engine. The dilution ratio was employed as an independent parameter to analyze the effect of the dilution of the intake charge for each EGR loop. At the same level of NO_x emissions, the fuel consumption and smoke opacity were slightly lower for LPL EGR than for HPL EGR.

- 기호설명 -

1. 서론

BMEP : 제동 평균 유효 압력, MPa

BSFC : 연료 소비율, g/kWh

BSNO_x : 질소산화물 배출량, g/kWh

배기가스재순환(EGR; Exhaust Gas Recirculation)은 디젤엔진에서의 질소산화물(NO_x; Nitrogen Oxide) 배출량을 저감시키기 위한 기술로써 각광을 받아 왔다. NO_x 배출량 저감을 위한 또 다른 기술로써 선택적 환원 촉매(SCR; Selective Catalytic Reduction) 기술이나 NO_x 흡장촉매(LNT; Lean NO_x Trap) 등이 있지만, 비용적인 측면과 적용 가능성 측면에서 보면 EGR 기술이 아직까지는 장점을 갖는다고 할 수

§ 이 논문은 대한기계학회 2010년도 추계학술대회 (2010. 11. 3.-5., ICC제주) 발표논문임

† Corresponding Author, ychoi@kimm.re.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

있다. 향후 유럽의 EURO 6 배기 규제에 대응하기 위해서는 더 많은 양의 EGR 가스를 안정적으로 공급하여 연소 온도를 낮춰서 NO_x 저감을 시킬 필요성이 있다.

기존의 고압 EGR 라인은 터빈 전단에서 배기 가스를 추출하여 압축기 후단으로 공급하기 때문에 EGR율을 늘릴수록 터보차저 출력이 저하되는 단점이 있다.⁽¹⁾ 그로 인해 동일 과급 압력을 유지하면서 많은 양의 EGR 가스를 공급하기 위해서는 가변 형상 터보차저(VGT; Variable Geometry Turbocharger)의 제어 범위가 한계에 부딪히게 된다. 이러한 문제 때문에 원활한 EGR 가스의 공급 측면에서 보면, 터빈 후단에서 배기가스를 추출하여 압축기 전단으로 공급하는 저압 EGR 라인이 상대적으로 장점을 갖는다.^(1,2)

이전 연구⁽³⁾에서는 고압 및 저압 EGR의 특성을 분석하기 위해 VGT의 베인 제어를 하지 않고 EGR율에 따른 연소 특성을 분석하였으나, VGT 제어를 하지 않으면 저압 EGR의 경우 EGR율이 증가해도 터빈 전단에서의 배기 압력의 변화가 거의 없어 고압 EGR의 경우보다 배기 압력이 상대적으로 높았다. 높은 배기가스 압력은 펌핑 손실의 증가로 연료 소비율 악화를 초래하기 때문에 실린더 내 연소에 대한 EGR 가스의 직접적인 영향을 분석하는 데 어려움이 있었다.

따라서 본 연구에서는 동일 과급 압력 조건으로 VGT를 제어하면서 고압 및 저압 EGR 적용 시 연소 특성을 비교하고자 하였다. 또한 각각의

경우에서의 VGT 제어 범위를 통하여 저압 EGR 라인이 갖는 장점을 살펴보고자 하였다. 혼합기의 희석된 정도를 보여주는 희석비에 따라 연료 소비율 및 배기 특성 결과를 비교 분석하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

저압 EGR을 적용한 디젤엔진의 희석비에 따른 엔진 연소 특성을 살펴보기 위해 엔진 동력계 상에 대상 엔진을 설치 후 본 실험을 진행하였다.

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 엔진은 2.0 L 급 승용 디젤 엔진으로서 커먼레일 직접 분사 방식의 분사시스템, 전자제어 VGT와 고압 EGR 라인, 디젤 산화 촉매(DOC; Diesel Oxidation Catalyst), 매연여과장

Table 1 Engine specification

Item	Specification
Valve type	DOHC
Number of cylinders	4
Bore × Stroke	84.0 mm × 90.0 mm
Power	184 PS @ 4000 rpm
Torque	40.0 kgf·m @ 1800~2500 rpm
Displacement	1995 cc
Compression ratio	16.0 : 1

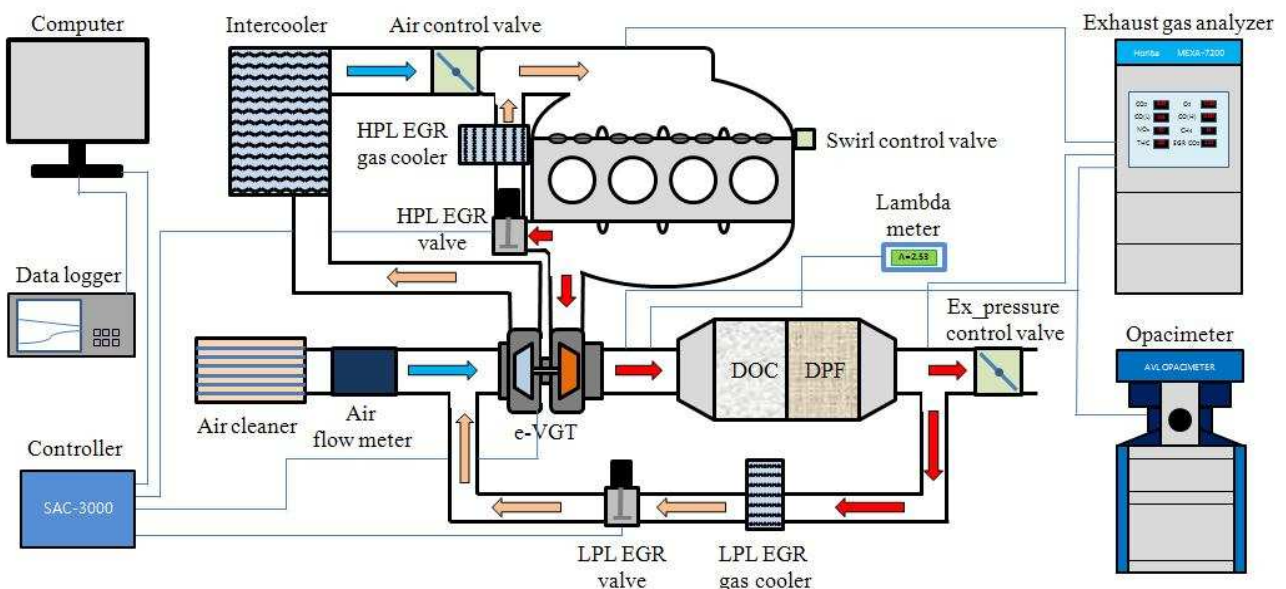


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

치(DPF; Diesel Particulate Filter) 등이 탑재되어 있다. 기타 엔진 사양은 Table 1과 같다.

Fig. 1은 본 실험에 사용된 장치들의 개략도이다. VGT의 터빈 전단에서 배기가스를 추출하여 압축기 후단으로 공급하는 기존의 고압 EGR 라인과는 별도로 DPF 후단에서 배기가스를 추출하여 압축기 전단으로 공급하는 저압 EGR 라인을 구축하였다. 압축기 전단에 EGR 가스를 공급하기 전에 EGR 가스의 온도를 낮추기 위해 열교환기를 장착하였으며, EGR 가스 유량을 제어하기 위해 기존의 고압 EGR 용도의 밸브를 임의로 장착하였다. 또한 많은 양의 EGR 가스를 공급하기 위해서는 배압을 올려줄 필요성이 있기 때문에 배압 조절 밸브를 배기관 끝단에 설치하였다.

VGT와 EGR 밸브를 제어하기 위해 외부 제어기(SAC-3000, SmarTek)를 이용하여 컴퓨터 상에서 모니터링하며 제어하였다.

흡기 및 배기의 성분을 분석하기 위해 배기가스 분석기(MEXA-7000, Horiba)를 사용하였고, 측정 위치는 흡기 매니폴드, VGT와 DOC 사이, DPF 후단에서 각각 측정을 하였다. 매연 배출을 측정하기 위해 Opacimeter(AVL 439 Opacimeter, AVL)를 사용하였으며, VGT와 DOC 사이에서 측정하였다.

연료 유량은 체적식 연료 유량계(SCHENCK)로 측정하였으며, 공기 유량은 차압식 면적 유량계(DPE-S-S, KOMETER)를 사용하여 측정하였다. 공기 과잉률을 측정하기 위해 Lambda meter(LA4, ETAS)를 배기관에 설치하였다. 흡기 매니폴드, 배기 매니폴드, DOC 및 DPF 전후단, 저압 펌프 후단의 연료 등에서 온도 및 압력을 측정하였다. 각종 데이터는 데이터 취득기(GL-800, Graphtec)를 통하여 취득하였다.

2.2 실험방법

엔진 운전 조건은 주요 시내 주행 조건인 엔진 회전수 1500 rpm, 제동 평균 유효 압력(BMEP; Brake Mean Effective Pressure) 0.4 MPa로 정하여 실험하였다. 엔진이 충분히 예열된 상태를 모사하기 위해 수냉식 열교환기를 사용하여 냉각수 공급 온도는 80 °C, 인터쿨러 후단의 흡기 온도는 40 °C, 저압 펌프 후단의 연료 온도는 40 °C로 제어하였다.

EGR 적용 시 EGR율을 계산하기 위해 배기와 흡기의 CO₂ 농도를 측정하였고 사용한 관계식은

(1)과 같다.

$$EGR \text{ rate} (\%) = \frac{[CO_2]_{in} - [CO_2]_{amb}}{[CO_2]_{ex} - [CO_2]_{amb}} \times 100 \quad (1)$$

여기서 [CO₂]_{in} : 흡기 중의 CO₂ 농도

[CO₂]_{ex} : 배기 중의 CO₂ 농도

[CO₂]_{amb} : 대기 중의 CO₂ 농도

이다.

고압 EGR의 경우 EGR율을 조절하기 위해 전자식 EGR 밸브의 개도를 조절하였고, 저압 EGR의 경우에는 기존의 고압 EGR 밸브는 닫은 상태에서 저압 EGR 밸브와 배압 조절 밸브의 개도를 통해 EGR율을 조절하였다. EGR율 계산 시 배기 중의 CO₂ 농도는 VGT와 DOC 사이에서 측정된 CO₂ 농도를 사용하였고, EGR율 0 %부터 공급 한계까지 약 10 % 간격으로 실험하였다.

과급 압력이 동일한 조건에서 실험하기 위해 고압 및 저압 EGR을 적용 시 VGT와 EGR 밸브, 배압 조절 밸브, 엑셀레이터 페달을 조절하여 과급 압력을 111.3 kPa(절대 압력)로 유지하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 계산 방법에 따른 저압 EGR율의 차이 및 희석비

Table 2는 엔진 회전수 1500 rpm, BMEP 0.4 MPa, EGR율 약 40 % 조건에서 고압 EGR 적용 시 DOC 전단, LP EGR 적용 시 DOC 전단, DPF 후단에서 측정된 배기가스 농도를 각각 보여준다.

고압 및 저압 EGR 적용 시 EGR율을 계산할 때 배기 중의 CO₂ 농도를 DOC 전단에서의 CO₂ 농도를 기준으로 계산을 하였다. 하지만 배기관에 흐르는 배기가스 양에 대한 흡기로 들어가는 배기가스의 양의 비율을 뜻하는 EGR율의 정의를 생각하면, 저압 EGR 적용 시 EGR율은 DPF 후단에서의 CO₂ 양을 기준으로 계산하는 것이 옳다고 할 수 있다. 실제로 저압 EGR 적용 시 EGR율을 계산해보면, DOC 전단 기준 시 40.1 %, DPF 후단 기준 시 38.7 %인 것을 확인할 수 있었다.

배기가스가 DOC를 지나는 과정에서 CO와 HC가 O₂와 반응하여 산화하기 때문에 CO₂의 양이 증가하게 되고 O₂의 양은 감소하게 된다. 이러한

이유로 EGR율을 통해서 고압 및 저압 EGR 적용 시 엔진 연소 특성을 비교하게 되면, 계산 방법에 따라 데이터 경향은 달라질 수 있다. 일반적으로 EGR 기술이 NO_x 배출을 저감시킬 수 있는 원인 중의 하나가 O₂ 저감에 의한 희석 효과인 것을 고려할 때 흡기의 희석된 정도를 나타내는 희석비는 EGR 라인의 레이아웃에 따라 영향을 받지 않으면서 EGR의 효과를 보다 정확히 나타낼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 희석비를 통해 고압 및 저압 EGR의 영향을 비교하고자 한다. 희석비에 대한 관계식은 식 (2)와 같다.⁽¹⁾

$$Dilution\ ratio(\%) = \left(\frac{[O_2]_{amb} - [O_2]_{in}}{[O_2]_{amb}} \right) \times 100 \quad (2)$$

여기서 [O₂]_{in} : 흡기 중의 O₂ 농도
 [O₂]_{amb} : 대기 중의 O₂ 농도
 이다.

3.2 희석비에 따른 VGT 제어 범위 비교

Fig. 2는 희석비에 따른 터빈 전단, 터빈과 DOC 사이, 그리고 DPF 후단에서 측정된 배기가스 압력을 보여준다. 고압 EGR의 경우 희석비가 높아질수록 EGR 공급량이 늘어나기 때문에 터빈을 돌릴 수 있는 배기가스의 유량이 줄어들게 된다. 일정 과급 압력을 유지하기 위해서는 동일 에너지를 가진 유체가 터빈을 돌려야 하므로 감소된 배기가스 유량을 높은 배기가스 압력이 보상하게 된다.

반면에 DPF 후단에서 배기가스를 추출하는 저압 EGR의 경우, 동등한 희석비의 EGR 가스를

Table 2 Concentration of the compositions of exhaust gas on each case at the condition of 40 % EGR rate

Composition	HPL_ Before DOC	LPL_ Before DOC	LPL_ After DPF
CO ₂ (%)	10.474	8.749	9.078
CO (ppm)	1980	737	0
HC (ppm)	459	284	39
NO _x (ppm)	12	39	42
O ₂ (%)	6.526	8.996	8.619

공급하기 위해서는 상대적으로 낮은 배기가스 압력이 필요함을 알 수 있다. 저압 EGR의 경우 희석비가 증가함에도 불구하고 터빈 전단에서와 DPF 후단에서의 압력 차이가 거의 일치함을 볼 때, 희석비에 따른 배기가스 압력 증가는 VGT 제어의 영향보다는 배기관 끝단의 배압 조절 밸브에 의한 것으로 설명할 수 있다.

이러한 경향은 희석비에 따른 VGT 제어 듀티비를 보여 주는 Fig. 3을 통해 보다 명확해진다. 저압 EGR의 경우 동일 과급 압력을 유지하기 위해 VGT 제어가 거의 필요하지 않는 이유는 EGR 공급을 위한 배기가스를 터빈과 후처리 장치를 지난 후에 추출하기 때문이다. Fig. 2와 Fig. 3의 결과는 저압 EGR 적용 시에는 VGT 제어 범위에 구속 받지 않고 고압 EGR에 비해 상대적으로 낮은 배기가스 압력으로도 동등한 EGR 가스를 원활히 공급할 수 있음을 뜻한다.

3.3 희석비에 따른 연료 소비율

Fig. 4는 희석비에 따른 연료 소비율을 보여준다. 희석비가 증가함에 따라 고압 및 저압 EGR 두 경우 모두 증가하는 경향을 보이지만, 전체적으로 저압 EGR을 적용하였을 때가 고압 EGR을 적용했을 때보다 연료 소비율이 낮은 것을 볼 수 있다. 이는 배기가스 압력의 경향과 밀접한 관계가 있다. 높은 배기가스 압력은 펌핑 손실을 증가시켜 연료 소비율의 악화를 초래한다. 또한 희석비가 동일 수준이라 하면 실린더 내 연소에 대한 EGR 가스의 희석 효과나 점화 지연 효과는 비슷하기 때문에, 저압

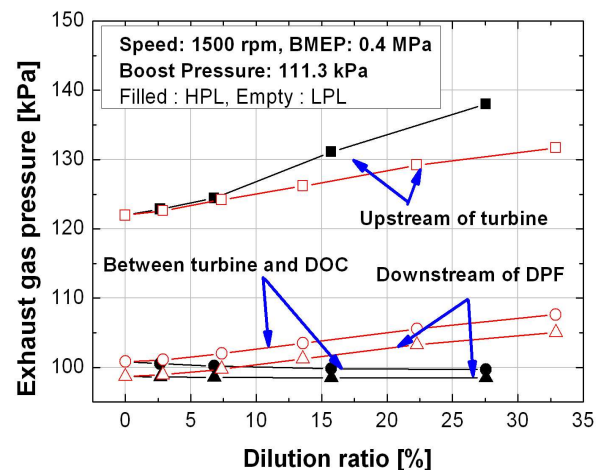


Fig. 2 Exhaust gas pressure at upstream of turbine, between turbine and DOC, and downstream of DPF according to the dilution ratio

EGR 적용 시 연료 소비율 저감은 터빈 전단에서의 배기가스 압력이 고압 EGR의 경우에 비해서 낮기 때문인 것으로 볼 수 있다.(Fig. 2)

3.4 희석비에 따른 배기 배출 특성

Fig. 5는 희석비에 따른 NO_x 배출 특성을 보여준다. 희석비가 증가함에 따라 고압 및 저압 EGR 적용 시 두 경우 모두 NO_x 배출량이 급격하게 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이는 혼합기 내에 CO₂와 H₂O의 농도가 증가하면서 높은 열용량에 의한 열적인 효과와 O₂의 농도가 감소하면서 산화물의 저감에 의한 희석 효과로 인해 NO_x 배출량이 원천적으로 감소되는 것이다.^(4,5) 저압 EGR 적용 시 고압 EGR을 적용했을 때와 동등한 수준으로 NO_x 배출량을 줄일 수 있음을 알 수 있다.

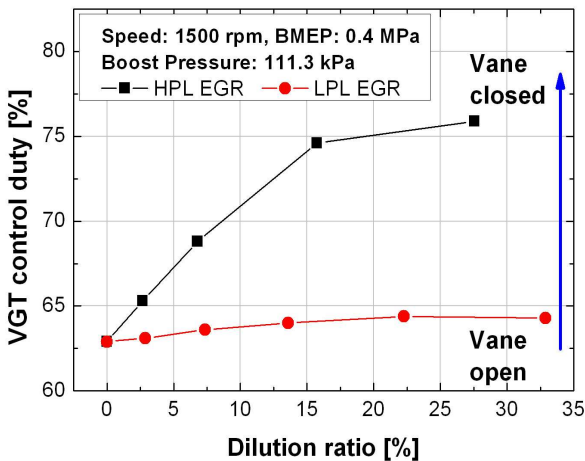


Fig. 3 VGT control duty for constant boost pressure of 111.3 kPa according to the dilution ratio

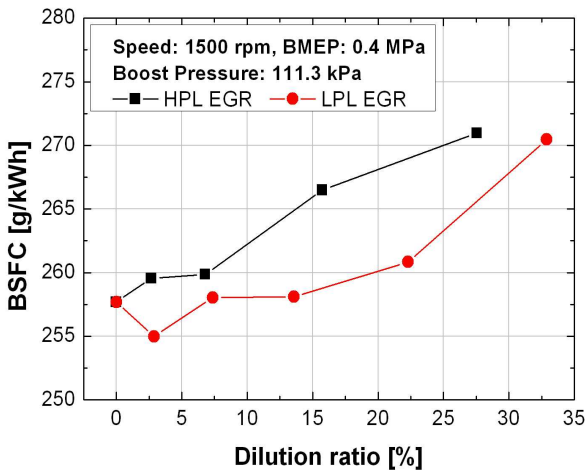


Fig. 4 Fuel consumption according to the dilution ratio

Fig. 6은 희석비에 따른 매연 배출 특성을 보여준다. 일반적으로 EGR율이 증가함에 따라 NO_x 배출량이 감소하면 매연 배출은 증가하는 것으로 알려져 있다. 그럼에도 불구하고 저압 EGR 적용 시 고압 EGR을 적용했을 때에 비해 상대적으로 낮은 매연 배출 특성을 보였다. 이는 저압 EGR의 경우 고압 EGR의 경우에 비해 EGR 가스와의 신기의 예혼합 시간이 길어지면서 실린더 내에서 국부적으로 농후한 영역이 상대적으로 감소하기 때문인 것으로 보인다.

Fig. 7과 Fig. 8로부터 NO_x 배출량에 따른 매연 배출과 연료 소비율을 각각 살펴보면, 저압 EGR 적용 시 동일 NO_x 배출량에 대해 연료 소비율 및 매연 배출을 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

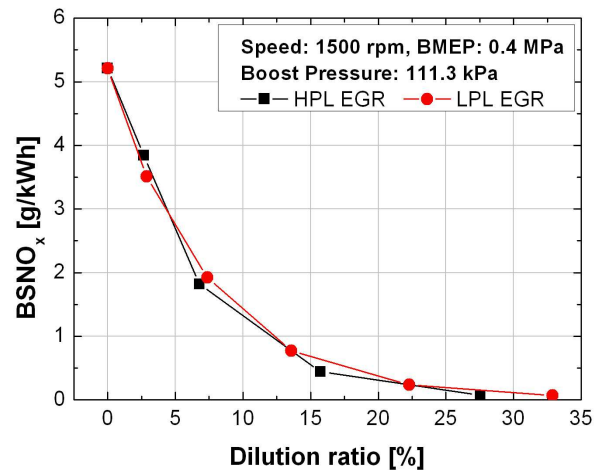


Fig. 5 NO_x emission according to the dilution ratio

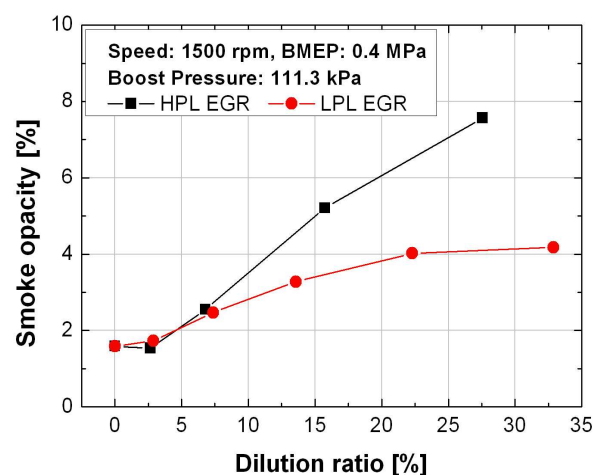


Fig. 6 Smoke opacity according to the dilution ratio

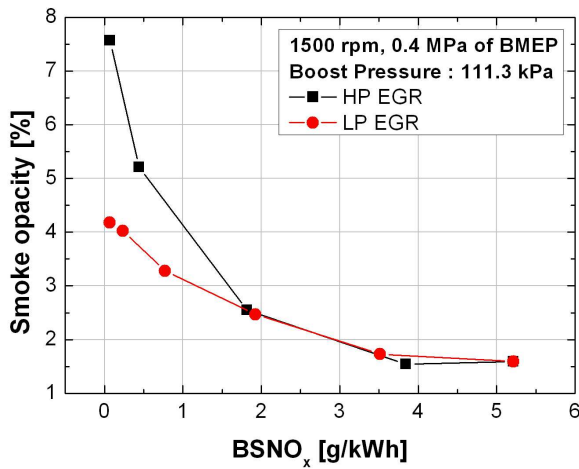


Fig. 7 NO_x & smoke opacity trade-off

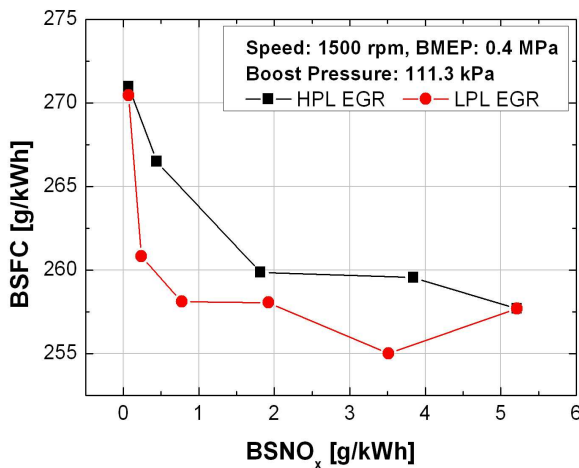


Fig. 8 Fuel consumption according to NO_x emission

4. 결론

본 연구에서는 저압 EGR을 적용한 2.0 L 급 디젤엔진에서 희석비에 따른 연소 특성을 기존의 고압 EGR을 적용했을 때와 비교 분석하였다. 결론은 다음과 같다.

(1) 고압 및 저압 EGR을 적용하여 EGR율 계산 시 배기가스의 CO₂ 농도 측정 위치에 따라 EGR율에 차이를 보이게 된다. 따라서 흡기의 희석된 정도를 나타내는 희석비를 통해서 고압 및 저압 EGR의 영향을 비교하는 것이 합리적이다.

(2) 저압 EGR 적용 시에는 VGT 제어 범위에 구속 받지 않고 고압 EGR에 비해 상대적으로 적

은 배기가스 압력으로도 동등한 EGR 가스를 원활히 공급할 수 있다.

(3) 저압 EGR 적용 시 상대적으로 낮은 배기가스 압력으로 인해 펌핑 손실이 줄어들어 연료 소비율은 고압 EGR을 적용했을 때에 비해 향상된다.

(4) 저속 저부하 조건에서 저압 EGR 적용 시 NO_x 배출량은 고압 EGR 적용 시와 동등한 수준이다. 그럼에도 불구하고 매연 배출은 EGR 가스와 신기의 예혼합 시간이 길어지면서 고압 EGR의 경우에 비해 낮은 배출 특성을 보인다.

(5) 저압 EGR 적용 시 동일 NO_x 배출량에 대해 연료 소비율 및 매연 배출을 감소시킬 수 있다.

후기

본 연구는 지식경제부에서 지원하는 산업원천 기술개발사업의 일환으로 수행되었으며, 관계 기관에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- (1) Maiboom, A., Tauzia, X. and Hétet, J. -F., 2008, "Influence of High Rates of Supplemental Cooled EGR on NO_x and PM Emissions of an Automotive HSDI Diesel Engine Using an LP EGR Loop," *International Journal of Energy Research*, Vol. 32, No. 15, pp. 1383~1398.
- (2) Lee, K. S., Baek, M. Y. and Park, H. B., 2007, "Study on Low Pressure Loop EGR System for Heavy-duty Diesel Engine to Meet EURO-5 NO_x Regulation," *Journal of the Korea Society For Power System Engineering*, Vol. 11, No. 4, pp. 12~17.
- (3) Lim, G. H., Park, C. W., Choi, Y. and Park, J. H., 2010, "Comparison of Emission Characteristics with Respect to High Pressure Loop and Low Pressure Loop EGR in 2.0 L Diesel Engine," *2010 Spring conference of the Korea Society of Mechanical Engineering*, pp. 94~95.
- (4) Ladommatos, N., Abdelhalim, S. M., Zhao, H. and Hu, Z., 1997, "The Dilution, Chemical, and Thermal Effects of Exhaust Gas Recirculation on Diesel Engine Emissions~Part 4: Effects of

- Carbon Dioxide and Water Vapor," *SAE Technical paper*, 971660.
- (5) Sohn, H. S. and Kim, H. Y., 2002, "Effects of Oxygen Concentration on the NO_x Emission of Non-Premixed Flame in Hot Exhaust Gas," *The Korea Society of Mechanical Engineering B*, Vol. 26, No. 6, pp. 833~841.