

LPL EGR System 적용 대형 디젤엔진의 EURO-5 NOx 규제대응에 관한 연구

Study on Low Pressure Loop EGR System for Heavy-duty Diesel Engine to Meet EURO-5 NOx Regulation

이교승 · 백문열 · 박형배

K. S. Lee, M. Y. Baek and H. B. Park

Key Words : Low Pressure Loop EGR(저압라인 배기재순환), Heavy-duty Diesel Engine(대형디젤엔진), EURO-5(EURO-5 규제), NOx(질소산화물)

Abstract : Recently, many small and medium size diesel vehicles have been equipped with turbocharger and EGR system to get high performance and reduce NO_x emissions but its application to heavy-duty diesel engine is not common yet. In this work, the simulation model for EURO-3 engine was developed using WAVE and then its performance and emission level were verified by comparing with experimental results. The possibility of current EURO-3 engine equipped with LPL EGR system which would be satisfied the EURO-5 regulation are examined. ESC 13 mode was chosen as the primary engine test mode, and the injection timing and fuel quantity were changed to compensate the lost engine performance caused by EGR. The system developed in this study shows that the current EURO-3 engine could satisfy EURO-5 NO_x regulation by applying LPL EGR.

1. 서 론

유럽과 북미의 배출가스 규제 정책은 상당한 양의 질소산화물과 입자상 물질의 저감을 요구하고 있는 현실 하에서 엔진의 성능과 비용을 개선시키거나 이러한 배출가스규제를 만족시키는 것이 엔진 제작자들에게 큰 당면 과제가 되었으며 따라서 디젤엔진에 대한 관심이 지속적으로 증대되어 왔다. 최근에는 발전된 연료 분사 방식과 전기적 제어 장치로 인해 디젤엔진의 사용 범위는 소형 승용 엔진에 까지 넓어졌다.¹⁾ 대형 디젤엔진의 배기규제는 소형 승용 디젤엔진의 배기규제 보다는 상대적으로 강도가 약한 편이나 차후로 점점 더 이와 같은 배기규제는 강화될 것이다. 그러므로 커먼레일, EGR 및 배출가스 후처리와 같은 기술들이 향후의 배기규제를 만족시키기 위해서 필요하며 이러한 기술들을 적용시킬 때 상당한 배출가스의 저감을 이루어

낼 수 있다.²⁾

DPF를 장착한 디젤엔진에서의 가장 큰 이슈는 질소산화물의 저감이다. 가솔린 엔진의 배출가스는 EGR과 삼원촉매를 통해서 쉽게 저감할 수 있으나 가솔린용 삼원촉매는 디젤엔진에 적용할 수 없다. 디젤엔진의 질소산화물 저감을 위해서 SCR, LNT와 같은 몇 가지 기술들이 개발되었지만 이러한 기술들은 몇 가지 약점을 가지고 있다. 예를 들어 Urea SCR의 경우, 지금의 주유소와 같은 충전소가 따로 필요하며 또한 Urea 분사 시스템 또한 추가적으로 장착이 되어야 한다.³⁾

EGR 방식에는 크게 두 가지 다른 형식이 존재하는데 High Pressure Loop(HPL) EGR과 Low Pressure Loop(LPL) EGR으로 나눌 수 있다. 일반적으로 High Pressure Loop EGR은 터빈 전단의 배출가스를 추출하여 컴프레서 후단으로 공급한다.⁴⁾

HPL EGR은 배출가스와 흡기사이의 압력차가 너무 작아서 효과적으로 EGR율을 제어할 수 없기에 추가적인 흡입장치를 필요로 한다.⁵⁾ 이러한 가스유동의 난점을 극복하기 위해 EGR pump,

접수일 : 2007년 9월 11일, 채택확정 : 2007년 11월 13일
이교승(책임저자) : 경기공업대학 자동차과
E-mail : leeks@kinst.ac.kr Tel. 031-496-4777
백문열, 박형배 : 경기공업대학 자동차과

venturi 및 흡기 throttle 등에 대한 연구가 진행 중이다. 대형 디젤엔진에서 질소산화물을 저감하기 위해 EGR을 많이 사용하고 있지만 BSFC가 커지고 입자상물질이 증가하는 단점을 가지고 있다.⁶⁾ 대형디젤엔진에 EGR을 공급하는 방법 중 하나로 LPL EGR이 있는데 LPL EGR은 후처리 장치와 함께 사용된다. LPL EGR은 exhaust manifold, turbine 후단이나 DPF 후단의 배출가스를 compressor 전단에 공급하므로 많은 양의 EGR을 공급할 수 있다는 장점이 있다. HPL EGR의 경우 필터링 되지 않은 배출가스를 바로 intake manifold에 주입하므로 흡기계에 불순물이 축적될 수 있지만 LPL EGR은 DPF 후단에서 배출가스를 재순환 공급하므로 이러한 문제를 일으키지 않는다. 뿐만 아니라 LPL EGR은 HPL EGR보다 높은 터빈효율을 갖기 때문에 HPL EGR에 비해서 뛰어난 BSFC를 나타낸다. 또한 DPF 후단의 배출가스를 이용함으로써 엔진의 내구성 또한 LPL EGR이 좋다.⁴⁾ 또한 DPF를 통과하면서 배출가스의 온도가 낮아져 작은 용량의 EGR cooler를 사용할 수 있다.

본 연구에서는 기존의 EURO-3 규제를 만족시키는 대상 엔진을 이용하여, LPL EGR 시스템을 장착하였을 경우, EURO-5 규제를 만족 가능성을 타진해 보고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

Fig. 1은 LPL EGR시스템이 장착된 실험용 엔진을 보여주고 있다. A로 표시된 것이 엔진의 인터쿨러를, B로 표시된 것이 EGR Cooler를 나타내고 있다. C는 LPL EGR의 유량을 제어하는 밸브와 유량계를 나타낸 것이다. 본 실험에서는 400kW를 지원하는 AC 엔진동력계 AVL EC 모델이 사용되었고, 배출가스 분석을 위해 Horiba Mexa 7100 DEGR 배출가스 분석기가 사용되었다. DPF후단에서 나온 EGR가스는 압축기를 통과하기 전에 신기와 혼합되었다. 실험에 사용된 엔진은 두산 인프라코어 대형 디젤엔진으로 제원은 Table 1과 같다. 또한 엔진 사이클 해석을 위해 ESC 13 Mode(Table 2)를 사용했다. 주어진 운전조건에서 각각의 엔진 속도마다 25%, 50%, 75%, 100% 부하조건을 선정했다. 엔진 속도와 부하조건은 20초 안에 이루어지고 엔진 속도는 50rpm 오차범위 내에서, 토크는 2% 오차범위 내에서 유지되었다.⁷⁾ 또한 ESC-13 mode 외

에 임의로 두 가지 다른 운전조건을 추가 하였다.⁸⁾

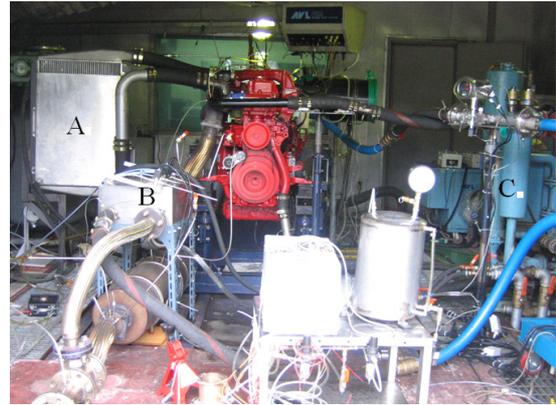


Fig. 1 Experimental engine setup
(A) intercooler (B) EGR cooler (C) EGR valve

Table 1 Specification of simulation model

Bore	108mm
Stroke	139mm
Displacement Volume	7640cc
Max. Power	320PS@2200rpm
Max. Torque	135kgf · m@1200rpm
Compression ratio	16.6
Number of cylinders	6
Firing order	1-5-3-6-2-4
Firing intervals	120°CA

3. 엔진 시뮬레이션

범용 프로그램인 WAVE를 사용하여 엔진 해석을 수행하였으며, 흡기 매니폴드의 각각의 치수, 곡률, 길이 등의 기하학적 데이터를 WAVE 데이터로 변환하기 위해 Wave Mesher가 사용되었다. 컴프레서와 터빈맵은 실제 엔진의 맵을 그대로 적용하였고, 커먼레일 압력, 인터쿨러 전후단의 온도 및 압력, 연료 분사량, 연료 분사 시기, 흡배기 밸브의 리프트(lift), 각 덕트의 직경 및 길이 굴곡 등 최대한 실제의 엔진을 모사하였다. 또한 현시점에서 개발단계에 있는 LPL EGR 적용 엔진의 시뮬레이션 결과를 실험으로 검증하는 것이 불가능하기 때문에, 먼저 기존 EURO-3 엔진을 해석하여 EURO-3 엔진의 실험데이터와 시뮬레이션 데이터를 비교한 후, LPL EGR을 적용하기 위해 EGR 파이프의 직경 및 길이를 결정하고 EGR 적용으로 인해 감소한 토크를 보상하기 위해 엔진 입력 변수를 조정하였다.

Table 2 Engine operating conditions

Mode NO.	Speed (rpm)	Torque (N·m)	Load (%)	Weighting Factor
1	1000	1264	100	0
2	2200	1019	100	0
3	599	37	0	0.15
4	1285	1327	100	0.08
5	1610	649	50	0.1
6	1610	970	75	0.1
7	1285	661	50	0.05
8	1285	995	75	0.05
9	1285	330	25	0.05
10	1610	1290	100	0.09
11	1610	324	25	0.1
12	1935	1155	100	0.08
13	1935	287	25	0.05
14	1935	860	75	0.05
15	1935	573	50	0.05

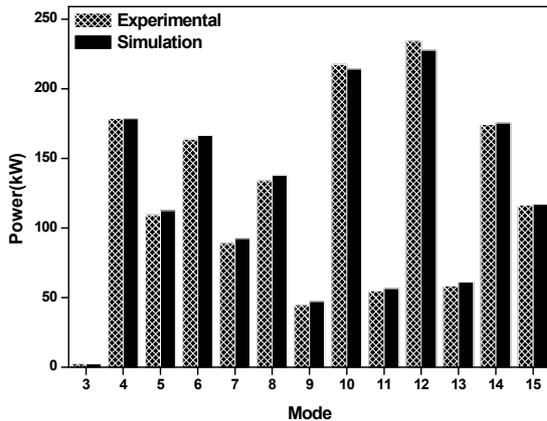


Fig. 2 Power comparison between simulation and experiment

4. 결 과

4.1 Base 엔진에 대한 성능 및 NOx 배출량 검증
 시뮬레이션 결과의 타당성을 고찰하기 위하여 해석결과를 base 엔진의 실험결과와 비교하였으며 Fig. 2에 결과를 나타내었다. 각 Mode 별로 ±5% 이내의 편차를 내에서 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 3은 NOx 생성율을 나타내었는데, 실제 실험과 시뮬레이션 결과는 역시 ±5%내의 편차를 보인다. NOx 예측에는 Zeldovich 모델이 사용되었다.

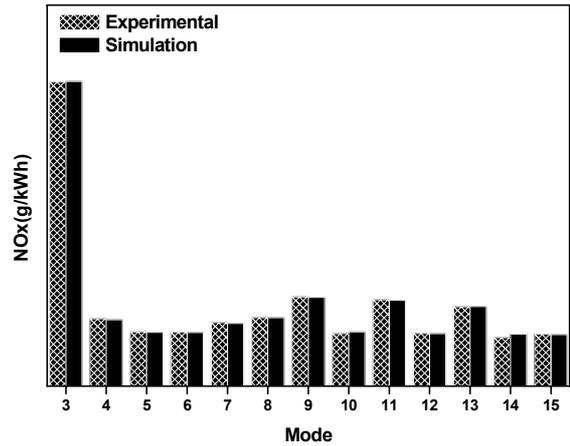


Fig. 3 NOx Comparison between Simulation and Experiment

4.2 최대 EGR율을 위한 EGR 파이프 직경 결정
 EGR을 적용하기에 앞서 EGR 파이프의 직경 및 길이를 해석적인 방법으로 선정하였다. EGR 파이프의 길이는 엔진 자체의 기하학적 형상에 의해 약 300 mm로 결정되었다. EGR 파이프의 직경의 경우에 직경에 따라 EGR율이 크게 변하므로 EGR 파이프 직경의 산출이 선행되어야 한다.

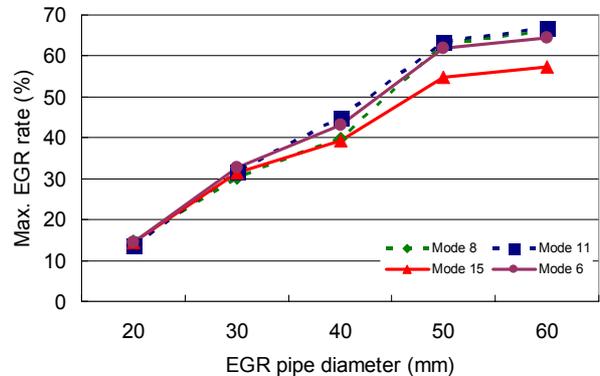


Fig. 4 Max EGR rate vs. EGR pipe diameter

설계 시 최대 EGR율 목표 30%를 달성하기 위해, 기존 흡기 파이프의 직경을 고려하여 EGR 파이프의 직경을 20~60mm 까지 10mm 단위로 변경하여 해석하였다. Fig. 5에서 확인할 수 있듯이 최대 EGR율 30%를 만족시킬 수 있는 EGR 파이프의 직경은 약 30mm 임을 확인할 수 있었으며 이때 최대 EGR율은 32.3%였다. 이후 해석에서 EGR 파이프 직경은 30mm로 고정하였다.

4.3 EGR 시뮬레이션 결과와 실험결과 비교 검증
 Fig. 5~7은 ESC 13 mode중 대표적인 중속도 영

역 1,610rpm에서 Cooled EGR이 적용된 실험결과와 시뮬레이션 결과를 비교하고 있다. 실험 데이터와 시뮬레이션 결과는 25%이상의 부하조건에서 90% 이상의 deNO_x 효율을 보여주고 있고, 35%이상의 EGR율에서도 토크의 감소는 크지 않다.

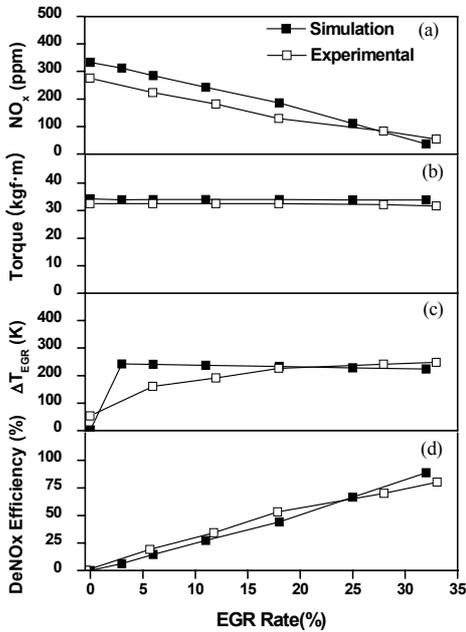


Fig. 5 (a) NO_x (ppm), (b) Torque (kgfm), (c) Difference of EGR Outlet and Inlet Temperature (d) deNO_x Efficiency (%) at 1,610rpm, 25% load condition

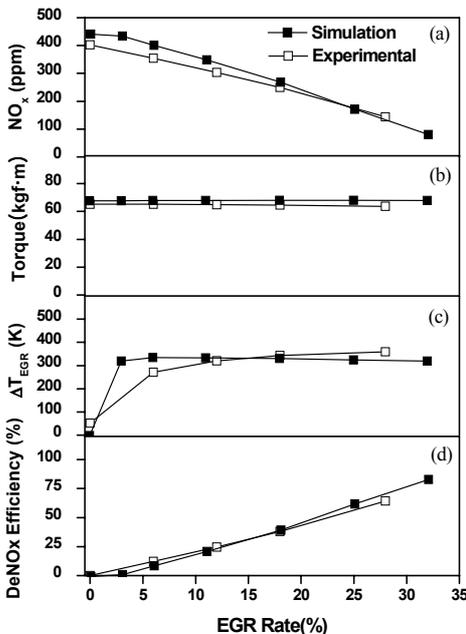


Fig. 6 (a) NO_x (ppm), (b) Torque (kgfm), (c) Difference of EGR Outlet and Inlet Temperature (d) deNO_x Efficiency (%) at 1,610rpm, 50% load condition

Fig. 6을 살펴보면 50% 엔진부하, EGR을 20%에서 deNO_x 효율을 90%까지 보여주고 있는데 이는 EGR가스의 충분한 산소가 아직까지 엔진 토크를 유지하는데 매우 효과적이기 때문이다. Fig. 7의 75% 엔진부하 조건에서는 토크의 감소로 인해 최대 5%의 EGR이 사용되었다.

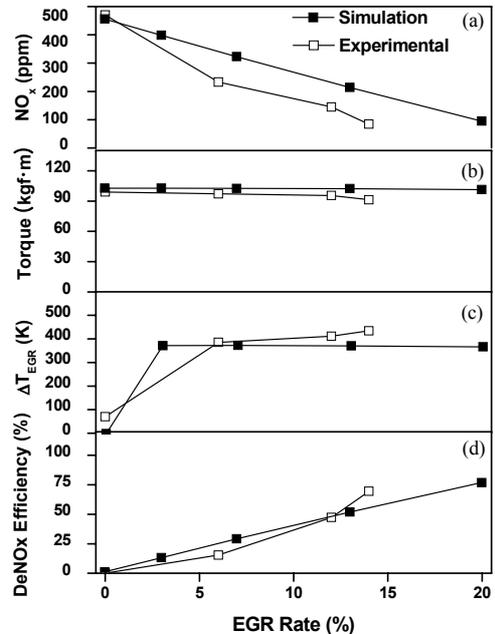


Fig. 7 (a) NO_x (ppm), (b) Torque (kgfm), (c) Difference of EGR Outlet and Inlet Temperature (d) deNO_x Efficiency (%) at 1,610rpm, 75% load condition

4.4 Torque 보상

EGR이 적용되지 않은 엔진에 EGR을 적용하였을 경우 토크의 감소를 가져오는데 실제 설계에 반영하기 위해서는 토크보상이 반드시 필요하다. 본 연구에서는 토크보상 방법으로 두산 이프라 코어에서 제안한 연료 분사시기의 진각 및 연료분사량 증가의 방법을 사용하였다.

4.4.1 25% 부하 조건

일반적인 경우, ESC 모드 전 운전영역의 저부하(25%) 운전조건에서는 중부하(50%) 조건에 비해 EGR에 의한 토크 변화율(2.7%감소)이 크지 않았기 때문에 최대 EGR율을 적용함에 있어 EGR 밸브를 전개도 하였다.

이 경우 EGR율은 저속(1,285rpm)에서 29.3%, 중속(1,610rpm)에서 27.1%, 고속(1,935rpm)에서 30.5%였다. 다만 고속의 경우 30.5% EGR 적용시

NOx 생성량이 오히려 증가한 운전 조건이 발생함으로써 EGR율을 25.1%로 하향 조정하였다. 연료 분사시기를 진각하여도 EGR의 영향에 의해 저속과 중속 모두 토크가 2% 감소하여 연료분사시기에 의한 영향이 크지 않은 것으로 판단하고 연료 분사량에 의해서만 토크를 보상하였다. 연료 분사량을 저속의 경우 2% 증가, 중속에서 4% 증가, 고속에서는 1% 감소시켜 토크를 보상하였고 저속에서 39%, 중속에서 37%, 고속에서 27%의 NOx 저감이 가능하였다.

4.4.2 50% 부하 조건

중부하(50%) 조건은 EGR에 의한 토크의 변화가 큰 영역으로 EGR 적용 시, 토크가 저속 중부하 영역에서 18% 감소하였다. EGR 적용으로 인한 토크 보상시 BSFC가 크게 증가할 것으로 예상되므로 중부하 이상의 운전 조건에서는 제작사와의 협의에 의하여 토크가 10% 감소될 때의 EGR율을 최대 EGR율로 정하였으며 EGR율은 저속에서 18.5%, 중속에서 22.2%, 고속에서 21.6%였다.

중부하 조건에서 10% 부족한 토크를 보상하기 위해 연료 분사량을 증가시키고, 이후 부족한 토크는 연료 분사시기로 보상하였다. 토크를 보상하기 위해 저속의 경우 연료 분사량을 15% 증가시키고, 이에 따라 연료 분사시기를 0.6° 진각시켜 토크를 보상하였고, 중속에서도 연료 분사량을 15% 증가하고, 연료 분사시기를 1.4° 진각하였으며, 고속에서는 연료 분사량을 14% 증가하고 연료 분사시기를 고정하여 토크를 보상하였다. 결과적으로 저속에서 31%, 중속과 고속에서 각 27%의 NOx를 저감하였다.

4.4.3 75% 부하 조건

고속 고부하(1,935rpm, 75%엔진부하) 조건에서 토크 감소가 가장 컸으며 약 43% 감소되었다. 따라서 중부하 조건에서와 마찬가지로 제작사와의 협의에 의하여, 적용 EGR율은 토크가 10% 감소되는 지점을 최대 EGR율로 고정하였으며 이 때 EGR율은 저속에서 9.6%, 중속에서 8.4%, 고속에서 11.8%였다.

고속에서는 중속에 비해 체적효율이 크기 때문에 토크 보상을 위한 연료 분사량 증가를 중속에서 보다 작게 하여도 토크보상이 충분히 가능하였다. 고부하 조건에서 저속의 경우, 연료 분사량을 11% 증가시키고, 연료 분사시기를 5.2° 진각시켜 토크를

보상할 수 있었다. 중속의 조건에서도 연료 분사량은 11% 증가한 상태에서 연료 분사시기를 1.1° 진각하였고, 고속의 경우 역시 연료 분사량을 11% 증가시켰고, 연료 분사시기는 7.2° 진각하여 토크를 보상하였다. 결과적으로 NOx의 경우 EGR을 적용하지 않았을 경우보다 저속에서 38%, 중속에서 47%, 고속에서 44% 저감되었다.

4.4.4 100% 부하 및 공회전(idle) 조건

100% 부하 운전조건인 경우 EGR밸브를 완전히 열었을 때, 1,285rpm과 1,610rpm 조건에서 토크가 60% 감소하고, 1,935rpm에서 67% 감소하여 EGR을 적용하지 않았다. 또한 공회전 조건에서도 EGR을 적용하지 않았다.

4.5 EURO-5 규제 대응 가능성

실험 엔진의 NOx 배출량과 EURO 배기규제 내용을 Fig. 8에 나타내었다. 이 연구에서 사용된 EURO-3 대응 엔진은 EGR System이 적용되지 않은 상태이나 Cooled EGR을 장착하여 최적화할 경우, EURO-5 규제를 만족시킬 수 있을 것으로 판단된다. 단 EGR 적용시 가장 큰 문제점인 연비악화(fuel penalty)가 본 연구의 경우도 약 6% 증가하므로 이를 신중히 고려해야 할 것으로 보인다. 또한 EGR System을 설계함에 있어서 시뮬레이션 방법은 배출가스 배출 정도를 예상할 수 있는 유용한 방법이 될 수 있다는 점 역시 확인하였다.

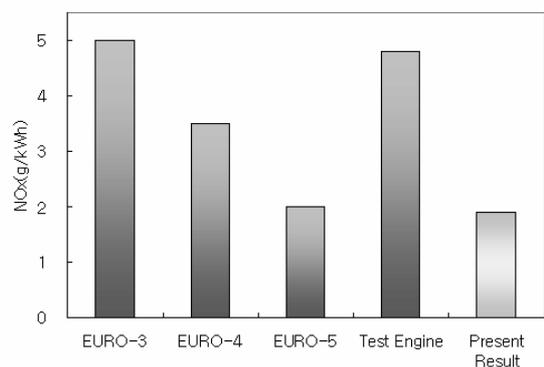


Fig. 8 Possibility of current engine for EURO-5

5. 결 론

EURO-3 규제를 만족시키는 대상 엔진을 이용하여, LPL EGR 시스템을 장착하여 EURO-5 규제를 만족 가능성을 타진해 보았으며 다음과 같은 결론

을 얻을 수 있었다.

1) NO_x 저감을 위한 주된 방법으로 Cooled EGR 을 사용하였으며 시뮬레이션 결과는 실험결과와 5% 미만의 차이로 만족스러웠다.

2) Cooled EGR의 경우 대상 엔진의 운전조건에 상관없이 높은 EGR율을 적용 할 수 있었다. NO_x 생성율은 운전조건에 따라 변하였지만, NO_x 저감율의 경우 EGR 적용된 운전영역에서 27~47% 임을 확인 할 수 있었다.

3) 시뮬레이션을 통해 Cooled EGR이 적용 가능한 영역을 확인하였고 WAVE를 이용하여 현재 EURO-3 규제를 만족하는 대상엔진에 LPL EGR 시스템과 DPF를 적용할 경우 EURO-5 규제 대응이 가능함을 확인하였다.

Steady State NO_x Levels from an Automotive Diesel Engine Using Optimized VGT/EGR Schedules" SAE Paper 1999010835.

7. K. S. Chen and O. Yanakiev, 2005, "Transient NO_x Emission Reduction Using Exhaust Oxygen Concentration Based Control for a Diesel Engine", SAE Paper 2005010372.

8. J. D. Kapparas, I. Brahma, A. Strzelec, J. C. Rutland, D. E. Foster and Y. He, 2005, "Integration of Diesel Engine, Exhaust System, Engine Emissions and Aftertreatment Device Models", SAE Paper 2005010947.

참고 문헌

1. L. Valaszka, and B. Jouannet, 2000, "Cooling System Optimization for Euro4 - EPA/02 Heavy Duty Trucks", SAE Paper 200001964.
2. Y. Bravo, L. J. Lazaro and L. J. Garcia-Bernad, 2005, "Study of Fouling Phenomena on EGR Coolers due to Soot Deposits Development of a Representative Test Method", SAE Paper 200511143.
3. Y. Kitamura, A. Mohammadi, T. Ishiyama and M. Shioji, 2005, "Fundamental Investigation of NO_x Formation in Diesel Combustion Under Supercharged and EGR Conditions", SAE Paper 2005010364.
4. A. Pfeifer, M. Smeets, H. Herrmann, D. Tomazic, F. Richert and A. Schlober, 2002, "A New Approach to Boost Pressure and EGR Rate Control Development for HD Truck Engines with VGT", SAE Paper 2002010964.
5. F. Charles, D. Ewing, J. Zcard, J. Chang and S. J. Cotton, 2005, "Optimization of the Exhaust Mass Flow Rate and Coolant Temperature for Exhaust Gas Recirculation Cooling Devices Used in Diesel Engines", SAE Paper 2005010654.
6. G. J. Hawley, J. F. Wallace, A. Cox, W. R. Horrocks and L. G. Bird, 1999, "Reduction of