Cooled EGR 시스템의 EGR률과 연료분사시기가 소형 디젤엔진의 배기 배출물 특성에 미치는 영향에 관한 연구

공 호 정¹⁾ · 황 인 구¹⁾ · 고 아 현¹⁾ · 명 차 리²⁾ · 박 심 수^{*2)} · 임 창 식³⁾

고려대학교 대학원 기계공학부¹⁾ · 고려대학교 기계공학부²⁾ · 캠펙 기술연구소³⁾

Effect of EGR Rate and Injection Timing on the Characteristics of Exhaust Emissions in Light-duty Diesel Engine

Hojeong Gong¹⁾ · In Goo Hwang¹⁾ · Ahyun Ko¹⁾ · Cha-Lee Myung²⁾ · Simsoo Park^{*2)} · Changsik Lim³⁾

¹⁾School of Mechanical Engineering, Graduate School of Korea University, Seoul 136-701, Korea

²⁾School of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

³⁾R&D Center, Kamtec Inc., 1143-1 Nowon-ri, Iwol-myeon, Jincheon-gun, Chungbuk 365-822, Korea

(Received 16 June 2010 / Revised 30 August 2011 / Accepted 6 October 2011)

Abstract : Cooled EGR system is widely used to reduce NOx emissions in diesel engine. But when EGR rate was increased, combustion stability was worsened and PM level was increased. So determining optimized control point of EGR rate is important. In order to determine this point, it is important to figure out the effect of EGR system on the exhaust emissions. In this research, NOx and PM emissions were analyzed with various coolant temperature supplied to the EGR cooler at several positions such as downstream of turbocharger, upstream and downstream of DPF. Effects of some variables such as EGR rate, hot / cooled EGR and change of injection timing were estimated. And CO₂ emissions were measured at exhaust and intake manifold to calculate EGR rate at each engine operating condition. Also combustion analysis was performed in each engine operating conditions. In the result of this study, there was trade-off between NOx emissions and PM emissions. When EGR rate was increased, combustion pressure was decreased and COV of IMEP was increased.

Key words : NOx(질소산화물), EGR(배기재순환), PM(입자상물질), Injection timing(연료분사시기)

1. 서 론

2005년 발효된 교토의정서에 따라 지구온난화에 대한 수송 분야의 CO₂ 규제가 강화되면서 유럽을 중심으로 디젤엔진이 중요한 대안으로 떠오르고 있다. 디젤엔진은 가솔린엔진에 비해 CO₂ 배출량이 적고 연비와 토크 측면에서 장점이 있기 때문에 가솔린엔진의 영역이었던 승용차에도 널리 쓰이게 되었다. 하지만, 디젤엔진의 배기 배출물은 기존의 삼원촉매로는 저감시키기가 어렵다. NOx를 저감하는

방법은 크게 EGR(Exhaust Gas Recirculation), LNT(Lean NOx Trap), SCR(Selective Catalytic Reduction) 등이 고려되고 있으나, 승용 디젤 엔진에서는 EGR 시스템이 널리 쓰인다.¹⁻⁴⁾ EGR 시스템은 배기중의 일부를 흡기로 재순환시켜 연소 최고 온도와 산소 농도를 낮추어 NOx의 발생을 저감시키는 방법이다. 그러나 EGR 시스템 적용시 NOx의 배출량과 PM(Particulate Matters)의 배출량 사이에는 서로 상반되는 관계가 성립한다.^{5,9,10)} 입자상 물질은 대기의 스모그 현상 및 인체의 호흡기 질환에 악영향을 끼치는 것으로 알려져 있으며, 특히 나노미터 크기의 입

*Corresponding author, E-mail: spark@korea.ac.kr

자상 물질은 입자가 큰 물질에 비하여 호흡기의 점막에 의하여 걸러지지 않고 최종 폐포까지 침투하여 인체에 더욱 치명적인 것으로 알려져 있다.^{6,7)} 그러므로 EGR률을 결정하는 여러 가지 변수들의 적절한 제어가 중요하며, 이를 위해서는 제어변수들의 변경에 따른 배기의 배출 특성을 파악하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 EGR률 변경과 연료분사시기 변경이 엔진의 배기 배출물 특성에 미치는 영향에 대하여 파악하고 분석한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 엔진과 EGR 쿨러를 나타낸 것이며, 엔진의 상세 제원을 Table 1에 나타내었다. 터보차저 후단과 DOC(Diesel Oxidation Catalyst) 전단, CPF(Catalysed Particulate Filter) 후단에서 k-type 열전대를 사용하여 배출가스 온도를 측정하였다. DMS500을 사용하여 PM 배출 수준을 측정하였으며^{8,11)}, Horiba社의 MEXA-7100D EGR 분석기와 NGK社의 NOx 센서와 ECM社의 NOx CAN module과 5210 디스플레이를 사용하여 엔진에서 배출되는 NOx와 CO₂ 배출 수준을 측정하였다. 각 시험 장비들을 Fig. 2에 나타내었다. 압전형 압력센서를 예열 플러그 위치에 장착하여 실린더 내 연소압을 측정

Fig. 1 Test engine and EGR cooler

Fig. 2 NOx sensor unit and MEXA-7100D EGR analyzer

Table 1 Specifications of test engine

Item	Specification
Engine type	In-Line 4, VGT
Bore (mm) × Stroke (mm)	77.2 × 84.5
Compression ratio	17.3 : 1
Displacement (cc)	1,582
Emission regulation	Euro 4

하였으며 별도의 연소해석기를 통하여 각각 변수의 변경에 따른 영향을 분석하였다.

2.2 실험 방법

Table 3은 본 연구에서 수행한 엔진 운전조건을 나타낸다. 총 10개의 엔진 운전조건에서 시험이 수행되었으며 배출가스 및 연비 시험 시 대표성을 갖는 주요 운전영역들을 포함한 것이다. 각각의 운전 조건에서 최대 EGR률을 파악하였고 그 후 EGR률을 변경시켜가며 그에 따른 배기 배출물 특성을 파악하였다. 그리고 연료의 분사시기 변경이 배출가

Table 2 Engine operating condition

No.	Engine speed (rpm) / BMEP (bar)
1	1,250 / 2.0
2	1,250 / 4.0
3	1,500 / 4.0
4	1,500 / 6.0
5	1,750 / 6.0
6	1,750 / 8.0
7	2,000 / 6.0
8	2,000 / 8.0
9	2,000 / 10.0
10	2,500 / 10.0

스 특성에 미치는 영향에 대하여 파악하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 EGR를 변경에 따른 배기 배출물 특성

Fig. 3은 엔진의 운전조건에 따른 배출가스 온도와 NOx 배출 수준을 나타낸 것이다. 엔진의 연소안정성을 크게 해치지 않는 범위 안에서 가능한 많은 EGR 가스를 신기로 유입시켰다. 엔진의 운전조건은 Table 2에 나타난 바와 같다. 엔진의 회전속도와 부하가 증가함에 따라 배출가스 온도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 연소최고온도의 영향을 받는 NOx 배출 수준 또한 증가함을 알 수 있다. 배출가스 온도는 약 280°C부터 520°C 까지 분포하며, NOx의 배출 수준은 거의 배출되지 않는 상태로부터 약 720 ppm 까지 분포한다.

Fig. 4는 최대 EGR률(약 35%)에서 배출가스 온도, 쿨러로 유입되는 가스 온도, 쿨러에서 냉각되어 신기로 유입되는 가스 온도, EGR률 그리고 쿨러의 효율을 나타낸 것이다. 쿨러로 유입되는 가스의 온도는 배출가스 온도와 매우 유사한 경향을 보이며, 쿨러를 거치면서 냉각된 가스의 온도는 100°C에서 150°C 정도로 유지된다. 쿨러의 효율은 모든 조건에서 80% 이상이다. 9번 운전조건(2000 rpm BMEP 10 bar)에서는 EGR 가스가 신기로 잘 유입되지 않음을 알 수 있다. 실험 시, EGR 밸브를 최대로 열었으나 EGR 가스가 신기로 잘 유입되지 않았으며 이는 쿨러 하우징의 영향으로 판단된다. 쿨러 내부의 유동 흐름 해석을 통한 형상 최적화가 이루어지면 이러한 현상을 개선할 수 있을 것이라 판단된다.

Fig. 5는 각 운전조건에서 EGR률이 증가함에 따른 NOx 배출 수준의 변화를 나타낸 것이다. EGR률이 0%~35%로 증가할 때, NOx 배출 수준은 약 750 ppm에서 약 10 ppm으로 변화하는 것을 볼 수 있다. 이는 배출가스의 일부가 흡기로 재순환되어 실린더 내부로 유입되는 신기의 열용량을 늘리고 O₂의 농도를 감소시켜, 실린더 내부의 연소최고압력과 연소최고 온도를 낮추어 NOx의 발생량을 저감시킨다. 모든 운전영역에서 EGR률이 증가할수록 NOx의 배출 수준은 낮아졌으며, EGR이 유입되지 않았을 때의 NOx 배출 수준은 BMEP에 따라 비슷한 경향을 보인다.

Fig. 3 Exhaust gas temperature and NOx level with operating condition (EGR rate 35%)

Fig. 4 Exhaust temperature, EGR rate, cooler in & out gas temperature and cooler efficiency (EGR rate 35%)

Fig. 5 NOx level with EGR rate

Fig. 6 Total PM level with EGR rate

Fig. 7 COV of IMEP with EGR rate

Fig. 6은 모든 영역에서 EGR률에 따른 총 PM 개수를 나타낸 것이다. EGR률이 증가함에 따라 배출되는 PM의 수가 증가한다. $1.0E+8 \text{ \#/cm}^3$ 정도의 PM이 발생하였으며 EGR률이 증가함에 따라 입자 개수도 증가함을 알 수 있다. EGR 가스가 신기로 유입됨에 따라 연소안정성이 나빠지며, 떨어지는 출력을 보상하기 위하여 연료 분사량이 증가한다. PM은 기본적으로 미연 탄화수소가 그 발생 원인이 되기 때문에 이러한 연료 분사량의 증가와 연소 안정성의 저하는 PM 증가의 원인이 된다고 판단된다. Fig. 7에 연소 해석을 통하여 측정되어진 IMEP값의 COV (Coefficient of variation)의 값을 나타내었다.

Fig. 8은 3번 운전조건에서 배기 배출물의 입자 크기 분포를 나타낸 것이다. 총 PM개수와 마찬가지로 EGR률이 증가함에 따라 배출 수준이 증가함을 알 수 있다.

Fig. 9는 1번 운전조건에서 EGR률 변경에 따른 연소압 곡선을 나타낸 것이다. EGR률이 증가함에 따라 최대 연소압력이 감소하고, 연소압 증가 시점이 늦어지는 것을 볼 수 있다. 이는 연료의 분사시기가 지각됨에 따른 것으로 판단된다. 연소 최고 압력

Fig. 8 PM size distribution with EGR rate (1500 rpm BMEP 4 bar)

Fig. 9 Combustion pressure with EGR rate (1250 rpm BMEP 2 bar)

이 낮아지게 되면 연소 최고온도가 낮아지며, 연소 최고온도의 영향을 받는 NOx가 줄어들게 됨을 알 수 있다. 20%, 25%의 경우를 제외한 나머지 조건에서는 연소압 곡선의 형태가 서로 유사하게 나타났으나 EGR률이 높은 두 조건에서는 pre injection timing과 main injection timing의 구분이 모호해지는 현상이 나타났다. Fig. 7에서 나타나듯이 두 조건에서의 연소안정성이 과도하게 저하된 것(20% : 3.5, 25% : 50)이 그 이유로 판단된다.

3.2 연료분사시기 변경에 따른 배기 배출물 특성

연료의 분사시기 변경에 따른 배기 배출물 특성을 파악하기 위한 실험이 수행되었다. 엔진의 공기량은 엔진 ECU에서 요구하는 목표 공기량에 부합

Fig. 10 NOx level with injection timing

Fig. 11 PM size distribution with injection timing
(1750 rpm BMEP 6 bar)

하도록 조절하였다. 분사시기를 BTDC 5 °CA, TDC, ATDC 5 °CA로 변경하였으며, 그 외의 변수들은 모두 동일한 상태를 유지하였다.

Fig. 10은 연료 분사시기 변경에 따른 NOx 배출 수준을 나타낸 것이다. 분사시기를 지각시키면 연소 후반부에 타는 연료량이 많아져 배출가스의 온도가 상승하게 된다. 하지만 ATDC 5 °CA에서 연료가 분사되는 경우 팽창과정 중에 연소가 시작되게 되므로, 압축행정 말기에 연소가 시작되는 BTDC 5 °CA일 때보다 연소최고압력과 최고온도는 낮아지게 된다. 이는 NOx 배출 수준의 저감으로 이어진다고 판단된다.

한편, 연료분사시기가 지각될수록 PM의 발생량은 전체적으로 증가함을 Fig. 11에서 볼 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 연료분사시기가 지각될수록 10 nm ~ 50 nm 크기의 핵화 모드 입자들의 배출 수준은 증가하나 100 nm 이상의 축적 모드 입자들의

Fig. 12 Combustion pressure with injection timing
(1500 rpm BMEP 4 bar)

배출 수준은 다소 줄어드는 것을 알 수 있다.

Fig. 12는 연료 분사시기 변경에 따른 연소압을 비교한 것이다. 연소시기를 변경시킴에 따라 상당히 큰 변화를 보인다. Pre injection timing의 분사시기는 변경하지 않았으므로, 그 형태가 거의 유사하다. BTDC 5 °CA의 경우에는 pre injection이 있는 후 곧바로 main injection이 이루어지기 때문에 연소압의 손실이 거의 없이 연소가 이어지고 따라서 최대 연소압이 높게 나타난다. 하지만 main injection timing을 TDC로 변경하면, pre injection timing과 어느 정도의 시간차가 발생하게 되고, 착화 지연의 증가로 인하여 연소압이 떨어졌다가 다시 증가하는 형태를 보인다. 분사시기를 ATDC 5 °CA로 변경하면 이러한 현상이 더욱 분명하게 드러난다. Pre injection timing과 main injection timing의 사이가 너무 넓어 pre injection으로 증가했던 연소압이 상당부분 감소하고 난 후에 main injection이 이루어진다. 이는 엔진 출력의 감소를 가져오며, 동일한 엔진출력에서 구동하기 위하여 연료량을 증가시키게 된다. 또한 main injection 된 연료가 연소할 충분한 시간이 제공되지 않을 수 있으며, 연료량 자체도 증가하므로 THC와 PM의 증가로 이어진다. 반면에 연소최고압력이 줄어들고 그에 따라 연소최고온도 또한 낮아지기 때문에 NOx의 배출 수준은 감소하게 된다.

4. 결론

- 1) EGR률의 변화가 NOx와 PM의 배출특성에 미치는 영향에 대하여 파악하였다. EGR rate가 증가

할수록 NOx 배출 수준은 감소하였으나, PM의 배출 수준은 증가하여 둘 사이에 상반되는 관계가 있음을 확인하였다. EGR률이 증가함에 따라 실린더내의 연소가스가 증가하여, 신기의 열용량이 증가하고 O₂농도가 감소하여 NOx의 배출 수준이 감소하며, 연소안정성의 저하로 인하여 부분적으로 발생하는 소염으로 인해 입자의 배출이 증가하였다고 판단된다. 최대 연소압은 EGR률이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다.

- 2) 연료분사시기가 지각됨에 따라 NOx의 배출 수준은 감소하였고, PM의 배출 수준은 일반적으로 증가하였다. 연소최고압력은 분사시기의 지각에 따라 감소하는 경향을 보인다. 분사시기 변경시 main injection timing만 변경하였으므로 pre injection에 의한 연소압 상승 부분은 같게 나타나지만, main injection timing과 pre injection timing 사이의 시간간격이 증가하고 착화지연의 증가에 의한 영향으로 연소압이 떨어졌다가 다시 증가하는 형태를 보인다. 이는 엔진에서 배출되는 NOx의 수준이 줄어드는 이유라고 판단된다. 또한 분사시기의 지각은 엔진 출력의 감소를 가져오며, 동일한 엔진출력에서 구동하기 위하여 연료량을 증가시키게 된다.

References

- 1) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, Mc-Graw Hill, New York, 1988.
- 2) B. D. Hsu, Practical Diesel-engine Combustion Analysis, SAE, 2002.
- 3) F. Yang and O. Minggao, "Experimental Research on EGR in a Diesel Engine Equipped with Common Rail Injection System," SAE 2003-01-0351, 2003.
- 4) J. Zhu and K. Lee, "Effect of Exhaust Gas Recirculation on Particulate Morphology for a Light-duty Diesel Engine," SAE 2005-01-0195, 2005.
- 5) Y. Han, Y. Oh and S. Oh, "An Experimental Study on Performance and Exhaust Gas in a Heavy-duty Diesel Engine with Cooled-EGR," Transactions of KSAE, Vol.9, No.5, pp.1-8, 2001.
- 6) N. H. Choi, G. S. Kim, B. J. Jang and G. A. Kim, Defining the Mechanism of Pulmonary Diseases Induced by Air-borne Particulate Matters and Development of Treatment Methods, KOSEF Report, 2005.
- 7) H. Gong, I. G. Hwang, S. Park, Y. Jang and C. Lim, "Experimental Investigation on Exhaust Characteristics of NOx and PM according to Coolant Temperature Variation of EGR System," Spring Conference Proceedings, KSAE, KSAE 10B-0078, 2010.
- 8) A. Ko, H. Lee, K. Hong, K. Min and S. Park, "Particulate Matter Behaviors in the After-treatment System of Diesel Engine Using Fast PM Analyzer," Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.19-24, 2009.
- 9) H. Choi and K. Min, "The Down-sizing for the Better Fuel Efficiency of HSDI Diesel Engines," Auto Journal, KSAE, Vol.30, No.6, pp.28-33, 2008.
- 10) C. Bae, "The Effect of EGR on the Combustion in a High Speed Direct-injection Diesel Engine," Proceedings of UK-Korea Joint Seminar on Internal Combustion Engines, KSAE, pp.173-194, 1998.
- 11) Y. S. Cho, S. W. Lee, J. S. Lee, Y. B. Yoon and Y. J. Park, "An Experimental Study on Regeneration Characteristics by Variation of Exhaust Gas Temperature, HC and O₂ Concentrations on DOC-CDPF System," Transactions of KSAE, Vol.17, No.1, pp.43-49, 2009.