

디젤 저온연소 운전 영역에서 흡기압이 엔진 성능에 주는 영향

이 선 업^{*1)} · 장 재 훈¹⁾ · 이 용 규¹⁾ · 오 승 목¹⁾ · 김 용 래¹⁾ · 김 득 상²⁾

한국기계연구원 그린동력연구실¹⁾ · (주)두산 인프라코어 신연소기술팀²⁾

Effect of Intake Pressure on Emissions and Performance in Low Temperature Combustion Operation of a Diesel Engine

Sunyoup Lee^{*1)} · Jae Hoon Chang¹⁾ · Yonggyu Lee¹⁾ · Seungmook Oh¹⁾ · Yongrae Kim¹⁾ · Duksang Kim²⁾

¹⁾Engine Research Team, Korea Institute of Machinery and Materials, 104 Shinsung-ro, Yuseong-gu, Daejeon 306-343, Korea

²⁾Advanced Combustion & Engine Technology Team, Doosan Infracore Inc., 39-3 Sungbok-dong, Suji-gu, Yongin-si, Gyeonggi 448-795, Korea

(Received 4 March 2011 / Revised 13 May 2011 / Accepted 24 June 2011)

Abstract : One of the effective ways to reduce both NO_x and PM at the same time in a diesel CI engine is to operate the engine in low temperature combustion (LTC) regimes. In general, two strategies are used to realize the LTC operation-dilution controlled LTC and late injection LTC - and in this study, the former approach was used. In the dilution controlled regime, LTC is achieved by supplying a large amount of EGR to the cylinder. The significant EGR gas increases the heat capacity of in-cylinder charge mixture while decreasing oxygen concentration of the charge, activating low temperature oxidation reaction and lowering PM and NO_x emissions. However, use of high EGR levels also deteriorates combustion efficiency and engine power output. Therefore, it is widely considered to use increased intake pressure as a way to resolve this issue.

In this study, the effects of intake pressure variations on performance and emission characteristics of a single cylinder diesel engine operated in LTC regimes were examined. LTC operation was achieved in less than 8% O₂ concentration and thus a simultaneous reduction of both PM and NO_x emission was confirmed. As intake pressure increased, combustion efficiency was improved so that THC and CO emissions were decreased. A shift of the peak Soot location was also observed to lower O₂ concentration while NO_x levels were kept nearly zero. In addition, an elevation of intake pressure enhanced engine power output as well as indicated thermal efficiency in LTC regimes. All these results suggested that LTC operation range can be extended and emissions can be further reduced by adjusting intake pressure.

Key words : LTC(Low Temperature Combustion, 저온연소), Intake pressure(흡기압력), PM(Particulate Matters, 입자상 물질), NO_x(Nitrogen Oxides, 질소산화물), EGR rate(배기 재순환율), O₂ concentration(산소 농도)

1. 서론

온실가스저감, 유해배출가스규제로 대표되는 환경/에너지 문제가 전 세계적인 화두가 되면서 내연기관 엔진기술은 괄목할 만한 기술적 성과를 거두고 있다. 특히, common rail 분사시스템과 배기후처

리시스템으로 대표되는 디젤엔진기술의 발전은 저공해/고연비를 동시에 달성할 수 있는 해법을 제공해 왔는데, 현재 주목받고 있는 디젤 저온연소기술(Low temperature combustion)의 경우 지금까지 디젤엔진에서 문제가 되고 있는 질소산화물(NO_x)과 입자상물질(PM)의 동시 저감이 가능하기 때문에 향후 후처리장치 부담 경감을 통한 비용 절감과 효율

*Corresponding author, E-mail: sunylee@kimm.re.kr

향상 등의 발전을 가져올 것으로 예측되고 있다.

일반적으로 디젤 저온연소를 구현하는 방법으로는 크게 dilution-controlled strategy과 late-injection strategy의 두 가지가 있는데, 첫 번째 방법은 대용량의 배기재순환(EGR)을 이용하여 흡기 내의 산소농도를 크게 낮춘 상태에서 연료의 조기분사를 통해 흡기/연료의 예혼합율을 향상시켜 연소온도를 낮추는 방식이며, 두 번째 방법은 상당량의 배기재순환을과 높은 스웰비 그리고 TDC 근처로의 분사시기 지연을 통해 점화지연 시간을 증가시킴으로써 공기/디젤연료의 예혼합율을 증가시켜 낮은 연소온도를 달성하는 것으로 Nissan에 의해 개발된 MK (Modulated Kinetics) 연소 방식을 그 근간으로 한다.¹⁾ 이렇게 활성화되는 1600 K 이하의 저온 산화영역은 NO_x와 Soot의 생성온도 이하이기 때문에 NO_x와 Soot이 동시에 저감되는 커다란 장점이 있다. 하지만 낮은 연소온도로 인해 CO와 THC 산화반응 속도 역시 감소, 불완전 연소로 인한 CO, THC의 배출이 증가할 뿐만 아니라 흡기 내 낮은 산소농도로 인해 출력이 감소하고 고부하 운전이 제한되는 등의 단점도 존재한다.

이러한 저온연소 운전의 단점--그중에서도 특히 출력 감소 및 운전영역 제한--을 해결하기 위한 방안의 하나로 이번 연구에서는 흡기 과급(Turbocharging)을 적용한 저온연소기법에 관해 검토하였다. 일반적으로 과급은 고출력과 고연비를 동시에 달성하게 해주기 때문에 일반 디젤엔진에서는 이미 널리 사용되고 있음에도 불구하고 이를 저온연소엔진에 적용하는 연구는 아직까지 많이 이루어지지 않았는데, Tanin et al.은 대형 디젤엔진에서 일정한 부하, 동일한 NO_x 배출 조건에서 흡기압의 상승은 Soot emission의 발생량을 감소시키는 것으로 보고 하였으며,²⁾ Noehre et al.은 높은 산소농도 조건에서의 과급(1~2.5 bar)은 Soot의 생성을 억제시키는 반면에 낮은 산소농도 조건에서는 Soot의 발생이 증가함을 보였다.³⁾ Colban et al.은 중형 디젤 단기통 엔진에서 흡기압력을 1, 1.5, 2 bar로 변화시켜 가며 UHC와 CO, 그리고 엔진 효율을 측정하였는데 흡기압력이 증가하는 경우 UHC와 CO emissions가 감소하는 원인을 제시하였으며 과급압 증가에 따른 연소효율의 증가 및 그로 인한 연비향상 가능성을 보여주었다.⁴⁾

이처럼 기존의 연구는 대형엔진에 대해서는 최대 2.5 bar, 중형엔진에 대해서는 최대 2.0 bar 이하의 흡기압 상승 조건에 대해 배기성능 변화 위주로 이루어져왔다. 따라서 이번 연구에서는 대형(mid-size) 디젤 단기통엔진을 이용해 dilution controlled regime에서의 저온연소 운전 시 흡기 과급이 엔진 성능 및 배기성능에 미치는 영향을 살펴보았다. 특히 과급 저온연소 운전에서 일반 디젤연소 운전과 같은 수준의 출력을 얻기 위해 요구되는 흡기압력 수준을 도출하였고 흡기압력 변화(1, 2, 3 bar)에 따른 Soot, THC, CO 등의 배기배출물의 거동 및 엔진 효율 변화 등에 대해 조사하였다.

2. 실험 장치

이번 연구에 사용된 단기통 디젤 엔진은 국내 업체에서 개발한 대형 디젤엔진을 단기통으로 개조한 것으로 이를 위해 피스톤 deactivation, 플라이휠, 흡배기 매니폴드 수정, 냉각수 유로 개선 등을 수행하였으며 이렇게 개조된 단기통 엔진의 제원은 Table 1과 같다.

Fig. 1은 저온연소를 구현하고 그 배기 및 출력특성을 파악하기 위해 사용한 시험 및 평가 장비의 대략적인 구성도이다. 연료 분사 장치는 common rail 분사방식을 사용하였는데, 더 향상된 반응속도 및 제어정밀성을 확보하기 위해 rail 입구의 유량을 제어하는 베이스 엔진의 연료분사시스템을 활용하는 대신 rail 출구 측에서 PCV 밸브의 개도를 조절, 리턴되는 연료량을 제어하여 rail 압을 조절하는 연료분사시스템을 개발, 대체하여 사용하였다.

연료분사 제어시스템의 경우 연료의 분사시기와 분사시간을 제어하기 위해 Engine Timing Unit (ETU 427, AVL)과 Injection driver (ZB-5000, Zenobalti Co.)를 사용하였으며 연료 레일압 제어를 위해 ZB-1100

Table 1 Single cylinder engine specifications

Items	Values
Displacement Vol. (cc)	1000
Bore × Stroke (mm)	100 × 125
Compression ratio	17.4
Tested engine speed (rpm)	1400
Fuel injection pressure (bar)	1600

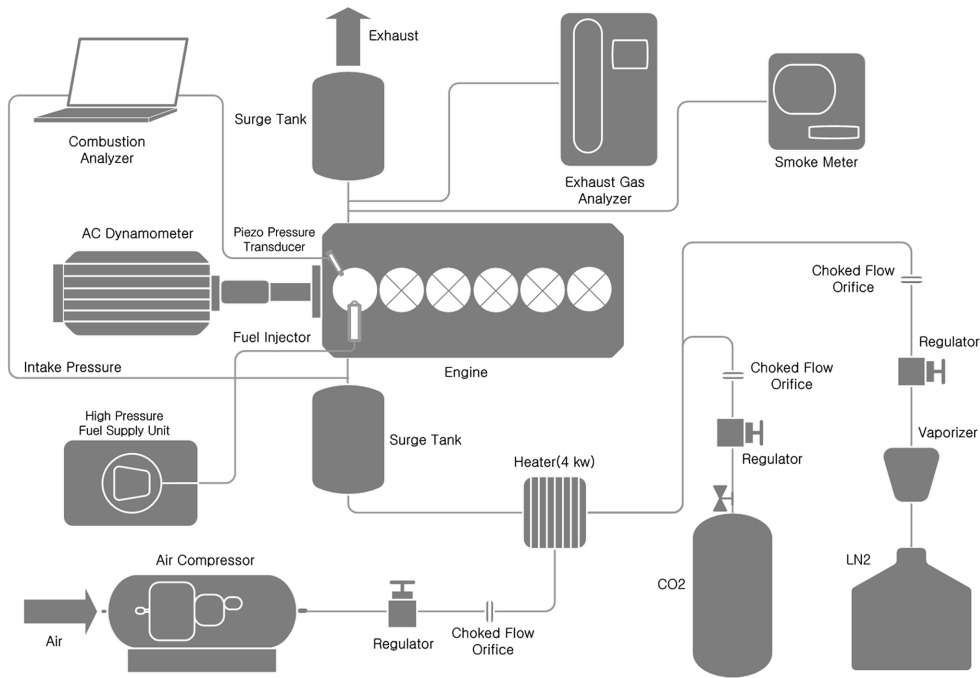


Fig. 1 Schematic of experimental setup

Common rail PCV driver (Zenobalti)를 이용하였다.

과급압력의 정확한 측정을 통한 EGR의 정밀 제어를 위해 흡기 매니폴드에 압력센서를 설치하였고 배기 매니폴드에는 배기가스 샘플링을 위한 Sampling Probe를 장착하여 이를 배기가스 분석기 (MEXA 8000, HORIBA) 및 광투과식의 Opacimeter (4390G004, AVL)에 연결, 엔진 배기 배출물을 분석하였으며 연소 후 배출되는 배기가스의 온도를 측정하기 위한 열전대를 설치하였다. 또, 흡배기관 내에 발생하는 맥동이 엔진에 주는 영향을 최소화하기 위해 흡기 매니폴드 전단 및 배기 매니폴드 후단에 surge tank를 설치하였고, 연료 container 내에 히터를 설치하여 공급되는 연료의 온도를 40°C로 유지, 연료로부터의 영향을 최소화하였다.

엔진에 공급되는 EGR 량 및 흡기압과 흡기온도를 정확하게 제어하기 위해 Simulated EGR gas 공급 장치를 설계, 제작하였는데 이 장치는 Choked flow 원리를 이용하는 Orifice flowmeter로 엔진 운전 상태와 관계없이 원하는 유량을 정밀하게 보낼 수 있는 장점이 있다.⁵⁾

이번 연구에서 사용한 단기통 엔진은 엔진회전수

1400 rpm, 연료분사압 1600 bar에서 두 가지 부하조건에 대해 산소농도, 흡기 과급압력 등을 변화시키면서 운전하였으며 보다 자세한 실험 조건은 Table 2와 같다. 참고로 Table 2의 각각의 실험 조건에 대해 연료분사시기를 변경하며 연료분사량에 대한 MBT timing에서의 분사시기를 찾았으며 배기특성, 효율, 연소안정성 등에 대한 검토를 진행하였다.

3. 실험 결과

Fig. 2는 각 연료분사량 및 흡기압력 조건에서 연소실 내 산소농도 변화에 대한 MBT timing에서의 분사시기(SOI) 변화를 나타낸 것이다.

먼저 그림에서 볼 수 있는 것처럼 흡기압력 3 bar 운전에서는 $m_f = 0.42 \text{ g/sec}$ 조건 시 산소농도 17%, $m_f = 0.58 \text{ g/sec}$ 조건 시 산소농도 15% 이상에서는

Table 2 Test conditions

Parameters	Value
Injection quantity (g/sec)	0.42 & 0.58
Boost (bar)	1.0, 2.0, 3.0
O ₂ Concentration (%)	7 - 19

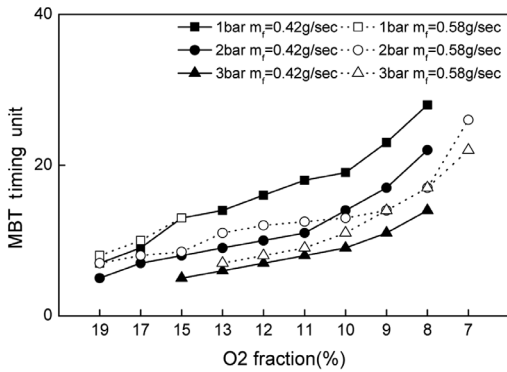


Fig. 2 MBT timing given as SOI for the O₂ concentration sweeps

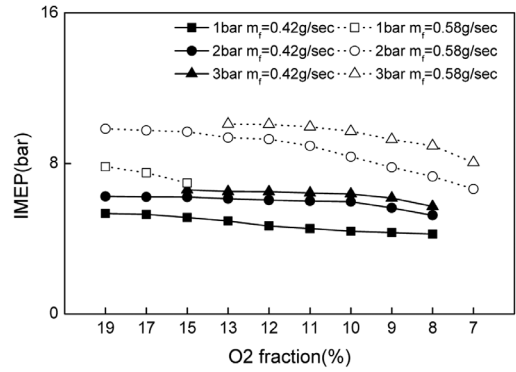


Fig. 4 IMEP variation at MBT timing for the O₂ concentration sweeps

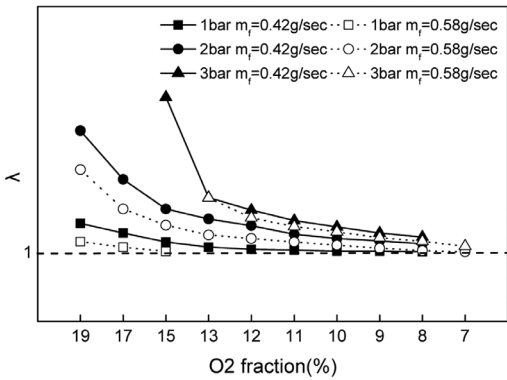


Fig. 3 Air excess ratio (λ) variation at MBT timing for the O₂ concentration sweeps

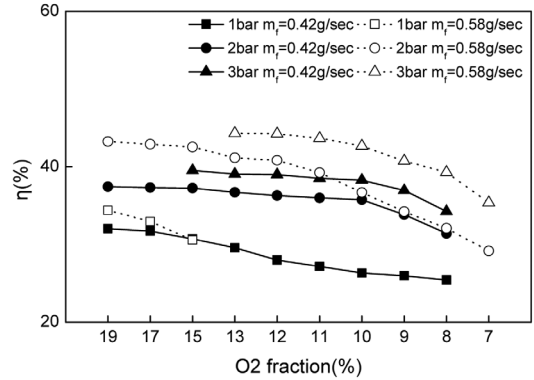


Fig. 5 Indicated thermal efficiency variation at MBT timing for the O₂ concentration sweeps

연소 최고 압력이 허용치 이상으로 올라가기 때문에 실험의 안정성을 고려, 실험을 진행하지 않았으며 흡기압 1 bar 운전의 경우 $m_f = 0.58$ g/sec 조건에서 산소농도 13% 이하가 되면 이론공연비보다 농후한 연소가 일어나기 때문에 이번 연구에서는 실험 대상에서 제외하였다. Fig. 2는 또한 동일 부하조건에서 산소농도가 감소할수록 더 긴 점화지연이 발생하고 그 결과 MBT를 위한 분사시기는 진각함을 보여주며, 흡기 과급이 증가할수록 연소실 내 가스의 밀도가 증가함으로 인해 연료/흡기의 혼합 특성이 향상되고⁶⁾ 동일 산소농도 하에서도 연소에 참여할 수 있는 산소분자 수가 더 많아지기 때문에 상대적으로 점화지연 기간이 짧아짐을 볼 수 있다.

각 연료 분사량 및 흡기압력 조건에서 연소실 내 산소농도 변화에 대한 MBT timing에서의 공기과잉률 변화는 Fig. 3에서 볼 수 있다. 산소농도가 감소할

수록 공기과잉률은 이론공연비에 가까워짐을 볼 수 있으며 특히 연료량 $m_f = 0.58$ g/sec, 흡기압 1 bar 운전의 경우 산소농도 15%에서 이미 이론공연비에도 달하여 더 이상의 EGR 사용이 불가능함을 확인할 수 있었다.

Fig. 4는 각 과급압력 조건과 두 개의 부하조건에서 산소농도 변화에 따른 MBT timing에서의 IMEP 계산 결과이다. 그림에서는 먼저 각 부하조건 및 흡기압력 조건에서 산소농도가 감소하고 연소온도가 낮아질수록 연소효율이 저하되고 연소최고 압력이 감소하기 때문에 IMEP가 작아짐을 볼 수 있는데, 특히 낮은 부하($m_f = 0.42$ g/sec) 운전에서는 저온연소시 IMEP가 산소농도 19% 조건 대비 약 20%(0.8~1 bar) 정도 감소되는데 반해, 부하가 올라갈수록 그 차이가 증가하여 $m_f = 0.58$ g/sec 조건에서는 약 30% 이상(~3 bar)의 IMEP 감소가 일어남을 관찰할 수 있다.

Fig. 4에서는 또한 흡기압 1 bar, 산소농도 19%의 일반 디젤 운전조건에서 얻을 수 있는 IMEP 값을 동일 연료량을 분사한 흡기압력 3 bar의 저온연소 운전에서 구현할 수 있음을 볼 수 있는데 이는 흡기 과급을 통해 1 bar 저온연소 대비 약 20-30% 이상의 IMEP 향상이 이루어질 수 있고 이로부터 고부하로의 운전영역 확대 역시 가능함을 의미한다.

산소농도에 따른 MBT timing에서의 도시 열효율 결과는 Fig. 5에 나타났다. 흡기 과급압력 및 산소농도 변화에 대한 열효율의 변화는 Fig. 4의 IMEP 변화와 동일하며, 특히 높은 흡기압에서는 저온연소 운전에서도 유의미한 수준의 효율을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 Soot emissions 결과를 나타낸다. 그림에서는 먼저 모든 조건에 대해 산소농도가 낮아질수록, 즉 EGR율이 증가할수록 Soot의 발생이 크게 증가했다가 감소하는 ‘Soot bump’ 현상을 볼 수 있다. 이러한 Soot bump는 가용 산소량의 감소가 처음에는 주로 Soot 산화반응을 감소에 영향을 주다가 나중에는 Soot 생성반응 억제에도 영향을 주기 때문에 발생하는 것으로 판단된다. 이를 조금 더 자세히 살펴보면 MBT timing의 변화가 크지 않은 소량의 EGR이 이용되는 조건에서는 확산화염에 의해 연소되는 연료량이 상당하여 Soot formation 반응은 어느 정도 유지되는 반면 가용 산소의 감소로 인한 Soot의 산화반응은 약화되어 Soot 배출이 증가하지만, 일정 수준 이상의 EGR이 투입되고 MBT timing이 진각하면 분사된 디젤연료의 예혼합 연소율이 우세하게 되어 Soot formation을 또한 크게 감소하고 그 결과 전체적인 Soot 배출이 줄어드는 것이 산소농도 변화에 따른 Soot emission 변화의 주원인으로 보인다.

다음으로 부하에 따른 Soot 배출 특성을 살펴보면 부하가 높아질수록 전체적인 Soot의 발생이 증가하는 모습을 볼 수 있는데, 특히 $m_f = 0.42$ g/sec에서는 산소농도 8%, $m_f = 0.58$ g/sec에서는 산소농도 7%에서 Soot 배출이 거의 일어나지 않는 저온연소 영역으로 들어감을 알 수 있다. 다음으로 과급압력이 Soot의 생성에 미치는 영향을 살펴보면, 흡기 압력이 증가할수록 Soot의 발생은 감소하는데 이는 연소

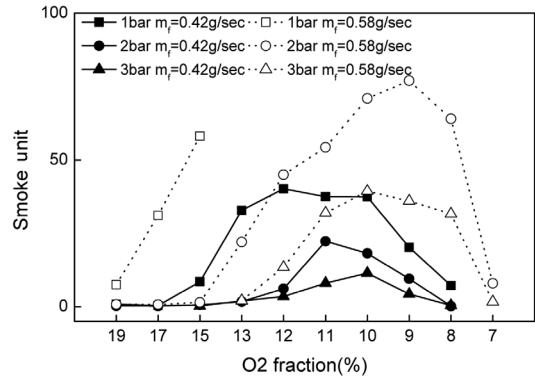


Fig. 6 Smoke levels for the O₂ concentration sweeps

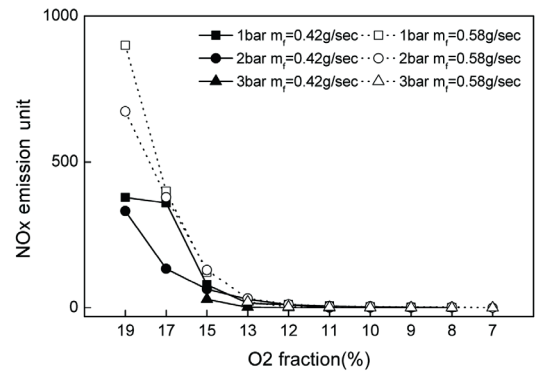


Fig. 7 NO_x emissions for the O₂ concentration sweeps

실 내 흡기 밀도의 증가가 연료/흡기 혼합특성을 향상시켜 Soot 산화반응이 더 활발히 일어나기 때문으로 판단된다. Fig. 6에서는 또한 $m_f = 0.42$ g/sec 운전 시 최대 Soot 발생지점이 흡기압 증가에 따라 더 낮은 산소농도 쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있는데 이는 흡기 과급압이 높아질수록 Soot 산화반응이 활성화될 수 있는 산소농도 조건이 더 낮아지기 때문으로 판단된다.

Fig. 7은 산소농도 변화에 따른 NO_x emissions의 변화를 보여주는데 산소농도가 감소할수록 연소온도가 낮아지고 산소 분압도 낮아지기 때문에 NO_x의 생성이 크게 감소하는 것을 알 수 있다. 특히 $m_f = 0.42$ g/sec 부하 시 산소농도 8%, $m_f = 0.58$ g/sec 조건 시 산소농도 7%는 Soot과 NO_x의 동시 저감이 이루어지는 저온 연소 영역임을 확인할 수 있었다.

Fig. 8은 각 연료분사량 및 흡기압력 조건에서 연소실 내 산소농도 변화에 따른 MBT timing에서의

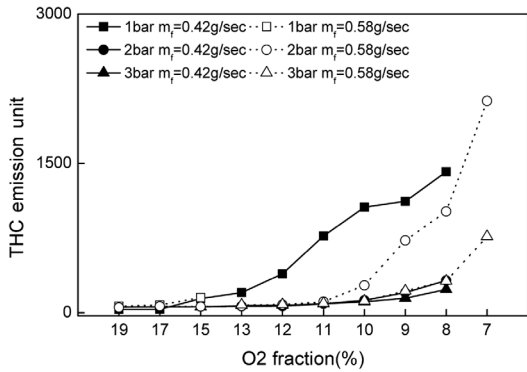


Fig. 8 THC emissions for the O₂ concentration sweeps

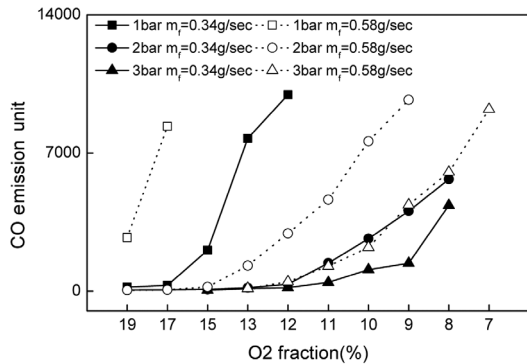


Fig. 9 CO emissions for the O₂ concentration sweeps

THC emissions 측정 결과로, 엔진이 충분히 희박한 영역에서 운전되는 경우 부하가 증가하더라도 비슷하거나 더 적은 THC가 발생하는 반면에 산소농도가 감소하는 경우 부하 조건이 높아질수록 전체 당량비가 이론공연비도 더 빠르게 근접하게 되고 그 결과 THC의 배출이 크게 증가함을 알 수 있다. 또한 동일 연료 분사량, 동일 산소농도 조건에서 흡기압력이 높아지면 전체 공연비 역시 더 희박해지기 때문에 THC 배출은 감소하는 모습을 보인다.

산소농도 변화에 따른 CO emissions 변화는 Fig. 9에서 볼 수 있다. 여기서 $m_f = 0.42$ g/sec, 흡기압력 1 bar와 $m_f = 0.58$ g/sec, 2 bar 운전의 경우 CO의 배출량이 측정장비의 한계치를 초과하기 때문에 각각 12%, 9% 지점까지로 측정을 제한하였다. CO emissions은 THC emissions 배출 경향처럼 부하가 증가할수록 그리고 과급압력이 감소할수록 전체 당량비가 점점 이론공연비에 가까워지고 그 결과 더

많이 배출되는 모습을 보이는데, 특히 산소 농도가 낮아질수록 전체 당량비의 증가로 CO 역시 증가함을 알 수 있다.

Fig. 8과 9에서 볼 수 있는 것처럼 저온연소 영역으로 가까워질수록 THC 및 CO emissions가 크게 증가하는 것이 사실이나 이는 후단에 산화촉매를 장착함으로써 용이하게 저감할 수 있기 때문에 저온연소 운전을 통해 NO_x와 PM의 배출을 동시에 낮추고 흡기압 증가를 통해 운전영역 및 출력, 연비를 높이는 전략은 상당한 의미가 있다 할 수 있다.

4. 결론

이번 연구에서는 흡기 과급 압력의 변화가 디젤 저온연소에 미치는 영향을 출력 및 효율, 배기 성능 결과를 바탕으로 조사하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 대용량 EGR을 이용하여 dilution-controlled regime에서 디젤 저온연소를 구현하였으며 산소농도 7~8%에서 Soot과 NO_x의 생성이 동시에 억제됨을 확인하였다.
- 2) 공급되는 EGR량이 증가하여 연소실 내 산소농도가 감소하면 MBT timing을 위한 분사시기 역시 진각하게 된다. 이때 흡기 과급압력이 높아질수록 요구되는 점화지연기간이 짧기 때문에 MBT 분사시기를 상대적으로 지각시킬 수 있다.
- 3) 동일 연료량 조건에서 디젤 저온연소 운전은 일반 디젤운전에서 보다 약 20~30%의 출력저하를 보이지만 흡기 과급을 통해 이것을 상쇄시켜 일반 디젤 운전과 동등한 수준의 운전이 가능하였으며, 이로부터 저온연소 엔진의 운전영역을 고부하까지 확장할 수 있는 가능성을 제시하였다.
- 4) 연소실 내 산소농도가 감소할수록 NO_x는 감소하는 반면에 낮은 연소온도로 인한 불완전연소의 증가 및 당량비 증가로 인해 THC와 CO의 배출이 크게 증가하였다. Soot의 경우 산소농도 감소에 따라 Soot의 발생이 증가했다가 다시 감소하는 Soot bump 현상을 관찰할 수 있었으며 최대 Soot 발생 지점은 흡기압 증가에 따라 더 낮은 산소농도 쪽으로 이동함을 확인하였다.

후 기

이번 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업 중 건설기계용 저온연소 엔진시스템 개발 과제의 지원으로 이루어졌습니다.

References

- 1) S. Kimura, O. Aoki, H. Ogawa, S. Muranaka and Y. Enomoto, "New Combustion Concept for Ultra-clean and High-efficiency Small DI Diesel Engines," SAE 1999-01-3681, Vol.108, 1999.
- 2) K. V. Tanin, D. D. Wickman, D. T. Montgomery, S. Das and R. D. Reitz, "The Influence of Boost Pressure on Emissions and Fuel Consumption of a Heavy-duty Single Cylinder D. I. Diesel Engine," SAE 1999-01-0840, Vol.108, 1999.
- 3) C. Noehre, M. Andersson, B. Johansson and A. Hultqvist, "Characterization of Partially Premixed Combustion," SAE 2006-01-3412, 2006.
- 4) C. W. Colban, P. C. Miles and S. Oh, "Effect of Intake Pressure on Performance and Emissions in an Automotive Diesel Engine Operating in Low Temperature Combustion Regimes," SAE 2007-01-4063, 2007.
- 5) J. H. Jang, S. Lee, Y. Lee and S. Oh, "EGR Simulation Gas Supply System Using Orifice Flow Controller," Annual Conference Proceedings, KSAE, pp.256-258, 2010.
- 6) L. M. Pickett and C. A. Idicheria, "Effects of Ambient Temperature and Density on Soot Formation under High-EGR Conditions," Proc. of THIESEL Conference on Thermo- and Fluid Dynamic Processes in Diesel Engines, pp.13-15, 2006
- 7) J. B. Heywood, Internal Combustion Fundamentals, McGraw-Hill, Inc., New York, 1988.