

과급을 이용한 저온 디젤 연소의 운전영역 확장 및 배기 배출물 저감

심 의 준 · 한 상 욱 · 장 진 영 · 박 정 서 · 배 충 식*

한국과학기술원 기계공학과

Expansion of Operating Range and Reduction of Engine out Emission in Low Temperature Diesel Combustion with Boosting

Euijoon Shim · Sangwook Han · Jinyoung Jang · Jungseo Park · Choongsik Bae*

Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

(Received 24 November 2008 / Accepted 2 February 2009)

Abstract : Supercharging system was adopted to investigate the influence of boost pressure on operating range and exhaust emissions by using a supercharger at low temperature diesel combustion (LTC) condition in a 5-cylinder 2.7 L direct injection diesel engine. The experimental parameters such as injection quantity, injection timing, injection pressure and exhaust gas recirculation (EGR) rate were varied to find maximum operating range in LTC condition. As a result of adopting increased boost pressure in LTC, wider operating range was achieved compared with naturally aspirated condition due to increased mixing intensity. Increased boost pressure resulted in lower hydrocarbon (HC) and carbon monoxide (CO) emissions due to increased swirl rate and mixing intensity, which induced complete combustion. Moreover, increased boost pressure in LTC resulted in much lower soot emissions compared with high speed direct injection (HSDI) condition.

Key words : Low temperature diesel combustion(LTC; 저온디젤연소), Exhaust gas recirculation(EGR; 배기가스 재순환), High speed direct injection(HSDI; 고속 직접분사), Supercharge(과급), Nitrogen oxides(NOx; 질소 산화물), Soot(수트, 그을음)

1. 서론

최근 고유가와 환경오염에 대한 세계적인 관심으로 가솔린엔진에 비하여 상대적으로 효율이 우수한 디젤엔진에 대한 연구가 활발하다. 디젤엔진은 이러한 장점 뒤에 폐질환을 유발시킬 가능성이 높은 질소산화물(NOx; nitrogen oxides)과 시각적으로 검은 연기를 내뿜으며 대기를 오염시키는 soot(수트, 그을음)의 배출 문제로 인하여 개선에 대한 필요성이 절실히 요구되고 있다. Kamimoto와 Bae의 연구에 의하면 적절한 당량비와 연소온도 조건을 확보

하게 되면 soot와 NOx를 동시에 저감할 수 있는 연소를 이룰 수 있다고 하였다.¹⁾

Fig. 1은 당량비-온도 평면상에서 soot와 NOx의 생성영역을 보여주고 있다.^{2,3)} 그림에서 보는 바와 같이 연소온도가 1600 K 이하로 낮아질 경우 soot와 NOx의 생성온도 이하에서 연소가 이루어져 soot와 NOx가 동시에 저감됨을 보고 하였다.³⁾

저온디젤연소(LTC; low temperature diesel combustion)는 이와 같은 사실을 바탕으로 연소실 내의 연소온도를 1600 K 이하로 낮추어 주어 soot와 NOx를 동시에 저감시키는 엔진 연소 기술이다.

본 연구에서 저온디젤연소를 구현하기 위하여 연

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

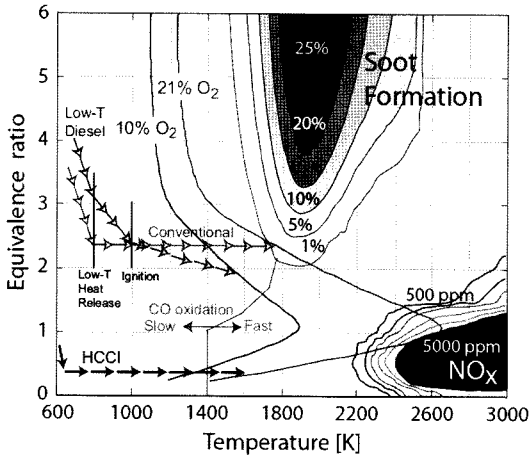


Fig. 1 Soot and NO_x formation of local fuel element on ϕ -T plane³⁾; Solid lines show adiabatic mixture flame temperature for various O₂ concentration of ambient gas

소실내의 연소온도 저감 방법으로 열용량이 큰 이산화탄소(CO₂; carbon dioxide) 가스를 다량 함유한 배기가스를 배기가스재순환(EGR; exhaust gas recirculation)을 통하여 연소실 내로 공급하였다.

저온디젤연소는 낮은 연소온도로 인하여 soot와 NO_x의 동시 저감을 이룰 수 있지만, 불안정한 연소로 인하여 그 운전영역이 기존의 고속직접분사(HSDI; high speed direct injection)방식에 비하여 현저히 제한되는 단점을 가지고 있어 저온디젤연소 기술을 실제 엔진시스템에 적용하는 것에 문제점으로 제기 되어 왔다. 본 연구에서는 이러한 저온디젤연소의 문제점을 해결하기 위하여 과급방식을 적용시켜 저온디젤연소의 운전영역을 확장시키고, 과급이 일산화탄소(CO; carbon monoxide)나 탄화수소(HC; hydrocarbon)와 같은 배기 배출물에 미치는 영향을 알아보고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

실험에 사용된 엔진의 제원을 Table 1에 나타내었다. 엔진은 배기량 2696 cc, 압축비 17.5인 5기통 디젤 엔진을 사용하였으며, 분사 시스템은 분사 압력을 160 MPa까지 가압할 수 있는 커먼레일 분사 시스템을 사용하였다. 동력계(dynamometer)를 엔진의

Table 1 Specifications of diesel engine

Specifications	Resources
Engine type	5 cylinder diesel
Bore×Stroke	86.2 mm × 92.4 mm
Compression ratio	17.5
Displacement	2696 cc

크랭크축에 연결하고 엔진의 회전속도 및 부하(load)를 제어 하였다. 엔진의 크랭크축에 장착되어 있는 엔코더(1800 pulse/rev)의 신호를 이용하여 분사시기를 제어하였다. 연료의 분사시기, 분사량, 분사압력 등은 ECU(electronic control unit)제어 프로그램(Delphi Visu98)을 통해 제어 되었다. 과급을 위하여 흡기다기관(intake manifold) 전단에 슈퍼 차저(supercharger)를 장착하였고, 슈퍼차저의 회전속도를 조절하여 연소실 내로 공급되는 과급압력을 제어하였다.

연소해석을 위한 실린더 내 압력은 압전소자(piezo)방식의 압력 센서(Kistler 6052B)를 이용하여 측정하였다. NO_x, HC, CO 등 배기가스는 배기가스 분석장치(HORIBA, MEXA 1500d)를 사용하여 분석하였으며, soot측정은 스모크미터(AVL, 415S)를 이용하였고 5회 측정하여 평균값을 사용하였다. 스모크미터의 1 FSN(filter smoke number)은 측정 점에서 soot 농도 17.84 mg/m³을 나타낸다.

본 연구에 사용된 전반적인 실험 장치들을 Fig. 2에서 개략도로 표현하였다. 다량의 저온 EGR을 공급하기 위하여 5기통 디젤엔진의 배기다기관(exhaust manifold)에 EGR 공급 라인과 EGR 냉각기를 추가로 설치하였다. EGR유량은 대기에서 오는 흡기라인과 EGR 라인이 만나는 지점에 3-Way 밸브를 설치하고, 이를 사용하여 조절하였다.

2.2 실험방법

엔진 운전 인자 및 조건은 Table 2에 나타내었다. 실험은 40, 80, 120 MPa의 각각의 분사압력, 그리고 100 KPa의 과급압력, 엔진회전속도 1200~2000 rpm의 조건에서 이루어졌다. LTC운전에서 최대토크는 연료 분사량, 연료 분사시기 및 EGR율을 변화시켜 각각의 엔진 회전속도에 대하여 조사되었으며 이를 통해 LTC운전이 가능한 영역을 확인하였다.

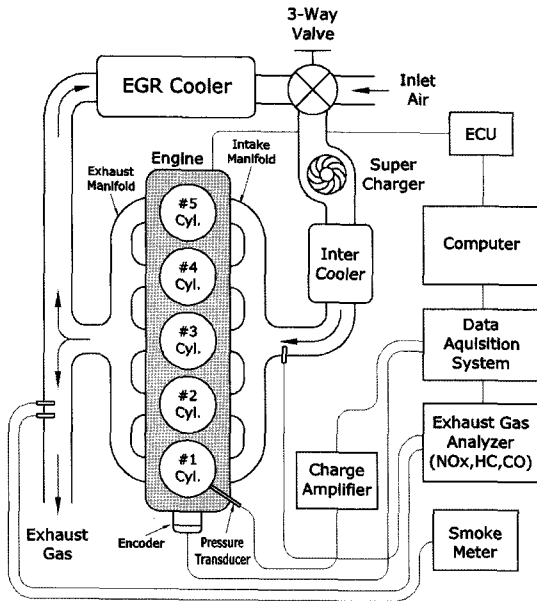


Fig. 2 Schematic diagram of engine, supercharger, gas analyzer and a cooled EGR supply system

Table 2 Operating parameters

Specifications	Resources
Engine speed	1200~ 2000 rpm
Injection quantity	main injection (3.5~16.3 mg/stroke)
Injection timing	main injection (0~30 CAD BTDC)
Injection pressure	40, 80, 120 MPa
Boost pressure	100 KPa
EGR rate	0 ~ 72 %

EGR율은 식 (1)에 의해 계산 되었고 0~72%까지 변화시키며 EGR의 영향을 살펴보았다.

식 (1)에서 CO₂의 비를 사용하는 이유는 CO₂가 연소 생성물 중 대표적인 것으로 측정하기 쉽고 양이 많으며, 연소과정 중 큰 변화가 없기 때문이다.

3. 실험 결과

3.1 EGR을 변화에 따른 배기 특성

Fig. 3은 EGR을 변화에 대한 CO, HC, NO_x, soot의 변화를 나타낸다. Fig. 3에서 soot와 NO_x의 경우 EGR율(0~52%)이 증가함에 따라 soot가 증가하고, NO_x가 감소하는 상반관계(trade off)관계를 보인다. 하지만 EGR율을 52% 이상 적용하였을 경우 soot 발

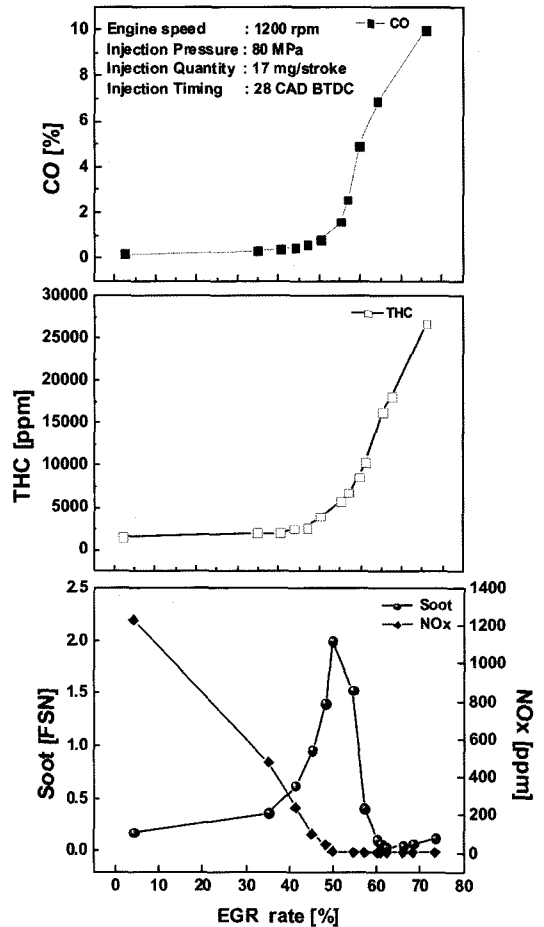


Fig. 3 Effect of EGR rate on emission characteristics [injection timing : 28 CAD BTDC, injection quantity : 17 mg/stroke, injection pressure : 80 MPa]

생이 저감되어 62% EGR율에서는 NO_x와 soot를 동시에 저감할 수가 있다.⁴⁻⁸⁾ 이러한 soot와 NO_x의 동시저감 원인은 온도에 대한 영향과 착화지연(ignition delay)에 대한 영향으로 설명할 수 있다.

첫 번째, 온도에 대한 영향으로 EGR율이 증가함에 따라 흡기 희석효과(dilution effect)로 인해 흡기 내의 O₂가 N₂와 열용량이 큰 CO₂로 대체됨으로써 O₂ 농도가 감소하게 되고, 연소가 활성화 되지 못하게 되어 연소온도가 낮아지게 되며,⁹⁾ 그로 인해 NO_x 생성에 지배적인 인자인 연소온도가 Fig. 1에서와 같이 NO_x 생성가능 영역을 벗어나게 되므로 NO_x의 저감을 이루어 낼 수 있다. 또한 soot의 경우에 높은 EGR율에서 soot생성에 필요한 연소온도

(약 1600 K)를 충족 시켜 주지 못한다. 따라서 높은 EGR율에서 soot배출량의 감소는 낮은 soot 생성물에 기인하는 것이고, 이는 연소온도가 낮은 영역에서는 soot의 전구체인 PAHs(polycyclic aromatic hydrocarbons)의 응집(coagulation)이 잘 이루어지지 못하기 때문이라 할 수 있다.¹³⁾

두 번째 원인으로 착화지연을 들 수 있다. EGR율이 증가함에 따라 연소실내의 온도가 감소하게 되어 연소실로 분사된 연료는 착화에 필요한 온도에도달할 때 까지 그 착화 시점이 지연되게 된다. 이로써 분사된 연료는 착화지연의 증가로 인하여 연소실내로 고르게 분포하여 국부적으로 농후한 영역이 감소하게 되고, 연소실 내의 당량비가 낮아지게 됨으로써 soot와 NOx의 발생이 감소하게 되는 것이다.

3.2 과급압력 변화에 따른 배기 특성

과급에 대한 배기 배출물 특성을 알아보기 위해 과급을 적용하여 실린더 내로 공급되는 흡기압력을 조절하였다. Fig. 4는 자연흡기상태와 100 KPa의 과급을 적용한 저온디젤연소의 배기 배출물에 관하여 나타내고 있으며, CO, HC, NOx, soot등 모든 배기 배출물에서 Fig. 3과 같은 동일한 경향성을 나타내는 것을 볼 수 있다. 과급을 적용하였을 경우에는 모든 배기 배출물의 발생량이 과급을 적용하지 않았을 경우와 비교하여 전체적으로 감소하는 것을 볼 수 있다. Soot의 경우에는 EGR율 52% 부근에서 발생하는 최대점이 현저히 감소하는 것을 볼 수 있었고, soot와 NOx가 동시에 저감되는 EGR율(62~65%)에서도 soot의 발생량이 0.063 FSN에서 0.018 FSN으로 발생량이 71.4%감소하는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 soot 배출이 감소하는 이유는 과급으로 인하여 연소실 내에 공급되는 가스의 유속이 빨라지게 되어 스웰비(swirl ratio)가 증가하게 되며 이렇게 증가된 스웰비는 연소실 내부에 국부적으로 농후한 영역을 감소시켜 soot의 생성을 억제시키기 때문이라 할 수 있다.

Fig. 3에서 저온디젤연소를 구현하기 위하여 EGR율을 62%까지 증가 하게 될 경우 CO와 HC의 배출이 급격히 증가하는 문제점을 가지고 있었다.¹²⁾ 하지만 Fig. 4에서 보는 바와 같이 과급을 적용하였을 경

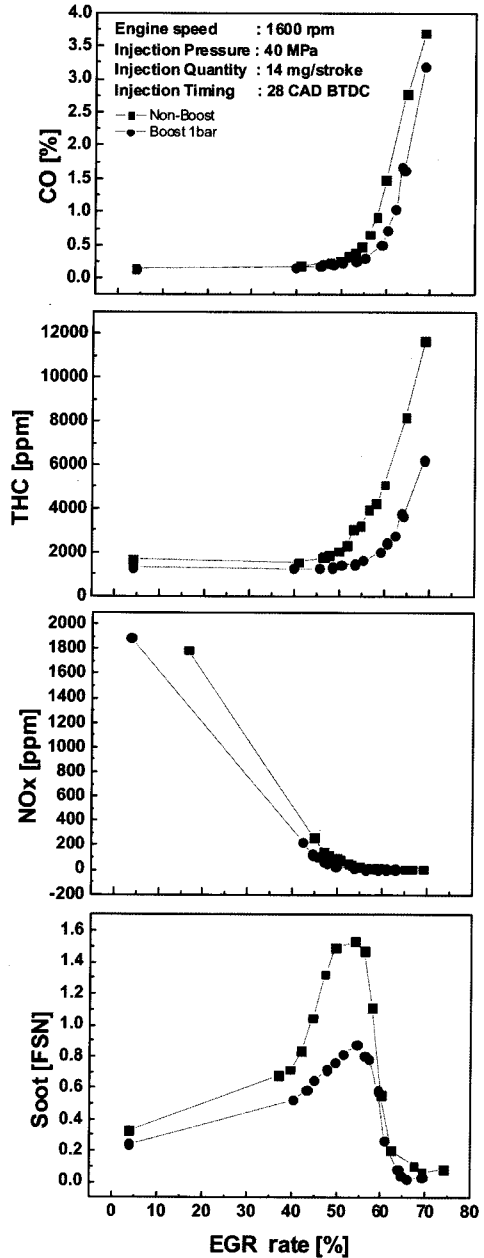


Fig. 4 Effect of boost pressure on emission characteristics [injection timing : 28 CAD BTDC, injection quantity : 14 mg/stroke, injection pressure : 40 MPa]

우 CO와 HC가 급격히 증가 되는 시점이 자연 흡기의 경우 보다 높은 EGR율에서 시작된다. 이것은 soot와 NOx가 동시에 저감되는 저온디젤연소 영역에서 과급을 적용할 경우, 자연흡기 상태에 비하여 상대적으로 CO와 HC배출이 감소하는 것을 의미한

다. 이러한 원인은 과급이 연소실내의 혼합강도 (mixing intensity)를 증가시켜 CO와 HC의 산화가 더욱 쉽게 일어날 수 있는 조건을 만들어 주기 때문이라 판단된다.¹⁰⁾

3.3 HSDI와 Non-boosted LTC, Boosted LTC의 운전영역별 soot 비교

Fig. 5~7에서는 HSDI와 non-boosted LTC, boosted LTC 조건에서 운전영역별 soot 배출을 나타내었다. 그리고 Fig. 8은 HSDI조건에서 발생된 soot의 배출량을 100%로 두었을 때 LTC조건에서의 상대적인 soot 배출량을 정량적으로 표현하였다. HSDI조건의 경우에는 상용엔진의 ECU에 저장된 분사량과 분사 시기로 운전하였다. LTC 조건의 경우에는 과급을 적용했을 때의 영향을 살펴보기 위해 과급이 된 boosted LTC와 자연흡기 상태의 non-boosted LTC로 나누어 실험이 수행 되었으며, 최저의 soot 배출량을 보이는 최적의 EGR 율(60~62%), 분사량, 분사시기에서 운전하였다. 그 결과 높은 EGR 율을 적용한 LTC조건(Fig. 6, Fig. 7)의 모든 운전영역 내에서 soot 발생량이 HSDI조건(Fig. 5)에 비하여 현저하게 저감됨을 알 수 있다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이 LTC조건에서 과급을 적용하였을 경우 자연흡기 상태의 LTC에 비하여 soot발생량이 0.01 FSN 수준에 해당하는 영역이 확

대되는 것을 볼 수 있다. 이것은 과급으로 인하여 연소실내에 공급되는 가스의 유속이 빨라지게 되어 스월비가 증가하고, 연소실 내로 유입되는 흡기 압력 증가로 혼합강도가 향상되기 때문인 것으로 판단된다. 증가된 스월비는 국부적으로 농후한 영역을 감소시켜 soot의 생성을 억제 시키고, 향상된 혼합강도는 soot의 산화가 잘 이루어 질 수 있는 환경을 만들어 주어 soot의 배출을 감소시킨다.

3.4 Non-boosted LTC와 Boosted LTC에서 운전영역 비교

또한 Fig. 6,7에서는 LTC 조건에서 과급 시 운전영역 변화를 확인 할 수 있다. 현재까지의 LTC 연구에서 문제 시 되고 있는 제한된 운전영역을 확장시키기 위하여 실린더 내에 공급되는 과급압력을 100 KPa까지 증가시켜 실험 하였다. 그 결과 Fig. 6과 7에서 보는 바와 같이 과급 압력을 증가 시킬수록 LTC의 운전영역이 모든 분사압력 및 엔진 회전 속도 조건에서 확장 되었으며, 특히 고 부하 방향의 운전영역은 분사압력 120 MPa, 엔진회전속도 1600 rpm에서 확장 폭이 50 Nm에서 86 Nm까지 과급에 의하여 41.9% 확장되는 것을 볼 수 있었다. 이것은 낮은 연소 온도 조건으로 불완전한 연소를 일으키는 LTC운전의 특성을 과급으로 인한 체적효율 (volumetric efficiency) 증가와 연소실 내의 스월비를 증가시킴으로써 연소실 내에 분사된 연료를 완전연소가 가능하도록 유도함으로써 고 부하 영역으로 운전영역이 확장 되었다고 볼 수 있다.^{10,11)} 본 실험에서 LTC 조건(62% EGR rate)에서 엔진속도1600rpm의 경우 체적효율이 자연흡기보다 과급을 적용하였을 때 18%증가하는 결과를 보였다.

3.5 분사압력 변화에 대한 soot 배출량 비교

한편 LTC 조건에서 저속, 저압 분사(1200 rpm, 40 MPa)의 경우에는 soot발생량이 고속, 고압분사에 비하여 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 저속, 저압분사 시 분무의 미립화가 잘 이루어 지지 않아 국부적으로 농후한 영역이 증가하여 soot의 생성을 돕기 때문이라 할 수 있다.¹⁴⁾ 이러한 사실을 통하여 분사압력이 soot의 생성에 영향을 주는 또 다른 인자라는 것을 알 수 있다. Fig. 8에서 분사압력 변화에 따

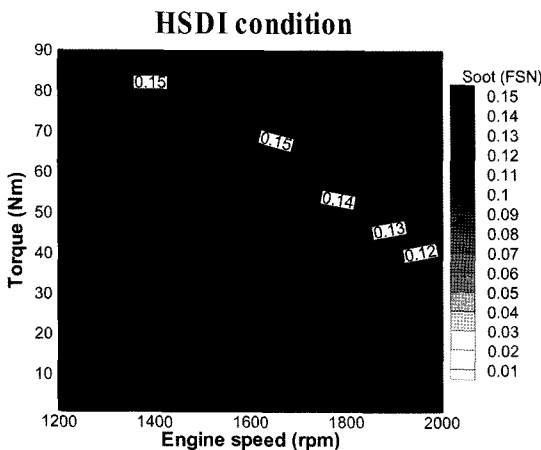


Fig. 5 Soot emission characteristics of HSDI condition [injection timing : -2~3.75 CAD BTDC, injection quantity : 5.4~19.4 mg/stroke, injection pressure : 20~140 MPa - using by engine ECU]

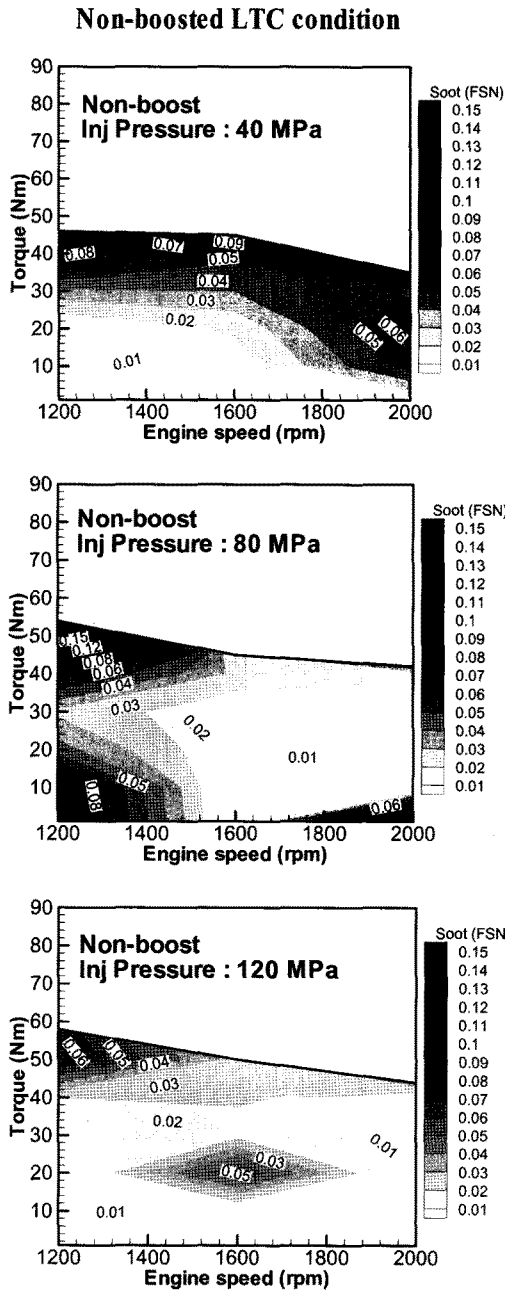


Fig. 6 Soot emission characteristics of Non-boosted LTC [injection timing : 0~30 CAD BTDC, injection quantity : 3~16 mg/stroke, injection pressure : 40, 80, 120 MPa]

른 soot 발생량을 나타내었다. 분사압력을 40 MPa에서 120 MPa로 증가시킬 경우 과급을 적용하지 않은 non-boosted LTC의 soot 발생량이 23.2%에서 4.2%

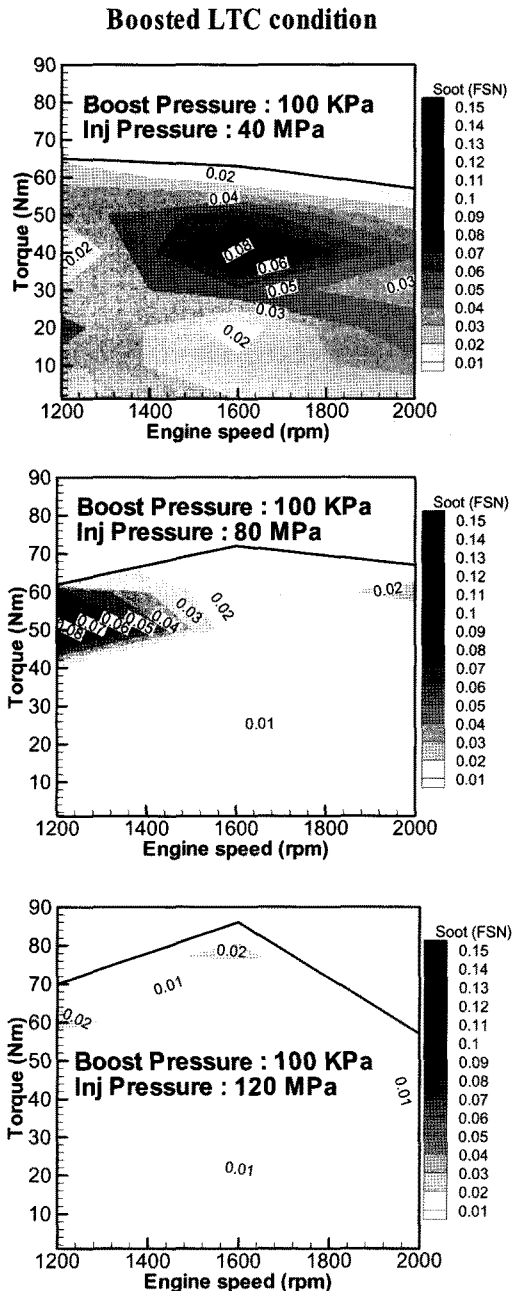


Fig. 7 Soot emission characteristics of Boosted LTC [injection timing : 7~30 CAD BTDC, injection quantity : 5~15 mg/stroke, injection pressure : 40, 80, 120 MPa]

로 감소됨을 볼 수 있으며, 과급을 적용한 boosted LTC의 경우에는 15.5%에서 3.6%까지 저감되는 것을 볼 수 있다.

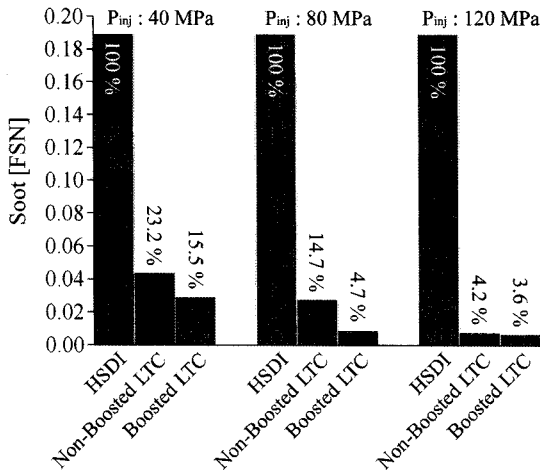


Fig. 8 Effect of injection pressure & boost pressure on soot emission

4. 결론

일반 디젤엔진에서 높은 EGR율을 적용하여 저온 디젤엔진을 구현 하였으며, soot와 NOx의 배출을 동시에 저감 할 수 있었다. LTC 운전조건에 과급을 적용하여 HSDI 운전조건에 비하여 제한된 운전영역을 확장할 수 있었으며, HSDI 조건에 비하여 상대적으로 높은 CO와 HC의 배출 수준을 낮출 수 있었다.

- 1) EGR율이 증가함에 따라 soot의 배출량도 점차 증가하여 52% EGR율에서 최대치를 보이며, EGR율이 52% 이상으로 증가함에 따라 soot가 감소하는 경향을 나타낸다. 그리고 62% 이상의 EGR율에서 soot와 NOx가 동시에 저감되는 저온 디젤연소를 구현하였다.
- 2) 과급압력을 100 KPa로 유지하였을 경우 기존의 LTC 조건에서 제한된 운전영역이 최대 41.9%까지 확장되었다.
- 3) LTC를 적용하였을 때의 soot 배출량이 HSDI의 경우에 비하여 최대 3.6% 수준으로 급격히 낮아짐을 볼 수 있었다.
- 4) 고압분사를 사용하여 soot의 발생을 저감 할 수 있었다. 분사압력의 증가는 연소실내 분무의 미립화를 촉진시켜 soot배출의 감소를 시키는 역할을 한다.
- 5) 40, 80, 120 MPa의 분사압력에 대한 soot발생 도표(map)을 바탕으로 soot발생이 최저가 되는 운전조건을 제시 할 수 있다.

후 기

본 연구는 미래형 자동차 사업단의 지원으로 수행 되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

References

- 1) T. Kamimoto and M. Bae, "High Combustion Temperature for the Reduction of Particulate in Diesel Engines," SAE 880423, 1998.
- 2) S. Kook, P. C. Miles, M. Bergin and C. Bae, "The Influences of Swirl Ratio on CO Emission and Fuel Conversion Efficiency in Low-Temperature Diesel Combustion," Fall Conference Proceedings, Vol.I, KSAE, pp.318-323, 2005.
- 3) T. Kitamura, T. Ito, J. Senda and H. Fujimoto, "Mechanism of Smokeless Diesel Combustion with Oxygenated Fuels Based on the Dependency of the Equivalence Ratio and Temperature on Soot Particle Formation," International Journal of Engine Research, Vol.3, p.223, IMechE, 2002.
- 4) M. Sasaki, Y. Kishi, T. Hyuga, K. Okazaki, M. Tanaka and I. Kurihara, "The Effects of EGR on Diesel Engine Oil, and Its Countermeasures," SAE 971695, 1997.
- 5) A. M. Kreso, J. H. Johnson, L. D. Gratz, S. T. Bagley and D. G. Leddy, "A Study of the Effects of Exhaust Gas Recirculation on Heavy-duty Diesel Engine Emissions," SAE 981422, 1998.
- 6) N. Ladommatos, S. M. Abdelhalim, H. Zhao, and Z. Hu, "The Dilution, Chemical, and Thermal Effects of Exhaust Gas Recirculation on Diesel Engine Emissions - Part 1: Effect of Reducing Inlet Charge Oxygen," SAE 961165, 1996.
- 7) K. Akihama, A. Takatori, K. Inagaki, S. Sasaki, and A. M. Dean, "Mechanism of the Smokeless Rich Diesel Combustion by Reducing Temperature," SAE 2001-01-0655, 2001.
- 8) S. Kimura, O. Aoki, Y. Kitahara and E. Aiyoshizawa, "Ultra-clean Combustion Technology Combining Concept for Meeting Future Emission Standard," SAE 2001-01-0200, 2001.

- 9) O. Hideyuki, L. Tie and M. Noboru, "Dependence of Ultra-high EGR and Low Temperature Diesel Combustion on Fuel Injection Conditions and Compression Ratio," SAE 2006-01-3386, 2006.
- 10) H. Yun, S. Mark, M. Nebojsa and Z. Stefan, "Development of Premixed Low-Temperature Diesel Combustion in a HSDI Diesel Engine," SAE 2008-01-0639, 2008.
- 11) B. Ralf, L. Guido, M. Oliver and S. Ansgar, "Boost and EGR System for the Highly Premixed Diesel Combustion," SAE 2006-01-0204, 2006.
- 12) S. Oh, F. Colban and C. Miles, "Unburned Hydrocarbon Emissions Characteristics in Low Temperature Diesel Combustion Systems," Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.155-161, 2005.
- 13) C. A. Idicheria and L. M. Pickett, "Soot Formation in Diesel Combustion under High-EGR Conditions," SAE 2005-01-3834, 2005.
- 14) Y. Han and K. Lee, "A Study on the Measurement of Temperature and soot for Diffusion Flame in a Visualized D.I. Diesel Engine Using the Two-color Method," Transactions of KSAE, Vol.15, No.1, pp.177-185, 2007.