

저온 디젤 연소에서 세탄가가 배기가스 특성에 미치는 영향

한 만 배*

계명대학교 기계자동차공학과

The Effect of Cetane Number on Exhaust Emissions in Low-temperature Diesel Combustion

Manbae Han *

Department of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

(Received 9 August 2010 / Accepted 13 July 2011)

Abstract : This study is to investigate the effect of the cetane number in ultra low sulfur diesel fuel on combustion characteristics and exhaust emissions at 1500 rpm and 2.6bar BMEP in low-temperature diesel combustion with 1.9L common rail direct injection diesel engine. Low-temperature diesel combustion was achieved by adopting external high EGR rate with the strategic injection control without modification of engine components. Test fuels are ultra low sulfur diesel fuel (sulfur less than 12 ppm) with two cetane numbers (CN), i.e., CN30 and CN55. For the CN30 fuel, as a start of injection (SOI) timing is retarded, the duration of an ignition delay was decreased while still longer than 20°CA for all the SOI timings. In the meanwhile, the CN55 fuel showed that an ignition delay was monotonically extended as an SOI timing is retarded but much shorter than that of the CN30 fuel. The duration of combustion for both fuels was increased as an SOI timing is retarded. For the SOI timing for the minimum BSFC, the CN30 produced nearly zero PM much less than the CN55, while keeping the level of NOx and the fuel consumption similar to the CN55 fuel. However, the CN30 produced more THC and CO than the CN55 fuel, which may come from the longer ignition delay of CN30 to make fuel and air over-mixed.

Key words : Low-temperature diesel combustion(저온 디젤 연소), Cetane number(세탄가), Start of injection timing (연료분사시기), Ignition delay(착화지연), Exhaust gas recirculation(배기가스 재순환)

Nomenclature

ATDC : after top dead center
BMEP : brake mean effective pressure, bar
BSFC : brake specific fuel consumption, g/kWh
LHV : lower heating value, MJ/kg
MFB : mass fraction burned
T10 : temperature of 10% distillation recovery, °C
T50 : temperature of 50% distillation recovery, °C
T90 : temperature of 90% distillation recovery, °C

1. 서론

전 세계적으로 저배기, 고효율 및 저 이산화탄소 배출 엔진 개발을 위하여 신 연소 기법, 후처리 방법 등에 관한 많은 연구가 진행되고 있다. 특히 다량의 배기가스 재순환(Exhaust Gas Recirculation, EGR)과 고압의 연료분사 시스템 및 분사시기 제어를 이용하여 입자상 물질(Smoke or Particulate Matter, PM) 과 질소산화물(Nitrogen Oxides, NOx)의 배출을 동시에 줄이는 저온 디젤 연소(low-temperature diesel combustion)에 관한 연구가 활발하다.¹⁻⁶⁾

*Corresponding author, E-mail: mbhan2002@kmu.ac.kr

전통적인 디젤 연소(conventional diesel combustion)에서는 PM을 줄이기 위하여 연료분사시기(Start of Injection timing, SOI)를 진각(advance)시키거나 EGR을 줄일 경우 NO_x가 증가하거나, 혹은 NO_x를 저감시키기 위하여 SOI를 지각(retard)시키고 EGR을 증가시키면 PM이 증가하는 소위 매연-질소산화물의 트레이드오프(trade-off) 현상이 보고되어왔다.⁷⁾ 그러나 저온 디젤 연소에서는 기존의 엔진의 구조를 거의 바꾸지 않고 다량의 EGR과 고압의 연료분사 및 분사시기 최적화를 통하여 착화지연(ignition delay) 기간을 늘려 연료와 공기의 예혼합(pre-mixedness) 정도를 증가시키고 연소 온도를 낮춰 PM과 NO_x 배출을 동시에 줄일 수 있다.

디젤연소는 연료의 물성치에 의하여 영향을 받게 되는데, 대표적으로 물성치는 세탄가(Cetane Number, CN), 방향족 성분(aromatic content), 연료의 90% 증발온도(temperature of 90% distillation recovery, T90)로 알려져 있다.⁸⁻¹¹⁾ 특히 다량의 EGR을 이용한 저온 디젤 연소에서 세탄가를 낮추면 착화지연이 길어져 PM 감소 효과가 큰 것으로 알려져 있다.⁸⁾ 세탄가 40-63 정도에서는 연료의 증발온도가 다량의 EGR을 이용한 저온 디젤 연소에서는 그 특징이 뚜렷하게 나타나지 않으며,⁸⁾ 다른 연구 결과에서는 고 부하 영역에서 낮은 증발온도를 갖는 연료는 특히 PM 저감 효과가 있다고 보고되고 있다.¹⁰⁾ 방향족 성분의 영향에 대하여는 전통디젤 연소에서는 PM 및 NO_x가 증가한다고 알려져 있다.¹⁰⁾

본 논문에서는 세탄가 30(CN30)과 세탄가 55(CN55)에 대하여 다량의 EGR(약 41%)을 이용한 저온 연소 영역에서 SOI에 따른 연소 및 배기가스 배출 특성에 대한 연구를 수행하였다.

2. 실험 방법

본 실험을 위하여 미국 General Motors사의 1.9L DOHC 커먼레일 직접분사(common rail direct injection) 엔진을 이용하였다. 피스톤의 형상은 보울인(bowl-in) 타입이며 압축비는 17.5이다. 가변 형상 터보 과급기(variable geometry turbo-charger)를 장착하고 있으며 EGR은 전자식으로 제어한다(Table 1). 저온 디젤 연소를 위하여 기존의 엔진의 부품이나 하

Table 1 Engine specification

Cylinder	4
Displacement [L]	1.9
Bore [mm]	82.0
Stroke [mm]	90.4
Compression ratio	17.5
Piston geometry	Bowl-in-piston
Valves/Cylinder	4
Injection system	Common rail direct injection
Injector	7-hole, 148°
Injector location	Centrally mounted
Rated power	110kW @4000rpm

Table 2 Fuel properties

Fuel name	CN30	CN55
Specific gravity [-]	0.8084	0.8086
Cetane number [-]	29.9	54.2
Aromatics [%vol.]	26.1	22.2
T10/T50/T90 [°C]	183/ 199/284	186/221/274
LHV [MJ/kg]	42.76	42.45
Sulfur [ppm]	1.9	1.2

드웨어를 변경하지 않았다.

사용한 연료는 초저유황 디젤 연료(ultra low sulfur diesel fuel, sulfur <12 ppm wt)로 방향족 성분, T90의 목표치는 각각 20%, 270°C이며, 세탄가의 목표치는 30과 55이다. 최대한 상기 목표치에 접근하도록 연료를 조성하였다. 저위발열량(Lower Heating Value, LHV)은 두 연료가 동등한 결과를 보였다. 상세한 결과는 Table 2에 나타내었다.

본 실험을 위하여 선택한 엔진 작동 영역은 저온 디젤 연소를 구현하기에 다소 유리한 저속 중·저부하 영역인 1500rpm 2.6bar BMEP이다. SOI 변경 실험에 따른 토크 변동은 분사된 연료량으로 조정하였다. 실험을 수행하는 동안 연료레일압력은 875 bar를 유지하였으며 이는 1500rpm, 2.6bar BMEP 저온 디젤 연소 조건에서 최적화된 값이다. 착화지연 시간 증대 및 연소 온도 저감을 위하여 사용된 EGR은 41%로 흡입 산소량으로는 15.6%에 해당한다. EGR은 흡기관과 배기관에서 측정된 CO₂ 농도의 비로부터 계산하였다(Table 3).

배기매니폴드 끝단에서 약 20cm 떨어진 위치에서 PM 측정을 하였으며, AVL사의 415S 장비를 이

Table 3 Engine operating condition

Engine speed [rpm]	1500
BMEP [bar]	2.6
EGR fraction [%]	41
A/F ratio [-]	22.5
Intake oxygen [%]	15.6
Intake manifold pressure [kPa]	108
Intake mixture temp. [°C]	90
Fuel rail pressure [bar]	875
Injection timing [°CA ATDC]	varying

용하여 광학식 방법으로 측정하였다. 터보 과급기에서 약 1m 정도 떨어진 위치에서 매연필터를 통과한 배기가스의 THC, CO, NOx, CO₂, O₂ 농도를 일반 배기가스 측정 장비를 이용하여 측정하였다. 배기가스 분석시 모든 샘플라인은 190°C로 제어하여 탄화수소 및 물의 응축을 최소화 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 SOI 영향

엔진제어 변수 중에서 특히 SOI에 따른 배기가스 특성과 연료소모율(Brake Specific Fuel Consumption, BSFC) 분석을 실시하였다. Fig. 1은 저세탄가(CN30) 및 고세탄가(CN55) 연료에 대하여 SOI 변화에 따른 PM, NOx, THC, CO 및 BSFC의 거동을 표시하였다. Fig. 1에서 보듯이 두 개의 연료에 대하여 연소 안정성이 유지되는 영역이 완전히 달라, 저세탄가인 CN30은 고세탄가인 CN55보다 SOI가 약 10°CA이상의 진각이 필요하였다. 각 각의 연료에 대하여 SOI가 지각됨에 따라서 PM 및 NOx는 단조적으로 감소하였고 THC, CO 및 BSFC는 증가하였다. PM은 CN30 연료의 경우 SOI에 따른 영향없이 PM이 배출되지 않았으며, CN55 연료는 감소하는 경향을 보였다.

Fig. 2는 CN30 및 CN55 연료에 대하여 SOI 변화에 따른 연소 해석을 수행하여 결과 중에서 착화지연 시간, MFB 50% 위치, 연소 기간을 보여준다. Fig. 2에서 보듯이 CN30의 경우 SOI가 지각됨에 따라 착화지연(여기서는 MFB 5%에 해당하는 각과 SOI 시기의 차이로 정의)은 감소하나 그 정도가 미미하다. 그러나 CN55의 경우 SOI가 지각됨에 따라 착화지

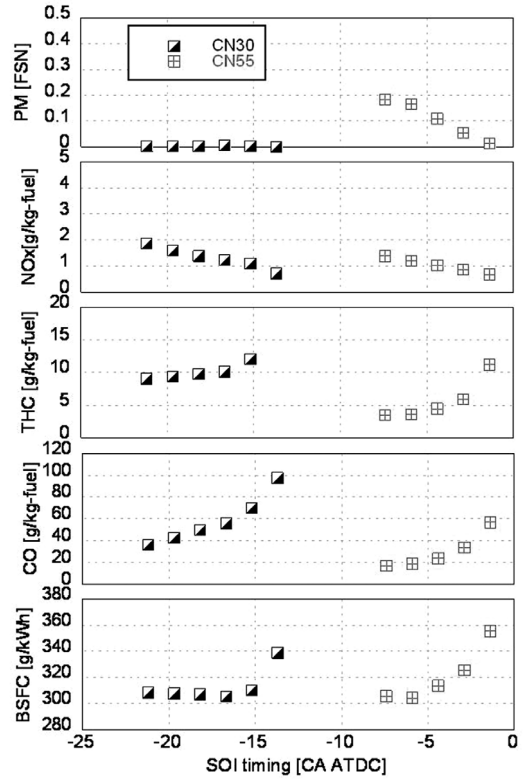


Fig. 1 PM, NOx, THC, CO, BSFC trends with SOI timing

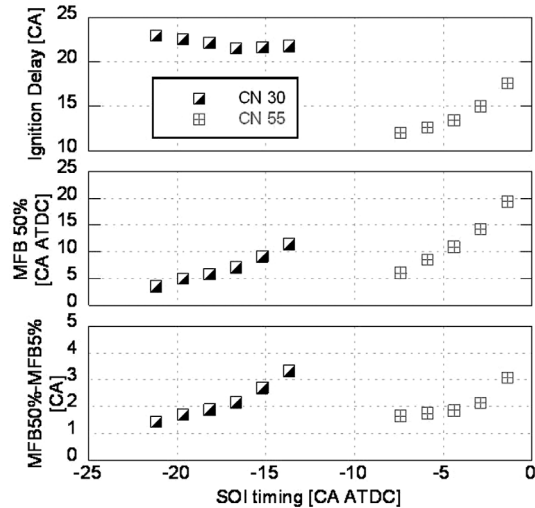


Fig. 2 Ignition delay, MFB50% location, and combustion duration for various SOI timing

연은 증가하였다. 두 세탄가에 대하여 SOI 지각에 따른 착화지연의 추세는 반대 경향을 확인하였다.

또한 MFB 50% 발생 위치는 SOI에 따라 단조롭게 지각되었으며 이는 SOI가 지각됨에 따라서 연소 위상(combustion phasing) 또한 지각됨을 보여준다. 연소기간은 (여기서는 MFB 50% 위치- MFB 5% 위치로 정의) 두 세탄가에 대하여 동일하게 SOI 지각에 따라서 증가하는 경향을 보였다.

CN30의 경우 착화지연 기간이 SOI에 관계없이 20°CA 이상이나 CN55는 이보다 짧은 12~18°CA이었다. CN55 연료는 착화지연 기간이 증가함에 따라 PM 및 NOx는 감소하고 THC, CO는 증가하는 일반적으로 알려진 저온 디젤 연소에서의 배기가스 배출특성을 보였다. 즉, 착화지연 기간 증가에 따른 연료 및 공기 그리고 EGR 가스의 혼합 정도가 증가하여 PM을 감소시키고 다량의 EGR 및 SOI를 지각함에 따라 연소 온도 감소로 인하여 NOx는 저감되고, THC 및 CO는 증가한 것으로 판단된다. 그러나 CN30은 SOI 지각에 따른 착화지연기간의 변화가 작고 착화지연 기간이 20°CA 이상으로 길어서 실험에서 수행한 모든 SOI 영역에 대하여 PM 배출이 거의 없었다. NOx 배출량의 감소 및 THC, CO 배출의 증가는 CN55의 경우와 같이 SOI 지연에 따른 연소 온도 감소로 인한 결과로 판단된다.

두 연료에 대하여 THC, CO 배출 정도를 비교하면 Fig. 1에서 알 수 있듯이 SOI 지각에 따라서 CN30의 경우가 THC, CO배출이 많다. 이것은 저세탄가 연료가 고세탄가 연료보다 착화지연 기간이 상대적으로 길어서 연료와 공기 및 EGR가스의 과혼합(over-mixing)이 증가하고 낮은 연소 온도 때문으로 판단된다.

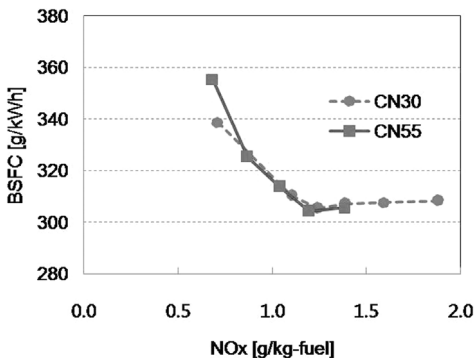


Fig. 3 BSFC vs. NOx emission for various SOI Timing

Fig. 3은 NOx 생성과 BSFC와의 관계를 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 CN30과 CN55의 연료에 관계없이 거의 동일한 경향의 NOx 생성 및 BSFC 결과를 보였다. 즉, NOx 생성이 많으면 BSFC가 증가하였다.

3.2 최적화된 SOI에서 배기가스 특성 비교

상기 시험 결과를 토대로 각 연료에 대하여 배기가스와 연비에 대하여 가중치(weighting factor)를 적용한 가격함수(cost function)를 최소화하는 SOI를 최적화된 지점으로 결정하는데, 본 논문에서는 이를 간략화 하여 최저 BSFC를 갖는 SOI를 최적화된 SOI로 간주하였다. SOI는 CN30의 경우 -16.7°CA ATDC이고 CN55는 -5.9°CA ATDC 이었다. Fig. 4는 각각 연료에 대하여 최적화된 SOI에 대한 실린더 압력과 열방출 특성을 비교하였다. CN30은 CN55와 비교하여 열방출이 완만하게 이루어지고 있음을 알 수 있었다. 또한 냉염(cool flame)이 존재하는 저온 연소 영역(low temperature combustion regime)이 CN30이 CN55 보다 더 깊을 확인하였다. Fig. 5는 최적화 SOI 시기에서 연소 특성 중에서 착화지연과 연소기간으로 비교하였다. 그 결과 CN30의 착화지연과 연소기간이 CN55의 약 150% 이상의 수준임을 알 수 있다.

각각의 연료에 대하여 최적화된 SOI에 있어서 Fig. 6은 PM 및 NOx 배출 특성을, Fig. 7은 THC 및 CO 배출 특성을 그리고 Fig. 8은 연료소모율을 각각 비교하였다. 각각의 그림에서 알 수 있듯이 두 개의 연료가 동등한 연료소모율을 보이며(Fig. 8), 비

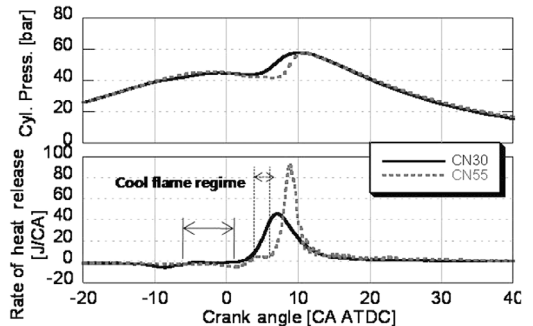


Fig. 4 Cylinder pressure and heat release rates at the optimized SOI timing

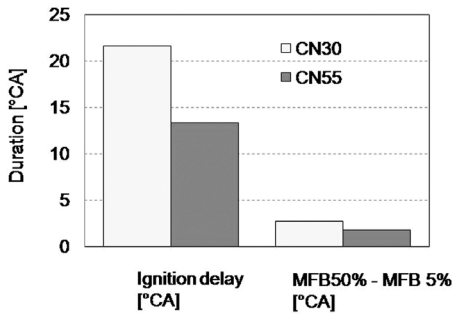


Fig. 5 Ignition delay and combustion duration at the optimized SOI timing

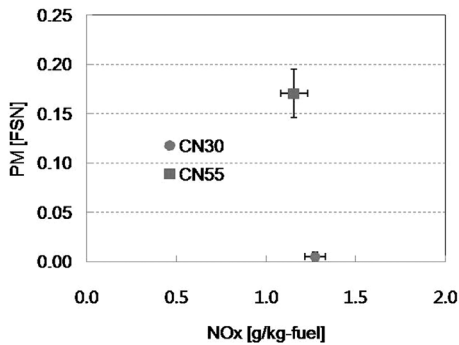


Fig. 6 PM and NOx Emissions at the optimized SOI Timing

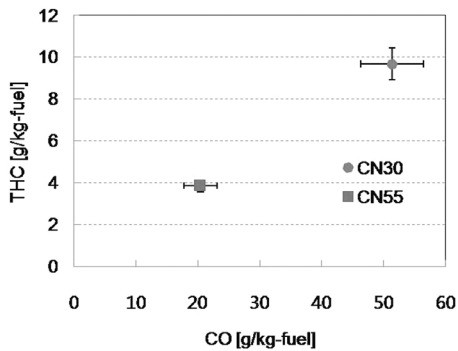


Fig. 7 THC and CO Emissions at the optimized SOI timing

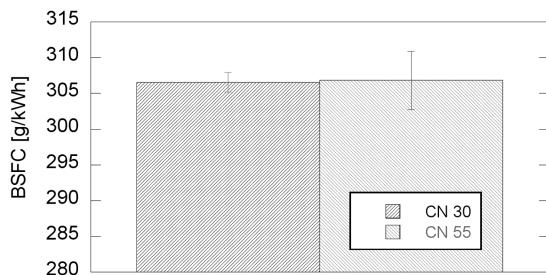


Fig. 8 Comparison of BSFC at the optimized SOI timing

슷한 NOx 배출에 대하여 CN30 연료의 PM 저감 효과가 우수하나(Fig. 6) 착화기간이 길으므로 THC 및 CO 배출이 약 2배 이상 증가하였다(Fig. 7).

4. 결론

본 연구는 1.9L 커먼레일 직접분사 디젤 엔진을 이용하여 1500rpm 2.6bar BMEP 조건에서 다량의 EGR(약 41%)을 적용하여 저온 디젤 연소 영역에서 세탄가에 따른 연소 및 배기가스 배출특성에 대한 실험을 수행하였다. CN30은 SOI가 지각됨에 따라 착화지연기간이 감소하였으나 CN55연료는 착화지연이 단조롭게 증가하였다. CN30의 착화지연은 모두 20°CA 이상으로 CN55연료의 착화지연기간의 150% 수준이었다. 연소기간은 세탄가에 관계없이 SOI 지각에 따라 모두 증가하였다. 최적화된 SOI 시점에서 CN30 연료는 CN55와 비교하여 동등한 연료 소모율 및 NOx 배출량을 보였으며, PM 배출은 거의 없었다. 그러나 THC 및 CO는 CN 55 대비 많이 배출되었다.

References

- 1) H. Akagawa, T. Miyamoto, A. Harada, S. asaki, N. Shimazaki, T. Hashizume and K. Tsujimura, "Approaches to Solve Problems of the Premixed Lean Diesel Combustion," SAE Transactions - Journal of Engines, Vol.109, SAE 1999-01-0183, 1999.
- 2) K. Akihama, Y. Takatori, K. Inagaki, S. Sasaki and A. Dean, "Mechanism of the Smokeless Rich Diesel Combustion by Reducing Temperature," SAE Transactions - Journal of Engines, Vol.110, SAE 2001-01-0655, 2001.
- 3) S. Kimura, O. Aoki, Y. Kitahara and E. Aiyo-shizawa, "Ultra-clean Combustion Technology Combining a Low-temperature and Premixed Combustion Concept for Meeting Future Emission Standard," SAE Transactions - Journal of Fuels & Lubricants, Vol.110, SAE 2001-01-0200, 2001.
- 4) M. P. B. Musculus, T. Lachaux, L. M. Pickett and C. A. Idicheria, "End-of-injection Over-mixing and Unburned Hydrocarbon Emissions

- in Low-temperature-combustion Diesel Engines,” SAE Transactions - Journal of Passenger Cars: Mechanical Systems, Vol.116, SAE 2007-01-0907, 2007.
- 5) M. Han, D. N. Assanis and S. V. Bohac, “Comparison of HC Species from Diesel Combustion Modes and Characterization of a Heat-up DOC Formulation,” Int. J. Automotive Technology, Vol.9, No.4, pp.405-413, 2008.
- 6) M. L. McMillan and Halsall, “Fuel Effects on Combustion and Emissions in a Direct Injection Diesel Engine,” SAE Transactions - Journal of Fuels and Lubricants, Vol.97, SAE 881650, 1988.
- 7) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw Hill, New York, 1988.
- 8) T. Li, Y. Okabe, H. Izumi, T. Shudo and H. Ogawa, “Dependence of Ultra-high EGR Low Temperature Diesel Combustion on Fuel Properties,” SAE 2006-01-3387, 2006.
- 9) A. M. Ickes, S. V. Bohac and D. N. Assanis, “Effect of Fuel Cetane Number on a Premixed Diesel Combustion Mode,” Journal of Engine Res., Vol.10, No.4, pp.251-263, 2009.
- 10) K. Kitano, R. Nishiumi, Y. Tsukasaki, T. Tanaka and M. Morinaga, “Effects of Fuel Properites on Premixed Charge Compression Ignition Combustion in a Direct Injection Diesel Engine,” SAE 2003-01-1815, 2003.
- 11) S. Kee, A. Mohammadi, Y. Kidoguchi and K. Miwa, “Effects of Aromatic Hydrocarbons on Fuel Decomposition and Oxidation Process in Diesel Combustion,” SAE Transactions - Journal of Fuels and Lubricants, Vol.114, SAE 2005-01-2086, 2005.