Transactions of KSAE, Vol. 17, No. 4, pp.79-85 (2009)

Copyright Ⓒ 2009 KSAE
1225-6382/2009/100-11

단기통 엔진에서 대유량 EGR을 통한 저온 연소 특성

조 상 현 · 오 광 철* · 이 춘 범

자동차부품연구원 환경시스템연구센터

Characteristics of Low Temperature Combustion in Single Cylinder Engine by High EGR Rate

Sanghyun Cho • Kwang-Chul Oh* • Chun Beom Lee

Environment Parts R&D Center, KATECH, 74 Yongjeong-ri, Pungse-myeon, Cheonan-si, Chungnam 330-912, Korea
(Received 28 October 2008 / Accepted 20 March 2009)

Abstract : Low temperature combustion regime for the simultaneous reduction of nitrogen oxides (NO_x) and paticulate matter (PM) is demonstrated in single cylinder engine at various operating parameters, such as EGR rate, injection timing, EGR temperature, amount of fuel and swirl rate. Low temperature combustion is accomplished by high exhaust gas recirculation (EGR) rate in this study. Generally, the emission of NO_x almost completely disappears and PM significantly increases in the first decreasing regime of oxygen concentration but after peaking about 10~12% oxygen concentration, PM then decreases regardless of fuel injection quantity. Low temperature combustion regime was extended by low EGR temperature, high injection pressure and low amount of fuel.

Key words : Low temperature combustion regime(저온연소영역), EGR(배기가스 재순환), Particulate matter(입자상 물질), NO_x(질소산화물), Injection timing(분사시기)

1. 서 론

디젤엔진은 높은 압축비와 희박연소로 인하여 높은 연료 경제성을 확보할 수 있고, 많은 기술 발전(CRDI, Cooled EGR, DPF 등)으로 인하여 엄격해진 배기규제 및 연비규제를 충족시키며 환경 친화적인 자동차의 위치까지 발전해 왔다. 그러나 향후 더욱 더 강화되는 배기규제를 만족하기 위해서는 개선된 후처리 장치($DeNO_x$ catalyst, DPF)의 장착과 연소 개선이 필수로 인식되고 있다.

이에 따라 후처리장치 장착에 따른 기술적, 비용적 측면의 부담을 연소 개선을 통하여 낮추어 디젤엔진의 가장 큰 문제점인 입자상물질(PM : Particualte matter)과 질소산화물(NO_x)을 연소 단계에서 동시에 저감할 수 있는 새로운 연소방식에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.[1-3)]

현재까지 많은 연구가 진행되고 있는 연소방식에는 연료를 이른 시기에 분사하여 공기와 충분히 혼합된 상태에서 연소를 시키는 균일 혼합기 압축 착화 방식(HCCI : Homogeneous Charge Compression Ignition)과 대용량 EGR을 이용하여 산소농도를 낮추어 연소 속도를 조절하고 연소온도를 낮추는 저온연소방식(LTC : Low Temperature Combustion) 등이 대표적이다.

균일 혼합기 압축 착화 방식은 연료를 압축 초기에 분사하여 희박 상태에서 연소가 진행되므로 화염 온도가 낮아 질소산화물과 PM의 동시 저감이 가능한 연소 방식이다. 이 연소방식은 희박 예혼합기를 압축착화 하기 때문에 연소 초기 단계에서의 착

*Corresponding author, E-mail: kcoh@katech.re.kr

화가 어렵고, 착화가 되더라도 이미 충분히 균일한 혼합기 상태이므로 혼합기의 조절(Mixing control) 등을 통한 연소 제어에 어려움이 있다. 따라서 최근에는 다단분사 및 EGR을 적용하여 연소율을 제어하기 위한 연구들이 활발히 진행 중이다.[4,5)]

높은 EGR을 이용한 저온연소(Low temperature combustion)방식은 연료 분사조건 등은 일반 디젤 엔진과 유사하지만, 대량의 EGR을 적용하여 실린더 내 산소 농도를 낮추어 연소를 유도하는 방식이다. 부분 예혼합 상태에서 연소가 진행되므로 안정된 착화를 유도할 수 있고, EGR률 변경 등을 통하여 연소 제어가 가능한 장점을 가진다. 그러나 대량 EGR을 적용하기 때문에 연료 분사량에 제한이 있어, 고부하 운전에 적용이 곤란하다.[6-8)]

본 연구에서는 적절한 저온 연소 운전 영역을 결정하기 위하여 단기통 엔진에 대용량의 EGR을 적용하고, 분사조건 및 운전조건에 따른 배기성능 및 동력성능을 비교함으로써 입자상물질 및 질소산화물을 동시에 저감할 수 있는 저온 연소 영역을 파악하였다. 또한, 주요 엔진 운전 변수들이 저온 연소 영역에 미치는 영향을 파악하여 저온 연소 영역의 확대를 위한 방법을 모색하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 이 연구에 사용된 실험 장치를 나타낸 것으로 Table 1과 같은 사양의 단기통 엔진에 대용량 EGR을 공급하기 위하여 배기단에 배압밸브를 장착하고, Fig. 1과 같이 EGR 유로를 설치하였으며, 다양한 EGR 온도 조건을 위하여 EGR 유로에 cooler와 전기히터를 장착하였다. 배기분석을 위하여 포터블 배기분석계(Eurotron, Greenliner 9000)를 설치하고, PM 측정을 위하여 Full-flow 방식의 Opacimeter (Celesco, 107)와 DAQ 시스템(Iotech , Daqbook 2020)을 이용하여 실시간 기록하였다. 그리고 EGR율의 측정을 위해서 배기단과 흡기단에 CO_2 분석계(NDIR)를 설치하였다.

연료분사 조건을 변경하기 위하여 인젝터 드라이버(TEMS, TDA-3200H)와 연료압력조절장치(TEMS, TDA-1100H)를 사용하여 연료분사 조건을 변경하였다. 매 사이클마다의 연소압력을 계측하고(Kistle, 6051B) 자체 제작한 연소해석 프로그램을 이용하여 연소 해석 및 IMEP를 계산하였다.

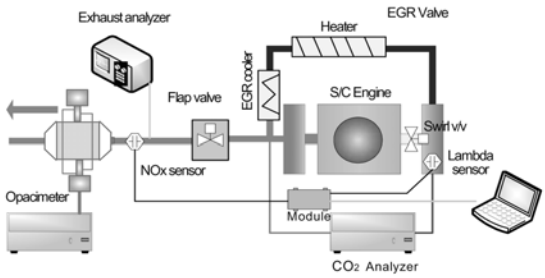


Fig. 1 Schematic of experimental setup

Table 1 Specification of single cylinder engine

Single cylinder engine	
Bore × Stroke	91 mm × 96 mm
Compression ratio	17.7
Displacement volume	624 cc
Injector	Delphi, 5 holes

2.2 실험조건 및 방법

PM 및 NO_x 동시저감을 위하여 본 연구에서 사용한 저온 연소 기법은 대용량의 EGR을 이용하여 실린더내의 산소 농도를 낮추어 연소 속도를 낮추고 이후 혼합정도에 따른 자연스런 연소를 통하여 연소율 및 화염 온도를 조절함으로써 연소실내의 온도를 낮추는 방법이다. 따라서 다양한 용량의 EGR 공급과 함께 기본적인 엔진 운전 변수인 연료 분사압력과 분사량 및 분사시기 등이 저온 연소에 미치는 영향 파악이 필수적이다. 그리고 이와 함께 대량의 EGR을 사용하기 때문에 EGR 조건(온도)에 따라 실린더 내의 연소 조건이 변화하는 경향이 있어 이에 대한 영향을 확인하기 위해 EGR 유로에 cooler와 heater를 동시에 장착하여 EGR 온도를 조절하였다.

연료 분사 조건은 기존의 저온 연소 연구 결과에서 알려진 바와 같이 부분부하 조건하에서 수행되었으며, 동일한 부하 조건을 설정하기 위하여 통상운전 조건하에서(w/o EGR) 각 연료 분사조건별로 동일한 IMEP가 되도록 분사량을 조절하였다. 분사시기는 EGR 등에 따른 MBT 조건을 고려하지 않고, 고정된 분사시기(BTDC 0° ~ BTDC 20°)를 일정간격(크랭

크 각 4도)으로 진각 또는 지각시키며 실험하였다.

EGR 온도는 일반적인 상용 차량의 EGR 냉각온도인 150°C와 최대로 냉각 가능한 온도인 100°C를 기준으로 실험하였으며, 스월비는 가변 스월 밸브를 사용하여 2.5와 2.8에서 수행하였다. 보다 상세한 실험 조건은 Table 2와 같다.

Table 2 Experimental condition

Experimental condition			
Engine speed (rpm)		1200	
Injection pressure (bar)		800, 1000, 1200	
Fuel amount	14 mg/st	IMEP (w/o EGR)	4.1 bar
	15.5 mg/st		4.6 bar
	17 mg/st		5.1 bar
Injection timing		BTDC 0° ~ BTDC 20°	
EGR rate		0 ~ 70%(variable)	
EGR Temp.		100°C, 150°C	
Swirl ratio		2.5, 2.8	

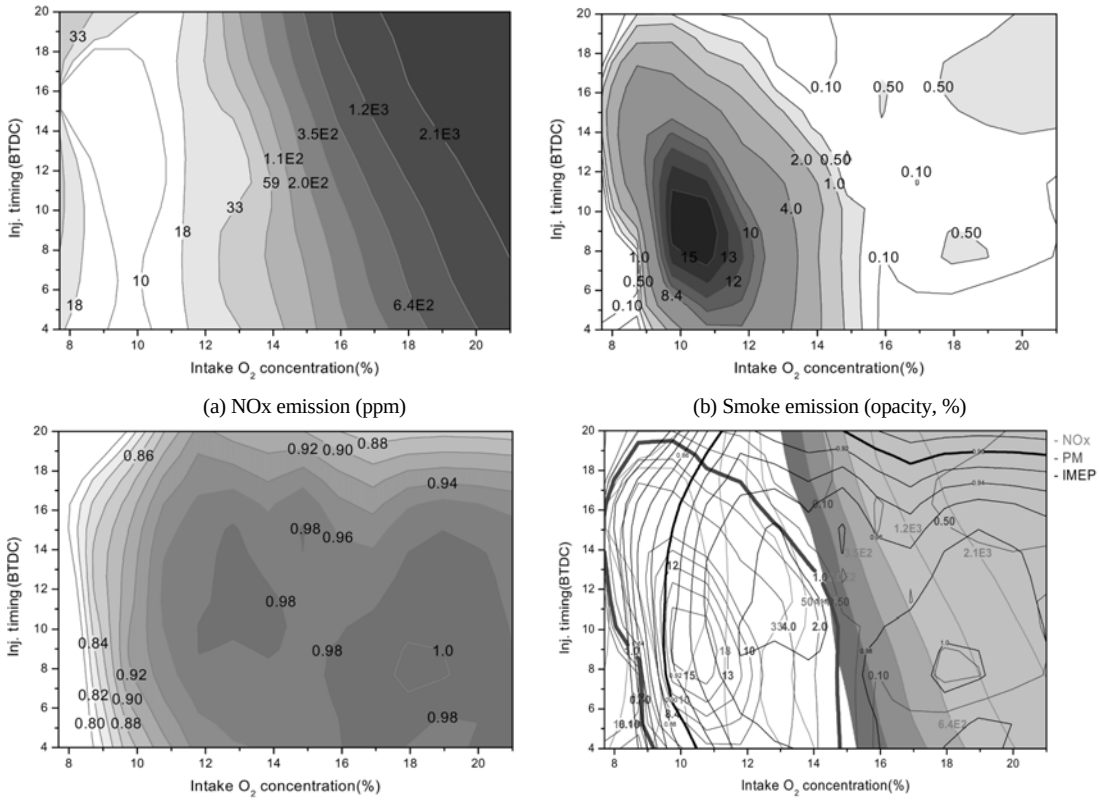
3. 실험결과

3.1 저온 연소 영역 설정을 위한 기준 선정

전술하였듯이 EGR을 이용한 저온연소 기법은 연소실내에서 연소 조절을 통해 PM과 NO_x를 동시에 저감하기 위한 목적이 있다. 그러나 PM과 NO_x를 완전히 제거하는 것이 불가능하기 때문에 저온 연소 영역의 설정을 위해서는 기준이 필요하다.

Fig. 2는 본 연구에서 표현하고자 하는 저온 연소 영역을 대표적으로 나타낸 것으로 엔진 회전 속도 1,200rpm에서 분사 압력과 분사량이 각각 1,000bar, 17mg/st이고, EGR 온도130~160°C, 스월비가 2.8인 조건에서 EGR량(흡기 산소 농도를 낮춤)과 분사시기를 변경하며 취득한 엔진성능(normalized IMEP)과 배기결과(NO_x, PM)를 나타낸 것이다.

Fig. 2의 NO_x(a) 및 PM(b)의 결과와 IMEP(c) 결과로부터 기본적인 저온 연소 영역의 선정이 가능하



(a) NOx emission (ppm)

(b) Smoke emission (opacity, %)

(c) Normalized IMEP (IMEP/$IMEP_{max}$)

(d) Overlapped contour

Fig. 2 Emission & IMEP map on LTC conditions (Inj. P = 1,000bar, Inj. Q = 17mg/st, Engine speed = 1200rpm, Swirl = 2.8)

다. 전체적인 경향을 보면 흡기 산소 농도가 12% 이하(EGR 약 60% 이상)인 조건에서는 NO_x 배출이 거의 없고, 스모크는 급격히 증가하며 IMEP는 감소하는 특징을 나타낸다. 그러나 PM이 감소하여 제거되는 부분에서는 급격한 IMEP의 감소를 가져오고 따라서 위의 조건에서는 일반적으로 알려진 저온 연소 영역이 매우 좁고, 또한 이러한 부분에서는 동력 성능의 저하로 인하여 실제 엔진 적용에 부적합함을 예상할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 가급적 동력 성능의 저하 없이 PM과 NO_x의 동시 저감이 가능한 영역을 저온 연소 영역으로 설정하기로 하였다. 이를 위하여 동력 성능은 MBT 조건이 포함된 분사 조건하에서 취득된 최대 IMEP를 기준으로 90% 이상, PM(opacity)은 1% 이하, NO_x의 경우는 50 ppm 이하(NO_x 최대 배출 수준 2,500ppm)의 기준을 선정하였다. Fig. 2의 (a), (b), (c)의 결과를 중첩하고, 각각의 기준을 표시하면 (d)와 같다. (d)의 결과에서 상대적으로 이른 분사시기(BTDC 18도)와 산소 농도 12% 부근에서 저온 연소 조건으로 선정된 NO_x와 PM 및 IMEP 기준을 만족하는 영역이 존재함을 확인할 수 있다.

3.2 분사압력 및 분사시기에 따른 영향

Fig. 3은 동일한 분사량에서 분사압력을 변경하고, 분사시기 및 EGR량을 변경하며 측정한 PM과 NO_x 및 IMEP 결과를 간략히 나타낸 것이다.

IMEP는 초기 상태(w/o EGR) 기준으로 90% 경계를 나타내며, PM(opacity)은 1% 경계를 NO_x는 50ppm 이하를 표현하였다. 분사압이 증가할수록 PM 이 1%이상 발생 영역이 분사시기와 흡입 공기의 산소 농도(EGR 율) 영역에서 감소하는 것을 알 수 있으며, IMEP와 NO_x의 영향도는 상대적으로 낮음을 확인 할 수 있다. 이는 분사압력이 증가할수록 연료의 미립화 성능이 우수하기 때문으로 판단된다. EGR 율이 점진적으로 증가할수록(흡입공기의 산소 농도가 낮을수록) PM 배출은 Fig. 4와 같이 증가했다가 감소하는 전형적인 배출 특성을 보이고 있으며, 분사시기가 진각 될수록 최대 PM 이 배출 되는 흡입 공기 산소 농도가 점차 낮아짐을 확인 할 수 있다. 이는 분사시기가 진각 될수록 실린더 내 혼합시간

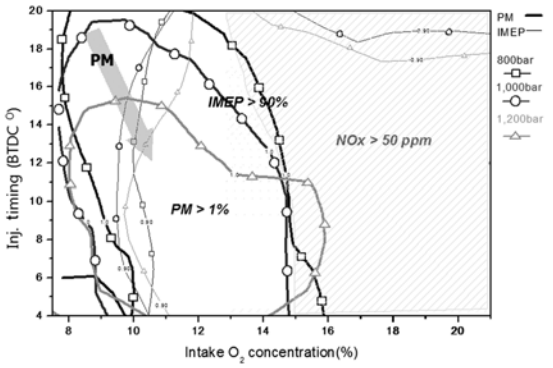


Fig. 3 Emission & IMEP map as injection pressure (Inj. Q=17mg/st, Engine speed=1200rpm, Swirl=2.8)

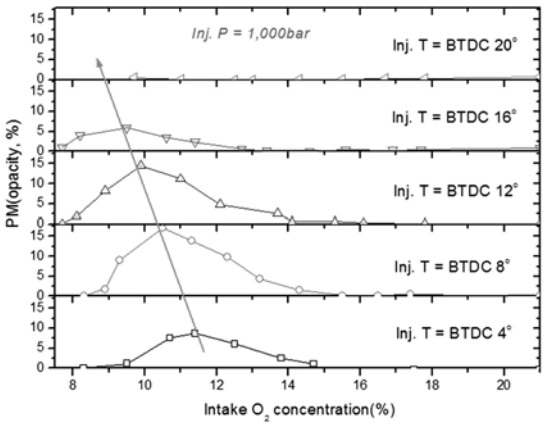


Fig. 4 Emission of PM as injection timing (Inj. P = 1,000bar, Inj. Q= 17mg/st, Engine speed=1200rpm, Swirl=2.8)

이 길어져 압축점화 이후의 연소율의 급격한 증가에 의해 연소실내의 온도가 상대적으로 높기 때문이다.

Fig. 5는 BTDC 4°일 때 PM포집기를 이용하여 측정된 PM 여지 사진과 포집된 PM의 무게를 보여준다. EGR율을 증가시킴에 따라 PM 양이 증가하다가 흡입공기의 산소 농도가 12% (EGR:45%, excess air ratio:1.35)정도에서 최대치를 갖고 다시 감소하기 시작한다. 그러나 사진에서 알 수 있듯이 저온 연소 영역에서 포집된 PM은 일반연소과정에서 발생한 PM과 달리 황갈색을 띄고 있고, Fig. 5에서 알 수 있듯이 SOF성분이 PM 중량의 대부분을 차지하고 있음을 알 수 있다. 이는 연소실내의 온도의 감소에 의한 팽창시기에서의 화염의 급격한 소염에 의해 후

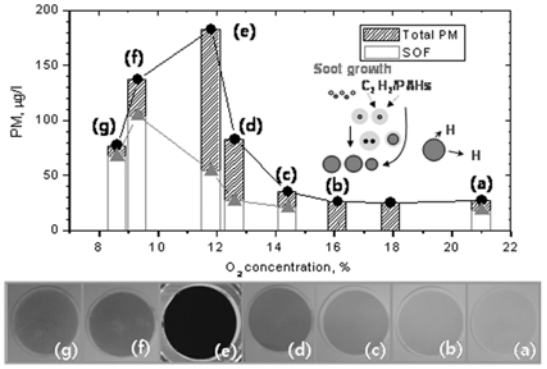


Fig. 5 Soluble Organic Fraction of PM as EGR rate

연소과정에서의 THC 및 PM의 산화가 원활치 않음을 알 수 있다.

3.3 분사량에 따른 영향

Fig. 6은 분사압력 1,000bar 조건에서 분사량(IMEP 및 부하)을 변경하면서 측정한 결과이다. 분사량이 감소할수록 PM 배출 1%이상 영역(opacity 기준)이 급격히 감소함을 알 수 있고, 동일 EGR율 및 분사시기에서 IMEP의 손해도 적어짐을 확인할 수 있다. 그리고 NO_x 배출은 상대적으로 큰 영향이 없어, 연료 분사량이 감소하면서 PM과 NO_x의 동시 저감이 가능한 저온 연소 영역이 넓어짐을 확인 할 수 있다. 이는 연료 분사량이 많은 경우 공연비(A/F)의 감소로 인해 매연 발생이 증가하고 연소 후기에 산화제의 감소로 인한 후 연소 과정의 감소에 기인한다고 볼 수 있다.

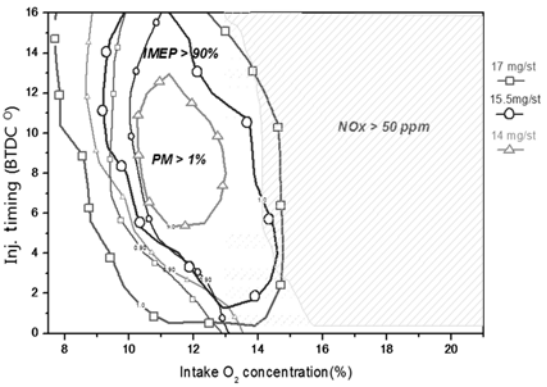


Fig. 6 Emission & IMEP as injection quantity(Inj. P = 1,000bar, Engine speed=1200rpm, Swirl=2.8)

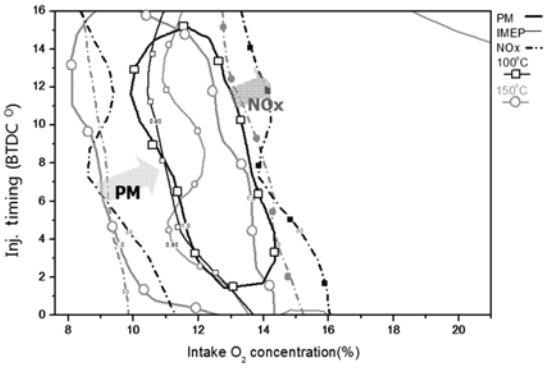


Fig. 7 Emission & IMEP as EGR temperature (Inj. P = 1,000bar, Inj. Q=15.5mg/st, Engine speed=1200rpm, Swirl=2.8)

이와 같이 과급이 없는 자연 흡기 상태에서 대유량 EGR(50-60%)을 사용한 경우, 산화제 양이 제한적이어서, 연료 분사량이 증가하면 연소가 진행됨에 따라 연소실내의 산소 분율이 감소하고, 이에 따라 불완전 연소가 증가하여 일산화탄소(CO) 및 미연 탄화수소(UHC)의 농도가 급격히 증가하게 되고, IMEP의 감소가 두드러져 연료 분사량 제한이 필요함을 알 수 있다.

3.4 EGR 온도에 따른 영향

Fig. 8은 동일한 분사조건에서 EGR 온도변화에 따른 저온 연소영역 설정을 위한 PM, NO_x, IMEP의 경계를 나타낸다. EGR 온도는 전술하였듯이 EGR 라인에 설치된 cooler와heater에 의해 EGR 유량에 관계없이 일정하게 조절되었다.

EGR 온도가 감소할수록 IMEP의 변화 없이 PM이 배출되는 영역과 NO_x 배출이 50ppm이하가 되는 구간 모두 산소농도가 높은(EGR률이 낮은) 영역으로 이동함을 알 수 있다. 이는 낮은 EGR 온도로 인하여 같은 흡입 산소농도에서 실린더 내 연소 온도가 감소하기 때문이다. 또한, EGR 유량이 큰 부분(왼쪽 경계)에서 PM 저감 효과가 크게 나타남을 알 수 있다.

3.5 THC/CO 배출 특성

Fig. 8과 Fig. 9는 EGR 증가에 따른 THC 및 CO의 배출 특성을 나타낸 것으로 PM과 NO_x가 동시 저감되는 영역(산소 농도 12% 이하)에서 THC와 CO의

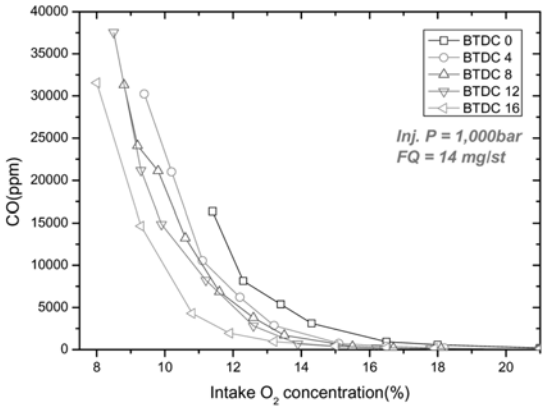


Fig. 8 Emission of CO as intake concentration

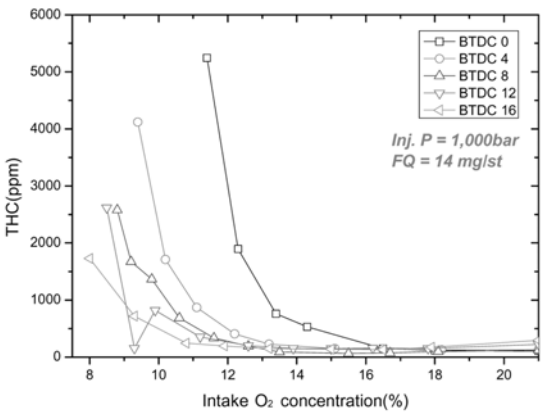


Fig. 9 Emission of THC as intake concentration

배출이 급격이 증가함을 확인할 수 있다. 이는 기본적으로 저온연소가 대량 EGR을 통하여 이루어지기 때문에 연소 후반부로 갈수록 산소 농도가 급격히 감소(3%이하)하고, 연소실내 온도 또한 낮아지기 때문이다. 이와 같은 저온 연소 조건하에서의 THC 및 CO의 배출을 저감하기 위한 별도의 후처리 장치가 필요할 것으로 여겨진다.

3.6 저온연소 영역의 설정 및 확대

Fig. 2 ~ Fig. 10 등의 실험 결과를 토대로 각각의 엔진 운전 조건이 저온 연소 영역에 미치는 영향을 Fig. 10과 같이 간략화 할 수 있다.

연료 분사 압력이 증가할수록 연료의 미립화가 촉진되어 실린더 내의 혼합이 증대되어 PM 발생 시기가 지각되며, EGR 온도가 감소할수록 보다 낮은 EGR률에서 PM과 NO_x가 동시 저감됨을 알 수 있다.

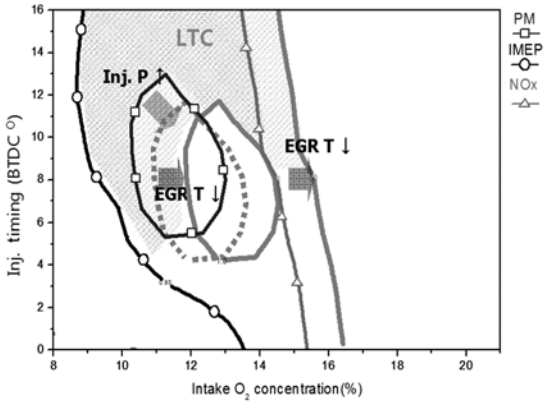


Fig. 10 Region of LTC and Expansion

이와 같은 조건에서 IMEP 변화는 상대적으로 크지 않고, 스월비는 실험 구간에서는 저온 연소 영역에 큰 영향을 주지 않았다. 따라서 산소 농도 12%(50% EGR 율)정도를 중심으로, 분사압력이 높고 EGR 온도가 낮을수록 저온 연소 영역을 확장할 수 있으며, 보다 넓은 분사시기 조건을 확보할 수 있다.

4. 결 론

단기통 엔진에 대용량 EGR을 적용하고, 다양한 연료 분사 조건과 EGR 및 엔진 운전 조건이 저온 연소 영역에 미치는 영향을 파악한 결과는 다음과 같다.

1) 자연 흡기 엔진에서 대용량 EGR을 통하여 흡기 산소 농도를 12% 정도로 낮출 경우에 저온 연소가 가능하다.
2) 분사 압력이 증가할수록 PM 발생 영역이 분사시기 도메인에서 지각되어 발생하여 저온 연소 영역이 확대된다.
3) EGR 온도가 낮을수록 보다 높은 흡기 산소 농도에서 PM과 NO_x의 동시 저감이 가능하다.
4) 상대적으로 분사압력이 높고, 분사량 및 EGR 온도가 낮을수록 저온 연소가 가능한 분사시기 및 산소농도(EGR 률) 구간이 확대된다.

후 기

본 연구는 미래형자동차 사업단의 지원을 받아서 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1) H. Ogawa, N. Miyamoto, H. Shimizu and S. Kido, “Characteristics of Diesel Combustion in Low Oxygen Mixtures with Ultra-High EGR,” SAE 2006-01-1147, 2006.
2) B. Keeler and P. J. Shayler, “Constaints on Fuel Injection and EGR Strategies for Diesel PCCI-type Combustion,” SAE 2008-01-1327, 2008.
3) Y. Wakisaka, Y. Hotta, M. Inayoshi, K. Nakakita, I. Sakata and T. Takano, “Emission Reduction Potential of Extremely High Boost and high EGR Rate for an HSDI Diesel Engine and the Reduction Mechanisms of Exhaust Emission,” SAE 2008-01-1189, 2008.
4) H. Kim, J. Ryu and K. Lee, “A Study on the Characteristics of Mixture Formation and Combustion in the Premixed Charge Compression Ignition,” Transactions of KSAE Vol.14, No.3, pp.1-9, 2006.
5) H. Kim, J. Ryu and K. Lee, “A Study on the Characteristics of Mixture Formation and Combustion in HCCI Engine According to the Various Injection Angle and Timing,” Transactions of KSAE, Vol.14, No.4, pp.20-25, 2006.
6) M. Alriksson and I. Denbratt, “Low Temperature Combustion in a Heavy Duty Diesel Engine Using High Levels of EGR,” SAE 2006-01-0075, 2006.
7) T. Fang, R. E. Coverdill, C.-F. F. Lee and R. A. White, “Combustion and Soot Visualization of Low Temperature Combustion within an HSDI Diesel Engine Using Multiple Injection Strategy,” SAE 2006-01-0078, 2006.
8) S. Kook, C. Bae, P. C. Miles, D. Choi, M. Bergin and R. D. Reitz, “The Effect of Swirl Ratio and Fuel Injection Parameters on CO Emission and Fuel Conversion Efficiency for High-dilution, Low-temperature Combustion in an Automotive Diesel Engine,” SAE 2006-01-0197, 2006.