

압축착화 엔진에서 분사압이 저온연소에 미치는 영향

장재훈*** · 이선엽*† · 이용규* · 오승묵* · 이기형**

Effect of Injection Pressure on Low Temperature Combustion in CI Engines

Jaehoon Jang, Sunyoup Lee, Yonggyu Lee, Seungmook Oh and Kihyung Lee

Key Words: Low temperature combustion(저온연소), Injection pressure(분사압), EGR(배기재순환), Nitrogen oxides(질소산화물), Particulate matters(입자상물질), Modulated kinetics(저온에 혼합연소)

Abstract

Diesel low temperature combustion (LTC) is the concept where fuel is burned at a low temperature oxidation regime so that NO_x and particulate matters (PM) can simultaneously be reduced. There are two ways to realize low temperature combustion in compression ignition engines. One is to supply a large amount of EGR gas combined with advanced fuel injection timing. The other is to use a moderate level of EGR with fuel injection at near TDC which is generally called Modulated kinetics (MK) method. In this study, the effects of fuel injection pressure on performance and emissions of a single cylinder engine were evaluated using the latter approach. The engine test results show that MK operations were successfully achieved over a range of with 950 to 1050 bar in injection pressure with 16% O₂ concentration, and NO_x and PM were significantly suppressed at the same time. In addition, with an increase in fuel injection pressure, the levels of smoke, THC and CO were decreased while NO_x emissions were increased. Moreover, as fuel injection timing retarded to TDC, more THC and CO emissions were generated, but smoke and NO_x were decreased.

1. 서 론

온실가스 저감과 유해배출가스 규제에 대표되는 내연 기관 분야 환경 및 에너지 문제로 인해 전세계적으로 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히 common rail 분사 시스템과 배기 후처리시스템으로 대표되는 디젤엔진 기술의 발전은 저공해와 고연비를 동시에 충족시킬 수 있는 해법을 제공해주고 있으며 이를 이용한 많은 신연소 기술들이 연구되고 있다. 이러한 신연소 기술 중 디젤

저온연소기술(Low temperature combustion; LTC)은 지금까지 디젤엔진에서 문제가 되고 있는 질소산화물(NO_x)과 입자상물질(PM)의 동시저감을 가능하게 해주기 때문에 향후 후처리장치 부담 경감을 통한 비용 절감과 효율 향상 등의 발전을 가져올 것으로 기대를 모으고 있다.

일반적으로 디젤 저온연소를 구현하는 방법으로는 크게 dilution-controlled strategy와 late-injection strategy의 두 가지가 있다⁽¹⁾. 첫 번째 방법은 대용량의 배기재순환(Exhaust gas recirculation; EGR)을 이용하여 흡기 내의 산소농도를 크게 낮춘 상태에서 연료를 조기분사하는 것으로 흡기/연료의 예혼합율을 향상시키고 혼합기의 열용량을 증가시킴으로써 연소온도의 상승을 억제하는 방식이다⁽²⁾. 두 번째 방법은 중간 정도 수준의 배기재순환율과 높은 스웰비 그리고 Top dead center(TDC) 근처에서의 연료분사를 통해 연소가 팽창과정 중에 이루어

(2012년 9월 21일 접수 ~ 2012년 11월 8일 심사완료, 2012년 11월 26일 게재확정)

*한국기계연구원

**한양대학교

†책임저자, 회원, 한국기계연구원

E-mail : sunylee@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7025 FAX : (042)868-7305

지도록 함으로써 낮은 연소온도를 달성하는 것으로 Nissan에 의해 개발된 MK (Modulated Kinetics) 연소 방식을 그 대표적인 예로 들 수 있다⁽³⁾.

이렇게 활성화되는 1600K 이하의 저온 산화영역에서는 NO_x와 soot의 생성이 크게 억제되기 때문에 NO_x와 soot이 동시에 발생하지 않는 커다란 장점이 있다. 하지만 낮은 연소온도로 인한 불완전한 연소의 증가는 CO, THC의 배출을 증가시킬 뿐만 아니라 출력이 감소하고 고부하 운전이 제한되는 등의 단점도 존재한다.

Late injection strategy를 이용하는 MK연소에 관한 지금까지의 연구결과를 살펴보면 먼저 Kawamoto등은 연료를 고압으로 분사하여 연료의 미립화 특성을 향상시키고 TDC 부근의 분사를 통해 혼합기를 팽창과정 중에 연소시킴으로써 연소 온도를 낮출 수 있기 때문에 smoke의 발생을 억제되는 동시에 NO_x가 저감됨을 보여 주었다⁽⁴⁾. 뿐만 아니라 MK연소에 높은 세탄가의 연료를 적용하는 경우 엔진의 압축비를 낮추는 방법이 효과적임을 보고하였다⁽⁴⁾. Kimura등은 연료의 분사시간 중착화가 일어나게 되면 확산화염 구간이 길어져서 NO_x와 PM의 동시저감이 어려움을 보여주었다. 그리고 이를 해결하기 위한 방안으로 하나로 점화 지연 시간이 분사 시간보다 길어질 수 있도록 EGR cooling을 적용할 것을 제안하고 이를 통해 MK 연소영역을 확장시킬 수 있음을 보고하였다⁽⁵⁾. Kimura등은 또한 성공적인 MK 연소의 구현을 위해서는 연소실 형상 변경과 높은 스웰비의 사용을 통해 연소실 내 혼합기의 유동을 최적화하는 것이 필수적임을 확인하였다⁽⁵⁾. Genzale등은 인젝터의 분사각 변화가 MK연소에 주는 영향을 가시화 엔진을 이용하여 알아보았으며⁽⁶⁾ Benajes 등은 대형디젤엔진을 이용하여 조기분사와 늦은분사를 이용한 저온연소에서 PM의 최저배출량이 비슷하다는 조사 결과를 내놓았다.⁽⁷⁾

앞서 살펴본 것처럼 지금까지 이루어진 MK 연소를 이용한 저온연소 구현에 관한 연구들은 대부분 엔진의 형상 변경에 주안점을 두고 이루어져 왔다. 따라서 본 연구에서는 분사압, 분사시기 등 연료 분사에 관련된 보다 실질적인 조건의 변화가 MK 연소에 미치는 영향을 살펴보기 위한 연구를 단기통 엔진을 이용하여 진행하였다. 이번 연구에서는 연소실 형상과 스웰비는 고정된 채로 분사압과 분사시기를 변화시키면서 NO_x와 smoke가 동시에 저감되는 MK연소 구간을 찾았으며 이에 따른 배기배출물의 거동 및 엔진 성능 변화 등에 대하여 조사하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

이번 연구에서 사용된 단기통 압축착화엔진은 상용 대형 디젤엔진의 헤드와 피스톤을 이용하여 제작한 것으로 엔진의 제원은 Table 1과 같다.

Fig. 1은 MK 연소를 구현하고 그 배기 및 출력특성을 파악하기 위해 사용한 시험 및 평가 장비의 구성도이다. 연료 분사장치는 common rail방식을 사용하였다. 연료분사 제어시스템의 경우 연료의 분사시기와 분사기간을 제어하기 위해 Engine Timing Unit(ETU427, AVL)과 Injector driver(ZB-5000, Zenobalti Co.)를 사용하였으며 연료 레일압력 제어를 위해 Common rail PCV driver(ZB-1100, Zenoblati Co.)를 이용하였다.

본 연구에서는 엔진 운전 상태와 관계없이 원하는 EGR 가스 및 흡기유량을 정밀하게 공급하기 위해 choked flow 원리를 이용하는 simulated EGR gas공급장치를 설계, 제작하여 실험에 사용하였다. 또한, 흡배기관 내에 발생하는 맥동이 엔진에 주는 영향을 최소화하기 위해 흡기 매니폴드 전단 및 배기 매니폴드 후단에 surge tank를 설치하였으며 흡기압의 정확한 측정 및 제어를 위하여 흡기 매니폴드에 압력센서를 설치하였다. 흡기 온도를 제어하기 위해 흡기 surge tank 내부에는 히터를 설치하고 흡기관에는 온도센서를 설치한 후 온도 측정값을 기준으로 히터에 대한 PID제어를 수행 하였다. 배기 매니폴드에는 배기가스 샘플링을 위한 sampling probe를 장착하여 이를 배기가스 분석기(AMA i60, AVL) 및 광 투과방식의 opacimeter(490G044, AVL)에 연결, 엔진 배기 배출물을 분석하였으며 연소 후 배출되는 배기가스의 온도를 측정하기 위한 열전대를 설치하였다. 엔진에서 소모되는 연료량을 측정하기 위하여 공급연료 라인에 연료소모량계를 설치하였으며 연료를 일정한 온도(40°C)로 공급하기 위하여 연료 heating & cooling system을 설치하였다.

2.2 실험 방법

연료 분사압과 분사시기가 MK연소에 주는 영향을

Table 1 Single cylinder engine specifications

Items	Values
Displacement Vol.(cc)	498
Bore × Stroke (mm)	83.2 × 92
Compression ratio	17.7

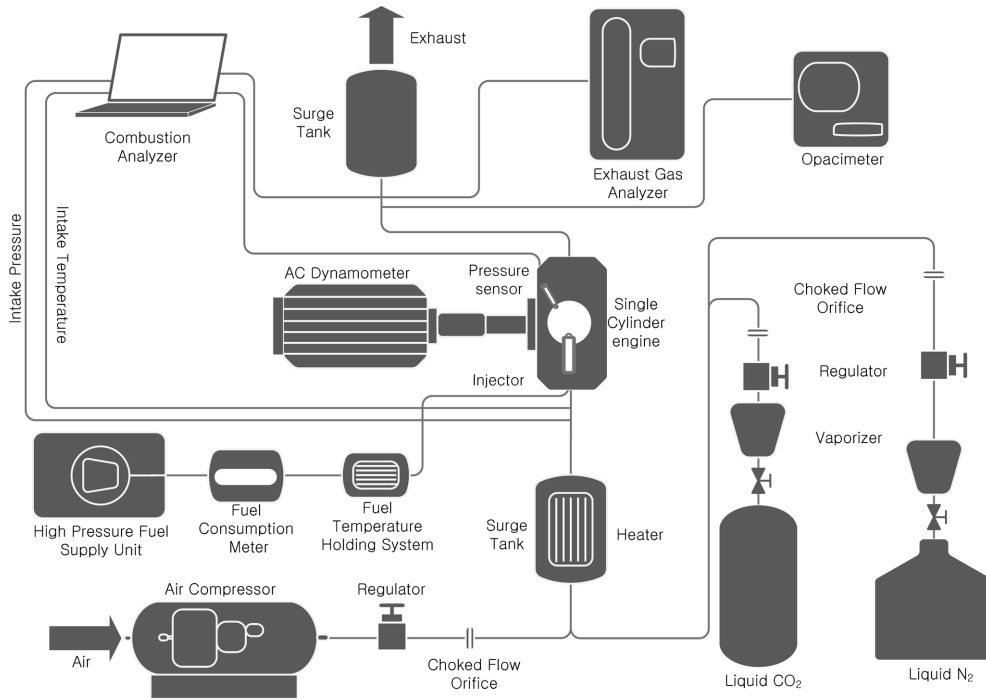


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

알아보기 위하여 본 실험에서는 50% 부하에 해당하는 연료량 조건에서 엔진 회전수와 흡기압을 각각 1500 rpm과 1 bar(절대압 기준)로 고정한 상태에서 실험을 수행하였다. 또한 EGR 을 역시 연소실 내 혼합기 산소농도 16%에 해당하는 31%로 일정하게 사용함으로써⁶⁾ 분사압과 분사시기를 제외한 인자들이 줄 수 있는 영향을 소거하였다.

앞서 언급한 바와 같이 이번 연구에서는 상용 디젤 엔진의 연소실을 변경 없이 그대로 사용했기 때문에 주어진 연소실 형상에서 구현 가능한 MK 연소 영역을 찾기 위한 예비 실험을 먼저 진행한 후 그 영역 내에서 연료 분사특성의 영향에 대한 본 실험을 진행하는 방식으로 연구를 진행하였다. 예비실험에서는 엔진 회전수 1500 rpm에서 연료 분사압과 분사시기를 각각 700 bar에서 1500 bar, 그리고 BTDC 8 Crank angle degree(CAD)에서 ATDC 5 CAD까지 변화시키며 MK연소 구현 여부를 관찰하였다. 그리고, 그 중 분사압 950~1050 bar와 분사시기 BTDC 0~7 CAD의 구간에서 안정적인 MK 연소가 이루어짐을 확인하고 이 영역에서 연료 분사특성 변화의 영향에 대한 본 실험을 단분사 조건 하에서 실시하였다.

참고로 본 연구에서 사용된 실험조건은 Table 2와 같다.

Table 2 Test conditions

Specification	Values
Engine speed (rpm)	1500
Injection pressure (bar)	950~1050
Fuel injection quantity	@50% load
Injection timing (BTDC, CAD)	0~7
Intake Pressure (bar, abs)	1
O ₂ concentration (%)	16
EGR rate (%)	31

3. 실험 결과

이번 연구에서는 본 실험에 앞서 MK 연소 영역을 찾기 위한 예비 실험을 수행하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다. 1) 분사압 950 bar 미만 조건의 경우 낮은 분사압으로 인한 연료 미립화 특성 악화로 TDC에서 연료 분사를 했을 때는 실화가 발생하고 TDC 이전에 분사를 했을 때는 smoke이 너무 많이 발생하기 때문에 저온연소를 구현할 수 없는 분사압 구간으로 판단하여 본 실험의 실험조건에서 제외하였다. 2) 1050 bar를 초과하

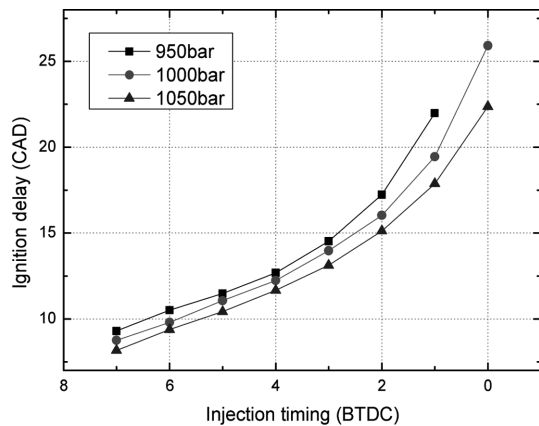


Fig. 2 Ignition delay variations with respect to injection timing and injection pressure

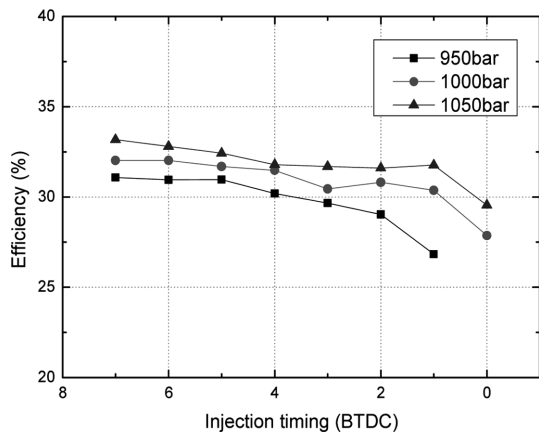


Fig. 3 Indicated thermal efficiency variations with respect to injection timing and injection pressure

는 분사압 조건에서는 연료 미립화 특성이 향상될 것으로 예측되었음에도 불구하고 TDC근방의 분사시기에서 smoke의 발생이 급격하게 증가하였다. 이는 1050 bar를 초과하는 분사압 조건에서는 분사된 연료의 penetration length의 증가로 인해 연료가 피스톤 bowl에 부딪히는 wetting 현상이 발생하기 때문으로 판단되며¹⁾ 이로 인해 이 구간에서는 NO_x와 PM의 동시저감이 이루어지는 저온연소 운전이 불가능하기 때문에 본 실험에서는 제외하였다.

Fig. 2는 분사압 변화에 따른 점화지연(분사시점에서부터 연료가 10% 연소한 시점의 시간으로 정의)을 분사시기를 TDC로 지각시키며 관찰한 그림이다. 먼저 분사압이 증가할수록 따라 점화지연 시간 역시 줄어들게 되는 것을 확인할 수 있는데 이는 분사압이 증가하면 연

료의 미립화 특성을 향상되어 착화에 유리한 혼합기 상태가 더 빨리 형성되기 때문으로 판단된다. 또한 분사시기가 TDC로 접근함에 따라 점화지연 시간이 길어짐을 볼 수 있는데 이는 분사시기가 지각될수록 주연소 구간이 팽창과정 쪽으로 이동하게 되어 연소실 온도 및 압력이 낮아져서 착화에 불리하기 때문이다. 이처럼 길어진 점화지연 시간은 연료/공기의 혼합시간 역시 길어짐을 의미하며 그 결과 예혼합을 역시 증가하게 된다. 참고로 분사압 950 bar의 경우 연료가 TDC에서 분사되었을 때는 착화 가능한 혼합기 형성이 이루어지지 않아 실화가 발생하였기 때문에 그림에는 나타내지 않았다.

Fig. 3은 분사압 변화가 엔진 열효율에 미치는 영향을 분사시기를 TDC로 접근시키면서 알아본 결과이다. 그림에 나타난 바와 같이 분사압이 높아지면 열효율도 증가하는데 이는 분사압이 높을수록 미립화가 잘 이루어져서 연소가 보다 최적의 혼합상태에서 진행되어 불완전연소가 감소하고 연소 기간도 짧아지기 때문으로 판단된다. 참고로 이번 실험은 동일 분사량 조건 하에서 이루어졌기 때문에 열효율의 차이는 IMEP의 차이를 의미한다.

Fig. 3에서는 또한 일반 연소가 이루어지는 분사시기 BTDC 4~7 CAD에서의 분사압 대비 열효율 차이보다 저온연소 영역으로 볼 수 있는 TDC 부근에서 연료 분사가 이루어진 경우의 열효율의 차이가 더 큼을 볼 수 있다. 이는 분사시기가 TDC에 근접할수록 주연소가 팽창과정 중에 이루어지게 되는데 이때 분사압이 증가하여 연소 특성이 향상되면 점화지연 및 연소기간이 단축되어 주 연소의 보다 많은 부분이 팽창과정 초반에 이루어질 수 있기 때문이다.

Figures 4와 5는 분사압 변화에 따른 THC와 CO 발생량 변화를 나타내는 것으로 Fig. 3에서 살펴 본 바와 같이 분사압이 증가할수록 연소효율이 좋아지고 불완전연소가 감소하기 때문에 THC와 CO의 발생량이 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한, 연료 분사시기가 TDC에 가까워짐에 따라 주연소의 많은 부분이 팽창과정 동안 이루어지게 되므로 낮아진 연소온도 및 압력으로 인한 불완전연소 증가로 일반연소 구간(BTDC 4~7 CAD)보다 더 많은 THC와 CO가 발생함을 알 수 있다.

일반적으로 NO_x 배출량은 연소최고온도에 매우 민감하기 때문에 분사압이 증가하여 미립화 특성이 향상되면 NO_x도 증가해야 한다. 하지만 분사압 변화에 따른 NO_x 발생량 변화를 분사시기를 바꿔가며 조사한 결과인 Fig. 6를 살펴보면 분사압 1050 bar에서는 예상대로

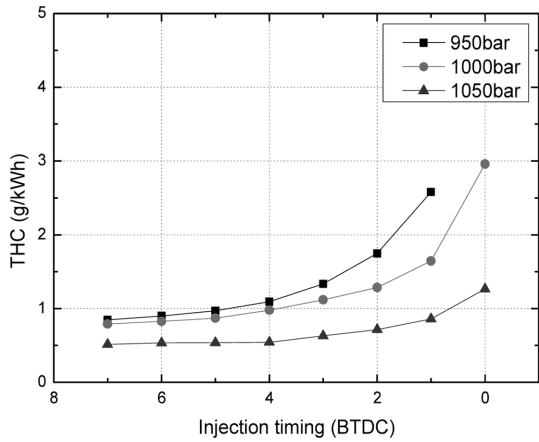


Fig. 4 THC emissions with respect to injection timing and injection pressure

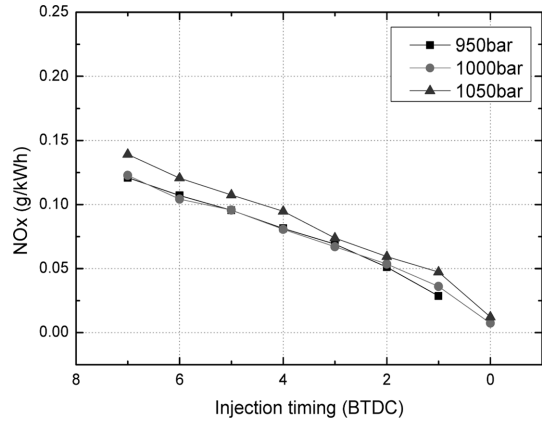


Fig. 6 NO_x emissions with respect to injection timing and injection pressure

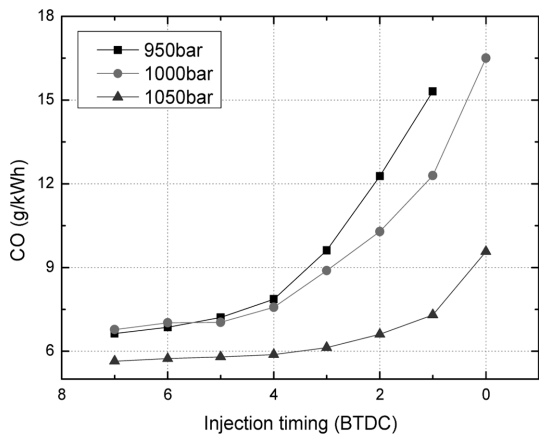


Fig. 5 CO emissions with respect to injection timing and injection pressure

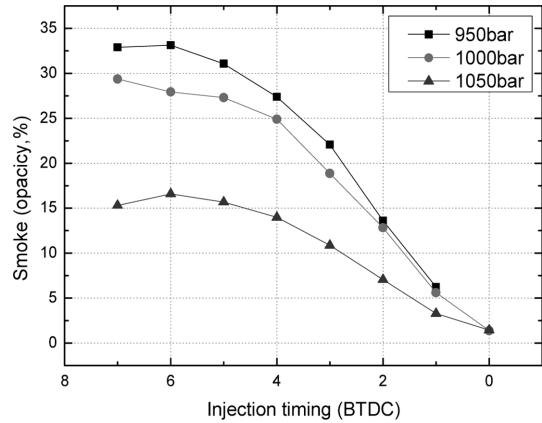


Fig. 7 Smoke results with respect to injection timing and injection pressure

NO_x 배출이 증가한 반면 분사압 1000 bar와 950 bar 조건에서는 NO_x 배출의 증가를 관찰할 수 없다. 이는 ppm 단위로 측정된 NO_x 배출량을 단위 출력당 배출 질량(g/kWh)으로 환산하여 그림에 나타냈기 때문에 생긴 현상으로 Fig. 3에서 볼 수 있는 것처럼 950 bar 보다 1000 bar에서의 IMEP가 더 크다는 점을 감안하면 실제 측정된 ppm 단위의 NO_x는 1000 bar 조건에서 더 많이 배출된다.

Fig. 6에서 NO_x에 대한 분사시기 변화의 영향을 살펴 보면, 분사시기가 TDC에 접근함에 따라 더 많은 연료가 팽창과정 중에 연소되기 때문에 연소온도가 낮아지면서 NO_x 배출량이 크게 감소하는 것을 볼 수 있다. 특히 일반연소 영역인 분사시기 BTDC 4~7 CAD에서는

분사압 차이에 따른 NO_x 배출량 차이가 관찰되는데 반해 TDC에서 연료가 분사되는 경우에는 분사압에 관계 없이 NO_x가 거의 배출되지 않는 저온연소가 이루어지고 있음을 확인할 수 있다.

Figure 7은 연료 분사압 차이에 따른 Smoke의 배출 경향을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 일반 연소가 이루어지는 분사시기 구간에서는 분사압이 증가할수록 Smoke의 배출이 감소하는데 이는 분사압이 높아지고 미립화 특성이 향상되어 PM의 생성이 억제되기 때문으로 판단된다. 한편 연료 분사가 TDC 쪽으로 지각되는 경우 Fig. 2에서 나타난 것처럼 점화 지연 시간이 늘어나게 되어 충분한 연료/공기의 혼합시간이 확보되고 팽창과정에서 주연소가 진행되어 연소온도 또한 매우 낮아지기 때문에 PM 생성이 크게 억제되어 TDC

분사에서는 분사압에 관계없이 PM이 거의 발생하지 않음을 볼 수 있다.

Figures 6과 7로부터 주어진 엔진 운전조건에서 분사압 950~1050 bar, 분사시기 BTDC 1~0 CAD에서 NO_x와 PM를 동시에 억제할 수 있는 MK 연소 방식의 저온연소 운전이 구현 가능함을 확인하였으며 동일 분사량 대비 출력 및 열효율을 고려하였을 때 분사압이 높을수록 유리함을 알 수 있었다.

결 론

이번 연구에서는 연료의 분사시기와 분사압력이 MK 연소방식의 디젤 저온연소에 미치는 영향을 단기통 압축착화 엔진을 이용하여 조사하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 본 실험에 앞서 주어진 연소실 형상 및 스월비에 대해 저온연소를 구현할 수 있는 구간 결정하기 위해 예비실험을 수행하였으며 분사압 950 bar~1050 bar에서 PM과 NO_x의 동시 저감이 가능함을 확인하였다.

2) 본 실험으로부터 연료 분사압이 증가함에 따라 미립화 특성이 향상되고 혼합기 상태가 개선되므로 점화 지연기간은 줄어들고 열효율은 증가함을 확인하였다. 또한 배기 측면에서 미립화가 잘 이루어질수록 불완전 연소가 감소하여 THC와 CO, 그리고 smoke의 발생이 감소하는 반면 NO_x는 증가하였다.

3) 분사시기가 TDC로 지각될수록 팽창과정 동안 연소되는 연료량이 증가하기 때문에 점화지연 기간은 늘어나고 불완전 연소가 증가하게 되며 열효율은 감소함을 확인하였다. 이처럼 증가된 불완전연소는 THC와 CO의 배출을 증가시키는 반면 연소온도의 상승을 제한하기 때문에 smoke과 NO_x의 발생은 줄어든다.

4) 저온연소는 분사압에 관계없이 TDC 근처(BTDC 0~1 CAD)에서의 연료분사를 통해 구현할 수 있었으며 열효율 및 출력을 포함하여 고려할 경우 분사압이 높을수록 유리함을 확인하였다.

후 기

이번 연구는 지식경제부 에너지기술개발사업 국제공동연구 중 수소 및 합산소, 바이오연료 적용 신연소 엔진기술 개발 과제 및 산업원천기술개발사업 중 건설기

계용 저온연소 엔진 시스템 개발 과제의 지원으로 이루어 졌으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- (1) W. F. 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.
- (2) Yonggyu Lee, Jaehoon Jang, Sunyoup Lee and Seungmook Oh, "Comparisons of Low Temperature Combustion Characteristics between Diesel and Biodiesel According to EGR control", Journal of ILASS-Korea v. 16, n. 3, p.119~p.125.
- (3) 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.
- (4) K. Kawamoto, T. Araki, M. Shinzawa and S. Kimura, Shunichi Koide and Masahiko Shibuya, "Combination of Combustion Concept and Fuel Property for Ultra-Clean DI Diesel," SAE 2004-01-1868, 2004.
- (5) S. Kimura, H. Ogawa and Y. Enomoto, "An experimental analysis of low temperature and premixed combustion for simultaneous reduction of NO_x and particulate emissions in direct injection diesel engines", Int. J. Engine. Research, Vol.3, No.4, 2002, pp. 249~259.
- (6) C. L. Genzale, R. D. Reitz and M. P. B. Musculus, "Effect of Piston Bowl Geometry on Mixture Development and Late-Injection Low-Temperature Combustion in a Heavy-Duty Diesel Engine", SAE 2008-01-1330, 2008.
- (7) J. Benajes, R. Novella, S. Arthozoul and C. Kolodziej, "Particle Size Distribution Measurements from Early to Late Injection Timing Low Temperature Combustion in a Heavy Duty Diesel Engine", SAE 2010-01-1121, 2010.
- (8) 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.
- (9) S. M. Aceves and D. L. Flowers, "A Detailed Chemical Kinetic Analysis of Low Temperature Non-Sooting Diesel Combustion", SAE 2005-01-0923, 2005.