

지연분사급속연소방식 예혼합연소 기술에 의한 NO_x, PM의 동시저감

김 장 현* · 최 인 용 · 김 창 일

현대자동차 파워트레인연구소

Simultaneous NO_x, PM Reduction by the Late Injection & Fast Combustion Type Premixed Combustion Technology

Jangheon Kim* · Inyong Choi · Changil Kim

Powertrain Laboratory, Hyundai Motor Company, 772-1 Changduck-Dong, Whasung-City, Gyenggi-do 445-706, Korea
(Received 2 April 2004 / Accepted 23 June 2004)

Abstract : A new combustion strategy called LIFC(Late Injection & Fast Combustion) was developed for simultaneous reduction of particulate matter(PM) and nitrogen oxides(NO_x) in exhaust emission of diesel engines. In this study, effects of injection timing and injection pressure under relatively high EGR rate were investigated. The experiments were conducted in a conventional engine over a range of commercial engine speed. The test engine could be operated in LIFC up to 2000rpm / bmep 5 bar condition with significant reduction of NO_x and PM. The experimental results showed potential for the mechanism of the simultaneous reduction of NO_x and PM from HSDI diesel engines.

Key words : Diesel engine(디젤 엔진), Combustion(연소), Late injection & fast combustion(지연 분사 급속 연소), Premixed combustion(예혼합 연소), HCCI combustion (균일 예혼합 압축착화 연소)

Subscripts

- EOI : end of injection
- SOI : start of injection
- SOC : start of combustion
- ROHR : rate of heat release

1. 서 론

가솔린엔진에서의 연소와 디젤엔진에서의 연소 방식에 대한 경계가 배출가스 규제의 강화에 따라 점점 모호해져 가고 있다. 이에, 공기와 연료를 연소 개시 전에 균일하게 혼합시켜두고, 그 혼합기를 점

화 플러그로 점화시켜 연소시키는 방식인 가솔린엔진의 우수한 배기가스 특성, 디젤엔진의 우수한 연료경제성의 두 가지 장점을 이용하여, 디젤엔진에서, 연료 착화기간을 늘려, 분사개시 후 착화까지의 시간을 취함으로써 혼합기의 균일화가 진행된 후 자기 착화시키는 예혼합압축착화 연소기술 연구가 활발하게 수행되고 있다. 예혼합압축착화 연소기술은 HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition), MK(Modulated Kinetics), CAI(Controlled Auto Ignition) 등의 컨셉으로, 선진 각 Maker 등에서 제안되어 개발이 진행되고 있으나, 기술 개발단계가 성숙되어 양산개발에 이른 기술로는 NISSAN의 MK, TOYOTA의 UNIBUS 연소기술 등으로 극히 예가 적다.

*To whom correspondence should be addressed.
jangheon@hyundai-motor.com, jangheon@daum.net

본 연구에서는, 신연소방식인 예혼합압축착화 연소기술을 당사 소형 HSDI 엔진에 적용하여 차기규제 만족을 목표로 선행개발 가능성을 검토하였다.

예혼합압축착화 연소기술은 착화개시 전에 연료 분사가 종료되어, 연소를 수행케 함으로써, 연료와 공기가 예혼합기 상태에서 연소반응이 진행되므로, 통상디젤연소에서와 달리 착화에서 문제가 되고 있는 Smoke와 NOx 발생이 극도로 억제될 수 있다. 이는 고스윌에 의해 연료의 혼합을 촉진시켜, THC, CO 발생을 억제하고, 분사시기 지연과 대량의 EGR에 의해 착화지연시간을 늘리고, 분사기간 단축(물리적인 착화지연시간 증대)을 위해 연료분사압력을 높이는 방법으로, 지연분사 급속연소(Late Injection & Fast Combustion)를 구현하였다. 그림 1에 본 기술의 개념을 보인다.

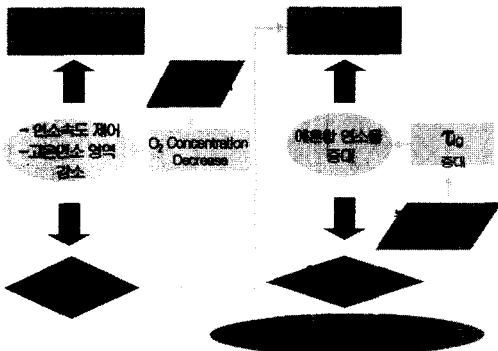


Fig. 1 LIFC concept

본 논문에서는 LIFC 방식 예혼합연소기술의 구현 및 이 기술의 적용에 의한 NOx와 PM 저감효과에 대하여 서술하고자 한다.¹⁾

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험용 엔진

본 실험을 위하여 Table 1과 같은 소형 HSDI 엔진을 사용하였다. 엔진은 저속에서는 고스윌을, 고속에서는 저스윌을 사용함으로써, 엔진조건에 부합하는 스윌 및 유량을 얻는 가변스윌이 가능하도록, Variable Swirl System이 장착되어 있으며, 대량의 EGR을 공급하기 위하여, Cooled EGR System이 구

Table 1 Specification of test engine

ENG. Type		HSDI diesel
Bore x Stroke		83 x 92
Displacement		1991
Compression ratio		16.8
Air charging		VGT
FIE	Pump	Bosch CP1
	Nozzle	7 x 158 x 520

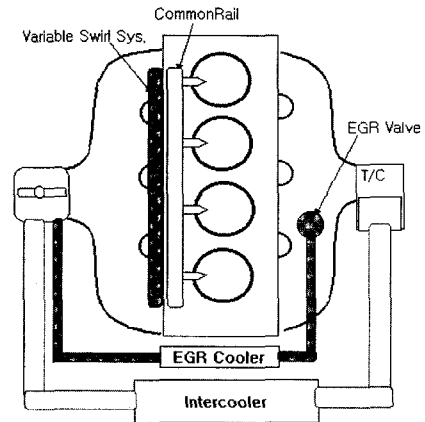


Fig. 2 Experimental engine setup

비되었으며, 수도수를 이용하여 EGR Gas를 원하는 온도까지 냉각되도록 하였다. 연료분사기간 단축을 위하여, 대구경 노즐을 선정하였고, 고압분사를 수행하였으며, 또한, VGT에 의해 흡배압의 조절이 가능하게 되었다. 그림 2에 시험엔진의 상세를 보인다.

본 실험에 사용된 연소실은 Re-entrant Bowl 연소실이며, 연소실 변경은 본 시험에서는 수행되지 않았다.

또한 급속연소에 필요한 고스윌을 얻기 위해 가변스윌 시스템을 채택하였으나, 급변의 실험에서는 적용을 하지 않았다.

2.2 실험 Data 취득방법

실험결과와 열발생율(ROHR)은 Kistler 연소압 센서(6055Bsp)를 이용하여 측정된 연소압을 이용하여 구하였으며, 배기가스 분석은 HORIBA MAXA9100을 이용하여 NOx, THC, CO 및 EGR Rate를 측정하였으며, Smoke는 AVL Smoke Meter를 이용 측정하

였고, 이를 환산하여 PM으로 표기하였다. 연료소비율(bsfc)은 AVL Fuel Balance(AVL733)을 이용하여 측정하였다.

3. 예혼합연소 구현

본 연구의 예혼합연소 개념은 분사시기 지연, 대량의 EGR에 의해, 화학적 착화지연기간(Ignition Delay)을 늘리고, 대구경 노즐 및 고압연료분사에 의해, 물리적인 착화지연기간(분사기간단축에 의한 이득)을 늘려, 연료분사 종료 후에 착화개시 되게 함으로써, 연소실 내에서 분사된 연료가 확산화염이 아닌, 거시적 예혼합 연소를 수행함으로써, NOx, PM을 동시에 저감 시키려는 기술이다.

Fig. 3에 같은 조건의 연소압 곡선을 보인다.

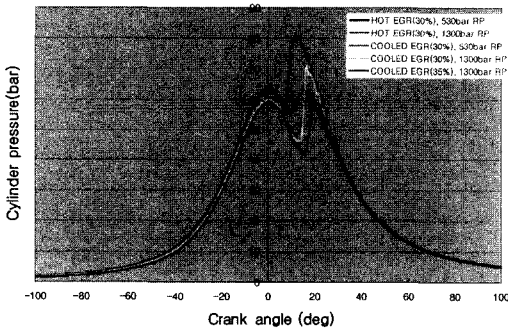


Fig. 3 Cylinder pressure

그림 4에 @2000rpm, 5bar bmep조건에서의 수행된 연소 시험의 열발생율 Pattern을 보인다. 실험변수는 EGR Cooling, EGR Rate, 연료분사압력, 분사시기이다. 시험방법은 EGR Rate 30%, 연료분사압력을 530bar의 시험조건을 Base로, EGR Rate 및 연료분사압력을 1300bar까지 상승시킨 상태로 연소시험을 수행하였다. HOT EGR 30%, 연료분사압력 530bar 조건에서는 착화지연기간이 짧아(예혼합연소 비율이 낮아) 분사종료 전에 연료의 착화가 개시됨으로써 후연소(Late Combustion)가 존재함을 알 수 있으나, EGR Rate의 증대(Cooled 35%) 및 분사압력의 상승(1300 bar)에 의해, 착화지연기간의 증대 및 분사기간 축소가 얻어져, 분사종료 후에 착화가 개시되는, 초기 저온산화반응(영역 I)에 이은 고온

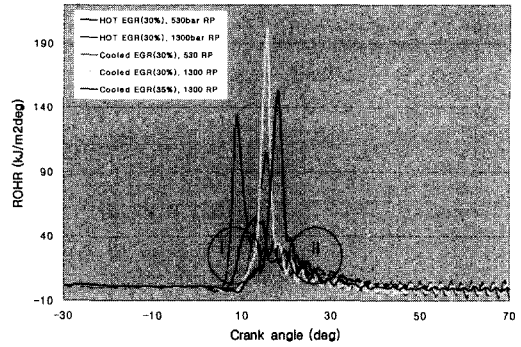


Fig. 4 Trial of premixed combustion(ROHR)

산화반응이 이루어져, 급속연소가 이루어짐으로써, 후연소반응(영역 II)이 거의 없는 예혼합연소가 구현되었음을 알 수 있다.

Fig. 5에 EOI 및 SOC에 의한 예혼합연소 판정법을 보인다. 일반적으로 엔진 ECU Injection Signal 및 인젝터의 Hydraulic Delay를 보상함으로써 계산상의 EOI를 구할 수 있다. 한편, 연소압 센서를 이용, 엔진 연소압을 측정하여, 열발생율을 구하여, SOC를 판별할 수 있다.

이에, 시험 1의 경우와 같이 Hot EGR에 연료분사압력이 530bar의 경우는, 연료분사 개시 2CA 후에 착화(SOC)가 일어남을 알 수 있다. 시험 4의 Hot EGR 30%, 연료분사압력 530bar의 경우는 연료분사 개시 후 8도 CA의 착화지연 후에 연소가 개시되었으나, 분사종료 전에 착화가 있어, 예혼합연소가 구현되지 못하였으며, 시험 4의 경우도 분사종료가 atdc 9.3도 CA이었으나, 착화는 atdc 9도 CA에 발생하여 예혼합연소가 일어나지 못했음을 알 수 있었다.

한편, 시험 5의 경우와 같이 Cooled EGR 35%, 연료분사압력 1300bar의 경우는, 착화지연기간이 길어져(5도 CA), 분사종료(atdc 8.75 CA)후에 착화(atdc 9.5도 CA)가 일어나 비로소 예혼합연소가 구현되었음을 알 수 있었다.

그림 6에 예혼합연소 구현과정에 따른 배기가스 변화 추이를 보인다. 모든 결과는 분사시기에 의해 NOx가 감소되는 경향을 보이나 Hot EGR 30%, 530bar에서, PM이 과도하게 배출되고 있으며, 연료분사압력을 1300bar로 상승시키에 따라 PM

NO	Parameters	SOI	EOI	SOC	Duration
1	HOT EGR 30%, P_rail 530bar	-4	-13	-6	8.5
2	HOT EGR 30%, P_rail 1300bar	-2	-7.3	-5	5.25
3	Cooled EGR 30% P_rail 530bar	-2	-11	-10	8.5
4	Cooled EGR 30% P_rail 1300bar	-4	-9.3	-9	5.25
5	Cooled EGR 35% P_rail 1300bar	-4.5	-8.8	-9.5	5.25

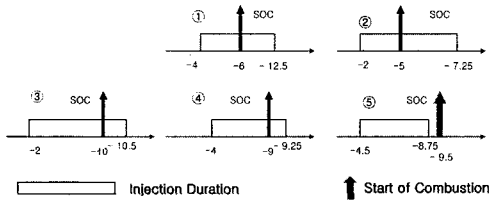


Fig. 5 Relation between EOI and SOC in premixed combustion trial

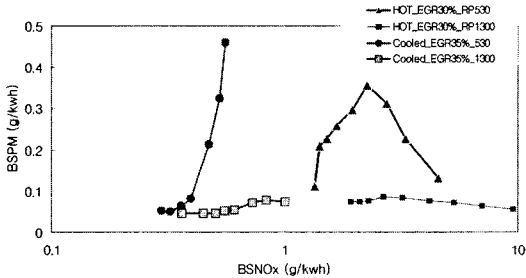


Fig. 6 Trial of premixed combustion (Emission)

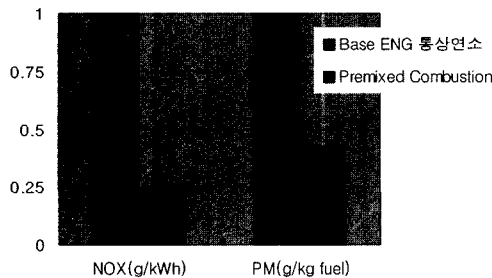


Fig. 7 Trial of premixed combustion (Emission)

은 저감되고, NOx가 증대되는 Trade-off 관계를 보였다. 한편, Cooled EGR 35%, 530bar조건에서는, 급격한 NOx의 저감을 보이나, PM이 과다하게 배출되었으며, 연료분사압력을 1300bar까지 상승시켜, 연료분사시간을 단축시켜야 만이 비로소 예혼합연소가 구현되어 NOx, PM이 동시에 저감됨을 알 수 있었다.

그림 7에 예혼합연소 구현에 따른 Emission의 저감정도를 통상연소의 경우와 비교하였다.

@2000rpm, 5bar bmep조건에서, 최적의 예혼합연소를 통하여, 통상연소 대비 NOx를 75%, PM을 55% 저감시킬 수 있었다.

4. 실험결과 및 고찰

예혼합연소 구현 인자 중, EGR Rate(A/F), 연료분사시기 및 연료분사압력이 연소특성에 미치는 영향을 알아보기 위해, EGR Rate 및 Rail Pressure Swing을 수행하였다.

4.1 EGR Rate에 의한 영향 평가

그림 8에 @2000rpm, 5bar조건에서, 적정 A/F를 알아보기 위하여, 동일 연료분사압력(P_rail=1300bar)에서 EGR Rate를 Swing 한 결과를 보인다. 각 EGR Rate에서 분사시기를 지연시킴에 따라 NOx와 Smoke는 동시에 감소하는 경향을 보이며, EGR Rate가 25%, 30%, 35%, 40%로 증가됨에 따라, 경향이 둔해짐을 보인다. EGR 40%의 경우, NOx는 분사시기에 둔감하나, Smoke는 분사시기에 매우 민감한 변화를 보임을 알 수 있어, bsfc를 고려하면, 이 조건에서의 적정 EGR Rate는 35%임을 알 수 있었다.

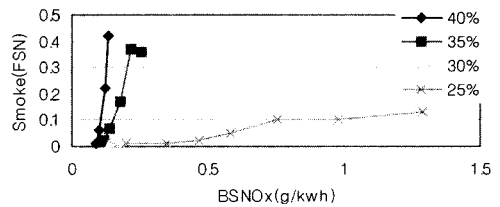


Fig. 8 Effect of EGR rate on emission

4.2 Rail Pressure에 의한 영향 평가

동일 EGR 조건(EGR Rate 35%)에서 예혼합연소에 미치는 연료분사압력의 영향을 그림 9에 보인다. 각각의 연료분사압력조건에서, 연료분사시기의 지연에 의해 NOx는 급격히 감소하나, Smoke의 저감은 완만하다. 연료분사압력을 상승시킴에 따라, Smoke는 목표치에 도달할 수 있었으며, 이는 연료분사압력의 증대를 통한 연료분사시간의 단축효과에 의해 예혼합연소가 구현됨으로써 NOx, Smoke가 동시에 저감된 것으로 판단된다.

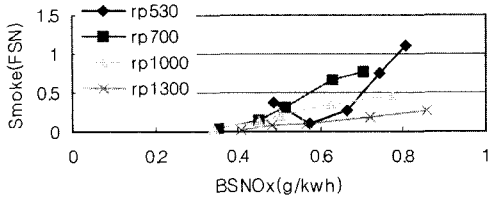


Fig. 9 Effect of rail pressure on emission

4.3 14 Mode Emission 시험 결과

대상엔진에서 구현된 예혼합연소 기술의 차량상대 Emission 달성 수준을 예측하고자, 계산 Emission Mode 시험을 수행하였다. AVL Cruise에 의해 선정된 14 Point를 RPM, Load Point조건으로 시험을 수행하였다.

그림 10에 14 Mode Emission 시험결과를 보인다. 평가 대상 차량은 중형 RV 차량으로, Base 엔진 대비, NOx 50%, PM 75%의 대폭적인 Emission 저감이 예측 되었으며, DPF 없이 Euro-IV Emission 규제 만족의 가능성을 보였다.

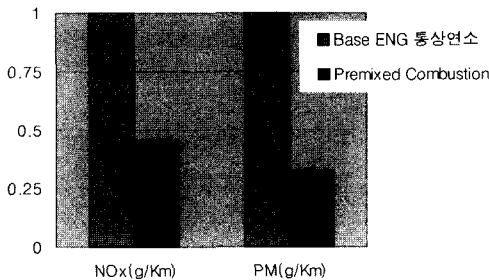


Fig. 10 14 Mode emission test results

5. 결론

지연분사급속연소방식(LIFC) 예혼합연소기술을 당사 소형 HSDI 엔진에 적용, 양산적용가능성을 파악한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) H/W 변경 없이, EGR율의 증대, 연료분사 압력 상승, 분사시기 지연만을 통하여, 예혼합연소를 구현할 수 있었다.
- 2) Base 엔진을 이용, @2000 RPM, 5bar bmep 조건

까지 동등 수준의 연비에서 예혼합 연소 운전이 가능함을 알 수 있었다.

- 3) 예혼합연소 구현을 통하여, 통상연소 대비, 1-3%의 연비희생으로, NOx는 최대 75%, PM은 최대 50%까지 저감시킬 수 있었다.
- 4) 양산적용 개발을 위하여, 예혼합연소를 위한 H/W적용을 통한 영역확대 및 연소계 및 흡배기계의 최적화가 요구된다.

References

- 1) H. Yanagihara, "Combustion in HCCI DI Diesel Engine," JSAE Emission Clean Technology, 20014528, 2001.
- 2) T. Hashizume, T. Miyamoto, H. Akagawa, K. Tsujimura, "Combustion and Emission Characteristics of Multiple Stage Diesel Combustion," SAE 980505, 1998.
- 3) Y. Matsui, S. Kimura, M. Koike, "A New Combustion Concept for Small DI Diesel Engines-1st Report : Introduction of the Basic Technology," JSAE 9730416, 1997.
- 4) Y. Matsui, S. Kimura, M. Koike, "A New Combustion Concept for Small DI Diesel Engines-2nd Report : Effects on Engine Performance," JSAE 9735051, 1997.
- 5) S. Kimura, O. Aoki, Y. Kitahara, E. Aiyoshi-zawa, "Ultra-Clean Combustion Technology Combining a Low-Temperature and Premixed Combustion Concept for Meeting Future Emission Standards," SAE 2001-01-0200, 2001.
- 6) B. Walter, B. Gatellier, "Development of the High Power NADI Concept Using Dual Mode Diesel Combustion to Achieve Zero NOx and Particulate Emissions," SAE 2002-01-1744, 2002.
- 7) K. Akihama, Y. Takatori, K. Inagaki, S. Sasaki, A. M. Dean, "Mechanism of the Smokeless Rich Diesel Combustion by Reducing Temperature," SAE 2001-01-0655, 2001.