

압축착화 엔진에서 가솔린과 디젤연료의 연소 특성에 관한 연구

A Study on Combustion Characteristics of Gasoline and Diesel Fuels in a Compression Ignition Engine

김기현
Kihyun Kim^{*†}

(Received 30 November 2016, Revised 31 January 2017, Accepted 31 January 2017)

Abstract: The combustion characteristics of gasoline and diesel were tested in a compression ignition engine. Both fuels were used with same common rail injection system. Combustion experiment showed that low load condition of 0.45 MPa IMEP (indicated mean effective pressure) was tested in metal and optical engines. The gasoline combustion showed higher hydrocarbon and carbon monoxide emissions but lower soot emission compared with diesel combustion. NO_x emissions were very high at late injection timing but significantly decreased at early injection timing due to the lean combustion resulted from vigorous mixing process. Direct combustion visualization showed that the diesel combustion was dominated by diffusion combustion exhibiting soot incandescence and the gasoline combustion was mostly consisted of premixed combustion showing blue chemiluminescence.

Key Words : Diesel, Gasoline, Compression ignition engine, premixed combustion, lean combustion

— 기 호 설 명 —

IMEP : indicated mean effective pressure
MPRR : maximum pressure rise rate
HC : hydrocarbon
CO : carbon monoxide
NO_x : nitrogen oxides
CA10 : crank angle where 10% of total heat release occurred
CA50 : crank angle where 10% of total heat release occurred

1. 서 론

디젤엔진은 가솔린엔진에 비해 높은 압축비와 희박연소, 펌핑로스 저감으로 인해 열효율이 높고 연료 경제성이 우수하다.¹⁾ 그러나 심화되고 있는 배기 및 연비규제로 인하여 엔진에서의 연소개선이 지속적으로 중요한 과제로 대두되고 있다. 근래에는 기존의 디젤연소 이외에도 다양한 신연소 기술이 제안되어 연구되고 있다. 그 예로서, 균질 예혼합기 압축착화(HCCI; homogeneous charge compression ignition), 부분 예혼합 압축착화(PCCI; premixed charge compression ignition) 등의 기술들이 있다.²⁾

*† 김기현(교신저자) : 신라대학교 융합기계공학부
E-mail : khkim3@silla.ac.kr, Tel : 051-999-6925

*† Kihyun Kim (corresponding author) : College of MICT Convergence Engineering, Silla University.
E-mail : khkim3@silla.ac.kr, Tel : 051-999-6925

이와 같은 신연소 기술들은 연료와 공기간의 혼합특성을 향상시켜 희박 예혼합 연소를 통하여 질소 산화물(NOx : nitrogen oxides)과 매연을 동시에 저감할 수 있다. 연료와 공기간의 혼합을 향상시키기 위하여 조기분사를 사용하여 분사시기와 점화시기 사이의 점화 지연기간을 길게 확보하거나 고압분사를 사용하여 연료의 무화를 향상시키기도 한다.³⁾

최근 연구자들에 따르면, 기존의 디젤 연료보다 기화성이 높고 자발 착화 저항성이 높은 가솔린 연료가 신연소 기술에 더 적합한 연료로 보고되고 있다.^{4,6-10)} 디젤을 연료로 적용한 예혼합 압축착화 기술은 2000년대 초반부터 활발히 적용되어 왔으나, 디젤의 낮은 기화성으로 인해 분사된 연료가 벽면에 충돌하면서 벽면 적심현상으로 연료가 충분히 기화되지 못해 완전 연소에 참여하지 못하거나, 높은 착화성으로 인해 압축행정 초기에 연소가 발생하는 등 연소상 제어의 어려움을 겪어 왔다.⁵⁾ 가솔린 연료는 증류온도가 디젤보다 낮아, 연소실내 같은 온도 조건에서도 더 빨리 기화하는 우수한 기화성을 가지고 있다. 또한 연료의 착화에 대한 저항성을 나타내는 지표인 옥탄가가 높아 동일한 압력과 온도 조건에서 디젤에 비해 더 긴 점화지연기간을 가지며, 자발 착화 온도 또한 250°C 수준으로 디젤에 비해 약 40°C 더 높다. 이에 따라 높은 증발성과 자발 점화에 대한 높은 저항성을 가진 가솔린에 가까운 성질의 연료를 예혼합 압축착화에 적용하여 적용성을 분석한 연구가 Kalghatgi 에 의해 2005년에 보고된 바 있다.⁴⁾ 이어, Johansson 등은 가솔린 연료를 압축착화 엔진에 적용하여 신연소 기술을 구현할 시에 고부하 조건에서 나타나는 성능 특성에 대해 보고하였다.^{6,7)}

가솔린연료는 동일한 분위기 조건(연소실내 온도, 산소농도)에서 분사되었을 때, 높은 기화성으로 인해 주변 공기와 더 균질되게 혼합하기가 용이하고, 낮은 착화성으로 인해 긴 점화지연 기간을 확보할 수 있어서 연료와 공기 간에 혼합 기간을 증가시킬 수 있다. 점화지연기간이 길어지면, 엔진에 따라 장단점이 존재하지만, 디젤엔진과 같은 압축착화엔진의 경우 점화지연기간을 길게 확

보하여 연료와 공기의 혼합을 향상하면서도 연료와 공기 혼합기의 성층화⁹⁾를 통하여 열방출을 단계적으로 일어나게 함으로써 노킹을 방지하게 되면, 매연을 개선할 수 있으므로 특히 연료량이 많은 고부하에서 강점을 나타낼 수 있다.

가솔린 신연소 기술의 개발을 위해서는, 가솔린 연료의 연소실 내 연소 특성에 대한 물리적 특성 분석이 요구된다. 이전의 연구에서는 대부분 성능 엔진의 고부하 조건에서 가솔린연소가 디젤연소에 비해 배기배출물을 개선하면서 동등한 열효율을 확보할 수 있는 측면에 집중하였다면, 본 연구에서는 저부하 조건에서 가솔린연소와 디젤연소를 비교하고, 연소가시화를 통해 가솔린과 디젤의 연소 특성을 물리적으로 가시화 하는 데에 중점을 두었다. 기존 GDI엔진에서 가솔린연소의 화염 가시화를 수행한 연구는 다수 존재한다. GDI엔진에서는 점화플러그로부터 화염전파에 의해 연소가 개시 및 진행되지만, 압축착화 엔진에서는 점화원이 없이 자발 착화가 일어나기 때문에 연소 메커니즘이 다를 수 있는데 이를 가시화한 기존 연구가 부족한 실정이다. 따라서 본 연구는 성능 엔진과 가시화엔진의 결과를 동일한 부하조건에서 시험하여 비교 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 연구를 위해 가솔린과 디젤을 4행정, 압축착화방식 단기통 실험 엔진에 연료로 사용하였다. 엔진의 제원은 Table 1과 같다. 엔진은 보어(Bore)와 스트로크(Stroke)가 각각 100, 125 mm이며 압축비는 17.4이다. 실험장치의 개념도는 Fig. 1과 같다. 82 kW급 교류 동력계를 사용하여 엔진 속도를 제어하였다. 가솔린과 디젤 모두에 동일한 Bosch 3세대 커먼레일 분사장치가 사용되었다.

Table 1 Engine specifications

Engine type	Single cylinder direct injection compression ignition engine
Bore×Stroke	100X125 mm
Compression ratio	17.4:1
Displacement	980 cc

Table 2 Properties of gasoline and diesel

Properties	ASTM	Gasoline	Diesel
Cetane number	D4737	-	47
Octane number	D2699	92	-
Liquid density (kg/m ³)	D1298	750	826
Lower Heating Value (MJ/kg)	D3338	43.1	42.6
Kinetic Viscosity@40°C	D445	0.7	2.6
Distillation point(T90, K)	D86	426	616

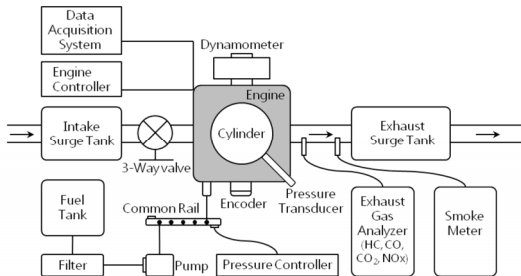


Fig. 1 Engine schematics

실험에 사용한 가솔린과 디젤의 물성치는 Table 2에 나타나 있다. 가솔린은 디젤에 비하여 낮은 밀도, 점도 특성을 가지고 있으며, 증류 온도 범위가 디젤에 비해 매우 낮다. 커먼레일 내의 연료 압력은 압력 제어 장치(ZB-1200, Zenobalti Co.)로 제어하였으며, 연료 분사시간은 인젝터 드라이버(IDU 5000B, Zenobalti Co.)로 제어하였다. 흡기 공기는 흡기압력의 맥동을 방지하기 위하여 흡기 서지 탱크를 통해 공급하였다. 과급을 위하여 최대 0.5 MPa 가압 가능한 외부의 별도의 압축기를 사용하였으며, 과급압력은 0.14 MPa로 고정하였고, 가솔린과 디젤연소에 동일하게 적용되었다.

실린더 압력은 압전 방식의 압력센서(6052C, Kistler)를 사용하여 측정하였으며 100 cycle 기준으로 0.2도 크랭크 각 단위로 취득하였다. 배기 가스는 가스 분석기(MEXA 1500D, Horiba)에 의해 분석되었으며, 모든 측정가스의 측정오차는 ±1% 이내이다. 매연의 경우 스모크 미터(415S, AVL)에 의해 측정 및 분석되었다. 측정오차는 5 µg/m³이다. 가스와 매연은 3번 측정하여 평균하였다.

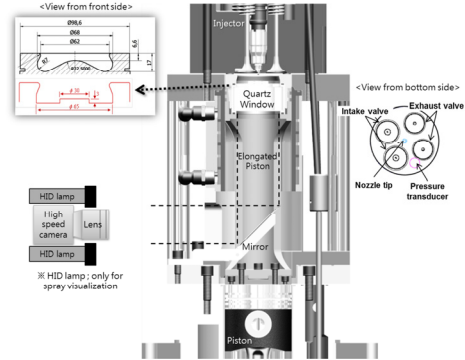


Fig. 2 Optical engine setup

연소 가시화 시험을 위하여 가시화 엔진을 사용하였다. 가시화 엔진 시스템의 단면이 Fig. 2에 나타나 있다. 확장 피스톤이 설치되었으며, 피스톤 헤드 하단부에 45도로 기울어진 거울을 통해 분무 및 연소 현상을 고속카메라 (Phantom V 7.1, Vision Research Inc.)를 통해 촬영하였다.

2.2 실험 방법

엔진성능 및 가시화 실험 조건에 대하여 Table 3에 나타내었다. 엔진속도는 1200 rpm, 분사량은 가솔린 기준 20 mg/stroke, 디젤은 발열량을 고려하여 20.2 mg/stroke 분사하였다. 이는 도시평균 유효압력(IMEP; indicated mean effective pressure) 0.45 MPa 수준으로 전체 부하의 20% 조건이다. 본 부하조건을 선정한 이유는 고부하 조건에서는 다양한 기존연구에서 시험한 바 있어 본 연구는

Table 3 Experimental conditions

Description	Specification
Fuel	Diesel, Gasoline
Engine speed [rpm]	1200
Injection quantity [mg/cycle]	20 (gasoline) 20.2 (diesel)
Injection pressure [MPa]	40
Injection timing [CAD ATDC]	-30 ~ 0
Intake pressure [MPa]	0.14
Intake temperature [K]	293
Coolant temperature [K]	358

저부하 조건에서의 연소 특성을 시험하고자 하였다. 또한 성능엔진 결과와 가시화엔진 결과를 매칭하여 분석하기 위하여 가시화엔진에서는 연소 가시화가 가능한 저부하 조건을 본 운전 조건으로 선정하였다. 분사압력은 40 MPa에 고정하고, 분사 시기는 -30~0 CAD ATDC(crank angle after top dead center) 범위로 변화시켰다. 분사시기에 따라 연료가 분사되는 연소실 내부 분위기가 상이하므로 연료와 공기의 혼합특성이 달라진다. 따라서 연소특성에도 영향을 미친다. 가솔린의 경우 -30 CAD ATDC 이전에 분사하는 경우 연료와 공기의 과도한 혼합으로 인해 실화가 발생하여, 엔진운전이 불가하였다. 따라서 위의 분사시기를 선정하였다.

3. 실험결과 및 토론

3.1 분사시기에 따른 가솔린과 디젤의 연소 및 배기 특성

Fig. 3은 분사시기에 따른 가솔린과 디젤의 연소 특성을 나타낸다.

엔진의 출력을 나타내는 지표인 IMEP가 표현되어 있다. 분사 개시시점부터 연료의 10%가 연소된 지점(CA10: crank angle where 10% of total heat release occurred)까지의 기간으로 정의된 점

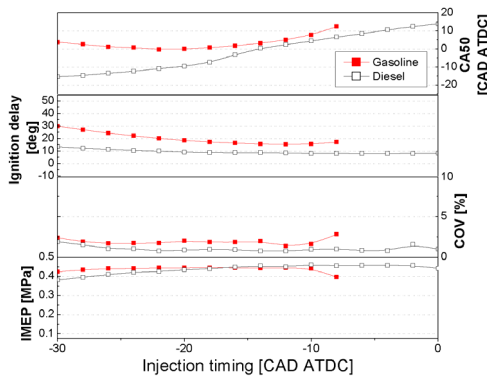


Fig. 3 Combustion characteristics of gasoline and diesel according to the injection timing (engine speed: 1200 rpm, injection quantity: 20 mg/stroke for gasoline)

화지연기간(ignition delay)을 나타냈다. 연소상은 연료의 50%가 연소된 지점(CA50: crank angle where 50% of total heat release occurred)으로 나타났다. 가솔린, 디젤 연료 모두 분사시기 -10 CAD ATDC 근방에서 가장 높은 IMEP를 나타냈는데, 이는 연소상이 상사점 근방에서 형성됨으로써 최대의 열변환 효율을 얻을 수 있기 때문이다. 분사시기가 진각됨에 따라 디젤은 IMEP가 감소하나, 가솔린은 -30 CAD ATDC 영역까지 높은 IMEP를 보였다. 이는 가솔린의 경우 점화지연기간이 길게 나타나 이른 분사시기 조건에서도 긴 점화지연으로 인하여 연소상이 상사점 근방에서 형성되기 때문이다. 반면 디젤연소는 점화지연이 짧기 때문에 분사시기가 진각되면 연소상이 함께 진각되어 IMEP가 하락한다.

Fig. 4는 분사시기에 따른 가솔린과 디젤 연소의 열방출률을 나타낸다. -10 CAD ATDC의 늦은 분사시기에서 두 연료를 비교하면, 가솔린 연소는 열방출 시작 시기 즉 연소 시작 시기가 늦고 연소기간이 짧으며, 열방출 최고값이 높은 예혼합 연소의 형태이며, 디젤 연소는 연소기간이 길고 짧은 예혼합 연소와 긴 확산 연소가 혼합된 형태를 보인다. 이는 두 연료의 점화지연 기간 차이에 따른 주변 공기와의 혼합 특성 차이에 기인한 것이라 볼 수 있다.

변 공기와의 혼합 특성 차이에 기인한 것이라 볼 수 있다. 본 실험에서는 배기가스재순환이 적용되지 않았으며, 과급압력이 고정되어 외부공기

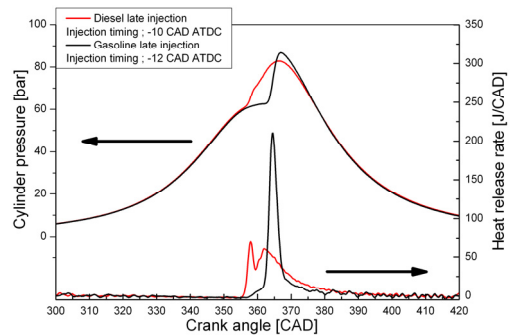


Fig. 4 cylinder pressure and heat release rate of gasoline and diesel at late injection timing

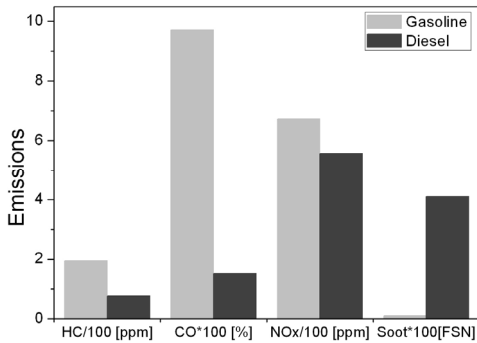


Fig. 5 Emissions of gasoline and diesel combustion at late injection timing

가 연소실내로 공급되었다. 또한 동일한 분사시기 조건에서 디젤과 가솔린 모두 거의 동일한 연소실내 분위기온도, 압력 조건에 연료를 분사하게 된다. 따라서 긴 점화지연기간을 가지게 되면 연료와 공기가 혼합할 시간을 추가로 더 확보할 수 있다. 분사시기가 진각됨에 따라 디젤 연소는 연소상이 진각되고, 가솔린 연소는 상대적으로 상사점 근방에서 연소가 일어나므로 가솔린연료가 공기와 혼합할 수 있는 시간을 더 확보할 수 있다.

Fig. 5는 -10 CAD ATDC 분사시기에서 가솔린과 디젤의 배기배출물 경향을 나타낸다. 불완전 연소 생성물인 탄화수소 (HC; hydrocarbon)과 일산화탄소 (CO; carbon monoxide)의 경우 가솔린 연소가 디젤 연소에 비해 전반적으로 매우 높은 것을 알 수 있다. 이는 가솔린의 경우 긴 점화지연기간으로 인해 주변 공기와의 촉진된 혼합 과정에 의해 희박한 혼합기의 연소가 증가했기 때문이다. 또한 가솔린의 높은 기화성으로 인하여 연료의 기화가 빨리 발생하고 이로 인해 주변공기와의 혼합이 더 활발하게 이루어지면서 희박한 혼합기 형성을 촉진할 것으로 예측할 수 있다.

질소 산화물의 경우 가솔린이 디젤보다 약 30% 정도 높은 수준을 나타냈다. 질소산화물은 연소온도와 혼합기의 당량비에 영향을 받는다. 급격한 열방출을 나타낸 가솔린의 경우, 희박한 혼합기도 존재하지만, 대부분의 연소가 이론 공연비에 가까운 영역에서 연소된 것으로 판단되며, 짧은 연소

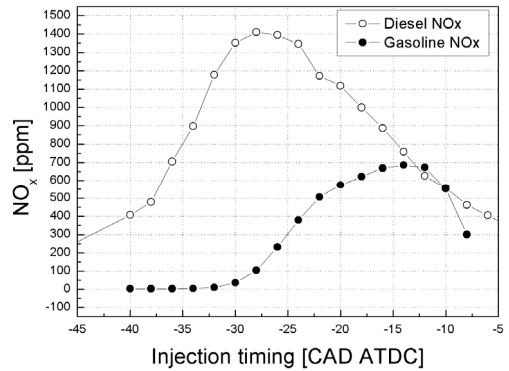


Fig. 6 NOx emission characteristics of gasoline combustion according to the injection timing

기간 동안 급격한 열방출로 높은 연소온도가 형성되면서 다량의 질소산화물이 배출된 것으로 보인다. 매연 배출물의 경우, 가솔린이 디젤에 비해 90% 이상 저감되는 결과를 보였다. 가솔린을 적용한 압축착화엔진의 기존 연구에서 질소산화물 저감을 위해 분사압력을 감소할 경우 매연 배출물이 증가하는 특성이 보고되었다. 본 연구에서도 200 bar 수준의 분사압력에서는 가솔린 연소에서도 매연이 0.5 FSN 이상 발생하였으나 질소산화물이 저감되었다. 따라서 매연 배출물을 억제하기 위해서 본 실험부하조건에서 약 400 bar 이상의 분사압력이 필요한 것을 알 수 있다. 동일한 분사압력 조건에서 가솔린이 디젤대비 매연이 저감된 것은 연료와 공기의 혼합이 활발하고 대부분이 예혼합된 혼합기로부터 연소가 발생하여 농후한 영역이 대폭 줄어들었기 때문으로 판단된다.

Fig. 6은 분사시기에 따른 가솔린 연소의 질소산화물 배출 경향을 나타낸다. 주목할 점은 늦은 분사시기조건에서는 앞서 Fig. 5에서 확인한 바와 같이 가솔린 연소가 높은 질소산화물 배출물을 보이나, 분사시기가 진각됨에 따라 대폭 저감된다는 점이다. 이는 분사시기가 진각됨에 따라 점화지연기간이 증가하기 때문에 연료와 공기의 혼합시간이 증가하고, 이론공연비에 가까운 혼합기보다는 희박한 혼합기의 비중이 증가하면서 질소산화물이 주로 생성되는 이론공연비 연소조건과 고온의 연소조건 모두를 피하기 때문으로 판단된다.

앞서 Fig. 4에서 가솔린연소는 -30 CAD ATDC의 이른 분사시기에서도 긴 점화지연기간으로 인하여 높은 IMEP를 나타내는 특성을 확인하였다. 즉 가솔린 연소의 경우 기존 디젤 연소처럼 -10 CAD ATDC 근방의 늦은 분사시기보다는 다소 진각된 분사시기를 사용하는 것이 높은 열효율과 배기배출물의 저감에 유리하다는 것을 알 수 있다.

3.2 분사시기에 따른 가솔린과 디젤의 직접 연소 가시화

Fig. 7은 가시화 엔진에서 앞서 실험한 조건인 -10 CAD ATDC 분사시기 조건에서 가솔린과 디젤의 직접 화염 가시화를 통해 취득한 이미지를 나타낸다. 위쪽 행이 디젤의 연소 이미지, 아래의 행이 가솔린의 연소 이미지이다. 흰색으로 표시된 경계는 피스톤 퀴츠창의 경계이다.

화염 이미지로부터, 디젤이 가솔린에 비해 이른 화염 발달 및 연소 시작을 나타내는 것을 알 수 있다. 이는 앞서 성능 단기통 엔진 시험 결과에서도 확인하였듯이, 디젤 연료의 짧은 점화 지연기간 때문이며, 분사기의 각 분공으로부터 분무 축을 따라서 적갈색의 확산 휘염(luminous flame)이 발달하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 노란색, 적갈색 화염은 대부분 연소로부터 생성된 매연의 백열 현상(incandescence)에 의해 기인하는 것으로 알려져 있다.

가솔린 연소의 경우 디젤에 비해 상대적으로 긴 점화지연 기간 후에 열방출 개시와 함께 청염(non luminous blue flame)이 나타나게 되는데, 이와 같은 청염은 연소과정 중 발생하는 중간생성

물에서 방출되는 화학적 발광 신호로 예혼합연소에서 주로 발생한다. 기존 GDI 엔진에서는 점화플러그로부터 화염이 전파하면서 연소가 진행되고 일부 농후한 영역에서 휘염이 발생한다. 그러나 본 연구에서 가솔린연소는 압축착화이므로 연소실 전반에 걸쳐 거의 동시에 예혼합 연소 화염이 발생하여 짧은 시간동안에 연소가 일어나고 화염이 소멸된다. 또한 휘염이 거의 발생하지 않는다. 이는 가솔린의 긴 점화지연 기간과 높은 기화성으로 인해 연소가 발생하기 전 주변공기와 잘 혼합된 다음, 연소실내 분위기 온도와 압력조건이 연소에 적합한 조건이 되면 혼합기가 동시에 연소가 발생하기 때문으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 가솔린 직접분사식 압축착화 엔진의 연소의 특성 연구로서, 가솔린과 디젤을 동일한 엔진 속도, 분사압, 분사시기 영역에서 연소실 내로 분사했을 때 실험적 연구를 수행하였다. 다음과 같은 결론을 도출하였다.

가솔린은 디젤에 비해 긴 점화지연 기간 및 직각된 연소상을 나타냈으며, 이로 인해 진각된 분사시기 조건에서 디젤에 비해 높은 IMEP를 나타냈다. (가솔린 0.43 MPa, 디젤 0.38 MPa) 이른 분사시기(-30 CAD ATDC)에서 가솔린은 희박 예혼합 연소를 통해 높은 IMEP를 유지하면서 질소 산화물을 94% 저감할 수 있었다.

엔진 내 연소가시화 결과, 가솔린 연소는 디젤 연소에 비해 짧은 연소 기간 동안 예혼합 연소를 나타내는 청염이 지배적으로 나타났다.

References

1. J. Dec, 2009, "Advanced Compression-ignition engines-understanding the In-cylinder Process", Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 32, No. 2, pp. 2727-2742.
2. F. Zhao, T. Asmum, D. Assanis and J. Dec, 2003, "Homogeneous Charge Compression

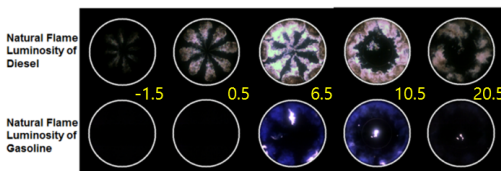


Fig. 7 Natural flame luminosity of the diesel and gasoline at late injection timing (engine speed: 1200 rpm, injection quantity: 20mg/stroke)

- Ignition (HCCI) Engines", SAE International 2003; Warrendale, PA, ISBN 978-0-7680-1123-4.
3. S.H. Jung, 2010, "Combustion Characteristics of HCCI Engine Fueled DME and Natural Gas", Journal of The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 14, No. 3, pp. 13-18.
 4. G.T. Kalghatgi, 2005, "Auto-ignition Quality of Practical Fuels and Implications for Fuel Requirements of Future SI and HCCI Engines", SAE International 2005; paper No. 2005-01-0239.
 5. S. Kimura, O. Aoki, Y. Kitahara and E. Aiyoizawa, 2001, "Ultra-Clean Combustion Technology Combining a Low-Temperature and Premixed Combustion Concept for Meeting Future Emission Standards", SAE International 2001; paper No. 2001-01-0200.
 6. V. Manente, B. Johansson, P. Tunestal and W. Cannella, 2009, "Effects of different type of gasoline fuels on heavy duty partially premixed combustion", SAE International 2009; paper No. 2009-01-2668.
 7. V. Manente, B. Johansson and W. Cannella, 2011, "Gasoline partially premixed combustion, the future of internal combustion engines?", International Journal of Engine Research, Vol. 12, No. 3, pp. 194-208.
 8. M. Sellnau, J. Sinnamon, K. Hoyer and H. Husted, 2012, "Full-time gasoline direct-injection compression ignition for high efficiency and low NOx and PM", SAE Int. J. Engines, Vol. 5, No. 2, pp. 300-314, SAE paper 2012-01-0384.
 9. M. Sellnau, M. Foster, W. Moore and J. Sinnamon, 2016, "Second Generation GDCI Multi-Cylinder Engine for High Fuel Efficiency and US Tier 3 Emissions", SAE Int. J. Engines, Vol. 9, No. 2, pp. 1002-1020.
 10. Y. Yang, J. Dec, N. Dronniou, and W. Cannella, 2012, "Boosted HCCI Combustion Using Low-Octane Gasoline with Fully Premixed and Partially Stratified Charges", SAE Int. J. Engines, Vol. 5, No. 3, pp. 1075-1088.