

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2013.37.3.221>

ISSN 1226-4881

## 성층희박연소 운전조건에서 분사시기에 따른 분무유도식 직접분사 가솔린엔진의 분무 및 화염특성<sup>§</sup>

오희창\* · 이민석\* · 박정서\* · 배충식\*<sup>†</sup>

\* 한국과학기술원 기계공학과

### Effect of Injection Pressure and Injection Timing on Spray and Flame Characteristics of Spray-Guided Direct-Injection Spark-Ignition Engine under Lean Stratified Combustion Operation

Heechang Oh\*, Minsuk Lee\*, Jungseo Park\* and Choongsik Bae\*<sup>†</sup>

\* Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology

(Received January 3, 2012 ; Revised December 25, 2012 ; Accepted December 26, 2012)

**Key Words:** DISI(가솔린 직접분사식 엔진), Stratified Combustion(성층연소) Spray Guided(분무 유도), Injection Timing(분사시기), Optical Engine(가시화 엔진)

**초록:** 분무유도식 DISI엔진의 성층연소운전조건에서 분무 및 화염특성에 대한 실험적 연구가 수행되었다. 연소가시화를 통하여 성층연소 DISI의 연소는 희박 예혼합 연소와 확산연소의 성격을 모두 가지고 있는 것으로 확인되었다. 분사시기에 따른 혼합기 형성특성이 연소의 특성을 결정하는 중요한 인자임을 관찰하였다. 분무와 혼합기 가시화를 통해 낮은 분위기압에서의 over-mixing, 높은 분위기압에서의 under-mixing이 발생하는 것을 확인하였으며 이러한 혼합기 형성과정의 결과에 따라 화염특성, 연소효율 등의 연소특성이 결정되는 것을 살펴볼 수 있었다. 또한, NOx, IMEP도 분사시기에 따른 경향성을 보였으며, 분사시기에 따른 연소상의 변화에 의한 영향임을 확인하였다.

**Abstract:** An experimental study was carried out to investigate the effects of the injection timing on the spray and combustion characteristics in a spray-guided direct-injection spark-ignition (DISI) engine under lean stratified operation. An in-cylinder pressure analysis, exhaust emissions measurement, and visualization of the spray and combustion were employed in this study. The combustion in a stratified DISI engine was found to have both lean premixed and diffusion controlled flame combustion characteristics. The injection timing condition corresponding to the stratified mixture characteristics was verified to be a dominant factor for these flame characteristics. For the early injection timing, a non-luminous blue flame and low combustion efficiency were observed as a result of the lean homogeneous mixture formation. On the other hand, a luminous sooting flame was shown at the late injection timing because of an under-mixed mixture formation. In addition, the smoke emission and incomplete combustion products were increased at the late injection timing as a result of the increased locally rich area. On the other hand, the NOx emissions decreased and IMEP increased as the injection timing retarded. The combustion phasing produced by the injection timing was verified as the reason for this observation.

#### 1. 서론

자동차업계에서는 온실가스 배출 저감과 연료 경제성 향상을 위하여 실린더 내에 연료를 직접 공급하여 연료소비율을 저감할 수 있는 DISI

(Direct injection spark ignition) 엔진에 주목해 왔다.<sup>(1)</sup> 최초의 DISI 엔진으로서, 혼합기 형성과정에서 실린더 내부유동을 이용하는 벽면유도(Wall guide) 방식이 제시되어 현재까지 활발히 연구되고 있으나,<sup>(2)</sup> 이 경우 운전조건에 따라 크게 변화하는 실린더 내부유동을 이용하여 혼합기를 형성하기 때문에 넓은 운전 영역에서의 성층연소 구현이 어렵고 피스톤에 충돌하는 연료가 탄화수소(HC)로 배출되기 쉬운 점이 문제점으로 지적되었

§ 이 논문은 대한기계학회 2011년도 추계학술대회(2011. 11. 2.-4., EXCO) 발표논문임

† Corresponding Author, csbae@kaist.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

다.<sup>(3,4)</sup> 이에 따라 분무의 운동량만을 이용하여 혼합기를 형성하는 방식인 분무유도(Spray guide) 방식이 제시되어 활발히 연구되고 있다.<sup>(5,6)</sup> 성층 연소 운전조건의 분무 유도식 DISI 엔진의 최근 연구에서 분사시기가 배기 및 연소 특성의 주요한 인자임이 보고되고 있다.<sup>(7-9)</sup> 그러나, 분사시기가 연소특성에 영향을 미치는 과정과 이유에 대하여 아직 많은 연구가 필요한 실정이다. 특히, 내연기관에서 연소 특성과 관련된 주요 인자, 그리고 인자들의 영향은 연소 및 분무 가시화 기법을 적용하여 연구될 수 있으나, 분무 유도식 DISI엔진에서 가시화를 적용한 연구는 아직 많이 보고되지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 성층연소 운전조건의 분무 유도식 DISI 엔진에서 분사시기를 주요인자로 하여 배기 및 성능을 측정하고 가시화 엔진에서 분무와 연소 가시화를 적용하여 분사시기에 따른 분무 및 연소특성을 고찰해보았다.

## 2. 실험 장치 및 조건

### 2.1 단기통 실험용 엔진

실험에 사용된 엔진은 4행정 단기통 분무유도식 DISI 엔진으로 연료 분사기로는 Continental VDO의 피에조 외향 개방 분사기를 사용하였으며 범용 피에조 분사기 드라이버(Zenobalti Co.)를 사용하여 구동하고 common rail system을 이용하여 연료를 공급하였다. 실험에 사용된 단기통 엔진의 주요 제원을 Table 1에 나타내었다. 실험엔진은 가시화 블록과 확장피스톤을 설치하여 실린더 내부의 연소와 분무를 가시화할 수 있다. 가시화 실험을 위해 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 실린더 헤드와 블록 사이에 가시화 블록을 삽입하고 기존 피스톤 위에 확장피스톤을 체결하였으며 피스톤의 보울 부분에 석영 가시화 창(Quartz window)을 장착하였다. 확장 피스톤 하단부에는 45° 반사경을 장착하여 연소실 내부에서 일어나는 연소를 엔진외부에서 촬영할 수 있도록 하였다. 화염 이미지는 고속카메라(Phantom V. 7.1)를 통하여 촬영하였다. 한편, 엔진내부의 분무형상을 측정하기 위해 내시경(Endoscope)을 실린더 헤드에 삽입하였으며 반사경을 통해 HID lamp에서 나오는 빛을 광원으로 활용하였다. 분무이미지는 ICCD 카메라(PI max2)를 이용하여 촬영하였다.

Table 1 Engine specification

Bore×stroke	85×88
Compression ratio	12:1
Engine type	Spray guided DI, DOHC
Intake valve timing	11 ATDC~ 202 ATDC
Exhaust valve timing	146 ATDC ~ 10 ATDC
Injector type	piezo outward opening
Injector mount	central

Table 2 Experimental conditions

Injection quantity [mg/str.]	11
Injection pressure [MPa]	10, 15, 20
Coolant temperature [°C]	80
Ignition timing	50 $\mu$ s sweep
Injection timing	2 CAD sweep
Throttle	wide open
Engine speed [rpm]	1200

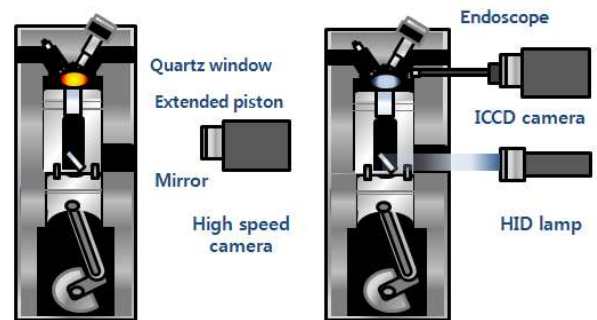


Fig. 1 Visualization setup

### 2.2 정적챔버 분무 가시화 실험

가압이 가능한 정적 챔버에서 평면 레이저 유도 형광법(Planar laser induced fluorescence) 분무 가시화 실험을 수행하였으며 광원으로 Nd:Yag 레이저의 4차 조화파 (266 nm)를 sheet beam을 만들어 사용하였다. LIF 신호는 280 nm high pass filter를 사용하여 266 nm의 산란신호를 차단하였다. 분무의 형광신호는 ICCD (Intensified charge coupled device) 카메라를 사용하여 촬영하였다.

가솔린을 모사하기 위한 단일화학종으로 이소옥탄을 선택하였으며 형광신호를 방출하기 위하여 선행 연구에서 제시된 것과 같이<sup>(10)</sup> 80 %의 이소옥탄에 20%의 3-펜타논을 혼합하여 사용하였다.

### 2.3 실험 조건

Table 2에 실험조건을 나타내었다. 성층 연소시 연비향상효과가 가장 큰 것으로 알려져 있는 저부하 조건을 대표할 수 있도록 분사량을 11mg/stroke으로 고정하였고 10, 15, 20 MPa의 분사압으로 분사하였다. 분사시기는 실화가 발생하지 않는 영역에서 2 크랭크 각도 (CAD)씩 변화하여 실험하였으며 점화시기는 각각의 분사시기에 대하여 50 μs(0.36 CAD)씩 변화하여 최대 출력이 발생하는 점화시기를 대표 점화시기로 적용하였다. 냉각수 온도는 80 °C, 흡기온도는 30 °C로 고정하였다. 분무 가시화 실험 시에는 상온에서 실험을 수행하였으며, 대기압, 0.8 MPa, 1.5 MPa의 분위기압조건에서 분무가시화를 수행하였다.

## 3. 실험 결과 및 토의

### 3.1 분사시기와 분사압에 따른 연소효율

Fig. 2는 실화가 발생하지 않는 영역에서 분사압과 분사시기에 따른 연소효율을 나타낸 것이다. 연소효율은 연료가 가진 에너지가 완전 산화물로 연소되었는가를 나타내는 지표<sup>(11)</sup>로서 다음과 같이 정의된다.

$$\eta_{com} = 1 - \frac{\sum_{i=HC,CO} x_i Q_{i,HHV}}{Q_{LHV} \times \dot{m}_f / (\dot{m}_f + \dot{m}_{air})} \quad (1)$$

위의 식에서  $Q$ 는 발열량(Heating value),  $x$ 는 해당 화학종의 질량 분율,  $\dot{m}$ 은 질량 유량을 나타낸다. Fig. 2에서 연소효율이 나타나지 않은 분사시기(44 CAD BTDC 이전, 18 CAD BTDC 이후)에서는 실화가 발생하였다. 연소효율은 실화한 계 부근의 진각된 분사시기에서 분사시기가 지각할수록 증가하다가 최대값을 가진 후 다시 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 실린더 내 분위기 압력이 혼합기 형성에 미치는 영향 때문인 것으로 판단된다. 즉, 진각된 분사시기의 경우 혼합기가 상대적으로 낮은 분위기압 조건에서 성층화

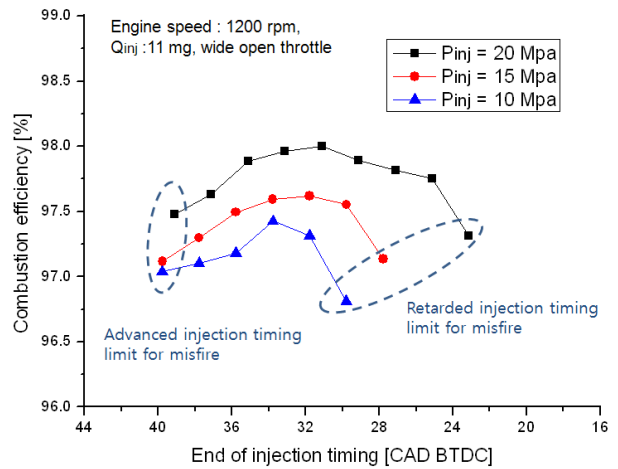


Fig. 2 Effect of injection timing on combustion efficiency for different injection pressures

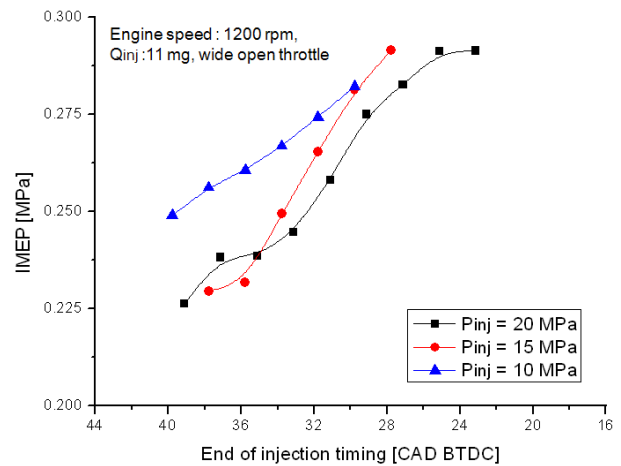


Fig. 3 Trend of IMEP for the various injection timings and pressures

가 되지 않고, 상대적으로 균질한 희박 혼합기를 형성하는 과다 혼합(Over-mixng)<sup>(12)</sup>이 발생하여 연소효율이 감소한 것으로 생각된다. 반면, 지각된 분사종료시기의 경우 높은 분위기압 조건에서 항력증가로 인하여 분무 운동량이 감소하고 이에 따른 혼합 부족(Under-mixng)<sup>(13)</sup>에 의하여 국부적으로 농후한 혼합기 영역이 증가한 것으로 생각된다. 따라서 이에 따라 불완전연소 배출물이 증가하여 연소효율이 감소한 것으로 판단된다. 즉, 분사시기에 따른 연소효율 경향은 분위기압 변화에 따른 혼합기 형성 특성에 기인한 것으로 판단된다. 이러한 설명의 당위성에 대하여 이후의 분무 및 연소 가시화 결과 해석에서 자세히 토의하고자 한다.

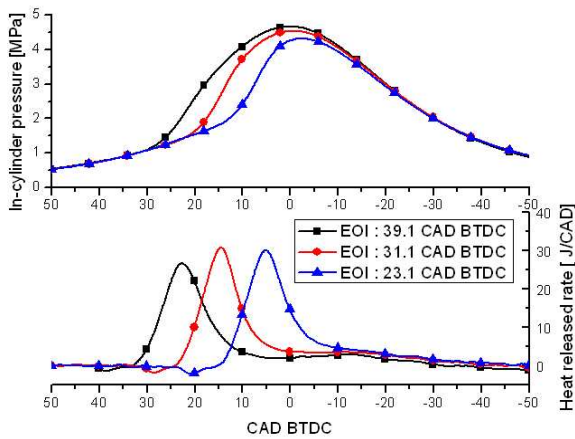


Fig. 4 Heat release rate curve and in-cylinder pressure for various injection timings with 20 MPa of injection pressure

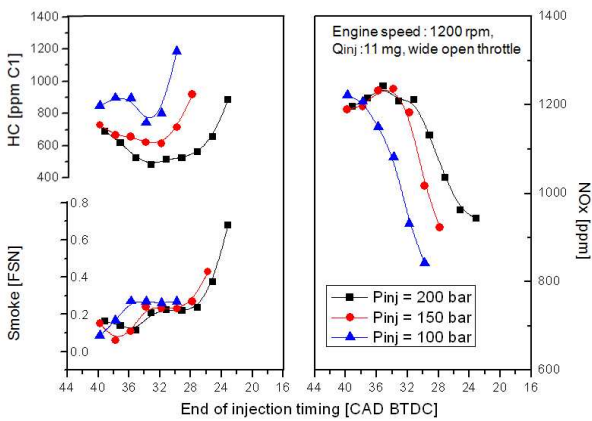


Fig. 5 Exhaust emission trend for various injection timings and injection pressures

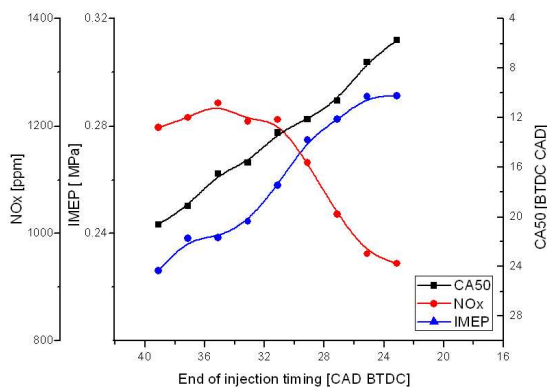


Fig. 6 NOx emissions, IMEP and CA50 for various injection timings with 20 MPa of injection pressure

3.2 분사시기에 따른 도시 평균 유효 압력

Fig. 3은 10, 15, 20 MPa의 분사압 조건으로 분

사시기를 2 CAD씩 지각하면서 실화가 발생하지 않는 영역에서의 도시 평균 유효 압력 (Indicated mean effective pressure : IMEP)을 나타낸 것이다. 본 실험에서는 분사량을 고정하여 실험하였으므로, IMEP의 경향은 연료 변환 효율(Fuel conversion efficiency)<sup>(11)</sup>의 경향과 일치한다. IMEP는 분사시기를 지각할 수 증가하는 경향을 보였으며 최대 IMEP는 연소가 가능한 가장 지각된 분사시기에서 나타났다. 이러한 경향은 앞서 살펴본 연소효율과 불일치하며 그 원인을 열방출률 해석<sup>(11)</sup>을 통하여 고찰해볼 수 있다.

Fig. 4는 분사압, 분사시기에 따른 실린더 압력과 열방출률을 나타낸다. 최대 순간 열방출률은 연소가능영역의 중간에 해당하는 분사시기에서 나타났으며 이는 연소효율의 경향과 일치한다. 지각된 분사시기에서 연소효율과 최대 순간 열방출률이 감소하였으나 높은 IMEP가 나타나는 이유는 연소상 지각으로 인한 유효일 증가 때문으로 판단된다. Fig. 4에서 늦은 분사시기의 경우 상사점 (top dead center : TDC) 이전의 압력상승이 감소하는 경향을 확인할 수 있으며 이는 압축과정 중 발생하는 음의 일이 감소하여 유효일이 증가하였음을 나타낸다.

3.3 분사시기에 따른 배기배출 특성

Fig. 5는 분사시기와 분사압에 따른 탄화수소(HC), 질소산화물(NOx), 입자상물질(Smoke)의 배출경향을 나타낸다. HC는 연소효율과 동일한 경향을 보였으며 실화 한계 부근으로 분사시기가 지각되거나 진각된 경우 배출이 증가하는 특성을 나타내었다. 이것은 앞서 연소효율에서 설명한 것과 같이 진각된 분사시기의 경우 과다혼합 효과로 인한 희박 예혼합연소, 지각된 분사시기의 경우 혼합부족으로 인한 농후한 성층 혼합기 영역의 증가 때문인 것으로 판단된다. Smoke는 분사시기 지각에 따라 증가하는 경향을 나타내었으며 앞선 설명과 같이 분사시기가 지각됨에 따라 농후한 혼합기 영역이 증가하였기 때문으로 생각된다. HC와 smoke 배출은 앞서 연소효율에서 설명한 것과 같이 분사시기에 따른 혼합기 특성에 기인한 것으로 판단되었다.

NOx 배출은 혼합기 특성으로 설명하기 어려운 경향을 나타내었다. 그러나 역시 분사시기에 따라 크게 변화하는 경향을 나타내었으며 분사시기가

지각됨에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 분사시기가 지각됨에 따라 연소상이 지각하게 되고 이에 따라 최대 실린더 온도와 압력이 감소하였기 때문으로 판단된다. Fig. 6에 200 bar의 분사압으로 분사하였을 때 분사시기 변화에 따른 NO<sub>x</sub>, IMEP와 연소상을 나타내는 인자인 CA50 (50% 열방출 지점)을 나타내었다. 앞서 설명한 것처럼 NO<sub>x</sub> 배출이 연소상과 밀접한 관계가 있음을 Fig. 6을 통하여 확인할 수 있다.

3.4 분무가시화 실험결과 해석

Fig. 7은 정적챔버에서 200 bar의 분사압, 분사 종료 후 180 μs에서 촬영한 각각의 분위기압에 따른 PLIF 이미지를 나타낸 것이다. 낮은 분위기압에서 분사한 경우 분무가 확산하면서 성층화가 되지않고 상대적으로 균질한 희박 혼합기를 형성하는 것을 볼 수 있다. 이와 반대로 높은 분위기압에서는 혼합기 영역이 감소하고 국부적으로 농후한 영역이 증가하는 것을 살펴볼 수 있다. 이러한 결과는 앞선 연소효율과 배기배출의 경향을 뒷받침한다고 판단된다.

실린더 내부에서의 분무거동을 살펴보기 위하여 가시화엔진에서 42 CAD BTDC로부터 2 CAD 간격으로 분사시기를 지각시키며 내시경을 이용하여 분무를 촬영하였다. 이때 분사압은 20 MPa, 분사촬영 시점은 분사종료 후 180 μs였으며 촬영된 이미지들을 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서, 분사시기를 지각시킬수록 고압의 분위기압 조건에 따른 항력 증가로 액상 연료의 분무도달 거리가 감소하는 것을 관찰 할 수 있다. 이는 실제 엔진에서 분사시기가 지각됨에 따라 분위기압이 증가하면서 분무 운동량 감소로 인하여 혼합부족 효과가 일어남을 반영하는 것으로 해석된다.

3.5 분사시기에 따른 화염특성

Fig. 9은 20 MPa의 분사압으로 분사한 경우 분사시기에 따른 화염의 이미지를 촬영한 것이다. Fig. 9에 나타난 화염이미지는 휘염(Luminous flame)과 청염(Non luminous blue flame)을 모두 보이고 있으며 휘염의 경우가 청염보다 신호의 강도가 4배 정도 강하였다. 가시화 엔진에서 직접가시화 기법을 통하여 얻은 화염 이미지는 화학 발광(Chemiluminescence)와 백열광(Soot incandescence)의 두 주요 성분을 가지고 있음이 알려져 있다.<sup>(14)</sup>

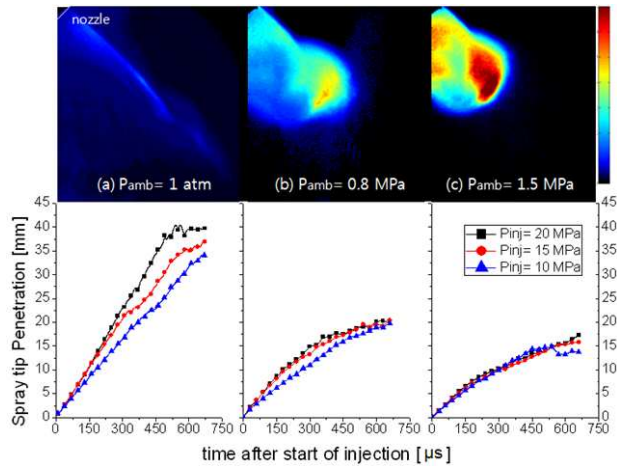


Fig. 7 PLIF spray images in a constant volume chamber and measured spray tip penetration length

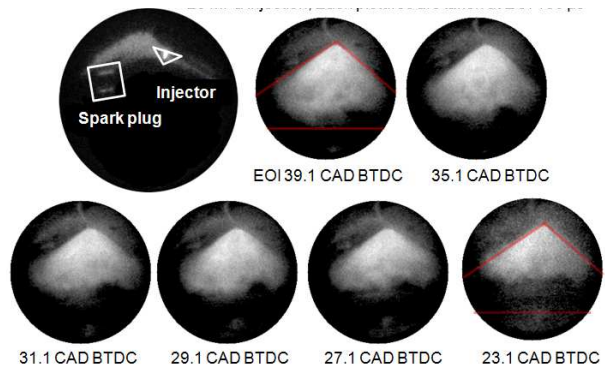


Fig. 8 In-cylinder spray visualization for injection timing taken at 180 μs after end of injection

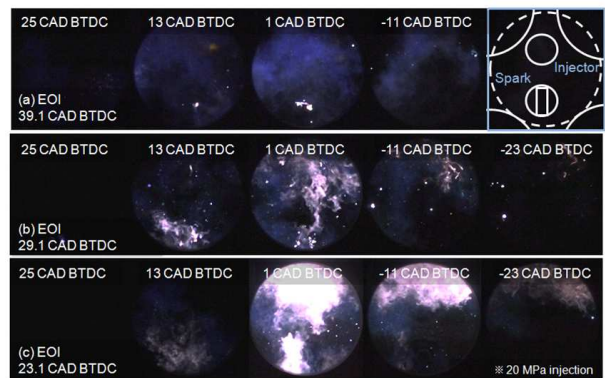
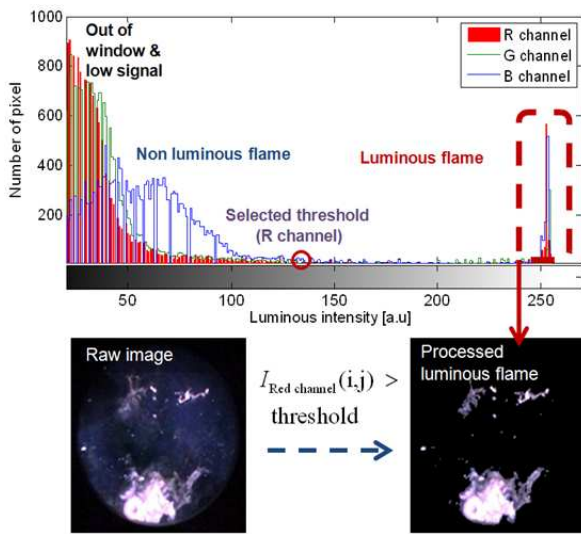
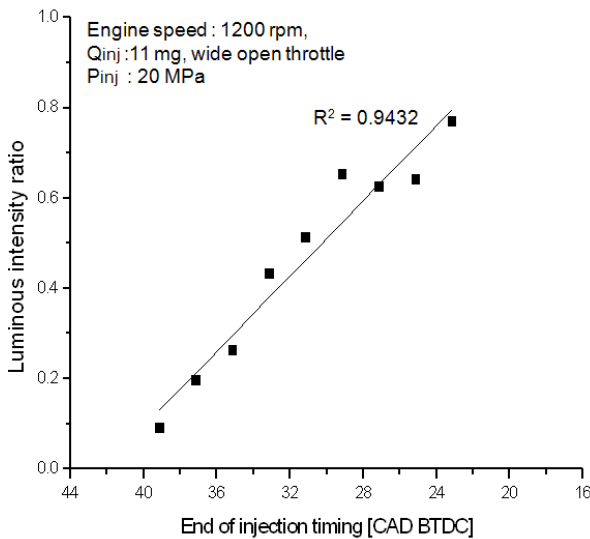


Fig. 9 In-cylinder combustion visualization for the various injection timings

화학 발광 신호는 연소과정 중 발생하는 중간생성물에서 방출되는 자연 방출 신호이며, 백열광은 입자상 물질의 백열로 인한 열복사신호이다. Fig. 9(a)에 나타난 청염은 화학 발광이 지배적인



(a) Schematics of image process



(b) Calculated luminous flame ratio

**Fig. 10** Schematics of combustion image process and calculated luminous intensity ratio for various injection timings

예혼합 화염(Premixed flame)의 특징을 보였다. 반면에 Fig. 9(b)에 나타난 휘염에서는 복잡하게 주름 잡힌 황적색의 경계면이 관찰되며 이는 연소 영역내로의 공기 유입에 의해 발달하는 확산화염(Mixing controlled flame)이 발생하였음을 의미한다. Fig. 9에 나타난 화염 이미지들은 기존 연구에서 보고된 것과 같이 성층 연소과정중 예혼합 화염과 확산 화염이 모두 발생함을 나타내고 있다.<sup>(15-17)</sup>

Fig. 9(a)에 나타난 진각된 분사시기의 경우 희

박 예혼합 연소의 성격을 띠는 화학발광신호가 지배적이었으며, Fig. 9(c)에 나타난 실화 한계 가까이 지각된 분사시기의 경우 휘염이 지배적으로 발생되었음을 관찰할 수 있다. 또한, 그 중간의 분사시기인 Fig. 9(b)의 경우 (a)와 (c)의 중간적인 특성을 나타내는 것을 살펴볼 수 있다. 이러한 경향은 앞서 연소효율 결과에서 설명한 실린더 내부의 분위기 압에 따른 혼합기 형성 특성을 반영하는 결과로 볼 수 있다. 즉, 이른 분사시기의 경우 낮은 분위기압에서 혼합과정이 활발하게 일어나 희박 예혼합화염의 특성이 나타났고, 지각된 분사시기의 경우 높은 분위기압에서 혼합과정이 충분하지 못해 부분적으로 농후한 혼합기가 형성되면서 확산연소에서 발생하는 휘염이 지배적으로 나타난 것으로 판단된다.

보다 정량적으로 화염 특성을 분석하기 위해 휘염이 발생하는 정도를 나타내는 지표로서 식 (2)와 같이 휘염 비율(Luminous flame ratio : LFR)을 정의하여 계산하였다.

$$LFR = \oint_{cycle} \frac{\int I_{luminous} dN}{\int I_{total} dN} d\theta \quad (2)$$

LFR은 화염 신호 중 휘염이 차지하는 비율을 계산한 뒤 사이클 동안 적분하여 나타낸 것이다. 위 식에서  $I$ 는 화염신호의 크기를 나타내며  $N$ 은 특징된 화염이 존재하는 픽셀의 수를 의미한다. LFR 계산을 위하여 휘염을 정의하고 이미지에서 휘염영역을 분리하여 분석하는 이미지 처리 기법을 적용하였다. Fig. 9에 나타난 것처럼 연소 실내 화염 영역 중 휘염은 황적색을 띄거나 과다 노출로 인한 백색을 띄는 반면, 청염은 푸른색을 띤다. 따라서 촬영된 화염의 이미지는 화염의 특성에 따라 특징된 색깔 배치(RGB) 특성을 가진다.<sup>(18)</sup> 특히 높은 강도의 적색신호는 휘염에서만 나타나므로 일정 크기의 적색 신호를 역치값으로 하여 휘염을 특징화하고 영상을 분리하여 식 (2)를 계산하였다.

Fig. 10은 이러한 화염영상의 처리과정과 계산한 LFR을 나타낸다. 분사시기가 지각될수록 선형적으로 확산 화염의 성격이 강해지는 것을 살펴볼 수 있다. 진각된 실화 한계근처의 분사시기의 경우 0.1 이하의 LFR을 나타내었으며 이는 희박 예혼합연소

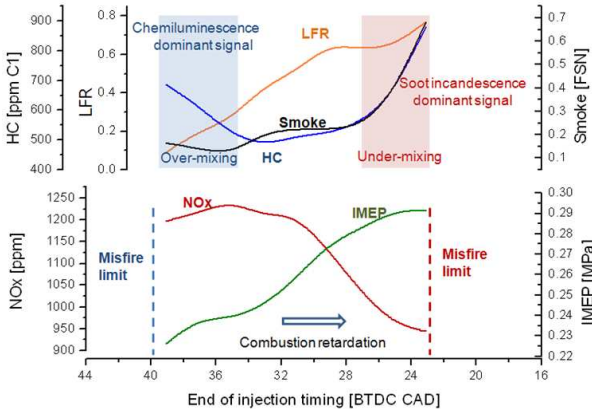


Fig. 11 Comprehensive schematics of effects of injection timing on combustion and emission characteristics

로 인한 청염이 지배적으로 나타났음을 의미한다. 반면에 지각된 실화한계 근처의 분사시기는 0.8의 높은 LFR을 나타내었으며 휘염 신호가 지배적임을 나타낸다. 0.2부터 0.7까지의 중간적인 LFR이 나타난 분사시기에서는 두 화염특성이 모두 나타났으며 분사시기가 지각될수록 혼합제어연소의 성격이 강해지는 것을 관찰할 수 있었다.

이상의 가시화 및 성능 실험 결과를 종합하여, 분사시기에 따른 연소특성을 Fig. 11에 도식화하여 나타내었다. 실화한계 부근까지 진각된 분사시기의 경우 공기와 연료의 과다혼합이 발생하며 이보다 분사시기가 진각된 경우 실화가 발생한다. 이 경우 희박예혼합 연소가 발생하여 HC의 배출이 높은 것을 확인할 수 있었다. 반면 실화한계 부근까지 지각된 분사시기에서는 높은 분위기압으로 인한 혼합부족이 발생하고 국부적으로 농후한 성층혼합기가 형성됨에 따라 smoke 및 불완전연소 배출물이 증가하고 휘염이 지배적으로 관찰되는 경향을 확인하였다. 중간의 분사시기에서는 적합한 성층혼합기의 형성으로 인하여 연소효율이 높았으며, 성층연소로 인한 휘염이 일부 관찰되었다. 이때 분사시기가 지각되거나 진각될수록 희박예혼합연소와 확산연소의 성격이 크게 나타났다. 한편 NOx와 IMEP는 분사시기에 따른 연소상에 크게 영향받음을 관찰하였으며, 연소상이 지각함에 따라 유효일의 증가와 최대 연소실온도의 감소로 인하여 NOx가 감소하고 IMEP가 증가하는 경향을 확인하였다.

#### 4. 결론

성층연소 조건의 단기통 분무유도식 DISI 가시

화 엔진에서 분사시기에 따른 연소 및 분무 특성에 대하여 고찰해보았다.

(1) 연소효율은 안정적인 연소가능한 분사시기 영역의 중간지점에서 가장 높은 값을 보였고 분사시기가 지각, 또는 진각됨에 따라 감소하는 경향이 나타났다. 이것은 실린더 내부의 분위기압에 따른 영향으로 과다혼합(over-mixing)과 혼합부족(under-mixing)이 발생했기 때문으로 생각된다.

(2) 정적챔버와 가시화 엔진에서 수행된 분무가시화 결과를 통하여 지각된 분사시기의 경우 (고압의 분위기압 조건) 분무도달 거리가 감소하고 국부적으로 농후한 영역이 증가하였으며, 진각된 분사시기의 경우 (저압의 분위기압 조건) 분무도달 거리가 길고, 상대적으로 균질한 희박 혼합기가 형성됨을 확인하였다. 이러한 경향은 연소효율의 결과에서 설명했던 진각된 분사시기의 과다혼합, 지각된 분사시기에서의 혼합부족 효과를 반영하는 것으로 판단하였다.

(3) 화염 가시화 실험결과 진각된 분사 시기의 경우 희박 예혼합연소의 특징이 강한 청염이 지배적으로 나타났으나, 분사시기가 지각될수록 백열로 인한 휘염이 증가하였고, 확산연소의 성격이 강해지는 것을 살펴볼 수 있었다.

(4) 이상의 결과에서 분사시기에 따른 혼합기 형성 특성이 연소효율, smoke 배출, 화염 특성에 지배적인 인자임을 알 수 있었다. 반면, NOx와 IMEP는 분사시기에 따른 연소상의 변화에 주로 영향을 받는 것으로 판단되었다.

#### 후기

본 연구는 한국기계연구원의 차세대 환경에너지 기계기술 개발 사업(직접분사식 초희박 가스엔진 핵심기술 개발)의 지원으로 수행되었으며 감사의 말씀을 전합니다. 그리고 엔진 및 분사제어기를 지원해주신 Zenobalti Co.에 감사의 말씀을 드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Zhao, F., Harrington, D. L. and Lai, M., 1999, "Automotive Gasoline Direct-Injection Engines," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol.25, pp. 437~562.
- (2) Kuwahara, K., Ueda, K. and Ando, H., 1998

- “Mixing Control Strategy for Engine Performance Improvement in a Gasoline Direct Injection Engine,” *SAE International Journal of Engines*, Vol.106, No.3, pp. 267~277.
- (3) Sandquist, H., Lindgren, R. and Denbratt, I., 2000, “Sources of Hydrocarbon Emissions from a Direct Injection Stratified Charge Spark Ignition Engine,” *SAE paper* 2000-01-1906.
- (4) Stevens, E. and Steeper, R., 2001, “Piston Wetting in an Optical DISI Engine: Fuel Films, Pool Fires, and Soot Generation,” *SAE International Journal of Engines*, Vol. 110, No. 3, pp. 1287~1294.
- (5) Brehob, D. D., Fleming, J. E., Haghgooeie, M. and Stein, R. A., 1998, “Stratified-Charge Engine Fuel Economy and Emissions Characteristics,” *SAE Paper* 982704.
- (6) Van Der Wege, B. A., Han, Z., O’lyer, C., Munöz, R. H. and Yi, J., 2003, “Development and Analysis of a Spray Guided DISI Combustion System Concept,” *SAE paper* 2003-01-3105.
- (7) Baecker H., Kaufmann A. and Tichy M., 2007, “Experimental and Simulative Investigation on Stratification Potential of Spray-Guided GDI Combustion Systems,” *SAE Paper* 2007-01-1407.
- (8) Szekeley, G. and Alkidas, A. C., 2005, “Combustion Characteristics of a Spray-Guided Direct-Injection Stratified-Charge Engine with a High-Squish Piston,” *SAE Paper* 2005-01-1937.
- (9) Oh, H., Bae, C. and Min, K., 2010, “Spray and Combustion Characteristics of Ethanol Bended Gasoline in a Spray Guided DISI engine under Lean Stratified Operation,” *SAE International Journal of Engines*, Vol. 119, No. 3, pp. 213~222.
- (10) Davy, M. H., Williams, P. A. and Anderson, R. W., 2000, “Effects of Fuel Composition on Mixture Formation in a Firing Direct-Injection Spark-Ignition Engine: An Experimental Study Using Mie-Scattering and Planar Laser-Induced Fluorescence Techniques,” *SAE Paper* 2000-01-1904.
- (11) Heywood, J. B. 1988, *Internal Combustion Engine Fundamentals*. Mcgrawhill.
- (12) Petersen, B. R., Ekoto, I. W. and Miles, P. C., 2010, “Optical Investigation of UHC and CO Sources from Biodiesel Blends in a Light-Duty Diesel Engine Operating in a Partially Premixed Combustion Regime,” *SAE International Journal of Fuel and Lubricant*, Vol. 119, No. 3, pp. 414~434.
- (13) Kook, S., Bae, C., Miles, P. C., Choi, D. and Pickett, L. M., 2005, “The Influence of Charge Dilution and Injection Timing on Low-Temperature Diesel Combustion and Emissions,” *SAE International Journal of Fuel and Lubricant*, Vol. 114, No. 4, pp. 1575~1595.
- (14) Mueller, C. and Martin, G., 2002, “Effects of Oxygenated Compounds on Combustion and Soot Evolution in a DI Diesel Engine: Broadband Natural Luminosity Imaging,” *SAE Paper* 2002-01-1631.
- (15) Kume, T., Iwamoto, Y., Iida, K., Murakami, M., Akishino, K. and Ando, K., 1996, “Combustion Control Technologies for Direct Injection SI Engine,” *SAE International Journal of Engines*, Vol. 105, No. 3, pp. 704~717.
- (16) Drake M. C., Fansler T. D. and Lippert A. M., 2005, “Stratified-charge Combustion: Modeling and Imaging of a Spray-guided Direct-injection Engine,” *Proceeding of Combustion Institute*, Vol. 30, pp.2683~2691.
- (17) Hemdal, S., Andersson, M., Dahlander, P., Ochoterena, R. and Denbratt I., 2011, “In-Cylinder Soot Imaging and Emissions of Stratified Combustion in a Spark-Ignited Spray-Guided Direct-Injection Gasoline Engine,” *International Journal of Engine Research*, Vol. 12, pp. 549~563.
- (18) Huang, H. and Zhang, Y., 2008, “Flame Colour Characterization in the Visible and Infrared Spectrum Using a Digital Camera and Image Processing,” *Measurement Science and Technology*, Vol. 19, No. 085406.