

직분식 가솔린 가시화 엔진의 성층연소 특성

Characterization of Stratified Combustion in a DISI Optical Gasoline Engine

최 동 석*, 이 용 석*, 최 재 준*, 배 충 식*
Dong-Seok Choi, Yongseok Lee, Jaejoon Choi, Choongsik Bae

ABSTRACT

This study investigated combustion characteristics paying particular attention to a mass flow rate pattern under stratification charge mode. The mass flow rate was changed using two injector drivers with different operating characteristics for an injector. These injection systems were employed in an optical single-cylinder engine. Three different injection timings under late injection modes were set to simulate the stratification charge combustion. To obtain the mass flow rate, the experiments of fuel metering and injection rate measurement were performed with a fixed injection quantity. In-cylinder pressure was measured to analyze combustion characteristics. Initial flame size and its developments were also visualized. In addition, the mixture distribution prior to ignition was obtained using PLIF technique. As the mass flow rate has a higher value, more stable and faster combustion was achieved. The mixture distribution showed more uniform and higher concentration in the bowl near the spark plug as the mass flow rate increases.

주요기술용어 : DISI engine(직분식 불꽃점화 엔진), Mass flow rate(질량유동율), PLIF(평면 레이저 유도 형광), Tracer(형광 표시자), Fluorescence intensity(형광강도)

Nomenclature

CA : crank angle (degree)
COV_{IMEP}: coefficient of variation of IMEP (%)
IMEP: indicated mean effective pressure (kPa)
MFB : mass fraction burned

1. 서 론

DISI(Direct Injection Spark Ignition) 엔진은 엔진 연소실에서 잘 제어된 성층 혼합 연소를 통하여 연소 안정성을 높이고 희박연소를 구현하는 메커니즘을 이용하고 있다. 그러므로 안정된 성층 혼합 연소를 위하여 분사시기와 분사계의 동특성은 매우 중요하다^{1,2)}. 특히 연료 분사율로부터 구한 연료의 과도적인 질량 유동율은 DISI

엔진의 연소실 설계에 있어 매우 중요한 인자들 중에 하나이다. 또한 질량 유동율의 제어는 연소율과 유해배출물의 생성을 지배하기 때문에 매우 중요하다. 최근 유해 배출물의 생성을 억제시키기 위하여 짧은 분사기간의 다단계 분사 전략을 적용한 연구도 있다^{3,4)}. 따라서 혼합기 분포와 연소특성에 대한 질량 유동율의 영향에 대한 조사는 안정된 연소와 유해 배출물 저감을 위하여 반드시 필요하다.

본 연구는 부분부하에서 분사시기와 분사율의 차이에 따른 성층 혼합 연소특성을 조사하였다. 분사계의 동특성을 조사하기 위하여 분사량과 분사율을 측정하였으며, 실린더내의 압력과 스파크 플러그 주위의 초기 화염의 성장을 가시화하였다. 또한 연소직전까지의 스파크 플러그 주위의 혼합기 분포를 PLIF(Planer Laser Induced

* 회원, 한국과학기술원 기계공학과

Fluorescence) 기법을 사용하여 2 차원적인 혼합기 분포화상을 취득하였다. 이와 같은 실험결과를 통하여 분사시기와 분사율의 차이에 따른 혼합기 형성과정과 성층 혼합 연소특성을 조사하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

2.1.1 가시화 엔진 및 분사계

가시화 엔진은 선행연구⁵⁾에서 사용한 역탑형 DISI 엔진 헤드를 결합한 방식이다. 실린더 내부의 가시화를 위한 가시화 모듈은 실린더 라이너, 라이너 하우징, 연장 피스톤, 가시창 및 프리즘, 45° 거울로 구성되어 있다. 가시화 모듈을 통하여 측면에서 흡입과정을 하방에서 압축과정을 관찰할 수 있도록 설계하였다. 엔진은 DC 다이내모미터로 구동시켰다. Table 1 은 가시화 엔진의 제원을 나타낸 것이다.

Fig. 1 은 피스톤 보울의 형상을 나타낸 것이

Engine Type	4 stroke, 4 valve
Bore × Stroke (mm)	85 × 88
Displacement vol. (cc)	559
Combustion chamber	Pent-roof
Compression ratio	9.3
Valve timing	IVO: 6° BTDC, IVC: 46° ABDC EVO: 130° ATDC, EVC: 10° ATDC
Injector type	Hollow cone, 60° swirl
Ignition method	TCI

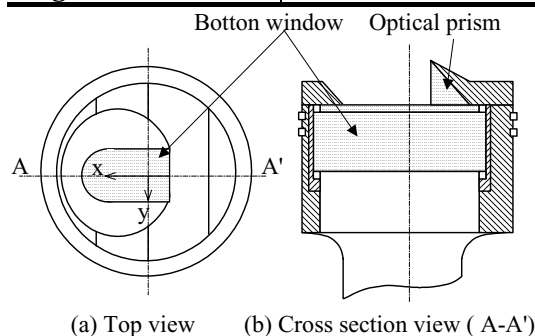


Fig. 1 Configuration of piston top

다. 후기분사 시 혼합기의 성층연소를 위하여 스파크 플러그쪽으로 농후한 혼합기가 분포되어야 한다. 따라서 인젝터가 설치된 흡기밸브쪽으로 타원형의 보울을 가진 형상의 피스톤을 제작하였다³⁾. 혼합기 분포 및 화염의 가시화를 위하여 하방 가시창(직경 60mm, 두께 25mm)과 프리즘을 설치하여 피스톤 보울 내부와 스파크 플러그 주위를 관찰할 수 있도록 설계하였다. 또한 다양한 피스톤 보울 형상에 대한 적용성을 고려하여 피스톤 보울을 교환할 수 있도록 피스톤 윗부분을 분리할 수 있게 설계하였다.

분사계는 인젝터, 고압 연료탱크, 보조 연료탱크, 질소탱크로 구성되어 있다. 인젝터는 분무각 60°의 고압 와류형 인젝터를 사용하였다. 분사압력은 고압 질소가스로 가압하여 5.1MPa 로 설정하였으며 연료의 용이한 공급과 첨가제에 의한 부식방지를 위하여 스테인레스 재질의 보조탱크를 통하여 고압 연료탱크로 연료를 공급하였다.

2.1.2 광학계

Fig. 2 는 혼합기의 분포를 계측할 수 있는 PLIF 기법을 적용하기 위한 광학계의 개략도를 나타낸 것이다. 광원으로 Nd:YAG 레이저의 4 차 조화파(266nm)를 사용하였다. 기본 연료와

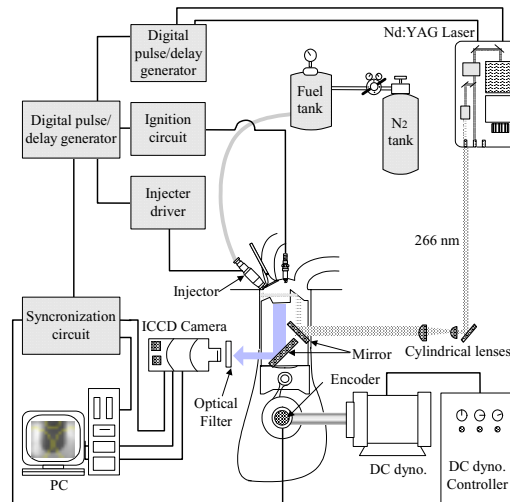


Fig. 2 Experimental setup for the visualization of flames and mixture distribution

첨가제로 iso-octane 과 3-pentanone 을 각각 체적비 80%와 20% 혼합하였다. 여기광원의 산란광을 제거하기 위하여 cut-off 필터를 사용하였다. 연소특성은 실린더내에 설치된 압력 변환기로 압력과 가시창을 통하여 화염의 자발광에 의한 화상을 측정하였다.

2.2 실험방법

엔진의 회전속도는 800rpm 으로 고정하였다. 분사시기는 후기분사에 해당하는 40°BTDC, 50°BTDC, 60°BTDC, 70°BTDC, 및 80°BTDC 로 설정하였다. 분사량 측정실험은 분사기간을 변화시켜가며 1000 회 분사하여 전자저울로 측정된 양을 분사 횟수로 나누어 특정 분사기간에 대한 대표값으로 취하였다. 본 연구에 사용된 공연비는 모든 조건에 대하여 35:1 이다.

연소 실험시 초기 연소실 온도의 설정 및 열교환을 위하여 내부에 순환수 재킷이 설치된 강재의 실린더 라이너를 사용하였다. 순환수의 온도는 피스톤 링과 가시창을 고려하여 70°(±1 °C) 로 설정하였다. 엔진은 실린더 라이너 부분에 오일 윤활을 할 수 없기 때문에 운전시간이 제한된다. 따라서 본 연구에서는 실린더내 압력취득 시 연속 연소방식을, 화염의 가시화 및 혼합기 분포 측정 시 간헐 연소방식을 채택하였다.

인젝터의 분사율은 연료분무의 상대적인 운동량과 분사된 연료량 측정으로부터 구하였다. 분무의 상대적인 운동량은 선형 압력변환기(Kistler 6123)를 사용하여 대기압 분위기에서 인젝터 팁의 1.5mm 앞쪽에 설치하여 상대적인 운동량 데이터를 취득하였다. 각기 다른 두가지 인젝터 드라이버를 인젝터에 적용하여 분사율의 패턴을 변경시켰다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 분사계의 동특성

Fig. 3 은 분사기간에 따른 분사량 측정실험의 결과이다. 이것은 앞서 설정한 공연비 (35:1)에 해당하는 분사기간을 결정하기 위한 것이다.

Fig.3 에 제시된 방정식은 선형적으로 피팅된 것이며 상관계수는 0.99 이상이다. 분사율 측정실험은 Naber 등⁶⁾이 제시한 방법을 사용하였다. Fig. 4 는 분사율 측정실험의 결과이다. 점선화살표는 분사 종료 신호의 위치를 나타낸다. 분사 제어신호(time zero)와 초기의 분사율 상승위치 사이의 시간 간격은 인젝터 드라이버와 관계된 지연시간(약 0.2ms 와 1.2ms)이다. 분사율 곡선에서 초기의 피크는 주 연료 분무가 형성되기 전에 노즐색내의 연료로부터 형성된 것이다⁷⁾. Type B 의 초기 분사율 상승 기울기가 Type A 보다 급하다. 이것은 Type B 가 분사초기 단계에서 보다 많은 연료 질량을 방출하고 있음을 의미한다. 분사 종료 후의 피크는 니들의 바운싱에 의한 것이다.

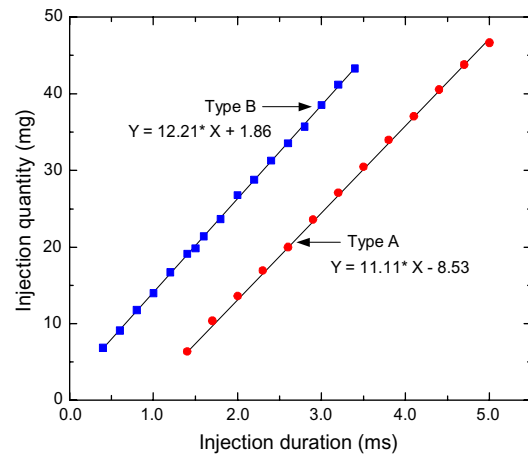


Fig. 3 Fuel metering as a function of injection duration

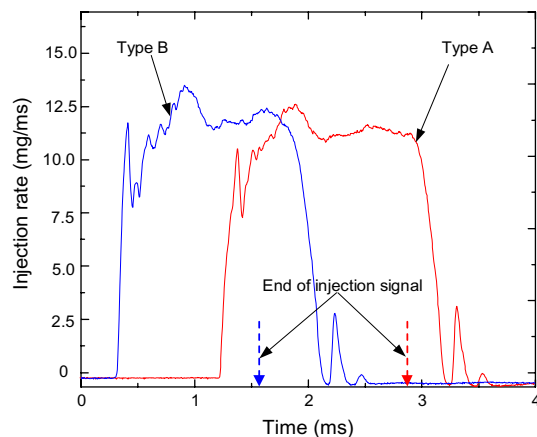


Fig. 4 Rate of injection curves for two different injector drivers

3.2 연소특성

3.1.1 실린더내 연소 압력해석

연소 안정성은 IMEP 와 COV_{IMEP} 로 정량화하였다. 연소 안정성은 IMEP 의 변동이 적은 COV_{IMEP} 5%이하를 연소가 안정된 것으로 생각하였다. 데이터는 각각의 실험조건에 대하여 20 사이클을 취득하여 처리하였다. Fig. 5 는 두 가지 인젝터 드라이버에 대하여 분사시기에 따른 IMEP 와 COV_{IMEP} 를 나타낸 것이다. 오차막대 (error bar)는 COV_{IMEP} 를 의미한다. 두 경우 모두 MBT 타이밍은 25°BTDC 이었다. Type A 의 IMEP 는 분사시기의 진각에 따라 감소하는 반면 Type B 의 IMEP 는 증가하였다. 또한 type B 의 경우가 type A 의 경우보다 IMEP 가 높게 나타났다.

이것은 type B 가 초기 질량 유동율이 커서 연료와 공기의 혼합시간이 보다 길기 때문에 IMEP 가 높게 나타나는 것으로 생각된다.

연소기간을 조사하기 위하여 MFB(Mass Fraction burned)가 계산하였다. 이 결과를 Table 2 에 정리하였다. 음수는 BTDC 를 의미한다. 연소기간은 10% MFB 에서 90%MFB 로 설정하였다. Type A 의 연소기간에 대한 기울기는 type B 보다 완만하다. 분사기간이 지연됨에 따라 type A 의 연소기간은 짧아지는데 반해 type B 의 연소기간은 길어졌다. 따라서 보다 높은 질량 유동율을 나타내는 type B 가 급속연소를 나타내며, 이것은 Fig. 5 의 IMEP 결과와 일치한다.

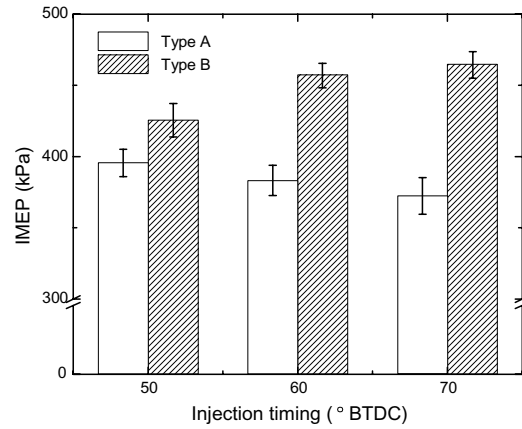


Fig. 5 IMEP with COV of IMEP for two different drivers

3.1.2 화염의 가시화

Fig. 6 은 성층혼합 연소조건에서 화염의 전파 과정을 나타낸 것이다. 각각의 인젝터 드라이버에 대하여 IMEP 가 가장 높은 경우를 비교하였다. 연장 피스톤의 가시창을 통하여 45°거울로 촬영한 사진이다. 위쪽에 스파크 플러그가 아래쪽에 두개의 흡기밸브가 위치하고 있다. 화염은 5 개의 화상을 취득하여 평균한 후, 화상처리를 통하여 화염의 경계를 검출하였다. 왼쪽 그림은 type A 의 50°BTDC 경우이며, 오른쪽 그림은 type B 의 70°BTDC 경우이다. 그림내의 숫자는 크랭크각(°BTDC)을 의미한다. Fig. 5 에서도 보았듯이 type B 의 경우가 IMEP 가 높았다. Type B 의 화염속도가 type A 의 속도보다 약간 빠름을 볼 수 있다. 23°BTDC 에서 19°BTDC 까지의 초기단계에서 type B 의 화염크기는 type A 보다 크

Table 2 Combustion durations for two different mass flow rates

Injection timings MFB	Type A			Type B		
	50° BTDC	60° BTDC	70° BTDC	50° BTDC	60° BTDC	70° BTDC
10 % (°CA)	-0.7	-0.8	1.4	-4.1	-4.6	-0.5
50 % (°CA)	9.8	10.0	13.3	3.4	4.1	8.9
90 % (°CA)	22.0	21.7	25.0	15.5	15.9	18.4
Burn dur. (°CA)	22.6	22.6	23.6	19.6	20.5	18.9
Slope	17.0	17.1	16.4	19.7	18.8	20.7

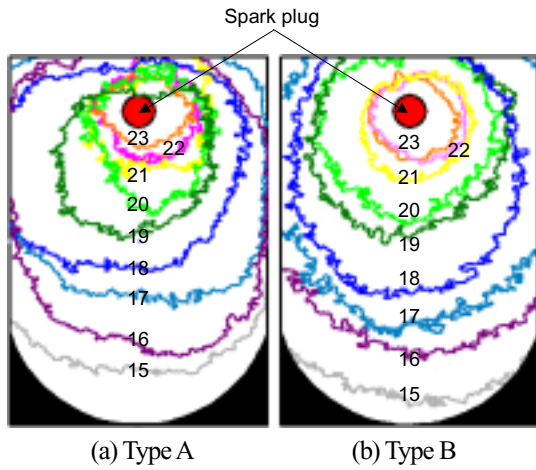


Fig. 6 Initial flame development

며 화염의 형상은 좀더 원형에 가깝다. 초기단계 이후에도 화염은 type B 가 약간 빠르게 전파하며 형상도 원형을 유지한다. 이러한 결과는 질량 유동율이 보다 빠를수록 보다 충분한 공기와의 혼합시간을 가지기 때문에 나타나는 결과로 생각된다.

3.3 혼합기 분포특성

연소이전의 혼합기 분포를 측정하기 위하여, PLIF 기법을 적용하였다. 10 개의 화상이 취득되었고, 각각의 화상은 레이저 출력 및 평면광의 프로파일로 정규화시켰다. Fig. 7은 스파크 플러그를 포함한 중선에 따른 상대적인 형광강도의 변화를 나타낸 것이다. 각각의 혼합기 분포를 비교하기 위하여 형광강도는 최대값으로 정규화시켜 상대적인 비로 나타내었다. Fig. 7은 Fig. 6 과 동일한 대표적인 두 가지 경우에 대한 것이다. Type A 의 경우, 46°BTDC 에서 분무중인 연료로 인하여 매우 높은 농도가 인젝터쪽 방향에서 볼 수 있다. 크랭크각에 따라 농후한 혼합기는 피스톤 보울벽면과 텀블유동에 의하여 스파크 플러그쪽으로 이동된다. 점화시기에서 스파크 플러그 주위의 상대적인 형광강도는 0.3 이다. Type B 의 경우, 지연된 분사기간 때문에 46°BTDC 에서는 어떠한 혼합기도 발견되지 않는다. 동일한 혼합기 형성기구로 혼합기는 스파크 플러그쪽으로 집중된다. 그러나 점화시기에

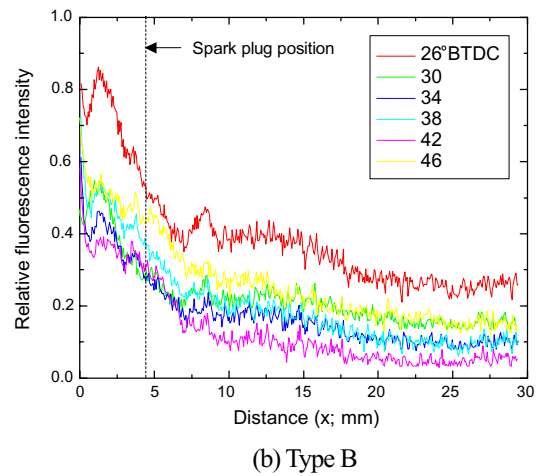
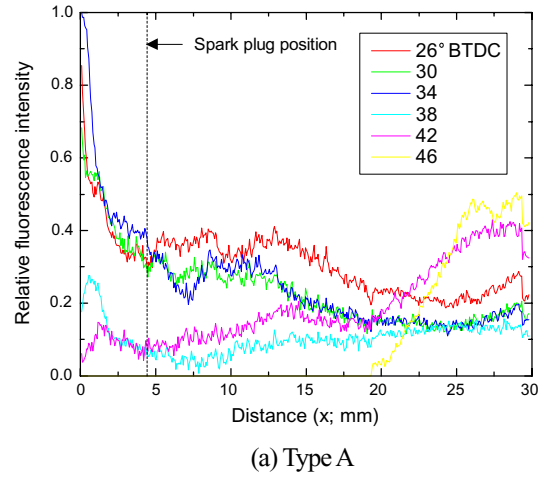


Fig. 7 Fluorescence intensity along the vertical center line through spark plug

서 스파크 플러그 주위의 상대적인 형광강도는 0.5로 이것은 Type A 와 비교하여 약 1.6 배이다. 이러한 혼합기의 농도차이로 질량 유동율이 빠른 Type B 가 IMEP 가 높게 나타나며 초기의 화염의 성장이 빠른 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

분사시기와 질량 유동율의 차이에 따른 혼합기 형성과정과 성층 혼합 연소특성을 조사하였다. 실린더내 압력을 취득하여 연소특성을 조사하고 초기 화염의 성장을 가시화하였다. 또한 PLIF 기법을 사용하여 혼합기 분포를 계측함으로써 성층화 과정을 가시적으로 관찰하였다. 본 연구의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 질량 유동율이 증가할수록 좀더 안정되고 빠른 연소과정을 나타내었다.
- 2) 초기 화염의 크기와 형상은 질량 유동율이 클수록 크고 원형에 가까웠다.
- 3) 혼합기 분포는 질량 유동율이 클수록 스파크 플러그 주위에 농후한 혼합기가 형성되었다.

후 기

본 연구는 국가지정 연구실 사업(NRL)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

- 1) F. Zhao, D. L. Harrington and M. C. Lai, "Automotive Gasoline Direct-Injection Engines," SAE, 2002.
- 2) J. Cousin, W. M. Ren and S. Nally, "Transient Flows in High Pressure Swirl Injectors," SAE Paper 980499, 1998.
- 3) M. Tabata, M. Kataoka, T. Tanaka and M. Yamakawa, "Measurement of Fuel Distribution in the Piston Cavity of Direct Injection SI Engine by Using LIF," SAE Paper 2000-01-0240, 2000.
- 4) P. J. Shayler, S. T. Jones, G. Horn and D. Eade, "Characterization of DISI Emissions and Fuel Economy in Homogeneous and Stratified Charge Modes of Operation," SAE Paper 2001-01-3671, 2001.
- 5) 최동석, 이용석, 최재준, 배충식, "직분식 가솔린 가시화 엔진에서 분사시기에 따른 연소 특성," 한국자동차공학회 2002 년 춘계학술대회 논문집, pp. 148-153, 2002.
- 6) J. D. Naber and D. L. Siebers, "Effect of Gas Density and Vaporization on Penetration and Dispersion of Diesel Sprays," SAE Paper 960034, 1996.
- 7) J. Choi, S. Lee, H. Shin and C. Bae, "Fuel-Spray Characteristics of High Pressure Gasoline Injection in Flowing Field," JSME International Journal, B. Vol. 43, No. 4, 2000.