직분식 가솔린 엔진에서 피스톤 캐비티 반경에 따른 연료 거동 분석

김태안*·강정중*·김덕줄**

A Study on the Fuel Behaivor with Cavity Diameter in a Gasoline Direct Injection Engine

Tae-An Kim, Jeong-Jung Kang and Duck-Jool Kim

Key Words: Exciplex Fluorescence Method(Exciplex 형광법), GDI(가솔린 직접 분사), Swirl Flow(선회 유동), homogeneous mixture(균일혼합)

Abstract

This study was performed to investigate the behavior of vapor phase of fuel mixtures with different piston cavity diameters in a optically accessible engine. The images of vapor phases were measured in the motoring engine using exciplex fluorescence method. The conventional engine was modified as GDI engine with swirl flow. Fuel was injected into atmospheric nitrogen to prevent quenching phenomenon by oxygen. Injection pressure is 5.1MPa. Two dimensional spray fluorescence image of vapor phases was acquired to analyze spray behavior and fuel distribution inside of cylinder. Three injection timings were set at BTDC 180°, 90°and 60°. With a fuel injection timing of BTDC 60°, fuel-rich mixture was concentrated in near the cavity center. With a fuel injection timing of BTDC 90°, fuel-rich mixture level in the center region was highest in the S-type during the late compression stroke. With a fuel injection timing of BTDC 180°, fuel was not affected in a piston cavity and generally distributed as homogeneous mixture.

기호설명

A : 증기상의 연료면적
A_{max} : 증기상의 최대 연료면적
I : 형광강도
I_{max} : 최대 형광강도
Z : 노즐팁으로 부터의 거리, mm

* 회원, 부산대학교 기계공학과 대학원
** 회원, 부산대학교 기계공학부
E-mail : djkim@hyowon.pusan.ac.kr
TEL : (051)510-3072 FAX : (051)516-9598

1. 서 론

각종 에너지 및 환경 문제가 대두되면서 저연비, 고출력, 저공해 특성을 실현하고자 하는 많은 연구와 노력이 이루어지고 있다. 전기 자동차와 기존의 가솔린 엔진의 접목을 통하여 저속 저부하에서 연비 향상을 도모한 하이브리드 엔진, 운전 영역에 따라서 기존의 포트 분사 엔진의 밸브 타이밍을 변화시키는 가변 밸브 타이밍 시스템, 그리고 기존 실제 자동차 엔진의 주류를 이루고 있는 가솔린 엔진과 디젤 엔진의 장점을 동시에 구현한 이상적이고 획기적인 기술로서 직분식 가솔린 엔진(Gasoline Direct Injection Engine, GDI) 기술이 많은 관심을 받고 있다. 특

히, GDI 엔진에 대한 연구는 근래 세계적으로 많은 연구가 활발하게 수행되어 왔으며, 최근 그 가시적인 성과가 보여지고 있다.(1)~(2) 하지만, 아직 국내의 경우에는 그 연구가 기초적인 부분에 머물러 있으며, 보다 많은 연구가 절실하게 요구되고 있다. 그리고 피스톤 형상에 따른 가시화 연구는 많이 수행되고 있지만, 직분식 가솔린 엔진에서 피스톤 캐비티 반경에 따른 연료 분포 특성에 대한 연구는 부족하다. 특히, 가솔린 엔진 통한 중앙 분사 방식의 피스톤 캐비티 반경 변화에 따른 연료의 농도장 및 거동에 대한 연구는 거의 부족하다. 선행연구 결과에 따르면 압축말기에 텀블유동 보다 선회유동은 오랫동안 존재하게 되고 스퀴시와 결합하여 강도가 강화되는 것으로 나타나 있다.(3)~(5) 피스톤 캐비티를 가지고 있는 것이 성층화를 이루는데 좋은 결과를 가진다고 나타나 있다.(6) 따라서, 본 연구에서는 GDI 엔진에서의 피스톤 캐비티의 반경을 변화하여 실린더 내 연료 거동 및 농도장 분포를 가시화 함으로서 GDI 엔진에서의 실린더 내 연료 혼합과 성층화 과정에 대한 정보를 얻고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서는 기존의 포트 분사식 DOHC 가솔린 엔진에 가시창을 설치하고, 실린더 중심에 와류형 고압 인젝터를 부착함으로서 중심 분사식 GDI 엔진으로 개조하였으며, 흡기포터를 가공하여 선회유동을 발생시켰고, 캐비티 직경을 d/D=0.35(이하 S-type), d/D=0.40(이하 M-type), d/D=0.45(이하 L-type)의 3종류를 이용하였다. 연료의 기·액상 화상의 취득을 위해 exciplex 형광법을 사용하였으며, 피스톤 캐비티 반경에 따른 각 분사시기별 실린더 내 분무의 거동 및 혼합기의 공간분포를 파악하기 위하여 기·액상의 가시화, 크랭크 각에 따른 연료의 공간분포에 관한 내용를 조사하였다. Fig. 1은 본 연구에서 실린더 내의 분무 유동장을 조사하기 위한 실험장치의 개략도이다. 실험장치는 가시화용 엔진, 가시화 엔진, 구동용 전동장치, 가시화를 위한 광학계, 신호처리계 그리고 GDI 분사계로 구성되어 있다. 광원으로는 Nd:YAG 레이저의 4차 조화파(266nm, 최대출력 60mJ/pulse, 발광반치폭 7ns) 를 여기광원으로 사용하였고, 분무화상은 ICCD 카메라로 취득하였다.

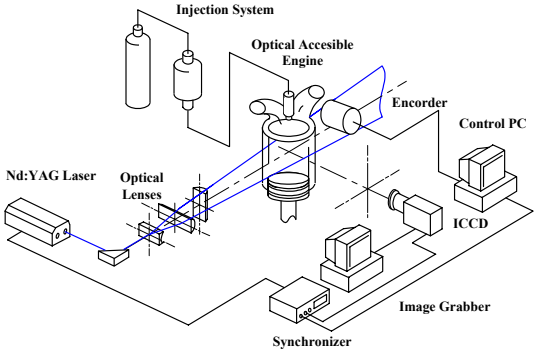


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

사용된 인젝터는 미쯔비시 사에서 채택하였던 와류형 고압 인젝터로 가압용 질소탱크와 연료탱크에 연결되어 있다. 신호 처리계는 자체 제작한 인젝터 솔레노이드 제어회로, 분사시기를 광원과 카메라의 동기를 위한 인터페이스보드, 화상취득용 이미지그래버, ICCD카메라 셔터제어기와 펄스발생기, 엔코더 등으로 구성되어 있다.

Table 1 Engine specifications

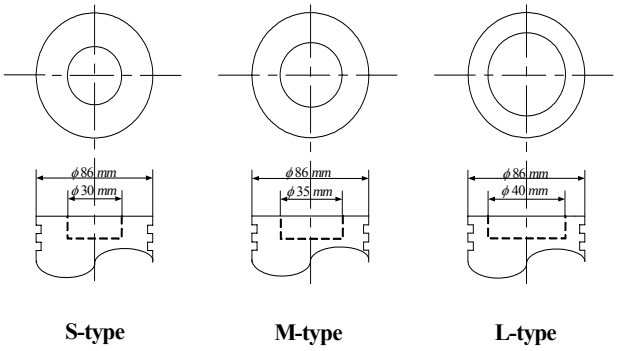
Specification	Resource	
Engine type	4-stroke,4-valves/cylinder, S.I. Engine	
Displacement(cc)	1998	
Bore×stroke(mm)	86×86	
Combustion chamber	Pentroof	
Compression ratio	S-Type	9.0:1
	M-Type	8.7:1
	L-Type	8.3:1

Table 1은 가시화용 엔진의 제원에 대해서 나타내었다. 가시화용 엔진은 선행연구에서 제작된 기존의 포트 분사 방식 DOHC 엔진을 사용하였고, 기존의 텀블 유동의 흡기포터를 한쪽은 막고 한쪽은 자체 제작한 스월러로서 선회유동을 발생시켰다.

Table. 2는 실험에 적용된 운전조건 및 분사시기를 나타낸 실험조건이다. 분사압력은 직분식 가솔린 엔진의 제원에 따라 5.1Mpa로 고정하였다. 피스톤 캐비티 반경을 변화하여 각 분사시기별 증기상의 실린더 내 거동 및 공간분표, 농도장, 분포등을 얻고자 한다.

Table 2 Experimental conditions

Injection pressure (MPa)	5.1
Injection duration (ms)	2
Engine speed (rpm)	450
Injection timing, SOI (BTDC)	180°, 90°, 60°



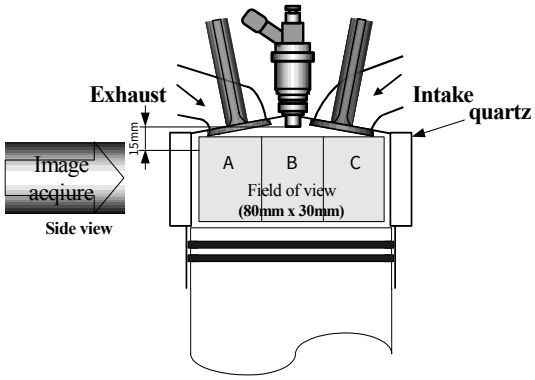


Fig 2 Configurations of designed piston shape and visualization region

Fig. 2은 사용된 피스톤의 형상과 취득된 화상의 가시영역을 나타낸 것으로 피스톤 캐비티 반경에 따라 S-type, M-type, L-type의 3가지로 실험을 행하였다. 본 연구에서는 기존의 포트 분사식 DOHC 가솔린 엔진에 가시창을 설치하고 와류형 고압 인젝터를 부착함으로써 중심 분사식 DI 가솔린 엔진으로 개조하였다. 가시영역은 실린더의 가로방향으로 배기측에서 흡기측으로 좌측영역(A), 중앙 영역(B), 우측영역(C)으로 나누었다. 실린더 내 가시영역은 실린더 헤드로부터 축방향으로 30mm, 반경방향으로는 실린더 중심 축으로부터 좌우로 40mm이다. 배기밸브와 흡기밸브가 위치는 각각 화상의 좌상측과 우상측이다.

2.2 실험방법

인젝터의 특성을 분석하기 위해 자유분무상태에서 산란광으로 분무폭, 분무거리, 그리고 분무각을 측정하였다. 또한 정상유동 실험을 통해서 실험에 가장 적절한 스월비를 찾았다. 또한, 실제 엔진의 운전조건과 유사하게 하고, 산소로 인한 소강현상을 줄이기 위해 분위기 기체인 질소를 이용하였으며, 이를 가열하여 온도를 약 100℃로 유지하였다. 기존의 엔진을 개조하여 실린더 내에 직접 분사할 수 있도록 실린더 헤드 중앙에 인젝터를 설치하였고, 분사압력은 최근의 직분식 가솔린 엔진용 인젝터의 분사압력에 근접하는 5.1MPa로 고정하였다. 실린더 내의 기·액상연료의 거동 및 분포특성을 분석하기 위하여 exciplex 형광법을 사용하여 각 분사시기별, 피스톤 형상별, 그리고 텀블유동이 일어나는 기존의 흡기포트를 자체 제작한 스월러로서 선회유동을 발생시켜 분무의 기·액상의 화상을 취득하였다. 기준연료와 첨가제는 선행연구와 같이 헥산에 플로오로벤젠과 DEMA를 첨가하였다.

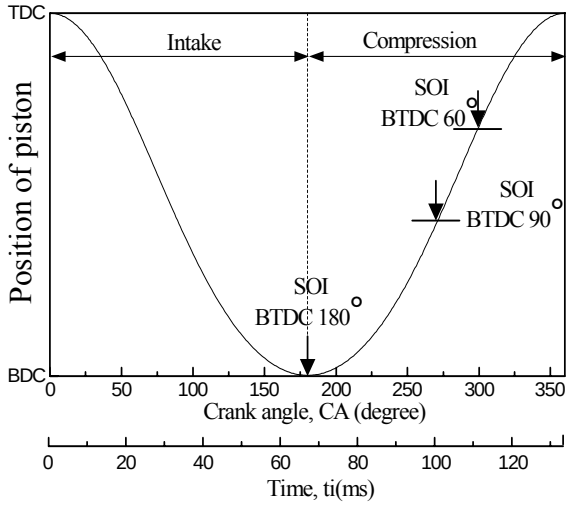


Fig 3 Relationship between positions of piston and crank angle

Fig. 3은 크랭크 각에 따른 피스톤의 위치와 분사 이후의 시간을 나타낸 것이다. 캐비티 직경에 대한 각각의 분사시기는 BTDC 180°, 90°, 60°에서 연료를 분사하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 분사시기 BTDC 180°에서 증기상의 연료 농도 분포

Fig. 4는 분사시기 BTDC 180°일 때 압축행정에서 크랭크 각에 따른 연료증기상의 거동을 측방에서 나타낸 것이다. 분사시기 BTDC 180°인 경우에는 압축행정이 시작하는 시점으로 행정이 진행되면서 크랭크 각도 ATDC 290°인 경우에는 전체적으로 균일하게 나타나 있고, 크랭크 각도 ATDC 300°에서는 각 조건에 대한 특징이 나타나고 있다. 즉, S-Type의 경우에는 연료가 C 영역으로 치우쳐서 나타나고, L-Type의 경우에는 중앙영역이 약하게 나타나고 있다. 또한, L-Type의 경우에는 연료분포가 대체적으로 양분화 되는 현상이 나타났으며, S-Type의 경우에는 C 영역으로 형광강도가 조금 더 집중되는 것으로 나타났다. 이것은 L-Type의 경우가 S-Type에 비해 상대적으로 캐비티의 직경이 넓기 때문이라고 사료된다. 그리고 M-Type의 경우에는 균일하게 분포하고 있다가 압축말기로 갈수록 C 영역에 더 높은 연료가 분포하고 있다. 특히, 크랭크 각도 ATDC 320°에서는 모든 형태에 대해서, 이전에는 B 영역에 분포하고 있다가 그 시점에서는 강한 연료농도가 C 영역으로 치우쳐 있다. 그리고 분사시기 BTDC 180°일 때는 내부유동에 많은 영향을 받기 때문에 전체적인 화상이 균일하게 연료가 혼합하고 있는 것으로 사료된다.

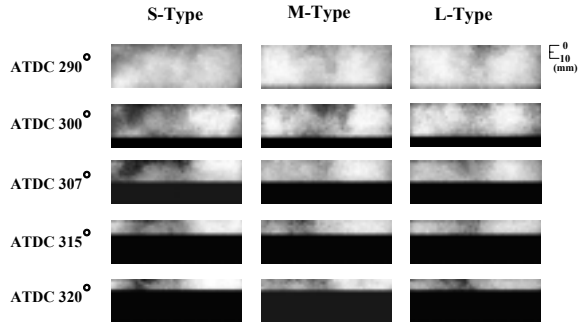


Fig 4 Spray fluorescence images according to crank angle at compression stroke (SIO : BTDC 180°, Side view)

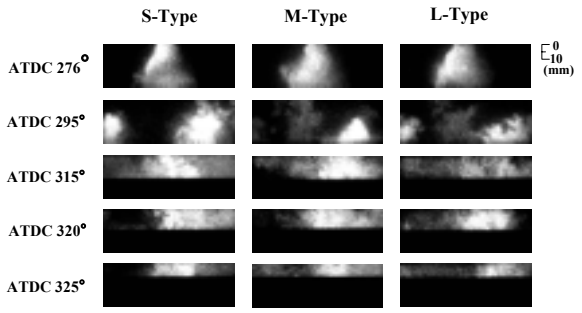


Fig 5 Spray flourescence image according to crank angle (SIO : BTDC 90°, Side view)

3.2. 분사시기 BTDC 90°에서 증기상의 연료 농도 분포

Fig. 5는 BTDC 90°에서 각 조건에 대하여 분무초기에서부터 압축말기까지를 크랭크 각에 따라 나타낸 것이다. 분사시기 BTDC 90°인 경우에는 피스톤이 압축행정 과정이 연료가 분사되기 때문에 분무초기에는 무분별하게 연료가 혼합하였다가 압축말기로 진행되면서 연료가 B 영역으로 집중된다. 이것은 선행연구에도 나타나 있듯이 캐비티의 영향이 미치면서 선회유동과 스퀴시의 유동이 결합되면서 유동속도가 더욱 강해지게 나타나기 때문으로 사료된다. 또한 M-Type의 경우에는 A 영역에 있던 연료가 실린더 중앙에 있으면서 C 영역에 더 많은 연료가 분포하고 있다. 특히 S-Type의 경우에는 나머지 두 가지 형태와는 달리 연료가 흡기 쪽에 많이 존재하였다가 압축말기에는 실린더 중앙으로 더 많이 존재함을 알 수 있었다.

Fig. 6은 BTDC 90°에서 취득한 가시화상을 압축말기에 세 가지의 영역(A 영역, B 영역, C 영역)을 등간격으로 나누어 증기상의 면적을 나타낸 것이다. 크랭크 각도 ATDC 320°에서는 모든 조건에서 연료가 B 영역과 C 영역에 분포되어 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 크랭크 각도 ATDC 325°인 경우, L-type에서는 크랭크 각도 ATDC 320°에서 연료분포가 중앙에 집중되어 있다가 크랭크 각도 ATDC 325°에 이르면 C 영역에 많이 분포하고 있다. 반면에 이 시점에서 S-Type은 B 영역에 많은 연료가 분포하고 있음을 알 수 있다.

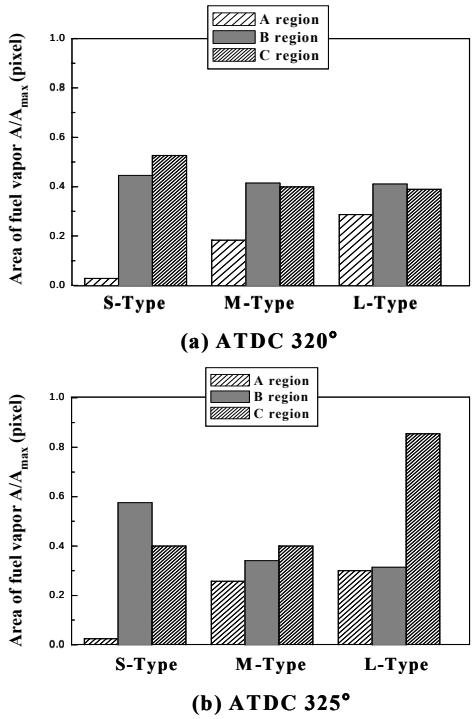


Fig 6 Area of vapor phase with each region and crank angle(SOI : BTDC 90°, Z=15mm)

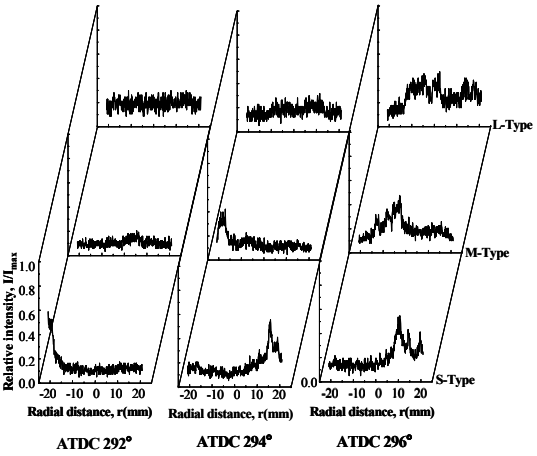


Fig. 7 Fluorescence intensity ratio profile according to crank angle (SOI : BTDC 90°, Z=15mm)

Fig. 7는 크랭크 각도와 캐비티 직경에 따른 연료형광강도를 나타내는 것이다. 연료가 분사된 이후에 가시영역을 벗어났다가 압축행정이 진행되면서 TDC 부근에 있는 가시영역에 또다시 나타나게 된다. 그래서 Fig. 7에서 나타나 있듯이 S-Type의 경우에 측정지점(z=15mm)에서 가장 먼저 연료에 대한 형광강도가 나타나고 있고, 반면에 L-Type의 경우에 가장 늦게 연료가 TDC 부근에서 나타났다.

3.2 분사시기 BTDC 60°에서 증기상의 연료 농도 분포

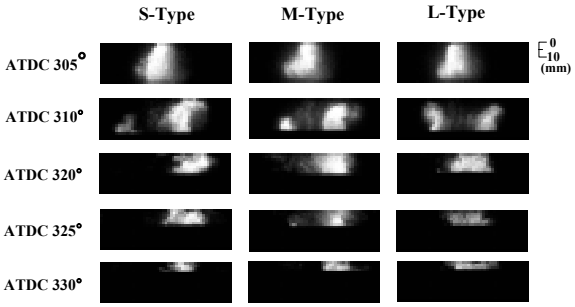


Fig. 8 Spray fluorescence images according to crank angle (SIO : BTDC 60°, Side view)

Fig. 8는 분사시기 BTDC 60°에서 각 조건에 대하여 분무초기에서부터 크랭크 각에 따라 나타낸 것이다. 전체적으로 농후한 혼합기가 실린더 벽면에는 거의 없고 실린더 중앙으로 분포되어 있다 특히, 압축말기에는 캐비티의 반경에 분무폭이 비례하여 나타나고 있다.

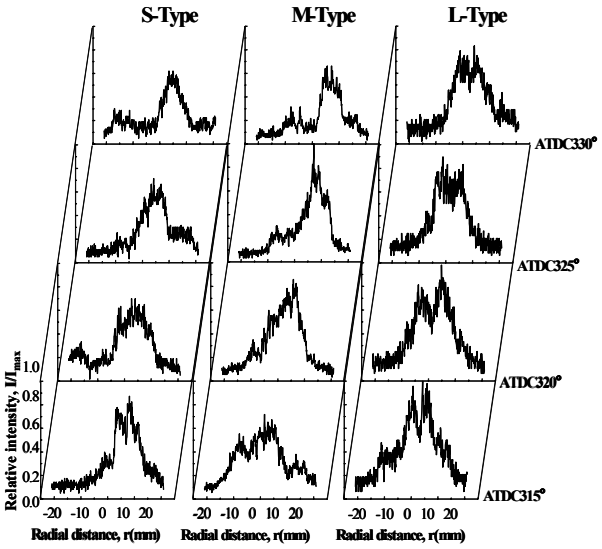


Fig. 9 Fluorescence intensity ratio profile according to crank angle (SOI : BTDC 60°, Z=15mm)

Fig. 9는 크랭크 각도와 캐비티 직경에 따른 연료형광강도를 노즐 팁으로부터 15mm 지점(Z=15mm)에서 형광강도를 나타낸 것이다. L-Type에 비해 S-Type의 조건에서 농후한 혼합기의 연료분포 폭이 좁게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그리고 L-Type의 경우에는 농후한 혼합기가 중앙에 있으면서 양분화되는 현상을 나타내고 있다. 또한 M-Type과 S-Type의 경우에도 마찬가지로 농후한 혼합기가 중앙에 있으면서 C 영역으로 치우쳐 있는 것으로 나타났다.

4. 결 론

직분식 가솔린 엔진의 피스톤 캐비티 반경 변화에 따른 실린더 내부의 혼합기 형성과정을 Exciplex 형광법을 이용하여 가시화하였고, 캐비티 반경과 분사시기에 따른 연료의 증기상에 대한 공간분포와 농도분포를 조사해 본 결론은 다음과 같았다.

(1) 분사시기 BTDC 180°인 경우, 전체적으로 균일혼합으로 나타났지만, 압축말기로 갈수록 M-Type의 경우에 C 영역으로 더 높은 형광강도가 나타났다.

(2) 분사시기 BTDC 90°인 경우, 압축 말기에는 연료 농도가 L-type에 비해 S-type인 경우 B영역에 더욱 많은 연료가 분포하고 있었다. 특히 크랭크 각도 ATDC 325°에서는 S-Type은 연료가 B 영역에 분포하고, L-Type은 C 영역에 많이 존재한다.

(3) 분사시기 BTDC 60°인 경우에는 전체적으로 B영역에 연료 농도가 집중되었고, L-Type의 경우에 농후한 연료강도의 폭이 S-Type에 비해 상대적으로 크게 나타났다.

(4) 각 조건에서, 압축말기에는 대체로 B 영역에 분포하고 있으면서 C 영역으로 치우쳐 있는 것으로 나타났다.

참고문헌

(1) U. Spicher, J. Reissing, J. M. kech and J. Gindele, "Gasoline Direct Injection(GDI) Engine-Development Potentialities", SAE1999-01-2938

(2) Y. Iwamoto, K. Noma, O. Nakayama, T. Yamauchi and H. Ando, "Development of Gasoline Direct Injection Engine", SAE970541

(3) G. K. Fraidl, W. F. Piock and M. Wirth, Gasoline Direct Injection: Actual Trands and Future Strategies"for Injection and Combustion System", SAE960465

(4) Yukiyoshi Fukano, Haruo Hisaki and Shigeo Kida, "Two-Dimension In-Cylinder Flow Field in a Natural Gas Fueled Spark Ignition Engine Probed by Particle Tracking Velocimetry and Its Dependence on Engine Specifications", SAE1999-01-1534.

(5) Yukiyoshi Fukano, Haruo Hisaki and Shigeo Kida, "In-Cylinder Combustion in a Natural Gas Fueled Spark Ignition Engine Probed by High Speed Schlieren Method and Its Dependence on Engine Specifications", SAE1999-01-1493.

(6) Martin Ekenberg and Bengt Johansson, "Fuel Distribution in an Air Assist Direct Injected Spark Ignition Engine with Central Injection and Spark Plug Measured with Laser Induced Fluorescence", SAE2000-01-1898.

(7) Shizuo Abe, Koichi Sasaki and Toyokazu Baika, "Combustion Analysis in Piston Cavity Shape of a Gasoline Direct Injection Engine", SAE2001-01-2029.

(8) Yasuo Moriyoshi, Hitoshi Nomura and Youhei Saisyu, "Evaluation of a Concept for DI Gasoline Combustion Using Enhanced Gas Motion", SAE980152