

직분식 전기점화 엔진에서 PLIF기법에 의한 성층 혼합기의 분포특성 연구

Study on the Fuel Vapor Distribution of the Stratified Charge in a DISI Engine by PLIF Technique

김 성 수
S. S. Kim

(접수일 : 2008년 11월 28일, 수정일 : 2008년 12월 12일, 채택확정 : 2008년 12월 22일)

Key Words : PLIF(Planar Laser Induced Fluorescence, 평면 레이저 유도 형광), Stratified Charge(성층급기), Swirl Flow(선회유동), Tumble Flow(텀블유동), DISI(직접분사식 전기점화)

Abstract : The spatial fuel distribution of the stratified charge of a high pressure 6-hole injector was examined in a single cylinder optical direct injection spark ignition (DISI) engine. The effects of in-cylinder charge motion, and fuel injection pressure, and coolant temperature were investigated using a planar LIF (Laser Induced Fluorescence) technique. It was confirmed that the in-cylinder tumble flow played more effective role in the spatial fuel distribution of the stratified charge than the swirl flow during the compression stroke and the fuel distribution area increased due to the activation of the fuel vaporization by the increase of the coolant temperature. But, the increase of the fuel supplying pressure could not change the pattern of the fuel vapor distribution against the expectation.

1. 서 론

직접분사식 가솔린 기관은 유해배출가스 저감과 연료소비율 향상의 동시에 만족할 수 있는 가능성을 가지고 있다. 제 1세대 분사 시스템인 연소실 벽면 유도방식은 성층 연소방식으로 연료소비율을 20%까지 향상시켰으나 유해배출가스인 HC와 NOx 등의 저감효과는 만족할 만한 수준에 도달하지 못하였다^{1~2)}. 최근 분무유도 (Spray Guided) 방식의 제 2세대 연료분사 시스템을 적용한 직접분사식 가솔린 기관에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다³⁾. 특히 연료분사 시스템의 핵심부품인 고압다공 (High Pressure Multi-Hole) 연료분사기와 외부개방형 피에조 (Outward Open Piezo) 연료분사기의 안정적인 분사패턴과 분사연료의 공간 분포성이 우수하여 성층연소의 가연범위를 개선하고 균질혼합의 경우에도 기존의 방식에 비해 매우 뛰어나 제 1세대 시스템의 단점을 보완할 수 있는 대책으로 많은 연구가 이루어지고 있다^{4~7)}. 직접분사식 가솔린

기관의 연소실 내에 요구되는 공기연료 혼합기를 공급하는 것은 성공적인 연소성능을 확보하는데 매우 중요하다. 기존의 연구에서는 미산란 기법을 통하여 고압 6공 연료분사기의 분무특성을 분석하였으며⁸⁾, 이를 기초로 하여 본 연구에서는 레이저 유도 형광 (Laser Induced Fluorescence) 기법을 이용하여 흡입유동, 연료 분사압력 및 냉각수 온도에 따른 성층 혼합기의 실린더 내 분포특성을 관찰하였다.

2. 실험 장치

2.1 노즐내부 유동

본 연구에 사용한 단기통 가시화 직접분사식 가솔린 기관의 사양은 Table 1에 나타내었다. Fig. 1에 나타낸 바와 같이 분무유도 방식의 직접분사식 가시화 기관은 팬트 루프형 4밸브 실린더 헤드로 구성되어 있다. 흡기유동을 형성하기 위해 Fig. 1(a)와 같이 2개의 흡기포트 중 한 개의 끝단에 선회조절 밸브를 설치하였다. 선회유동은 선회조절 밸브를 닫을 때 유도되고 선회조절 밸브를 열면 텀블유동이 형성된다. 또한 팬트 루프형 연소실을 가시화

김성수(책임저자) : 신라대학교 자동차기계전자공학부
E-mail : sskim@silla.ac.kr, Tel : 051-999-5712

Table 1 Specification of test engine

engine type	DISI DOHC
bore × stroke (mm)	92 × 95
compression ratio	10.5
displacement volume (cc)	498
intake ports	swirl / tumble
angle between valves	45°
valve timing	
IVO(BTDC) / IVC(ABDC)	6°CA / 50°CA
EVO(BBDC) / EVC(ATDC)	50°CA / 6°CA

하기 위해 Fig. 1 (b)와 (c) 와 같이 2개의 펜트 루프형 수정 창과 측면을 가시화 할 수 있도록 수정 라이너를 설치하였다.

또한 LIF 이미지를 측정하기 위하여 피스톤 크라운 부에 직경 58 mm의 수정창과 연장피스톤 안에 45도 반사거울을 설치하여 실린더 내의 가시화 영역이 직경 50 mm가 되도록 하였다. Fig. 1(d)와 같이 점화 플러그와 연료분사기는 일렬로 설치되어 있으며 흡기전회 조절밸브위치에 의해 선회유동이 시계 방향으로 회전하게 됨을 알 수 있다.

모든 실험은 모터링 조건에서 수행하였으며 데이터 측정은 배기 측의 캠축에 설치한 옵티컬 픽업 장치와 0.25°CA당 펄스가 생성되는 크랭크축에 설치한 엔코더 (Muirhead Vactric)로 각도를 측정하였다. 연료분사압력은 커먼레일형 연료공급 장치를 사용하여 70 bar와 120 bar로 조정하였고 냉각수 온도는 냉각수 온도 조절 장치를 이용하여 40°C와 90°C로 조절하였다.

2.2 레이저 유도 형광 측정 장치

Fig. 2는 실험에 사용한 고압 6공 연료분사기의 노즐부 형상과 분무형상의 미산란 이미지를 나타낸 것이다. 연료분사기는 관측 창에서 A-A 평면 이미지가 보이도록 노즐을 고정하였다. Fig. 3은 실린더 내의 기화연료의 분포를 측정하는 레이저 유도 형광 (LIF 측정 장치와 레이저 평면광의 위치를 나타낸 것이며 Fig. 4는 PLIF 시스템으로 실험을 하고 있는 상태를 촬영한 사진이다. Fig. 3과 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 연료증기의 분포를 확인하기 위하여 Nd:YAG (Spectra Physics GCR 170)레이저로부터 펄스당 72 mJ의 에너지로 방출되는 파장 266 nm의 빔을 조합한 렌즈를 통과시켜 두께 1 mm, 폭 70 mm의 평면 광을 만들었으며, 실린더 헤드면의 아래 2 mm의 위치에서 연소실로 조사시켰다. 레이

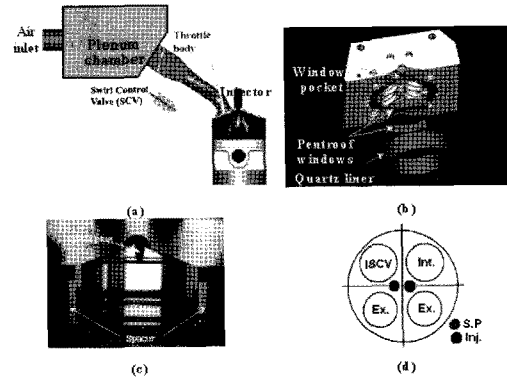


Fig. 1 Engine set-up: (a) Schematic of engine set-up (b) Optical access arrangement (c) Front view optical access (d) Cylinder head configuration

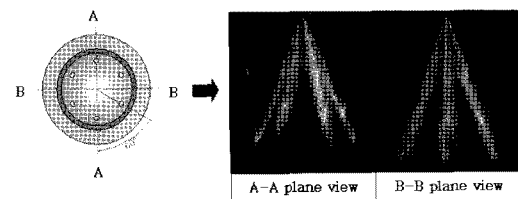


Fig. 2 Nozzle of injector and fuel spray

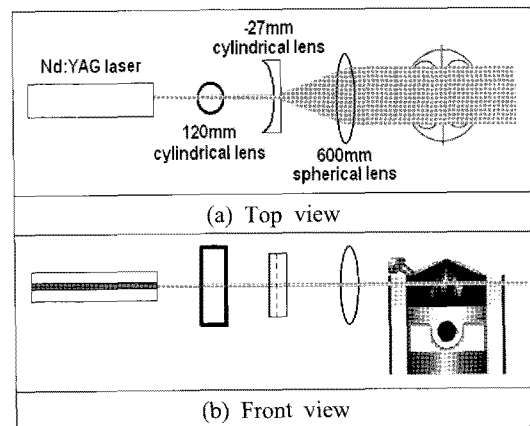


Fig. 3 PLIF system

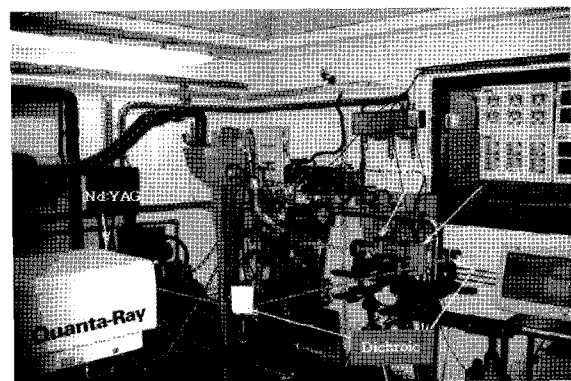


Fig. 4 Photo of PLIF system

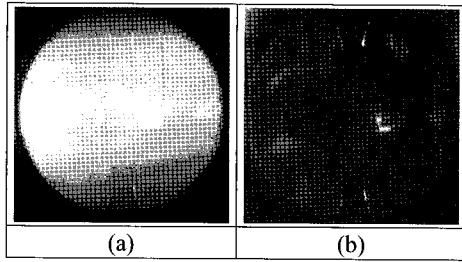


Fig. 5 LIF images on 2mm plane at ATDC 348°C

- (a) Homogeneous charge image
- (b) Background image

Table 2 Experimental conditions

injection duration (ms)	1.0
inlet air temperature (°C)	20
coolant temperature (°C)	40/90
fuel injection pressure (bar)	70/120
fuel	iso-octane (80%) + 3-pentanone (20%)
start of injection (°CA)	ATDC 300

저 평면광은 레이저 발생장치에 의해 8.3 Hz로 생성되었으며 엔진 회전수 1000 rpm 조건에서 한 사이클 당 한 장의 형광이미지를 촬영할 수 있었다. 실린더 내 연료증기의 분포는 조사된 평면 레이저 광에 의해 실린더 내에 분포하는 혼합연료 (이소옥탄 80% + 3-pentanone 20%)로부터 발생하는 형광을 연장 피스톤 안에 설치한 45도 반사거울을 통하여 증폭 CCD 카메라 (DiCam)로 측정하였다.

Fig. 5는 냉각수 온도 40°C, SOI ATDC 60°C, 균질혼합기 공급조건에서 크랭크 각도 ATDC 348°C에서 측정된 LIF 이미지와 연료를 공급하지 않을 때의 배경 이미지이다. 연소실에서의 균질 혼합기는 일반 가솔린용 포트 연료분사기를 흡기관에 설치하여 해당조건에서의 공기량에 대응하는 연료를 분사하여 이론 공연비의 혼합기를 형성하였다. LIF 이미지 측정을 위한 실험조건은 Table 2에 나타내었으며, 각 조건에서의 후처리 LIF 이미지는 측정된 각각의 raw LIF 이미지와 해당 조건에서의 배경 이미지를 이용하여 구한다. 해당 조건에서의 LIF 평균 이미지는 20 사이클의 후처리 LIF 이미지를 평균하여 구하였다.

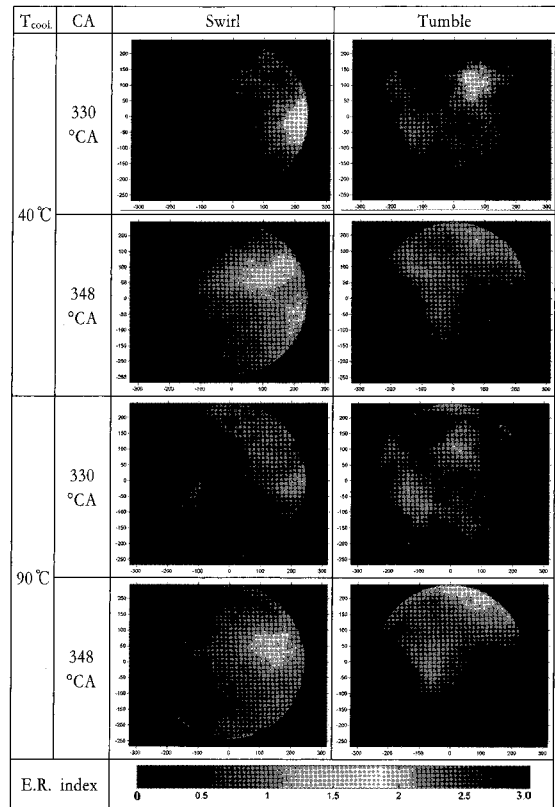


Fig. 5 Mean LIF images during compression stroke, $p_{inj.}=70$ bar

3. 결과 및 고찰

3.1 성층혼합기의 LIF 이미지

고압 6공 연료분사기는 기관의 전 영역에서 매우 안정된 분무구조 특성을 가지고 있다. 특히 연소실의 압력, 연료분사 시기 등에 관계없이 거의 설계사양의 연료 분무각도와 넓은 공간 분포성의 장점을 가지고 있다. 직접분사식 가솔린 기관에서 성층혼합기를 공급할 경우, 점화시기에 최적의 연소 가능한 혼합기가 점화플러그 부근에 공급할 수 있어야 한다. 또한 농후한 혼합기는 점화시기에 점화플러그 부근에 존재해야 한다. 본 연구에서는 성층혼합기를 공급하기 위하여 압축과정의 ATDC 300°C에서 연료분사압력 70 bar와 120 bar 조건에서 1 ms 동안 연료를 분사하였다. Fig. 5는 엔진회전수 1000 rpm, 냉각수 온도 40°C와 90°C, 연료 분사 압력 70 bar일 때 흡입유동 조건에 따라 ATDC 330°C와 348°C에서 측정하여 후처리한 LIF 평균 이미지이다.

Fig. 5의 좌측 열에 나타난 선회유동조건인 경우, 냉각수의 온도와 크랭크 각도에 관계없이 시계방향으로 회전하는 선회유동이 분사된 연료에 영향을

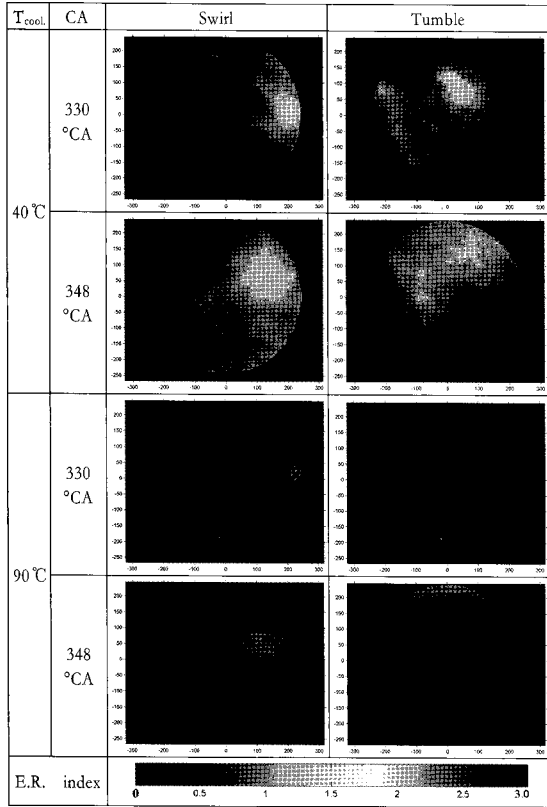


Fig. 6 Mean LIF mean images during compression stroke, $p_{inj} = 120$ bar

주어 연료증기가 실린더의 우측 가장자리에서부터 실린더 중심부를 향해 시계방향으로 퍼져 나가게 된다. 크랭크 각도 ATDC 330°CA의 LIF 이미지를 보면 연료증기가 아직 실린더의 좌측 가장 자리에는 도달하지 않은 상태를 볼 수 있다. 이후 크랭크 각도가 ATDC 348°CA로 진행함에 따라 피스톤이 상승하여 연소실의 높이가 줄고 연료의 기화가 촉진됨에 따라 연료증기가 실린더 전체로 퍼져 나가게 됨을 알 수 있다. ATDC 330°CA에서 냉각수 온도가 40°C인 경우의 LIF 이미지에서는 당량비 1.5 ~ 2의 혼합기가 우측 가장자리에 국소적으로 분포하고 있으나 냉각수 온도가 90°C로 증가하게 되면 당량비 1 ~ 1.5의 혼합기가 냉각수 온도 40°C의 경우보다 더 넓은 가장자리에 분포하게 된다. 이는 냉각수 온도가 40°C에서 90°C로 상승함에 연료의 기화가 촉진되어 나타나는 현상이다. 그리고 ATDC 348°CA에서 냉각수 온도가 40°C와 90°C인 LIF 이미지에서는 냉각수 온도에 관계없이 당량비 1.0 ~ 2.0의 혼합기가 점화 플러그의 반대방향에 위치한 실린더의 절반지역에 넓게 분포하며, 점화플러그의 위치한 위치에는 당량비 1이하의 혼합기가 분포되어 충분한 양의 혼합기가 공급되지 못하고 있다. 이

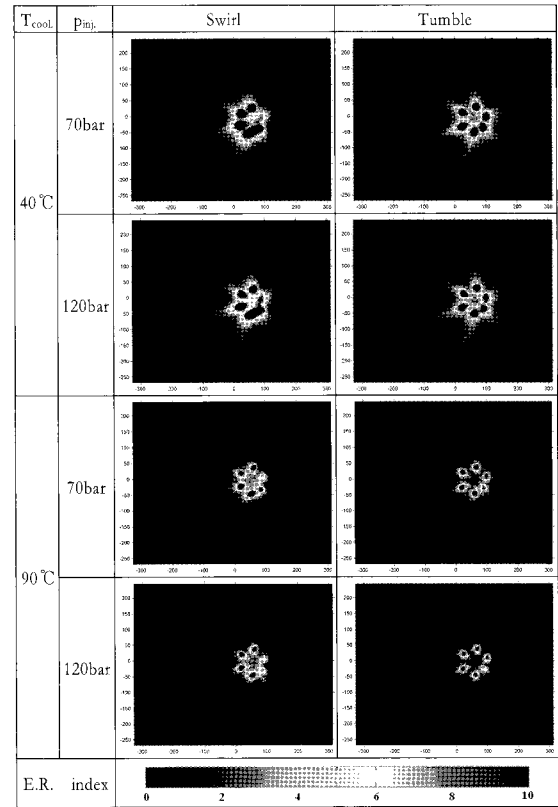


Fig. 7 Mean LIF images at EOI, ATDC 300°CA + 1 ms

로써 성층연료 공급시 선회유동은 점화시기에 충분한 양의 농후혼합기를 점화플러그 주위에 공급하지 못함을 알 수 있다.

Fig. 5의 우측 열에 나타난 텀블유동의 LIF 이미지의 경우에는 텀블유동이 점화플러그와 연료분사기가 일렬로 위치한 x-축을 중심으로 회전하므로 분사된 연료증기가 흡기 밸브 측에서 배기밸브 측으로 이동 하는 것을 볼 수 있다. 냉각수 온도 40°C, 크랭크 각도 ATDC 330°CA의 LIF 이미지를 보면 점화플러그와 연료분사기가 일렬로 위치한 실린더의 중심을 기준으로 다소 넓게 연료증기가 분포하고 있으며 특히 1.5 ~ 2 정도의 혼합기가 연료분사기 주위에 국소적으로 분포한다. 크랭크 각도가 ATDC 348°CA로 진행하게 되면 텀블유동에 의해 당량비 1 ~ 1.5 정도의 혼합기가 실린더의 흡입밸브 측 가장자리에서 실린더의 중심부로 이동하는 것을 볼 수 있다. 크랭크 각도 ATDC 330°CA와 348°CA의 LIF 이미지에서는 냉각수 온도에 상관없이 점화플러그 주위에 당량비 1 ~ 1.5 정도의 혼합기가 안정적으로 공급되는 것을 알 수 있다. 크랭크 각도 ATDC 348°CA에서 냉각수 온도 40°C인 LIF 이미지와 냉각수 온도 90°C인 LIF 이미지를 비교해

보면 냉각수 온도가 증가함에 따라 연료의 기화가 촉진되어 점화플러그 주위에 농후혼합기가 더 집중되어 공급됨을 알 수 있다. 이로써 텀블유동은 점화시기인 ATDC 348°CA에서 점화플러그 주위에 당량비 1 ~ 1.5의 농후혼합기를 안정적으로 공급하여 선회유동보다 성층화에 더욱 유리함을 알 수 있다.

Fig. 7은 연료분사시기 ATDC 330°CA에서 연료 분사시간 1 ms가 경과하여 연료분사가 완료되는 시점에서 촬영한 LIF 평균 이미지이다. Fig. 7의 좌측 열에 나타난 선회유동의 LIF 이미지의 경우 고압 6공 연료분사기에서 분사되는 연료의 분사 중 노즐 중심에서 우측에 위치한 2 개의 분사는 선회유동의 영향을 받아 그 단면의 형상이 좌하단 방향으로 변형된다. 특히 우측 상단의 분사는 분사의 액적들이 유동에 의해 분사에서 분리됨에 따라 다른 분사 보다 낮은 당량비를 나타낸다. 우측 하단의 연료분사는 선회유동의 영향으로 최 하단에 위치한 연료분사와 서로 합쳐져 분사 간의 구분이 명확하지 않게 된다. 연료분사압력이 70 bar인 경우와 120 bar인 경우를 서로 비교해 보면 70 bar인 경우의 우측 상단의 연료 분사의 변형이 120 bar인 경우보다 심하게 나타난다. 이는 연료 분사압력에 따라 분사된 연료분사의 모멘텀의 세기가 120 bar의 경우보다 약하여 유동의 영향이 분사에 상대적으로 크게 작용하기 때문이다. 연료분사 분사 주위로의 연료증기의 분포형태는 연료분사압력이 120 bar의 경우가 70 bar인 경우보다 개별 분사 방향으로 더 명확하게 퍼져 나감을 볼 수 있다. 이 역시 연료분사 압력상승에 따른 개별 분사의 모멘텀이 크기 때문이다. 냉각수 온도가 90°C인 경우에는 냉각수 온도가 40°C인 경우에 비해 개별 분사의 중심 단면의 크기가 상당부분 줄어들었다. 이는 냉각수 온도가 상승함에 따라 개별 분사 표면에 존재하는 연료액적의 기화가 촉진되기 때문이다. 냉각수 온도가 90°C 인 경우에 연료분사압력이 70 bar에서 120 bar로 증가할 경우에도 냉각수 온도가 40°C인 경우에서와 유사하게 연료 분사 방향으로 연료증기가 더 명확하게 퍼져 나감을 알 수 있다.

Fig. 7의 우측 열에 나타난 텀블유동의 LIF 이미지에서 고압 6공 연료분사기에서 분사되는 연료의 분사는 유동의 영향을 크게 받지 않고 각각의 위치에서 분사되고 있음을 알 수 있다. 개별 분사에서 분사된 연료가 선회유동의 경우보다 분사방향으로 더 명확하게 퍼져나감을 알 수 있다. 그리고 연료분

사압력이 70 bar에서 120 bar로 증가할 경우 연료증기가 개별 분사 방향으로 더 명확하게 퍼져 나감을 알 수 있다. 이 역시 연료분사압력이 상승함에 따라 개별 분사의 모멘텀이 증가하기 때문이다. 또한 냉각수 온도가 40°C에서 90°C로 증가하게 되면 분사를 구성하는 연료액적의 기화가 촉진되어 개별 분사 중심 단면의 크기가 상당부분 줄어들음을 알 수 있다.

4. 결 론

LIF 기법을 이용하여 6공 고압연료분사기를 장착한 직접분사식 가솔린 기관에서 성층혼합기 공급모드에서의 연료분포 특성을 관찰한 결과는 다음과 같다.

- 1) 흡입유동에 따른 성층혼합기 공급모드에서 텀블유동은 선회유동에 비해 점화플러그 주위에 당량비 1 ~ 1.5 정도의 연료공기 혼합기를 안정적으로 공급하였다.
- 2) 냉각수 온도가 40°C에서 90°C로 증가하면 연료의 기화가 촉진되어 농후 혼합기의 분포영역이 넓어짐을 알 수 있었다.
- 3) 연료공급 압력의 상승은 농후 혼합기의 분포패턴을 크게 변화시키지 못했다.

후 기

본 연구를 수행할 수 있도록 지원해 주신 영국 시티대학교의 Constantine Arcoumanis교수님께 깊이 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. Nouri J. M. and Whitelaw J. H., 2002, "Effect of chamber pressure on the spray structure from a swirl pressure atomiser for direct injection gasoline engines", 1st Int. Conference on Optical Diagnostics, ICOLAD, 1, pp. 121 ~ 129.
2. Wirth M. et al., 1998, "Gasoline DI engines: the complete system approach by interaction of advanced development tools", SAE 980492.
3. Fraidl G. K., Plock W. F. and Wirth M., 1996, "Gasoline Direct Injection: actual trends and future strategies for injection and combustion

- systems", SAE 960465.
4. Wirth M. et al., 2004, "A Cost Optimised Gasoline Spray Guided Direct Injection System for Improved Fuel Economy, Seminar on Fuel Economy and Engine Downsizing". IMechE Fuel Economy and Engine Downsizing, Seminar Proceedings, One Birdcage Walk, London.
 5. Nouri J. M. and Whitelaw J. H., 2002, "Effect of chamber pressure on the spray structure from a swirl pressure atomiser for direct injection gasoline engines", 1st Int. Conference on Optical Diagnostics, ICOLAD, 1, pp. 121~129.
 6. Li T., Nishida K. and Hiroyasu H., 2004, "Characterization of initial spray from a D.I. gasoline injector by holography and laser diffraction method", Int. Journal of Atomization and Sprays, vol. 14, pp. 477~494.
 7. Mitroglou N., 2005, "Multi-hole Injectors for Direct-Injection Gasoline Engines", Ph.D Thesis, The City University, pp. 187~248.
 8. Kim S. S. and Kim S. H., 2007, "Effects of Intake Flows on Spray Structure of a High Pressure Multi-Hole Injector in a Second Generation Direct Injection Gasoline Engine", KSPSE, Vol. 11, No. 4, pp. 18~25.