

6공 연료분사기를 장착한 DISI 엔진 내 균질급기의 연료증기 분포 특성

The Study on the Fuel Vapor Distribution of Homogeneous Charge in a DISI Engine with a 6-Hole Fuel Injector

김 성 수
S. S. Kim

(접수일 : 2010년 7월 20일, 수정일 : 2010년 11월 5일, 채택확정 : 2010년 11월 18일)

Key Words : PLIF(Planar Laser Induced Fluorescence, 평면레이저유도형광), Homogeneous Charge(균질급기), Swirl Flow(선회유동), Tumble Flow(텀블유동), DISI(직접분사식 전기점화)

Abstract : The spatial fuel vapor distribution of the homogeneous charge by a 6-hole injector was examined in a optically accessed single cylinder 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 a little more effective role in the spatial fuel vapor distribution than the swirl flow during the compression stroke at 10 mm and 2 mm planes under cylinder head gasket and the increased fuel injection pressure activated spatial distributions of the fuel vapor. In additions, richer mixtures were concentrated around the cylinder wall by the increase of the coolant temperature.

1. 서 론

직접분사식 가솔린기관은 기존의 포트분사 방식의 가솔린기관에 비하여 유해 배출가스 저감과 연료소비율 향상을 동시에 만족할 수 있는 가능성을 가지고 있다. 제 1세대 분사 시스템인 연소실 벽면 유도 방식은 성층 연소방식으로 연료소비율을 20%까지 향상시켰으나 유해 배출가스인 HC와 NOx 등의 저감효과는 만족할 만한 수준에 도달하지 못하였다^{1,2)}. 최근 분무유도(spray guided) 방식의 제 2세대 연료 분사시스템을 적용한 직접분사식 가솔린기관에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다³⁾. 특히 연료분사시스템의 핵심부품인 고압다공(high pressure multi-hole) 연료분사기와 외부 개방형 피에조(outward open piezo) 연료분사기의 안정적인 분사패턴과 분사연료의 공간분포특성이 우수하여 성층연소의 가연범위를 개선하고 균질급기 조건의 경우에도 기존의 방식에 비해 매우 뛰어나 제 1세대 시스템의 단점을 보완할

수 있는 대책으로 간주되어 많은 연구가 이루어지고 있다^{4,5)}. 직접분사식 가솔린기관의 연소실 내에 요구되는 공기-연료 혼합기를 공급하는 것은 성공적인 연소성능을 확보하는데 매우 중요하다. 이전 연구에서는 레이저유도형광(laser induced fluorescence) 기법을 적용하여 성층급기의 연료증기 분포특성을 관찰하였으나⁶⁾ 본 연구에서는 흡입유동, 연료분사압력 및 냉각수온도에 따른 균질급기의 연료증기 분포특성을 관찰하였다.

2. 실험 장치

2.1 가시화 엔진

본 연구에 사용한 단기통 가시화 직접분사식 가솔린기관의 사양은 Table 1에 나타내었으며 분무유도 방식의 직접분사식 가시화기관은 Fig. 1과 같이 펌트 루프형 4밸브 실린더헤드로 구성되어 있다. 흡기유동을 형성하기 위해 Fig. 1 (a)와 같이 2개의 흡기포트 중 한 개의 끝에 선회조절 밸브를 설치하였다. 선회조절 밸브를 닫으면 선회유동이, 선회조절 밸브를 열

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

Table 1 Specification of test engine

Engine type	DISI DOHC
Bore × Stroke	92 mm × 95 mm
Compression ratio	10.5
Displacement volume	498 cc
Intake ports	Swirl / Tumble
Valve timing	
IVO(BTDC) / IVC(ABDC)	6°CA / 50°CA
EVO(BBDC) / EVC(ATDC)	50°CA / 6°CA

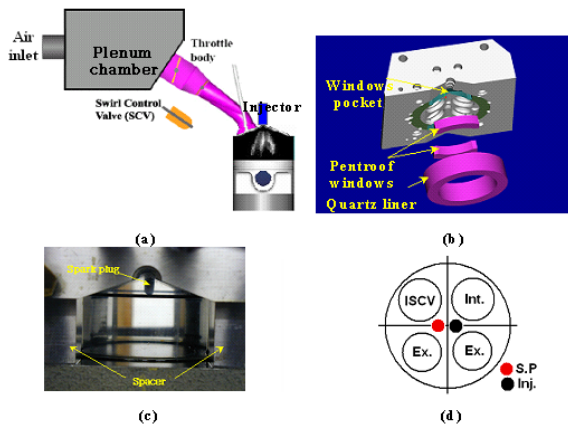


Fig. 1 Engine set up: (a) Schematic of engine set-up (b) Optical access arrangement (c) Front view optical access (d) Cylinder head configuration

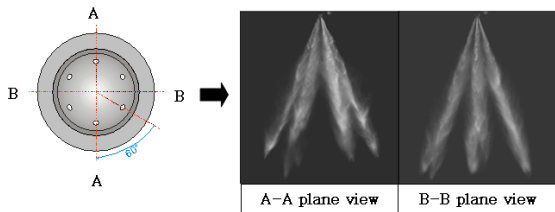


Fig. 2 Nozzle of injector and fuel spray

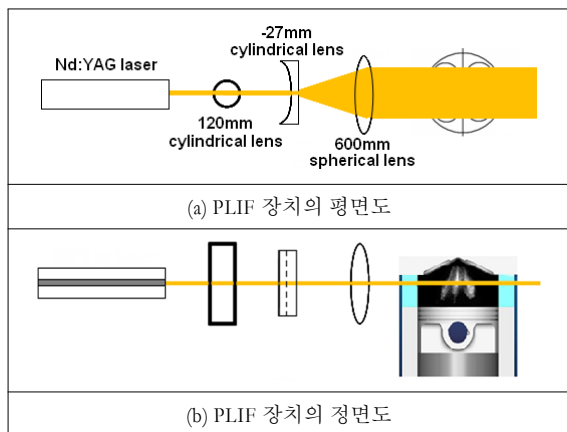


Fig. 3 PLIF system

면 텀블유동이 형성된다. 또한 펜트루프형 연소실을 가시화하기 위해 Fig. 1 (b)와 (c) 와 같이 2개의 펜트루프형 수정 창과 측면을 가시화 할 수 있도록 수정라이너를 설치하였다. 또한, LIF 이미지 측정을 위하여 피스톤크라운 부에 직경 58 mm의 수정 창과 연장피스톤 안에 45도 반사거울을 설치하여 실린더 내의 가시화영역이 직경 50 mm가 되도록 하였다. Fig. 1(d)와 같이 점화플러그와 연료분사기는 일렬로 설치되어 있다.

모든 실험은 드로틀밸브 전개, 1000 rpm 모터링조건에서 수행하였다. 이는 이전 연구에서 성층급기의 연료증기 분포특성을⁶⁾ 관찰하였던 조건과 동일한 운전조건이다. 모든 데이터는 배기 측의 캠축에 설치한 옵티칼 픽업 장치와 0.25°C당 펄스가 생성되는 크랭크축에 설치한 엔코더로 각도를 기준으로 측정하였다. 연료분사 실험조건은 Table 2에 나타내었는데 연료분사압력은 커먼레일형 연료공급장치를 사용하여 70 bar와 120 bar로 조정하였고 연료분사시기는 이전의 연료 분무특성 연구⁷⁾에서 균질급기 모드에 적용하였던 ATDC 60°CA, 90°CA, 120°CA 중에서 분무연료의 기화시간이 가장 긴 ATDC 60°CA로 정하였다. 냉각수온도 변화에 따른 혼합기 분포특성을 관찰하기 위하여 냉각수온도는 냉각수온도 조절장치를 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 레이저유도형광측정장치와 레이저 평면광의 위치를 나타낸 것이며, Nd:YAG, Spectra Physics GCR 170레이저로 부터 펄스 당 72 mJ의 에너지로 방출되는 파장 266 nm의 빔을 조합렌즈를 통과시켜 두께 1 mm, 폭 70 mm의 평면광을 만들었으며, 실린더헤드면의 아래 2 mm와 10 mm의 위치에서 연소실로 조사시켰다. 레이저 평면광은 레이저 발생장치에 의해 8.3 Hz로 생성되었으며 엔진회전수 1000 rpm 조건에서 한 사이클 당 한 장의 LIF 이미지를 촬영할 수 있었다. 연소실 내의 연료분포는 조사된 평면 레이저광에 의해 실린더 내에 분포하는 혼합연료(이소옥탄 80% + 3-pentanone 20%)로부터 발생하는 형광신호를 연장 피스톤 안에 설치한 45도 반사거울을 통하여 증폭 CCD 카메라,

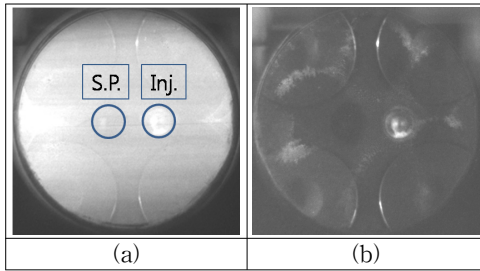


Fig. 4 LIF images on 2 mm plane at ATDC 348°C (a) Homogeneous charge image (b) Background image

Table 2 Experimental conditions

Injection duration	2.8ms, 3.2ms
Inlet air temperature	20°C
Coolant temperature	40°C / 90°C
Fuel injection pressure	70 bar / 120 bar
Fuel	Iso-octane(80%) + 3-pentanone(20%)
Start of injection	ATDC 60°C

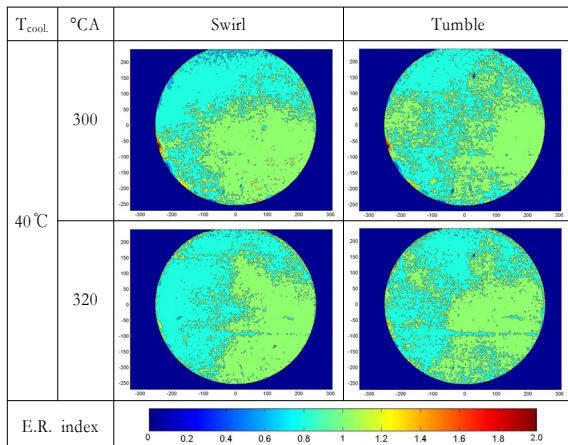


Fig. 5 Mean LIF images at 10 mm under cylinder head gasket, $p_{inj.}=70$ bar

DiCam으로 측정하여 구하였다. 연소실에서 기준이 되는 이론공연비의 균질혼합기는 가솔린용 포트 연료분사기를 흡기관에 설치하여 흡기포트에 해당조건의 공기량에 대응하는 연료를 분사하여 형성하였다. 연소실 내의 연료분포 LIF 이미지의 정량화를 위한 기준 이미지는 해당 유동 및 냉각수온도 조건에서의 포트공급 균질혼합기의 LIF 이미지와 연료를 공급하지 않을 때의 배경 LIF 이미지이다. Fig. 4는 냉각수온도 40°C, 연료분사 시작시기 ATDC 60°C, 포트공급 균질혼합기 조건에서 크랭크각도 ATDC 348°C에서 측정한 LIF 이미지와 연료를 공급하지

않을 때의 배경이미지를 나타내었다. LIF 이미지 측정조건은 Table 2에 나타내었으며, 해당 조건에서의 LIF 평균 이미지는 20 사이클의 후처리 LIF 이미지를 평균한 이미지를 당량비 영역별 구분이 가능하도록 10단계 Contour 형태로 처리하여 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

직접분사식 가솔린기관에 적용되고 있는 6공 연료분사기는 연소실의 압력, 연료 분사시기 등에 관계없이 거의 설계사양의 연료 분무각도와 넓은 공간 분포특성의 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 균질급기 모드에서 연료분사압력과 흡기유동 및 냉각수온도의 변화가 압축상사점 부근에서 혼합기의 분포특성에 미치는 영향을 다음과 같이 관찰하였다.

3.1 연료분사압력 70 bar일 때의 혼합기 분포

연료분사압력 70 bar인 조건에서 연소실 내에 균질급기를 형성하기 위하여 연료분사 시작시기를 흡입과정의 ATDC 60°C로 하여 3.2ms 동안 연료를 분사하였다. Fig. 5는 연료분사압력 70 bar, 엔진회전수 1000 rpm, 냉각수온도 40°C, 실린더헤드 개스킷 아래 10 mm의 평면에서 ATDC 300°C와 320°C일 때의 LIF 평균 이미지이다. Fig. 5의 좌측 열에 나타난 선회유동 조건, ATDC 300°C일 때의 혼합기분포 이미지를 보면 당량비 1.0~1.1의 혼합기는 연소실의 3, 4사분면에 집중되어 있고 당량비 0.9~1.0의 혼합기는 연소실의 1, 2사분면과 3사분면의 일부영역에 분포되어 있다. 크랭크각도가 ATDC 320°C가 되면 당량비 1.0~1.1의 혼합기는 연소실의 1사분면 가장자리 영역을 제외한 1, 4사분면 전체에 분포되고, 당량비 0.9~1.0의 혼합기는 크랭크각도 ATDC 300°C의 경우에 비하여 1사분면의 분포면적이 일부 줄어드는 반면 2, 3사분면의 분포면적이 증가하게 된다. 이는 연소실 내에 존재하는 반시계방향의 선회유동이 연소실의 혼합기분포에 영향을 주어 분포영역이 변하고 있음을 알 수 있다. Fig. 5의 우측 열에 나타난 텀블유동 조건, ATDC 300°C일 때의 혼합기분포 이미지를 보면 당량비 1.0~1.1의 혼합기는 0.9~1.0 혼합기와 혼합되어 연소실 전체에 넓게 분포되어 있으며, 1, 4사분면에 더 집중적으로 분포되어 있다. 당량비 1.0~1.1의 혼합기 분포영역 가장자리는 매우 불규칙하게 주름져 있을 뿐만 아니라 작은 영역으로 형성된 섬 모양의 혼합기가 널리

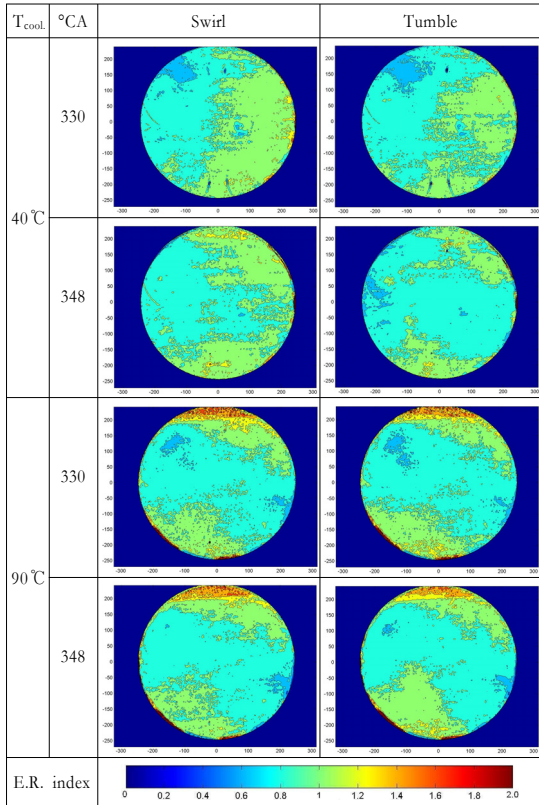


Fig. 6 Mean LIF images at 2 mm under cylinder head gasket, $p_{inj.}=70$ bar

퍼져 있다. 이는 흡입과정에서 생성된 텀블유동이 압축과정이 진행됨에 따라 주유동의 세기가 점점 작아지면서 생성되는 와류(vortex)의 영향으로 연소실 내의 공기연료의 혼합이 선회유동의 경우보다 활발하게 일어나기 때문으로 보인다. 이전의 연구에서 보면 균질급기 모드인 흡입과정에서 연료를 분사할 때 연료의 분무형상에 선회유동이 텀블유동보다 크게 영향을 주어 분무형상이 크게 변형되는 것을 볼 수 있었다⁷⁾. 본 연구에서는 압축과정 상사점 부근인 ATDC 348°CA에서 균질혼합기의 분포형태는 오히려 텀블유동이 선회유동보다 활발한 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 또한 크랭크각도가 ATDC 320°CA가 되면 ATDC 300°CA의 경우에 비해 당량비 1.0~1.1의 혼합기가 연소실의 3, 4사분면 쪽으로 이동하여 분포하게 됨을 알 수 있다.

Fig. 6은 연료분사압력 70 bar, 냉각수온도 40°C, 90°C조건에서 실린더헤드 개스킷 아래 2 mm의 평면에서 ATDC 330°CA와 348°CA일 때의 LIF 평균 이미지이다. 냉각수온도 40°C, 선회유동 조건, ATDC 330°CA일 때의 혼합기분포 이미지를 보면 당량비 1.0~1.1의 혼합기가 연소실의 1, 4사분면에 분포되고 있으며, ATDC 348°CA일 때의 혼합기분포 이미지에

서는 당량비 1.0~1.1의 혼합기가 연소실의 1, 3, 4사분면의 가장자리 영역으로 분포되고 있음을 알 수 있다. 이는 냉각수온도 40°C, 선회유동 조건일 때 Fig. 5의 ATDC 300°CA와 320°CA, Fig. 6의 330°CA와 348°CA에서의 혼합기분포 이미지를 서로 비교해 보면 ATDC 300°CA일 때 연소실의 4사분면에 집중 분포되어 있던 당량비 1.0~1.1의 혼합기는 반시계 방향으로 회전하는 선회유동에 의해 크랭크각도가 320°CA, 330°CA로 진행될수록 1, 4사분면으로 넓게 퍼져 분포하게 되며 크랭크각도가 ATDC 348°CA가 되면 당량비 1.0~1.1의 혼합기는 연소실의 1, 3, 4사분면의 가장자리 영역으로 분리되어 분포되는 패턴이 존재함을 알 수 있다. 냉각수온도가 90°C로 상승하게 되면 ATDC 330°CA에서의 혼합기분포는 연소실의 1, 2사분면의 상단과 3, 4사분면 하단 가장자리 영역으로 분포하게 된다. 또한 크랭크각도가 ATDC 348°CA로 진행하여도 ATDC 330°CA에서의 혼합기분포와 비슷한 형태를 유지하고 있어 냉각수온도가 40°C 일 때와는 달리 선회유동이 혼합기분포의 형태에 크게 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 또한 연소실의 1, 2사분면의 상단 일부영역에서는 당량비 1.2~1.3, 1.4~1.5의 혼합기가 층을 이루어 분포하게 되는데 이는 냉각수온도의 영향으로 보인다. 냉각수온도가 90°C인 경우에 당량비 0.9~1.0의 혼합기가 냉각수온도가 40°C인 경우보다 더 넓은 영역에 분포되고 있음을 알 수 있다. 따라서, 냉각수온도가 40°C인 경우에는 연소실 내의 선회유동이 당량비 1.0~1.1의 혼합기에 영향을 주어 크랭크각도가 진행함에 따라 혼합기의 분포형태가 변화하나 냉각수온도가 90°C인 경우에는 냉각수온도의 영향이 실린더 내의 선회유동의 영향보다 커서 크랭크각도가 ATDC 330°CA에서 ATDC 348°CA로 진행하여도 혼합기분포의 형태가 거의 변하지 않는다.

Fig. 6의 우측 열에 나타낸 냉각수온도 40°C, 텀블유동 조건, ATDC 330°CA일 때의 혼합기분포 이미지를 보면 당량비 1.0~1.1의 혼합기가 연소실의 1, 4사분면에 분포되며 가장자리는 더욱 주름져 당량비 0.9~1.0의 혼합기와와의 혼합이 선회유동의 경우보다 더 활발히 일어남을 알 수 있다. 크랭크각도가 ATDC 348°CA가 되면 혼합기분포가 연소실의 상단과 하단의 가장자리로 퍼져서 분포하게 될 뿐 아니라 선회유동의 경우보다 당량비 0.9~1.0의 혼합기가 차지하는 영역이 더 넓어지게 된다. 텀블유동의 경우에도 Fig. 5의 ATDC 300°CA와 320°CA, Fig. 6의

330°C와 348°C에서의 혼합기분포 이미지를 서로 비교해 보면 크랭크각도가 진행함에 따라 혼합기분포 영역이 선회유동의 경우와 유사한 패턴으로 변화하고 있음을 알 수 있다. 즉, ATDC 300°C와 320°C일 때 4사분면에 분포되던 당량비 1.0~1.1의 혼합기가 텀블유동의 영향으로 크랭크각도가 ATDC 330°C로 진행함에 따라 점차 분리되기 시작하여 ATDC 348°C에서는 연소실의 1, 2사분면의 상단과 3, 4사분면 하단 가장자리 영역으로 완전히 분리되어 분포하게 된다. 또한 냉각수온도 90°C, 텀블유동 조건, ATDC 330°C에서의 혼합기분포 형태는 선회유동일 때의 혼합기분포 형태와 유사할 뿐만 아니라 ATDC 348°C일 때의 혼합기분포 이미지와 거의 유사하게 나타난다. 텀블유동의 경우에도 냉각수온도가 40°C인 경우에는 텀블유동이 연소실에 분포된 혼합기에 영향을 주어 크랭크각도가 진행함에 따라 혼합기분포의 형태가 변화하나 냉각수온도가 90°C가 되면 냉각수온도의 영향이 유동의 영향보다 크게 작용하여 크랭크각도가 ATDC 330°C에서 ATDC 348°C로 진행하여도 혼합기분포의 형태는 거의 변하지 않음을 알 수 있다.

3.2 연료분사압력 120 bar일 때의 혼합기 분포

연료분사압력 120 bar인 조건에서 연소실 내에 균질급기를 형성하기 위하여 연료분사 시작시기를 흡입과정의 ATDC 60°C로 하여 2.8ms 동안 연료를 분사하였다. Fig. 7은 연료분사압력120 bar, 냉각수온도 40°C, 90°C조건에서 실린더헤드 개스킷 아래 2 mm의 평면에서 ATDC 330°C와 348°C일 때의 LIF 평균 이미지이다. 냉각수온도 40°C, 선회유동조건, ATDC 330°C일 때의 혼합기분포 이미지를 보면 당량비 1.0~1.1의 혼합기가 연소실의 1, 4사분면에 분포하고 있는 형태는 Fig. 6의 연료분사압력이 70 bar일 때의 혼합기분포 형태와 유사하나 연소실 우측 가장자리의 작은 영역에 분포되었던 당량비 1.2~1.3의 혼합기가 차지하는 영역이 1.0~1.1의 혼합기가 차지하는 영역의 1/4정도에 해당될 정도로 넓게 나타난다. ATDC 348°C일 때는 선회유동의 영향으로 당량비 1.0~1.1의 혼합기는 연소실의 1, 4사분면의 가장자리와 2, 3사분면의 일부영역에까지 분포하게 됨을 알 수 있다. 냉각수온도가 90°C로 상승하게 되면 ATDC 330°C에서의 혼합기분포 형태는 연료분사압력이 70 bar일 때의 혼합기분포 이미지와 유사하며 ATDC 348°C가 되어도 혼합기분포 형태

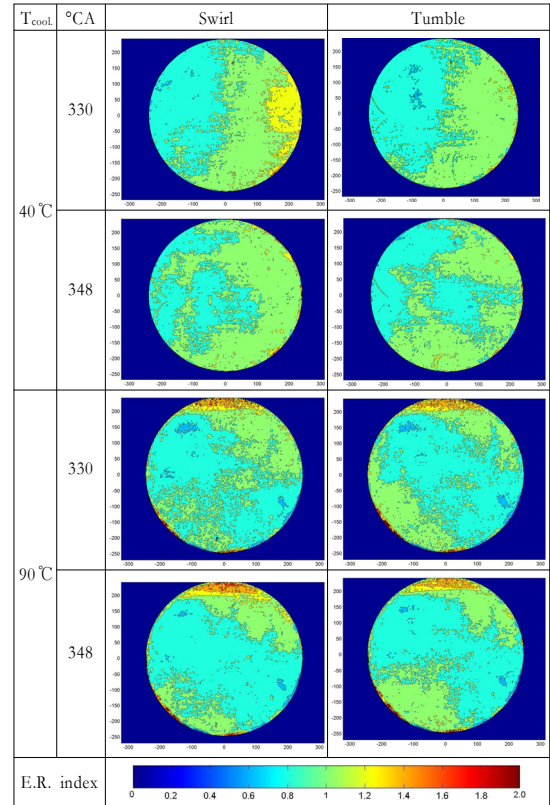


Fig. 7 Mean LIF mean images at 2 mm under cylinder head gasket, $p_{inj.}=120$ bar

는 크게 변하지 않는다. 냉각수온도 40°C, 텀블유동인 경우 당량비 1.0~1.1의 혼합기가 연료분사압력이 70 bar일 때의 경우보다 더 넓은 영역에 분포하고 있으며, 선회유동의 경우와 유사하게 1, 4사분면에 걸쳐 집중적으로 분포하고 있다. ATDC 348°C일 때의 혼합기분포는 텀블유동의 영향으로 당량비 1.0~1.1의 혼합기가 1, 3, 4사분면에 분포하고 있으며 선회유동의 경우와는 달리 1, 4사분면의 경계에서 혼합기분포 영역이 분리되고 2, 3사분면의 일부영역에까지 혼합기가 분포하게 됨을 알 수 있다. 이로써 냉각수온도 40°C, 연료분사압력이 120 bar일 때 연소실 내에 분포되는 1.0~1.1의 혼합기는 연료분사압력이 70 bar인 경우보다 더 넓은 영역에 분포하고 있는데 이는 연료분사압력의 상승으로 인한 영향으로 보인다. 냉각수온도가 90°C로 상승하게 되면 ATDC 330°C일 때 당량비 1.0~1.1의 혼합기는 연소실의 상하 가장자리에 분포하게 되며 크랭크각도가 ATDC 348°C로 진행하여도 혼합기의 분포형태는 크게 변하지 않았다. 이는 냉각수온도가 90°C일 때 냉각수온도의 영향이 유동의 영향보다 크게 작용하기 때문이다.

4. 결 론

LIF 기법을 이용하여 6공 연료분사기를 장착한 직접분사식 가솔린기관에서 균질급기 공급모드에서의 혼합기분포 특성을 관찰한 결과는 다음과 같다.

1. 냉각수온도가 40°C일 때 실린더헤드 개스킷 아래 10 mm 및 2 mm의 평면에서 당량비 1.0~1.1의 혼합기분포는 선회유동 및 텀블유동의 영향으로 ATDC 300°CA일 때 연소실의 4사분면에 집중분포하다 점차 1, 4사분면으로 퍼져 분포하게 되며 ATDC 348°CA가 되면 연소실의 1, 3, 4사분면의 가장자리 영역에 분포하는 패턴이 존재함을 알 수 있었다.
2. 냉각수온도 40°C, 텀블유동 조건일 때 연소실 내 공기-연료의 혼합은 압축과정 상사점 부근에서 생성되는 와류(vortex)의 영향으로 선회유동의 경우보다 활발하게 일어났다.
3. 연료분사압력이 70 bar에서 120 bar로 상승하면 당량비 1.0~1.1의 혼합기분포 영역이 증가하였다.
4. 냉각수온도가 90°C일 때는 냉각수온도의 영향이 연료분사압력 및 유동조건의 영향보다 크게 작용하여 크랭크각도가 ATDC 330°CA에서 ATDC 348°CA로 진행하여도 그 분포형태가 거의 변하지 않았다.

후 기

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

참고 문헌

1. J. M. Nouri and J. H. Whitelaw, 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. M. Wirth, W. F. Piock, G. K. K. Fraidl, P. Schoeggi and E. Winklhofer, 1998, "Gasoline DI Engines: the Complete System Approach by Interaction of Advanced Development Tools", SAE 980492.
3. G. K. Fraidl, W. F. Piock and M. Wirth, 1996, "Gasoline Direct Injection: Actual Trends and Future Strategies for Injection and Combustion Systems", SAE 960465.
4. J. M. Nouri and J. H. Whitelaw, 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.
5. N. Mitroglou, 2005, "Multi-hole Injectors for Direct-Injection Gasoline Engines", PhD Thesis, The City University, pp. 187-248.
6. S. S. Kim, 2008, "Study on the Fuel Vapor Distribution of the Stratified Charge in a DISI Engine by PLIF Technique", KSPSE, Vol. 12, No. 6, pp. 64~69.
7. S. Kim, J. M. Nouri, Y. Yan and C. Arcoumanis, 2009, "Effects of Intake Flow on the Spray Structure of a Multihole Injector in a DISI Engine", IJAT, Vol. 10, No. 3, pp. 277~284.