

가솔린 엔진의 연소실내 현상 연구

Investigation of In-Cylinder Phenomena in a SI Engine

김기성*

K. S. Kim

ABSTRACT

To investigate the in-cylinder phenomena in a SI engine with 3 valves and pent-roof type combustion chamber, flow fields, fuel distributions, and flame propagations were measured in a single cylinder visualized engine. Flow fields were visualized by PTV system during the intake and compression process. Fuel distributions were measured by PLIF at the various engine conditions including the cold and hot engine conditions and the effect of air-shrouded injector on the fuel distribution was investigated also. In addition, flame propagation patterns were characterized.

주요 기술용어: SI engine(가솔린 기관), fuel distribution(연료분포), flame propagation(화염전파), PTV(입자추적속도계), LIF system (레이저유도형광측정장치), air-shrouded injector(공기보조분사기)

1. 서 론

엔진 개발시 점차적으로 강화되는 설계 목표, 즉 현재 정도의 수준, 혹은 그 이상의 성능 및 운전성을 가지면서 배기가스 저감과 연비 향상을 이룩하기 위해서는 연소실내에서 일어나는 현상을 정확하게 이해하는 것이 필요하다.

엔진에서 유동과 연료분포는 엔진 성능과 배기 가스 생성을 좌우하는 주요 요소로 알려져 있다. 이러한 현상들을 이해하기 위해서 레이저를 이용한 측정이 행해지고 있으며, 특히 연료분포 측정은 최근 회박연소 엔진, 직접분사식 엔진 등과 같이 성층화 개념을 이용하는 엔진의 개발로 인해 그 필요성이 크게 대두되고 있다. 레이저를 이용한 엔진내의 연료분포 측정은 최근 펄스 레이저의 발전과 함께 시도되고 있는데, LIF(Laser Induced Fluorescence), Rayleigh 산란 및 Raman 산란을 이용하는 방법이 주로 이용된다.[1-7]

본 연구의 목적은 3밸브 펜트루프 형상 가솔린 엔진의 연소실내 현상, 즉 유동장, 연료의

혼합과정 및 화염 전파 특성을 측정하여 현상 규명을 하는 것이며, 특히 연료분포에 영향을 줄 수 있는 여러 인자들의 효과를 중점적으로 조사하였다. 이를 위해 전체적인 유동을 잘 관찰할 수 있는 PTV(Particle Tracking Velocimeter)를 이용하여 motoring 상태에서 실린더 내의 유동을 가시화하였으며, LIF 시스템을 이용하여 연료분포를 측정하였다.

2. 시험 장치 및 시험 조건

2.1 시험 장치

시험대상 엔진은 3밸브, 펜트루프 형상 가솔린 엔진이다. 유동장 측정을 위한 PTV 시스템은 Ar-ion 레이저와 ICCD(Intensified CCD) 카메라, 석영 라이너를 장착한 가시화 엔진으로 구성되어 있으며, lycopodium 입자를 이용하였다.

연료분포 측정을 위한 시험장치의 구성은 Fig.1과 같다. 레이저는 248nm 파장의 빛을 내는 KrF 엑시머 레이저이며, 레이저 평면광은 측면 윈도우(30mm width)를 통하여 헤드 밀

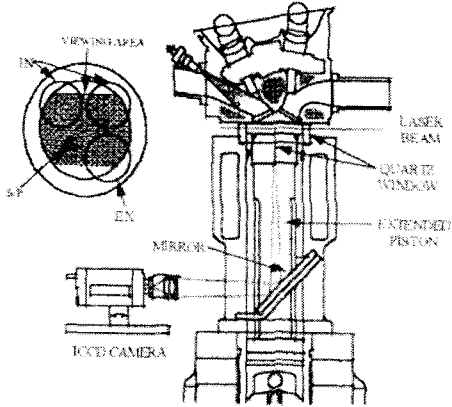


Fig.1 Schematic diagram of LIF system.

면 8mm 하단 위치로 연소실을 통과하고, 빔 두께는 약 0.6mm 이다. 연료에서 발생한 형광 이미지는 연장 피스톤에 장착된 윈도우(d=56mm)를 통하여 ICCD에 의해 획득된다. 형광 이미지를 획득하기 위하여 광영역 다이얼렉트릭 코오팅 미러 (300-450nm)를 이용하였다.

LIF를 이용한 연료분포 측정에서 가장 중요한 요소중의 하나는 형광 발생을 위한 첨가 물질의 선정인데, 본 시험에서는 형광 강도와 관측장의 오염을 고려하여 이소옥탄을 연료로 하고 가솔린(10%)을 형광 발생 물질로 첨가하여 이용하였다. 이 연료(iso-octane + 10% gasoline)의 실엔진 운전 조건에서의 켄칭 효과는 Fig.2와 같다. Fig.2의 결과는 균일 혼합기를 엔진에 공급하여 운전하는 조건에서 얻은 것으로 압축이 진행됨에 따라 형광의 세기가 약간 감소하는 것으로 나타나는데, 압축에 의한 혼합기의 밀도 증가를 고려하면 켄칭에 의한 형광의 감소가 아주 크다는 것을 알 수 있다. 그러나 공연비 측면에서 보면 획득된 이미지의 형광 세기가 같을 경우 흡입 및 압축 어느 시점에서든지 비슷한 공연비를 나타내는 것으로 볼 수 있어 측정에 유리한 점이 있다.

화염전파 측정은 연료분포 측정 장치에 이용한 ICCD를 통하여 행했으며, 화염면을 선명하게 보기 위해 UV 영역의 빛을 주로 반사시키는 거울을 이용하였다. 이와 같이 하면 연소시

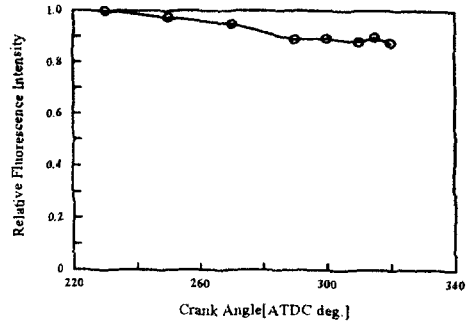


Fig.2 Fluorescence Intensity during compression.

Table 1 Experimental conditions of the engine.

Parameter	Conditions	Abbreviation
Intake Port Temp.	≈ 40°C	COLD
	≈ 85°C	HOT
Injection End	ATDC 300°	IVC
	ATDC 120°	IVO
Load (MAP)	Full Load	WOT
	50kPa	P/L
Injector	regular dual stream	D/S
	air-shrouded dual stream	A/S
* Fixed Condition		
● Engine Speed: 1500RPM		
● A/F: 14.7		
● Spark Advance: Full Load: 10° Part load: 32°		
* 유동 측정시 시험 조건		
● 1500RPM, WOT, Motoring		

생성되는 OH, NO 등 각종 레디칼에서 나오는 빛으로 영상을 얻을 수 있어 화학반응 영역을 보다 명확하게 관찰할 수 있는 장점이 있다.

2.2 시험 조건

유동, 연료분포 및 화염전파 측정시 시험조건은 Table 1에 나타낸 바와 같다. 공기보조 인젝터의 입자분포 특성은 Fig.3과 같은데, 노즐 양단의 압력차가 클수록 평균분무 직경은 감소하나 감소율은 작은 편이다. 이는 압력차

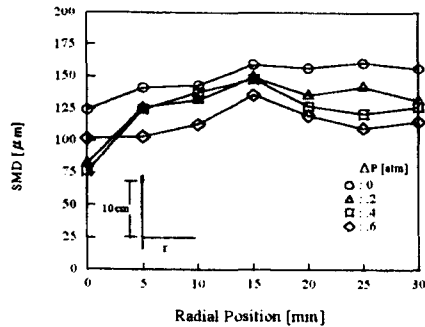


Fig.3 Mean drop sizes with respect to pressure difference in A/S injector.

가 큰 경우에도 두줄기의 분무를 유지하기 위해 환봉 형상의 충돌 물체가 인젝터 텀 전면에 설치되어 있기 때문으로 사료된다.

3. 결과 및 검토

3.1 유동장 측정

연소실내의 유동은 사이클 변화가 상당히 크지만 본 엔진에서 가장 지배적으로 나타나는 경향은 아래와 같다. Fig.4는 크랭크 각에 따른 텀블 유동의 변천 과정을 나타낸 것이다. 흡입 행정 말기(ATDC120°)에 흡기밸브 상단부를 통해 들어온 강한 유동이 배기측 실린더 상단 벽면에 부딪히면서 피스톤 윗면으로 향하는 텀블(tumble) 유동을 생성시킨다.

BDC를 지나 압축행정 초기(ATDC240°)에는 흡입유동이 없어짐에 따라 배기측 실린더 벽으로 내려온 유동이 피스톤 윗면에 평행하게 이동하다가 흡기측 벽에 부딪치고, 피스톤의 상승운동에 의해 방향이 급격히 바뀌면서 흡기측 피스톤 면 위(좌측하단)에 텀블 중심을 형성하게 된다.

이후 배기측 벽면 근처의 하강 유동은 더욱 약해지고, 피스톤의 상승속도가 최고가 되는 압축중반(ATDC270, 290°)에는 하강유동과 상승유동이 실린더 내부에서 평형을 이룸에 따라 텀블 중심이 배기측으로 이동하여 대체로 실린더 중앙에 위치하게 되고, 텀블 유동이 잘

발달되게 된다. 이런 현상은 실린더 내부의 순간적인 기하학적인 형상, 즉 축방향 길이가 내경과 비슷해진 점도 주요 요인이 되는 것으로 사료된다. 압축 말기에는 배기측 하강 운동량은 더욱 약해지고, 피스톤면의 상승에 의한 유동이 상대적으로 커짐에 따라 ATDC310°에서는 텀블 중심이 배기측으로 이동하여 위치하게 된다. 이후 ATDC330°에서는 텀블이 깨져 거의 소멸되고, 피스톤면에서 흡기밸브측으로 향하는 유동이 지배적으로 된다.

본 엔진의 흡기포트의 기하학적인 형상이 텀블이 잘 발달될 수 있는 구조이기 때문에 전체적인 유동 패턴도 그와 부합되게 나타나는 것을 알 수 있다.

3.2 연료분포 측정

3.2.1 연료분포 영상 데이터의 해석 방법

연소실과 같이 협소하고 벽면이 가까운 조건에서의 시험은 반사광의 영향이 커서 연료분포 이미지에 배경이미지가 포함되게 된다. 그리고 관측창의 오염정도, 레이저 빔 강도의 사이클 변동(약10%정도) 및 ICCD의 화소수에 따른 감도차 등으로 인해 정량적인 해석을 위해서는 적절한 보정이 이루어져야 하는데, 본 시험에서는 흡입 초기부터 압축 말기까지 연료의 유입 형태 및 혼합과정을 거시적으로 관찰하는데 초점을 맞추었기 때문에 정성적인 분석만 행하였다.

액체 상태의 연료 입자는 연료 분자가 밀집되어 있기 때문에 레이저에 의해 여기될 경우 형광 강도가 세다. 따라서 주위의 증기 상태의 연료와 구분된다. 입자 연료의 크기 추정은 고체 입자인 lycopodium 입자를 망 크기가 20μm와 50μm인 체를 거쳐서 연소실내로 유입시켜 동일 시스템으로 이미지를 찍어 이와 비교하여 행하였다.

3.2.2 냉간 조건에서의 연료분포

WOT, IVC, D/S 인젝터 조건에서 측정 단면에서의 연료분포는 Fig.5와 같다. 흡입 초기에는 매우 농후한 혼합기가 연소실내로 유입되며 수많은 연료입자들이 포함되어 있으나 증기 상

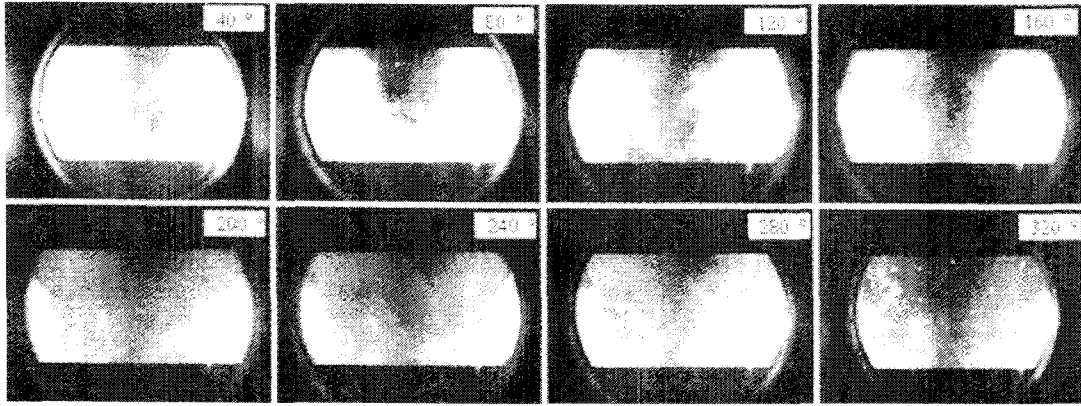


Fig.5 Fuel distributions at COLD, WOT, IVC, and D/S (Intake ATDC)

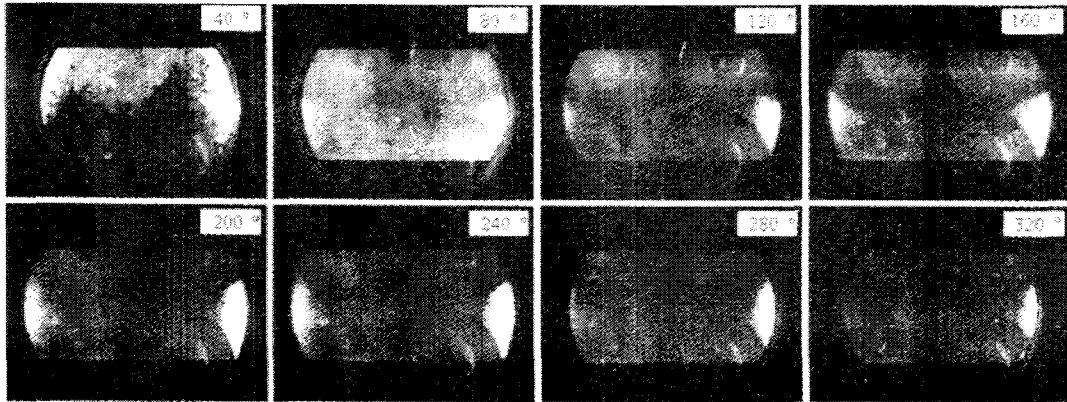


Fig.6 Fuel distributions at COLD, P/L, IVC, and D/S (Intake ATDC)

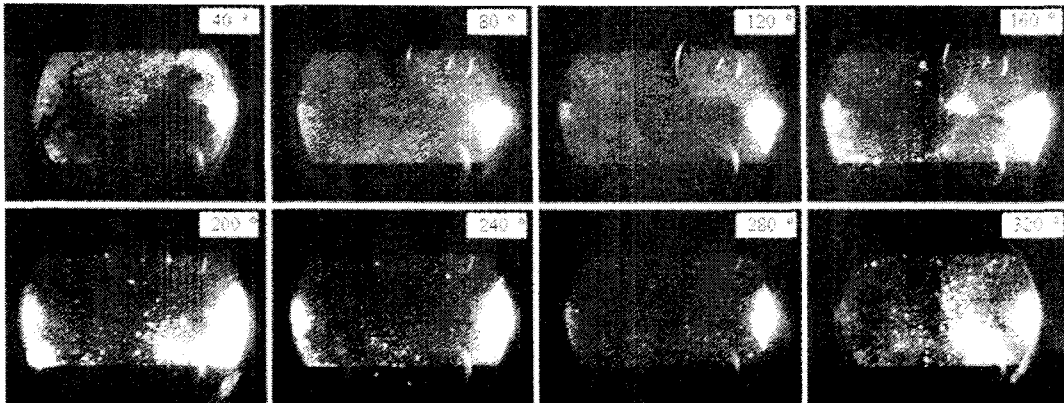


Fig.7 Fuel distributions at COLD, P/L, IVO, and D/S (Intake ATDC)

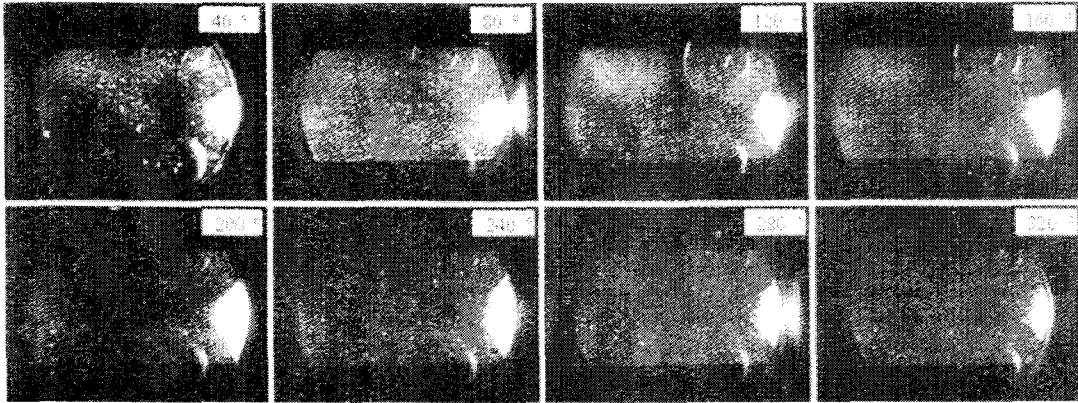


Fig.8 Fuel distributions at COLD, P/L, IVC, and A/S (Intake ATDC)

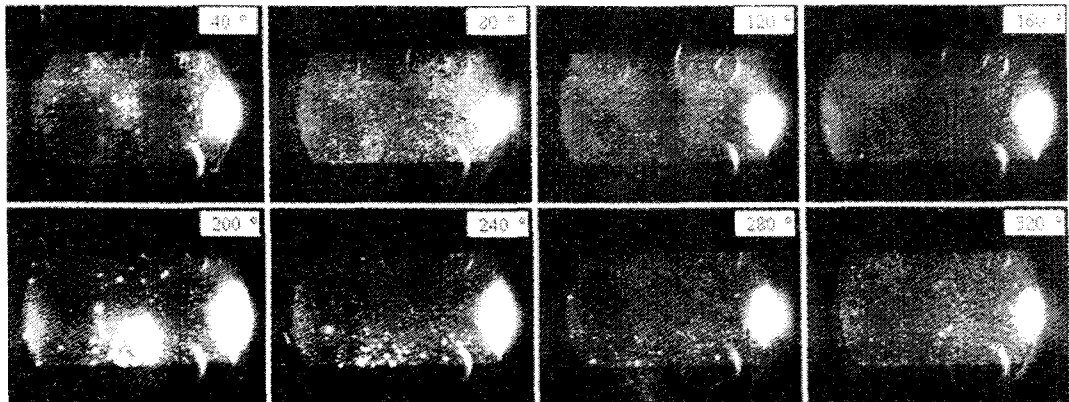


Fig.9 Fuel distributions at COLD, P/L, IVO, and A/S (Intake ATDC)

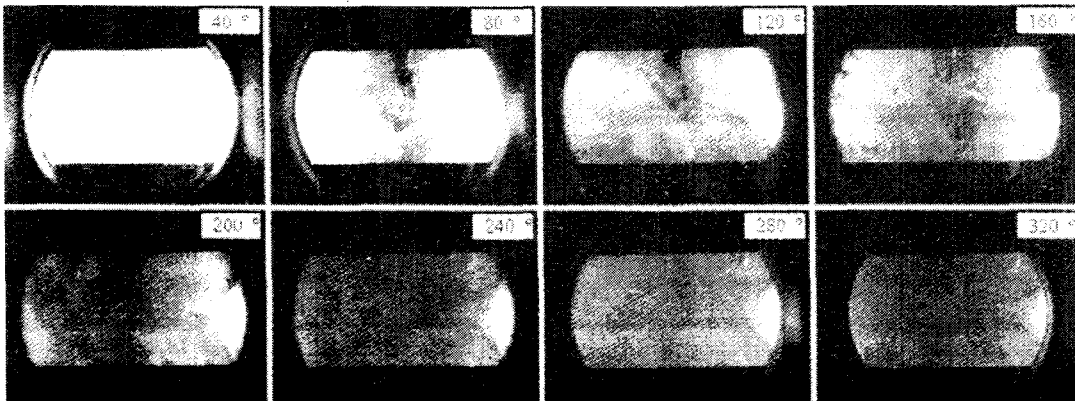


Fig.10 Fuel distributions at HOT, WOT, IVC, and D/S (Intake ATDC)

태의 연료도 많은데, 이는 흡기밸브가 닫힌 직후 연료분사를 행하기 때문에 연료가 증발할 수 있는 기간이 길고, 밸브 표면이나 흡기포트, 벽면의 온도가 높기 때문이다. 배기측에 보다 농후한 연료가 많이 분포하는데 이는 흡입되는 혼합기의 주유동 방향이 배기측을 향하기 때문으로 사료된다. 대부분의 연료입자는 약60-70 μ m이하의 크기이다. D/S 인젝터에 의한 분무의 SMD가 약 150 μ m 정도인 것을 고려할 때 미립화가 잘되어 유입됨을 알 수 있다. 이와 같이 미립화가 잘되어 유입되는 것은 분사된 큰 입자의 연료들이 분사시 운동량이 크기 때문에 흡기 밸브 표면이나 포트 벽면에 묻어 있다가 흡입되는 공기의 힘에 의해 분열되기 때문으로 사료된다. 흡입 중기와 말기에는 초기 보다는 희박한 혼합기가 유입되며 연료입자의 크기는 수십 μ m이내이다. 압축말기까지 많은 연료입자들이 남아있으며 입자 크기는 약40 μ m이내이다.

P/L, IVC, D/S 조건의 연료분포 특성은 Fig.6과 같다. 흡입초기에는 농후한 혼합기가 유입되며 많은 연료 입자들이 유입된다. WOT에 비해 신기의 유입이 늦는 것은 흡기밸브가 열릴 때 연소실에서 흡기 포트로의 역류가 있기 때문이며, 입자 크기는 큰 입자들의 경우가 약40 μ m이내이다. 압축말기에도 많은 연료가 입자상태로 남아있으며 약20 μ m이내의 크기이다. 이러한 액체 상태의 연료 입자 존재는 냉간 조건에서 연소안정성을 나쁘게 하는 주요 요인으로 사료된다.

위의 조건에서 A/S 인젝터를 적용했을 경우(Fig.8) 흡입초기에 보다 많은 연료 입자들이 유입되며, 압축말기에는 연료입자들이 보다 균일하게 분포한다. 이것은 A/S 인젝터의 경우 P/L 조건에서 D/S 인젝터에 비해 미립화 특성이 좋아서 분사시 흡기 포트내에 부유하는 크기가 작은 연료 입자들이 많기 때문으로 사료된다.

P/L, IVO, D/S 조건에서의 연료분포는 Fig.7과 같다. 흡입초기에는 약20 μ m이내의 크기를 갖는 입자들이 다수 유입되며 연료중기의 유입은 IVC에 비하여 적다. 흡입말기에는 100 μ m이

상의 크기를 갖는 큰 입자들이 다수 유입되며 배기측에 주로 분포하는데, 흡입유동의 주방향이 배기측을 향하기 때문으로 생각된다. 압축중기에는 크기가 작은 입자들이 측정면에 소수 존재하는데, 이는 흡입말기에 유입된 큰 입자들이 흡입 주유동을 따라 연소실 하단으로 이동했기 때문이다. 압축말기에는 이 큰 입자들이 피스톤의 상승운동과 함께 다시 나타나며 그 크기는 약50-80 μ m이하이다. IVC 분무에 비해 훨씬 많은 입자들이 존재하며 국부영역에 입자들이 많이 몰려 있다.

이 조건에 A/S 인젝터를 적용하였을 경우(Fig.9) 연료의 유입 및 분포 형태는 D/S 인젝터와 비슷하나 압축말기에 존재하는 연료입자의 크기들이 보다 작고 측정면에서의 공간분포가 보다 균일하다.

3.2.3 열간 조건에서의 연료분포

WOT, IVC, D/S 인젝터 조건에서 연료분포는 Fig.10과 같다. 흡입초기에는 매우 농후한 입자들이 연소실내로 유입되며, 소수의 액체 상태의 연료 입자가 포함되어 있다. 흡기 밸브와 포트 벽면의 온도가 매우 높고, 증발할 수 있는 시간이 길기 때문에 분사되는 연료량이 많다하더라도 대부분의 연료가 증발하여 증기 상태로 유입됨을 알 수 있다. 흡입말기에는 희박한 혼합기가 유입되며 연료중기의 분포는 지역적으로 상당히 차이가 난다. 압축말기에는 연료중기의 분포가 난류유동에 의한 혼합으로 상당히 균일해졌음을 알 수 있다. 본 시험의 경우 한 단면에서의 측정만을 했기 때문에 연소실 전체를 대변한다고 볼 수는 없으나 시험엔진이 펜트루프 형상이기 때문에 텀블 유동이 주유동이므로 흡입초기에 유입되는 농후한 혼합기와 흡입말기의 희박한 혼합기가 잘 섞이기에 유리한 유동 형태이므로 압축말기에는 연소실 전체가 상당히 균일한 연료분포일 것으로 생각된다.

P/L, IVC, D/S 조건의 연료분포는 Fig.11과 같다. 흡입 초기에는 농후한 혼합기가 유입되며 액체 상태의 연료는 거의 포함되어 있지 않다. 흡입 중기, 말기에는 희박한 혼합기가 유입

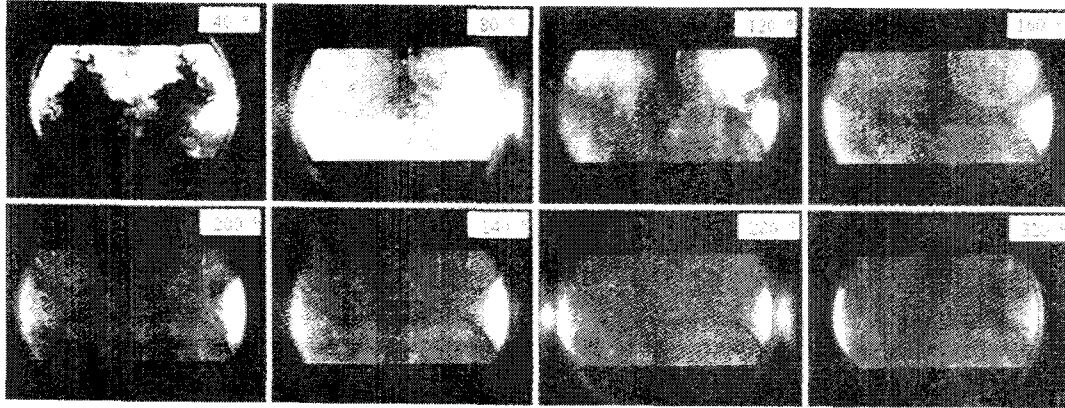


Fig.11 Fuel distributions at HOT, P/L, IVC, and D/S (Intake ATDC)

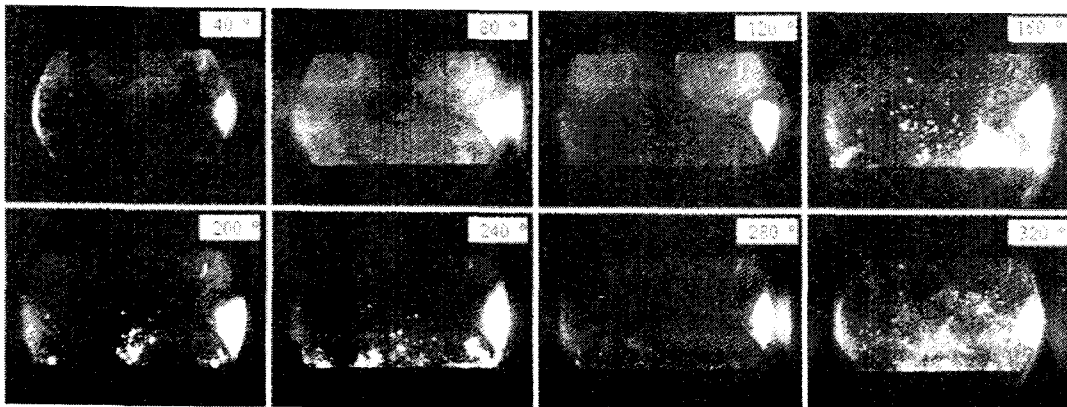


Fig.12 Fuel distributions at HOT, P/L, IVO, and D/S (Intake ATDC)

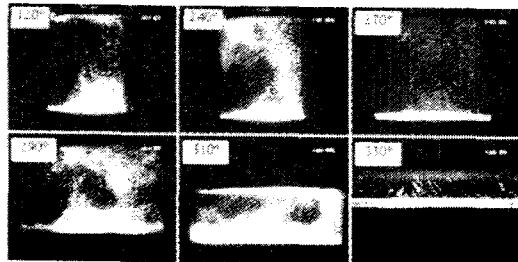


Fig. 4 Flow fields during intake and compression process.

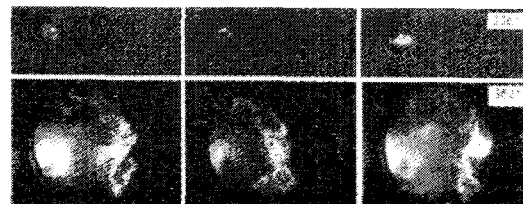


Fig.14 Early and middle stage of flame propagations at P/L, IVC, and D/S.

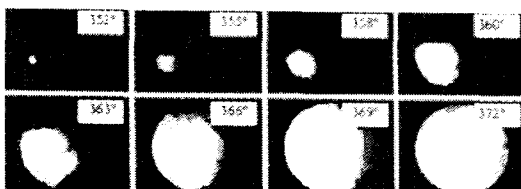


Fig.13 Duplicated flame images at WOT, IVC, and D/S.

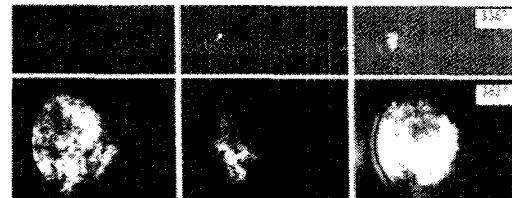


Fig.15 Early and middle stage of flame propagations at P/L, IVO, and D/S.

되며 지역에 따른 연료분포의 차가 있다. 압축됨에 따라 혼합이 진전됨으로 인해 측정면에서의 연료분포는 상당히 균일해진다.

P/L, IVO, D/S 조건의 연료분포는 Fig.12와 같다. 흡입 초기와 중기에는 매우 활발한 혼합기가 유입되며, 이 후의 기간에서 연료입자의 유입이나 분포 형태는 냉간 조건에서와 비슷하다.

3.3 화염 전파 특성

Fig.13은 WOT, IVC 분사에서 얻은 화염영상을 크랭크 각에 따라 각각 6프레임씩 중첩한 것으로 화염전파 형태의 전체적인 경향과 사이클변화를 나타내고 있다. 엔진 후방측으로의 화염 전파가 가장 늦고 흡기 밸브측으로의 전파도 늦다. 본 엔진의 경우 스파크 플러그의 위치가 엔진 전방-배기 밸브 쪽으로 많이 치우쳐 있기 때문이며, 따라서 노킹의 발생 가능성이 가장 높은 곳은 배기 밸브측으로 볼 수 있다. 화염전파의 사이클 변화가 상당히 있는데, 유동 측정 결과에서도 알 수 있듯이 유동장 자체가 사이클마다 많이 변하기 때문에 화염전파 과정도 영향을 크게 받는 것으로 볼 수 있다. 초기 화염의 전파과정을 보면 WOT의 경우 전체적으로 스파크 플러그를 중심으로 구형에 가까운 형태로 화염이 형성되나 사이클에 따라 변화가 상당히 있다. 이와 같이 되는 이유로서는 점화진각이 10° 이므로 이 때에는 텀블 유동이 작은 크기의 에디로 분열이 많이 진행되어 점화플러그 주위의 유동 속도가 빠르지 않아 점화플러그를 중심으로 구형에 가까운 초기 화염이 형성되는 것으로 생각된다.

부분부하의 경우 초기화염은 점화플러그에서 배기측으로 치우쳐서 형성되어 있고, WOT에 비해 플라즈마 강도도 약하다.(Fig.14) 이 조건에서는 점화진각이 32° 이므로 스파크시 텀블 유동이 일부 살아남아 흡기측에서 배기측으로 향하는 유동이 존재하기 때문에 화염핵이 휩쓸려가는 것으로 생각된다. 부분부하의 경우 스파크시 연소실내 압력이 WOT에 비해 훨씬 낮기 때문에 스파크시 형성되는 플라즈마 강도도 낮다. 부분부하시 사이클 변동이 심한 것도

일부는 이에 기인할 것으로 생각된다.

IVO 분사인 경우 WOT 조건에서는 IVC 분사일 때와 비교하여 초기 화염의 형상에 큰 차이점이 없으나, 부분부하인 경우에는 초기화염의 생성이 늦고 사이클 변동이 심하다.(Fig.15) 연료분포 측정 결과를 보면 부분부하, IVO 분사인 경우 스파크시에도 연료가 입자 상태로 많이 남아 있고, 주로 연소실 하단부에 분포하기 때문이다. 부분부하에서 IVC 분사인 경우 화염전면이 기연 영역의 경계부근에 집중되어 있는 반면, IVO인 경우 반응이 일어나는 부위가 화염 전영역에 산재하며 사이클 변동이 심하다. 이것은 입자 상태의 연료가 압축 말기까지 많이 남아있어 국부적으로 농후한 영역이 산재해 확산화염의 특성을 나타내는 것으로 볼 수 있다.

4. 결 론

엔진에서 여러 인자들이 연료분포에 미치는 영향을 조사하고, 아울러 유동과 화염전파를 측정된 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) COLD, IVC 분사일 때 흡입 초, 중기에 많은 연료입자들이 유입되며, 이 입자들의 크기는 수십 μ m 이내로서 분사시의 연료입자들에 비해 훨씬 작은 크기의 입자들이 유입되고, 압축말기까지 많은 입자들이 남아있으며 약20-30 μ m이내의 크기이다.
- 2) IVO 분사의 경우 A/S 인젝터가 D/S에 비해 유입되는 연료입자의 크기가 다소 작고 압축말기에 연료입자의 공간분포가 균일하다.
- 3) HOT, IVC 분사일 때 WOT 조건에서는 흡입 초기에는 연료입자가 소수 유입되나 대부분 중기 상태로 유입되며, P/L 조건에서는 입자상태로 유입되는 연료는 없었다.
- 4) 스파크 플러그 위치가 엔진 전방-배기 밸브 쪽으로 치우침으로 인해 엔진 후방측으로의 화염 전파가 가장 늦고, 흡기측으로의 전파도 늦다. 따라서 엔진 후방측에서 노킹 발생 가능성이 가장 클 것으로 판단된다.
- 5) 부분부하에서는 스파크시 압력이 낮아 플라즈마 강도가 WOT에 비해 훨씬 약하다. 그리

고 유동이 강해서 초기 화염의 표류가 심하며, 분사시기의 영향을 많이 받는다. 이러한 요소들은 부분부하에서 연소의 불안정성을 심화시키는 요인이 될 것으로 판단된다.

참고문헌

1. E.Winklhofer, H.Philipp, G.Fraidl, and H.Fuchs, "Fuel and Flame Imaging in SI Engines", SAE Paper 930871 (1993)
2. T.A.Baritaud and T.A.Heinze, "Gasoline Distribution Measurements with PLIF in a SI Engine", SAE 922355 (1992)
3. B.Johansson, H.Nejj, M.Alden, and G.Juhlin, "Investigations of the Influence of Mixture Preparation on Cyclic Variations in a SI-Engine. Using Laser Induced Fluorescence, SAE 950108 (1995)
4. J.Meyer, M.Haug, and S.Unverzagt, "Controlling Combustion in a Spark Ignition Engine by Quantitative Fuel Distribution", SAE 950107 (1995)
5. J.C. Swindal, D.P. Dragonetti, R.T. Hahn, P.A.Furman, and W.P. Acker, "In-cylinder charge homogeneity during cold-start studied with fluorescent tracers simulating different fuel distillation temperatures.", SAE 950106 (1995)
6. J.B.Ghandhi and F.V.Bracco, "Fuel distribution effects on the combustion of a direct-injection stratified-charge engine.", SAE 950460 (1995)
7. R.Shimizu, S.Matamoto, S.Furuno, M. Murayama, and S.Kojima, " Measurement of air-fuel mixture distribution in a gasoline engine using LIEF technique.", SAE 922356 (1992)
8. T.D.Fansler, D.T.French, M.C.Drake, "Fuel distributions in a firing direct-injection spark-ignition engine using laser-induced fluorescence imaging.", SAE 950110 (1995)
9. Z.Hu, J.H.Whitelaw, and C.Vafidis, "Flame propagation studies in a four-valve pentroof-chamber spark ignition engine", SAE 922321 (1992)