

가솔린엔진에서의 2차원 화염 가시화

배 충 식 *

2-Dimensional Visualization of the Flame Propagation in a Four-Valve Spark-Ignition Engine

Choong-sik Bae*

Key words : 2-dimensional visualization, 4-valve spark ignition engine, laser Mie scattering, flame propagation, image processing, lean burn condition

ABSTRACT

Flame propagation in a four-valve spark-ignition optical engine was visualized under lean-burn conditions with A/F=18 at 2000rpm. The early flame development in a four-valve pentroof-chamber single-cylinder engine was examined with imaging of the laser-induced Mie scattered light using an image-intensified CCD camera. Flame profiles along the line-of-sight were also visualized through a quartz piston window. Two-dimensional flame structures were visualized with a Proxitronic HF-1 fast motion camera system by Mie scattering from titanium dioxide particles along a planar laser sheet generated by a copper vapor laser. The flame propagation images were subsequently analysed with an image processing programme to obtain information about the flame structure under different tumble flow conditions generated by sleeved and non-sleeved intake ports. This allowed enhancement of the flame images and calculation of the enflamed area, and the displacement of its center, as a function of the tumble flow induced by the pentroof-chamber in the vicinity of spark plug.

Image processing of the early flame development quantified the correlation between flame and flow characteristics near the spark plug at the time of ignition which has been known to be one of the most important factors in cyclic combustion variations in lean-burn engines. The results were also compared with direct flame images obtained from the natural flame luminosity of the lean mixture.

1. 서론

내연기관의 개발에 있어서 연소기 내부에서 일어나는 연소현상의 물리적 특성을 자세히 파악하는 것은 설계상의 필수적인 요구사항이라 하겠다. 전 기점화기관의 예혼합연소에 있어서 난류화염의 구조는 혼합기의 유동장 특성에 의해 결정되며 점화 성능, 화염전파속도등에 영향을 미친다. 엔진 연소실의 난류유동장에서 초기 화염핵이 성장하면서 여러 난류특성길이의 스펙트럼으로 인해 화염대가 굴

곡 (wrinkled)되면서 난류화염의 형상을 갖추게 된다. 이러한 난류화염대의 형성은 연소속도를 증가시키는 역할을 한다[1]. 유동장과 화염전파 간의 상호작용은 희박혼합기의 연소에 있어서 더욱 중요한 문제이다.

최근의 가솔린엔진 개발에 있어서 연료경제성을 증진하고 공해배출물을 줄이기 위한 가장 효과적인 방법의 하나가 희박연소를 가능하게 하는 엔진의 개념이다. 그러나 희박혼합기 연소방식을 채택할 경우 초기화염 형성과 화염전파 속도가 감소하게 되어 연소의 사이클변동이 커지는 한편 미연탄화수 소 계열의 배출이 증가하는 단점이 있다[2]. 희박연

* 충남대학교 항공우주공학과

소조건하에서 엔진의 안정성을 확보하기 위하여서는 연소시간을 단축하고 연소의 사이클변동을 감소시켜야 한다. 희박연소 조건하에서 엔진의 안정성을 양호하게 할수있는 가장 현실적이고 효율적인 접근방법은 유동의 강화, 특히 난류강도의 증진을 통해 화염전파속도를 증가시킴으로써 연소시간을 단축시키는 것이다 [3].

현재의 추세로는 지붕형상 연소실을 갖는 4-밸브 엔진에서 흡배기밸브를 가르는 대칭면을 따라 생기는 텀블와류의 형성을 통하여 점화시기의 난류강도를 증진시키는 것이 가장 효과적인 방법이다. 흡입 과정에서 형성된 텀블와류는 압축과정 후반에서 피스톤의 상승운동때문에 압축 변형되면서 난류 운동에너지를 방출한다. 이 과정에서 여러 난류 특성 길이가 화염을 굴절시켜서 국부적인 화염대의 스트레칭(stretching)을 가져온다[4].

내연기관 내에서 유동 및 혼합기 분포에 따른 화염구조를 해석하기 위하여 가시화방법이 전통적으로 유용하게 쓰여져 왔는데, 그 방법으로는 직접가시화, 쉘리렌사진법, 새도우사진법 등이 있다[5-8]. 최근에는 평면가시화를 이용하여 공간적, 시간적으로 분해능이 향상된 화염구조를 얻는 방법이 개발되고 있다[9-12].

본 연구에서는 단기통 가시화엔진에서 레이저 Mie 산란을 통한 평면 가시화법을 이용하여 4-밸브 가솔린엔진의 화염전파 양상을 살펴 보았다. 실험에 사용된 단기통 가시화엔진은 한쌍의 측면 수정

창과 피스톤창을 장착하고 있어서 가시화가 가능하게 되어 있으며, Mie산란을 이용한 2차원 가시화에서는 Copper vapor 펄스레이저광을 광원으로 하여 TiO₂ 입자를 흡기구로 공급하여 그 산란광을 image-intensified CCD (ICCD)카메라로 영상화 하였다. 디지털 화염영상들을 컴퓨터 프로그램으로 처리하여 각 크랭크각에서 화염의 면적과 화염중심의 위치를 계산하였다. 평면가시화를 통한 화염영상을 직접 가시화로 얻은 영상과 비교하였으며 공연비 18의 희박혼합기 조건에서, 강한 텀블와류를 형성하도록 슬리브(sleeves)가 삽입된 흡기구와 상대적으로 유동 평균속도와 난류가 작은 흡구에 대하여 가시화 실험을 수행한후 결과를 비교하였다.

2. 실험방법

2.1 단기통 가시화엔진

그림1은 4-밸브 단기통 가시화엔진을 보이고 있다. Ricardo의 Hydra 크랭크케이스에 지붕형상의 연소실을 갖는 4-밸브 가솔린엔진 실린더헤드를 장착하고 있으며 중요제원은 표1에 보이는 바와 같다. 실린더헤드의 모양을 요약하면 흡기매니폴드 및 흡기구의 입사각은 헤드밑바닥에 대하여 26° 이고 흡기밸브의 바닥을 형성하는 실린더헤드 지붕면에 대하여 47°의 방향성이 있다. 이것은 지붕형상 연소실을 갖는 4-밸브 실린더헤드의 유동을 텀블형태로 만들어 주기위한 것이다 [13,14].

그림1에 보이는 바와 같이 단기통엔진은 실린더 라이너 및 피스톤을 통해 광확창을 갖도록 개조되어 레이저유속계 실험 및 가시화가 가능하여 연소실 내

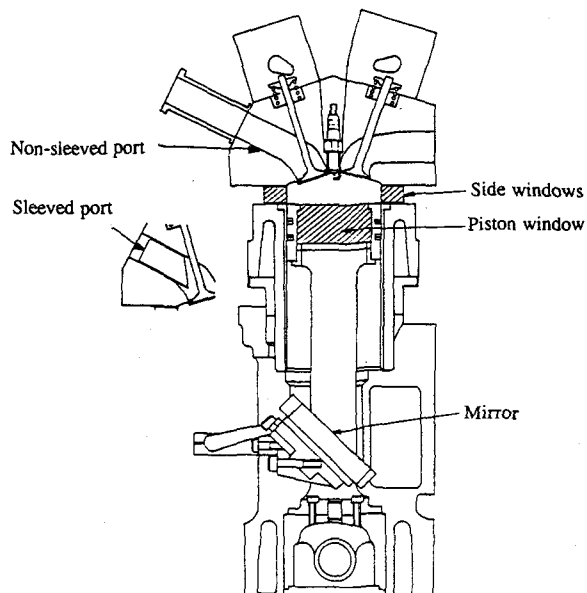


Figure 1. Optical single cylinder engine

Table 1 Parameters of four-valve pentroof engine

Bore	83 mm
Stroke	92 mm
Mean Piston Speed, V_p	6.134 m/s
Compression ratio	10.5
Connecting rod	154 mm
Intake Valves:	
diameter	33.5 mm
seat angle	45°
open at	6° BTDC
close at	224° ATDC
Max. lift	9.13 mm

부를 관찰할 수 있다. 측면창 모듈은 실린더헤드와 라이너 사이의 가스킷 면에 부착하도록하여 15mm 높이, 20mm 두께의 한쌍의 수정창으로 구성되어 있다. 연소실 내부 관찰을 위해 또한 연장피스톤(extended piston)에 지름 58mm의 수정창을 삽입하였다. 실린더헤드의 상부의 캠축에 광학 축엔코더(optical shaft encoder : HP HEDS-6110-B13)를 장착하여 LDV 측정 및 가시화를 위해 0.36° 크랭크각(CA)의 정확도를 갖고 크랭크축 각도를 동기시켰다.

한편 흡기밸브의 하부를 차단하여 흡기유동의 방향성을 증가함으로써 더욱 강한 텀블와류가 생성되도록 하기 위하여 흡기덕트 하부면에 얇은 철판(슬리브)을 부착하여 실험을 수행하였다. 이러한 방법으로 점화시 유동의 평균속도와 난류를 증진할 수 있었으며 LDV를 이용한 속도 측정결과는 그림 3에 보인다.

지붕형상 연소실에 점화 전극은 거의 중앙에 위치하며 포트 연료분사 장치를 사용하였다. 엔진 내의 냉각수와 윤활유는 80 30°C로 유지 되었으며 엔진속도는 3rpm 안에서 제어되며, 상용엔진의 엔진 제어장치(LUCAS 15CU)를 개조하여 점화시각 및 연료분사 지속시간을 조절하였다. 코로나방전 유량계로 공기량을 측정하고 소모연료량을 측정하여 흡입혼합기의 공연비를 환산하였다. 분사전 연료의 온도는 30°C 정도이고 연료관의 압력은 3 0.001기압으로 유지되었다. 엔진연소 실험은 2,000rpm 에서 공연비 18의 희박혼합기에 대해 95 ULG 가솔린으로 부분부하 2.1bar IMEP 조건에서 수행하였다. 흡기구에 슬리브가 있는 경우와 없는 경우 즉, 각각 텀블와류가 상대적으로 강한 경우와 약한 경우의 두가지의 다른 흡기구 형상에 대한 실험결과도 비교하여 보았다.

2.2 연소해석

엔진출력은 2.1 bar IMEP 로 유지되도록 연료분사 기간과 스톱틀 위치를 조절하였다. 실린더 압력은 피에조압력계(Kistler 6121)로 측정하였다. 압력계신호는 인터페이스 카드(Dostek 1400 DMA)를 통하여 PC에 연결하여 크랭크각 신호와 함께 입력되도록 하였다. 각 실험조건에서 350사이클의 압력신호를 처리하였다. 트리거시각은 축엔코더에 의해 0.36° 크랭크각의 정확도를 가지며 엔진속도의 정확

도(3rpm)를 고려할때 상사점의 정확도는 0.5° 크랭크각 이다. 종합적으로 점화시각의 정확도는 1° 크랭크각 이내이다. 연소시간은 압력신호의 열방출해석법(heat release analysis)를 통해 크랭크각 단위로 산출되었다[15]. 연소실을 개방계로 가정하고 혼합기의 물성은 이상기체 방정식에 따른다고 하여 열역학1법칙을 적용하여 열방출율을 계산하였다. 이값을 크랭크각에 대해 적분하고 최대값으로 무차원화하여 각 크랭크각의 질량연소율(mass fraction burned)로 환산하였다. 일반적으로 미연가스와 기연가스의 밀도가 대략 4:1이기 때문에 10% 정도의 질량이 연소되었을때 화염의 크기는 실린더 보어의 반에 해당하는 화염반지름을 갖는다. 연소시간은 다음과 같은 단계로 구분한다.

- i) 초기화염 형성각 (θ_d ; Flame development angle) : 점화시각으로부터 5 %의 에너지가 방출되기까지의 시간(크랭크각)
- ii) 급속연소각 (θ_b ; Rapid burning angle) : 초기화염각과 연소말기까지의 시간 (에너지 방출이 5-95 %인 시간)
- iii) 총연소각(θ_o ; Overall burning angle) : 초기화염각과 급속연소각의 합, $\theta_d + \theta_b$ (에너지 방출이 95 %가 될때까지의 시간).

이외에도 에너지 방출이 2 %가 될때까지의 초기각도 계산하였다. 실린더압력을 처리하기전에 압력신호를 스무딩(smoothing) 처리하여 측정시 생길수 있는 교란의 영향을 제거하였다. 각 사이클의 압력을 해석한후 350사이클의 값을 평균하여 사이클 평균값을 구하였다.

2.3 화염가시화

● 직접촬영법 : 피스톤에 삽입된 수정창과 확장피스톤의 하부에 고정된 거울을 통해 ICCD 비디오카메라를 이용해 연소실내의 화염전파를 촬영하였다. 정해진 각도에서 카메라가 작동하도록 조절하여 각 사이클의 화염사진을 얻었다. 카메라의 트리거는 축엔코더의 신호를 이용하였으며 35사이클에 대하여 화염영상을 얻었다. 이실험에서 채택한 부분부하 조건에서는 대부분 화염이 청색을 띄어 조도가 낮으나 사용한 ICCD는 300-800nm 영역에서 고른 감도를 갖고 있어 화염사진을 얻을수 있었다[16].

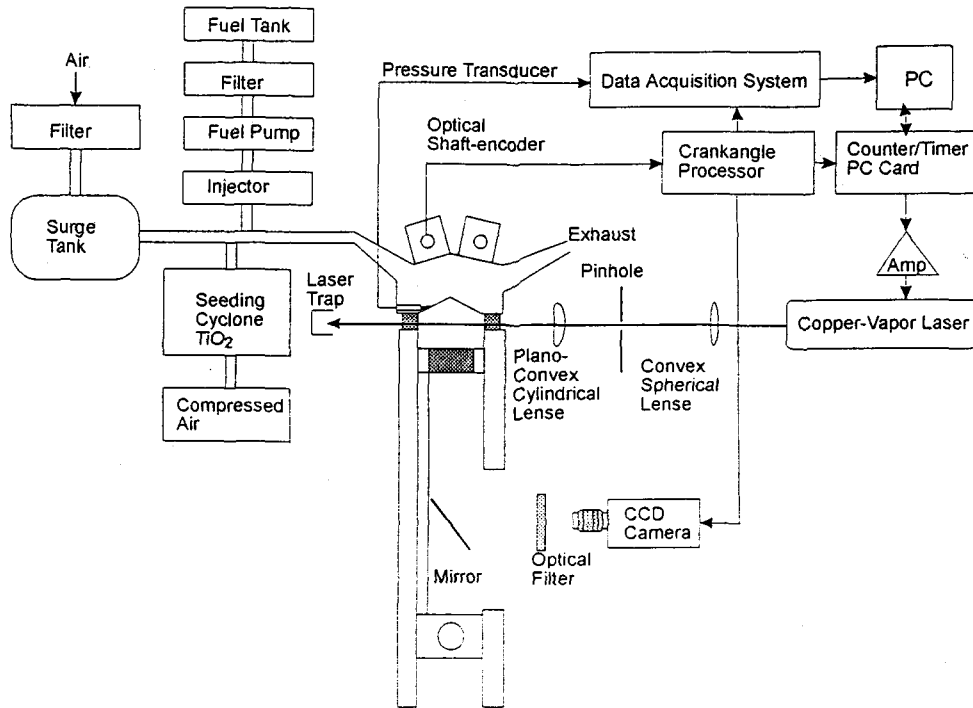


Figure 2. Schematic of the experimental set-up for two-dimensional visualization with laser Mie scattering

화염영상을 컴퓨터프로그램으로 처리하여 화염영역의 면적과 점화전극로부터 화염영역의 중심까지의 거리를 구하였다.

• 레이저 Mie산란을 이용한 2차원 가시화 - 그림2에서 Cu-vapor레이저와 ICCD로 구성된 2차원 가시화 장치의 개략도를 보이고 있다. TiO₂ 입자를 공기흡기구에 공급하여 산란입자로 사용하였다. 측면창을 통해 레이저 평면광을 연소실로 주사하면 미연가스부분에서 산란되는 빛과 기연가스의 어두운 부분이 구분된다. 따라서 화염영역을 명도가 다른 두 부분의 경계로써 정할수 있다.

Cu-vapor 레이저는 8.3kHz로 작동되는데 이는 2000rpm에서 엔코더에서 나오는 신호펄스 주파수의 4분의 1에 해당한다. 레이저펄스의 기간은 20ns이며 511nm파장에서 펄스당 에너지는 약 2.75mJ이다. 레이저 평면광은 폭40mm, 최소두께 0.5mm로서 원통형렌즈를 비롯한 렌즈의 조합으로 형성되며 위치는 실린더헤드의 하부면으로부터 3mm, 상사점으로부터 2mm이다. 산란입자로부터 산란된 빛은 필터를 거쳐 카메라로 포착하였다. 1미크론보다 작은 TiO₂ 입자를 공기압을 이용한 사이클론을 통해 흡기

구에 공급하여 산란입자로 사용하였다. TiO₂는 TiCl₄를 이용하여 이것이 공기중의 수증기와 반응하여 TiO₂와 HCl을 생성하는 점을 이용하여 공급할수도 있으나 HCl이 엔진요소를 부식시킬수 있는 위험성이 있어서 사용을 지양하였다.

화염전파 영상은 S-VHS 테이프에 기록된후 Matrox IP-8 grabber card를 이용하여 PC로 저장되었다. 이 영상들을 처리하여 화염구조를 관찰할수 있었다. 이 영상에 대해서도 역시 화염영역의 면적과 중심을 계산하였다.

3. 결과 및 해석

4-밸브 단기통엔진의 속도장은 레이저 유속계로 측정하였으며 자세한 내용은 [13,14]에 소개되었다. 그림3은 2000rpm에서 점화전극 주위의 유동속도와 난류의 평균값이다. 속도는 피스톤 평균속도($V_p=6.13\text{m/s}$)로 표현되었다. 4-밸브 실린더헤드에서는 텀블와류가 형성되며 이것은 흡입단계부터 실린더의 대칭면에서 확인된다. 압축과정을 거치면서 텀블속도 성분의 전단력이 증가하면서 난류가 생성되어 다른 속

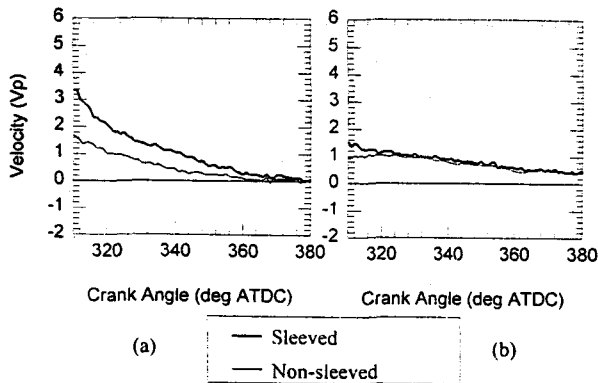


Figure 3. Ensemble-averaged velocities at the spark gap
(a) mean velocities (b) rms velocities

도성분으로 재분배되며 실린더 내의 평균 난류 강도가 2-밸브헤드에 비해 60%가량 큰 값을 갖는다[14]. 그림1에 보이는바와 같은 슬리브를 흡기구에 삽입하면 더욱 강한 텀블와류가 형성된다. 그림3에서 굵은 선이 슬리브가 있는 흡기구에 대한 평균속도 및 난류성분이다. 310°CA 이후에 텀블속도가 감소된다. 슬리브를 장착한 경우에 있어서 점화각은 330°CA 부근으로 난류값은 1Vp 정도가 되는 한편 평균속도는 2Vp 정도로 비교적 높은 편이다. 슬리브가 없는 흡기구에 대한 평균속도 및 난류는 같은 기간동안 각각 1Vp 및 0.8Vp로서 난류값이 슬리브가 있는 경우보다 10-20% 작음을 알 수 있다. 슬리브가 있는 경우 흡입시 생긴 강한 텀블와류는 연소실 내에서 압축말기까지 존재하며 그중 일부가 압축과정을 거치며 난류생성의 증가에 기여한다. 강한 텀블와류로 인한 높은 유동속도와 난류가 존재하는 경우 화염전파속도가 빨라지게 된다. 이를 그림4에 나타내었다. 그림4는 350사이클에 대한 열방출해석을 통해 얻은 연소시간을 크랭크각으로 표현한 것이다. 이 그림을 보면 흡기구에 슬리브를 삽입하여 텀블강도를 강화한 경우에 약한 텀블유동장의 경우에 비해 초기 화염시간이 5°CA 짧게 됨을 알 수 있다. 급속연소각은 전반적인 화염전파 시간을 대표하는데 이 값도 텀블유동이 강하면 약간 짧다. 텀블유동이 약한 경우 총연소각이 7.4°CA 정도 길게 나타나는데 이중 5.1°CA가 초기화염시간에서

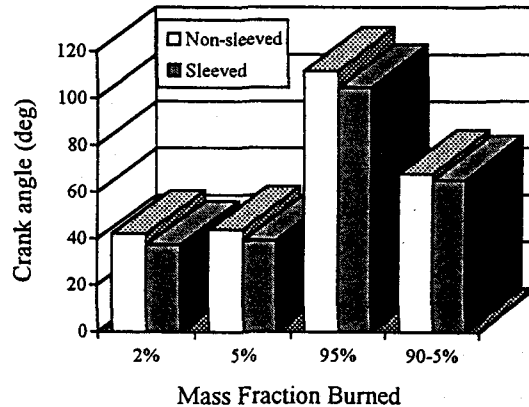


Figure 4. Combustion angles of a lean mixture (A/F=18.0) as a function of a crankangle after spark ignition at 2000rpm (2.1bar IMEP, 95ULG fuel, MBT ignition)

차이가 나게 된 것이므로 유동의 영향이 화염전파 초기에 더욱 중요하다는 사실을 시사한다. 카메라로 얻은 화염영상에서 정확한 화염의 경계를 구하기 위한 일련의 영상자료 처리과정을 그림5에 도시하였다. 디지털화 된 영상의 기본 단위는 픽셀(pixel)로서 각 픽셀은 0(흑색)과 255(백색)사이의 256개로 구분된 명도(grey level)의 값을 갖는다. 그림5(a)는 카메라가 받아들인 본래의 영상 자료이다. 먼저 연소실내부의 영상만을 선택하고(그림5(b)) 화염영역을 판가름하는 기준값을 설정하여 경계를 결정한다(그림5(c)). 이렇게 결정된 화염형상으로부터 화염의 크기와 위치를 계산한다. 화염면의 경계가 그림5(d)에 보이듯 확연히 드러나게 되면 기준값을 정하는데 무리가 없다. 초기의 화염과 같이 화염대의 경계를 정하기 어렵게 명도변화가 약할때도 있다. 그러나 대부분의 영상에서 기준값의 변화가 화염영역의 크기에 큰 영향을 미치지 않는 것이다. 처리된 영상에서는 화염의 중심이 점으로 표현되었고 점화전극의 위치를 십자로 나타내었다.

그림6은 화염의 발광을 직접촬영한 영상의 예로서 슬리브가 있는 흡기구의 경우에 얻은 화염의 영상이다. 화염은 비대칭 난류화염의 양상을 보이고 있으며 강한 텀블유동의 영향으로 배기밸브쪽으로 대류되고 있음을 볼 수 있다. 전극을 지나가는 유동이 초기화염을 전극으로부터

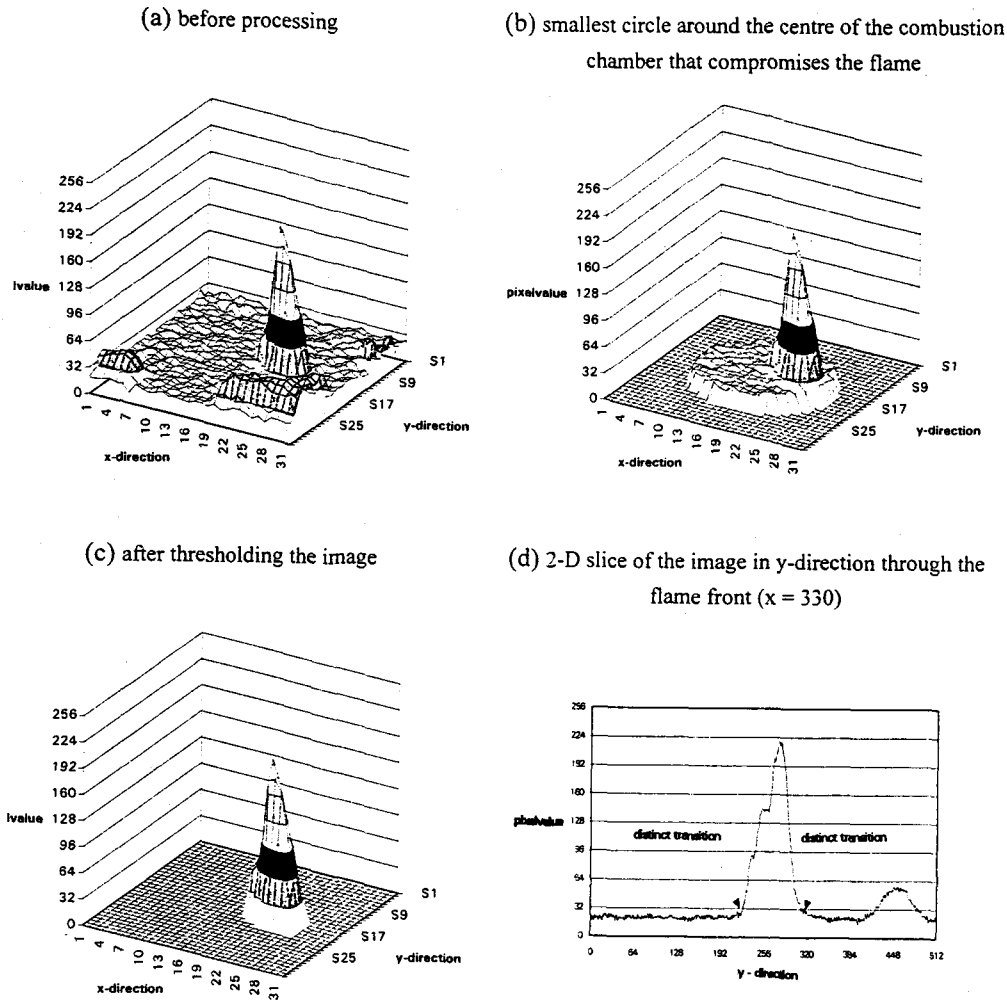


Figure 5. Processing steps of an image array

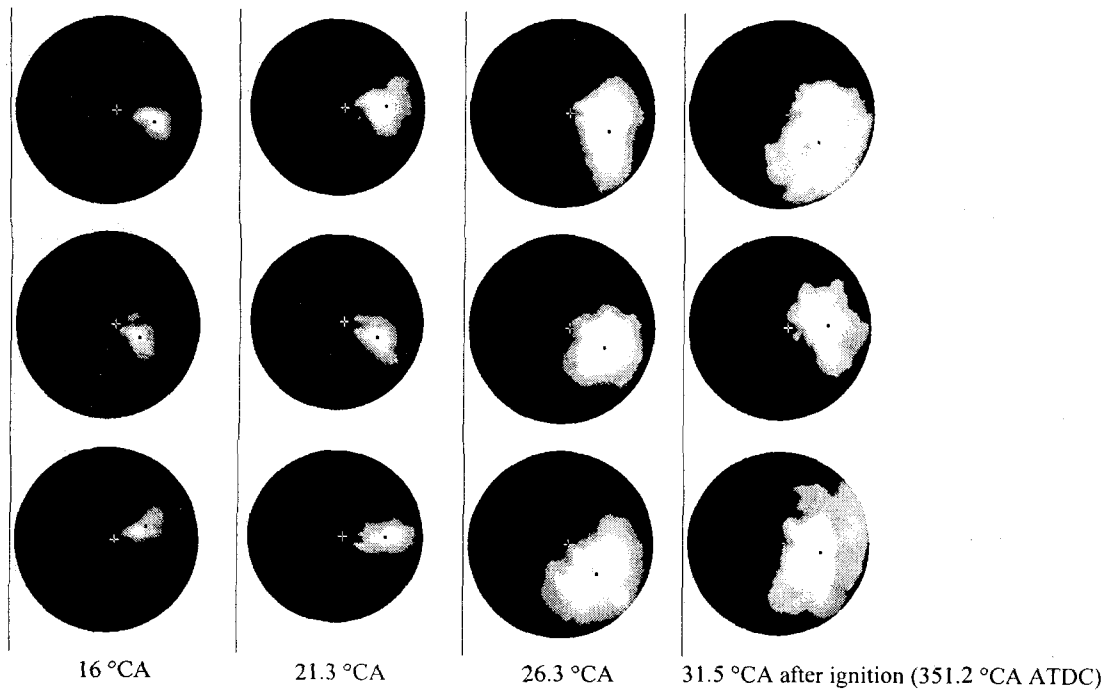


Figure 6. Images of the developing flame obtained with direct imaging with sleeved inlet ports under part throttle condition ($A/F=18.0$, 2000rpm, 2.1bar IMEP)

분리시켜서 전극으로의 열전달 손실을 막아준다. 그림7은 그림6과 같은 운전조건에서 레이저 Mie산란을 이용한 2차원 가시화로 얻은 화염의 영상을 보인다. 20ns의 레이저 펄스로 본 화염의 영상은 상대적으로 긴 노출시간(50-100 μ s) 동안 화염의 발광을 직접 촬영한 것보다 더 자세히 화염의 구조를 관찰할수 있게 해준다. 특히 직접촬영법의 경우 3차원 광로상의 빛을 모두 2차원 영상으로 기록하였기 때문에 화염의 영상이 정확하지 않다. 초기화염의 모양이나 대류된 정도에 사이클 변동이 매우 크다는 것도 영상을 통해 알수 있다. 화염영상을 정량적으로 해석하기 위하여 같은 크랭크각에 65사이클이 넘는 영상을 처리하여 각각의 화염면적과 중심을 구하여 평균값을 구하였다. 그림8에서 이 값들을 도시하였다. 화염영역을 정하는 명도의 기준값을 정하는데 있어서 주관적인 기준이 개입될수 있는데 전체적으로 화염면적 값에 대한 정확도는 10% 이내이다. 화염영상을 해석한 결과 슬리브가 있어서 텀블이 강한 경우에 화염이 더욱 크게 형성됨을 알수 있었다(그림8(a)).

이것은 강한 텀블이 희박연소에 유익하게 작용하여 화염전파속도를 증가시킨다는 사실을 단적으로 보여주는 결과라고 할수있다. 그림8(b)는 직접촬영법과 2차원 가시화를 이용해 얻은 화염영상의 크기를 비교한것으로 레이저 Mie산란을 이용한 평면 가시화로 관찰한 화염의 3-5분의 1의 크기에 불과해 두 가시화방법의 차이를 보인다. 얇은 평면광 영역에서 20ns의 레이저 펄스로 본 화염의 영상은 상대적으로 긴 노출시간(50-100 μ s) 동안 3차원 광로상의 화염의 발광을 모두 2차원 영상으로 직접 촬영한 것보다 더 자세히 화염의 구조를 관찰할수 있게 해준다는 사실을 확인시켜 주는 것이다. 이상에서 가시화된 화염을 해석하는데에는 많은 주의를 필요로 하지만 각각의 방법이 정성적으로 또는 정량적으로 의미있는 정보를 줄수 있다는 시사를 얻을수 있다.

그림9는 두 흡기구 모양에 대해 화염중심의 위치를 비교한것이다. 슬리브를 장착한 경우 화염의 중심이 점화전극으로부터 더욱 멀어져 배기밸브쪽으로 치우치게 되는것을 보여준다. 이것은 슬리브로 인하여 방향성이 커진 흡입 유동으로 인해 생긴 강한 텀블와류로 인해 전극을 지나는 유속이 높다는 또다른 증거가 된다. 이러한 강제대류는 높은 난류강도와 아울러 화염의 스트레칭을 증진하여 화염면적을 늘리는 작용을 한다.

강한 텀블와류의 형성은 연소율을 증가시켜 사이클변동을 감소시키고 나아가 희박한계를 확장하는 역할을 하지만[13] 이러한 경향은 텀블의 강도가 적절한 범위에 있을때에만 유효한 것이다. 텀블이 너무 강하면 체적효율의 감소로 출력이 감소할수도 있고 약한 녹킹을 수반할수도 있다. 따라서 특정한 엔진에 대한 텀블와류에 대해서는 광범위한 운전조건에 대해 최적의 강도가 정해져야 한다.

4-밸브 가솔린엔진에서의 화염가시화를 통해 점화전극을 지나는 유동의 영향을 파악할수 있었다. 직접촬영법을 통해 연소실내의 화염전파 과정을 전반적으로 살펴 볼수 있으며, 레이저 Mie산란을 이용한 2차원 화염가시화를 이용하여 화염의 구조를 더욱 정확히 관찰할수 있다. 이러한 가시화 결과는 엔진내 연소과정에

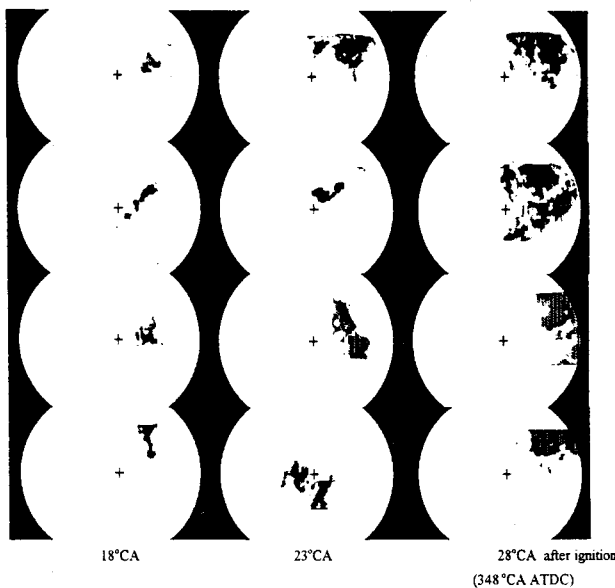
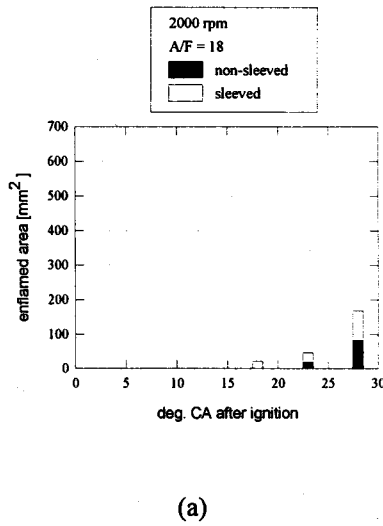
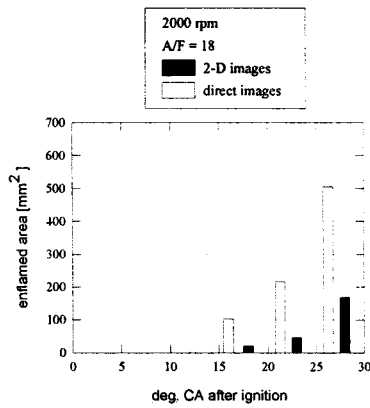


Figure 7. Images of the developing flame obtained with two-dimensional visualization of laser Mie scattering with sleeved inlet ports under part throttle condition (A/F=18.0, 2000rpm, 2.1bar IMEP)



(a)



(b)

Figure 8 Averaged projected enflamed area at 2000rpm, A/F=18

(a) flame images from 2-D visualization for sleeved and non-sleeved inlet port

(b) comparison of flame images from 2-D and direct imaging for sleeved inlet port

대한 전산시뮬레이션에 좋은 자료를 제공할수 있다. 그러나 위의 방법들은 3차원적인 화염형상을 제공하지 않으므로 여러개의 레이저 평면광을 이용한 가시화법을 사용하여야 한다 [17].

4. 결론

4-밸브 가솔린엔진의 화염전파 과정을 레이저 Mie산란을 사용하여 2차원으로 가시화 하고

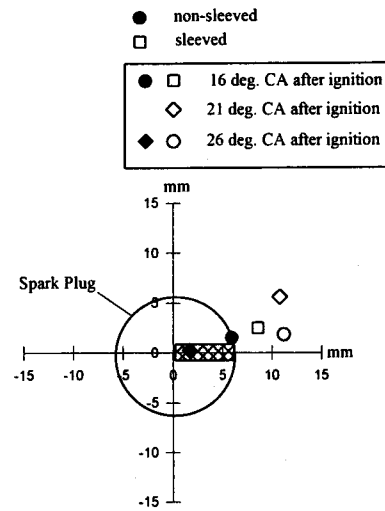


Figure 9. Displacement of the gravitational centre point of the flame images from 2-D visualization for the sleeved and non-sleeved inlet ports at 2000rpm, A/F=18

직접촬영법과 비교하였다. 지붕형 연소실을 갖는 4-밸브 단기통 가시화엔진에서 흡기구의 변형을 통해 강도가 다른 텀블와류를 형성하고 이에 따른 화염전파의 특징을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을수 있었다.

1. 레이저 평면광에서 Mie산란을 이용한 2차원 가시화를 통해 화염의 구조를 관찰할수 있었으며, 이는 직접촬영을 통한 가시화방법보다 더욱 자세한 화염형상을 제공한다. 화염영상을 처리하여 화염의 크기 및 화염의 위치를 정량화하였다.
2. 두가지의 강도가 다른 텀블와류에 의해 형성된 유동장에서의 화염전파의 가시화를 통하여 텀블강도가 높은 경우에 초기화염의 형성기에 화염크기가 크고 배기밸브쪽으로 치우쳐 대류되어 감을 알수 있다. 이러한 영향으로 연소시간이 6%가량 감소되었다.
3. Mie산란을 이용한 2차원 화염가시화는 엔진내의 비대칭 난류화염 구조를 연구하는 좋은 도구로 활용될수 있다.

후기

본 연구에 많은 조언을 준 Imperial College의 C.Arcoumanis교수와 영상처리에 도움을 준 Salman Ali, Achen 공대의 Tobias Haas에게 감사 드린다.

참고문헌

- [1] Bracco, F.V., 1985, Modelling and Diagnostics of Combustion in Spark-Ignition Engines, COMODIA 85, pp.1-13.
- [2] Germane, G. J., Wood, C. G. and Hess, C. C., 1983, Lean Combustion in Spark-Ignited Internal Combustion Engines, SAE Paper 831694.
- [3] Kalghatgi, G.T., 1987, Spark Ignition, Early Flame Development and Cyclic Variation in IC Engines, SAE Paper 870163.
- [4] Bradley, D., Lau, A.K. and Lawes, M., 1992, Flame Stretch Rate as a Determinant of Turbulent Burning Velocity, Phil. Trans. R. Soc., A338, pp.359-387.
- [5] Beretta, G. P., Rashidi, M. and Keck, J. C., 1983, Turbulent Flame Propagation and Combustion in Spark Ignition Engines, Comb. Flame, Vol 52, pp.217-245.
- [6] Bates, S. C., 1991, Further Insights into SI Four-Stroke Combustion Using Flame Imaging, Comb. Flame, Vol 85, pp.331-352.
- [7] Baritaud, T.A., 1987, High Speed Schlieren Visualization of Flame Initiation in a Lean Operating SI Engine, SAE Paper 872152.
- [8] Witze, P. O. and Vilchis, F. R., 1981, Stroboscopic Laser Shadowgraph of the Effect of Swirl on Homogeneous Combustion in Spark-Ignited Engine, SAE Trans. 90, pp.979-992, SAE Paper 810226.
- [9] Baritaud, T. A. and Green, R. M., 1986, A 2-D Flame Visualization Technique Applied to the I.C. Engine, SAE Paper 860025.
- [10] zur Loye, A. O. and Bracco, F. V., 1987, Two-Dimensional Visualization of Premixed-Charge Flame Structure in an IC Engine, SAE Paper 870454.
- [11] Ziegler, G.F.W., Zettlitz, A., Meinhardt, P., Herweg, R., Maly, R. and Pfister, W., 1988, Cycle-Resolved Two-Dimensional Flame Visualization in a Spark-Ignition Engine, SAE Paper 881634.
- [12] Mantzaras, J., Felton, P.G. and Bracco, F.V., 1988, Three dimensional Visualization of Premixed-Charge Engine Flames ; Islands of Reactants and Products ; Fractal Dimensions and Homogeneity, SAE Paper 881635.
- [13] Arcoumanis, C., Bae, C-S. and Hu, Z., 1994, Flow and Combustion in a Four-Valve Spark-Ignition Optical Engine, SAE Paper 940475.
- [14] Bae, C-S., 1993, Flow and Flame Interaction in Spark-Ignited Premixed Mixtures, PhD Thesis, Imperial College, London.
- [15] Chun, K. M. and Heywood, J. B., 1987, Estimating Heat-Release and Mass-of-Mixture Burned from the Spark-Ignition Engine Pressure Data, Comb. Sci. Tech., Vol.54, pp133-144.
- [16] Nakamura, A., Ishii, K. and Sasaki, T., 1989, Application of Image Converter Camera to Measure Flame Propagation in SI Engine, SAE Paper 890322.
- [17] Hicks, R.A., Lawes, M., Sheppard, C.G.W. and Whittaker, B.J., 1994, Multiple Laser Sheet Imaging Investigation of Turbulent Flame Structure in a Spark-Ignition Engine, SAE Paper 941992.