4-밸브 가솔린 엔진에서 텀블, 스월 유동이 화염전파에 미치는 영향

배 충 식 (충남대학교), 강 건 용 (한국기계연구원)

The Effects of Tumble and Swirl Flows on the Flame Propagation in a 4-Valve Gasoline Engine

Choong-Sik Bae (Chungnam National University)
Kern-Yong Kang (Korea Institute of Machinery and Materials)

ABSTRACT

The effects of tumble and swirl flows on the flame propagation were investigated experimentally in a 4-valve optical gasoline engine. The tumble flow patterns, generated by various intake ports of different entry angle; 25° , 20° and 15° , were characterized under motored conditions with laser Doppler velocimetry. Inclined tumble(swirl) flows were induced by three different swirl control valves. The initial flame propagation was visualized by an ICCD camera and its image were analyzed to compare the enflamed area and displacement of initial flames.

It was found that there is a correlation between the stronger tumble during induction and turbulence levels at the time of ignition resulting in faster flame development. Inclined tumble was proved to be more beneficial than the pure tumble for faster and stable combustion under lean mixture conditions, which was confirmed by faster propagating flame images.

1. 서론

최근의 가솔린엔진 개발에 있어서 연료경제성을 증진하고 공해배출물을 줄이기 위한 가장 효과적인 방법의 하나가 희박연소를 가능하게 하는 엔진의 개념이다. 그러나 희박혼합기 연소 방식을 채택할 경우 초기화염 형성과 화염전파 속도가 감소하게되어 연소의 사이클변동이 커지는 한편 미연탄화수소 계열의 배출이 증가하는 단점이 있다[1]. 희박연소조건하에서 엔진의 안정성을 확보하기 위하여서는 연소시간을 단축하고 연소의 사이클 변동을 감소시켜야 한다. 희박연소 조건하에서 엔진의 안정성을 양호하게 할 수 있는 가장 현실적이고 효율적인 접근 방법은 유동의 강화, 특히 난류강도의 증진을 통해 화염전파속도를 증가시킴으로써 연소기간을 단축시키는 것이다[2, 3].

현재의 추세로는 지붕형상 연소실을 갖는 4-밸브 엔진에서 흡배기밸브를 가르는 대칭면을 따라 생기는 텀블와류 및 경사텀블의 형성을 통하여 점화시기의 난류강도를 증진시키는 것이 가장 효과적인 방법이다. 흡입과정에서 형성된 텀블와류는 압축과정 후반에서 피스톤의 상승운동 때문에 압축 변형되면서 난류 운동에너지를 방출한다. 경사텀블의 경우에는 피스톤 운동에 영향을 별로 받지 않는 스월유동까지 가미하여 난류유동을 형성한다. 이 과정에서 여러 난류 특성 길이가 화염을 굴절시켜서 국부적인 화염대의 스트레칭(stretching)을 가져온다[4].

내연기관 내에서 유동특성과 화염전파과정을 측정하기 위하여 가시화 엔진을 사용한다[5]. 실린더 내 유동 측정을 위하여 LDV를 이용하고 화염의 가시화를 위해 전통적인 사진법으로서 직접가시화, 쉴리렌 사진법, 섀도우 사진법[6, 7] 등을 이용하며 최근에는 평면가시화를 이용하여 공간적, 시간적으로 분해능이 향상된 화염구조를 얻는 방법이 개발되고 있다[8, 9].

본 연구에서는 4-밸브 가솔린엔진의 흡기포트 형상 변화에 따른 텀블, 스월유동이 초기 화염전파에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 25° , 20° , 15° 3종류의 흡기유입각을 갖는 흡기포트 및 또다른 3종류의 스월조절밸브를 20° 유입각의 흡기포트에 부착하여 텀블유동 및 경사텀블 유동을 형성하고 ICCD 카메라로 화염사진을 취득하여 화염전파 거동을 분석하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 흡기포트 형상

본 연구에 사용된 가솔린 엔진은 지붕형상 연소실을 갖는 4-밸브 MPI 엔진으로서 제원 및 작동특성을 Table 1에 나타내고 있다.

Table 1. Parameters of the pentroof chambered 4-valve research engine

Displacement (cc)	1998
Bore × Stroke (mm)	86.0 × 86.0
Compression ratio	9.2 : 1
Maximum valve lift (mm)	9
Valve timing	IVO BTDC 10° IVC ABDC 55° EVO BBDC 55° EVC ATDC 10°

4-밸브 엔진 실린더 내의 텀블유동 및 경사텀블(경사스월)의 강도를 변화시키기 위하여 6가지 종류의 흡기포트를 사용하여 흡입공기 유입각도의 영향을 평가하였다. Fig. 1은 본 연구에서 채택된 흡기포트 및 가시화 엔진의 구조를 보이고 있다. 지붕형 연소실 내로의 유동 흡입과정에서 텀블유동 생성 형태는 흡입포트 유입각도의 가파름에 따라 달라질 수 있다는 점에 착안하여, Fig. 1(a)에 보이는 바와 같이 흡입포트 유입각도를 25° , 20° , 15° 로 변화시켰다[10]. 가시화 엔진에서 실린더 헤드의 흡기포트 부분만을 도려내고 다른 형상을 갖는 알루미늄으로 만든 카세트 형상의 통로를 장착하여 엔진헤드에 장착하였다.

지붕형상 연소실을 갖고 흡입유동이 연소실 단면 축에 대칭으로 두 흡입밸브로 유도되는 경우 실린더 내 유동은 순수한 텀블 와류를 형성하는 것으로 보고되었으며[11], 이러한 텀블유동에 스월 성분의 유동이 가미된 경사텀블의 영향을 보기 위해 흡입공기의 유입각도가 20° 인 흡입포트에 대하여 Fig. 1(b)에 보이듯 세 종류의 스월조절밸브를 흡입포트에 장착하여 시험하였다. 본 연구에서는 실린더 내 유동장을 LDV 측정을 위해서는 특수 제작한 단기통 가시화 엔진을 사용하였고, 화염가시화를 위해서는 상용의 4기통 가솔린 기관을 개조하여 단기통 가시화 엔진을 제작하였다[12]. 4기통 엔진의 크랭크케이스와 실린더 헤드를 그대로 사용하고 실린더 블록과 실린더 헤드 사이에 확장피스톤을 내장한 실린더 라이너를 제작, 삽

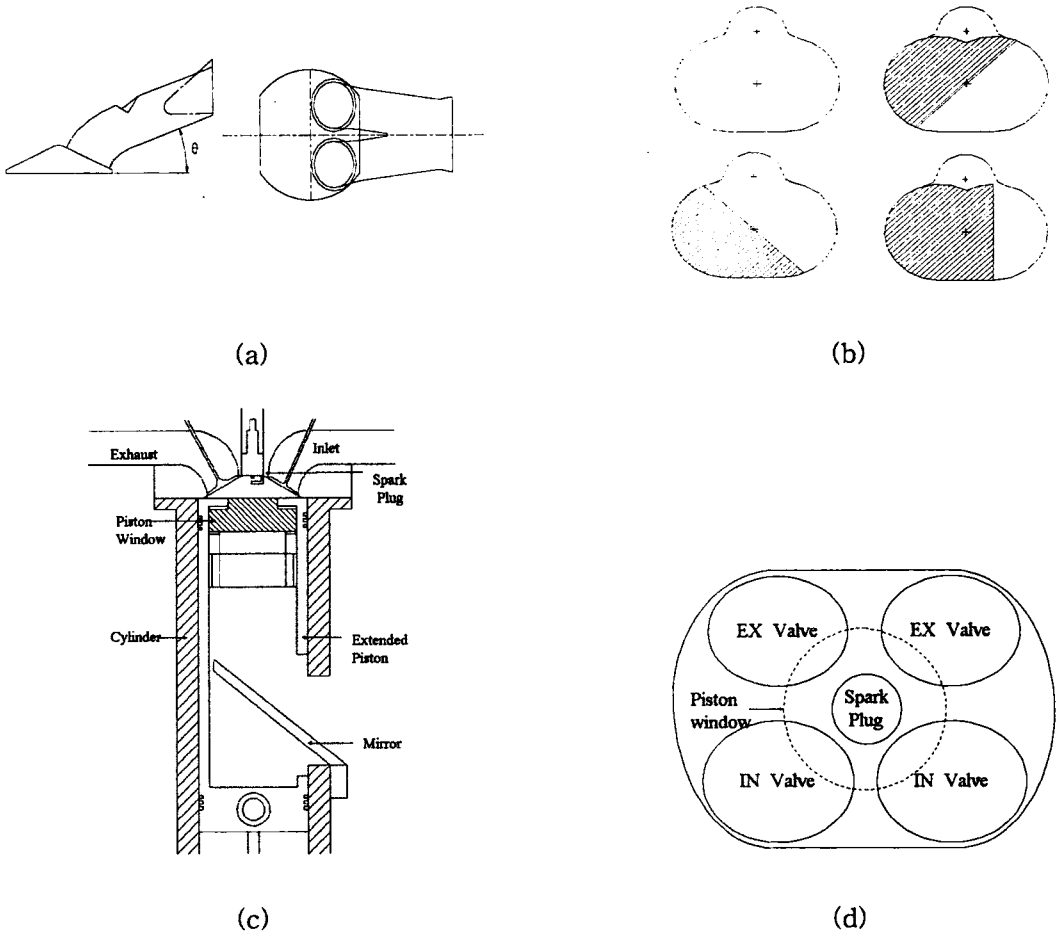

Figure 1. The 4-valve research optical engine
(a) The shape of tumble ports, θ = entry angle; 25° , 20° , 15°
(b) Swirl control valves
(c) Side view of an optical single-cylinder engine
(d) Bottom view of an optical single-cylinder engine

입하였다. 가장 외측 실린더 한 개에 대하여 광학창을 갖는 피스톤-실린더 계를 구성함으로서 단기통 연구용 엔진으로서 작동하게 하였으며 나머지 세 개의 실린더는 알루미늄재 보강재로 지지하였다. 확장 피스톤 상단에는 실린더 내부로의 광학적 접근이 가능하도록 광학창을 장착하였으며, 피스톤 몸체의 중앙부분을 비워서 45° 의 거울을 삽입하였다(Fig. 1(c)). 연소실험시에 광학창의 재료로 quartz를 이용하였다. Fig. 1(d)는 광학창의 크기와 위치를 보이는데 보어가 86mm인데 비하여 피스톤 창의 관찰 부분의 직경은 35.5mm로 제작하여 스파크 플러그 주위의 초기화염을 주로 가시화 대상으로 삼는다.

2.2 유동 특성 측정

엔진의 흡기포트 형상에 따른 연소전 유동 특성을 해석하기 위하여 가시화 엔진을 모터로 구동시키면서 LDV를 이용해 흡입 및 압축 과정의 유동 및 난류 특성을 측정하였다. Fig. 2는 단기통 가시화 엔진에서의 LDV 측정 장치의 구성을 나타내고 있다. 측정에 필요한 동기신호들은 축엔코더를 통해 나오는 크랭크 각의 정보를 이용하였으며, 측정점은 3차원 이송장

치에 의하여 실린더 축 및 측면창을 따라 정하였다. 산란입자는 1μm의 알루미나를 입자부 유기에 통과시켜 연속적인 공급이 이루어지게 하였으며 전방산란 및 후방산란을 이용하여 1000rpm에서 속도측정을 수행하였다. 정상유동장치에서의 텀블 강도 측정이 실린더 내 유동 특성과 상관관계가 있는 것으로 밝혀졌으므로[13] 경사텀블 유동을 유도하기 위해 3종류의 스월조절밸브를 설치한 포트의 경우에 대해 정상유동장치에의한 텀블 및 스월유동 강도를 산출하였다.

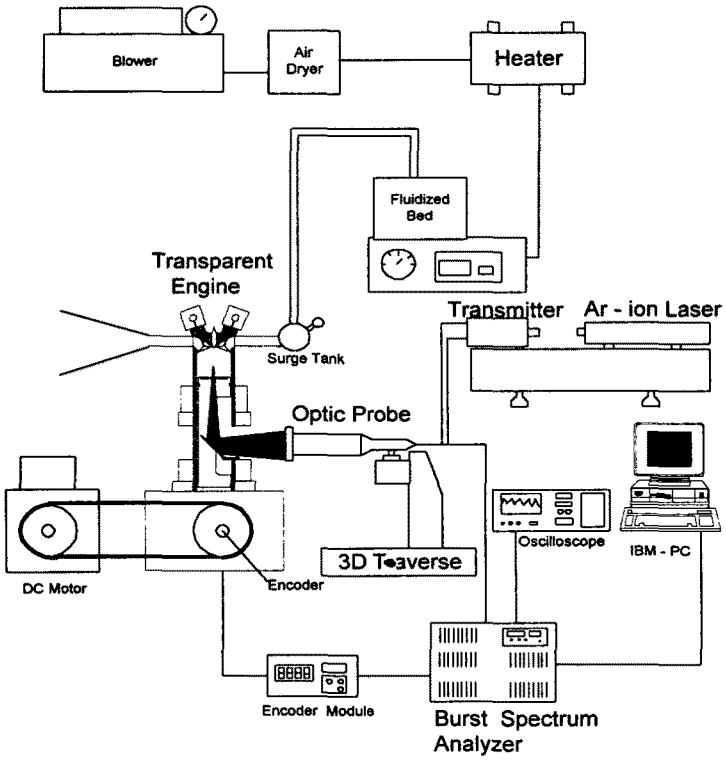

Figure 2. Experimental set-up of LDV set-up

2.3 연소 특성 측정 및 가시화

연소 실험시 연소실내의 압력을 스파크플러그와 조합된 압력변환기로 측정하였으며 이의 열방출 해석을 통해 연소시간을 산출하였다. Fig. 3은 단기통 가시화 엔진에서의 가시화 방법의 개념도를 보이고 있다.

엔진의 흡기관에 층류유량계를 설치하여 흡입 공기유량을 측정하는 한편 산소센서(ECM 2400)를 이용하여 공연비를 측정하였다. 엔진의 연소조건 제어를 위하여 엔진제어장치 (Engine Management System ; Intelligent Control IC 5460)를 사용하였다. EMS는 shaft encoder 신호를 입력으로 받아들이고 제어신호를 만들어낸다. Encoder는 incremental rotary encoder (OMRON E68-CWZ)로서 TDC 신호 및 1회전당 360개의 펄스 신호를 보내므로 엔진제어장치를 이용한 시기조정은 1° 크랭크각의 오차를 갖게된다. 엔진제어장치는 별도의 제어판을 이용함과 아울러 컴퓨터의 A/D 카드와 통신하여 입출력을 조절하도록 하였다. 엔진내 화염전파 과정은 CCD 카메라로 촬영하였다. 이 실험에 사용된 CCD 카메라는 Hamamatsu의 C3077로서 영상증폭기(Image intensifier : Hamamatsu C4273/4)를 가지고 있어 광도가 낮은 영역의 가시화도 가능하도록 되어 있어 희박연소의 거동도 관찰할 수 있다. CCD 카메라는 정해진 크랭크 각에서 1사이클당 한 개의 영상을 취득하며 이 시기는 점화시기로부터 지연시각을 조절하여 정하였으며 노출시간은 150μsec로 정하였다. 연속된 사이클

의 화염영상은 S-VHS 비디오 레코더(JVC VICTOR HR-S10000)에 수록되었다가, 영상 재생 과정에서 프레임별로 영상획득장치(Image grabber : Hamamatsu DVS-300)를 통해 디지털 영상으로 컴퓨터에 기록되었다.

이 영상들은 화염의 크기 및 위치의 거동을 살펴보는데 사용되어졌다. 연소실험은 1250rpm에서 이론 혼합기(A/F=14.7) 및 희박혼합기 조건에서 이루어졌다.

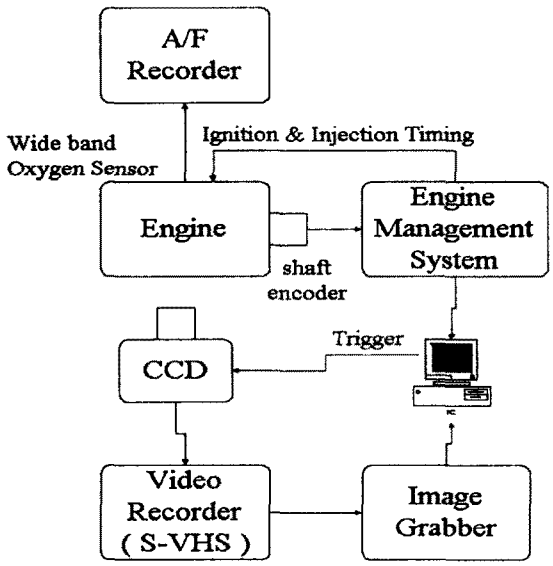

Figure 3. The concept of flame visualization

3. 결과 및 고찰

Fig. 1(a)에 보인 흡기포트의 형상에 따른 3개 포트에대해 크랭크 각도에 따른 텀블유동 속도 변화를 Fig. 4와 같이 얻었다. 1차원적인 텀블 속도 측정값으로부터 실린더 내부의 3차원적 텀블유동 해석에 무리가 있을 수 있으나, 지붕형상 연소실을 갖고 흡입 유동이 연소실 단면의 흡입밸브-배기밸브 방향 축에 대칭으로 유입되는 경우 실린더 내 유동은 순수한 텀블 와류를 형성하는 것으로 보고되고 있으므로[11] 대체적인 텀블유동의 강도를 비교할 수 있을 것이다. 유입각이 큰 경우(가파른 경우)에는 흡입포트로부터 유입되는 흡입공기가 곧바로 피스톤 상단에 충돌해 반사되어 생성되는 형태로서 종방향으로 늘어진 텀블 선회류가 만들어지게 된다. 이때 텀블유동의 크기가 전체 실린더에 가득 차지 않음으로써 실린더 벽면 근처에서 2차류가 생성되어 많은 운동에너지를 잃게되는 단점이 있다. 흡입포트의 유입각도가 작을 경우에는 유입공기가 실린더 헤드면을 따라 흐르게되는 횡방향으로 늘어진 텀블유동이 된다. 이 경우에도 피스톤 상단 공간에 적합하도록 만들어져서, 피스톤의 움직임에 따라 같이 움직이어야한다. 즉, 흡입시 생긴 강한 텀블와류가 연소실내에서 압축말기까지 존재하며 그중 일부가 압축과정을 거치며 난류생성의 증가에 기여하도록 하여야 한다. 흡기포트 유입각이 25° 인 경우 흡입과정중 흡입유동이 피스톤상단에 충돌함으로써 텀블유동이 생성되고 있으나 피스톤이 점차 하사점으로 내려감에 따라 흡입유동의 속도가 떨어져 피스톤 하단까지 이르지 못함으로써 밑부분부터 텀블유동의 형태가 깨어지고 있다. 일단 깨어지기 시작한 텀블유동은 압축과정시 피스톤이 상승하면서 텀블유동을 약화시켜 압축과정 중반에는 텀블유동이 거의 사라지는 특성을 보인다. 반면에 흡입각도가 낮은 15° 포트의 경우 흡입유가 실린더헤드면을 따라 흐름으로써 텀블유동이 생성되며 유동의 중심도 피스톤 쪽으로 치우쳐 나타나고 있다. 그러나 치우쳐진 유동은 다시 피스톤이 상승함에 따라 텀블유동의 형태로 바꾸어 압축과정 후반까지도 텀블유동의 형태가 존재하고 있음을 보인다. 이 두경우의 중

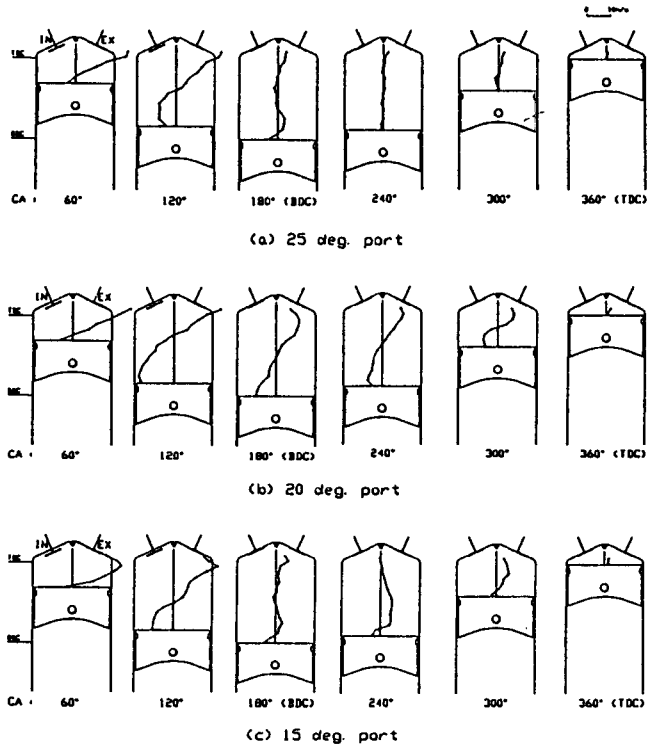

Figure 4. Tumble velocity profiles(1000rpm)

간형태인 20° 포트에서는 생성되는 텀블유동의 형태가 피스톤의 위치에 따라 잘 이동함으로써 거의 실린더 중심과 텀블유동의 중심이 일치하는 것을 볼 수 있다. 그리하여 텀블유동은 유동의 부차적인 손실이 작아지게 되고 유동에너지를 압축과정 후반까지 잘 보존할 수 있다. 그 결과로 그림에서도 알 수 있듯이 다른 2개의 포트에서 보다 뚜렷한 텀블유동이 잘 유지됨을 알 수 있다. 이러한 텀블유동이 피스톤이 계속 상승함에 따라 더 이상 존속하지 못하고 작은 와류들로 깨지게 되어 소산되게 된다. 3개의 텀블포트에의한 텀블유동의 강도와 이에 따른 난류강도를 비교하여 본 결과, 20° 유입각을 갖는 경우 압축과정까지의 텀블강도가 가장 크고 압축말기 난류강도도 가장큰 값을 갖고 15° , 25° 의 순으로 텀블강도와 난류강도가 작아지고 텀블모멘트와 난류강도 사이에 상관관계가 있는 것으로 밝혀졌다[14].

강한 텀블을 생성하고 이에 따라 난류강도를 증진하여 연소시간을 단축할 수 있는 20° 유입각을 갖는 흡기포트에 대하여, 여기에 스월유동이 부가되었을 경우의 영향을 알아보기 위하여 Fig. 1(b)에 보이는 바와 같은 스월조절밸브를 장착하여 실험하여 보았다. 각각의 스월조절밸브가 형성하는 텀블 및 스월유동의 특성을 결정하기 위하여 정상유동 장치에서 텀블 및 스월의 강도를 측정하였다. 이 값들은 Table 2에 보이며, 순수한 텀블만이 존재하는 20° 유입각의 흡기포트를 기준으로 순수 고텀블(HT; High Tumble), 고텀블중스월(HTMS; High Tumble Medium Swirl), 고텀블고스월(HTHS; High Tumble High Swirl), 중텀블중스월(MTMS; Medium Tumble Medium Swirl) 등으로 편의상 명명하였다.

Fig. 5는 A/F=17인 희박 혼합기 조건에서 흡기포트의 유입각이 달라서 텀블강도가 다르게 될 경우의 초기 화염전파 양상을 비교해 볼 수 있는 화염 영상들의 예이다. 점화후 크랭크각 15° 이후의 영상들로부터 화염의 경계면이 굴곡되어 있는 난류화염을 볼 수 있으며 화염위치 및 형상에 있어서 사이클 변동을 관찰할 수 있다. 그리고 대체적으로 초기 화염들이 배기밸브쪽으로 치우쳐 위치함을 알 수 있다. 이것은 지붕형상 연소실을 갖는 DOHC 엔진에 존재하는 텀블유동이 압축말기까지 영향을 미치는것을 시사한다. 즉, 흡입시 형성된 강한 텀블

유동장이 압축과정을 거치면서 대부분 작은 크기의 난류로 소산되면서도 약화된 텀블유동의 상단이 점화 플러그 근방에서 배기밸브 방향의 유동성분을 갖게됨으로써, 초기화염을 대류시키고 있음을 의미한다. 이러한 경향은 연소속도가 낮은 희박 혼합기 조건에서 더욱 뚜렷이 나타난다.

Table 2. Flow characteristics of SCV's

Configuration	Tumble ratio	Swirl ratio	Open ratio	Tumble angle
HT (High Tumble no swirl)	2.048	0.000	100%	90.0°
HTMS (High Tumble Medium Swirl)	3.363	0.594	55%	75.9°
HTHS (High Tumble High Swirl)	2.386	1.088	55%	65.5°
MTMS (Medium Tumble Medium Swirl)	1.540	0.837	37%	61.5°

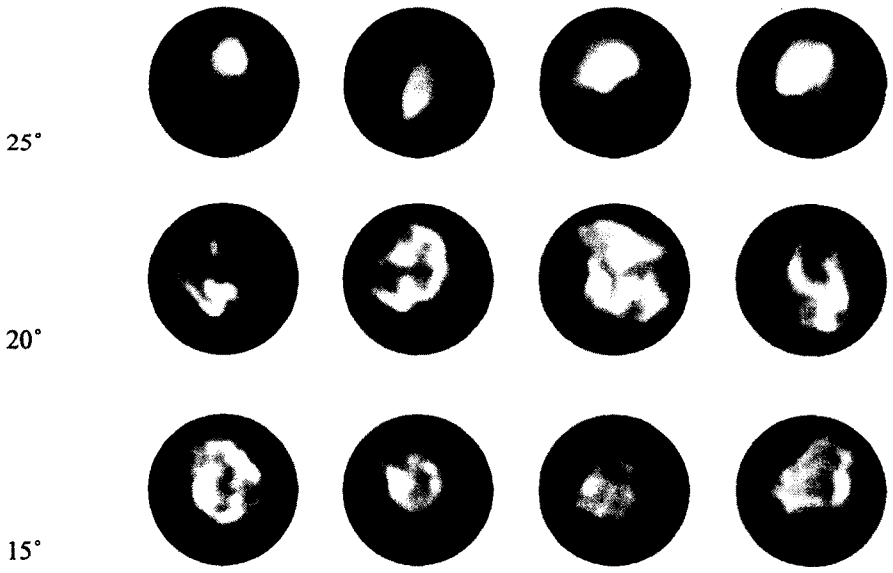

Figure 5. Flame Images obtained at 15° CA after ignition for 25° , 20° and 15° tumble port (1250rpm, A/F=17)

텀블강도가 크고 난류가 높은 20° 포트의 경우 월등히 큰 화염크기임을 쉽게 알아볼 수 있는데 이러한 경향을 Fig. 6에서 확인할 수 있다. 그림에서 보이는 화염면적이라는 것은 3차원 화염을 투영하여 가시화한 2차원 화염의 면적을 말하므로 실제 화염대의 면적을 의미

하지 않으며, 화염의 크기를 비교하기 위한 값이다. ICCD 카메라로 얻은 화염영상에서 정확한 화염의 경계를 구하기 위하여 일련의 영상자료 처리과정을 거쳐서 화염의 크기와 위치의 값은 각 경우 50사이클의 영상에 대한 계산 값을 평균한 것으로서 고텀블을 통한 높은 난류의 생성은 초기 화염전파를 증진함을 알 수 있다. Fig. 7은 여러 종류의 스월조절밸브를 장착하였을 경우 형성되는 경사텀블 유동장에서의 화염전파 형태를 비교해 놓은 것이다. 십자표시는 스파크플러그의 위치를 나타내고 점은 화염의 중심을 보인다. 그림에서 보듯이 순수

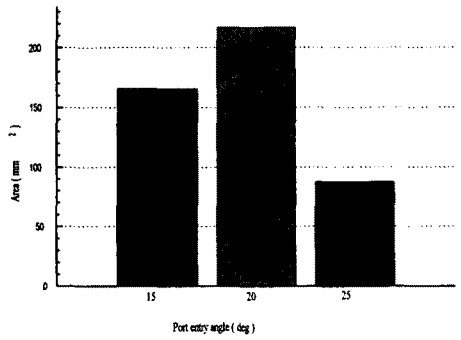

Figure 6. Comparison of flame sizes for different ports (1250rpm, A/F=17)

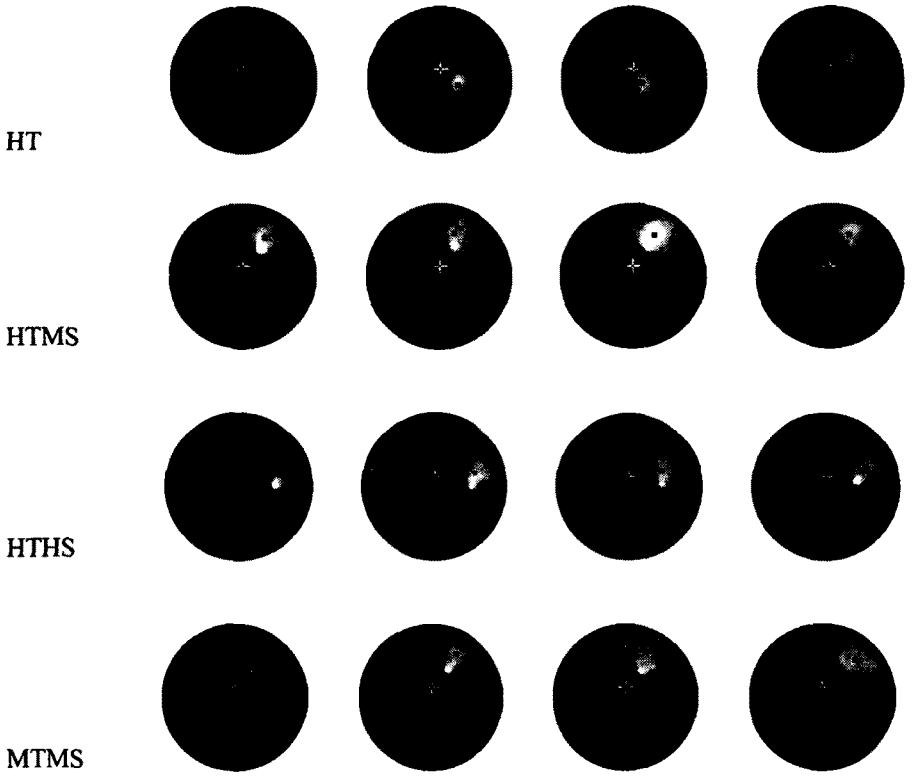

Figure 7. Flame Images obtained at 5° after ignition for various SCV's (1250rpm, A/F=17)

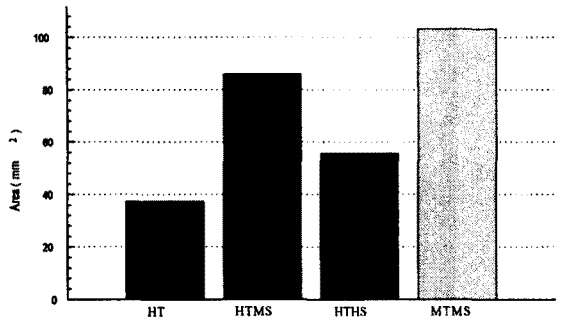

Figure 8. Comparison of flame sizes for various SCV's (1250rpm, A/F=17)

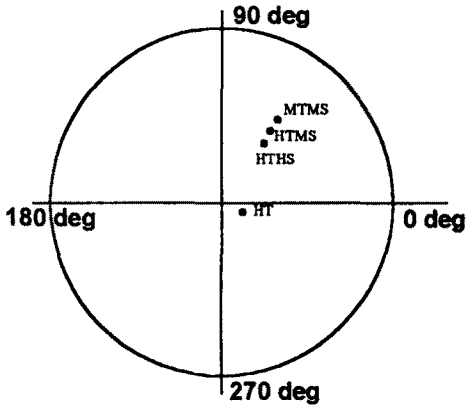

Figure 9. Flame centers for different inlet ports (1250rpm, A/F=17)

텀블만 있는 경우에 비하여 스월유동이 가미되면 화염위치가 점화전극으로부터 많이 대류되어감을 볼 수 있다. 스월조절밸브에의한 유동의 화염전파에대한 영향은 Fig. 8과 Fig. 9의 화염면적 및 화염 위치에 관한 결과로부터 찾아볼 수 있다. Fig. 8의 화염면적으로부터 순수텀블보다는 경사텀블이 초기 화염전파에 유리하여 중텀블중스월(MTMS)의 배합이 가장 좋다고 할 수 있으며, Fig. 9의 화염 위치를 보면 초기 화염전파가 잘 이루어지는 것은 화염이 벌크유동에 의해 많이 대류되어진것과 상관관계가 있다는 추론을 할 수 있다. 그러나, 지금 단계에서는 이에 대해 결론 내리기에는 자료가 부족하므로 본 연구와 병행하여 진행되고 있는 난류유동 특성의 결과가 나오면 더욱 더 자세한 분석이 가능할 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 4-밸브 가솔린엔진의 흡기포트 형상 변화에 따른 텀블, 스월유동이 초기 화염전파에 미치는 영향을 알아보기 위하여 3가지의 텀블유동과 3가지의 경사텀블 유동이 있는 경우에 대하여 유동장 특성을 측정하고, ICCD 카메라를 초기 화염을 가시화하여 화염전파 거동을 영상해석을 통해 분석하였다. 이로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 25° , 20° , 15° 의 유입각을 갖는 흡입포트중 20° 포트가 가장 강한 텀블과 압축말기 난류강도 값을 보였으며 이에 따라 초기 화염전파속도도 빨랐다. 이를 통해 지붕형상 연소실을 갖는 4-밸브 가솔린엔진에서 텀블유동의 유용성을 확인할 수 있었다.

(2) 순수텀블보다는 스월을 가미한 경사텀블 유동의 형성이 희박혼합기 연소에 유리함을 확인하였다.

(3) 경사텀블을 유도하기위하여 여러 가지 스월조절밸브를 사용한 결과 중텀블중스월(MTMS)의 배합이 가장 유리함을 밝혀냈다. 그러나, 이에 대한 유동해석이 뒷받침되어야 보다 구체적인 결론에 도달할 수 있을 것이다.

5. 후기

이 연구는 통산산업부에서 수행한 G7 차세대자동차 저공해 공통기반기술 과제의 연구비 지원에 의해 수행된 결과의 일부입니다.

참고 문헌

1. Germane, G.J., Wood, C.G. and Hess, C.C., "Lean Combustion in Spark-Ignited Internal Combustion Engines", SAE Paper 831694, 1983
2. Bracco, F.V., "Modelling and Diagnostics of Combustion in Spark-Ignition Engines", COMODIA 85, pp1-13, 1985
3. Kalghtagi, G.T., "Spark Ignition, Early Flame Development and Cyclic Variation in IC Engines", SAE Paper 870163, 1987
4. Bradley, D., Lau, A.K. and Lawes, M., "Flame Stretch Rate as a Determinant of Turbulent Burning Velocity", Phil. Trans. R. Soc., a338, pp359-387, 1992
5. 배충식, "가시화 엔진을 이용한 내연기관내 유동 및 연소의 연구", 한국자동차공학회지, Vol.18, No.1, pp2-15, 1996
6. Bates, S.C., "Further Insights into SI Four-Stroke Combustion using Flame Imaging", Comb. Flame, Vol.85, pp331-352, 1991
7. Baritaud, T.A., "High Speed Schlieren Visualization of Flame Initiation in a Lean Operating SI Engine", SAE Paper 872152, 1987
8. zur Loye, A.O. and Bracco, F.V., "Two-Dimensional Visualization of Premixed-Charge Flame Structure in an IC Engine", SAE Paper 870454, 1987
9. 배충식, "가솔린 엔진에서의 2차원 화염가시화", 한국연소학회지, Vol.1, No.1, pp65-73, 1996
10. 강건용, 오승묵, 이진욱, 배충식, "텀블 유동을 이용한 연소개선 효과 연구", 한국자동차공학회 추계학술대회 논문집, Vol.II, pp84-89, 1996
11. Arcoumanis, C., Bae, C-S, and Hu, Z., "Flow and Combustion in a Four-Valve Spark-Ignition Optical Engine", SAE Paper 940475, 1994
12. 배충식, 이재호, 오승묵, 강건용, "단기통 가시화 엔진의 제작 및 연소실험", 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집, pp70-75, 1996
13. K-Y. Kang, S.M. Oh, J-W. Lee, D-S. Jeong, K-H. Lee, C-S. Bae, "The Effect of Intake Port Design in Lean Burn SI Engines", IMechE Paper S433/009/96, Proc."Lean Burn Combustion Engines", pp135-147, 1996
14. C. S. Bae and K. Y. Kang, "The Correlation between Flow and Flame Propagation in a Four-Valve SI Engine", pp245-248, Proc. ASPACC97, 1997