Transactions of KSAE, Vol. 12, No. 3, pp.10-18 (2004)

Copyright © 2004 KSAE
1225-6382/2004/069-02

정적 연소실내 혼합기 분포가 연소특성에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

이 기 형[*1] · 이 창 희[2] · 안 용 흠[2]

한양대학교 기계공학과[1] · 한양대학교 대학원[2]

An Experimental Study on the Effect of Mixture Distribution in the Constant Volume Combustion Chamber on the Combustion Characteristics

Kihyung Lee[*1] · Changhee Lee[2] · Yonghum An[2]

[1,2]*Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Gyeonggi-do 425-791, Korea*

(Received 2 October 2003 / Accepted 25 March 2004)

Abstract : It is well known that the stratified charge combustion has many kind of advantages to combustion characteristics, such as higher thermal efficiency and less CO, NOx levels than conventional homogeneous mixture combustion. Although this combustion can be caused low fuel consumption, it is produced the high unburned hydrocarbon and soot levels because of different equivalence ratio in the combustion chamber. Moreover it has a lot of possibility of low output and misfire if the mixture gas would not be in existence around the spark plug. In this paper, fundamental studies for stratified combustion were carried out using a constant volume combustion chamber. The effect of locally mixture gas distribution according to control the direct injection and premixed injection in the chamber were examined experimentally. In addition, the effects of turbulence on stratified charge combustion process were observed by schlieren photography.

Key words : Stratification effect(성층효과), Constant volume combustion chamber(정적연소실), Rate of mass combustion(질량연소율), Swirl intensity(스월강도)

Nomenclature

P : pressure (MPa)
M_f : rate of mass combustion(%)
S : flame propagation velocity(m/sec)
A : flame area (mm^2)
ρ : density of unburned mixture (kg/m^3)
t : time (msec)

Subscripts

i : initial

*To whom correspondence should be addressed.
hylee@hanyang.ac.kr

1. 서 론

최근 세계적으로 대두되고 있는 화석 에너지의 절약과 CO^2에 의한 지구 온난화 문제에 대응하기 위하여 가솔린 자동차용 엔진에 대한 배기 배출물의 저감과 저 연비 그리고 고출력화가 동시에 요구되고 있는 추세이다. 가솔린 엔진의 경우 흡기 포트 내에서 연료와 공기가 충분히 혼합된 후 점화되는

예혼합 연소이므로 이는 일정 공연비 이상에서는 연소가 발생하지 않는 가연 한계가 존재한다. 따라서 기존의 예혼합 연소에 의해서는 CO^2의 절대량을 줄이는데는 한계가 있다. 따라서, 종래의 가솔린 엔진의 이러한 한계점을 극복하기 위한 연소실 내 직접 분사식 가솔린 엔진에서의 연료의 성층화를 통한 연소 방법은 현재의 한계 공연비 20:1인 예혼합 MPI 엔진의 운전 가연한계를 50:1정도로 2배 이상 확장함으로써 전체 연비를 30%이상 높일 수 있는 획기적인 가능성을 가지고 있는 기술이다. 이러한 직분식 성층연소의 연비 증가율은 다른 기술로는 도달하기 어려운 수치이므로 가솔린 엔진의 연비 개선을 위한 가장 확실하고 핵심적인 기술로 평가된다. 또한, 가솔린 엔진에서의 직접 분사식 성층 연소는 희박 연소를 시킬 수 있는 좋은 방법이 되며, 내노크성이 뛰어나고, 높은 열효율을 가지며, 일산화탄소 및 질소 산화물 등의 배기가스의 저감을 가져올 수 있다. 따라서 연비 향상과 배기가스의 저감을 위해 성층 연소의 특성에 관한 연구는 그 의의가 크다.

지금까지 많은 분야에서 성층 연소에 관한 연구가 이루어지고 있으나 저부하 운전시의 미연탄화수소의 배출량이 많고, 연소 온도가 낮기 때문에 촉매에 의한 배기가스의 정화도 쉽지 않으며, 점화 플러그에 혼합기가 집중하지 않을 경우에 실화나 출력 저하 등의 치명적인 결과를 초래할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 체적이 일정한 정적 연소기에 직분식 인젝터를 부착시켜 화염핵이 형성되는 점화 플러그 부근에 연료를 직접 분사시켜 성층 연소의 기본적인 연소 특성을 파악하였으며, 동일 당량비의 예혼합 연소와의 특성을 비교 분석하였다. 그리고 점화 플러그 근처에 집중되는 혼합기의 당량비와 외곽 부근의 당량비를 변화시켜 정적 연소기 내의 혼합기 분포에 따른 연소 특성을 파악하였다.[1-3]

또한 실제 엔진에서 발생할 수 있는 난류 유동장을 모사하기 위해 연소실 내에 일정 압력의 공기로 스월을 형성하여 난류 강도가 성층 연소에 미치는 영향에 대해서 연구하였다.

2. 실험 장치 및 연구 방법

2.1 실험 장치

본 연구에 사용된 실험 장치는 정적 연소실을 중심으로 예혼합실, 예혼합실과 직접 분사식 인젝터에 연료 공급을 위한 고압의 연료 공급 장치, 연소실 내에 스월을 발생시키기 위한 난류 발생 장치, 정적 연소실에 부착된 직접 분사식 인젝터, 연소실의 온도를 자동으로 제어할 수 있는 온도 제어 장치, 점화 에너지를 만들기 위한 CDI(capacitor discharge igni-

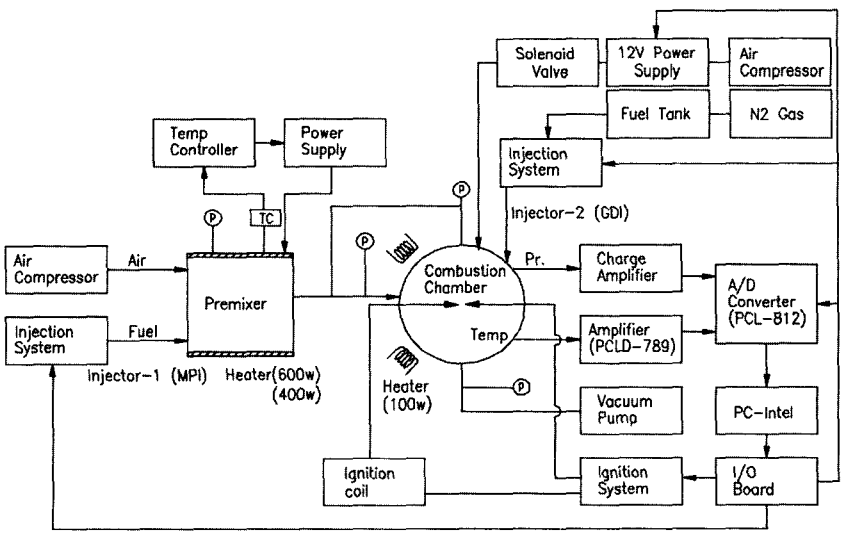


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

tion)식 단발 점화 장치, 압력 및 온도 측정 장치, 분사 및 점화 동기 제어 장치, DATA수집 및 처리장치로 구성하였다. Fig. 1은 실험장치의 개략도를 나타낸 그림이다.

Fig. 2는 실험에 사용된 정적 연소실을 나타낸 그림으로 정적 연소실의 내경과 높이는 각각 100mm와 30mm이며 체적은 235.619cc이다. 연소실의 재질은 열전도율과 내구성이 우수한 듀랄루민을 사용하였다. 연소압력과 온도를 측정하기 위해 연소실의 벽면에 압전형 압력 센서와 온도 센서를 사용하였으며, 연소실의 초기온도를 설정하기 위하여 연소실의 벽면에 100W Heater를 부착하였으며 온도 조절장치를 이용하여 제어하였다.

점화 플러그(spark plug) 주변의 성층 연소를 이루기 위해 ①과 같이 직분식 인젝터에 의해 10MPa로 분사된 연료가 점화 플러그 주위에 집중되어 연료의 성층화가 가능하도록 구성하였다. 또한, 정적 연소실내에 스월을 발생시키기 위하여 ②와 같이 솔레노이드 밸브를 장착하였으며 이때 점화플러그는 연소실의 중앙에 위치하였다. 정적 연소실 내의 분무거동을 관찰하기 위해 연소실의 측면에 광학창을 만들었으며, 연소실내의 화염 및 화염전파 특성을 파악하기 위해 양 측면에 두께 30mm의 석영창을 설치하였다.

Fig. 3은 성층 연소를 실행하기 위한 솔레노이드 밸브의 개폐시간과 직분식 인젝터의 분사기간 및 점화기간의 신호 개략도이다. 이러한 시스템간의

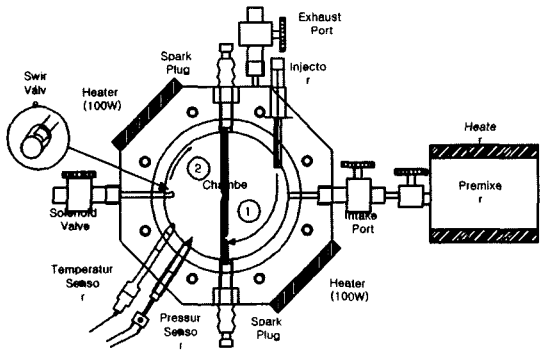


Fig. 2 Schematic diagram of constant volume combustion chamber

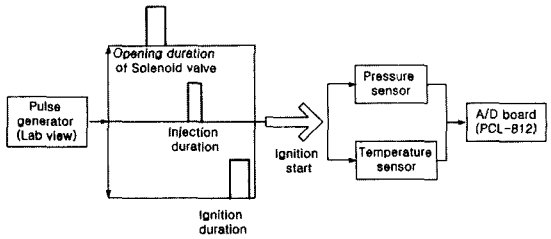


Fig. 3 Timing diagram with pressure history

동기 제어를 위하여 Delay/Pulse Generator을 사용하였으며, 연소시 발생하는 압력과 온도를 실시간으로 데이터 획득 장치를 이용하여 측정하였으며, 총괄적인 프로그램은 Lab View를 사용하여 제어하였다.

2.2 실험 방법

가솔린 연료의 경우 상온에서 액체상태이므로 직접 연소실 내로 연료를 분사할 경우 실화의 가능성이 크다. 따라서 정적 연소실의 온도를 가솔린의 기화 가능 온도인 443K로 고정시킨 후에 연료-공기의 혼합기를 형성하여 성층 연소를 가능하게 하였다.

연소실내의 전체 당량비는 0.8, 0.6, 0.4, 0.2에서 실험하였으며, 연소실 내의 혼합기 분포를 변화시키기 위해 공급되는 연료 중 30, 50, 70%의 연료를 예혼합실에서 미리 충분히 혼합한 후 연소실로 공급하였으며, 공급된 연료의 70, 50, 30%의 연료를 연소실 내로 직접 분사하여 연소실 내의 혼합기 분포에 따른 연소 특성을 파악하였다. 연료 분사 후 3msec 이후에 점화를 시작하였으며 점화기간은 10msec로 고정하였다. 또한, 직분식으로 연소실 내로 분사되는 연료의 당량비는 인젝터의 1회 분사량에 따른 통전시간으로 조절하였다. 한편, 실제 엔진의 경우 연소실 내에는 복잡한 유동장이 형성되므로 실제로 연소 특성이 많이 달라지게 된다. 따라서 실제 엔진에서의 성층 연소특성을 모사하기 위하여 정적 연소실의 벽면에 분사 방향과 동일한 방향으로 공기를 주입시킬 수 있는 솔레노이드 밸브를 부착하여 연소실 내에 난류 유동장을 발생시켰다. 스월의 강도는 가압 공기탱크를 이용하여 연소실로 유입하는 압력에 의하여 조절하였으며, 연소실 내의 전체 당량비는 솔레노이드 밸브의 개폐시간으로

Table 1 Experimental conditions

Experimental variables	Conditions
Equivalence ratio	0.2, 0.3, 0.4, 0.8
Ambient pressure (MPa)	0.3, 0.5, 0.7
Ambient temperature (K)	443
Injection pressure (MPa)	10
Ignition duration (msec)	10
Mixture distribution(Dir:Pre)	100:0, 70:30, 30:70, 0:100
Induced air pressure (MPa)	1, 0.8, 0.6

조절하였다.

Table 1은 본 연구에서 선정한 실험 조건과 변수를 나타낸 표이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 혼합기 분포에 따른 연소 특성

3.1.1 당량비(φ=0.8)인 경우의 연소실내의 연소 압력 특성

Fig. 4는 각각 당량비가 0.8이고 연료-공기의 혼합기의 분위기 압력이 0.5MPa과 0.7MPa인 경우의 혼합기 분포에 따른 연소실 내의 압력 변화를 나타낸 결과이다. 동일 당량비 하에서 두 분위기 압력 조건에서 연소실내로 100% 직접 분사시에 최고 연소 압력을 얻었다. 또한 최고연소압력에 도달하는 시간 또한 가장 빠름을 알 수 있었다. 이러한 결과로부터 희박 영역에서의 화염면이 형성되는 점화플러그 주변의 농후한 연료를 형성하는 것이 성층 연소에 유리하다는 사실을 입증한다고 사료된다.

Fig. 5는 당량비가 0.8이고 분위기 압력이 0.2MPa, 부터 0.7MPa까지 0.1MPa 간격으로 혼합기 비율 변화에 따른 최고 연소 압력 및 최고 연소 압력 도달 시간을 나타낸 결과이다.

Fig. 5(a)는 분위기 압력 및 혼합기 비율 변화에 따른 연소 최고 압력을 나나낸 결과로서, 직접 분사 비율이 증가함에 따라 선형적으로 연소 압력이 증가함을 알 수 있었다.

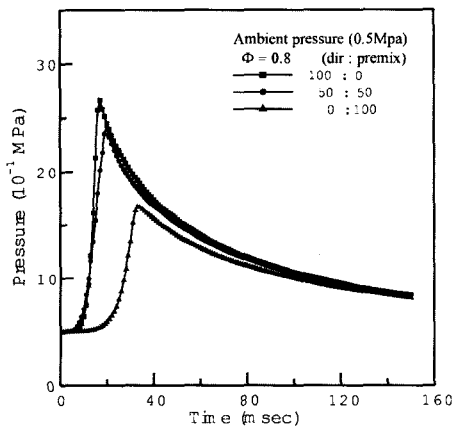
Fig. 5(b)의 결과를 통하여 직접분사 비율이 증가하고 분위기 압력이 증가함에 따라 최고 압력에 도달하는 시간이 증가함을 알 수 있었다.

이러한 결과를 통해 직접 분사 비율과 더불어 챔버내의 분위기 압력이 증가함에 따라 화염 전파속도가 감소와 최고 압력 도달 시간이 증가됨을 알 수 있었다. 비교적 희박 영역에서는 균일한 혼합기일 때 보다는 플러그 주변에 농후한 당량비를 조성함으로서 최고 연소 압력 상승을 가져올 수 있다고 생각된다.

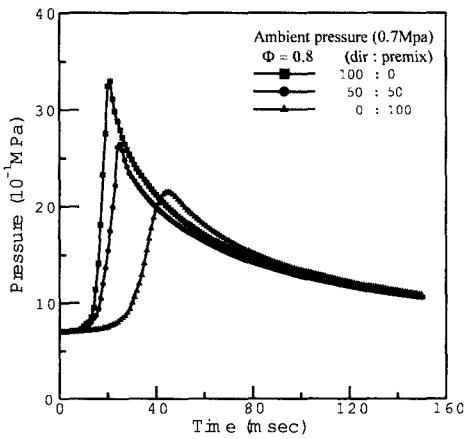
3.1.2 혼합기 분포에 따른 질량 연소율

질량연소율의 계산은 실험결과 얻어진 압력 데이터로부터 Lewis와 Von Elbe의 식 (1)을 이용하여 질량연소율 M_f을 계산하였다.[2)]

$$M_f(t) = \frac{P(t) - P_i}{P_{max} - P_i} \quad (1)$$

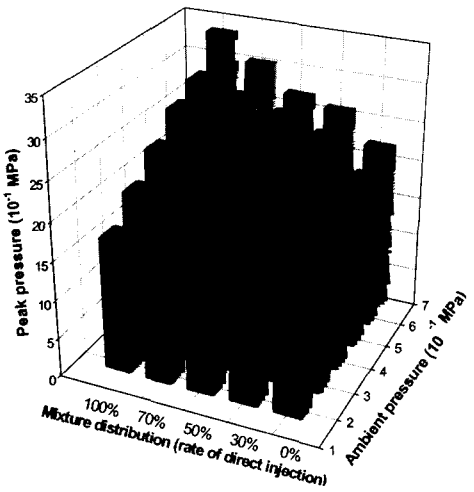


(a) Ambient pressure : 0.5MPa

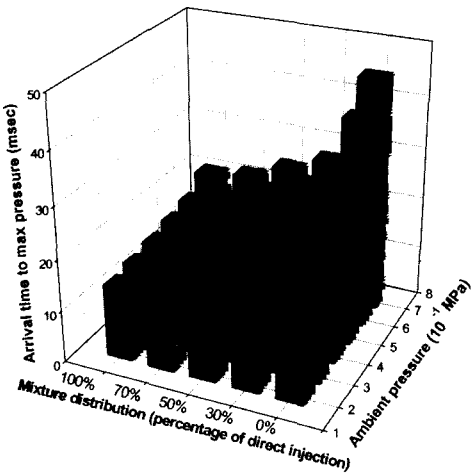


(b) Ambient pressure : 0.7MPa

Fig. 4 Effect of mixture distribution on the combustion pressure

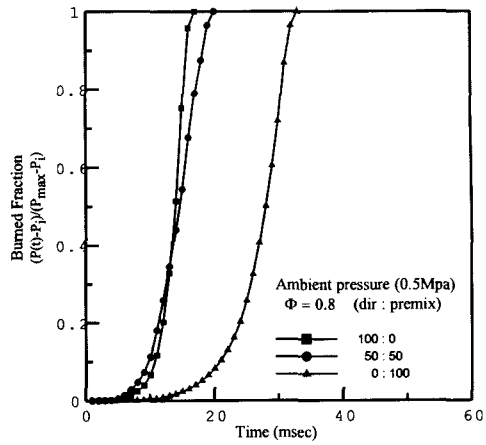


(a) Peak pressure

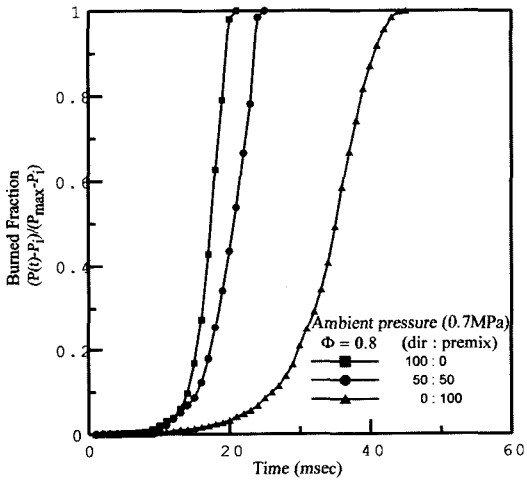


(b) Arrival time to max pressure

Fig. 5 Effect of mixture distribution and initial pressure



(a) Ambient pressure : 0.5MPa



(a) Ambient pressure : 0.7MPa

Fig. 6 Effect of mixture distribution on the burned fraction

여기서, P는 연소압력, P_i는 초기 혼합기 압력, P_{max}는 최고 연소압력, t는 연소 진행되는 시간을 나타낸 것이다.

질량 연소율은 실험 결과 얻어진 압력 데이터로부터 계산하였으며, 최고 압력에 도달하는 시점에서 연소가 종료되었다고 가정하였다.

Fig. 6의 결과로부터 초기 분위기 압력이 증가할수록 연소기간이 길어짐을 알 수 있으며, 연소실내의 예혼합기의 양이 많을수록 연소기간이 길어지며 특히 100% 예혼합 연소의 경우 혼합기 분포와 초기 분위기 압력 등의 외부 인자에 의해 연소기간이 10msec 이상의 차이를 보였다. Fig. 6 (a)과 (b)의 결과를 통하여 희박 영역에서 초기 압력이 0.5MPa과 0.7MPa일 때의 혼합기 분포에 따른 질량 연소율을 나타낸 결과이다. 100% 직접분사의 경우 연소율 곡선이 매우 급격하게 상승하고 있으며, 연소실 외곽부근의 당량비가 농후하며 예혼합 비율이 증가함에 따라 연소율 곡선이 완만해짐을 알 수 있다. 특히 당량비 0.8의 100% 예혼합 연소의 경우 이론상의 최대 출력 당량비인 1.1~1.2에 비해 정적 연소실내의 예혼합 가연 한계에 접근하는 당량비로서, 혼합기 중의 연료의 밀도가 상당히 낮아 연소가 불량해지

며 연소기간이 길어져 출력저하의 원인이 될 수 있다. 그에 비해 동일 당량비 하에서의 성층 연소의 경우 연소기간이 20msec 이상 단축됨을 알 수 있다.

3.2 난류특성 변화에 따른 연소실내의 연소특성

3.2.1 당량비 변화에 따른 연소특성

Fig. 7은 초기 연소실내의 분위기 압력이 동일한 경우에 각각 가압된 공기 탱크로부터 토출되는 공기량에 의해 연소실내의 스월 강도를 조절하여 스월량에 따른 연소 압력을 비교한 결과이다.

연소실 내의 당량비와 분위기 압력은 솔레노이드 밸브에서 분사되는 공기의 분사 기간으로 조절하였다. 솔레노이드 밸브를 통해 공기가 연소실 내로 주입된 후에 인젝터에 의해 연료는 챔버내로 분사하였다. 스월에 의한 연소실 내의 압력차에 의해 분사된 연료가 연소실의 중심에 위치하게 되며 연소가 발생하게 된다.

각각의 경우 압력선도는 거의 비슷한 경향을 보이나 토출 압력이 1MPa일 때 연소 압력이 가장 높으며 0.6MPa일 때 상대적으로 낮음을 알 수 있으며, 최고 연소 압력 도달시간의 경우 토출압력 1MPa의 경우가 가장 빠름을 알 수 있다. 이는 비교적 강한 난류 유동장에 의하여 생성된 스월의 영향으로 인해 연료와 공기의 혼합기 형성을 촉진으로 인하여 화염면(Area of flame)이 넓어짐에 따라 연소가 촉진되기 때문이라고 판단된다.

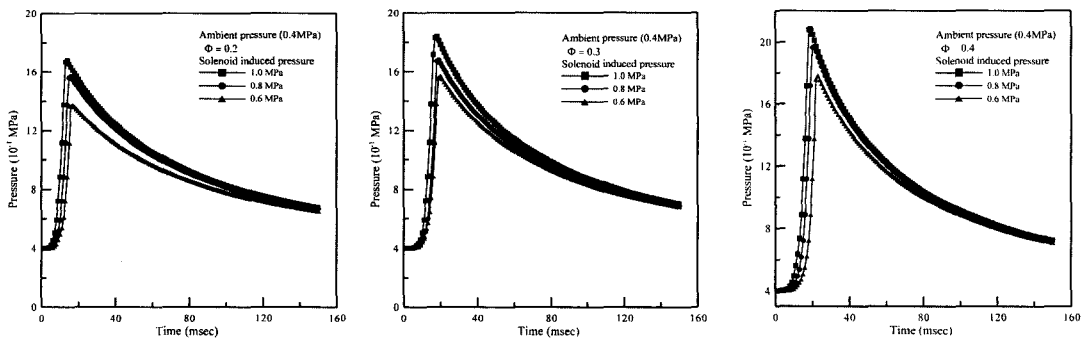
3.2.2 스월에 따른 연소 전파 속도[4]

연소시에 발생하는 화염의 연소 속도 S(t)를 측정하기 위해 미연혼합기의 질량 보존식[5,6]을 사용하였다.

$$S(t)=\frac{dM/dt(t)}{A(t)\cdot\rho(t)} \tag{2}$$

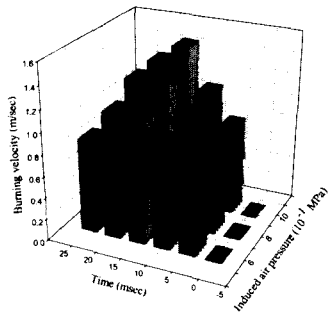
이와 같은 방법으로 연소 시간의 경과에 따른 화염의 연소 속도를 구하기 위해서는 연소 기간중 임의의 시각에 있어서의 질량 연소율(rate of mass combustion rate, dM/dt), 화염 면적(Flame area, A) 및 미연 혼합기의 밀도(Density of unburned mixture, ρ)가 구해져야 한다. 따라서 본 연구에서는 각각의 항목들을 구하기 위해 연소실내의 압력을 측정하고, 화염이 전파되는 과정을 가시화 하여 화염속도를 계측하였다.

Fig. 8은 일정한 당량비(Φ=0.2, 0.4)인 경우 연소실내 스월 강도에 따른 화염 전파중의 연소속도를 나타낸 것이다. 스월이 발생하는 경우 예혼합 화염과는 다르다. 즉 화염면의 굴곡이 심하며 점화 플러그 중앙으로부터의 완전한 원형의 화염전파가 일어나지 않으므로 정확한 화염 면적을 구하는 것이 어려웠다. 따라서 본 연구에서는 화염면의 안쪽면을 기준으로 하여, 화염의 명암을 수치화(grey level)하여 명암이 가장 밝은 화염 영역을 grey level=255, 가장 어두운 영역을 grey level=0으로 하였다. 따라서 grey level=255가 끝나는 화염면의 안쪽 경계면은 기준으로 하여 중심으로부터 36개의 지름을 가지는 원을 만들어 지름의 평균치로 화염의 면적을 계산하였다. 연소 속도는 연소가 진행됨에 따라 증가하

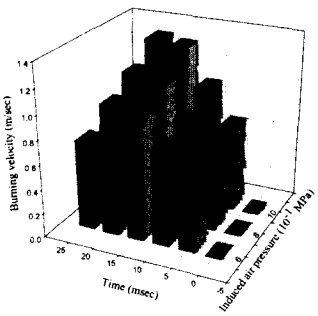


(a) Φ = 0.2 (b) Φ = 0.3 (c) Φ = 0.4

Fig. 7 Effects of the combustion pressure according to equivalence ratio



(a) Φ = 0.2, ambient pressure : 0.3MPa



(b) Φ = 0.4, ambient pressure : 0.3MPa

Fig. 8 Effect of swirl intensity on the burning speed

는 경향을 보이며, 연소가 시작된 후 17msec 전후에서 최고 연소속도를 보이며, 연소 말기 시점인 15~20msec 이후에는 점차 감소하는 경향을 보인다. 또한, 상대적으로 스월 강도가 큰 토출 압력 10bar일 때의 연소속도가 크게 나타났다. 이와 같은 현상은 스월 강도가 증가할수록 스월 유동중에 수반되는 스월 특성의 연소 촉진효과에 기인한 것으로서, 스월 강도가 증가함에 따라 질량 연소율의 증가 영향이 화염 면적 및 미연 혼합기 밀도의 증가 영향보다 큰데 기인하는 것으로 판단된다.

3.3 혼합기 분포에 따른 화염 전파 특성

3.3.1 스월이 없는 경우의 화염 전파 특성

Fig. 9는 초 희박한 당량비 0.2인 경우 분위기 압력이 0.3MPa인 경우의 화염 전파 특성을 가시화 한 그림이다. 사진으로부터 혼합기 분포가 100% 직접분사인 경우의 화염 전파 기간이 가장 짧으며 예혼합기의 양이 증가할수록 기간이 길어짐을 알 수 있다. 연소실내에 예혼합기가 존재할 경우 점화 플러그 주변의 성층화된 혼합기의 밀도가 낮을 뿐 아니라 외곽 부근의 예혼합 연료의 밀도가 낮아 연소가 불안정하게 일어남을 알 수 있다. 따라서 본 연구에 사용된 정적 연소실의 경우 당량비 0.2인 경우 100% 직접 분무인 경우가 연소 효율이 좋으며 가연 한계에 근접함을 알 수 있었다.

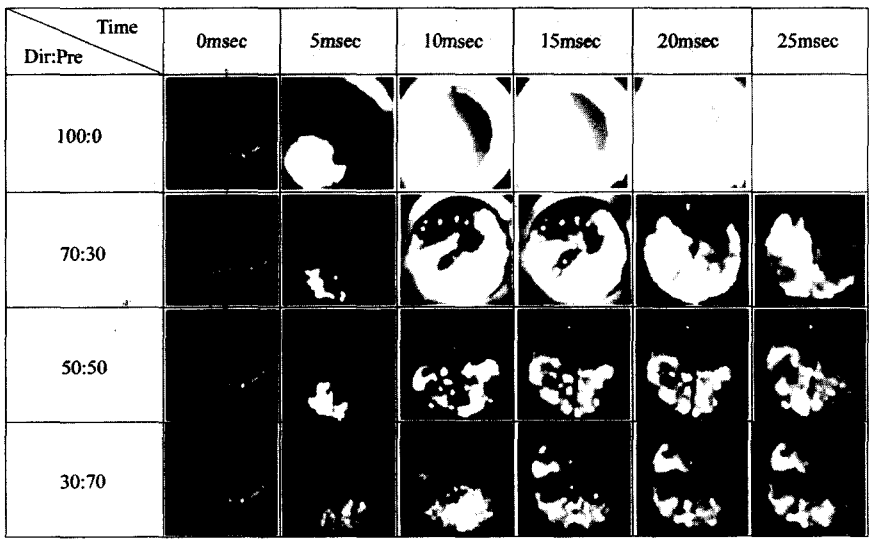


Fig. 9 Flame propagation process with equivalence ratio (Φ = 0.2, ambient pressure = 0.3MPa)

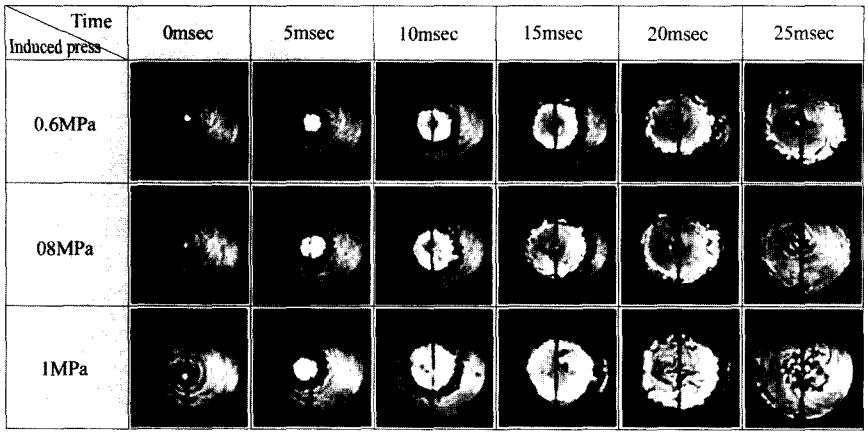


Fig. 10 Fuel stratification and flame propagation process with swirl intensity (Φ = 0.2, ambient pressure = 3bar)

3.3.2 스월이 있는 경우의 화염 전파 특성

Fig. 10은 분위기 압력이 0.3MPa이고 초 희박 당량비 0.2인 경우 연소실내에 분무된 연료가 스월에 의해 성층화 되는 과정과 스월 강도에 따른 화염을 슈리렌 방법에 의해 촬영한 결과이다. 그림에서 가로축의 시간은 점화가 시작되는 시간을 0msec로 하였다. 즉, 분무 가시화 사진의 경우 점화가 시작되기 전 25msec(연료 분사 후 3msec 이후)부터 촬영을 시작하여 점화가 시작되기 직전까지의 성층화 과정을 나타낸 그림이다. 스월의 강도가 강한 경우에 점화 플러그에 연료가 성층화 되는 기간이 짧아지며 연료 액적 주위에 소용돌이가 더 많이 발생하는 것을 알 수 있다. 이 결과에 의해 스월이 강한 경우의 연소시 화염면의 증가에 따른 연소시간의 단축이 가능하다는 것을 예상할 수 있다.

또한, 화염 가시화 사진의 결과를 통해 스월 강도가 강한 경우의 연소 기간이 상대적으로 더 짧음을 알 수 있고, 기존의 예혼합 연소에 비해 화염면에 많은 소용돌이가 발생하며 화염면이 상대적으로 커짐을 알 수 있다. 이러한 결과로 미루어 보아 스월이나 텀블같은 강한 유동장을 이용하여 연료의 성층화를 가능하게 하여 저연비를 가능하게 하며, 연소 기간을 단축시켜 출력을 증대시킬 수 있음을 예상할 수 있다.

4. 결 론

1) 연소실내의 동일한 당량비 하에서 성층 연소를 시킬 경우 예혼합 연소에 비해 높은 연소 압력을 나타내며, 급속 연소를 가능하게 하여 연소 효율을 증대시킬 수 있다.
2) 성층 연소의 경우, 주변 압력의 영향이 적게 나타나지만, 예혼합 연소 비율이 증가할수록 분위기 압력의 영향이 커짐을 알 수 있다.
3) 당량비 0.2와 같은 초희박 한계에서도 압축행정 말기와 같은 6~10bar정도의 높은 분위기 압력과 강한 유동장을 이용한다면 높은 연소효율을 기대할 수 있으며, 이는 성층 연소가 종래의 연소방식에 비해 희박 가연 한계의 확장으로 연비의 절감을 가져오며 동시에 연소기간의 단축을 가져올 수 있다.
4) 난류 강도가 강해짐에 따라 연소압력이 높아지며 최고 연소 압력 도달 기간이 단축됨을 알 수 있다. 이는 난류에 의해 연소가 촉진되기 때문이다.
5) 연소실내의 스월의 강도가 커짐에 따라 연소압력이 높아지며 급속 연소가 가능하였다. 연소실내 유동장이 증가하면 반응대에 있어서의 활성화 물질의 이동과 열전달 면적이 증가되어 연소를 촉진시키는 역할을 하는데 기인하는 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 연소기술센터(CERC)의 후원을 받아 수행되었으며, 관계기관에 깊은 감사를 드립니다.

References

1) Y. Moriyoshi, E. Komatsu, H. Morikawa, "Analysis of Turbulent Combustion in Idealized Stratified Charge Conditions," COMODIA 2001, No.2-09, pp.226-231, 2001.
2) D. S. Jeong, S. W. Suh, S. M. Oh, Y. J. Chang, "An Experimental Study of the Effect of Flow on Flame Propagation in a Constant-Volume Combustion Chamber," Transactions of KSAE, Vol.3, No.2, pp.136-145, 1995.
3) N. Kawahara, E. Tomita, S. Yoshiyama, A. Nishiyama, Y. Hamamoto, "Effect of Swirl Turbulent Flow Field and Inhomogeneous Concentration Field on Combustion of Fuel-Air Mixture in a Constant Volume Vessel," COMODIA 2001, No.2-08, pp.219-225, 2001.
4) S. J. Lee, J. T. Lee, S. Y. Lee, "A Study on the Influence of Turbulence Characteristics on Burning Speed in Swirl Flow Field," KSME (B), Vol.20, No.1, pp.244-254, 1996.
5) C. Arcoumais, C. S. Bae, "Visualization of Flow/Flame Interaction in a Constant-Volume Combustion Chamber," SAE 930868, 1993.
6) M. David Checkel, D. S. Khing Ting, "Turbulence Effects on Developing Turbulent Flame in a Constant Volume Combustion Chamber," SAE 930867, pp.301-305, 1993.