

정적연소기에서의 메탄-공기 혼합기의 연소특성(1) : 균질급기

최 승 환¹⁾ · 전 충 환²⁾ · 장 영 준²⁾

부산대학교 기계공학과¹⁾ · 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소²⁾

Combustion Characteristics of Methane-Air Mixture in a Constant Volume Combustion Chamber(1) : Homogeneous Charge

Seunghwan Choi¹⁾ · Chunghwan Jeon²⁾ · Youngjune Chang²⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, RI-MT, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

(Received 9 January 2003/ Accepted 5 March 2003)

Abstract : A cylindrical constant volume combustion chamber was used to investigate the flow characteristics at spark plug and the combustion characteristics of homogeneous charge methane-air mixture under various initial pressure, excess air ratio and ignition times in quiescent mixture. The flow characteristics such as mean velocity and turbulence intensity was analyzed by hot wire anemometer. Combustion pressure development measured by piezoelectric pressure transducer and flame propagation acquired by ICCD camera were used to investigate the effect of initial pressure, excess air ratio and ignition times on pressure, combustion duration, flame speed and burning velocity. Mean velocity and turbulence intensity had the maximum value at 200 or 300ms and then decreased to near 0 value gradually after 3 seconds. Combustion duration, flame speed and burning velocity were observed to be promoted with excess air ratio of 1.1, lower initial pressure and ignition time of 300ms.

Key words : Constant volume combustion chamber(정적연소기), Methane-air mixture(메탄-공기 예혼합기), Mass fraction burned(질량연소분율), Burning velocity(연소속도), Flame propagation speed(화염전파속도)

1. 서론

최근 연료 경제성과 대기 환경오염문제가 전세계적인 화두로 대두됨에 따라 희박 연소 및 저공해 대체연료의 개발에 관한 연구가 진행되고 있다. 특히 가솔린 연료보다 공해배출물이 적은 액화석유가스(liquefied petroleum gas), 압축천연가스(compressed natural gas), 수소 등의 가스연료를 사용한 엔진에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이러한 연구들은 지구환경보존 및 에너지 절약문제를 만족시키

기 위해 희박연소에 초점을 맞추고 있다. 하지만 희박연소시 착화성의 악화, 열효율 및 연소속도의 저하, 연소상태의 불안정 등과 같은 문제점이 발생되기 때문에 이를 개선할 연구활동이 절실히 요구되고 있다.

가솔린 기관에 있어서 예혼합된 연료와 공기가 점화되어 연소가 완료되는 과정은 물리적, 화학적으로 복잡하지만 기관 성능 개선과 향상을 위해서는 실린더내의 각종 정보를 명확히 이해해 둘 필요가 있다. 가솔린 기관의 연소과정은 공기과잉율, 공기유동, 연소실 형상 등과 같은 여러 가지 요인에 강하게 지배받고 있다. 실제 엔진을 이용한 연구에서

*To whom correspondence should be addressed.
chjeon@pusan.ac.kr

는 각종 계측의 난해함뿐만 아니라 이들 요인들이 복잡하게 상호 간섭하고 있으므로 각각의 요인이 연소과정에 어떻게 관여하는지를 파악하기는 쉽지 않다. 따라서 기관의 연소현상을 기본적으로 조사하기 위해서는 먼저 공기 유동이 없고 연소실 형상이 단순화된 정적연소실에서 점화된 예혼합 화염의 연소특성을 상세히 조사할 필요가 있으며, 이에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.

Hjima와 Takeno¹⁾는 정적연소기에서 메탄 혼합기의 분위기 온도 및 압력변화에 따른 화염전파속도에 관한 연구를 수행하였다. Kim과 Kwon^{2,3)}은 정적연소기를 이용하여 유동이 정지된 상태에서 당량비, 수소 첨가율 및 초기압력의 변화에 따른 메탄-수소-공기 예혼합기의 연소특성을 조사하였다. Lee 등⁴⁾은 메탄-공기 혼합기의 연소과정을 연소실 내의 분위기, 혼합기의 온도와 압력, 점화에너지 등의 연소조건이 변할 경우에 대해 비교하였으며, 솔리덴 기법을 이용하여 화염가시화를 실시하였다.

Arcoumanis와 Bae⁵⁾는 정적연소기 내의 유동속도를 측정하고 이를 바탕으로 유동에 의한 초기화염성장을 관찰하였으며, 초기압력, 온도, 공연비 등을 변화시키며 이에 따른 연소특성을 관찰하였다. Strauss와 Edse⁶⁾는 대기압에서 10MPa까지의 다양한 분위기 압력조건에 대해 연소속도를 취득하였으며, 대기압 조건에서 연소속도가 50cm/s 이하인 경우 혼합기 압력이 증가함에 따라 연소속도가 감소하였으며, 연소속도가 50cm/s 이상인 경우에는 혼합기의 압력과 연소속도가 비례함을 보였다. 또한 Lefebvre⁷⁾는 층류연소속도와 화염전파속도에 관한 정의와 함께, 혼합기의 초기온도, 압력 및 농도가 연소속도에 미치는 영향에 대해 조사하였다.

정적연소기를 이용한 다양한 실험에 대해서 조사한 결과 성층연소에 관한 광범위한 연구는 진행이 되고 있지 않음을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 희박연소특성의 관찰이 가능한 성층급기 공급시스템을 갖춘 정적연소기를 제작하고, 그 첫 번째 단계로써 균질혼합기에 대한 실험을 수행하였다. 먼저 열선유속계를 이용하여 스파크 플러그 주변에서의 평균속도와 난류강도를 취득하여, 점화가 발생하는 영역에서의 유동특성을 파악하고, 점화시기의

변화에 따른 영향을 고찰하였으며, 또한 연료의 농도와 연소기의 초기압력의 변화가 균질 메탄-공기 예혼합기의 연소특성에 미치는 영향을 압력해석과 화염가시화를 통해 화염전파속도와 연소속도를 취득하여, 균질 메탄-공기 예혼합기 연소특성에 대해 조사하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 정적연소기 및 주변장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 정적연소기의 개략도이다. 연소실 형상은 배기량 2.4L의 승용차용 가솔린 기관의 압축상사점 부근을 모사하여 직경 86mm, 폭 25mm(체적 145cc)로 하였다. 이는 대상 엔진에서의 BTDC 38° 부근의 체적에 해당한다.

가시화를 위해 연소실 양쪽에 두께 20mm의 FS창(fused silica windows)을 각각 설치하였다. 연소기의 측면에는 레이저 시트용 석영창을 설치할 수 있도록 폭 6mm, 두께 4mm, 길이 100mm의 막대형 석영창을 설치하였다. 혼합기의 흡입포트는 연소실 벽면에 접선방향으로 설치하여 스월이 형성될 수 있도록 하였다. 반대편 벽면에 소기용 흡입포트를 설치하여, 한번의 연소 이벤트가 종료된 후 동일한 공연비의 혼합기로 연소실 내를 소기 함으로써 실험의 신뢰성을 높이고자 하였다. 또한 자동차용 점화플러그를 개선한 직경 1mm의 피아노 선을 개조한 전극을 연소실 상하 벽면에서부터 대향형으로 설치하여 연소실의 중심에서 점화하였으며, 이때 두 전극의 간극은 2mm로 고정하였다. 이 경우 2mm의 간극과 10m/s 이내의 평균유속에서의 점화에너지는 수 mJ에

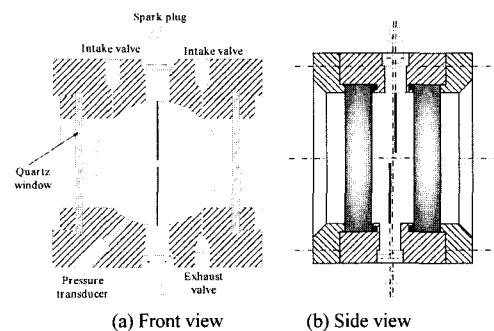


Fig. 1 Schematic diagram of CVCC

불과하므로^{8,9)} 본 연구에서는 점화에너지에 대한 영향은 고려하지 않았다. 연소실의 압력측정을 위해 압전형 압력변환기(Kistler 6160B)를 이용하였다.

Fig. 2는 실험장치의 구성도이다. 연료와 공기를 분사용 혼합탱크(A) 및 연소기 소기용 혼합탱크(B) 내에 충전하여 공기과잉율이 일정한 균질혼합기를 만들었다. 이때 공기과잉율은 충전되는 연료와 공기의 분압비에 의해 결정되며, 메탄과 공기의 분압은 1kPa 해상도의 다이어프램식 압력계이저를 사용하여 계측하였다.

스파크 플러그 간극에서의 유동특성을 조사하기 위해 정온도형 열선유속계(CCA : constant temperature hot wire anemometer, IFA-300)를 이용하였으며, 마이크로 마노미터와 TSI model 1125 교정기를 이용하여 3차의 다항식으로 근사하였으며, 이때의 표준편차는 0.45이다. 속도 데이터는 각 조건에 대해 100회씩 앙상블 평균을 취하여 구하였다.

화상취득을 위해 512×512, 16 bit의 ICCD 카메라(PI Max 512)를 이용하였으며, 화상 취득시의 노출 시간은 1μs로 고정하였으며, 각 신호의 동기를 위해 2대의 시간 지연 및 펄스 발생기(DG-535)를 사용하였다. Fig. 3은 각 구성요소에 대한 동기신호의 흐름도를 나타낸다.

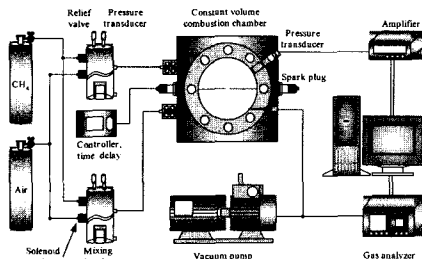


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

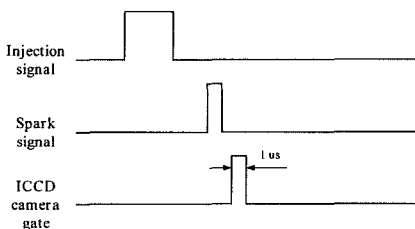


Fig. 3 Timing diagram for synchronization of each component

2.2 실험방법

한번의 연소 이벤트가 종료된 후 진공펌프와 소기용 혼합탱크의 혼합기를 이용하여 연소실내의 잔류 배기가스를 배출한다. 실험을 재개할 온도가 되면, 진공펌프를 이용하여 연소실을 진공 상태로 한 후 분사용 혼합탱크와 연결되어 있는 솔레노이드 밸브에 전압을 인가하여 원하는 연소실내의 초기압력으로 충전한다. 흡기포트는 분사용과 소기용이 있으며, 직경은 1mm이다. 점화시기를 조정하여 연소가 진행되고, 연소가 종료되면 직경 2mm의 배기포트를 통해 배기가스가 배출되게 된다.

연소실 내의 초기압력은 0.15, 0.30, 0.60MPa이며, 공기과잉율은 희박 조건인 1.1, 1.2, 1.3, 1.4이며, 균질 혼합기에 대한 점화시기는 혼합기의 유동이 준정적상태로 되는 분사 개시 후 10000ms와 유동이 존재하는 300ms로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 유동특성해석

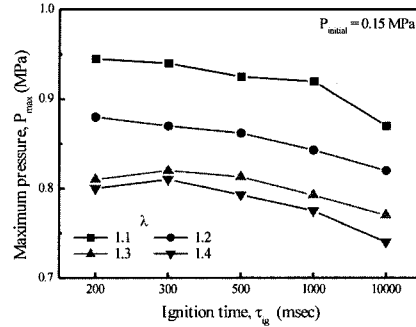
유동실험은 혼합기 초기 압력이 각각 0.15와 0.30 MPa인 경우에 대해 실험을 수행하였다. Fig. 4는 스파크 플러그 간극에서의 평균속도와 난류강도의 결과이다. 두 경우 모두 속도가 일정한 값까지 증가한 후 점점 감소하여 3초 이후부터는 평균속도와 난류강도가 거의 존재하지 않음을 알 수 있다. 혼합기를 0.15MPa로 공급한 경우, 평균속도와 난류강도의 최대값이 나타나는 시점은 분사 종료 후 200ms 근방이며, 3000ms에는 평균속도와 난류강도가 모두 0.2m/s 이하로 됨을 알 수 있다. 이에 비해 0.30MPa로 공급한 경우는 약 300ms 근방에서 최대값을 보이며, 3000ms에서 0.3m/s 이하로 됨을 알 수 있다. 이는 0.15MPa로 분사되는 경우 상대적으로 유동의 모멘트가 작기 때문에 나타나는 결과이다.

3.2 점화시기에 따른 연소특성

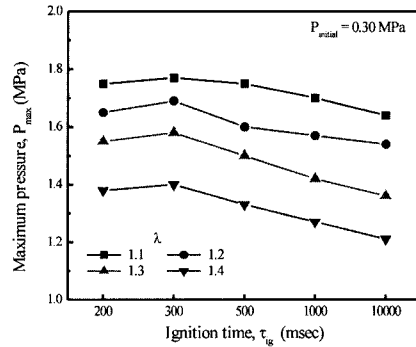
스파크 플러그 주변에서의 유동 특성과 점화시기와의 관계를 알아보기 위해 점화시기의 변경에 따른 연소특성을 살펴보았다. 공기과잉율 1.1, 1.2, 1.3, 1.4와 점화시기 200, 300, 500, 1000, 10000ms, 연소

실 초기압력 0.15, 0.30MPa에 대해 연소 압력을 취득하였다.

Fig. 5(a)와 (b)는 각각 연소기 초기압력이 0.15, 0.30인 경우, 점화시기와 공기과잉율에 따른 연소최고압력의 결과이다. 두 경우 모두 점화시기에 관계없이 공기과잉율 1.1의 경우가 가장 높은 연소최고압력을 보이며, 희박할수록 최고 연소압력은 감소함을 알 수 있다. 전반적으로 평균속도와 난류강도가 존재하는 1000ms 이전의 점화시기 조건에서는 연소압력이 유사하게 나타나지만, 유동이 거의 정지한 상태인 점화시기 10000ms의 조건에서는 연소최고압력이 감소됨을 알 수 있다. 이는 점화시기가 빠를수록 초기의 높은 평균속도로 인해 초기 화염이 스파크 전극으로부터 이동함으로써 전극으로의 열손실이 저감되며, 또한 높은 난류강도로 인해 열 및 물질 전달의 효과가 크게 되기 때문으로 생각되며, 이로 인해 유동특성이 존재하는 점화시기의 경우 연소기간이 단축된다. 전반적으로 점화시기 200ms와 300ms에서 최고압력을 보이고 있으며, 이상의 결과로부터 유동특성과 연소특성에는 밀접한



(a) 0.15 MPa



(b) 0.30 MPa

Fig. 5 Effects of ignition time and excess air ratio on maximum pressure

관계가 있음을 알 수 있으며, 본 연소기에서 최고연소압력의 상승을 위해서는 점화시기 300ms의 경우가 더 적절한 것으로 나타났다.

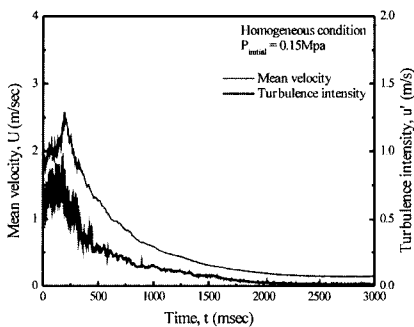
3.3 균질혼합기의 연소특성

성층연소 특성을 파악하기 위한 이전 작업으로 본 연구에서는 균질급기에 대한 실험을 수행하였다. 이때 점화시기는 연소기내의 유동이 준정적상태인 솔레노이드 밸브가 닫히고 난 후 10000ms와 유동이 존재하는 300ms이다.

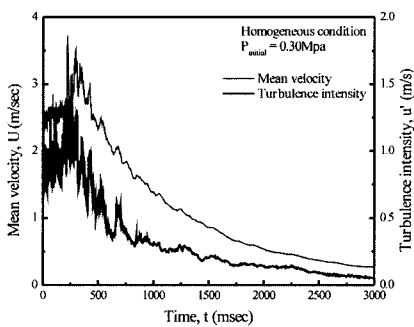
일반적으로 연소속도에 영향을 미치는 인자로는 혼합기의 초기온도와 압력, 농도 등을 들 수 있다.⁷⁾

혼합기의 초기온도는 최대연소속도에 영향을 미치는데 메탄 혼합기의 경우 초기 온도의 2.11 승에 비례하며,⁷⁾ 300K의 경우 식 (1)에 의해 최대연소속도는 35cm/s로 계산된다.

$$S_b = 0.08 + 1.6 \times 10^{-6} T_0^{2.11} \text{ [m/sec]} \quad (1)$$



(a) 0.15 MPa



(b) 0.30 MPa

Fig. 4 Flow characteristics at spark plug

또한 혼합기 초기압력의 영향은 혼합기에 따라 다른 양상을 보이며 연소속도가 빠르지 않는 천연가스와 같은 경우 압력의 증가에 따라 다음 식과 같이 연소속도가 감소한다.⁷⁾

$$S_b \propto P^x \quad (2)$$

여기서 x 는 $-0.5 \sim -0.1$ 의 값이다.

혼합기 농도의 영향은 공기과잉율 0.91~0.95의 약간 과농한 조건에서 최대 연소속도를 갖는다고 보고되고 있다. 본 연구에서는 압력의 영향을 알아보기 위해 연소실 초기압력을 0.15, 0.30, 0.60 MPa로 변화시켰으며, 농도의 영향을 알아보기 위해 희박조건인 공기과잉율 1.1, 1.2, 1.3, 1.4에 대해 알아보았으며, 유동의 영향을 관찰하기 위해 점화시기를 유동이 거의 존재하지 않는 분사종료 후 10000ms와 유동이 존재하는 300ms로 하여 실험을 수행하였다.

3.3.1 압력해석

Fig. 6은 취득된 압력데이터를 이용하여 계산한 질량연소분율과 압력상승율에 대한 결과를 점화시기 10000ms와 300ms의 경우에 대해 나타낸 대표 결과로 연소실 초기압력 0.15MPa에 대해 제시하였다. 질량연소분율의 계산은 다음과 같은 Lewis와 von Elbe⁸⁾의 식을 이용하였다.

$$M_b(t) = \frac{P(t) - P_i}{P_{max} - P_i} \quad (3)$$

여기서 $P(t)$ 는 연소압력, P_i 는 연소실 초기압력, P_{max} 는 최고연소압력을 나타낸다. 즉, 최고연소압력에 도달할 때를 혼합기가 100% 연소한 것으로 보고 이에 대한 상대값을 계산한 것이다. 또한 압력상승율은 급속연소에 대한 상대적인 척도로 이용되는 파라미터이다.

Fig. 7은 최고연소압력을 공기과잉율과 연소실 초기압력에 대해 나타낸 결과이다. 전반적으로 준정적상태인 점화시기 10000ms의 경우에 비해 유동이 존재하는 300ms의 경우가 최고연소압력이 높게 나타남을 알 수 있으며, 그 차이는 연소실의 초기압력이 높을수록 더 크게 나타난다. 연소실 초기압력이 0.15MPa인 경우 점화시기의 변경에 따른 최고연소압력의 증가율은 5.7~8.8%, 0.30MPa의 경우는 8.3~16.0%, 0.60MPa의 경우는 14.4~32.2%이며, 희박영역으로 접근할수록 그 차이는 증가하는 경향을 보이며, 이상으로부터 적절한 유동은 연소압력 향상에 좋은 요소임을 다시 한번 확인할 수 있다.

Fig. 8은 질량연소분율의 결과로부터 취득한 결과로 연소기간에 관한 내용을 공기과잉율과 연소실 초기압력에 대해 나타내고 있다. t_{10} 은 질량연소분율의 10%에 도달하는데 소요되는 시간으로 스파크

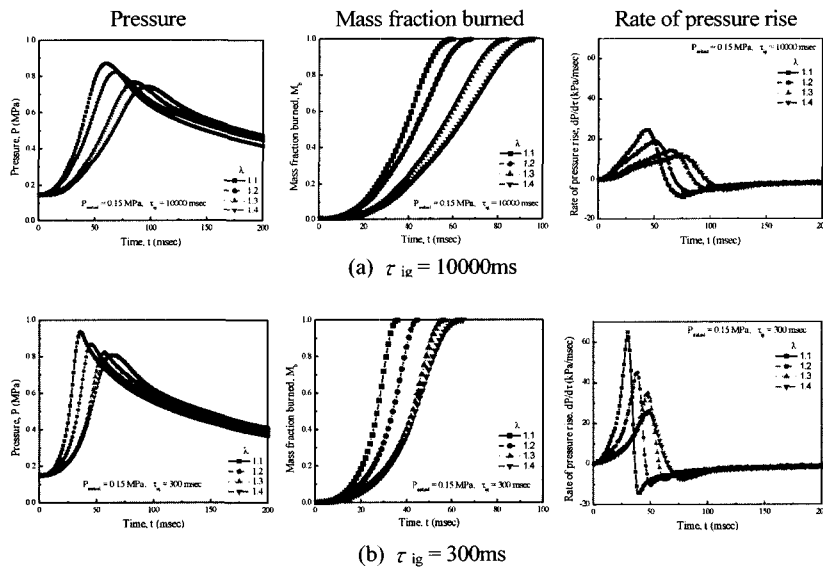


Fig. 6 Result of pressure analysis at $P_{initial} = 0.15$ MPa

정적연소기에서의 메탄-공기 혼합기의 연소특성(1) : 균질급기

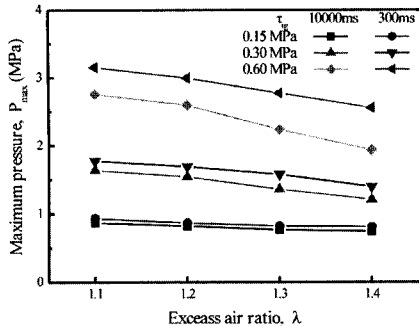
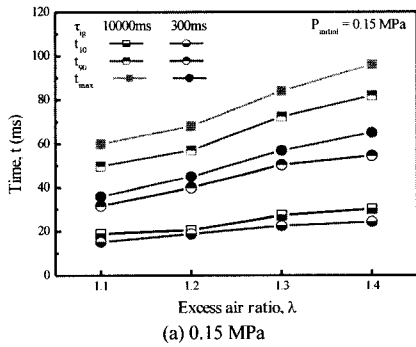
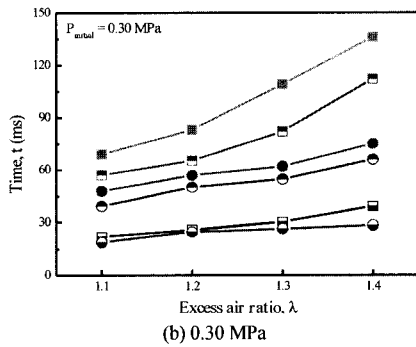


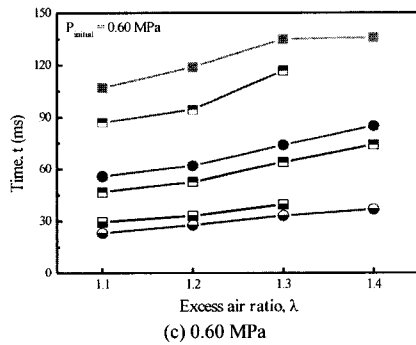
Fig. 7 Effects of excess air ratio and initial pressure on maximum combustion pressure



(a) 0.15 MPa



(b) 0.30 MPa



(c) 0.60 MPa

Fig. 8 Effects of excess air ratio and initial pressure on combustion duration

에너지 방출로부터의 시간을 의미하는 점화지연기간이며, t_{90} 은 혼합기의 대부분을 연소시키는데 요구되는 시간으로 일반적으로 질량연소분을 90%에 도달하는데 소요되는 시간으로, 화염발달기간이다. t_{max} 는 최고연소압력에 도달하는 시간으로 정적연소기에서 총연소기간으로, 또한 t_{10} 에서 t_{90} 까지의 시간인 t_{10-90} 은 급속연소기간이다.

유동이 존재하는 경우가 유동이 존재하지 않는 경우에 비해 점화지연 기간은 연소실초기압력에 대해 평균적으로 각각 4(0.15MPa), 4.8(0.3MPa), 6(0.6 MPa)ms가 감소하였으며, 화염발달기간은 각각 21.2, 26.6, 45ms가, 총 연소기간은 26.3, 38.8, 56.3ms가 감소되는 결과를 보였으며, 전체 평균으로도 점화지연기간은 16.3%, 화염발달기간은 36.7%가, 총 연소기간은 39.6%가 감소되는 효과를 볼 수 있으며, 특히 희박영역으로 접근할수록 감소효과는 더 증가됨을 알 수 있다.

Fig. 9는 급속연소기간에 대한 결과로 아래 부분에 나타내어진 그래프는 300ms의 결과로 윗 부분에 도시된 10000ms의 결과보다 훨씬 연소기간이 단축됨을 확인할 수 있으며, 이상의 결과로부터 유동은 연소기간의 단축에도 큰 영향을 미치는 인자임을 다시 한번 확인할 수 있다.

Fig. 10과 11은 공기과잉율에 따라 취득된 화염의 이미지를 연소실 초기압력 0.60 MPa의 경우에 대해 나타낸 결과를 도시한 것으로 가로축은 시간을 세로축은 공기과잉율을 표시한다.

먼저 Fig. 10은 점화시기 10000ms의 준정적상태에서 연소시킨 결과로 시간이 경과함에 따라 구형

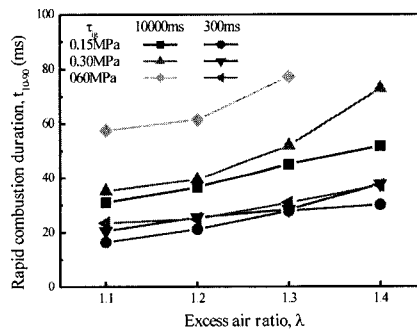


Fig. 9 Effects of excess air ratio and initial pressure on rapid combustion duration

의 화염성장 과정이 잘 관찰된다. 공기과잉율이 증가함에 따라 화염의 크기는 작아짐을 관찰할 수 있으며, 화염중심의 검은 세로 선은 본 연구에 사용된 점화플러그의 진극이다. Fig. 11은 점화시기 300ms의 경우로, 10000ms의 경우에 비해 화염의 성장이 빨라짐을 볼 수 있다. 300ms의 경우는 스파크 플러그 주변에서 평균속도 및 난류강도가 높은 경우로 연소기 내부에는 강한 스웰이 형성된다. Fig. 11의 공기과잉율 1.4의 경우 먼저 화염핵이 형성된 후 시계방향으로 회전하면서 화염이 성장하는 것을 관찰할 수 있으며, 화염 영역은 준정상상태에 비해 빨리 증가하는 경향을 나타내고 있다.

Fig. 12는 ICCD 카메라를 이용하여 취득한 화상 이미지로부터 구해진 화염의 직경을 나타낸다. 화염의 직경은 동일한 시간에 대해 초기압력과 공기과잉율에 반비례함을 알 수 있다. 이는 초기압력이 증가할수록 연소실내의 높은 밀도에 의해 화염전파속도가 저감되기 때문이다. 화염의 직경은 1차원 피

팅으로 나타내었는데 이에 대한 표준편차는 Table 1에 표현한 바와 같이 모두 3.1% 이내에 존재한다. 피팅의 기울기는 평균화염속도를 나타내는 것으로 Fig. 13에 결과를 표시하였다. 연소실 내의 평균화염속도는 연소실의 초기압력과 공기과잉율에 따라 약 80~235 cm/s의 범위이며, 본 연구 조건에서의 평균화염속도의 최대값은 공기과잉율 1.1, 연소실 초기압력 0.15MPa의 경우에서 나타났고, 그 값은 235.7 cm/s였다.

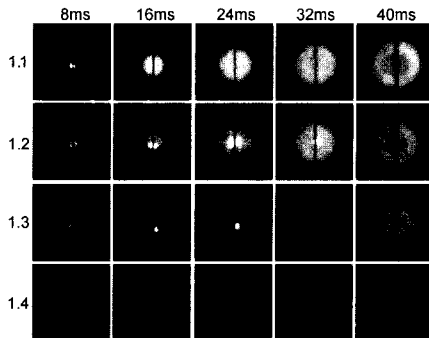


Fig. 10 Effect of excess air ratio on the flame propagation by ICCD camera ($P_{initial} = 0.60\text{MPa}$, $\tau_{ig} = 10000\text{ms}$)

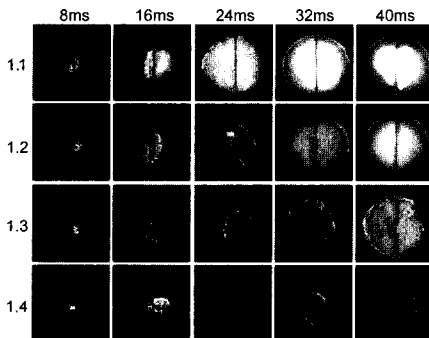
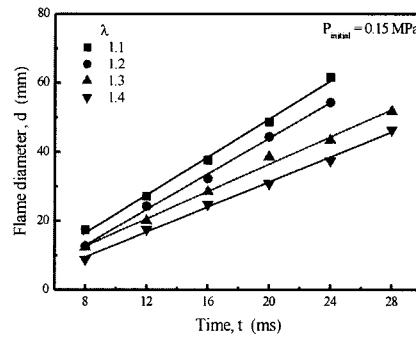
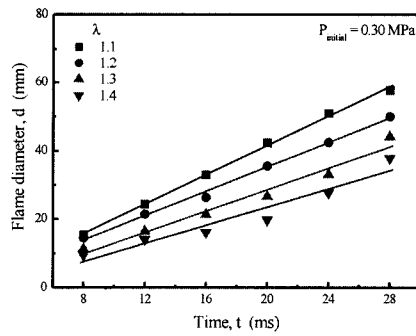


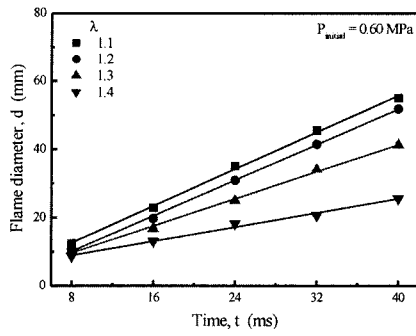
Fig. 11 Effect of excess air ratio on the flame propagation by ICCD camera ($P_{initial} = 0.60\text{MPa}$, $\tau_{ig} = 300\text{ms}$)



(a) 0.15 MPa



(b) 0.30 MPa



(c) 0.60 MPa

Fig. 12 Effect of excess air ratio and initial pressure on flame propagation diameter

Fig. 6의 압력선도와 같이 압력은 조건에 따라 점화 후 약 10~20ms 동안은 거의 초기압력과 동일하다. 따라서 연소실 내의 압력이 상승되어 연소실 압력이 화염전파속도와 연소속도에 영향을 미치는 것을 배제하기 위해 점화 후 최대 20ms까지 전파된 화염면 반경을 이용하여 화염전파속도와 연소속도를 결정하고자 한다.

Fig. 14는 연소속도를 나타내는 것으로 측정된 화상에 의해 계측된 화염전파속도로부터 다음과 같이 계산하였다. 먼저 화염면 전후의 압력차는 무시할 수 있으며, 화염전파과정이 정상상태(steady state)이다. 연소실과 주위의 분위기는 단열적이며, 화염온도는 단열화염온도이며, 상태변화는 정압변화라고 가정하였다.¹⁰⁾ 그리고 미연가스층의 압력, 체적, 밀도, 연소속도를 각각 $P_0, V_0, T_0, \rho_0, S_b$ 로 하고, 기연가스층의 경우를 각각 $P_f, V_f, T_f, \rho_f, S_f$ 로 두고 정상상태의 연속방정식을 도입하면

$$\rho_0 S_b = \rho_f S_f \quad (4)$$

그리고 정압변화라고 가정하였으므로

$$\frac{V_f}{V_0} = \frac{T_f}{T_0} \quad (5)$$

$$\rho_0 V_0 = M_0, \rho_f V_f = M_f \quad (6)$$

단, M_0 는 반응물질의 분자량, M_f 는 생성물질의 분자량이다. 식 (4)~(6)으로부터 연소속도 S_b 는

$$S_b = S_f \frac{T_0 M_f}{T_f M_0} \quad (7)$$

로 주어진다. 여기서 초기온도, 반응물질과 생성물질의 분자량, 단열화염온도의 계산결과는 Table 2에 표시하였다. 이와 같은 연소속도의 계산에 있어서 단열조건과 화염온도 및 화염면 두께에 대한 영향은 있으나 대략 9% 정도임이 밝혀져 있으므로,¹⁰⁾ 전체적으로는 10%의 오차를 발생하게 된다.

Table 1 Standard deviation of flame diameter

	1.1	1.2	1.3	1.4
0.15 MPa	1.14	0.99	1.22	0.90
0.30 MPa	0.80	1.02	2.19	3.08
0.60 MPa	0.80	0.58	0.78	0.77

연소속도의 최대값도 화염전파속도의 경우와 동일한 조건인 공기과잉율 1.1, 분위기 압력이 0.15 MPa에서 32.8cm/s를 나타내었으며, 본 연구에서 사용된 메탄은 연소속도가 50cm/s보다 낮은 경우로

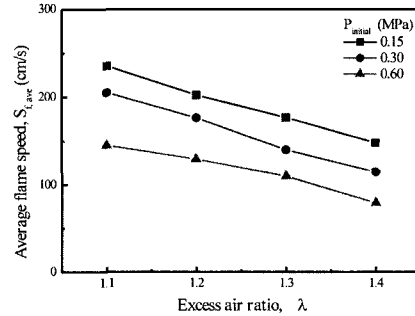


Fig. 13 Effect of excess air ratio and initial pressure on average flame speed

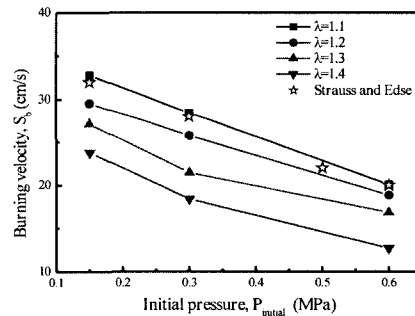


Fig. 14 Effect of excess air ratio and initial pressure on burning velocity

Table 2 Thermodynamic properties and adiabatic flame temperature of methane-air premixture gas

$P_{initial}$	λ	MW_R	MW_P	T_{aia}
0.15 MPa	1.1	27.74	27.67	2150.6
	1.2	27.82	27.79	2048.2
	1.3	27.89	27.88	1951.2
	1.4	27.96	27.95	1862.8
0.30 MPa	1.1	27.74	27.68	2157.8
	1.2	27.82	27.8	2051.5
	1.3	27.89	27.88	1952.8
	1.4	27.96	27.95	1863.6
0.60 MPa	1.1	27.74	27.70	2163.4
	1.2	27.82	27.80	2054.0
	1.3	27.89	27.89	1954.0
	1.4	27.96	27.95	1864.3

λ : Excess air ratio,
 MW_R : Molecular weight of reactants
 MW_P : Molecular weight of products
 T_{aia} : Adiabatic flame temperature (K)

혼합기 분위기 압력이 증가함에 따라 연소속도가 저감되고 있으며, 이는 Strauss와 Edse⁶⁾의 연구결과와 잘 일치하고 있다. 여기서 비교 데이터로 제시한 Strauss와 Edse의 결과는 공기과잉율 1.0에 대한 결과이다. 본 연구 결과의 공기과잉율 1.1보다 다소 낮은 연소속도 결과를 나타내는데 이는 연소속도 계산에 포함된 단열온도나 정압변화 등의 가정에 의한 오차로 사료된다.

연소속도에 미치는 압력의 영향은 Strehlow¹¹⁾에 의해 다음과 같이 해석되었다. 압력의 변화는 기연가스에서 해리와 3체 충돌에 의한 자유 라디칼에 영향을 미친다. 50cm/s 이상의 연소속도를 갖는 혼합기는 압력의 증가에 따라 높은 화염온도를 갖는다. 따라서 압력이 증가함에 따라 기연가스의 온도는 상승하며, 반응율도 증가하며, 결론적으로 연소속도가 증가하게 된다. 이에 비해 50cm/s 이하의 연소속도를 갖는 혼합기는 해리의 영향을 적게 받는 낮은 화염온도를 갖는다. 따라서 압력의 증가는 반응영역에서 자유 라디칼의 농도를 감소시키며, 이는 연소속도를 저감시키게 된다.

4. 결론

본 연구는 가시화창을 장착한 정적연소실에서 유동특성을 파악하기 위해 연소실 중심에 위치한 스파크 플러그에서의 평균속도와 난류강도를 취득하였으며, 유동특성과 점화시기와의 관계를 규명하기 위해 점화시기 변경에 따른 압력해석을 실시하였다. 또한 균질 메탄-공기 예혼합기의 압력 특성과 화염전파과정을 실험적으로 해석한 결과 다음과 같은 결론을 취득하였다.

1) 열선유속계를 이용한 유동특성 해석으로부터 평균속도와 난류강도는 0.15MPa의 경우는 약 200ms 근방에서, 0.30MPa의 경우는 약 300ms 근방에서 최대값을 형성한 후 점점 소멸되어 2~3초 이후에는 유동이 거의 소멸되었다.

2) 1.1~1.4의 4가지 조건의 공기과잉율과 200, 300, 500, 1000, 10000ms의 5가지 조건의 점화시기에 대해 압력을 구한 결과 유동특성이 양호한 200ms와 300ms에서 높은 압력을 보였으며, 본 연소기의 경우 전반적인 연소압력의 상승에는 300ms의 경우가 더 적절함을

알 수 있었으며, 준정적상태와 비교하기 위한 점화시기로 선정되었다.

3) 균질혼합기에 대해 점화시기 10000ms와 300ms의 경우와 공기과잉율, 연소실의 초기압력의 변화에 대한 압력해석의 결과 기연급된 바와 같이 유동의 영향을 받는 점화시기 300ms의 경우가 연소압력의 향상과 연소시간의 단축을 가져왔으며, 유동이 연소특성에 미치는 좋은 영향을 확인할 수 있었다.

4) ICCD 카메라를 이용한 화상취득의 결과로부터 화염전파속도와 연소속도를 취득하였다. 화염전파속도는 각 조건에 대해 80~235cm/s의 속도값을 보였으며, 0.15MPa, 공기과잉율 1.1, 점화시기 300ms의 경우 235.7cm/s의 최대 화염전파속도를 나타내었다.

5) 연소속도는 분위기 압력과 공기과잉율이 증가함에 따라 감소되는 경향을 나타내었으며, 최대 연소속도는 화염전파속도와 동일한 조건에서 32.8cm/s를 나타내었으며, 계산 결과(35cm/s)와의 차이는 연소속도 계산과정에 포함된 단열화염온도나 정압변화 등의 가정에 의한 오차로 판단된다.

후 기

본 연구는 청정생산기술사업의 지원에 의해 수행된 연구결과로, 관계 기관에 감사 드립니다.

References

- 1) T. Hjima, T. Takeno, "Effects of Temperature and Pressure on Burning Velocity," Comb. and Flame, Vol.65, pp.35-43, 1986.
- 2) B. S. Kim, C. H. Kwon, "Combustion Characteristics of Methane-Hydrogen-Air Premixture (I)," Transactions of KSAE, Vol.3, No. 3, pp. 129 -139, 1995.
- 3) B. S. Kim, Y. J. Lee, "Combustion Characteristics of Methane-Hydrogen-Air Premixture(II)," Transactions of KSAE, Vol.4, No.3, pp.156-167, 1996.
- 4) C. S. Lee, D. S. Kim, K. S. Oh, "A Study on the Combustion Characteristics of Methane-Air Mixture in Constant Volume Combustion Chamber," Transactions of KSAE, Vol.4, No.4, pp.201-209, 1996.

- 5) C. Arcoumanis, C. S. Bae, "Correlation between Spark Ignition Characteristics and Flame Development in a Constant-Volume Combustion Chamber," SAE 920413, 1992.
- 6) W. A. Strauss, R. Edse, "Burning Velocity Measurements by the Constant-Pressure Bomb Method," 7th Symposium on Combustion, pp. 377-385, 1959.
- 7) A. H. Lefebvre, Gas Turbine Combustion, Taylor and Francis, pp.38-39, 1999.
- 8) B. Lewis, G. von Elbe, Combustion, Flames and Explosions of Gases, pp.333-413, Academic Press, 1987.
- 9) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, pp.427-437, McGraw-Hill, 1988.
- 10) I. S. Jeung, Study on the Transiently Propagating Propane-Air Premixed Flame, Ph.D. Thesis, Seoul University, 1982.
- 11) R. A. Strehlow, Combustion Fundamentals, p. 283, McGraw-Hill, 1984.