

<논 문>

밀폐 연소실내의 메탄-공기 예혼합기의 연소 및 라디칼 특성에 관한 연구 (1)

전충환* · 장영준*

(1995년 6월 5일 접수)

A Study on the Characteristics of Methane-Air Premixture Combustion and Combustion Radicals (I)

C. H. Jeon and Y. J. Chang

Key Words : Combustion Radical(연소라디칼), Radical Intensity(라디칼강도), Equivalence Ratio(당량비), Flame Speed(화염속도)

Abstract

To clarify the effects of equivalence ratio, initial pressure and temperature on the flame propagation and radicals characteristics, a series of the experimental study were conducted in a quiescent methane-air premixture using a constant volume chamber. The development of the flame was visualized following the start of ignition using high speed schlieren photo and radical images by intensified CCD camera. Combustion pressure and ion current were recorded simultaneously according to the experimental conditions which were equivalence ratio with 0.7 to 1.2, initial pressure with 0.08 MPa to 0.40 MPa and initial premixture temperature with 313.2K to 403.2K. The results showed that the flame speed by ion current and mass fraction burned by combustion pressure characterized the effects of flame propagation very well. And increased combustion duration due to lean combustion condition that was below equivalence ratio, 0.8 caused cycle variation and decreasing the power of engine.

1. 서 론

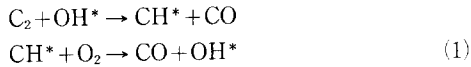
가솔린기관에 있어서 예혼합된 연료와 공기가 점화되어 연소가 완료되는 과정은 물리적, 화학적으로 복잡하나 가솔린기관의 성능 개선과 향상을 위해서는 가솔린기관의 화염 거동을 충분히 이해해 둘 필요가 있다. 가솔린기관의 연소 과정은 당량비, 공기 유동, 연소실 형상의 세 가지 요인에 강하게 지배받고 있다. 실기를 이용한 연구에서는 각

종 계측이 어렵고, 이들 세 요인이 복잡하게 간섭하고 있기 때문에 개개의 요인이 연소 과정에 어떻게 관여하는가를 파악하기가 쉽지 않다. 따라서 가솔린기관의 연소 현상을 기초적으로 조사하기 위해서는 먼저 공기의 유동이 없고 연소실 형상이 단순화된 정적연소실에 점화된 예혼합화염을 상세히 조사할 필요가 있다고 생각된다.

최근에는 연소실내의 연료나 미립자의 농도 분포, 분자의 농도 분포 등을 측정하기 위하여 비접촉 계측인 광학적 측정법이 이용되고 있다. 특히, 화염분광법을 이용하여 예혼합화염의 당량비, 분자나 라디칼의 농도 및 반응을 등을 구하는 측정기술

*회원, 부산대학교 정밀기계공학과 · 기계기술연구소

개발을 위한 연구가 많이 이루어지고 있다.^(1~6) 또한 버너나 내연기관내의 연소 조건에 따른 당량비의 변화를 화염의 발광으로부터 얻고자 하는 시도도 행해지고 있다. 스파크 플러그 중앙에 광섬유를 삽입한 광연소센서(Optical combustion sensor)를 연소실에 부착하여 화염으로부터 점화시기 및 노킹을 검출하거나, 연소광의 스펙트럼, 연소 말기에서의 복사, 점화진각에 따라 복사량이 최대인 크랭크 각도 및 공연비 등을 검출한 예도 있다.^(7~9) Gaydon은 탄화수소화염의 청록색은 C_2^* , CH^* 라디칼에 의한 것임을 밝히고 다음의 식을 제안하였다.^(10,11)



여기서 CH^* 와 OH^* 는 광전자, 즉 화학 발광의 형태로 여기 에너지를 방출할 수 있는 라디칼을 의미한다. 이것에 의해 반응대를 비롯한 연소반응영역에서 라디칼 발광이 일어난다. 탄화수소 예혼합기의 연소 과정을 나타내는 반응기구 중에서 발광 스펙트럼을 분석해 보면 여기상태에서 광전자를 방출하는 라디칼은 수중에 지나지 않는다.

이와 같은 연소 반응시 발생하는 라디칼에 대하여 오래 전부터 많은 연구가 수행되어 왔다. 특히 화염전파와 관련한 반응대 구조 및 농도 연구에 있어서는 그 중요성이 인정되어 왔다.⁽¹²⁾ 1965년 Calcote 등에 의해 탄화수소 화염의 이온(HCO^+ 와 $C_3H_3^+$) 생성기구가 제안⁽¹³⁾된 후, 1973년 Kinbara 등은 광학 튜브를 이용해서 탄화수소의 연소반응 연구에서 이온은 C_2^* , CH^* , OH^* 라디칼이 발생된 후 약 10 μs 이후에 나타난다고 보고하였다.⁽¹⁴⁾ Gaydon 등은 라디칼은 고유의 발광 밴드 스펙트럼을 가지며, 탄화수소 화염은 파장 470, 510, 560 nm 부근에서 밴드 스펙트럼을 내는 C_2^* 라디칼과, 파장 390 nm와 430 nm 부근에 밴드 스펙트럼을 내는 CH^* 라디칼 때문에 화염색이 청색 또는 청록색을 띄고 수소화염은 이와 같은 라디칼을 함유하지 않으므로 무색에 가까움을 밝혔다.⁽¹⁵⁾ 1985년 Itoh 등은 버너화염에서 순간 공기과잉율은 CH^* , C_2^* 라디칼의 발광강도비와 상관관계가 있음을 보이고, 측정 결과를 보고한 바 있다.⁽¹⁶⁾ 즉, 화염의 고유한 색깔은 각 연소 조건에 따라 달라지는데, 이는 화염 색깔을 결정하는 발광 라디칼 속에 당량비, 화염 온도, 연소 형태 등의 다양한 정보가 포

함되어 있음을 밝혔다.

연소실의 연소 조건에 따른 화염전파특성은 기관의 열효율, 출력, 배기가스성분 등에 크게 영향을 미친다. 그러나 이들의 상호 관계를 구명하기 위해서는 유동장을 단순화시킨 정적연소실을 이용한 층류화염전파 및 연소 라디칼의 특성에 관한 연구가 필요하다. 특히 연소 라디칼은 화염전파 특성을 구명하기 위한 중요한 수단임에도 불구하고 측정 및 가시화의 어려움 때문에 충분한 자료가 부족한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 전기 점화기관의 효율 향상 및 유해 배기배출물의 저감을 위한 새로운 기관의 개발과 설계에 필요한 기초 자료를 얻기 위한 목적으로 연소실내에서 유동이 없는 메탄-공기 예혼합기의 화염전파 및 라디칼 특성을 구명한다.

2. 밀폐 연소실내의 화염전파 특성

연소실내의 메탄-공기 예혼합기의 화염전파 특성을 혼합기의 당량비, 초기압력 및 초기온도에 따라서 다음과 같이 고찰하였다.

첫째, 층류화염 전파 과정을 솔리덴 광학계로 가시화하고, 특히 연소 압력의 변화가 거의 없는 초기 연소 기간 동안의 화염성장속도를 구하였다.

둘째, 주로 반응대에서만 발생하는 양이온을 이온 프로브로 계측하여 당량비 및 초기조건에 따른 국소 및 평균 화염전파속도를 구한 후 솔리덴 촬영에 의해 측정된 화염전파속도와 비교 분석하였다.

셋째, 연소실내 화염 전파로 인해 발생하는 연소 압력을 이용하여 당량비 및 초기 조건에 따른 연소 질량분율, 질량연소율을 구함과 동시에 연소 최고 압력 및 최고 압력까지의 도달 시간에 따른 연소 특성을 고찰하였다.

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 실험에 사용한 내경 70 mm, 길이 34 mm, 연소실 체적이 130 cm^3 인 듀랄루민제 원판형 연소기를 나타낸다. 연소실의 전후면에는 솔리덴 사진촬영 및 연소 라디칼의 계측을 위해 두께 20 mm의 광학 코팅된 FS 창(Fused silica windows)을 설치하였고 또한 연소실의 기밀을 유지하기 위하여 FS 창과 연소실 사이에 석면을 삽입하였다.

사용한 점화 플러그는 시판되는 자동차용 점화 플러그의 중심에 직경 2 mm의 구멍을 뚫고 피아노

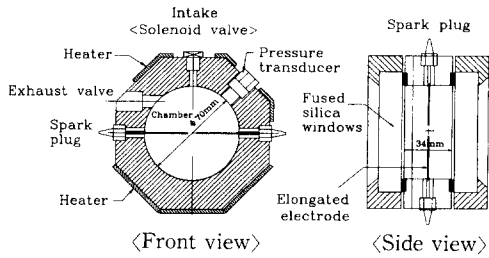


Fig. 1 Schematic of cylindrical constant-volume combustion chamber

선을 끼워 맞춘 후 연소실의 중심까지 향하도록 길게 연장하여 양측에 설치하였다. 점화 전극간의 간격은 1.5 mm로 고정하고, 방전면은 30°의 경사를 가진 원추면으로 만들었다. 연소실내의 외측에는 스파크 플러그, 흡입 밸브, 배기 밸브, 압력변환기 및 팬히터를 설치하였다. 압력변환기의 출력은 충전식 증폭기로 증폭하여 데이터 수집 장치 및 오실로스코프에 기록하였다.

본 실험에서 사용한 메탄은 순도가 99.9% 이상이며 원하는 메탄-공기 혼합기를 충전시키기 위하여 Fig. 2에 표시한 예혼합기 제조 장치를 구성하였다. 메탄과 공기에 연결된 각각의 압력조절기에 나타나는 분압에 의하여 일정 체적의 혼합 탱크를 채우는 혼합기의 혼합비를 계산하였다.

혼합기 온도를 변화시키기 위해 온도 조절기와 결합된 세 개의 팬히터를 연소실 벽의 상하면에 부착하였다. 연소실 벽면의 온도를 일정하게 유지시켜서 연소실 혼합기의 온도를 실온에서 403.2 K까지 변화시킬 수 있도록 하였다.

사용한 점화 코일은 시판의 자동차용 12 V 점화 코일이며, 이 점화장치의 최대 축적 에너지는 약 100 mjoule이다. 메탄-공기 예혼합기의 가연범위는 당량비 0.5~1.7이지만 본 실험에서 사용한 메탄-공기 예혼합기의 당량비 범위는 가장 많이 상용하고 있는 당량비 0.8~1.2이다. 이 범위에서 최소 점화 에너지는 수 mjoule⁽¹⁷⁾에 불과하므로 본 실험에서 사용한 점화 에너지는 충분하다고 생각된다. 따라서 화염전파는 충분한 점화 에너지 하에서 관측하였기 때문에 점화장치의 전기적 특성은 고려의 대상에서 제외하였다.

Fig. 3에는 본 실험에서 사용한 측정 장치의 계통도를 나타내었다. 전체적으로 정적연소실을 중심으로 두 부분으로 구성되어 있다. 즉, 고속 솔리렌

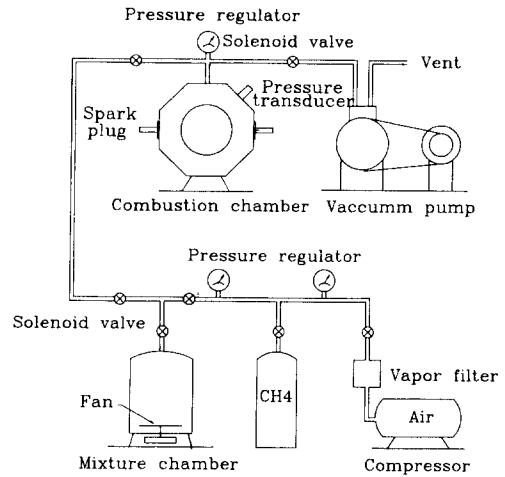


Fig. 2 Apparatus of methane-air premixture mixing process

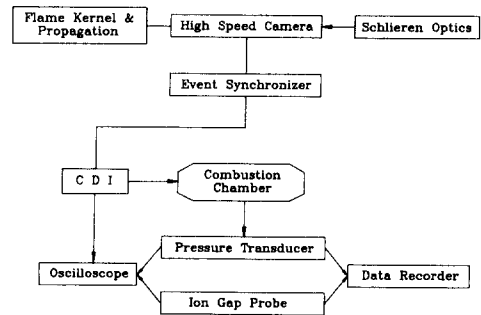


Fig. 3 Block diagram of measuring instruments

Table 1 Experimental conditions

Parameter	Condition
Pressure : P_i (MPa)	0.08, 0.24, 0.40 (gauge)
Equivalence Ratio, ϕ	0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2
Temperature : T (K)	313.2, 353.2, 403.2

사진기에 의한 화염 촬영부와 압력 및 이온 계측부이다. 두 부분이 독립적으로 실험이 수행되나 모두 연소 압력을 동시에 계측함으로써 실험 상호간의 동일성을 확인하였다.

Table 1은 본 실험의 조건을 나타낸다. 혼합기의 당량비, 초기온도 그리고 초기압력 등이 정적연소실과 같은 밀폐된 공간내의 층류 화염전파에 큰 영향을 미치므로, 이들이 화염전파에 미치는 상관관계를 조사하였다.

2.2 실험방법

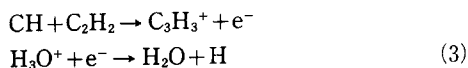
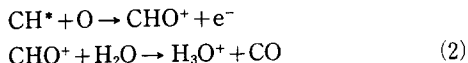
2.2.1 솔리렌 촬영에 의한 화염전파 및 연소속도의 측정

연소실내에 전파되는 화염의 전파형태 및 전파속도를 측정하기 위하여 솔리렌 사진을 고속도 촬영하였다. 이것은 메탄-공기 예혼합기는 화염면의 휘도가 낮아서 직접사진이나 영사진에 의하여는 화염면의 구조와 화염전파형태의 관찰이 거의 불가능하므로 솔리렌 촬영을 이용하였다. 본 실험에 사용한 고속 솔리렌 사진기의 촬영속도는 7,000 frames/sec로 Frame 당 0.14 ms 정도로 10 ms 이내의 초기 연소기간에 화염핵의 성장 과정을 가시화하고, 가시화된 사진을 확대투영기를 이용하여 시간에 따른 화염 반경의 궤적을 계산함으로써 화염 전파속도를 계산하였다.

2.2.2 이온 프로브에 의한 화염전파속도의 측정

예혼합 층류화염에 있어서, 화염면은 크게 두 부분으로 구분할 수 있다. 즉 연소화학반응이 주로 이루어지는 극히 미소한 영역인 반응대(Reaction zone)와 기연가스가 존재하며 화학반응이 거의 종결된 화염후면(Post-reaction zone)으로 나눌 수 있다. 그런데 반응대에서는 화학반응이 급격하게 진행되는 각종의 화학종이 연쇄반응을 계속하게 되며 이때 이 화학종은 전기 에너지 준위 이상으로 여기된 상태의 화학종이며 탄화수소화염의 경우에는 C_2^* , CH^* 라디칼 등이 그 대표적인 예이다.

이 여기된 상태의 화학종이 급격한 연소반응과 이에 따른 열방출에 의하여 열역학적 화학평형상태 이상으로 존재하는 경우에는 자연히 화염면의 이온화가 이루어진다. 실제 연소화학반응은 거의 반응대에서만 이루어지므로 자연 이온화는 화염면에서만 발생한다는 사실로부터 지금까지 많은 연구자들이 이온 프로브를 화염전파 경로에 설치하여 화염전파속도, 층류화염면의 두께 등의 화염면에 관한 정보를 얻고 있다.⁽¹⁷⁻¹⁸⁾ 탄화수소 예혼합기의 화염에 있어서 주된 이온반응은 다음과 같다.



식 (2)에 나타난 바와 같이 이온화 반응의 주요한

1차 이온은 CHO^* , CH_3O^* 및 $C_3H_3^*$ 로 알려져 있다.⁽¹⁹⁾ 이온화 반응의 1차 이온으로부터 몇 가지 이온이 생성되고 최후에는 식 (3)과 같이 재결합하여 급속히 소멸하므로 이온농도가 높은 영역은 화염면의 반응대에 한정되어 있음을 알 수 있다.⁽²⁰⁾

Fig. 4는 본 실험에 사용된 이온 프로브의 세부 형상도를 표시한다. 그림에 표시한 바와 같이 프로브는 직경 0.2 mm, 폭 1.0 mm인 두 개의 동일한 100% 니켈(Ni-100%) 선을 연소실 중심으로부터 벽면까지 양방향으로 5 지점씩 설치했다. 첫번째 이온 프로브를 연소실의 중심(점화 전으로부터 17 mm 떨어짐)에 위치하도록 설치하고 첫번째 프로브에 화염면이 도달하는 시각과 각 이온 프로브(중심에서 $r=10, 17.5, 25, 32$ mm의 위치)에 화염면이 도달하는 시간차를 측정하였다.

전파화염의 이온을 측정하는 경우, 일반적으로 이온 프로브에서 이온전류가 극대치에 도달한 시각에 화염면이 이온 프로브 수감부를 통과한다고 생각한다. 이온전류가 극대치에 도달한 시간 간격을 각 프로브의 수감부 사이의 거리로 나눔으로써 국소 화염전파속도(Local flame velocity, V_L)를 얻을 수 있고 각각의 국소 화염전파속도를 평균한 것을 평균 화염전파속도(Average flame velocity, V_A)로 정의하였다. 이온 프로브에 의한 화염전파속도 측정의 신뢰도를 높이고, 불균일성이 높은 화염에 대해서도 비교적 정확하게 적용하기 위하여 연소실내의 중심에서 양방향으로 프로브를 설치하였다. 이는 이온 전류를 양방향으로 측정하여 비대칭적인 화염전파를 확인한 후 정상화염과 구분할 수 있기 때문이다.

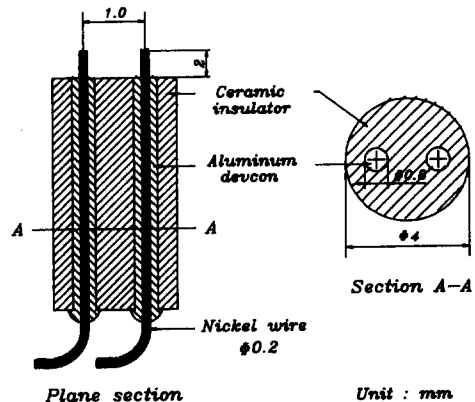


Fig. 4 Configuration of ion gap probe

2.2.3 연소압력에 의한 연소 질량분율의 측정

최고 연소압력이 발생된 시점을 화염면이 연소실의 끝 단에 도달되어 연소실의 모든 혼합기가 연소된 것으로 가정한다면 압력에 의해 연소실내 연소 질량분율 및 연소질량률을 계산할 수 있다. 압력으로부터 Lewis와 Von Elbe 결과식⁽²¹⁾을 이용하여 연소질량분율(mass fraction burned, MFB)을 구하였고 이 값을 최대압력을 완전 연소상태인 1.0으로 보고 상대적인 비를 구한 것이다. 또한 연소질량분율의 시간에 따른 변화인 연소질량률(mass burning rate, MBR)을 Lagrangian의 보간법을 이용하여 계산하였다.

화염핵 및 화염성장의 시간을 기술하기 위해서 일반적으로 압력 값이 이용된다. 전기점화기관에 있어서의 점화지연은 점화 이후 혼합기의 1~10%가 연소하는데 걸리는 초기 연소시간으로 정의된다. 이것은 혼합기가 열해리되어 화염면을 형성시키는데 필요한 시간과 혼합기의 초기 연소시간 모두를 포함하고 있다. 왜냐하면 이와 같은 점화지연 이후 급격한 압력 및 연소율의 증가가 나타나기 때문이다. 이론 당량비인 메탄-공기 혼합기에 대해 화염핵은 불꽃 방전 후 거의 20 μs에서 체적이 약 3 mm³이므로 일반적인 압력변환기는 이 점에서 어떤 압력변화를 검출할 수 없으므로 10%의 연소질량분율이 점화지연을 정의하는데 사용된다.

3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 5는 측정된 연소압력과 이온전류의 실험 예

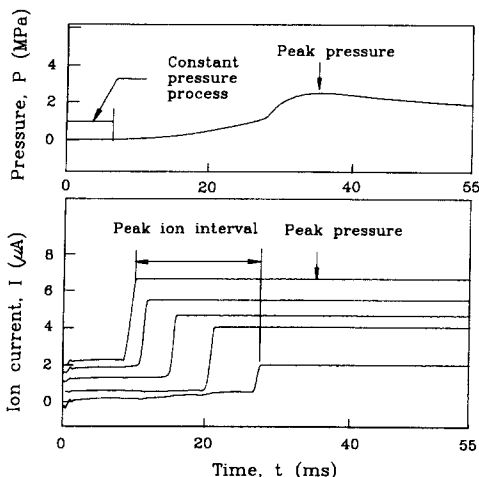


Fig. 5 Example traces of overall signal output

이다. 이온신호는 정량적으로는 큰 의미를 갖지 않으므로 최소량만 발생되면 최대값이 나타나는 증폭 범위로 조정되어 있다.

3.1 슐리엔 촬영에 의한 화염전파 특성

Fig. 6은 초기압 0.24 MPa, 분위기 온도 313.2 K 인 경우의 각 당량비에 대한 메탄-공기 예혼합기의 초기 화염전파 현상을 나타낸다. 그림의 가로축은 점화가 시작된 후부터의 시간이며 세로축은 전파된 화염의 반경이다. 그림에서 당량비 0.6의 경우는 점화가 되지 않았다. 화염의 전파 과정은 연소 초기에 전극의 냉각 작용의 영향을 많이 받으므로 전

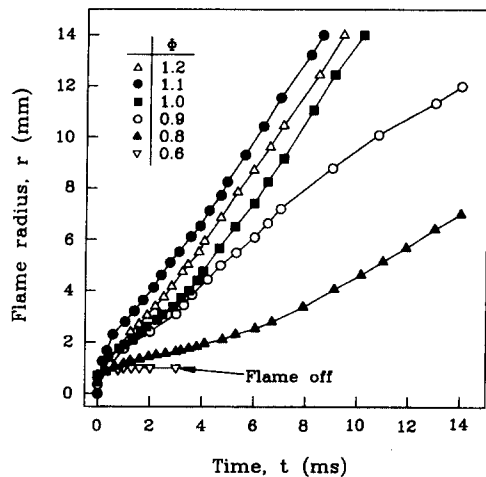


Fig. 6 Effect of equivalence ratio on the flame propagation radius ($P_i=0.24$ MPa, $T_i=313.2$ K)

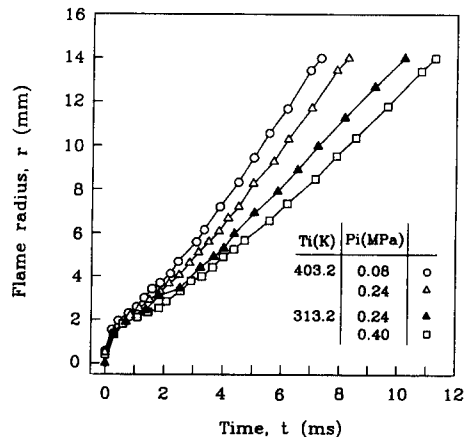


Fig. 7 Effect of initial pressure and temperature on the flame propagation radius ($\phi=1.0$)

극의 직각방향으로 팽창하는 화염면의 크기를 측정하였으며 부력의 영향을 고려하여 화염전파 직경을 측정하여 그 반을 화염전파 반경으로 취하였다. 전체적으로 당량비 1.0 이상에서는 변곡점이 존재하고 있으나 당량비 0.9 이하의 희박혼합기층에서는 변곡점을 발견할 수 없었다. 당량비에 따른 화염성장은 변곡점 이전, 즉 3 ms 이내에 결정되며 그 후에 일정한 속도로 전파되어 간다. 그러나 혼합기가 희박해지면 6 ms 이후로 벗어나게 된다. 이것은 희박혼합기인 경우에는 연소 초기부터 화염전파 속도가 매우 느리기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 7은 당량비가 1.0일 때 초기온도가 313.2 K에서 403.2 K로 변하는 경우의 초기압이 0.08 MPa에서 0.24, 0.40 MPa로 변하는 경우에 대한 화염전파 기록을 표시한다. 동일한 온도 조건에 초기압력만 변하는 경우에는 반경 14 mm에서 1 ms 정도의 시간차가 있고, 동일한 초기압 하에서 온도가 90 K 변하는 경우 2 ms의 시간차가 발생된다. 이것은 초기압의 증가는 미연 혼합기의 밀도 증가로 인하여 미연 혼합기의 점화에 더 많은 열량이 소모되기 때문이라고 생각된다.

Fig. 6과 Fig. 7의 결과를 종합해 보면 일정한 당량비 조건에서는 초기압력이 낮을수록, 초기온도가 높을수록 초기연소시간은 단축됨을 알 수 있다. 즉 혼합기에 활성화 에너지의 증대를 유도하여 초기의 화학반응을 촉진시켜 주거나 또는 밀도가 낮은 미연 혼합기의 점화에 소비되는 열량이 작아지므로 나타나는 결과임을 알 수 있다. 그러나 동일 조건에서 당량비의 변화는 반경 1.5 mm 정도의 화염핵의 초기 성장에서부터 큰 영향을 미치지만, 동일한 당량비하에서 점화조건에 따른 변화는 반경 2.5 mm 정도 지나서 영향을 미침을 보여준다. 이것은 초기상태에서는 당량비의 영향이 초기조건보다도 지배적이기 때문이다.

Fig. 6을 Fig. 8의 슐리렌 사진 (a), (b), (c)와 비교하여 보면 슐리렌 사진의 결과에서부터 동일시간에 혼합기의 당량비에 따라 화염면이 더 빨리 전파되었음을 쉽게 알 수 있으며 이와 같은 초기의 화염전파속도의 차이가 계속해서 유지하게 된다.

Fig. 7을 Fig. 9의 슐리렌 사진 (b), (c)와 비교하여 보면 동일시간에 혼합기 온도가 높은 쪽의 화염면이 더 빨리 전파되었음을 쉽게 알 수 있으며, 또한 동일한 초기온도에 초기압이 변하는 Fig. 9의 (a), (b)와 초기온도가 바뀌는 (b), (c)의 슐리렌

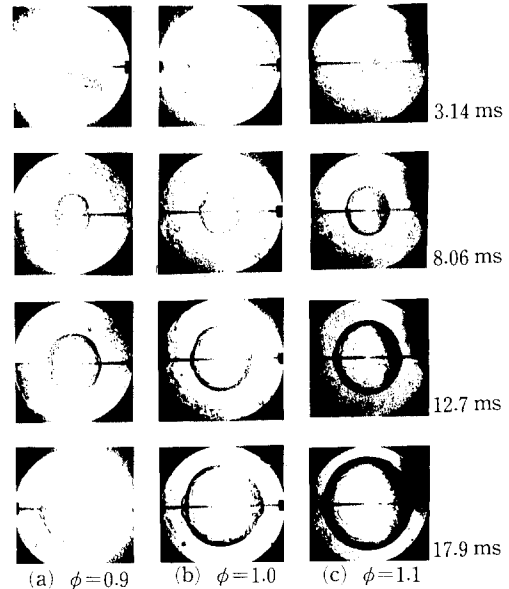
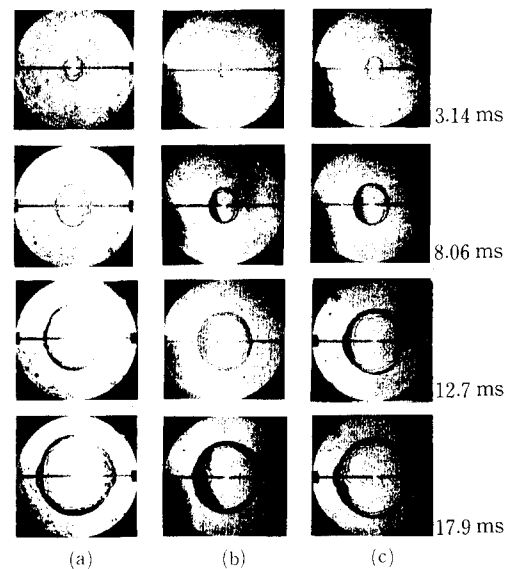


Fig. 8 Effect of equivalence ratio on the flame propagation by schlieren photo ($P_1=0.08$ MPa)



(a) $T_1=313.2$ K, $P_1=0.08$ MPa
 (b) $T_1=313.2$ K, $P_1=0.24$ MPa
 (c) $T_1=403.2$ K, $P_1=0.24$ MPa

Fig. 9 Effect of initial pressure and temperature on the flame propagation by schlieren photo

사진을 비교하면 초기압력이 낮을수록 화염면이 더욱 신속하게 전파함을 관찰할 수 있다. Fig. 9의 슐리렌 사진을 살펴보면 전체적으로 부력의 영향을

받아 화염면 전체가 연소실의 상부로 부상됨을 볼 수 있다. 이와 같은 부력효과는 초기 화염핵의 성장에 점화 플러그의 냉각효과와 더불어 화염핵의 미끄러짐의 원인이라고 생각된다.

3.2 이온 프로브에 의한 화염전파 특성

Fig. 10은 연소실 반경방향에 따른 화염전파속도를 양방향 이온 프로브에 의해 측정된 것으로서 초기 압력 그리고 당량비의 변화가 평균 화염전파속도에 미치는 영향을 나타낸다. 전체적으로 당량비 1.1에서 최대 화염전파속도가 나타났다. 초기온도가 403.2 K일 때 초기압력에 따른 평균 화염전파속도의 차는 25.5 cm/s이고, 같은 초기압력에서는 거의 균일하게 평균 99.5 cm/s이다. 초기온도 313.2

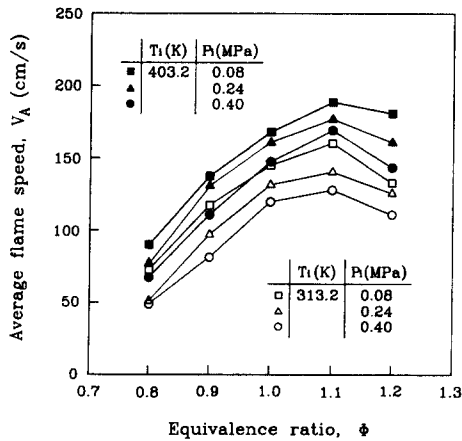


Fig. 10 Effect of equivalence ratio on average flame speed

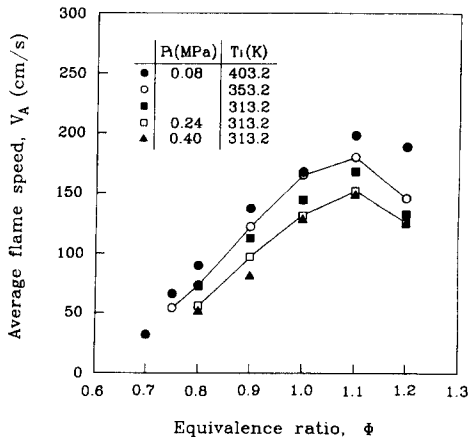


Fig. 11 Effect of initial temperature and pressure on average flame speed

K일 때 초기압력의 변화에 따른 평균 화염속도의 차는 27.6 cm/s이고, 같은 초기압력하에서는 거의 균일하게 평균 85.5 cm/s이다. 따라서 초기온도 변동으로 발생된 화염전파속도차 14 cm/s보다 초기 압력 변동으로 생긴 평균 화염전파속도 차는 26.6 cm/s로 더욱 크게 나타났다. 이것은 본 실험의 범위내에서 화염전파속도에 초기압력이 더욱 큰 영향을 미치기 때문이다.

Fig. 11은 초기압력이 일정할 때 초기온도의 변화가 평균 화염전파속도에 미치는 영향을 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이, 최대 평균 화염속도

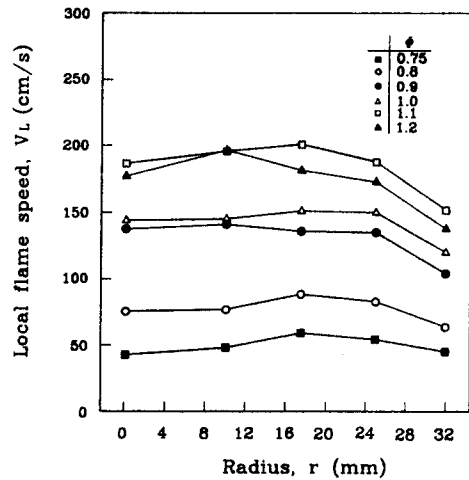


Fig. 12 Effect of equivalence ratio on local flame speed ($P_1=0.24$ MPa, $T_i=403.2$ K)

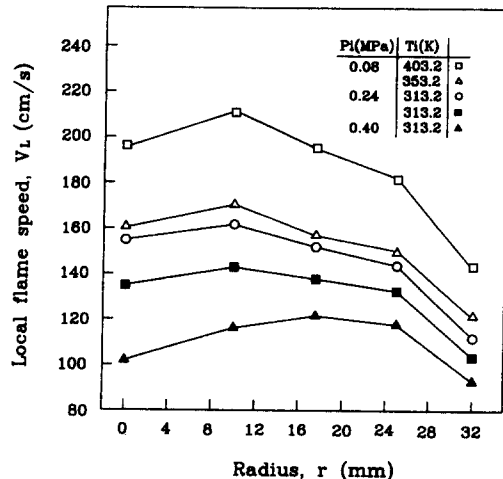


Fig. 13 Effect of initial mixture pressure and temperature on local flame speed ($\phi=1.1$)

는 초기 혼합기압력이 낮을수록, 초기 혼합기 온도가 높을수록 증가된다. 이것은 초기 압력이 높고 초기 온도가 낮을수록 연소실내 혼합기의 총진 양이 많아져 미연 혼합기의 밀도가 증가되고, 따라서 미연 혼합기의 점화에 더 많은 열량이 소모되기 때문이고, 초기 혼합기 온도는 연소반응을 더욱 촉진시켜서 화염속도를 가속하기 때문이라고 생각된다.

화염속도에 미치는 혼합기 압력의 영향은 초기 압력이 증가할수록 국소 화염전파속도의 거리에 따른 변동은 더욱 감소된다. 즉 초기압이 0.08 MPa인 경우 당량비 0.8과 1.1의 속도차는 94.5 cm/s이지만 초기압이 0.40 MPa인 경우에는 80.0 cm/s가 되어 약 15 cm/s 이상 국소 화염전파속도의 거리별 속도차가 균일화됨을 알 수 있다.

Fig. 12는 혼합기의 당량비 변화가 국소 화염전파속도에 미치는 영향을 나타낸다. 국소 화염전파속도는 연소실 중심으로부터 속도가 증가하여 중심에서 약 17.5 mm 떨어진 지점에서 최대가 된 후 벽면으로 갈수록 급격히 감소한다. 중심에서 $r=17.5$ mm까지는 최초 정지상태의 화염이 가속되는 구간이며 이 구간을 지나면서부터는 벽면에 의한 냉각효과 등으로 감소하는 것으로 사료된다. 또한 당량비가 낮을수록 이와 같은 가속 구간의 구별 없이 국소 화염전파속도는 전 연소장에 걸쳐 비슷하게 나타난다. 즉, 당량비 1.1일 때 국소 화염전파속도차는 약 50 cm/s이지만 당량비 0.8인 경우 15.63 cm/s로 약 30% 이상 균일하게 된다. 이는 당량비가 낮을수록 슬리렌 사진의 결과에서와 같이 화염전파속도 궤적의 변곡점이 없어지기 때문이다.

Fig. 13은 국소 화염전파속도에 미치는 혼합기의 초기압력과 온도의 영향을 보여준다. 초기온도가 높을수록 온도의 자승에 거의 비례하여 높은 화염속도가 얻어진다. 즉, 중심에서 17.5 mm 지점의 화염속도는 온도 40 K의 변화에 속도는 3.5 cm/s 증가하였지만 온도가 90 K 증가하면 40 cm/s 정도 증가하였다. 이는 혼합기의 초기온도가 높을수록 화학 반응에 의한 초기 점화핵의 생성 및 성장이 활성화되기 때문이다.

3.3 연소압력에 의한 연소질량분율의 특성

Fig. 14는 메탄-공기 예혼합기의 당량비가 0.75~1.2일 때의 연소질량분율(MFB)을 나타낸다. 당량비 0.9~1.2와 당량비 0.8 이하의 두 그룹으로 구별된다. 이것은 혼합기가 희박해질수록 화염전파

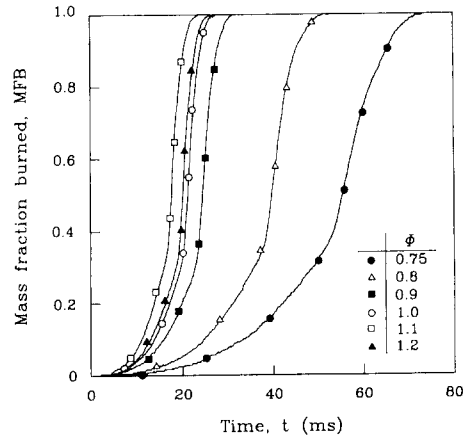


Fig. 14 Effect of equivalence ratio on mass fraction burned ($P_1=0.24$ MPa, $T_1=403.2$ K)

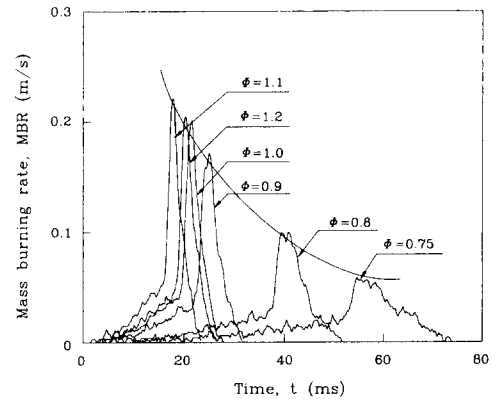


Fig. 15 Effect of equivalence ratio on mass burning rate ($P_1=0.24$ MPa, $T_1=403.2$ K)

속도의 급격한 감소로 인한 연소기간의 증가 때문인 것으로 생각된다.

혼합기의 초기 압력과 온도에 관계 없이 연소질량분율은 당량비 1.1일 때 가장 크게 나타난다. 이것으로부터 혼합기의 당량비가 감소함에 따라 연소기간(100% 연소될 때까지의 시간)이 증가함을 알 수 있다.

Fig. 15는 혼합기의 당량비가 0.75~1.2일 때의 연소질량분율(MFB)을 이용하여 계산한 질량연소율(MBR)을 보여준다. 전체적으로 초기의 심한 변동기간을 벗어나면 급격히 연소율이 증가하고 최대에 이른 후 다시 급격한 하락이 나타난다. 당량비가 희박해짐에 따라서 크기가 급격히 감소하며, 특히 당량비 0.75에서는 $t_{p_{MBR}}$ 전후에 상당한 진동이

발생함으로써 연소상태가 불안정함을 보여주고 있다. 즉, 질량연소율이 가장 큰 당량비 1.1과 비교해 보면 당량비 0.9는 약 21.6%, 당량비 0.8은 54.5% 정도로 최대 질량연소율이 감소되었음을 알았다.

당량비 0.8 이하는 당량비 1.2~0.9 그룹과 비교할 때 연소 상태가 구분되는 희박한 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 혼합기의 당량비가 1.1 이상으로 갈수록 오히려 최대 질량연소율의 크기는 감소되며 시간은 길어지는 경향을 보인다. 따라서 메탄은 본 실험의 범위내에서 최대의 질량연소율이 당량비 1.1에 존재하므로 양론비(stoichiometric ratio)보다 조금 높은 당량비에서 최적의 연소상태를 나타내었다.

Fig. 16은 당량비가 1.0일 때의 초기온도 및 압력의 변화에 따른 질량연소율을 보여준다. 연소질량분율이 가장 큰 초기압 0.08 MPa과 비교해 보면 초기압, 온도 증가에 대해 최대 질량연소율이 약 11.7% 증가하지만 그때까지의 시간(t_{PMR})은 온도와 압력이 반대의 경향임을 알 수 있다.

Fig. 17은 연소압력을 기초로 얻어진 화염성장시간(t_{90} , t_{10})에 미치는 혼합기의 당량비의 영향을 나타낸 것이다. 당량비가 증가함에 따라 초기화염 성장기간뿐 아니라, 전체화염 전파시간이 감소하고 있다. 앞의 언급한 연소질량분율에서의 결과와 같이 당량비 1.1 에서 가장 빨리 연소가 끝나며 이로부터 화염속도도 가장 빠른 최적의 연소상태임을 나타내고 있다.

Fig. 18은 화염성장시간에 미치는 혼합기의 초기

압력과 온도의 영향을 보여준다. 혼합기의 초기온도가 높아질수록 연소 기간은 더욱 짧아지고, 초기압력이 높을수록 길어짐을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 화염전파속도가 혼합기의 온도가 높을수록 증가하기 때문인 것으로 사료된다. 즉, 분위기 온도가 증가할수록 화학 활성도가 증가하기 때문이다. 또한 당량비가 0.8 이하로 희박해지면, 이로 인해 100% 연소될 때까지의 시간이 40 ms 이상 걸리고 있음을 보여주고 있다. 특히 당량비가 0.9에서 0.8로 0.1 감소했을 때 연소기간은 21 ms 정도 길어졌으나, 0.8에서 0.75로 0.05 감소했을 때 당량비 0.1 감소시보다 더 긴 약 25 ms나 되었다. 이와 같은 희박연소시 연소기간의 증가는 기관의 사이클 변동 및 출력 저하의 원인이 되고 있다.

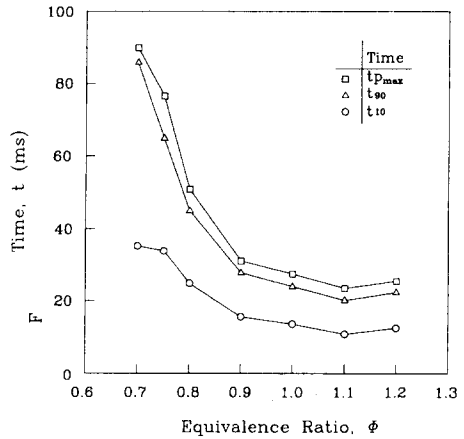


Fig. 17 Effect of equivalence ratio on flame propagation time ($P_i=0.24\text{MPa}$, $T_i=403.2\text{K}$)

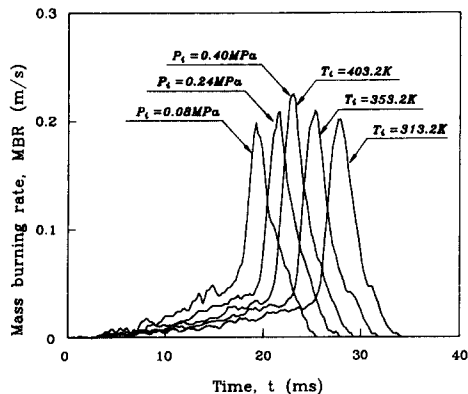


Fig. 16 Effect of initial pressure and temperature on mass burning rate ($\phi=1.0$)

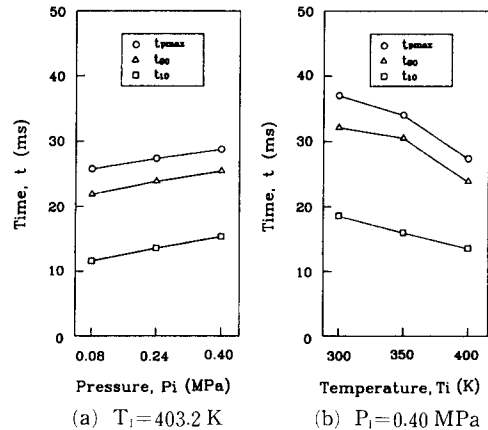


Fig. 18 Effect of initial pressure and temperature on flame propagation time ($\phi=1.0$)

4. 결 론

(1) 솔리렌 촬영으로 초기 화염전파기간(5ms)에 층류화염 연소속도를 측정하여 다른 연구자의 결과와 비교해 보면 당량비 1.1에서는 거의 일치한다.

(2) 이온 프로브와 솔리렌 촬영에서 얻은 층류화염 전파속도는 당량비에 따라 전체적으로 동일한 경향을 나타내지만, 당량비 조건에 따라 이온 프로브는 희박한 조건에서, 솔리렌은 농후한 조건에서 조금 높게 나타내었다.

(3) 평균 화염전파속도는 초기압력이 낮을수록, 초기온도가 높을수록 화염전파가 빠르고, 국소 화염전파속도는 연소실의 중간 ($r=12\sim 17$ mm)에서 최대에 이른 후 벽면으로 갈수록 급격히 감소된다.

(4) 연소질량분율 및 연소율은 본 실험의 당량비 범위내에서 최적의 연소조건은 당량비 1.1이었다. 이때 연소압력은 가장 높고 연소시간은 가장 짧으며, 이 범위를 벗어날수록 감소되었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 연구비 지원(과제번호 : 941-1000-047-1)으로 수행된 것이며, 이에 관계 제위에 심심한 감사의 뜻을 포함합니다.

참고문헌

- (1) Mizutani, Y., 1989, "Visualization and Image Analysis of Combustion Field," *JSME Int. Journal* II, Vol. 32, No. 1, pp. 1~10.
- (2) Sasayama, T., et. al, 1987, "Recent Development of Optical Fiber Sensors for Automotive Use," *SPIE*, Vol. 840.
- (3) Chigier, N. A., 1991, "Combustion Measurement," Hemisphere.
- (4) Eckbreth, A. C., Bonczyk, P. A. and Verdieck, J. F., 1979, "Combustion Diagnostics by Laser Raman and Fluorescence Techniques," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Pergamon Press, Vol. 5, pp. 253.
- (5) Eckbreth, A. C., 1981, "Recent Advances in Laser Diagnostics for Temperature and Species Concentration in Combustion," *18th Sym. (Int.) on Combustion*.
- (6) Mizutani, Y., Saeki, T. and Nakabe, K., 1988, "Visualization of the Reaction Zone of a Flame by Image Processing (Further Report)," *Trans. JSME, Series B*, Vol. 52, No. 504, pp. 2219~2226.
- (7) Remboski, D. J., 1986, "Optical Sensors for Combustion Analysis and Control Automotive Engineering," *SPIE* 97-6.
- (8) Day, E., et. al., 1989, "Start of Combustion Sensor," *SAE Paper 890484*.
- (9) Ohyama, Y., et. al., 1990, "Study on Optical Combustion Sensor for Spark Ignition Engine," *COMODIA 90*, pp. 359~364.
- (10) Gaydon, A. G. and Wolfhard, H. G., 1970, *Flames, Their Structure, Radiation and Temperature (3rd edn)*, London, Chapman and Hall Press.
- (11) Gaydon, A. G., 1957, *Spectroscopy of Flames*, Wiley Press.
- (12) Eckbreth, A. C., 1988, *Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species*, Abacs Press.
- (13) Calcote, H. F., 1963, *Ionization in High-Temperature Gases*, Academic Press.
- (14) Tosiw, K. and Kacuhiko, N., 1973, "Relation between Ion Creation and C₂, CH and OH Formation in the Combustion of Hydro Carbons," *14th Sym. (int.) in Combustion*, pp. 321~328.
- (15) Lewis, B. L. and von Elbe, G., 1961, *Combustion, Flames and Explosions of Gases*, Academic Press.
- (16) Ito, H., Hommo, Y., Jae-Ik Song and Gomi, T., 1988, "An Instantaneous Measuring Method of Air-fuel Ratio by Luminous Intensity of Radical (Application to practical Burner Flames)," *JSME*, Vol. 52, No. 481, pp. 2219~2230.
- (17) Zallen, D. M., Hirleman E. D. and Witting, S. L., 1976, "Ion Precursors, Chemi-Ion Formation and Electron Densities in Shock-Induced Methane Combustion," *15th Sym. (Int.) on Combustion*, pp. 1013~1021.
- (18) Miller, W. J., 1974, "Ions in Flames : Evaluation and Prognosis," *13th Sym. (Int.) on Combustion*.

- tion, pp. 307~320.
- (19) Namazian, M., Hansen, S., Lyford-Pike, E., Sanchez, J., Heywood, J. and Rife, J. 1980, "Schlieren Visualization of the Flow and Density Fields in the Cylinder of a Spark-Ignition Engine," *SAE paper 800044*.
- (20) Calcote, H. F., 1963, *Ionization in High-Temperature Gases*, Academic Press.
- (21) Lewis, B. L. and von Elbe, G., 1961, *Combustion, Flames and Explosions of Gases*, Academic Press.