

부분 예혼합 화염에서 연소실 압력이 연료별(CH₄, C₂H₄, C₃H₈) 연소특성과 반응영역에 미치는 영향

손제하* · 김종률** · 최경민**** · 김덕줄***

Influence of Changing Combustor Pressure on Combustion Characteristics and Reaction Zone in the Partially Premixed Flame with CH₄, C₂H₄ and C₃H₈

Je-ha Son, Jong-ryul Kim, Gyung-min Choi and Duck-jool Kim

ABSTRACT

Combustion experiments were conducted at three different fuels (CH₄, C₂H₄ and C₃H₈) to investigate the effects of combustor pressure (30 ~ 30 kPa) on combustion characteristics and reaction zone structure. Regardless of the fuels, emission index of CO (EICO) increased with decreasing combustor pressure, and EICO of C₂H₄ was mostly affected by changing combustor pressure at subatmospheric pressure. In order to observe reaction zone, OH^{*}, CH^{*} and C₂^{*} chemiluminescence intensity were measured. The sequence of the chemiluminescence intensity peak position was affected by chemical characteristics of fuels rather than changing combustor pressure. The emission zone thickness of C₂H₄ and C₃H₈, defined by the full width at half maximum (FWHM) of CH^{*} intensity profile, were increased with decreasing combustor pressure. however, the thickness of C₂H₄ exhibited the opposite tendency due to the characteristics of the fuel as the bond structure.

Key Words : Partially premixed flame, Combustor pressure, Combustion characteristic, Reaction zone, Emission zone thickness, EICO

기 호 설 명

Alphabets

Φ : Equivalence ratio

P^{*} : Pressure index

P_{abs} : Absolute pressure

P_{atm} : Atmospheric pressure

Q : Caloric value

S_L : Burning velocity

Q_M : main air

Q_S : Surrounding air

I : Mean intensity

1. 서론

산업용 보일러나 가정용 버너의 경우 열전달 촉진과 배기가스의 원활한 배출을 위해 유도 유동(Induced flow)을 적용시킨 연소시스템이 도입되고 있다. 유도 유동 화염은 연소가스를 연소기 출구로 강제 배출하여 유동 조건에 따라 연소실 압력이 대기압 이하의 조건을 포함한 다양한 압력조건을 형

성한다. 따라서 이러한 유도 유동 화염의 연소특성을 파악하고 제어하기 위해서는 다양한 압력변화에 대한 연소현상을 분석할 필요가 있다. 연소현상에서 연소실 압력은 화염구조, 화염안정화 및 배출특성 등에 밀접한 영향을 준다고 알려져 있다. 연소실 압력에 따른 연소현상에 관한 연구는 대부분 연소실 압력이 대기압이상인 조건에서 수행되었고, 연소실 압력이 대기압이하인 조건에서는 일부 제한적으로 실험이 수행되었다[1-4]. 유도 유동 화염의 연소특성을 분석하기 위해 선행연구에서 다양한 연료(CH₄, C₂H₄, C₃H₈)의 부분 예혼합 화염에서 연소실 압력 및 당량비 변화에 따른 국소반응 특성과 배출 특성 등을 관찰하였다[5]. 주요 결과로는 연료종류에 관계없이 연

* 부산대학교 대학원 기계공학과

** LG전자 HA 공통기술연구소

*** 부산대학교 기계공학부

† 연락처, choigm@pusan.ac.kr

소실 압력이 감소함에 따라 NO_x 배출량이 감소하였다. 이는 연소실 압력이 낮아짐에 따라 화염면이 신장되어 주위 공기류와의 접촉 면적이 증가하였고, 이로 인해 국부적인 고온 영역이 제거되어 Thermal NO_x 가 감소하기 때문이다. 이러한 결과는 중심 반응 영역의 온도 분포에서도 확인 할 수 있었다. 국소반응강도의 경우 메탄(CH_4)과 프로판(C_3H_8)에서는 과농하고 대기압 이하의 조건에서 미연 혼합기의 빠른 확산에 의해 국소 자발광 강도가 강하게 나타났지만 에틸렌(C_2H_4)은 빠른 연소속도의 영향으로 상대적으로 연소실 압력의 영향이 작았다. 이와 같은 결과로, 연료에 따라 정도의 차이는 있지만 모든 연료(CH_4 , C_2H_4 , C_3H_8)에서 연소실 압력조절로 연소반응을 제어 가능하며, 확산속도는 연소특성에 영향을 미치는 중요한 인자임을 알 수 있었다. 하지만 연료의 확산속도만으로는 유도 유동으로 인한 연소실 압력 변화와 다양한 연료의 연소 메커니즘을 상세히 이해하는 데는 어려움이 있었다.

연소실 압력변화에 따른 연소현상을 상세히 분석하기 위해서는 압력변화에 따른 연소 반응대의 분석이 필요하다. 연소 반응대는 화염의 특성, 연소속도 및 연료의 특성 등을 측정할 수 있는 주요한 인자로서 많은 연구자들은 반응대 분석을 위해 화염 및 방출영역의 두께를 측정하였다. 화염두께를 측정할 선행연구로 Andrew와 Bradely는 미세 열전대와 솔리덴 간섭계를 이용하여 메탄-공기 예혼합 화염에서 당량비 변화에 따른 두께를 측정하였고, Furukawa 등은 마이크로 정전기 프로브를 이용한 이온전류 변동측정의 확률밀도함수로 난류 예혼합 화염의 두께를 측정하였다[6,7]. Gottgens 등은 82종의 반응요소 운동메커니즘을 이용하여 다양한 연료의 압력, 당량비의 변화에 따른 연소속도를 계산하여 전체 화염의 두께와 예열대의 두께를 유도해냈다[8]. Kwon과 Bowen은 메탄-공기 예혼합 화염의 온도변화에서 온도구배를 이용하여 화염의 두께를 계산하였고 화염대 두께에서 예열대가 차지하는 비율을 유도하였다[9]. 비접촉식 광학실험으로는 Kojima 등이 대기압조건에서 당량비에 따른 자발광강도를 측정하여 방출영역의 분포와 두께를 측정하고 PREMIX code를 이용한 수치해석결과와 비교하였다[10]. 하지만 대부분의 화염 반응대에 관한 연구는 연소실 압력이 대기압 이상인 조건에서 수행되었고, 연소실 압력이 대기압 이하에서는 제한된 조건에서 수치해석적인 방법으로 연구가 수행 되었다.

본 연구에서는 다양한 연료의 연소실 압력변화에 따른 배출특성 및 화학종의 방출강도를 측정, 방출영역의 두께를 측정, 분석하고, 유도 유동 시스템에서 다양한 연료의 연소특성을 상세히 규명하고자 한다.

2. 실험장치 및 조건

2.1. 실험장치

본 실험에 사용된 실험 장치는 연소실의 압력을 조절해주는 부분과 연료를 혼합하여 공급하는 혼합기 부분으로 구성되어있다. 연소실 내부의 압력을 대기압 이상으로 형성하기 위해서 고압 블로우(blower)를 통해서 유입되는 공기의 유출을 출구밸브를 조절하여 압력을 형성한다. 대기압 이하의 압력을 형성할 때는 출구부의 진공펌프의 출력을 조절하여 연소실 공기를 외부로 배출시켜 압력을 형성한다. 연소실에 공급되는 주위 공기류는 질량유량계(KOFLOC HFC-300)를 통하여 계측되어지고, 게이트 밸브를 조절하여 연소실에 공급되는 유량을 제어할 수 있으며 모든 압력 조건(-30~30 kPa)에 공급되는 유량(140 L/min)은 동일하다.

혼합기는 질량유량계(KOFLOC MFC-3660)로 조절된 연료와 건조공기로 혼합실에서 생성하여 연소실로 공급한다. 혼합실내에는 스테인리스 볼과 허니콤을 설치하여 유동을 정류하고 역화를 방지 하였다.

Fig. 1은 실험에 사용된 연소기와 디퓨저를 상세히 나타낸 것이다. 연소기는 55 mm × 55 mm × 500 mm인 정방향이며, 연소기 전·후면에 광학계측용 가시화창(45 mm × 300 mm × 5 mm, $\lambda = 200\sim 2000$ nm)을 설치하였다. 화염장의 온도 계측용 프로브를 삽입하기 위하여 10 mm 간격으로 측정 홀($d = 5$ mm)을 연소기 측면에 가공하였다. 디퓨저는 혼합가스의 분사속도를 낮추고 분사압력을 높여 대기압 이하의 조건에서 화염의 안정 영역을 넓히기 위해 사용하였다. 압력변동에 대한 화염의 안정화를 위해 중심 출구($d = 8$ mm)를 중심으로 8개의 보조 인젝터($r = 1.5$ mm)를 설치하여 파일럿 화염을 형성하였다.

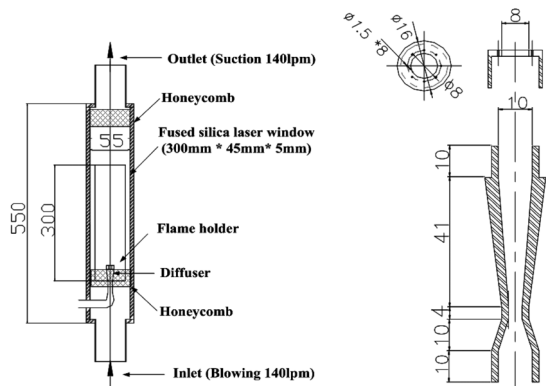


Fig. 1. Detail diagrams of combustor and mixture nozzle.

Table 1. Experimental conditions

Parameter	Range								
P^*	0.7 1.0 1.3 (-30, 0, 30 kPa)								
Fuel	CH ₄			C ₂ H ₄			C ₃ H ₈		
Mol.wt. (kg/kmol)	16.043			28.054			44.096		
Φ	0.8	1.0	1.2	0.8	1.0	1.2	0.8	1.0	1.2
Q (W)	0.54	0.67	0.77	0.59	0.73	0.86	0.57	0.71	0.84
S _L (cm/sec)	26	40	37	50	67	71	40	44	42
$Q_M = 10.6$ (L/min), $Re = 722.2$									
$Q_S = 140$ (L/min), $Re = 1104.6$									
Oxidizer : Dry air									

2.2. 실험방법 및 조건

다양한 연료에 대한 연소실 압력변화에 따른 연소특성을 분석하기 위하여 압력지수와 당량비를 조절하였다. 본 실험의 연소시스템에서는 압력지수($P^* = P^*_{abs}/P^*_{atm}$)가 0.7 이하, 1.3 이상의 조건일 때 연소실 내부압력이 약하게 진동하여 정압을 유지하기 힘든 조건이 발생하였기 때문에 실험구간을 각 당량비 조건에서 압력지수 0.7~1.3로 설정하였다. 당량비는 메탄(CH₄), 에틸렌(C₂H₄), 프로판(C₃H₈)과 압축된 건조공기를 혼합하여 0.8~1.2까지 조절하였으며 모든 연료의 혼합기 유량은 10.6 L/min으로 동일하다. 실험조건은 Table 1에 나타내었다.

Fig. 2는 각 연료별(CH₄, C₂H₄, C₃H₈) 연소실 압력에 따른 분자 확산계수를 나타낸 것이다. 모든 연료

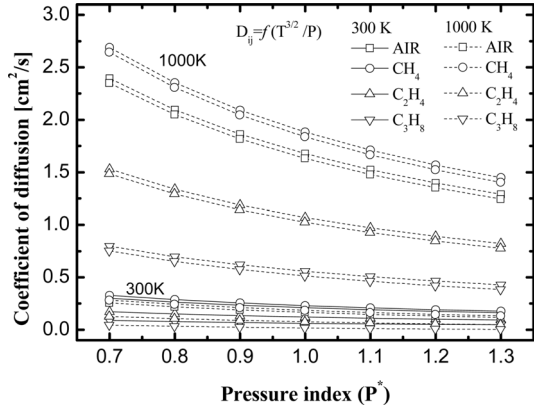


Fig. 2. Coefficient of diffusion as function of fuel (CH₄, C₂H₄, C₃H₈) and pressure index($P^*=0.7\sim 1.3$).

에서 연소실 압력지수가 감소할수록 확산계수는 증가하였고 온도가 높을수록 분자확산이 활발해짐을 확인할 수 있었다. 특히, 분자량이 작은 연료일수록 확산 계수가 높고 압력지수의 영향을 많이 받았다 [11]. 이러한 연료 특성에 따른 확산계수의 차이가 연소현상에 영향을 줄 것으로 예상된다.

Fig. 3(a)는 배기가스 및 반응대의 강도와 방출영역의 두께를 측정하기 위한 장치를 나타낸 것이다. 연소가스 중의 일산화탄소(CO)는 화학 발광식 가스 분석기(A&D system-9000 series)를 사용하여 측정하였다. 측정을 위하여 사용된 스테인리스 샘플링 프로브는 과열을 방지하기 위해 수냉식 2중관을 설치하였으며 프로브의 샘플링 홀의 크기는 1 mm로 하

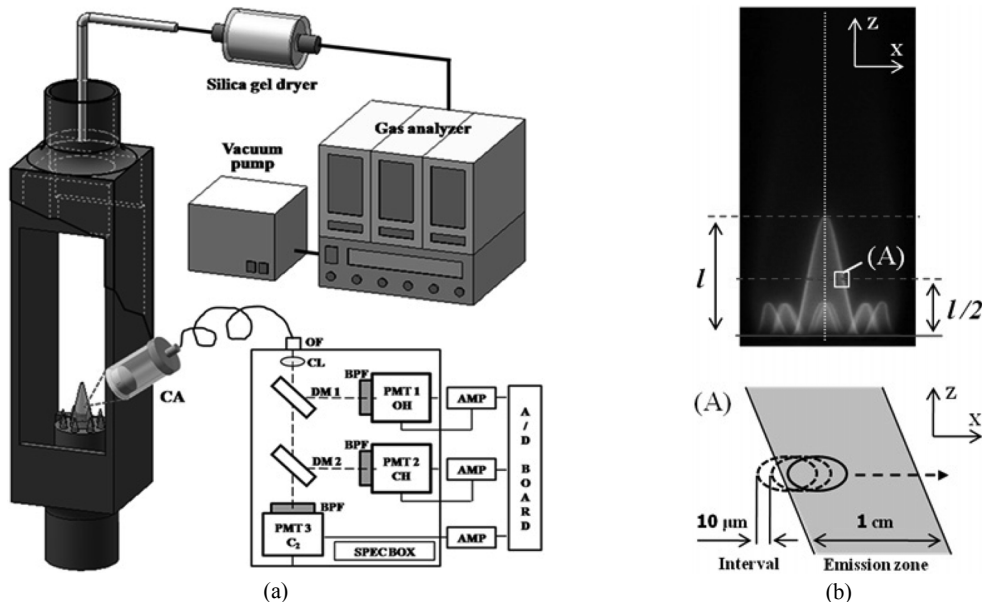


Fig. 3. Schematic of the experimental apparatus, (a) experimental setup for exhaust gas and local chemiluminescence intensity, (b) Measuring point of chemiluminescence on the emission zone.

었다. 일산화탄소(CO)는 연소기 출구부에서 포집하였다. 포집된 가스는 실리카겔과 거즈를 이용하여 수분과 soot를 제거하고 진공펌프로 가스분석기에 일정하게 공급(500 cc/min)하였다.

화염의 국소반응강도는 연소반응에서 발생한 화학발광을 검사체적이 $200 \mu\text{m} \times 1.6 \text{mm}$ 인 Cassegrain mirror로 집광하여 Optical fiber를 통해 Spec box로 보낸다. 화학발광은 파장에 따라 Dichroic mirror를 이용하여 분광한 후, 각각 OH^* ($306 \pm 14 \text{nm}$), CH^* ($431.4 \pm 1.5 \text{nm}$), C_2^* ($516.5 \pm 14 \text{nm}$)의 간섭필터를 사용하여 광전자증배관(Hamamatsu, R106UH)에서 검출된다. 검출된 아날로그 신호는 Amplifier와 지역통과필터를 거쳐 고속 AD-Board(NI-DAQ 4474)에서 데이터를 획득하였다[4]. Fig. 3(b)는 방출영역의 반응강도 측정위치를 나타내었다. 측정위치는 각 조건에 따라 변화된 화염길이의 1/2지점에서 반응영역을 따라 반경방향으로 마이크로이송장치로 $10 \mu\text{m}$ 간격으로 이동하며 측정하였다. 측정 시간은 10초이며 시간 분해능은 5 kHz이다. 10회 측정한 반응강도의 FWHM을 평균하여 방출영역의 두께로 정의하였다[10].

3. 결과 및 검토

3.1. 연소실 압력변화가 배출특성에 미치는 영향

Fig. 4는 각 연료(CH_4 , C_2H_4 , C_3H_8)에 대한 연소실 압력변화와 당량비에 따른 EICO를 나타낸 것이다. 모든 연료에서 당량비에 관계없이 연소실 압력이 감소할수록 EICO의 배출량이 증가하였으며 $P^* \leq 1$ 인 조건에서 배출량의 변화가 급격히 커지고 연료 간 배출량 차이 또한 증대되었다. 에틸렌(C_2H_4)은 모든 당량비 조건에서 배출량이 가장 높게 나타났으며 과농한 조건에서는 연소실압력 감소에 따른 배출량의 변화가 상대적으로 작게 나타났다. 반면 메탄(CH_4)은 당량비가 증가함에 따라 EICO의 배출량이 증가하였는데, 이러한 연료 간 경향차이는 에틸렌(C_2H_4)의 경우 이론 당량비 보다 과농한 조건에서 연소속도가 빠르고 반응이 활발하여[12,13] EICO의 배출량이 줄어들었기 때문이다. 프로판(C_3H_8)의 경우, EICO 배출량이 가장 낮았으며 다른 연료에 비해 연소실 압력변화에 작은 영향을 받았고, 모든 당량비에서 유사한 EICO 배출량을 나타내었다. 이는 탄소함량 비율은 프로판(C_3H_8)이 메탄(CH_4)보다 높지만 분자량이 상당히 커서 탄소함량 비율보다 높은 분자량의 영향이 지배적이기 때문이다. 그리고 에틸렌(C_2H_4)이 메탄(CH_4)보다 분자량이 크어도 EICO 배출량이 많은 이유는 탄소함량 비율이 메탄(CH_4)에 비해 상당히 높고, 메탄(CH_4)의 경우 탄소원자간

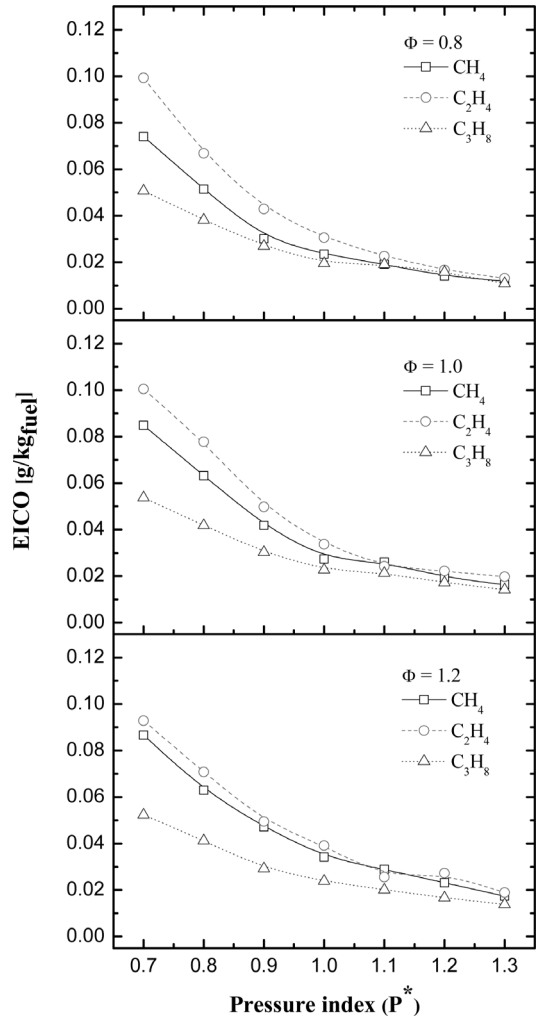


Fig. 4. CO emission as function of fuel (CH_4 , C_2H_4 , C_3H_8), pressure index and equivalence ratio.

결합력(347 kJ/mol)이 탄소와 수소원자간 결합력(414 kJ/mol)보다 낮은 단일결합구조(C-C)인데 반해 에틸렌(C_2H_4)은 결합력(611 kJ/mol)이 높은 이중결합구조로써 연소 시 미연성분을 많이 발생시키기는 연료이기 때문이다.

이렇듯, EICO 배출량은 당량비, 연소실압력 뿐만 아니라 연료의 분자량과 화학적 구조와 같은 연료 성질에 복합적인 영향을 받음을 알 수 있다. 이러한 연소실 압력변화에 따른 연료성질과 연소특성의 관계를 상세히 규명하기 위해 방출영역 분포를 계속하여 반응대를 분석해 볼 필요가 있다.

3.2. 연소실 압력변화가 화학종의 방출분포에 미치는 영향

반응영역에서 방출되는 화학종들의 분포를 분석

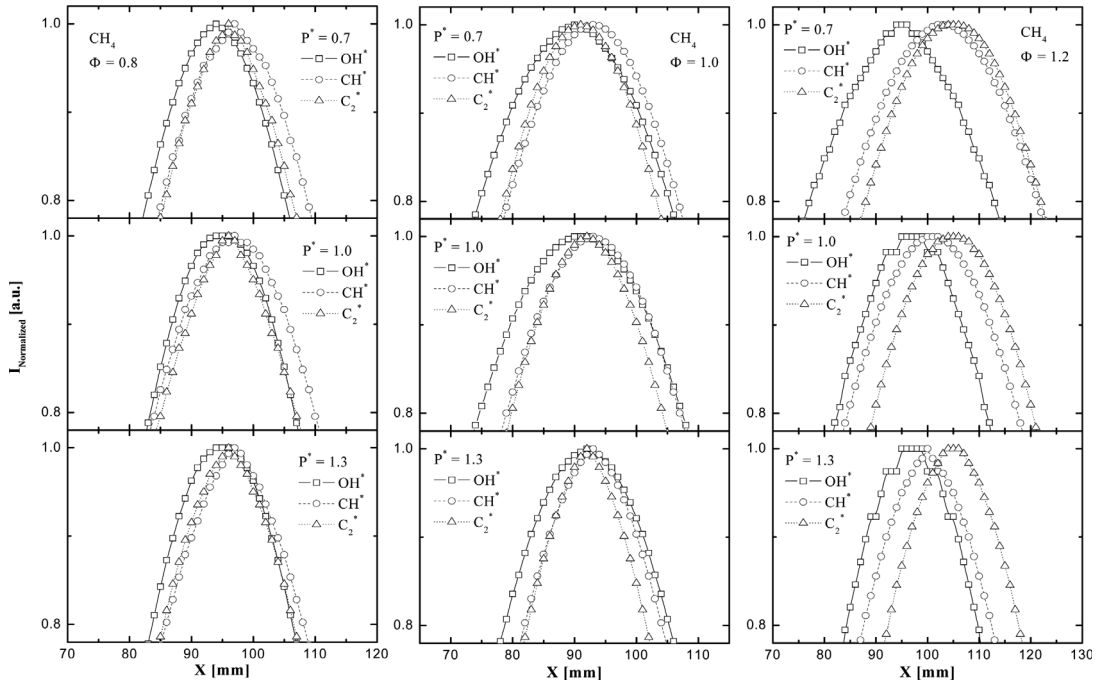


Fig. 5. Intensity profiles of chemiluminescence of CH₄ in a reaction zone with pressure index and equivalence ratio.

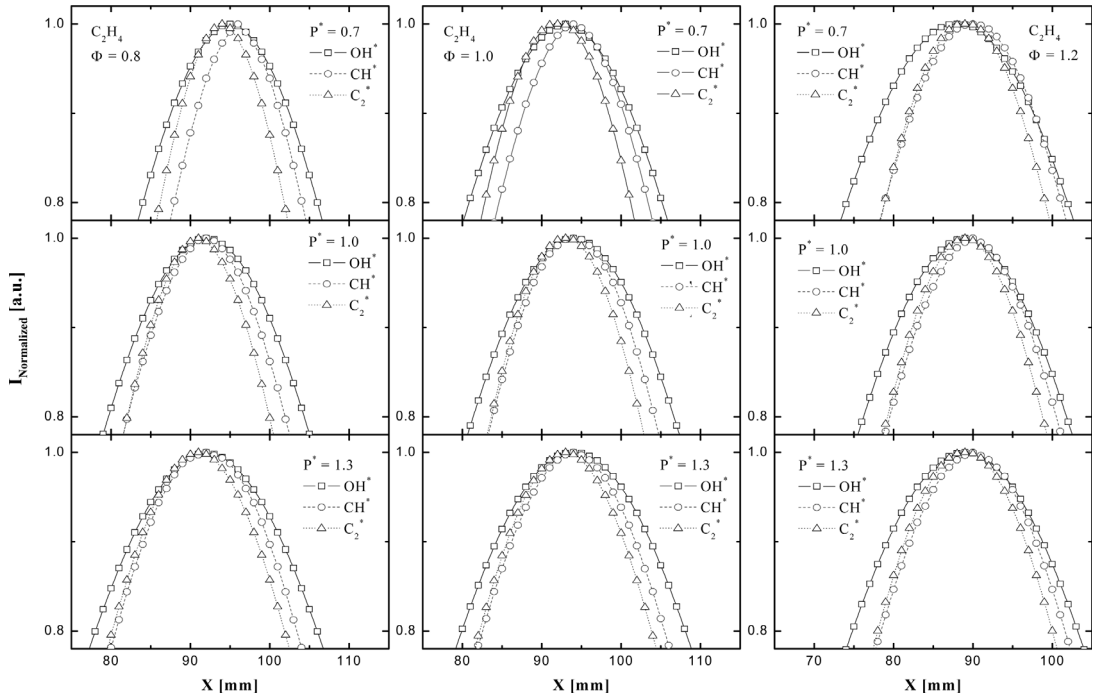


Fig. 6. Intensity profiles of chemiluminescence of C₂H₄ in a reaction zone with pressure index and equivalence ratio.

하고 방출영역의 두께를 측정하기 위해 국소 반응 강도를 측정하였다. Fig. 5~7은 연소실 압력과 당량비 변화에 따른 각 연료(CH₄, C₂H₄, C₃H₈)별 화염의 반경방향에 대한 3가지 화학종(OH*, CH*, C₂*)의 방

출분포를 나타낸 것이다. 화학종간의 강도차이로 인해 방출분포를 비교함에 어려움을 줄이기 위해 국소 반응강도를 무차원화 하였다.

방출영역에서 화학종의 분포는 연료 및 실험조건

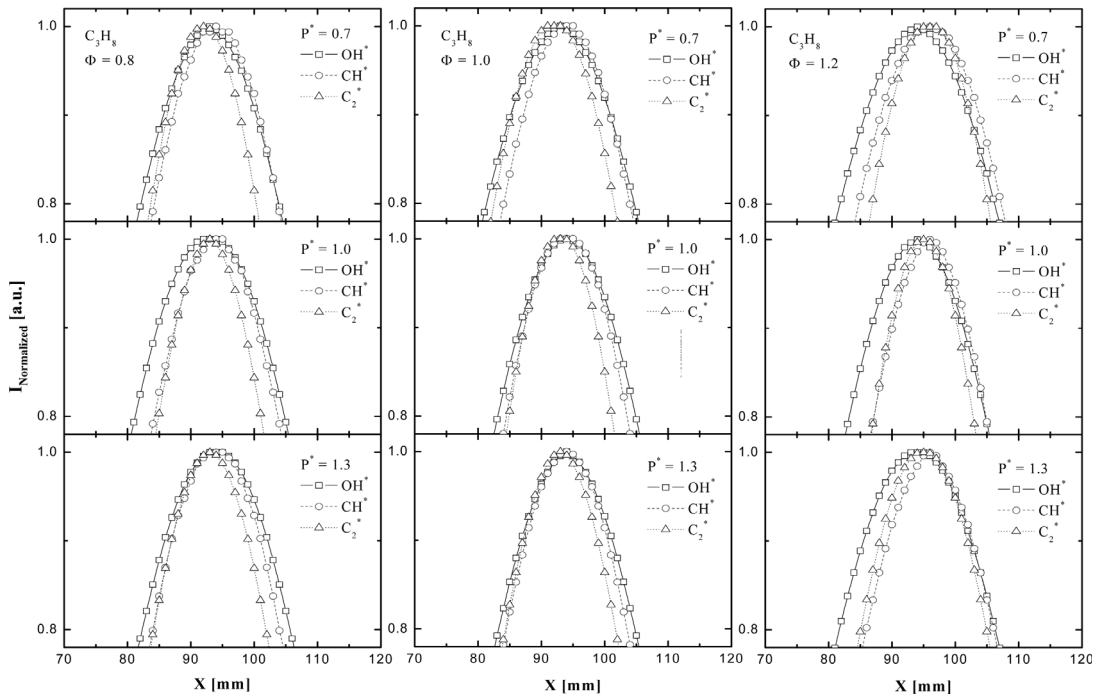


Fig. 7. Intensity profiles of chemiluminescence of C_3H_8 in a reaction zone with pressure index and equivalence ratio.

에 상관없이 OH^* 가 가장 넓게, C_2^* 가 가장 좁게 나타났으며 당량비가 증가할수록 모든 화학종의 방출영역이 두꺼워지고 최고치간 간격이 증대하는 경향을 보였다. 또한 모든 실험조건에서 측정 전영역의 화학종 방출분포는 OH^* 가 가장 먼저 방출되었다. 이는 OH^* 는 연소반응에서 화염대의 예열대에서 반응대까지 넓게 분포하며 반응초기에 나타나 오랜 시간 방출되는 반면, CH^* 와 C_2^* 의 경우 반응대에서만 짧은 기간 동안 방출되기 때문이다. 각 화학종의 자발광 강도 최고치의 경우, 메탄(CH_4)은 연소실 압력조건에 관계없이 $\Phi \leq 1$ 인 조건에서 $OH^*-C_2^*-CH^*$ 순으로 방출되었다. 이러한 결과는 대기압 상태에서 메탄화염의 당량비 별 방출영역의 분포 및 화학종의 자발광 강도 최고치를 관찰한 Kojima 연구팀의 연구와 일치하는 결과이다[10]. $\Phi > 1$ 에서는 압력변동에 따른 화염면의 진동으로 인해 화학종별 자발광 강도 최고치계측에 불확실성으로 $\Phi = 1.2$ 인 조건에서는 $OH^*-CH^*-C_2^*$ 순으로 나타났다. 반면에 에틸렌(C_2H_4)과 프로판(C_3H_8)의 경우, CH_4 에 비해 최고치들이 상대적으로 좁은 영역에서 관찰되었다. $\Phi \leq 1$ 인 조건에서 자발광 최고치가 $C_2^*-OH^*-CH^*$ 순으로, $\Phi = 1.2$ 인 조건에서는 $OH^*-C_2^*-CH^*$ 순으로 나타났는데 이러한 연료에 따른 경향 차이는 연료의 결합구조와 같은 고유의 화학적 특성에 따른 것으로 생각되며 이에 따른 추가적인 연구가 필요할 것이다.

방출영역에서 화학종의 분포는 연료에 관계없이

동일하게 나타났으나 화학종 별 반응강도최고치의 분포는 당량비나 연소실 압력의 영향보다는 연료의 화학적 특성에 많은 영향을 받았다. 이러한 각 화학종의 방출분포는 층류화염 반응대 내의 미연영역과 연소영역을 구분할 수 있는 지표가 될 수 있다.

3.3. 연소실 압력변화가 방출영역 두께에 미치는 영향

Fig. 8은 각 연료(CH_4 , C_2H_4 , C_3H_8)에 대한 연소실 압력변화와 당량비에 따른 CH^* 자발광의 방출영역 두께를 나타낸 것이다. 본 실험에서는 반응대에서 강도가 강하게 나타나는 CH^* 자발광을 이용하여 국소반응강도를 반경방향으로 측정하였고(Fig. 3(b)), 이 반응강도 분포의 반치폭(FWHM)을 이용하여 10 회 실험의 평균값으로 방출영역 두께를 구하였으며 결과에 대한 표준오차를 표시하였다. 메탄(CH_4)은 가능한 조건($\Phi > 1$)에서 방출영역 두께가 두껍게 나타났고 모든 당량비 조건에서 연소실압력이 감소할수록 반응대의 두께는 두꺼워졌다. 이러한 결과는 본 연구팀의 선행연구에서 보고하였던 연소실 압력이 대기압이하인 조건에서 화염길이 신장되고 화염면이 확장되면서[5] 반응대가 확장되어 방출영역의 두께를 늘여왔기 때문이다. 연소실 압력변화에 따른 방출영역 두께의 감소정도는 압력구간과 당량비에 따라 차이가 있었다. $\Phi \leq 1$ 조건에서 P^* 가 1.3에서 1.0로 낮아지면 방출영역의 두께는 $\Phi = 1$ 일 때 약 6.7%,

$\Phi=0.8$ 일 때 약 2.1% 증가하였고 P^* 가 1.0에서 0.7로 낮아지면 방출영역의 두께는 $\Phi=1$ 일 때 약 18.1%, $\Phi=0.8$ 일 때 약 4.5% 증가하여 $P^*\geq 1$ 일 때 보다 $P^* < 1$ 일 때 방출영역의 두께증가치가 컸다. 반면에 $\Phi > 1$ 조건에서는 P^* 가 1.3에서 1.0로 낮아지면 방출영역의 두께는 약 16.6% 증가하였고 P^* 가 1.0에서 0.7로 낮아지면 방출영역의 두께는 약 7.8% 증가하여 $P^*\geq 1$ 일 때 보다 $P^* < 1$ 일 때 방출영역의 두께증가치가 작았다. 이러한 경향은 과농한 화염은 연소실 압력이 대기압이하인 경우 미연가스의 분자확산이 활발해져[5] 반응대의 반응이 촉진되어 저압조건으로 발생하는 반응대 확장을 억제했기 때문이다.

에틸렌(C₂H₄)의 경우, 연소실압력이 감소할수록 방출영역의 두께가 얇아졌고, 당량비가 증가할수록

방출영역 두께에 대한 연소실압력의 영향이 줄어들었다. 이는 다른 두 연료(CH₄, C₃H₈)와 달리 에틸렌(C₂H₄)은 탄소원자의 결합구조가 결합력이 강한 이중결합구조로 되어 있고 연료의 탄소함량 비율이 높아 연소 시 미연성분을 많이 발생시키는 연료로서 $P^*\leq 1$ 인 경우, 반응대에서 연소될 수 있는 미연성분들이 유도 유동으로 인해 2차 화염영역에서 연소되거나[5] 연소실외부로 배출되기 때문에 사료된다. 그리고 에틸렌(C₂H₄)은 비교적 과농한 조건에서 연소속도가 빠르고 반응이 활발해져[12,13] $\Phi > 1$ 조건에서 유도 유동에 의한 연소실 압력영향을 적게 받게 된다. 이러한 결과는 앞서 언급한 에틸렌(C₂H₄)의 EICO 배출량의 경향에서도 확인할 수 있다.

프로판(C₃H₈)의 경우, 메탄(CH₄)과 동일하게 연소실압력이 증가할수록 방출영역의 두께가 감소하고 당량비가 증가할수록 방출영역의 두께가 증가하였지만, 메탄(CH₄)에 비해 연소실 압력변화의 영향을 적게 받았다. 이러한 경향은 Fig. 2에서 설명된 것처럼, 다른 연료에 비하여 상대적으로 분자량이 큰 프로판(C₃H₈)은 연소실 압력변화에 따른 차이가 상대적으로 작기 때문이다.

이를 통해 메탄(CH₄)과 프로판(C₃H₈) 화염에서는 연소실압력이 감소함에 따라 방출영역의 두께가 줄어들고 에틸렌(C₂H₄)의 경우, 연료특성으로 인해 다른 두 연료와 상이한 경향을 보임을 관찰할 수 있었다. 또한 분자량이 무거운 연료일수록 연소실압력의 영향을 적게 받는 것을 알 수 있었다.

위의 결과에서 각 연료의 특성 및 화학적 구조에 따른 연소실 압력 변화에 대한 연소현상의 차이를 관찰할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 연소실 압력변화가 연료성질과 당량비 변화에 따른 연소특성에 미치는 영향을 규명하기 위하여, EICO를 계측하고 국소반응강도를 측정하여 화학종의 방출분포와 방출영역의 두께를 측정함으로써 반응대를 분석하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 각 연료에 따른 EICO의 배출량은 모든 연료조건에서 연소실 압력이 감소할수록 증가하였으며, 연료의 분자량과 화학적 특성의 영향을 받았다.
- 2) 연료의 화학적 특성에 따라 반응영역에서 주요 라디칼의 방출분포는 차이를 보였으며 각 화학종의 방출영역두께는 연료 및 당량비, 연소실 압력 조건에 상관없이 OH*가 가장 두껍게 C₂*가 가장 얇게 나타났다.
- 3) 메탄(CH₄)의 CH* 방출영역 두께는 연소실 압

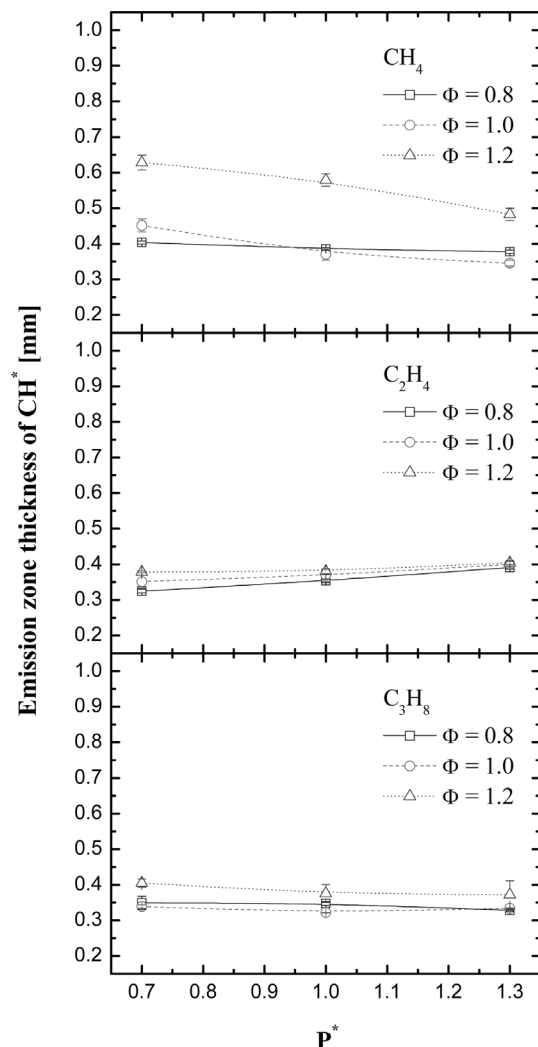


Fig. 8. Emission zone thickness of the CH* chemiluminescence in various fuel (CH₄, C₂H₄, C₃H₈), pressure index and equivalence ratio.

력이 감소할수록 두꺼워졌으며 $P^* < 1$ 조건에서 $\Phi > 1$ 인 경우, 방출영역의 두께 감소량이 적었다.

4) 에틸렌(C_2H_4)에서는 연료의 화학적 특성으로 인해 $P^* < 1$ 조건에서 미연성분이 연소실 외부로 배출되어 CH^* 방출영역 두께가 연소실 압력이 감소할수록 얇아졌다.

5) 프로판(C_3H_8)의 경우, 연소실 압력이 감소할수록 CH^* 방출영역 두께가 두꺼워졌으나 연소실 압력 변화에 따른 변화량이 적었다.

참고문헌

- [1] Soike, A., Dinkelacker, F., Leipertz, A., "Pressure Influence on the Flame Front Curvature of Turbulent Premixed Flame: Comparison Between Experiment and Theory", *Combustion and Flame*, Vol. 132, 2001, pp. 451-462
- [2] J.T. Agnew, L.B. Graiff, "The pressure dependence of laminar burning velocity by the spherical bomb method", *Combustion and Flame*, Vol. 5, 1961, pp. 209-219
- [3] H. Kobayashi, "Experimental study of high-Pressure turbulent premixed flames", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 132, 2002, pp. 375-387
- [4] Liakos, H.H., Founti, M.A. and Markatos, N.C., "The relative importance of combustion mechanisms in industrial premixed flames under high pressure", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 20, 2000, pp. 925-940
- [5] 김종률, 손제하, 노영구, 김운동, 최경민, 김덕출, "부분 예혼합화염의 연소실 압력이 연료별(메탄, 에틸렌, 프로판) 연소특성과 국소화염 반응에 미치는 영향", *한국연소학회지*, Vol. 15, 2010, pp. 29~36
- [6] Andrew, G. E., Bradely, D., "The Burning Velocity of Methane-air mixtures", *Combustion and flame*, Vol. 19, No. 275, 1972
- [7] J. Furukawa, E. Harada, "Local reaction zone thickness of a high intensity turbulent premixed flame", *Symposium (International) on Combustion*, Vol. 23, 1991, pp. 789-794
- [8] Gottgen, J., Mauss, F., Peter, N., "Analytic Approximations of Burning Velocities and Flame Thickness of Lean Hydrogen, Methane, Ethylene, Ethane, Acetylene and Propane Flames", *Twenty-fourth Symposium (international) on Combustion*, The Combustion Institute, 1992, pp. 129-135
- [9] 권순익, Philip J. Bowen, "메탄-공기 예혼합기에서의 층류 화염속도 및 화염두께 예측", *대한기계학회논문집 B권*, 제27권, 제9호, 2003, pp. 1201-1208
- [10] Jun Kojima, Yuji Ikeda, Tsuyoshi Nakajima, "Basic aspects of OH(A), CH(A), and $C_2(d)$ chemiluminescence in the reaction zone of laminar methane-air premixed flames", *Combustion and flame*, Vol. 140, 2005, pp. 34~45
- [11] R.C Reid, J.M. Prausnitz, B.E. Poling, *The properties of gases and liquids*, 4, 1986, pp. 577-632
- [12] G. J. Gibbs, H. F. Calcote, "Effect of Molecular Structure on Burning Velocity", *Journal of Chemical and Engineering*, Vol. 4, 1959, pp. 226-237
- [13] Hua Wei Huang, Yang Zhang, "Digital colour image processing based measurement of premixed $CH_4 + air$ and $C_2H_4 + air$ flame chemiluminescence", *Fuel*, Vol. 90, 2011, pp. 48-53