

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2009.33.5.365

메탄/공기 화염에서 연소실 압력변동이 연소특성과 국소 반응강도에 미치는 영향

김종률* · 최경민[†] · 김덕줄**

(2009년 1월 13일 접수, 2009년 4월 2일 수정, 2009년 4월 6일 심사완료)

Influence of Changing Combustor Pressure on Combustion Characteristics and Local Reaction Intensity in the CH₄/Air Flames

Jong-Ryul Kim, Gyung-Min Choi and Duck-Jool Kim

Key Words: Combustion Characteristics(연소특성), Changing Combustor Pressure(연소실압력변동), Local Reaction Intensity(국소반응강도)

Abstract

The influence of combustor pressure on the local reaction characteristics of CH₄/air flames was investigated by measurements of local chemiluminescence intensity. Induced flow flames are often applied to the industrial boiler systems and incinerator in order to improve heat transfer and prevent exhaust gas leakage. In order to investigate combustion characteristics in the induced flow pattern, the combustor pressure index(P^*) was controlled in the range of 0.7~1.3 for each equivalence ratio in the present combustion system, where P^* is defined as the ratio of absolute pressure to atmospheric one. Relationship between local reaction intensity and pressure index have been investigated by simultaneous CH^{*}, C₂^{*} and OH^{*} intensity measurements. It could be observed that flame length became longer with decreasing P^* from CH^{*} chemiluminescence intensity of axial direction. The mean value of C₂^{*} and CH^{*} chemiluminescence intensities, which indicates reaction intensity in the CH₄/air flames, decreased with decreasing pressure index for $\phi \leq 1$, but increased with decreasing pressure index for $\phi > 1$. C₂^{*}/CH^{*} intensity ratio, which can be a good marker to demonstrate local equivalence ratio, was almost same for $\phi \leq 1$ regardless of pressure index change, while they showed high level for lower pressure index for $\phi > 1$ conditions.

기호설명

- P^* : 압력지수(Pressure index)
- Φ : 당량비(Equivalence ratio)
- I : 평균강도(Mean intensity)
- Q_s : 주위 공기류 유량(Surrounding air flow rate)
- Q_M : 혼합기 유량(Mixture flow rate)

1. 서론

열전달 촉진, 연소가스의 누출방지 및 배기효율의 향상을 위해 산업용 보일러, 소각로, 가정용 의류 건조기 등은 유도 팬을 통하여 연소가스를 외부로 배출한다. 이때 형성된 화염을 Induced flame이라 하며 대기압보다 수십 torr 정도 낮은 압력에서 연소가 이루어진다. 이러한 유도 유동장에서 형성된 화염은 연소실 압력에 따라 화염 안전화, 배출 특성이 크게 영향을 받으므로 고효율 연소 시스템의 운영을 위하여 상세한 조사가 필요하다. 연소실 압력변동에 따른 연소특성을 관찰한 대표적인 연구로는 고압 연소 조건에서

[†] 책임저자, 회원, 부산대학교 화력발전에너지기술분석센터

E-mail : choigm@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2476 FAX : (051)512-5236

* 부산대학교 기계기술연구소

** 회원, 부산대학교 기계공학부

연소실 압력이 증가함에 따라 연소 반응률과 온도가 증가하는 관계를 규명한 연구⁽¹⁾가 수행되었고, 난류화염에서 연소실 압력과 화염구조의 관계를 해명한 연구⁽²⁾도 보고되고 있다. 고온·고압의 조건하에서 다양한 연료에 대해 당량비의 변화에 따른 층류 연소속도계측을 통하여 변화를 관찰한 연구^(3,4)가 보고되었고, Kobayashi 등⁽⁵⁾은 난류 예혼합화염에서 화염면의 난류연소속도 및 화염구조에 압력이 미치는 영향을 조사하였다. 그리고 모델링을 통하여 고압의 연소조건에서 질소산화물의 생성 기구를 관찰⁽⁶⁾한 연구도 수행되었다. 그러나 이러한 연구들의 대부분은 대기압 이상의 조건에 국한 되고 Induced flame의 연소조건인 대기압 이하의 압력 조건에서 압력변동이 연소특성에 미치는 영향을 조사한 연구는 찾아보기 어렵다. 본 연구팀의 선행 연구에서 연소실 압력을 대기압 이하로 감압한 경우에는 화염대가 넓고 균일하게 분포하며, 주위 공기류의 유입이 촉진되어 국소 고온영역이 제거되어 저 NO_x 연소가 실현된다고 보고하였다.⁽⁷⁾ 그러나 압력변동에 따른 저 NO_x 메커니즘 및 연소특성에 관해서는 아직도 이해가 부족하다. 본 연구에서는 국소 라디칼 자발광 강도 계측을 통하여 압력변동이 국소 반응강도에 미치는 영향을 관찰하였다. 비접촉식 국소 라디칼 자발광 강도 계측의 선행연구를 살펴보면 Kojima, Ikeda 등^(8,9)은 층류와 난류메탄화염에서 국소지점과 전체화염의 자발광 특성과, 자발광비와 당량비의 관계에 대한 연구를 통하여 OH^* , CH^* , C_2^* 등이 이론공연비 부근에서 최고 강도치를 가지며, C_2^*/CH^* , C_2^*/OH^* 그리고 CH^*/OH^* 등의 자발광비가 $\phi=0.8\sim 1.5$ 의 영역에서 선형적으로 증가함을 밝혀냈다. Docquier등은 압력과 당량비 그리고 국소영역과 전체화염의 자발광 특성을 비교 실험하였다.⁽¹⁰⁾ Higgins^(11,12) 등은 실험과 수치해석적인 연구를 통하여 메탄화염에서 온도와 당량비는 증가할수록 그리고 압력은 감소할수록, 자발광 강도가 커짐을 밝혔다. 자발광 계측의 정성적인 연구와 함께 PLIF 기법을 통한 정량적인 측정도 병행되고 있다. OH^* 와 CH^* 는 반응영역과 열 방출의 지표로 사용되고, 최고 강도는 화염면 부근에 위치하므로 화염의 구조와 국소 연료의 산화과정을 설명하는데 쓰이고 있다.^(13,14) 최근 Choi등에 의해 실험과 수치 해석적 방법 통하여 층류와 난류화염에서 CH^* 의 농도분

포와 열방출율의 상관관계 비교를 통하여 CH^* 가 열방출율의 중요한 지표가 된다고 밝혔다.⁽¹⁵⁾ 따라서 본 연구에서는 난류화염의 국소 영역에 있어서 실시간적 계측을 위해서 국소 자발광 측정을 수행하여 부분예혼합화염에서 연소실 압력 변동에 따른 연소특성과 국소 반응강도에 관한 상세 분석 및 낮은 압력조건에서 저 NO_x 메커니즘을 규명하였다.

2. 실험장치 및 조건

2.1 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 실험 장치는 크게 연소실 압력을 조절하는 부분과 혼합기를 공급하는 부분으로 구성된다. 연소실내 대기압 이상의 압력을 형성할 경우, 고압 블로어를 이용하여 연소실 입구에서 공기를 공급하고 출구밸브를 조절하여 압력을 형성하고, 대기압 이하의 압력을 형성할 경우, 출구부에서 진공펌프를 이용하여 연소실의 공기를 외부로 배출하고 입구밸브를 조절하여 압력을 형성하게 된다. 연소실에 공급되는 주위 공기류는 질량유량계(KOFLOC HFC-300)를 통하여 계측되어지고, 게이트밸브로 조절하여 연소실 압력을 제어하였다. 이때 모든 압력 조건(-30 ~ 30kPa)에서 연소실내에 동일한 유량(140L/min)을 공급하였다.

혼합기는 공기와 연료를 질량유량계(KOFLOC MFC-3660)로 조절하여 혼합실에서 생성된다. 혼합실내에는 스테인리스 볼과 허니콤을 설치하여 혼합기의 유동을 정류하였고, 역화를 방지하는 기능으로도 사용되었다. 다양한 압력 변화에 대한 안정적인 화염 형성을 위해 디퓨저와 파일릿

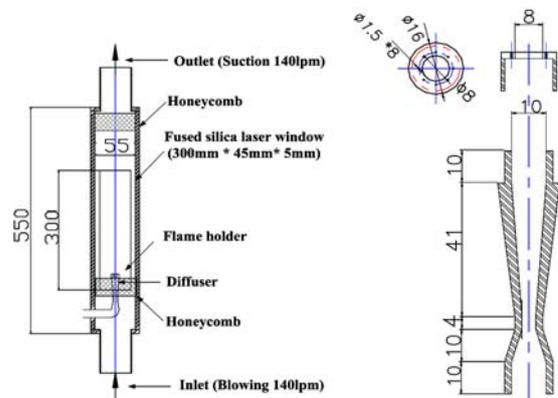


Fig. 1 Detail diagrams of combustor and mixture nozzle

Table 1 Experimental conditions

Parameter	Range
ϕ	0.9 ~ 1.2
P^*	0.7 ~ 1.3
Axial distance(mm)	0 ~ 50 (2mm)
Radial distance(mm)	0 ~ 15 (1mm)
$Q_S = 140(l/min)$ $Re = 1104.6$	
$Q_M = 10.6(l/min)$ $Re = 722.2$	
Fuel : CH ₄ Oxidizer : Dry air	

화염용 인젝터가 부착된 보염기를 사용하였다.

Fig. 1는 실험에서 사용한 연소기와 디퓨저를 상세히 나타낸 것이다. 연소기는 55mm×55mm×500mm인 정방형이며, 연소기 전·후면에 광학계측용 가시화창(45mm×300mm×5t, $\lambda=200\sim 2000nm$)을 설치하였다. 화염장의 온도 계측용 프로브를 삽입하기 위하여 10mm 간격의 측정 홀($d=5mm$)을 연소기 측면에 가공하였다. 디퓨저는 혼합가스의 분사압력과 분사속도를 낮추고 대기압이하의 조건에서 화염의 안정 영역을 넓히기 위해 사용하였다. 보염기는 압력변동에 대하여 화염의 안정화를 위해 중심 출구($d=8mm$)를 중심으로 반경 1.5mm인 보조 인젝터를 8개 설치하여 파일럿 화염을 형성하였다. 실험에서 연료는 순도 99.99%의 메탄(CH₄)을 사용하였으며 연소용 공기로는 습기가 제거된 건공기를 사용하였다.

연소실 압력변동에 따른 혼합기의 유동 특성을 관찰하기 위하여 X형 열선을 이용하였으며, 각 측정 점에서의 속도 성분은 열선 프로브를 사용하여 정온도 방식으로 작동하는 열선 풍속계(Constant Temperature Anemometer: TSI - IFA300)에 연결하여 측정하였다. 통계처리에 사용된 자료는 추출간격 100 μs 로 8192개씩의 자료를 20회 측정하여, 한 측정지점에서 총 163840개의 자료를 표본 하여 앙상블 평균(ensemble average)을 취하였다.

질소산화물(NO_x)의 농도를 측정하기 위해서 화학 발광식 가스분석기(SHIMADZU, NOA-7000)를 사용하였다. 질소산화물(NO_x)의 측정을 위하여 스테인리스 샘플링 프로브를 사용하였으며 프로브의 과열을 막기 위해 수냉식 2중관을 설치하였다. 프로브의 샘플링 홀의 크기는 1mm로 하였고, 연소가스의 포집 위치는 압력지수, 당량비에 따

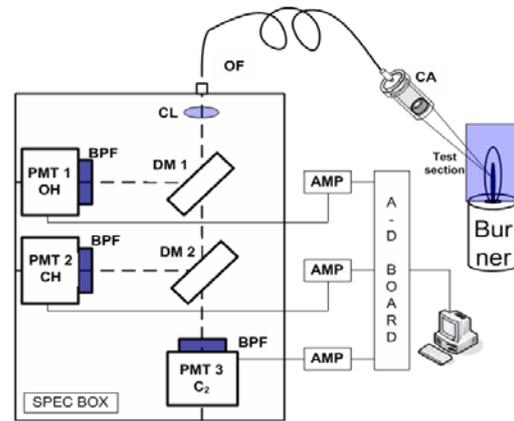


Fig. 2 Experimental setup for chemiluminescence spectra measurement

라 화염길이의 2배되는 지점부터 연소기 출구까지 10mm 간격으로 포집하였다. 포집된 연소가스는 soot와 수분을 실리카겔과 거즈를 통해 여과 후 가스 분석기에 일정하게 공급(500cc/min)하였다. 측정된 값은 EINO_x (Emission Index NO_x)로 표시하였고 측 방향 측정위치에 대하여 평균값을 취하였다.

화염 내부의 온도를 측정하기 위한 열전대(R-type)는 직경 300 μm 를 사용하였고, 세라믹제로 단열처리 되어진 2공 튜브로 소선을 분리하였다. 온도 측정위치는 압력지수와 당량비에 따른 화염길이의 1/2 지점에서 반경방향 1mm 간격으로 측정하였다. 각 지점에서 안정된 온도 값을 얻기 위해 5회 측정치의 평균값을 취득 하였다.

Fig. 2는 국소 자발광 강도 계측을 위한 광학계이다. 본 실험에서는 높은 공간 분해능을 가진 Cassgrain mirror system을 사용하여 OH*, CH*, C₂* 자발광 동시 계측을 하였다.⁽¹⁶⁾ 화염의 화학발광은 Cassegrain mirror에서 집광하여 광파이버를 통해 자발광 파장에 따라 OH 밴드, CH 밴드 다이크로익 미러를 이용하여 분광되고, OH*(0,0), CH*(0,0) 및 C₂*(0,0) 밴드의 자발광을 획득하기 위한 각각 306±14nm, 431.4±1.5nm, 516.5±2nm의 간섭필터(Optical Interference Filter)를 지나, 광전자 증배관(Photomultiplier : Hamamatsu-R106UH)에서 검출된다.^(16,17) 검출된 아날로그 신호는 증폭기와 저역통과필터(LPF-1kHz)를 거쳐 고속 AD-변환기(NI-DAQ 4474)에서 데이터를 획득한다. 이때 시간 분해능은 5kHz이고, 10초간 측정하였다.

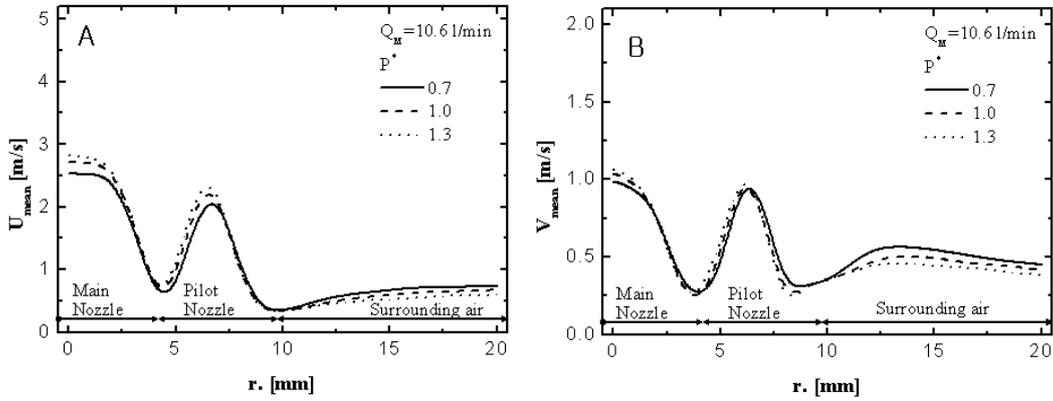


Fig. 3 Distribution of mean velocity as function of pressure index (A: Axial velocity, B: Radial velocity)

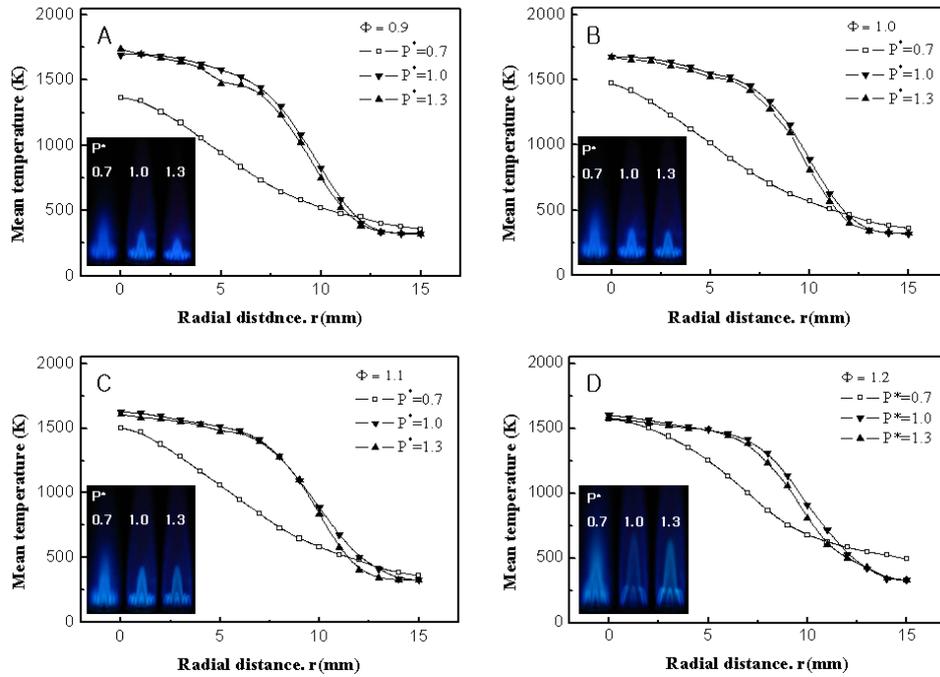


Fig. 4 Distribution of mean temperature and direct photograph as a function of pressure index and equivalence ratio

2.2 실험조건

실험에서 화염의 구조 변화와 배출특성을 관찰하기 위하여 당량비(Φ), 압력지수($P^* = P_{abs}/P_{atm}$)를 조절하였다. 당량비는 연료와 공기량을 조절하여 0.9~1.2까지 다양하게 형성하였다. 압력지수는 각 당량비 조건에서 0.7~1.3까지 조절하였다. 압력은 연소실 입출구부 100mm 지점에 압력센서(Digitron-2000P)를 설치하여 측정하였고, 본 연소시스템에서는 P^* 가 0.7 이하, 1.3 이상의 조건에서 연소실 내부압력이 약하게 진동하여 정압조건을

유지하기 힘든 조건이 존재하였으므로, 본 연구에서는 P^* 가 0.7 이상, 1.3 이하의 조건에서 실험을 수행하였다. 실험 조건은 Table 1에 나타내었다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 연소실 압력 변동에 따른 유동 특성

Fig. 3은 연소실 압력에 따른 혼합기 ($Q_M = 10.6$ L/min)의 비연소시 대표 단면(노즐 5mm 하류 단면)에 대한 비연소시 반경방향 유속 분포를 나타

낸 것이다. 대표단면에서 축방향 속도(U)와 반경방향 속도(V)는 유사한 경향이 나타내었다. 연소실 압력조건을 만족시키기 위하여 주위 공기류의 유속은 압력이 낮을수록 증가하지만, 혼합기의 유속은 연소실압력의 영향으로 반대의 경향을 나타낸다. 축 방향속도에서 혼합기의 경우, 노즐 중심에서 약 10% 차이를 나타내며, 반경방향에서는 약 7%의 차이를 나타내고 있다. 전체적으로 연소실 압력의 강하와 함께 속도 피이크 영역이 반경방향으로 이동함을 관찰할 수 있다. 이 같은 현상은 화염형상에 영향을 미칠 것으로 예상된다.

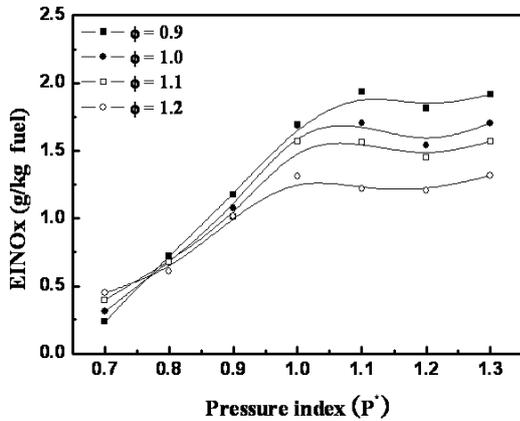


Fig. 5 Averaged nitric oxide emission as functions of pressure index and equivalence ratio

3.2 연소실 압력 변동에 따른 연소 특성 관찰

Fig. 4는 당량비와 압력지수에 따른 평균온도분포와 직접사진을 나타낸 것이다. 직접 사진에서 화염은 이중 구조 형태를 나타내며, 내염은 밝고, 외염은 휘도가 낮은 청염이 관찰된다. 외염보다 내염에서 연소실 압력 변동에 민감하게 반응하고, 직접사진에서 화염길이는 $P^* < 1$ 조건이 $P^* \geq 1$ 조건보다 상대적으로 화염 길이 변화가 크며, 화염면이 넓게 분포한다. 연소실 압력의 강하와 함께 축방향유속이 다소 감소하였으나, 화염의 길이는 길어진 현상은 유속보다는 연소실 압력이 화염형상에 미치는 영향이 크다는 것을 설명한다. 한편, 화염길이를 살펴보면, 과농조건 보다 희박조건에서 상대적으로 압력의 영향을 크게 받는 것이 관찰 된다.

평균온도 분포는 $P^* \geq 1$ 경우, 좁은 고온 영역이 나타나며, $P^* < 1$ 경우는 화염신장으로 인해 전체적인 온도장이 균일하게 분포함을 관찰할 수 있다. 또 반경방향의 온도분포가 완만한 변화를 보이는 조건($P^* < 1$)과 반경방향 6mm 부근에서 급변하는 조건($P^* \geq 1$)으로 양분할 수 있다. 이러한 두 그룹간의 온도차는 희박조건에서 크게 나타나고, 당량비가 증가할수록 작아진다. 특히, 당량비 1.2에서 대기압 이하 조건과 대기압 이상 조건의 국

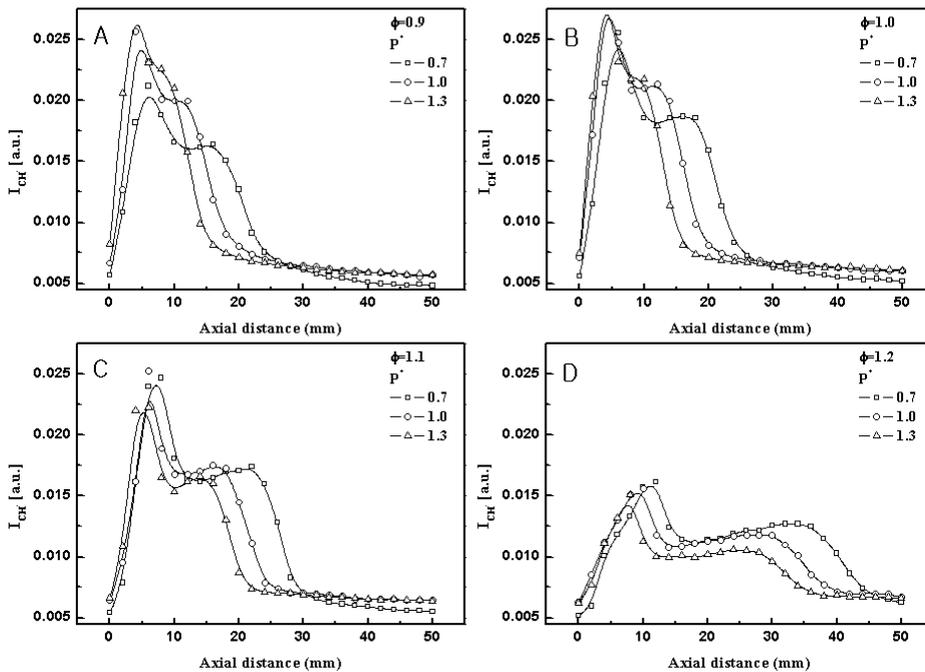


Fig. 6 Distribution of chemiluminescence intensity of CH^* as functions of pressure index and equivalence ratio (Axial)

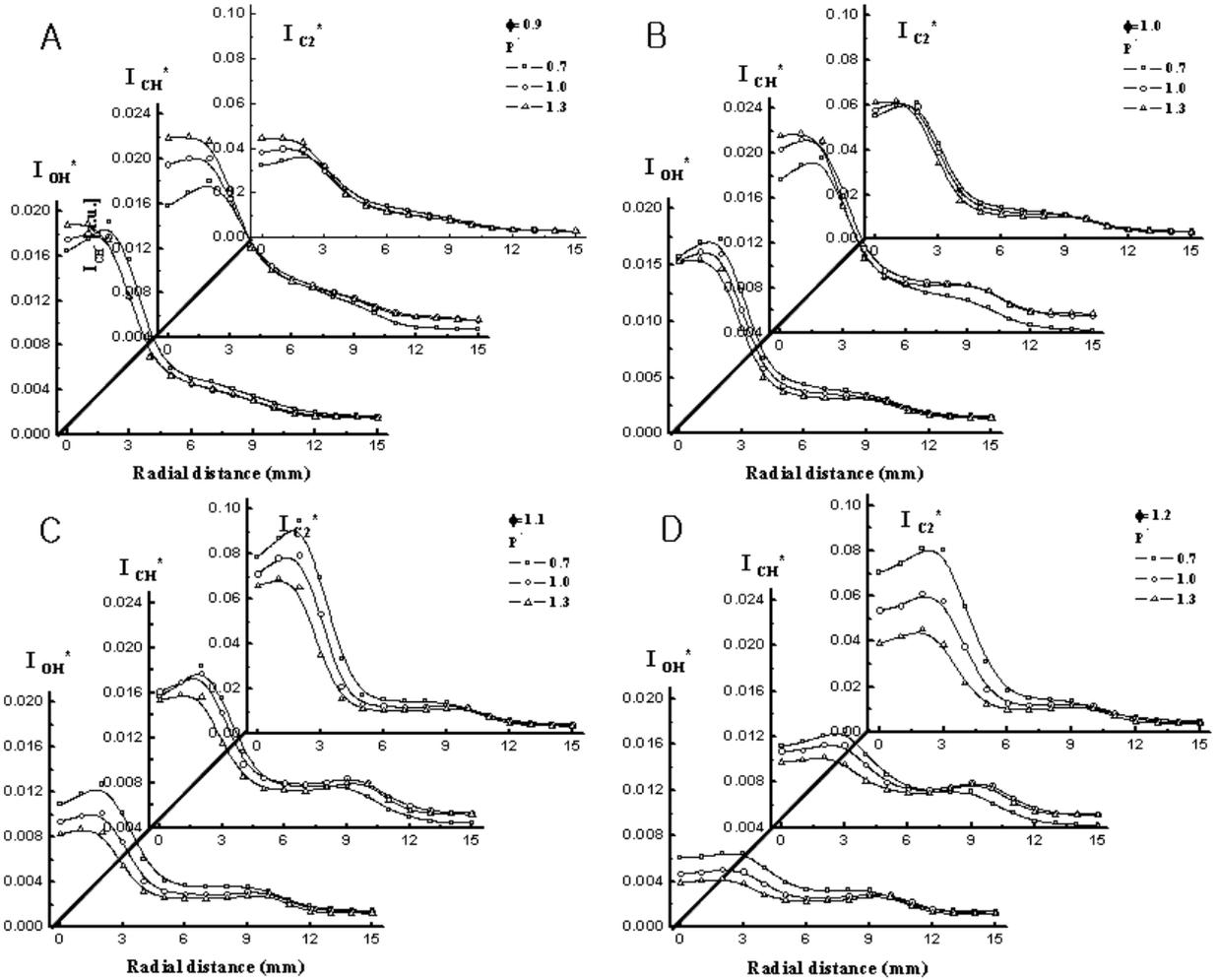


Fig. 7 Distribution of chemiluminescence intensity of OH*, CH* and C2* as functions of pressure index and equivalence ratio

소 온도차이가 현저히 감소함을 관찰 할 수 있다. 이러한 형상은 후술하는 연소 반응대의 강도 계측 결과를 이용하여 설명 할 것이다.

Fig. 5는 각 실험조건에 따른 NO_x의 농도분포를 나타낸 것이다. NO_x의 배출량은 전체적으로 압력지수가 감소함에 따라 약 30% 정도 감소하였다. 이것은 대기압 이하의 압력변동 조건에서는 연소실 압력이 연소반응 영역의 분포를 변화하여 저 NO_x 연소가 일어났기 때문이다. P* ≥ 1 경우, 당량비가 증가할수록 EINO_x가 감소하고, P* < 1 경우에는 압력지수가 감소함에 따라 EINO_x가 감소하고, 과농조건보다 희박조건에서 감소율이 크게 나타났으며, 특히 P*=0.7에서는 대기압 이상 조건에서와 상반된 경향이 관찰 된다. 당량비 변화에 따른 연소실 압력변동과 NO_x 배출 특성과의 관계를 규명하기 위해 연소실 압력변동에

따른 화염의 국소 반응강도를 측정함으로써 NO_x 배출과 압력변동과의 상관관계를 밝힐 수 있을 것이다.

3.2 연소실 압력변동이 국소 반응 강도에 미치는 영향

Fig. 6는 축방향의 CH* 국소 자발광의 평균 강도를 나타낸 것이다. 반응강도 Peak값의 1/2에 해당하는 두 영역간의 거리를 주반응 영역 길이라고 하면, 압력지수가 감소할수록 반응대가 확장되는 것을 관찰 할 수 있으며, 과농영역에서 뚜렷하게 나타나고 있다. 희박조건에서는 압력지수가 높은 조건에서 최대 Peak 치를 나타내나, 과농조건에서는 압력지수가 낮은 경우의 강도가 대기압 이상 압력 조건을 초과하고 있다.

Fig. 7은 압력지수와 당량비에 따른 반경 방향

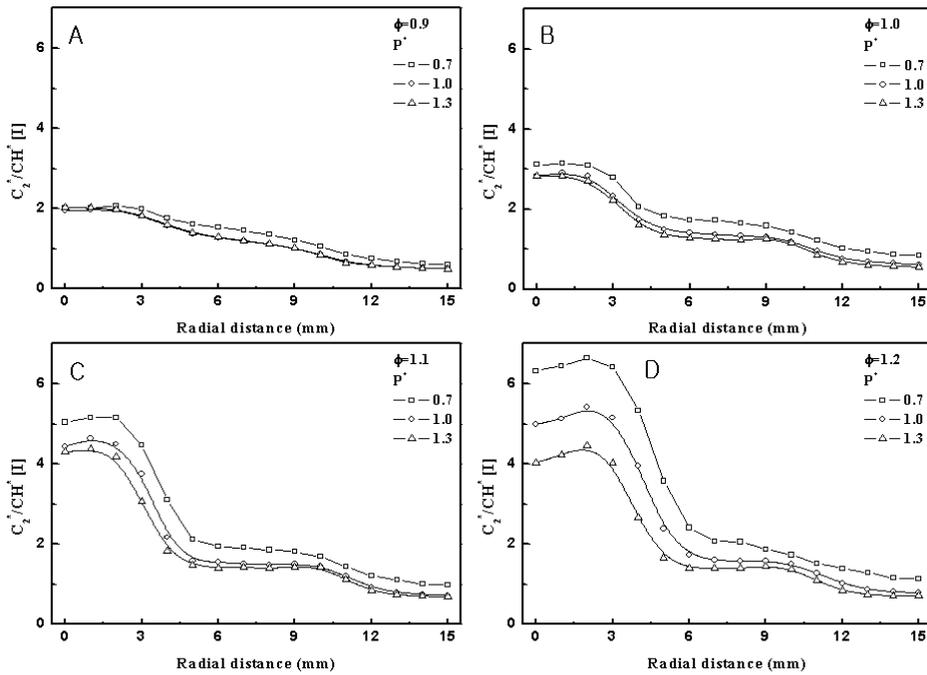


Fig. 8 Correlation of chemiluminescence intensity ratios (C_2^*/CH^*) with pressure index and equivalence ratio

의 국소 자발광 분포를 나타낸 것이다. 화염중심 부에서 높은 강도를 보이고, Peak 치는 화염의 중심보다 화염면 부근에서 나타났다. C_2^* 강도는 당량비가 증가함에 따라 증가하고, CH^* , OH^* 는 감소하는 경향을 보이고 있다. 반경방향 강도 분포 또한 축 방향 결과와 유사하게 과농하고, 낮은 연소실압력조건에서 연소반응이 활성화되는 것이 관찰 되었다. 이는 과농한 조건에서 CH_4 성분, 주위 압력이 낮아짐에 따라 확산속도가 증가하여 주위 공기류와 2차 반응이 촉진되어 확산 화염 형태의 연소가 활성화 되었기 때문이다. 이 결과는 앞의 평균온도와 $EINO_x$ 결과에서 관찰된 과농하고 낮은 압력 조건에서의 현상을 뒷받침해 준다.

Fig. 8은 반경 방향 C_2^*/CH^* 를 당량비와 압력지수에 따라 나타낸 것이다. C_2^*/CH^* 는 국소 당량비의 지수가 된다. 전체적으로 압력지수가 낮은 조건에서 높은 값이 나타나고, 과농조건에서 이러한 현상은 두드러진다. 이와 같은 현상은 그림 6에서 설명한 낮은 압력 조건에서 CH_4 의 확산속도 증가에 기인한다. $\phi=0.9$ 에서는 압력지수가 국소 당량비에 미치는 영향이 작고, 당량비가 증가함에 따라 미연 연료 성분의 확산 화염 모드 연소가 활성화됨을 알 수 있다. 위 결과로부터 이

는 과농조건에서 압력 변동을 통해 효율적으로 연소반응 제어가 가능함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 연소실 압력변동에 따른 유도유동화염의 연소특성과 국소 반응강도에 미치는 영향을 조사하기 위하여 유속 측정, $EINO_x$, 평균온도분포 및 화염형태를 관찰 하였고, 국소 반응특성은 CH^* , C_2^* 와 OH^* 의 국소 자발광을 동시 계측하여 분석하였다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) $P^* \geq 1$ 과 $P^* < 1$ 의 화염구조는 당량비 변화에 관계없이 확연히 다른 특성을 나타낸다.
- (2) P^* 의 감소와 함께 $EINO_x$ 는 저감되나, $P^* \geq 1$ 조건과 $P^* = 0.7$ 조건에서 당량비에 따른 $EINO_x$ 배출 특성은 상반된다.
- (3) 과농하고 $P^* < 1$ 의 조건에서 미연 연료의 빠른 확산에 의해 주위공기와의 확산화염 형태의 연소가 활성화 되었다.
- (4) 유도유동화염의 과농한 조건에서는 연소실 압력 변동을 통한 연소반응제어 가능성이 관찰 되었다.

후 기

이 논문은 에너지관리공단 학술진흥사업의 지원에 의하여 연구되었음. (2004-E-ID03-P-02-0-000)

참고문헌

- (1) Liakos, H.H., Founti, M.A. and Markatos, N.C., 1999, "The Relative Importance of Combustion Mechanisms in Industrial Premixed Flames Under High Pressure," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 20, pp. 925~940.
- (2) Soike, A., Dinkelacker, F. and Leipertz, A., 2001, "Pressure Influence on the Flame Front Curvature of Turbulent Premixed Flame: Comparison Between Experiment and Theory," *Combustion and Flame*, Vol. 132, pp. 451~462
- (3) Metghalchi, M. and Keck, J.C., 1980, "Laminar Burning Velocity of Propane-Air Mixtures at High Temperature and Pressure," *Combustion and Flame*, Vol. 38, pp. 143~154.
- (4) Metghalchi, M., 1982, "Burning Velocities of Mixtures of Air with Methanol, Isooctane, and Indolence at High Pressure and Temperature," *Combustion and Flame*, Vol. 48, pp. 191~200.
- (5) Kobayashi, H., 2002, "Experimental Study of High-Pressure Turbulent Premixed Flames," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 26, pp. 375~387.
- (6) DOUGLAS THOMSEN, D., 1999, "Modelling of NO Formation in Premixed, High-Pressure Methane Flame," *Combustion and Flame*, Vol. 119, pp. 307~318.
- (7) Jong-Ryul Kim, Gyung-Min Choi and Duck-Jool Kim, 2005, "New Approach to Low Combustion by Changing Combustor Pressure," *KSME(B)*, Vol. 29, No. 10, pp. 1148~1155.
- (8) Ikeda, Y., Kojima, J., Hashimoto, H. and Nakajima, T., 2002, "Detailed Local Spectra Measurement in High-Pressure Premixed Laminar Flame," 40th Aerospace Sciences Meeting, paper AIAA-2002-0191.
- (9) Ikeda, Y., Kojima, J. and Nakajima, T., 2002, "Chemiluminescence Based Local Equivalence Ratio Measurement in Turbulent Premixed Flames," 40th Aerospace Sciences Meeting, paper AIAA-2002-0193.
- (10) Docquier, N., Belhafaoui, S., Lacas, F., Daraba, N. and Rolon, C., 2000, *Prog. Combust. Inst.*, Vol. 28, pp. 765~1774.
- (11) Higgins, B., McQuary, M.Q., Lacas, F., Rolon, J. C., Darabiha, N. and Candel, S., 2001, "Systemic Measurements of OH Chemiluminescence for Fuel-Lean," High-Pressure, Premixed, Laminar Flames, *Fuel*, 80, pp. 67~74.
- (12) Higgins, B., McQuary, M.Q., Lacas, F. and Candel, S., 2001, "An Experimental Study on the Effect of Pressure and Strain Rate on CH₄/Air Flames," *Fuel*, 80, pp. 1583~1591.
- (13) Lee, S.-Y., SEO, S., BRODA, J. C., PAL, S. and SANTORO, R. L., 2000, "An Experimental Estimation of Mean Reaction Rate and Flame Structure During Combustion Instability in a Lean Premixed Gas Turbine Combustor," *Prog Combust Inst.*, 28, pp. 775~782.
- (14) Heberle, N. H., Smith, G. P., Jeffries, J. B., Crosley, D. R. and Dible, R. W., 2000, "Simultaneous Laser-Induced Fluorescence and Rayleigh Scattering Measurements of Structure in Partially Premixed Flame," *Appl Phys*, B71, pp. 733~740.
- (15) Choi, G.-M., Yang, J.-S., Kim, D.-J., Tanahasi, M. and Miyauchi, T., 2007, "Estimations of Local Heat Release Rate In The Methane-Air Premixed Flames," *Thermochemica Acta*, Vol. 455, pp. 34~39.
- (16) Kojima, J., Ikeda, Y. and Nakajima, T., 2000, "Detail Distributions of OH*, CH*, and C2* Chemiluminescence in the Reaction Zone of Laminar Premix Methane/Air Flames," AIAA 2000-3394.
- (17) Ikeda, Y., Kojima, J., Nakajima, T., Akamatsu, F. and Katsuki, M., 2000, "Measurement of the Local Flamefront Structure of Turbulent Premixed Flames by Local Chemiluminescence," *Prog. Combust. Inst.*, Vol. 28, pp. 343~350.