

# 스윙화염에서 연소실 압력 변동에 의한 국소 반응강도의 특성

노영구\* · 김중률\* · 김태형\*\* · 서상일\*\* · 김성철\*\* · 나중문\*\*\* · 최경민\*\*\*\* · 김덕줄\*\*\*\*

## The Characteristics of Local Reaction Intensity with Changing Combustor Pressure in the Swirl-stabilized Flame

Young-Gu Noh, Jong-Ryul Kim, Tae-Hyung Kim, Sang-Il Seo,  
Sung-Chul Kim, Jong-Moon Na, Gyung-Min Choi and Duck-Jool Kim

### ABSTRACT

An experimental study was performed to confirm the effect of the changing combustor pressure(-30~30 kpa), combustion characteristics were investigated by measuring the local chemiluminescence intensity, the local temperature distribution and emission. In order to investigate combustion ones, 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. The local mean temperature showed the uniform distributions for lower pressure index, which increased with increasing equivalence ratio. The mean  $OH^*$  chemiluminescence intensity, showed high level for lower pressure index for  $\Phi \geq 1.0$  conditions.  $EINO_x$  decreased with decreasing pressure index for overall equivalence ratio conditions.

**Key Words** : Changing combustor pressure, Below atmospheric pressure condition, Local reaction intensity

### 기 호 설 명

#### Alphabets

$\Phi$  : Equivalence ratio

$P^*$  : Pressure index

$I$  : Mean intensity

$P_{abs}$  : Absolute pressure

$P_{atm}$  : Atmospheric pressure

$i'$  : R.m.s. of intensity

## 1. 서론

연소실 압력은 화염 안정화 및 배출 특성에 중요한 인자이며 연소 효율에 큰 영향을 미친다. 연소실 압력 변동에 의한 연소 효율 변화와 배출 특성에 관한 연구는 다양하게 이루어져 왔다. Soike[1]는 난류화염에서 연소실 압력과 화염구조의 관계를 연구하였으며, Kobayashi[2]는 난류 예혼합 화염에서 화염면의 난류연소속도 및 화염구조에 압력이 미치는 영향을 조사하였고, Liakos[3]는 연소실내 압력이 증가함에 따라 연소 반응율과 온도가 증가함을 확인하였다. 그러나 이러한 연구들은 대부분 대기압 이상의 압력 조건에서 이루어졌으며 대기압 이하 조건

에서의 압력 변동에 관한 연구는 찾아보기 어렵다. 본 연구팀의 선행 연구에서 유도팬을 이용하여 유도 유동화염을 형성하였으며, Pilot flame burner에서 다양한 연소실 압력 및 당량비 변화에 따른 국소반응 특성과 배출 특성을 관찰하였다. 그 결과, 대기압보다 낮은 압력 조건에서 화염대가 넓고 균일하게 분포하며 국소 고온 영역이 제거되어  $NO_x$  저감 효과가 뛰어남을 보고 하였고 자발광 강도가 대기압 이하의 과농한 조건에서 활발한 반응을 하는 것을 관찰하였다[4]. 한편, 스윙 연소기에서도 대기압 이하 압력 조건이 화염 안정화와  $NO_x$  배출 농도에 큰 영향을 미친다는 것을 확인하였다[5]. 그러나 난류화염에서 압력 변동에 따른 국소반응 영역의 연소 특성에 관해서는 아직도 이해가 부족하다. 이에 본 연구에서는 난류 화염의 국소 라디칼 자발광 강도 측을 통하여, 압력 변동이 난류 화염의 국소 반응 강도에 미치는 영향을 관찰 하였다. 라디칼 자발광 강

\* 부산대학교 기계공학부 대학원

\*\* 전력연구원

\*\*\* 서라벌대학교 자동차정보비튜닝과

\*\*\*\* 부산대학교 화력발전에너지기술분석센터

† 연락처, choigm@pusan.ac.kr

도 계측에 관한 선행 연구를 살펴보면, Choi[6]는 층류와 난류화염에서 실험과 수치해석적 방법을 통하여  $\text{OH}^*$ ,  $\text{CH}^*$  자발광을 계측하였으며,  $\text{CH}^*$  자발광이 열발출율의 중요한 지표가 됨을 밝혔다. Higgins[7,8]는 층류 예혼합화염에서 당량비와 압력변화에 의해  $\text{OH}^*$ 와  $\text{CH}^*$  자발광 강도가 비례한다는 것을 밝혀내어 자발광이 온도와 압력의 함수임을 확인하였는데 이는 자발광을 이용하여 압력 변동 조건의 연소 현상 조사가 가능함을 제시한다. 화염에 대한 포괄적인 분석은 연소 현상의 전체적인 경향을 확인할 수 있지만 국소 지점에 관한 화염 정보를 얻기 어렵다. 따라서 상세한 연소 현상을 분석하기 위해서는 국소 자발광 계측이 유효하다. Kojima, Ikeda[9,10]는 층류와 난류화염에서 국소 지점과 전체 화염의  $\text{OH}^*$ ,  $\text{CH}^*$ ,  $\text{C}_2^*$  등이 이론 공연비 부근에서 최고 강도치를 나타남을 확인하였다. Takahashi[11]는 전단층에 형성되는 난류 예혼합화염을 조사하는 방법으로 국소 자발광을 이용한 연소반응 영역을 추정하였는데, 이는 국소 자발광 강도 계측을 통해 난류 화염의 연소 특성을 확인할 수 있음을 제시한다. 또한, Samaniego[12]는 예혼합화염에서  $\text{CO}_2^*$  자발광을 이용하여 연소 현상을 분석하였는데, 주 피크가 나타나지 않고 연속적으로 나타나는  $\text{CO}_2^*$ 는  $\text{CH}^*$ ,  $\text{C}_2^*$ 과 중첩되어 나타났다[13]. 따라서 본 연구에서는 다른 분자 밴드와 비교적 독립적인  $\text{OH}^*$  자발광을 이용하였다.

이에 본 연구는 연소실 압력 변동 조건에서 난류 화염에 대한 국소영역 반응 특성을 실시간 계측을 위하여 국소 자발광 계측을 하였으며, 스윙 연소기에서 연소실 압력 변동에 따른 연소특성과 국소 반응강도에 대한 분석 및 배출가스 생성 기구를 해명하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1. 실험장치

Fig. 1은 본 실험에 사용된 실험 장치를 나타낸 것이다. 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 형성하였다. 대기압 이하의 압력을 형성할 경우, 출구부에서 진공펌프를 이용하여 연소실 공기를 외부로 배출하고 입구밸브를 조절하여 압력을 형성하게 된다. 연소실에 공급되는 주위 공기류는 질량유량계(KOFLOC HFC-300)를 통하여 계측되어지고, 게이트 밸브를 조절하여 연소실 압력을 제어하였다. 이때 모든 압력 조건(-30~30 kPa)에서 연소실내에 동일한 유량(100 L/min)을 공급하였다.

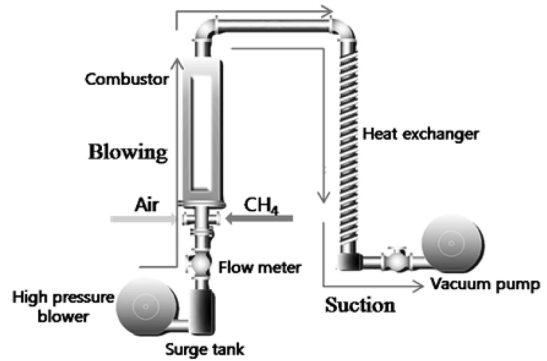


Fig. 1. Experimental setup of combustion system.

혼합기는 공기와 연료를 질량유량계(KOFLOC MFC-3660)로 조절하여 혼합실에서 생성된다. 혼합실내에는 스테인리스 볼과 허니콤을 설치하여 혼합기의 유동을 정류하였다. 다양한 압력 변화에 대한 안정적인 화염 형성을 위해 디퓨저와 파일럿 화염용 인젝터가 부착된 보염기를 사용하였다. 연소기는 110 mm × 110 mm × 1100 mm인 사각 파이프 형태이며, 내부에는 다양한 압력 변화에 대한 높은 난류 형성을 위해 스윙 인젝터가 설치되었다.

Fig. 2는 스윙러 연료 분사 노즐을 나타낸 것이다. 스윙러 외경( $r_o$ )은 30 mm이고, 내경( $r_i$ )은 14 mm이며, 스윙 베인은 6개, 각( $\theta_i$ )은 45°인 스윙을 사용하였고, 스윙 수는 아래의 식 (1)과 같이 정의하였으며, 스윙 수( $S_n$ )는 0.667이다[14].

$$S_n = \frac{2}{3} \left[ \frac{1 - (r_i/r_o)^3}{1 - (r_i/r_o)^2} \right] \tan \theta_v \quad (1)$$

### 2.2. 실험 조건 및 방법

화염의 국소반응특성과 배출특성 등의 연소 특성을 조사하기 위하여 당량비, 압력지수를 조절하였다. 당량비는 순도 99.99 %의 메탄과 습기가 제거된 압

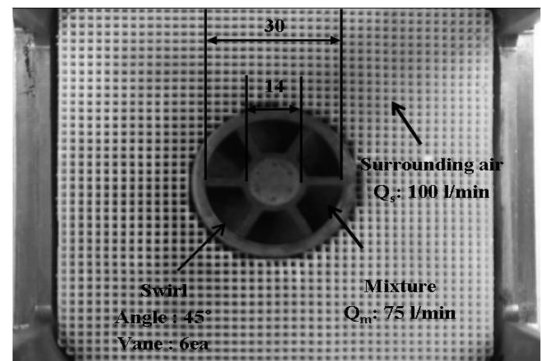


Fig. 2. Direct photograph of swirl combustor.

축 공기를 0.8~1.2까지 변화시켜 조절하였다. 본 연소시스템에서는  $P^*$ 가 0.7 이하, 1.3 이상의 조건일 때 연소실 내부압력이 약하게 진동하여 정압조건을 유지하기 힘든 조건이 존재하였으므로 압력지수( $P^* = P_{abs}/P_{atm}$ )는 각 당량비 조건에서 0.7~1.3까지 조절하였다. 압력센서는 연소실 출구부 100 mm 지점에 설치하여 측정하였다. 실험조건은 Table 1에 나타나 있다.

**Table 1.** Experimental conditions of mixture

Equivalence ratio, $\Phi$	Mixture flow rate	Air condition	Pressure index( $P^*$ )
0.8 ~ 1.2	75~125 (L/min)	Suction	0.7~0.9
		Atmospheric	1
		Blow	1.1~1.3

Fig. 3은 연소실 압력변동에 따른 유동특성과 국소반응강도 및 배출특성을 조사하기 위하여 평균온도, 배출가스, 국소 자발광을 측정하기 위한 장치를 나타낸 것이다. 화염 중심 반응대의 온도를 측정하기 위해 직경 100  $\mu\text{m}$ 의 R-Type 열전대를 사용하였다. 온도 측정은 당량비와 압력에 따라 생성된 각 조건별 화염 길이의 1/2 지점에서 반경 방향으로 1 mm 간격으로 측정하였으며, 각 지점의 안정된 온도 값을 얻기 위해 5회 측정치의 평균값을 취득하였다.

배기가스 중의 질소산화물( $\text{NO}_x$ )과 일산화탄소( $\text{CO}$ )의 농도를 측정하기 위해서 화학 발광식 가스 분석기(A&D system-9000 series)를 사용하였다. 배출가스의 측정을 위하여 스테인리스 샘플링 프로브를 사용하였으며 프로브의 과열을 방지하기 위해 수냉식 2중관을 설치하였다. 프로브의 샘플링 홀의 크기는 1 mm로 하였고, 연소가스의 포집은 연소기 출구부

에서 이루어졌다. 포집된 연소 가스는 soot와 수분을 1차적으로 실리카겔과 거즈를 통해 여과하여 가스 분석기로 공급하였다. 이때 연소실 압력이 가변하기 때문에 진공펌프와 유량계를 이용하여 500 cc/min의 연소가스를 가스 분석기에 일정하게 공급하였다. 화염의 화학발광은 10~20  $\mu\text{m}$ 의 측정면적에서, Cassegrain mirror를 통해 집광하여 Optical fiber를 통해 Spec box로 보낸다. 자발광은 파장에 따라 Dichroic mirror를 이용하여 분광한 후, 각각  $\text{OH}^*$  ( $306 \pm 14 \text{ nm}$ ),  $\text{CH}^*$  ( $431.4 \pm 1.5 \text{ nm}$ ),  $\text{C}_2^*$  ( $516.5 \pm 14 \text{ nm}$ )의 간섭필터를 사용하여 광전자증배관(Hamamatsu, R106UH)에서 검출된다. 검출된 아날로그 신호는 Amplifier와 저역통과필터를 거쳐 고속 AD-Board(NI-DAQ 4474)에서 데이터를 획득하였다. 측정 시간은 10초이며 시간 분해능은 5 kHz이다. 국소 자발광은 국소 온도 측정 데이터와 비교 분석하기 위해 동일한 지점에서 실험을 수행하였다.

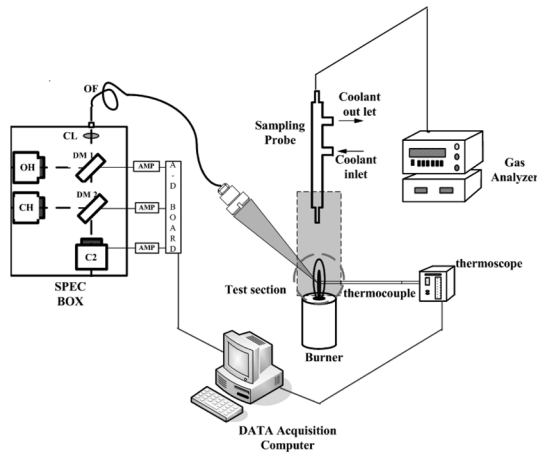
### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1. 연소실 압력 변동이 난류특성 및 가연한계에 미치는 영향

본 연구에서는 진동 현상이 가장 두드러진 혼합기 유량 75 SLPM을 기준으로 실험을 수행 하였고, 평균유속은 최대난류강도 영역에서  $U = 6.71 \text{ m/s}$ ,  $V = 3.39 \text{ m/s}$ 이며 상대난류 강도는 51%이다. 이 때 난류 특성은 Reynolds number( $Re_\lambda$ ) = 48.9, Euler scale ( $L$ ) = 7.22 mm, Taylor scale( $\lambda$ ) = 0.753 mm, Kolmogorov scale( $\eta$ ) = 0.0171 mm이다. 따라서 대상 화염은 corrugated flamelets 영역에 해당 한다[15].

Fig. 4는 압력지수에 따른 축 방향 유속( $U$ ), 반경 방향 유속( $V$ )과 난류 강도( $u'/U$ )를 나타낸 것이다. 유속은 스윙 유동이 발생하는 중심 반응 영역인 반경 방향 7~15 mm에서 압력지수의 영향을 다소 받지만, 압력지수 변화에 의한 유속 분포의 변화는 거의 나타나지 않으며, 유사한 경향이 관찰된다. 난류 강도는 스윙 유동 발생 영역과 주위류와의 전단층에서 가장 높은 값을 나타내는 것을 관찰할 수 있다.

Fig. 5는 혼합기 유량( $Q_M$ )과 압력지수( $P^*$ )에 따른 가연한계를 나타낸 것이다. 가연한계는 압력지수가 감소함에 따라 화염 안정화 영역이 좁아지는 경향을 보인다.  $P^* = 1.1$ 에서 역전 현상이 발생하는 혼합기 유량 75 SLPM은 100 SLPM, 125 SLPM에 비해 연소실 압력의 영향을 상대적으로 크게 받는 것을 관찰되며, 이는 화염의 진동현상과 밀접하다. 이에 본 실험은 혼합기 유량 75SLPM을 기준으로 실험을 수행하였다. 화염 형상 또한 압력의 영향을 크게 받는다. 대기압 이하 조건으로 갈수록 화염의 길이는



**Fig. 3.** Experimental setup for chemiluminescence, temperature and exhaust gas.

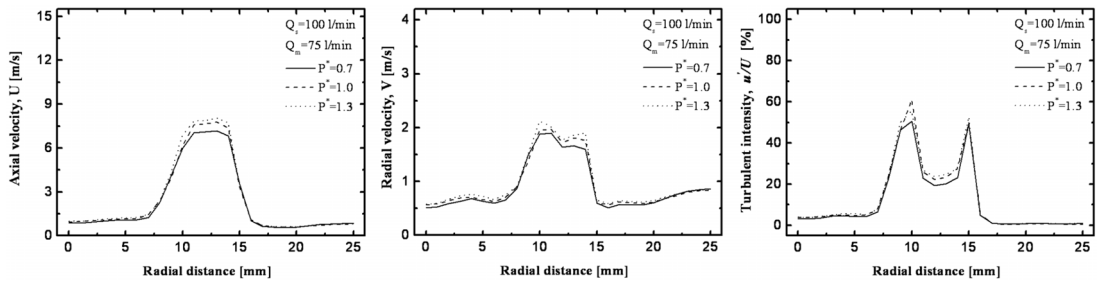


Fig. 4. Distribution of axial velocity(U), radial velocity(V) and turbulent intensity( $u'/U$ ) with mixture flow rate and pressure index.

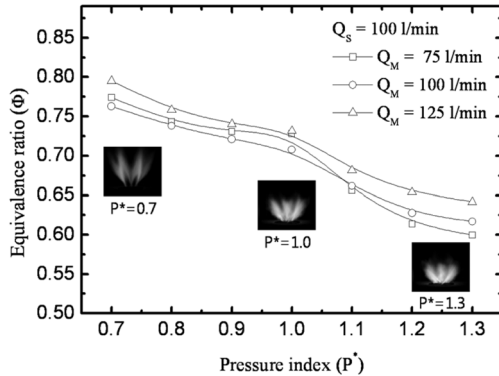


Fig. 5. Flammable limits as function of mixture flow rate and combustor pressure.

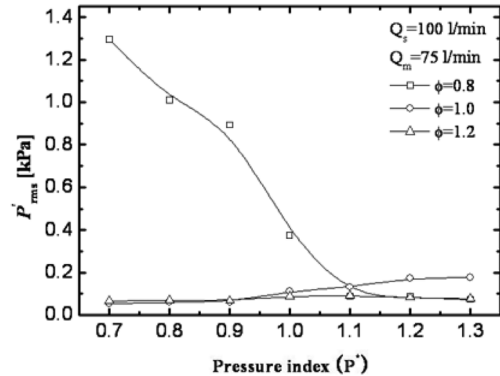


Fig. 6. R.m.s. of pressure fluctuation as functions of pressure index and equivalence ratio.

신장효과로 길어지고, 대기압 이상의 조건으로 갈수록 화염의 길이는 압축효과에 의해 줄어든다. 이는 주류상 층류화염 조건과 동일한 경향이다[4].

연소실 압력의 영향을 거의 받지 않는 유속 분포 결과와는 달리 가연한계는 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있으며, 이는 연소 반응이 압력의 영향에 의해 크게 바뀐다는 것을 의미한다.

Fig. 6은 압력지수와 당량비에 따른 압력 변동치를 나타낸 것이다.  $\Phi=0.8$  조건에서 연소실 압력 변동의 영향을 크게 받고 있으며, 대기압 이하 조건으

로 갈수록 압력 변동치가 큰 것을 관찰 할 수 있다.  $\Phi \geq 1.0$  조건에서는 연소실 압력의 영향이 상대적으로 작은 것을 관찰할 수 있다. 위의 결과로부터, 연소실 압력과 당량비의 변화가 화염 불안정성을 유발할 수 있음을 알 수 있다.

### 3.2. 연소실 압력 변동에 따른 배출 특성 관찰

Fig. 7은 압력지수와 당량비에 따른 EINOx (Emission Index NOx)와 EICO(Emission index CO)를 나타낸 것이다. EINOx는 대기압 이하 조건으로 갈수

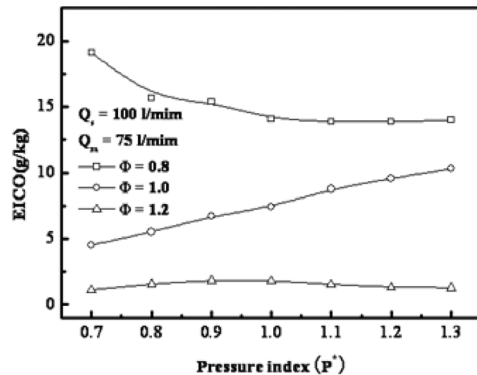
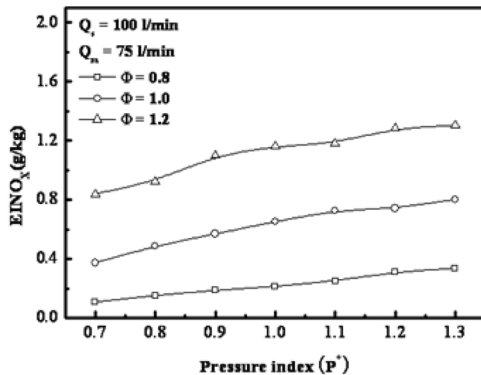


Fig. 7 NOx and CO emission index with pressure index and equivalence ratio

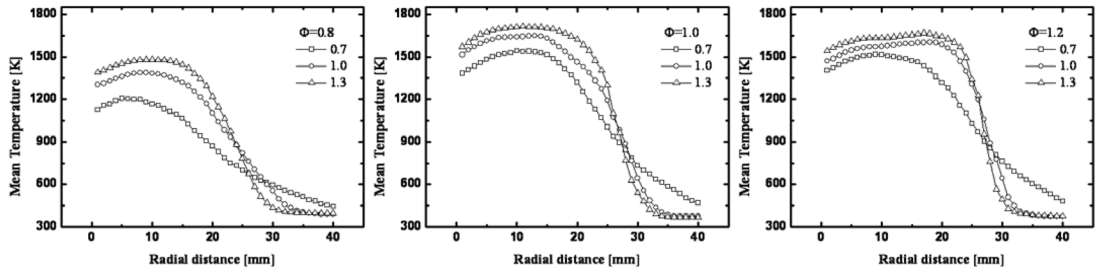


Fig. 8. Mean temperature distribution as functions of pressure index and equivalence ratio.

록 배출 농도가 감소하고, 희박 조건보다 과농 조건에서 압력의 영향을 크게 받는 것이 관찰 된다. EINOx는 연소실 압력이 대기압 이하 조건으로 갈수록 화염이 신장된다. 이로 인해 반응영역이 증가하게 되므로 prompt NOx가 다소 증가할 것으로 예상되지만, 대기압 이하 조건으로 갈수록 국소 온도 저감을 통한 Thermal NOx의 감소에 의해 전체적인 NOx의 배출농도가 감소하는 것으로 예측된다.

EICO는  $\Phi=0.8$ , 대기압 이하 조건에서 불안정한 연소로 인해 배출 농도가 증가하며 압력 변동치 결과에서도 불안정성을 확인 한 바 있다. 압력지수가 증가함에 따라 압력 변동치가 다소 커지는  $\Phi=1.0$ 에서도 압력지수가 증가함에 따라 CO 배출량이 증가함을 알 수 있다.

### 3.3. 연소실 압력 변동에 따른 국소 반응

Fig. 8은 연소실 압력 지수와 당량비에 따른 평균 온도분포를 나타낸 것이다. 온도 분포는 대기압 이하 조건으로 갈수록 화염 신장으로 인해 전체적인 온도장이 완만하게 분포한다. 대기압 이상의 조건은 중심 반응 영역에서 좁은 고온 영역을 형성하여, 반경 방향의 온도 분포가 상대적으로 급변한다.

이와 같은 현상은 주름상 층류 화염의 결과와 유사하다[4]. 대기압 이상의 조건에서는 국부적인 고온 영역의 발생으로 인해 Thermal NOx의 증가가 예상되며, Fig. 7의 NOx 결과에서도 확인 할 수 있다.

압력지수에 따른 중심반응대의 온도분포 차이는  $\Phi < 1.0$  조건에서 크게 나타나고,  $\Phi \geq 1.0$  조건으로 갈수록 줄어드는 것이 관찰된다. 이론 당량비 조건은 활발한 연소로 인해 상대적으로 고온 영역이 형성됨을 확인 할 수 있다. 이와 같은 현상은 과농한 대기압 이하 조건에서 미연 연료의 빠른 확산에 의해 주위 공기와의 확산화염 형태의 연소가 활성화되었던 주름상 층류 화염의 선행 연구와 유사하며[14], 이로 인해  $\Phi \geq 1.0$  조건으로 갈수록 대기압 이하 조건의 온도 분포가 상승하여 상압 조건과의 온도 분포 차이가 줄어드는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 9는 압력지수와 당량비에 따른 반경 방향의 국소 자발광 분포를 나타낸 것이다.

자발광 강도는 유속 분포 결과에서 나타난 전단층 내에서 활발한 것을 확인할 수 있다.  $\Phi < 1.0$  조건의 자발광 강도는 압력지수가 증가할수록 높은 값을 나타내며 주름상 층류 화염과 유사하다[4]. Fig. 5의 화염 이미지에서도 연소실 압력이 증가함에 따라 휘도가 증가하는 것을 확인할 수 있다.  $\Phi \geq 1.0$  조건은 측정 위치간의 자발광 강도 변화가 큰 것을 확인 할 수 있는데, 이는 주름상 층류 화염과는 달리 난류 예혼합화염에서 발생하는 와류에 의해 나타나는 현상이다. 경계층 영역에서 가장 높은 값을 나타내며, 측정 위치간의 자발광 강도 변화가 큰 것을 확인 할 수 있다. 이는 주름상 층류 화염[4]에서 확인했던 과농한 대기압 이하 조건의 활발한 확산 화

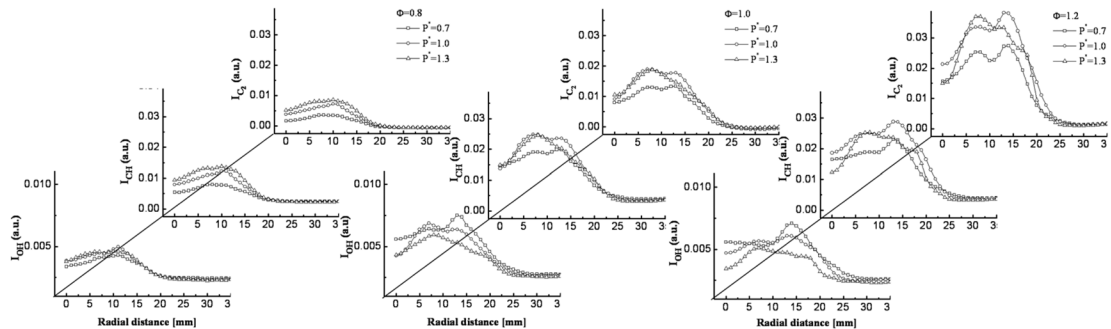


Fig. 9. Distribution of chemiluminescence intensity of OH\*, CH\*, and C<sub>2</sub>\* as functions of pressure index and equivalence ratio.

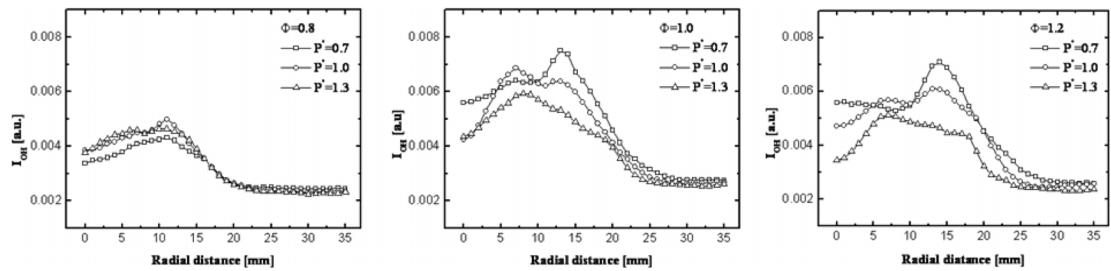


Fig. 10. Distribution of chemiluminescence intensity of OH\* as functions of pressure index and equivalence ratio.

염 형태의 연소보다는, 높은 난류 강도에 의한 혼합의 영향이 더 크기 때문이다.

Fig. 10은 압력지수와 당량비에 따른 반경방향의 OH\* 국소 자발광 강도를 상세히 나타낸 것이다. 압력 지수간의 OH\* 국소 자발광 강도는 가장 높은 값이 나타나는 반응 경계 영역에서 난류에 의해 다소 불규칙한 분포를 나타낸다. 또한,  $\Phi \geq 1.0$  조건으로 갈수록 난류 특성이 활발해짐에 따라 불규칙한 분포가 두드러지며 국소 온도 분포의 결과와도 일치하지 않음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는, 유사한 반응 영역을 나타내는 온도와 OH\* 자발광의 영역이 난류 강도가 증가함에 따라 불일치해지는 Mansour의 실험 결과에서도 확인 할 수 있다[16].

그러나 대기압 이하 압력 조건의 OH\* 자발광 강도는 과농해질수록 중심 반응 영역내에서 반응이 활발해지는 것을 확인할 수 있으며, 이와 같은 현상은 과농한 대기압 이하 조건에서 미연 연료의 빠른 확산에 의해 주위 공기와의 확산화염 형태의 연소가 활성화 되었던 주름상 층류화염의 결과와 유사하다[4]. 이 결과는 스윙 화염 내에서도 OH\* 국소 자발광 강도를 통해 연소실 압력 변동에 따른 국소 반응 특성을 확인할 수 있음을 제시한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 난류화염의 국소영역을 실시간 측하기 위해, 국소 자발광 측측을 통하여 연소실 압력 변동에 따른 연소특성 및 국소 반응강도에 대한 분석 및 배출가스 생성 기구를 해명하였다.

1) 대기압 이하 압력 조건은 전체적으로 넓고 균일한 온도 분포를 이루며,  $\Phi \geq 1.0$  조건으로 갈수록 국소 지점의 활발한 반응 영역이 넓고 균일해진다. 자발광은  $\Phi \geq 1.0$  조건에서 난류 혼합에 의해 압력간의 강도차가 불규칙해진다.

2) 대기압 이하 조건의 OH\* 국소 자발광 강도는  $\Phi \geq 1.0$  조건에서 중심 반응 영역내에서 가장 활발한 반응을 나타냈다.

3) NOx 배출 농도는 대기압 이하 조건으로 갈수

록 배출 농도가 감소한다. CO 배출 농도는 불안정한 연소가 발생하는  $\Phi=0.8$  조건에서 압력이 감소할수록 증가하지만, 넓고 균일한 반응대를 보이는  $\Phi \geq 1.0$ 의 대기압 이하 조건은 배출 농도가 감소하는 것을 확인 할 수 있다.

#### 후 기

이 논문은 한전 전력기반조성사업센터 지원의 부산대학교 화력발전에너지분석기술센터 사업에 의하여 연구되었음.

#### 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] H. Kobayashi, "Experimental study of high-Pressure turbulent premixed flames," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 132, 2002, pp. 375-387.
- [3] 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.
- [4] Jong-Ryul Kim, Fumiteru Akamatsu, Gyung-Min Choi, Duck-Jool Kim, "Observation of local heat release rate with changing combustor pressure in the CH<sub>4</sub>/air flame (wrinkled laminar regime)," *Thermochimica Acta*, Vol. 491, Issues 1-2, 2009, pp. 109-115.
- [5] 노영구, 김종률, 나종문, 최경민, 김덕줄, "연소기 압력변동조건하에서 2차연료분사가 화염안정화 및 배출특성에 미치는 영향", 한국연소학회, KOSCO SYMPOSIUM 논문집, Vol. 12, 2008, pp. 141-146.
- [6] Choi, G.-M., Yang, J.-S., Kim, D.-J., Tanahasi, M.

- and Miyauchi, T., "Estimations of Local Heat Release Rate In The Methane-Air Premixed Flames," *Thermochimica Acta*, Vol. 455, 2007, pp. 34-39.
- [7] B. Higgins, M. Q. McQuay, F. Lacas, J. C. Rolon, N. Darabiga, S. Candel, "Systematic Measurements of OH Chemiluminescence for Fuel-lean, High-pressure, Premixed, Laminar Flames," *Fuel*, Vol. 80, 2001, pp. 67-74.
- [8] B. Higgins, M. Q. McQuay, F. Lacas, S. Candel, "An Experimental Study on the Effect of pressure and Strain Rate on CH Chemiluminescence of Premixed Fuel-lean Methane/Air Flames," *Fuel* Vol. 80, 2001, pp. 1583-1591.
- [9] J. Kojima, Y. Ikeda, T. Nakajima, "Spatially Resolved Measurement of  $\text{OH}^*$ ,  $\text{CH}^*$ , AND  $\text{C}_2^*$  Chemiluminescence in The Reaction Zone of Laminar Methane/Air Premixed Flames," *Proc. of the Combustion Institute*, Vol. 28, 2000, pp. 1757-1764.
- [10] Y. Ikeda, J. Kojima, H. Hashimoto, and T. Nakajima, "Local Chemiluminescence Spectra Measurements in a High-Pressure Laminar Methane/Air Premixed Flame," *Proc. of the Combustion Institute*, Vol. 29, 2002, pp. 1495-1501.
- [11] Takahashi, T., Katuski, M. and Mizutani, Y., "Fine Flame Structure and Combustion Mechanism of Lean Turbulent Premixed Flames," *JSME(B)*, Vol. 37, No. 1, 1994, pp. 172-179.
- [12] Samaniego, J.M., Egolfopoulos, F. N., and Bowman, C.T., " $\text{CO}_2^*$  Chemiluminescence in Premixed Flames," *Combustion Science and Technology*, Vol. 109, 1995, pp. 183-203.
- [13] 권승진, "최적연소 및 유해가스 저감을 위한 화염 내 라디칼의 실시간 측정 기법에 관한 연구," 석사학위논문, 한양대학교, 2007.
- [14] A. K. Gupta, D. G. Lilley, N. Syred, SWIRL FLOWS, Abacus press, 1984.
- [15] N. Peters, Turbulent Combustion, *Cambridge University Press*, UK, 2000.
- [16] Mohy Mansour, Yung-Cheng Chen, "Stability characteristics and flame structure of low swirl burner," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 32, Issue 7, 2007, pp. 1390-1395.

접수일 : 2009. 11. 19

심사완료일 : 2009. 12. 09