

# 환형제트에서의 메탄과 공기의 층류 예혼합 화염에서 발생하는 자발적인 소음에 대한 실험적 연구

진성호\* · 정재훈\* · 권성준\* · 정석호\*

## Self-Excited Noise Generation from Laminar Methane/Air Premixed Flames in Thin Annular Jets

S. H. Jin\*, J. H. Joung\*, S. J. Kwon\*, and S. H. Chung\*

### ABSTRACT

Self-excited noise generation from laminar flames in thin annular jets of methane/air premixture has been investigated experimentally. Various flames were observed in this flow configuration, including conical shape flames, ring shape flames, steady crown shape flames, and oscillating crown shape flames. Self-excited noise with the total sound pressure level of about 70dB was generated from the oscillating crown shape flames for the equivalence ratio larger than 0.95. Sound pressure and CH\* chemiluminescence were measured by using a microphone and a photomultiplier tube. The frequency of generated noise was measured as functions of equivalence ratio and premixture velocity. A frequency doubling phenomena have also been observed. The measured CH\* chemiluminescence data were analyzed from which the corresponding sound pressure has been calculated. By comparing the data with those of measured ones, the noise source can be attributed to the flame front fluctuation near the edge of the oscillating crown-shape flames. The flame stability regime was influenced sensitively to the supplying air through the inner tube.

**Key Words** : Annular Jet, Laminar Premixed Flame, Sound Pressure, Stability

### 1. 서론

고출력 연소와 배기가스 규제는 종종 연소 불안정성과 진동을 야기시킨다. 이것들은 바람직하지 않은 소음원이고 때때로 연소기관의 심각한 파괴를 발생시키므로 연소 불안정성/진동의 능동 제어는 연소연구의 관심분야 중 하나가 되었다. 효과적인 제어기술을 발전시키기 위해서 화염 불안정성과 진동의 매커니즘과 그에 영향을 주는 요소에 대한 이해가 요구되었다.

연소불안정성에 대한 이전의 연구들은 로켓 모터[1-3], 제트 엔진의 재연소장치[4, 5], 그리고 ramjets[6-9] 와 같은 추진기에 주로 초점이 맞춰져 왔다. 이러한 현상은 복합체, 유동과의 피드백 타입 상호작용, 소음, 그리고 연소 프로세스와 결합된다. 최근에는, 비교적 단순하고 잘 한정된 유동에서의 연소 소음 연구가 주목을 받고 있다. 실험적으로는, 층류 영역에서 냉판으로의 충돌제트 실험 등을 통하여 소음원이 냉판 근처에서 주기적인 화염의 소멸과 밀접한 관계가 있음이 밝혀진 바가 있다[10]. 수치 및 이론적 해석을 통해서도 버너에 안정화된 평형 화염에 대한 음향파 가진을 통한 응답 특성이 연구된 바가 있다[11]. 그러나, 단순한 층류 유동의 경우에서 자발화된

\* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

† 정석호, shchung@snu.ac.kr

연소 소음에 대한 연구는 적었다.

실용적인 연소 장치에서 연소특성은 난류화염의 length scale에 의해 크게 영향을 받는 형태로 진행된다. 이러한 이유로, 매탄/공기의 선형 예혼합기의 얇은 환형 제트 화염은 환부폭을  $O(1\text{mm})$ 로 하였다. 이러한 형태의 유동 형태에서 이전에도 화염 안정성에 대해 연구가 진행된 바가 있다[12]. 또한 이러한 이중 동축류 제트에서의 연소 소음이 예혼합기의 당량비와 제트의 출구 속도에 의해 영향 받음이 밝혀진 바가 있다[13]. 따라서 본 연구에서는 자발화된 버너에서의 소음 발생에 주안점을 두었으며, 특히 소음이 발생하는 영역 및 전체적인 특성 등에 대해 관찰하였다.

## 2. 실험

실험장비는 환형 제트 버너와 유동 제어기, 가시화 장치, 그리고 음압 측정 장치로 되어있다. 환형 제트 버너는 (Figure 1) 황동으로 된 이중 동축관으로 구성되어 있다. 내부관의 길이는 400mm 이고 내부 직경은 10.1mm, 외부 직경은 10.9mm이다. 외부관의 길이는 300mm 이고 내부 직경은 12.8mm, 외부 직경은 13.8mm이다. 내외부관의 길이는 실험조건에서 내부유동이 완전 발달된 분포를 갖을 수 있도록 고려하였다. 환형부의 너비는 0.95mm이고 넓이는  $35.37\text{mm}^2$ 이다. 두관의 동심은 외부관 아래쪽의 나사로 조정하였다.

연료는 순도 99.95% 이상인 메탄을 사용하였으며, 산화제로 공기를 사용하였다. 연료와 공기는 습식가스미터로 보정된 질량유량계(MFC, MKS)를 사용하여 유량을 제어하였다. 예혼합기는 Honeycomb과 glass bead를 노즐 하단부에 설치하여 환형부에서 미리 잘 섞이도록 하였다. 환형부에선 공기와 메탄의 예혼합기가 공급되고 중앙부에선 공기가 공급되도록 하였다. 실험변수로서 예혼합기의 당량비 및 출구 속도, 내부노즐의 공기속도를 변화시켰으며 이에 따른 화염형태의 변화를 관찰하였다.

$\text{CH}^+$  분자의 자발광 신호는 밴드 패스 필터(431nm, FWHM=5nm)를 통해 광증배관으로 측정하였다. 광증배관은 노즐로부터 반경방향으로 27cm, 노즐 상단에서 3cm 하류에 설치하였으며, 신호는 8.19kHz에서 측정하였다. 화염의 직접 사진은 ICCD 카메라(Princeton Instruments)로 측정하였다.

음압은 마이크로폰(4189, B&K)으로 측정하였다. 이것은 노즐로부터 반경방향으로 31cm, 노즐에서 하류로 3cm에 설치하였다. 순간음압 신호는 광분해능 0.5Hz 인 8.19kHz에서 측정하였다.

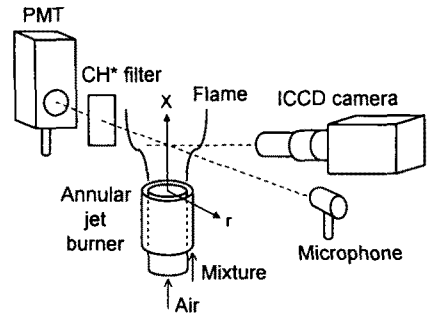


Figure 1. Schematic of experimental set-up.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 화염의 형태

당량비( $\phi$ )와 예혼합기 속도( $U_p$ )에 따라서 다양한 화염이 관찰되었다. 내부관의 속도 ( $U_a$ )를 0으로 하였을 때의 대표적인 화염의 직접 사진을 Figure 2 에 나타내었다. 레이놀즈 수,  $Re$ 는  $U_p D_e / \nu$ 으로 정의된다. 는 동점성 계수이고  $D_e$ 는 유량에 기반한 유효지름이다. 그리고  $D_e = (4A/\pi)^{1/2}$ 로 정의된다. 실험은  $U_p = 1.0 - 4.0$  m/s 사이에서 수행하였으며, 이 사이에서 레이놀즈의 범위는 400-1700이다. 실험 범위에서 유동 특성을 확인하기 위해 슬리텐 이미지로 이러한 실험의 범위에서 유동이 선형임을 확인하였다.

$\phi = 1.6$  이고  $U_p = 1.4$  m/s 인 조건에서(a), 과농 예혼합화염이 확산화염에 둘러싸인 원뿔 모양에 가까운 형태를 보여주었다. 화염은 바깥부분이 노즐에 부착되어 있으면서, 안쪽가장자리에선 부상되었다. 이러한 화염은  $U_p$ 가 증가할수록

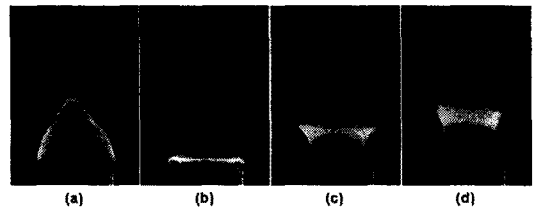


Figure 2. Direct photographs of flames in thin annular jet burner; (a) conical shape ( $\phi=1.6$ ,  $U_p=1.4\text{m/s}$ ), (b) ring shape (1.2, 1.2m/s), (c) steady crown shape (1.14, 1.8m/s), and (d) unsteady crown shape (1.14, 2.5m/s).

화염은 길어지다가 결국 화염날림이 발생한다.  $\phi = 1.2$ 이고  $U_p = 1.2$  m/s 인 조건에서(b), 과농 예혼합화염은 확산화염에 둘러싸인 고리모양의 화염이 되었다. 과농 예혼합화염은 안쪽 바깥쪽 가장자리 모두가 노즐에 부착되었다.  $\phi = 1.14$  이고  $U_p = 1.8$  m/s 인 조건에서(c), 왕관 모양의 예혼합화염이 관찰되었다. 예혼합화염의 안쪽은 내부 노즐에 부착되어 있고 바깥부분은 외부 노즐 하류에 부상되어 있으며, 화염후류의 확산화염은 안쪽 노즐에 부착되어 있다. 이러한 세가지 형태의 화염은 이전에도 관찰된바 있다.[13]

$\phi = 2.5$ 이고  $U_p = 1.14$  m/s 인 조건에서(d), 화염은 불안정해지면서 왕관 형태 화염의 가장자리 아래쪽 근처에서 떨린다. 이러한 경우에, 당량비 0.95에서 50dB을 가지는 배경잡음(background noise level)에 비해서 상당한 소음인 70dB의 음압 레벨이 발생하였다. 이번 연구는 자발화된 소음을 발생하는 화염에 주안점을 두었다. 내부관의 공명에 의한 소음 발생일 가능성을 확인하기 위해 내부관의 노즐 출구부를 막고 실험을 수행한 결과, 계속해서 소음이 발생하는 것을 통해 내부관의 공명에 의한 것이 아님을 확인하였다.

Figure 3 에서 당량비와 예혼합기 속도에 따른 소음을 발생시키는 화염의 영역을 나타내었다. I 영역은 이전에 연구된 바와 같이 고리 또는 원뿔 형태를 가지는 영역이다[13]. 당량비가 0.8에서 1.25 사이일 때  $U_p$ 가 증가하면 안정된 외부 부상화염(outer lifted flame) (I 영역)에서 진동하는 외부부상화염(III영역)으로 변화하였다. 당량비가 1.25에서 1.4 사이일때  $U_p$ 가 증가하면 화염은 고리 또는 원뿔 형태에서 진동하는 외부 부상화

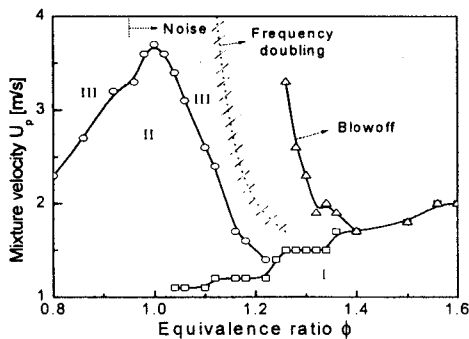


Figure 3. Regimes of various flames in terms of equivalence ratio and mixture velocity (regime I; ring or conical shape, regime II; steady crown shape, regime III; unsteady crown shape).

염으로 변화 하였다가 최종적으로 화염 날림이 발생하였다. 당량비가 1.4보다 클 때  $U_p$ 를 증가하면 고리 형태의 화염은 거의 원뿔 형태로 변화하였고 최종적으로 화염날림이 발생하였다. 비록 그림에 나타내진 않았지만  $U_p$ 가 1m/s보다 작으면 화염의 형태는 왕관형 또는 고리형이 되었다. 주파수 doubling 현상이 관찰되는 III영역에서의 화염특성은 다시 논의할 것이다.

### 3.2 소음 발생 화염

당량비 1.12, 1.14, 그리고 1.16에서의 불안정한 왕관 형태 화염의 전체 음압 레벨을 Figure 4 에 나타내었다. 그림에서 보이듯이, 예혼합기 출구 속도에 따라 두 가지 특징을 관찰할 수 있었다. 첫 번째, 비록  $U_p$ 에 따라서 국부적인 음압레벨은 조금 증가하는 경향이 보이지만 전체 음압 레벨은 예혼합기 속도의 변화에 거의 무관하다. 실험 환경에서의 배경잡음은 대략 50dB이었는데, 이러한 배경잡음 레벨은 안정화된 화염의 경우나 화염이 없는 냉간제트의 경우나 거의 변화하지 않았다. 이러한 음압 레벨에 비교하여 불안정한 왕관 형태 화염의 총 음압 레벨은 대략 20dB 정도 높았다. 둘째로, 소음이 발생하게 하는 속도의 지점이 당량비에 따라 매우 민감하였다.

다음으로 소음발생 특성을 분석하였다. 몇몇의 당량비( $\phi=1.12, 1.14$ , 그리고 1.16)와 예혼합기의 속도( $U_p=2.6$  그리고 3.2m/s)에서의 실험을 Figure 5에서 음압 레벨(SPL, Sound Pressure Level)에 따라 도시하였다. 음압 레벨은 몇몇의 피크점을 보여주는데 이러한 각 피크점에는 그 지점의 주파수를 표시하였다. 일반적으로 주파수가 감소함에 따라서 이러한 피크는 배경잡음레벨과 구별이 되지 않게 약화되었다. 사운드 스펙트

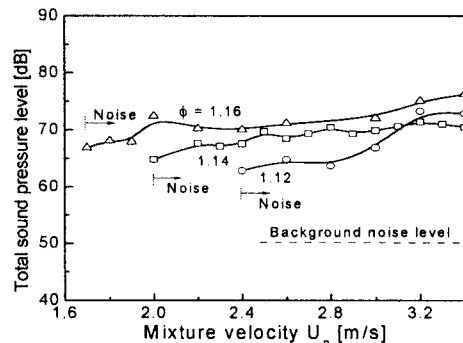


Figure 4. Sound pressure level as function of mixture velocity at several equivalence ratios.

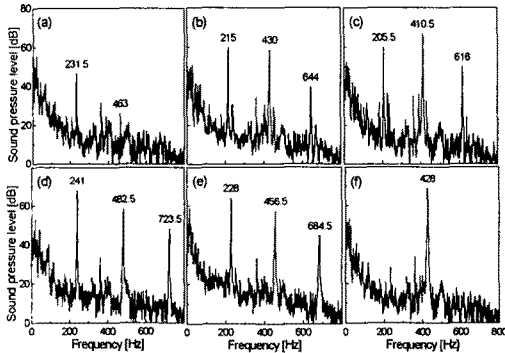


Figure 5. Sound spectra at various equivalence ratios and mixture velocities;

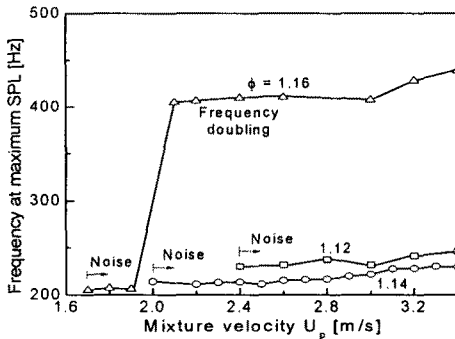


Figure 6. Frequency at maximum sound pressure level as a function of mixture velocity at several equivalence ratios.

림의 피크들은 당량비와 예혼합기의 속도에 따라 민감하게 영향을 받음을 관찰할 수 있었다.  $U_p=2.6\text{m/s}$ 이고  $\phi=1.12$  일 때(a), 기본주파수는 231.5Hz로 측정되었고 음압은 대략 50dB로 측정되었으며 당량비만 1.14(b)로 증가시키면 기본 주파수는 215Hz가 되었고 음압 레벨은 60dB로 변화하였다. 430Hz인 2차조화에서의 음압 레벨은 기본 주파수 레벨과 유사하였다. 당량비만 1.16(c)으로 늘이면 410.5Hz의 음압 레벨은 205.5Hz의 레벨보다 높아짐이 관찰되었고 당량비 1.12(d)에서 예혼합기 속도를 3.2m/s로 높이면 241Hz를 갖는 기본 주파수의 음압 레벨은 68dB로 증가하였다. 당량비가 1.14(e)에서 228Hz를 갖는 기본 주파수의 음압 레벨은 2차조화보다 우세해짐이 관찰되었고 기본 주파수가 428Hz인 당량비 1.16(f)에서의 음압 레벨도 그러하였다. 피크 음압 레벨의 주파수가 예혼합기의 속도에 따라 변함을 Figure 6에서 도시하였다. 또한 Figure 6을 통해 당량비 1.16에서 예혼합기의 속도가 증

가하면 화염은 불안정한 왕관 형태의 화염을 가지면서 주파수가 더블링되는 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 경향은 이번 실험의 영역인 1.16에서 계속 유지되었다. 이러한 점은 다음에 좀더 논의해 보겠다.

### 3.2.2 CH\* 자발광

불안정한 왕관 형태 화염의 특징들에 대해 좀더 분석하여 보았다. Figure 7에서는 진동의 한 주기 동안 CH\* 자발광 신호가 일정하게 진동함을 관찰할 수 있다. Figure 2d에서는 위상각(phase angle)에서의 몇몇의 ICCD 이미지가 불안정 화염과 조화하여 변화됨이 나타났으며 화염면 후류에서 다양하게 변하는 화염면의 변화와 일치하는 CH\* 신호가 사인파의 형태로 관찰되었다.  $\phi=5/4$ 에서의 화염면의 중간 부분을 관찰하면 주름지고, 확대되어, 아래쪽으로 움직이기 시작함을 관찰할 수 있었고, 위상각  $\phi$ 가  $\pi/4 - 5\pi/4$  사이일 때는 휘어진 화염면은 화염면 상류를 향해 구부러지고 화염가장자리가 큰 폭으로 진동하였다.

다양한 화염모양에 대한 CH\*자발광의 변화를 확인하기 위해 다양한 조건에서 실험을 행하였다. CH\* 자발광의 주파수를 fast Fourier transform(FFT) 한 값의 피크점을 예혼합기의 속도 변화에 따라 Figure 8에 도시하였다. Figure 6에는 예혼합기의 속도와 당량비를 변화시키면서 음압 레벨 주파수의 변화를 도시하였다. 당량비 1.16에서 주파수가 doubling되는 예혼합기 속도지점이 음압의 경우는 대략 2.1m/s (Figure 6) 이고 CH\* 자발광의 경우는 대략 2.7m/s (Figure 8)이었다. 음압과 CH\* 신호의 FFT값의 변화 형태가 유사함을 확인함으로써 음압 레벨과 CH\* 신호가 서로 연계됨을 유추할

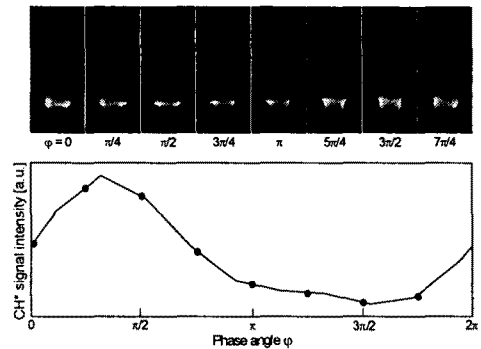


Figure 7. Variation of flame shape and CH\* signal as function of phase angle for  $\phi = 1.14$  and  $U_p=2.5\text{m/s}$

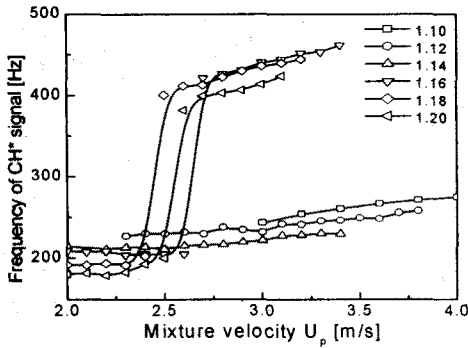


Figure 8. Peak frequency from FFT of chemiluminescence of CH\* as function of mixture velocity at several equivalence ratios.

수 있었다. 주파수가 doubling되는 지점은 Figure 3에서 점선으로 전 영역에 대해 도시하였다 여기서의 doubling 지점의 확인은 직접 소리의 변화를 구별하여 이루어졌다

### 3.2.2 CH\* 자발광과 음압

Figure 9에서 몇몇의 당량비와 예혼합기의 속도에 따른 음압과 CH\*신호를 시간 축에 대하여 도시하여 비교하여 봄으로써 두 개의 신호 모두 시간에 따라 진동함을 확인할 수 있었다. (a)에서는 CH\* 자발광 신호의 형태가 주기적으로 변화하였고 (b-e)의 경우에는 주파수가 doubling되었다. 그리고, (f)의 경우에는 높은 주파수를 가지

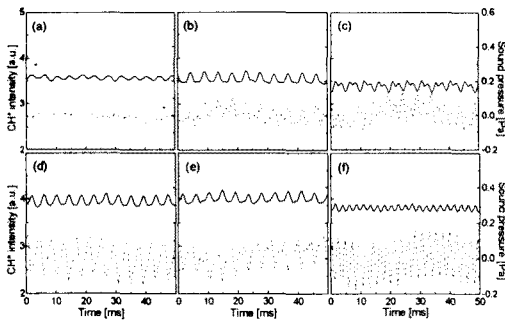


Figure 9. Comparison of CH\* chemiluminescence and sound pressure with time; (a) ( $\phi = 1.12$ ,  $U_p = 2.6$  m/s), (b) (1.14, 2.6 m/s), (c) (1.16, 2.6 m/s), (d) (1.12, 3.2 m/s), (e) (1.14, 3.2 m/s), and (f) (1.16, 3.2 m/s).

면서 주기적인 변화가 관찰되었다. 이러한 형태는 Figure 5에서 보여지는 소리의 스펙트럼의 피크점들과 잘 일치함을 알 수 있다. 음압에 따른 이러한 주기적 변화의 형태는 CH\* 자발광에 따른 주기적 변화의 형태와 매우 유사하였다.

예혼합화염에서의 소리발생의 메커니즘은 화염에서의 빛의 방출을 분석함으로써 관측하였다. Price[14] 등의 논문에 따르면 음압  $p$ 는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$p(r, t) = \frac{\rho_x}{4\pi r} \left( \frac{\rho_u}{\rho_b} - 1 \right) \left[ \frac{dQ}{dt} \right]_{t-r} \quad (1)$$

$r$  은 화염과 마이크로폰과의 거리,  $t$  는 시간,  $\rho_\infty$  대기중의 공기 밀도,  $\rho_u/\rho_b$  은 volumetric expansion ratio of unburned to burnt gases,  $Q$  는 예혼합기의 체적소비율, 는 화염에서 측정장치까지 음파가 전파되는데 걸리는 시간이다. 소리의 파장의 길이는 화염의 길이에 비해 훨씬 길다고 가정하였다.

$dQ/dt$  는 아래의 식을 통해  $Q$  를 정의하여 정하였다.

$$Q = kl \quad (2)$$

위 식에서와 표현된 바와 같이  $Q$ 는 반응지역에서의 자유분자 CH\* 또는  $C_2^*$ 의 발광 강도(I)에 비례한다.

$k$  는 주어진 당량비에서 평균 유량과 평균 발광강도의 비율을 정하는 상수이다. 이러한 상호관계는 종종 열발산비의 값을 추정하는데 사용된다.[15]

위에서의 두 식을 통해 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$p(r, t) = \frac{\rho_x}{4\pi r} \left( \frac{\rho_u}{\rho_b} - 1 \right) k \left[ \frac{dI}{dt} \right]_{t-r} \quad (3)$$

위 식을 통해 화염 발광 변수로 음압 신호 값을 구할 수 있다.

CH\* 신호로 음압을 구하여 위 (3)식을 통해 CH\* 자발광 신호를 분석하여 Figure 10을 통해 계산된 음압 값과 측정된 음압 값을 비교하였다. 비록 음압 측정기의 오차로 인한 한계는 있지만 두 개의 음압 값이 거의 일치함을 보여준다. 음압을 측정할 때 무향실이 아니었고 마이크로폰의 위치인  $r = 31$  cm는 식 (3)에서 far-field approximation ( $r > \lambda$ )을 사용하는 것에 조금의 오차가 존재하므로 실험을 통한 음압의 측정에도 작은 오차가 발생하였다. 위의 31cm의 거리는

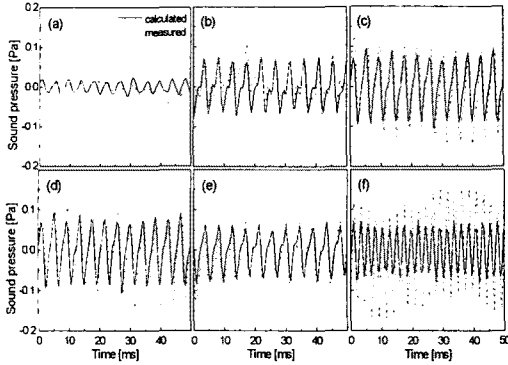


Figure 10. Comparison between measured and calculated sound pressures with time; (a) ( $U_a = 0.01$  m/s), (b) ( $U_a = 0.085$  m/s), (c) ( $U_a = 0.10$  m/s), (d) ( $U_a = 0.13$  m/s), (e) ( $U_a = 0.14$  m/s), and (f) ( $U_a = 0.16$  m/s).

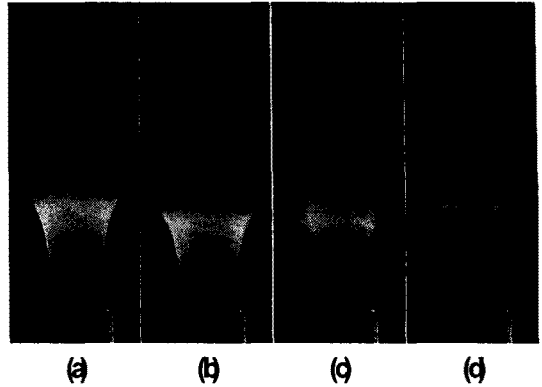


Figure 11. Direct photographs of flames with air velocity in inner nozzle for  $U_p = 2.5$  m/s; (a)  $U_a = 0.01$  m/s, (b)  $U_a = 0.085$  m/s, (c)  $U_a = 0.10$  m/s, and (d)  $U_a = 0.13$  m/s.

이전의 실험[10]에서도 사용된바 있는 거리로써 이러한 거리는 주변으로부터 소리가 반사되어 오는 영향을 최소화 하기 위한 것이다.[10] 측정된 음압값과 계산된 음압 값이 유사하다는 것은 소리 발생의 이유가 화염면의 진동에 의한 것임을 나타낸다.

### 3.2.2 내부관 공기유동의 영향

내부관을 통해 공기를 공급하면 안정된 영역이 변화하였다. 당량비 1.14,  $U_p=2.5$ m/s에서 중앙관의 공기 유입속도에 따른 화염 형태의 변화를 직접 사진으로 찍어 Figure 11에 도시하였다. 이전에 논한 바와 같이 외부 부상 화염은 중앙 노즐 속도가 0일 때 진동한다. 중앙 노즐에서 0.01m/s로 공기를 공급하면 화염은 좀더 안정적으로 변화하는데(a), 이러한 경향은 중앙 노즐 속도를 0.095m/s까지 증가 시킬 때 까지 계속되었다. 그러나 중앙 노즐 속도가 0.10m/s(c)가 되면 화염이 다시 불안정해지고 소리도 다시 발생하기 시작하였고, 공기의 속도가 증가함에 따라 소음의 크기도 증가하였다. 중앙 노즐 속도가 0.20m/s 보다 커지면 화염은 불규칙 (d) 해졌고 최종적으로 화염날림이 발생하였다.

당량비 1.14,  $U_p=2.5$ m/s 에서  $CH^*$  신호의 주파수, 음압 레벨, 그리고 진폭이 공기 속도에 따라 변화함을 Figure 12 를 통해 관찰할 수 있다. 공기의 속도를 증가시키면 화염의 불안정성이 계속 변화하는 transient한 화염이 발생하고, 중앙 노즐 속도가 0.1m/s 보다 커지면 공기의 속도를 증가시키기에 따라 주파수는 줄어들고 음압 레벨은 증가하였다. 중앙 노즐 속도가 0.10m/s 보다 클

때에는 중앙노즐속도가 느릴 때에 비해 음압은 거의 유사하지만 주파수는 절반도 되지 않을 정도로 크게 감소하였다.

Figure 13 에서 중앙노즐 속도가 0.03m/s 그리고 0.10m/s 일 때의 안정성에 대한 도표를 도시하였다. 중앙 노즐 속도가 0인 Figure 3 과 비교하여 볼 때, I 영역은 상대적으로 큰 변화 없이 고리 또는 원뿔 모양의 화염이 발생하였고, II 영역에선 안정된 왕관 모양의 화염이 처음에 커지다가 (a) 작아지고 그 후 과도 영역으로 이동함이 관찰된다. 이러한 변화에 의해 III 영역에서는 진동하는 불안정한 왕관 모양의 화염 영역이 확장되었다. 처음에는 화염날림 영역도 과도 영

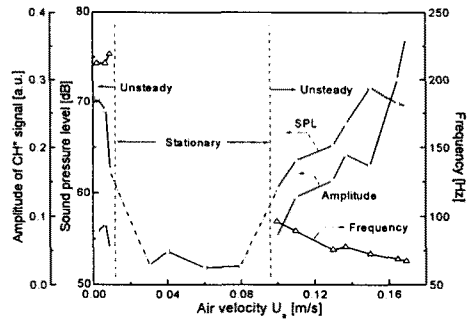


Figure 12. Sound pressure level, frequency, and amplitude of  $CH^*$  signal as function of air velocity in inner tube for  $\phi = 1.14$  and  $U_p = 2.5$  m/s.

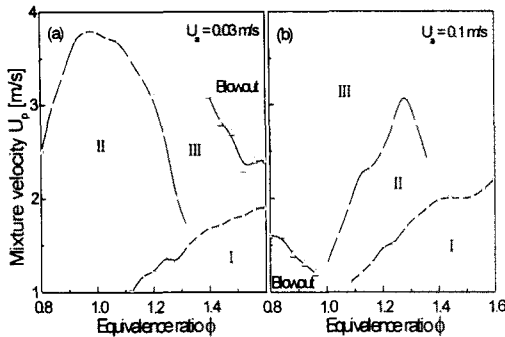


Figure 13. Flame stability diagrams for air velocity in inner nozzle of (a)  $U_a = 0.03$  m/s and (b)  $0.1$  m/s (regime I; ring or conical shape, regime II; steady crown shape, and regime III; unsteady crown shape).

역으로 이동하였으나,  $0.10$  m/s와 같이 상대적으로 빠른 중앙노즐 속도에서는 작은 당량비와 작은 환부 노즐 속도에서도 화염 날림이 발생하였고, 이러한 변화는 계속되어 중앙노즐 속도가 증가함에 따라 이러한 영역은 확대되었다

#### 4. 결론

얇은 선형 환형 제트 버너에서 메탄/공기 예혼합 화염을 자발화된 소음 생성의 특징을 조사하기 위해 실험적으로 연구하였다. 환형 제트에서의 화염의 모양은 당량비, 예혼합기 속도, 그리고 공기 속도에 따라 고리모양, 원뿔 모양, 왕관 모양, 그리고 진동하는 왕관 모양 등의 다양한 형태로 변화하였고, 이러한 화염의 존재 영역은 실험을 통해 확인할 수 있었다. 예혼합기가 과농할 때 불안정한 왕관 모양의 화염에서  $70$  dB의 자발화된 소음이 발생하였다. 이러한 음압은 당량비와 예혼합기의 속도에 의하여 결정되었다. 과농한 영역에서 주파수가 doubling되는 현상도 관찰할 수 있었다. 왕관 형태 화염에서의 음원은 화염하류에서의 화염표면의 떨림임을 시간에 대한 음압의 변화와  $CH^*$  자발광의 시간에 대한 변화의 형태가 거의 유사함을 관측함으로써 확인하였다. 이번 연구는 연료/공기의 과농한 예혼합기가 공기를 통해 나올 때 상당한 소음을 발생시킴을 보여주었다. 앞으로는 화염주름의 메커니즘, 소음원의 위치, 주변부의 확산화염과의 관계, 그리고 주파수가 doubling되는 메커니즘에 대해 보다 많은 연구가 있어야 할 것이다.

#### 후기

본 연구는 연소기술센터(CERC)와 서울대 기계항공공학부의 BK-21 프로그램의 지원을 받아 수행하였다.

#### 참고문헌

1. H. Tsuji, T. Takeno, Tenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1964, p. 1327.
2. L. Crocco, S. Cheng, Theory of Combustion Instability in Liquid Propellant Rocket Motors, Butterworths Scientific Publications, London, U.K., 1956.
3. B.T. Zinn, E.A. Powell, Thirteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1970, p. 491.
4. P.J. Langhorne, J. Fluid Mech. 193 (1988) 417-443.
5. G. Bloxsidge, A. Dowling, P.J. Langhorne, J. Fluid Mech. 193 (1988) 445-473.
6. V. Yang, F.E. Culick, Comb. Sci. and Tech. 45 (1986) 1-25.
7. K.C. Schadow, K.J. Wilson, AIAA Journal 25 (1987) 1164-1170.
8. K.C. Schadow, E. Gutmark, Prog. Energy Combust. Sci. 18 (1992) 117-132.
9. U.G. Hegde, D. Reuter, B.R. Daniel, B.T. Zinn, Comb. Sci. and Tech. 55 (1987) 125-138.
10. T. Schuller, D. Durox, S. Candel, Combust. Flame 128 (2002) 88-110.
11. R. Rock, L.P.H. Goey, L.M.T. Somers, K.R.A.M. Schreel, R. Parchen, Combust. Theory Modelling 6 (2002) 223-242.
12. Z. Shu, S.K. Aggarwal, V.R. Katta, I.K. Puri, Combust. Flame 111 (1997) 276-295.
13. S.J. Kwon, M.S. Cha, M.S. Choi, S.H. Chung, Trans. KSME (B) 24 (2000) 1662-1669.
14. R.B. Price, I.R. Hurler, T.M. Sugden, Twelfth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1968, p. 1093.
15. S. Ducruix, D. Durox, S. Candel, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 28, The Combustion Institute, Pittsburgh, 2000, p. 765.