

프로판 예혼합화염의 소음발생 매커니즘에 관한 실험적 연구

이원남* · 박동수**

An Experimental Study on the Noise Generation Mechanisms of Propane Premixed Flames

Wonnam Lee*, Dong Soo Park**

ABSTRACT

The Noise generation mechanisms of propane laminar premixed flames on a slot burner have been studied experimentally. The sound levels and frequencies were measured for various mixture flow rates (velocities) and equivalence ratios. The primary frequency of self-induced noise increases with the mean velocity of mixture as $f \propto U_f^{1.44}$ and the measured noise level increases with the mixture flow rate and equivalence ratio as $p \propto U_f^{1.7} F^{0.2}$. The nature of flame oscillation and the noise generation mechanisms are also investigated using a high speed CCD camera and a DSRL camera. The repetition of sudden extinction at the tip of flame is evident and the repetition rates are identical to the primary frequencies obtained from the FFT analysis of sound pressure signals. CH chemiluminescence intensities of the oscillating flames were also measured by PMT with a 431 nm(10 FWHM) band pass filter and compared to the pressure signals.

Key Words : Laminar premixed flame, Self-induced noise, Combustion instability

1. 서론

층류 예혼합화염은 가정용, 상업용 및 산업용 연소시스템에 널리 사용되고 있다. 특히 회박 예혼합화염은 화염과 연소가스의 온도가 낮게 되어 NOx의 배출이 적어지고 높은 연소효율을 유지할 수 있어 점차 그 응용이 증가하고 있다. 대표적인 기체 연료를 이용하는 층류 예혼합 연소장치인 가정용 보일러, 온수기용 버너에도 이와 같은 회박 예혼합연소를 사용하여 NOx와 CO 배출을 저감하는 연구 개발이 활발하게 진행되고 있다. 그러나 메탄과 프로판이 주 연료로 사용되는 가스연소 장치에서는 층류 화염진과속도가 매우 느리기 때문에 화염의 안정화 영역이 비교적 좁아서 불안정한 화염을 형성하기 쉽다는 단점을 가지고 있다. 또한 회박연소로 형성된 불안정한

화염은 소음의 원인이 되고 심한 경우에는 연소기의 고장을 발생시키기도 한다.

화염에서 발생하는 소음에 대한 연구는 주로 제트화염(jet flame)과 환형버너(annular burner)를 이용하여 수행되었다. Candal et al⁽¹⁾은 냉각된 평면판에 버너의 화염을 충돌시켜서 발생하는 소음에 대한 연구에서 화염의 주기적인 소음이 소음발생의 원인이라고 설명하였다. 또한 층류 예혼합화염의 안정화를 위한 환형버너의 실험에서는⁽²⁾ 불안정한 화염의 끝 부분이 갑자기 연소하면서 화염이 붕괴되는 과정에서 소음이 발생하며 이는 이웃하는 화염면이 주기적으로 붕괴하며 화염면적의 급격한 감소와 관계가 있다고 하였다. 진성호 등⁽³⁾도 환형제트에서의 자발적인 소음에 대한 연구에서 CH 라디칼의 신호의 변화와 음압의 변화가 유사함을 관측하고 이를 이용하여 화염면의 변화와 소음발생의 관계를 설명하였다. 그러나 이와 같은 연구들은 대부분 연료과농 조건($\Phi > 1.0$)에서 원형제트 형상을 갖는 단일 화염을 이용하여 수행되었으며, 가정용 가스보일러

* 단국대학교 기계공학과

** 단국대학교 대학원

† 연락처: wlee@dku.edu

등과 같은 층류예혼합 연소를 이용하는 대부분 실용연소기는 대부분 슬릿 등과 같은 다양한 형태의 노즐판으로부터 함께 형성되는 다수의 화염을 사용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 슬롯버너를 이용하여 다수의 슬롯으로부터 생성된 2 차원 구조를 갖는 화염의 소음 발생 특성을 실험적으로 알아보았다. 특히 희박 예혼합화염에서 소음이 발생하는 영역을 찾아내고, 소음의 특성과 발생 메커니즘에 대한 실험적 연구를 수행하였으며 또한 화염들의 상호작용의 역할을 알아보았다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

희박 예혼합화염(희박화염)의 연소 특성에 대한 실험에는 폭 1 mm 길이 50 mm의 슬롯이 적층된 구조의 노즐을 갖는 슬롯버너를 사용하였다. 노즐은 두께 1mm의 스테인리스 스틸 판을 1 mm 간격으로 겹쳐놓은 형상으로 구성되어 있다. 중앙에 위치한 4개의 슬롯에는 연료의 유량과 당량비를 변화시킬 수 있는 내부화염을 형성하고, 양옆에는 일정한 당량비와 유속을 가지는 희박화염을 고정된 상태에서 외부화염을 만들었다. Fig. 1은 슬롯버너에서 형성되는 화염의 개략도를 보여주고 있으며, 이때 외부에 형성된 화염은 내부화염을 안정시키는 역할을 한다. 내부에 만들어진 화염은 유량과 당량비 조건에 따라 진동과 소음이 발생하게 된다.

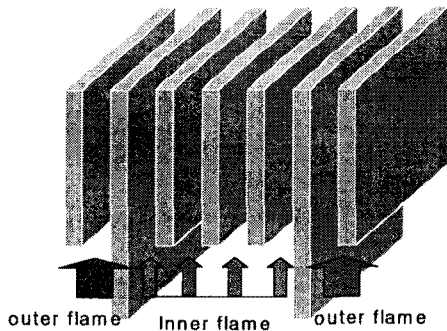


Fig. 1 Slot burner concept.

노즐에 공급되는 연료와 공기의 제어에는 4개의 질량흐름 제어기(MFC, MKS, brooks)와 Readout 장치(Locas/Gmate 2000)가 사용되었다. 본 실험에 사용한 연료는 프로판(순도 99.0% 이상)이며 산화제로는 공기를 사용하였다. 소음 발생 원인을 분석하기 위하여 고속 카메라(FASTCAM-Ultima APX, Photron limited

2003)를 사용하여 1/4000 fps (frame per second)로 연속 이미지를 촬영하였으며, 디지털 카메라(Nikon D-100)로 ISO 800, F#=11, f=50 mm, shutter speed 1/4000sec 조건에서 stop-action 사진을 촬영하였다. 음압 레벨(SPL)은 소음계를 이용하여 화염의 측면 310 mm 위치에서 측정하였으며, 소음의 주파수 분석과 CH 라디칼 자발광의 변화와 비교하기 위한 음압의 측정에는 마이크로폰(B&K)과 오실로스코프를 사용하였다.

2.2 실험방법

실험은 슬롯 노즐의 중앙 4개에 내부화염을 형성하고 양옆으로 외부화염을 형성하여 내부화염을 안정화시킨 후 내부화염에 공급되는 당량비와 유속을 변화시키면서 진행되었다. 이때 외부화염의 당량비와 유속은 일정하게 유지하면서 소음이 발생하기 시작하는 조건을 당량비와 유속의 기준으로 설정하였으며, 내부화염에 공급되는 연료는 400 sccm에서 시작하여 50 sccm 씩 700 sccm 까지 단계별로 증가시켰다. Table 1은 각각의 연료유량에서 기준이 되는 실험조건을 보여주고 있다. 이때 내부화염에 공급되는 희박예혼합기의 유속(U_f)은 내부화염이 형성되는 4 개의 슬롯과 4 개의 스테인리스 판을 포함하는 폭 8 mm, 길이 50 mm의 단면적으로 계산된 평균 속도를 의미한다.

실험은 설정된 연료 유량에 대하여 공기 유량을 증가시키면서 수행되었으며, 이때 공기 유량의 증가에 따라 소음이 발생하지 않는 화염이 소음 발생 화염으로 변하고 다시 소음이 발생하지 않는 화염으로 돌아오게 된다. 소음이 발생하는 영역내의 음압(SPL)이 가장 큰 지점에서 주파수와 음압을 측정하였다. 또한 유속 및 당량비의 변화가 소음발생 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 연료를 600 sccm 으로 고정하고 Table 2의 조건으로 공기량을 변화시키면서 나타나는 음압과 주파수를 측정하였다.

Table 1 Experimental condition 1.

Case	Fuel (sccm)	Air (slpm)	EQ ratio	U_f (m/s)
1	400	12.27	0.775	1.055
2	450	13.41	0.798	1.155
3	500	14.34	0.829	1.236
4	550	15.51	0.843	1.388
5	600	16.71	0.854	1.443
6	650	17.49	0.884	1.512
7	700	18.84	0.884	1.628

*외부화염: Fuel(200 sccm), Air(5.17 slpm)
EQ ratio(0.92), U_f (0.895 m/s)

소음이 발생하는 메커니즘을 이해하기 위하여 소음이 발생하는 화염의 long-exposure(셔터 속도 1/50초) 사진과 stop-action 사진(셔터 속도 1/4000초)을 촬영하였다. 고속카메라를 이용하여 소음이 발생하는 화염의 진동 패턴을 살펴보았으며, 또한 소음과 CH 자발광을 동시에 측정하고 상관관계를 알아보았다.

Table 2 Experimental condition 2.

Case	Fuel (sccm)	Air (slpm)	EQ ratio	U_f (m/s)
1	600	15	0.952	1.30
2	600	16	0.892	1.38
3	600	16.35	0.873	1.413
4	600	16.71	0.854	1.443
5	600	18	0.793	1.55
6	600	20.25		

*외부 화염: Fuel(200 sccm), Air(5.17 slpm)
EQ ratio(0.92), U_f (0.895 m/s)

3. 결과 및 고찰

1) 소음 발생 화염

외부화염을 고정한 상태에서 내부화염에 공급되는 공기량을 변화시키는 과정에서 일정한 영역에서 화염의 진동과 소음이 발생하였다. Fig. 2와 3은 슬롯버너에 생성된 소음이 발생하지 않는 안정된 화염과 소음이 발생하며 진동하는 화염의 직접사진과 구조를 보여주고 있다. 고정된 프로판 유량(600 sccm)에서, 공기유량을 16.0 slpm(평균유속 1.383 m/s, 당량비 0.892)로 공급하면 안정된 2 개의 층류화염의 형상을 갖는 희박에 혼합화염이 형성되었다. 그러나 공기 유량을 16.71 slpm(평균유속 1.443 m/s, 당량비 0.854)으로 증가시키면 내부화염은 더 이상 2 개로 분리된 층류화염 형태를 유지하지 못하고 1 개의 진동하는 화염 형상으로 변화되었으며 소음이 발생하였다. 그러나 이때 Fig. 4와 같이 스테인리스 스틸 판을 화염의 중앙 부분에 삽입하면 진동과 소음이 소멸되었다. 따라서 본 실험에서 관찰된 진동과 소음이 발생하는 화염은, 안정된 상태에서 생성되었던 2 개의 화염이, 버너에 공급되는 유속 증가와 당량비 감소로 불안정성이 증가하고 화염간의 상호작용으로 진동하는 난일화염 구조로 전이되는 것이라고 판단되었다.

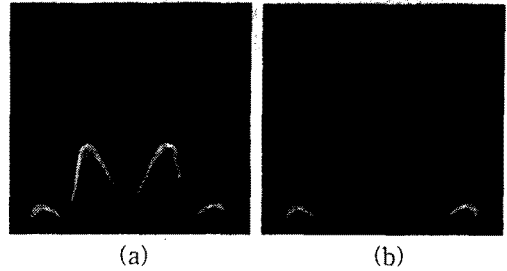
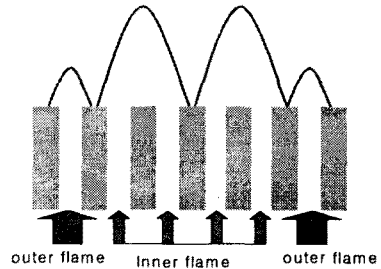
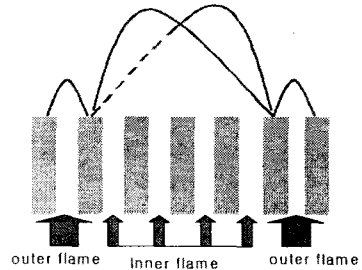


Fig. 2 Long-exposure photos of (a) stable flame and (b) noise generating flame.



(a)



(b)

Fig. 3 Structures of (a) stable and (b) noise generating flames.

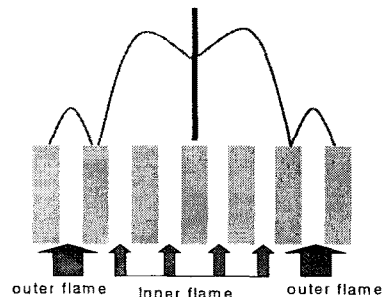


Fig. 4 Oscillating flame is re-stabilized with a center plate.

Figure 5와 6은 공급되는 연료의 유량에 대한 소음이 발생하는 당량비와 평균유속의 영역을 보여주고 있다. 연료 유량의 증가에 따라 소음이 발생하는 평균유속이 증가하고, 당량비 범위가 줄어드는 것을 알 수 있다. 소음이 발생하는 당량비 영역은 프로판 유량 450 sccm 에서 넓어진 후 700 sccm 까지는 조금씩 좁게 나타났다. 본 실험에서 슬롯버너 프로판 회박 예혼합화염의 소음 발생영역은 당량비 0.523-0.915 평균유속 1.028-2.13 m/s 사이에서 나타났다.

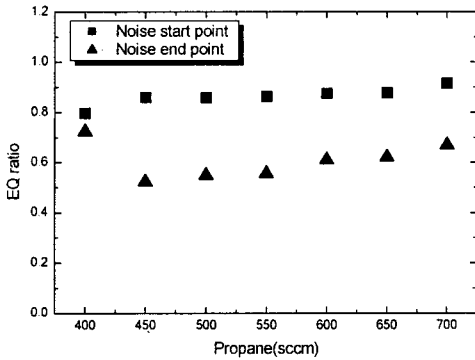


Fig. 5 Noise generating conditions of EQ ratio.

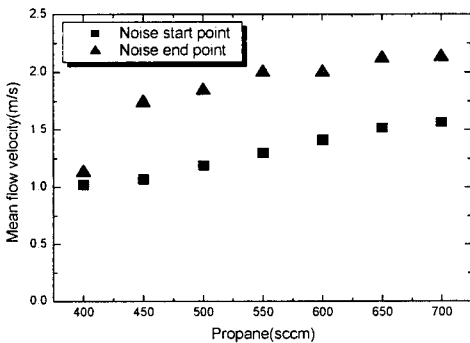


Fig. 6 Noise generating conditions of Mean flow rate.

Figure 7과 8은 각각의 주어진 연료유량에서 소음이 가장 크게 발생하는 조건을 선정하고, 이 조건에서 측정된 소음의 주파수 및 음압과 평균유속 및 당량비의 관계를 보여주고 있다. Fig. 7은 화염에서 발생하는 소음의 주파수, f 는 당량비에 민감하지 않으며 단지 평균유속, U_f 의 증가에 따라 증가하는 것을 보여준다. 이 관계에서 다음과 같은 실험식을 얻을 수 있었다.

$$f \propto U_f^{1.111} \quad (1)$$

그러나 Fig. 8에서 나타낸 것과 같이 화염에서 발생하는 음압의 크기는 평균유속과 당량비의 변화에 모두 영향을 받는 것으로 나타났다. 음압과 평균유속, U_f 및 당량비, F 의 관계로부터 다음의 실험식으로 얻을 수 있었다.

$$p \propto U_f^{1.7} F^{0.2}$$

이로부터 화염에서 발생하는 소음의 주파수는 단지 유동장의 유속과 밀접한 관계가 있지만 소음의 크기는 유속과 당량비 모두의 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 따라서 화염의 진동 주기는 유동장에서 발생하는 와류의 진동 주기에 따라 결정되지만, 진동의 세기는 화염의 열에너지 방출률에 따라 결정된다고 해석될 수 있다.

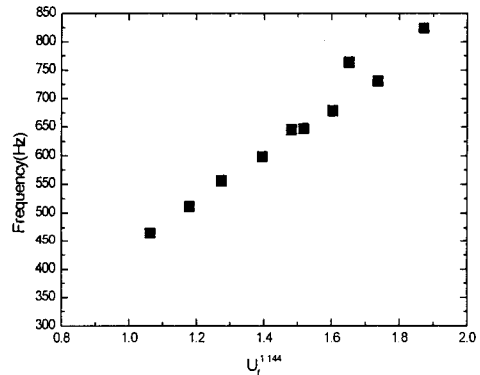


Fig. 7 The effect of mean flow rate on frequency.

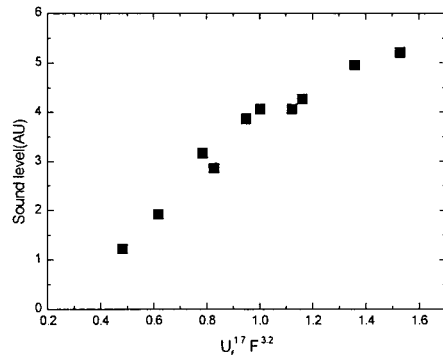


Fig. 8 The effect of mean flow rate and EQ ratio on sound pressure level.

2) 소음 발생 메커니즘

회박 예혼합화염에서 C_2 및 CO_2 자발광의 세기는 CH 자발광에 비하여 비교적 작으므로, 본 실험에서는 CH 필터(430 nm, 10 nm FWHM)를 사용하여 얻어진 이미지와 직접사진을 비교하여 화염 구조의 차이가 거의 없음을 확인한 후, 충분한 광량을 얻기 위하여 CH 필터를 제거하고 셔터속도 1/4,000초의 stop-action 사진과 4,000 fps의 고속사진을 촬영하였다.

Figure 9는 슬롯버너 회박 예혼합화염에서 발생하는 소음의 원인을 알아보기 위하여 고속 카메라로 촬영한 직접사진을 보여주고 있다. 실험 조건은 프로판 600 sccm, 공기 16.71 slpm이며, 이때 소음의 주파수는 약 647 Hz으로 측정되었다. 이 사진으로부터 화염이 와류에 의한 진동과 비슷한 형태로 주기적인 변화를 하는 것을 알 수 있다. 그림에서 왼쪽에 화염이 돌출되고 시간이 지남에 따라 화염이 붕괴가 되면서 강한 CH 자발광을 방출한 후 오른쪽, 왼쪽으로 반복하여 화염이 붕괴되었다. 따라서 소음 발생 메커니즘은 이와 같은 화염의 붕괴와 이에 따른 급격한 열에너지의 방출과 관계가 된다는 것을 알 수 있다. 이 때 붕괴되는 화염의 크기가 증가하면 발생하는 소음의 세기가 증가하였다.

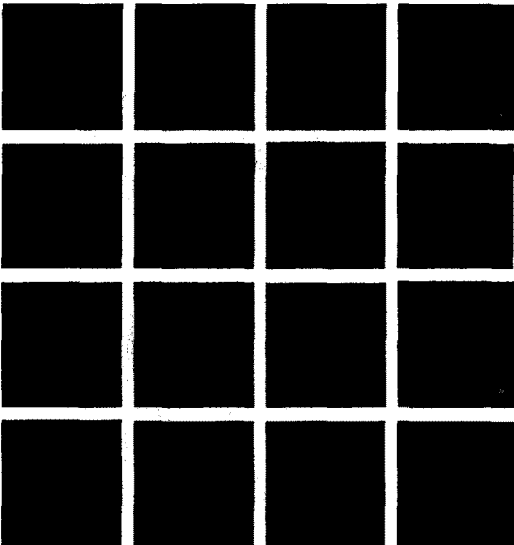


Fig. 10 Sequential photos of a noisy flame.

Figure 10은 프로판과 공기의 유량을 변화시키면서 촬영한 1/4,000 초의 stop-action 사진들, Table 3은 실험 조건을 보여주고 있다. 붕괴되는

화염이 작은 프로판 유량 400 sccm의 경우 화염의 주름이 비교적 적게 나타나는 것을 알 수 있으며, 이때 유속이 낮고, 소음의 세기가 작았다. 그러나 프로판 유량이 증가하면 화염의 주름이 심해지고 붕괴되는 화염이 커지게 되며(Fig. 10의 오른쪽 방향), 이때 유속이 크고 소음의 세기가 커지는 것을 알 수 있다.

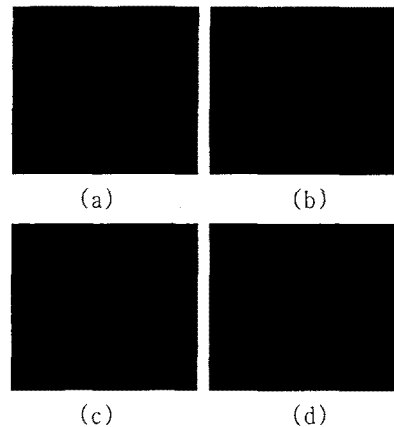


Fig. 10 Stop-action photos with various fuel flow rates.

Table 3. Experimental conditions for Fig. 10.

Image	Fuel (sccm)	Air (slpm)	EQ ratio	Uf (m/s)	SPL (dB)
a	400	12.27	0.775	1.05	48
b	500	14.34	0.829	1.23	67
c	600	16.71	0.854	1.44	72
d	700	18.84	0.884	1.62	77

Figure 11과 Table 4는 프로판 유량을 600 sccm으로 일정하게 유지하며 공기의 유량을 증가시킨 결과를 보여준다. 안정된 화염은 평균유속의 증가와 당량비의 감소에 따라 진동하는 화염으로(Fig. 11의 왼쪽에서 오른쪽으로) 변하게 된다. 그러나 당량비가 감소하면 반응 속도(연소 속도)가 감소하게 되어 화염의 붕괴가 천천히 일어나며 유속 증가에 따라 붕괴되는 화염의 크기가 줄어들게 된다. 그 결과 Table 4에서 보여주는 것과 같이 진동 주파수는 증가하지만 소음의 세기는 작아지는 것을 알 수 있다.

화염에서 발생하는 소음의 음압은 화염의 열 발생률 변화와 CH 자발광의 관계⁽⁴⁾로 설명되었다. 본 연구에서도 소음의 음압변화와 CH 자발광의 변화를 동시에 측정하고, 이를 고속사진의 결과와 관련하여 소음발생 메커니즘을 알아보았다. 고속사진으로부터 화염의 붕괴가 발생하면

강한 자발광이 방출되는 것을 알 수 있다. 이는 인접한 2 개의 화염면이 겹치게 되면 중간에 위치한 혼합기의 온도가 증가하고, 이에 따라 연소 속도가 급격히 증가하게 된다. 여기에서 강한 CH 자발광이 방출되고 열 발생율의 증가에 따른 급격한 밀도 변화가 소음원 역할을 하는 것으로 판단된다. Fig. 12는 PMT와 마이크론을 사용하여 측정된 CH 자발광 신호, I 와 음압, p 를 보여주고 있다. 이 때 CH 자발광으로부터 식(3)을 이용하여 음압을 추정하였으며, 화염의 붕괴와 이에 따른 급격한 열에너지 방출의 소음발생 메커니즘을 확인 할 수 있었다.

$$p(t) = K \left[\frac{\Delta I(t)}{\Delta t} \right]_{t-}, \quad (3)$$

그러나 본 연구에서는 CH 자발광으로부터 식(3)을 사용하여 추정된 음압은 측정된 음압과 완전히 일치하지 않았으며, 오히려 시간에 따른 CH 자발광의 변화가 음압의 변화와 유사한 형태로 나타났다. 이때 마이크론은 상온 대기압에서 약 0.9 ms 의 소리 전파시간에 해당하는 310 mm 거리에 위치하였으며, Fig. 12의 CH 자발광은 1.0 ms, CH 자발광의 변화값은 1.15 ms 의 시간 편이(time shift) 시킨 결과를 나타내었다. 이와 같은 결과는 더 연구가 되어야 할 부분으로, 본 실험에서 연구된 화염의 특징인 하나의 화염에서 발생하는 소음이 아니고 인접한 2 개의 화염의 상호작용에 의해서 소음이 발생하는 것과 관련이 있을 가능성이 있다

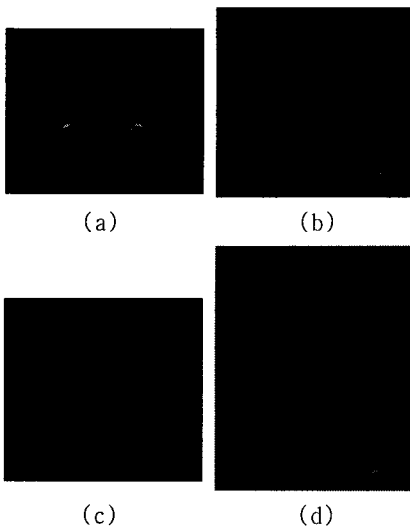
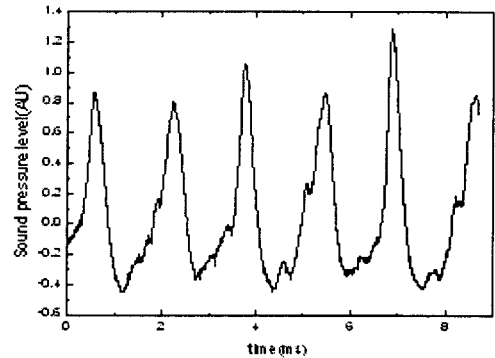


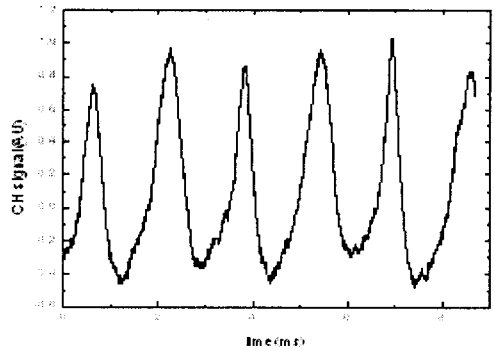
Fig. 11 Stop-action photos with various air flow rates.

Table 4. Experimental conditions for Fig. 11.

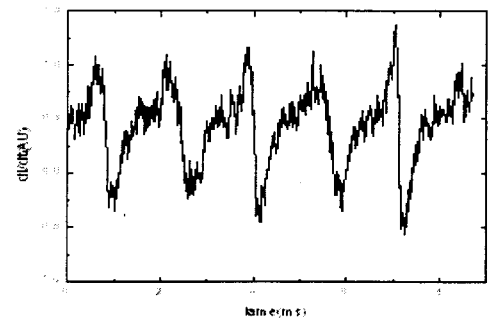
Image	Fuel (sccm)	Air (slpm)	EQ ratio	Uf (m/s)	SPL (dB)
a	600	16	0.892	1.38	
b	600	16.71	0.854	1.44	72
c	600	18	0.793	1.55	72
d	600	20.25	0.705	1.73	65



(a)



(b)



(c)

Fig. 12. Measured data of (a) sound pressure level, (b) CH signal, (c) dI/dt .

4. 결론

슬롯버너에서 생성된 프로판 희박 예혼합화염의 소음 특성과 소음 발생 메커니즘에 관한 실험을 수행하였다. 소음의 주파수는 혼합기 유량의 증가에 따라 증가하였으며 당량비의 영향은 크지 않았다. 그러나 화염에서 발생하는 음압의 크기는 평균유속과 당량비의 변화에 모두 영향을 받는 것으로 나타났다. 이로부터 화염의 진동 주기는 유동장에서 발생하는 와류, 진동의 세기는 화염의 열에너지 방출과 관계가 있다고 생각된다.

고속사진과 CH 자발광 및 소음측정의 결과 화염의 붕괴가 발생하면서 강한 자발광이 방출되는 것을 알 수 있었으며, 인접한 2 개의 화염면이 겹치게 되면 연소속도가 급격히 증가하여 강한 CH 자발광이 방출되고 열 발생율의 증가에 따른 급격한 밀도 변화가 소음원 역할을 하는 것으로 판단된다. 본 연구에서는 CH 자발광으로부터 추정된 음압은 측정된 음압과 완전히 일치하지 않았으며, 오히려 시간에 따른 CH 자발광의 변화가 음압의 변화와 유사한 형태로 나타났다. 이와 같은 결과는 더 연구가 되어야 할 부분으로, 하나의 화염에서 발생하는 소음이 아니고 인접한 2 개의 화염의 상호작용에 의해서 소음이 발생하는 것과 관련이 있으리라 생각된다. 따라서 실용연소기의 희박 예혼합화염에서 발생하는 소음 발생 메커니즘을 이해하기 위해서는 화염의 구조, 유동장 특성, 화염의 붕괴 특성과 소음발생 메커니즘에 대한 연구가 필요함을 알 수 있었다.

참고 문헌

- [1] T. Schuller, D. Durox, and S. Candel, "Dynamics of and Noise Radiated by a Perturbed Impinging Premixed Jet Flame," *Combustion and Flame* 128, 2002, pp.128-88.
- [2] T. Schuller, D. Durox, and S. Candel, "Self-induced combustion oscillations of laminar premixed flames stabilized on annular burners," *Combustion and Flame* 135, 2003, pp.525-537.
- [3] 진성호, 전재훈, 권성준, 정석호, "환형세트에서의 메탄과 공기의 층류 예혼합 화염에서 발생하는 자발적인 소음에 대한 실험적 연구," 제26회 KOSCO Symposium 논문집, 159-165, 2003.
- [4] R. Price, I. Hurie, T. Sugden, *Twelfth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1959. pp. 1093-1102.