

급속 확대 채널 예혼합 화염의 연소 소음 기초 연구

유소* · 김남일**†

A Basic Study on Combustion Noise of Premixed Flames in Sudden Expansion Channels

Zhao Liu*, Nam Il Kim**†

ABSTRACT

Flame stabilization conditions and combustion noise characteristics induced by premixed flames in sudden expansion channels were experimentally investigated. Nozzle size and channel scale were varied continuously, and variation of flame behaviors was examined. Combustion noise was observed at specific configurational conditions, and their mechanism was investigated. This study will help understand premixed flame instability at the burner surface.

Key Words : Flame instability, Sudden expansion nozzle, Combustion noise, Premixed flame

예혼합 화염 연소기를 설계하는데 있어서 화염의 안정화 영역의 확보는 매우 중요하다. 화염 안정화 영역의 확보는 연소기의 운전 범위(TDR, turn down ratio)를 결정하며, 저공해 연소를 달성하기 위한 운전 경로를 결정하는데 매우 중요하다. 특히 난류 화염 연소기에서는 화염 안정화 범위의 확장을 위해서 스웰을 이용한 화염 안정화 또는 예혼합 화염 주위의 유동 확장을 이용하는 경우가 많다[1,2]. 예혼합 평면 화염의 기본 구조를 선택할 경우 연소기 표면에서의 화염 안정화는 연소기의 기공율에 따라 안정화 범위가 주로 지배되는 것으로 알려져 있다. 그런데 실제 연소기의 개발 과정에서는 연소기 기공율의 변화에 따라 연소실 내부에서 원하지 않는 소음이 발생하는 조건을 경험할 수 있다.

이러한 연소 소음은 일반적으로 연소기 내부에서의 음향학적 소음으로 해석되는 경우가 많지만[3], 연소기 표면 근처에 형성된 화염에 대해서는 음향불안정성에 대한 기본 이론을 직접 적용하기에는 어려움이 있다. 이는 연소기 표면 화염의 거동이 연소기 표면형상이나 열적 조건과 직접적으로 상호작용 하기 때문으로 생각된다. 좁은 채널 내부에서의 유동 및 온도 조건에 따른 화염의 전파 속도 및 화염 구조에 대한 수치해석

결과로부터 이러한 특성을 짐작할 수 있다[4,5]. 따라서 본 연구에서는 다양한 기공율의 연소기 형상을 단순화한 구조로 노즐과 채널의 폭을 변경할 수 있는 가변형 급속확대채널을 가진 연소기를 사용하여 화염의 거동 특성을 연구하였다.

본 연구에 사용된 실험 연소기를 Fig. 1에 나타내었다. 연소기의 노즐 사이즈(IG, inlet gap)를 변경할 수 있고 출구쪽 채널의 확장 단차(OS, outlet step)를 마이크로 이송대를 이용하여 정밀하게 변경할 수 있도록 설계함으로써 다양한 형상 조건을 실험할 수 있었다. 연소공간의 길이는 앞뒤 석영판의 높이(QH, quartz height)를 변화시켰다. 연료는 메탄(>99.995%)을 사용하였

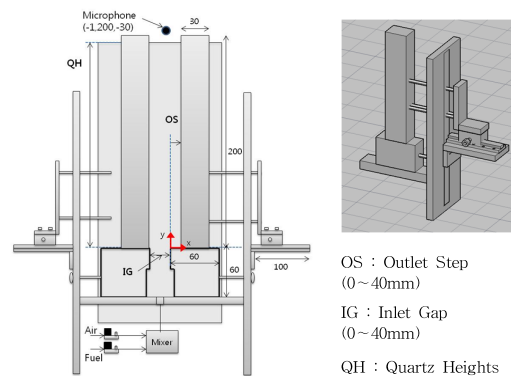


Fig. 1. A schematic of combustor with sudden expansion configuration and a 3D drawing of half side of the burner

* 중앙대학교 기계공학부 대학원

** 중앙대학교 기계공학부

† 연락처, nikim@cau.ac.kr

TEL : (02)820-5753 FAX : (02)825-5753

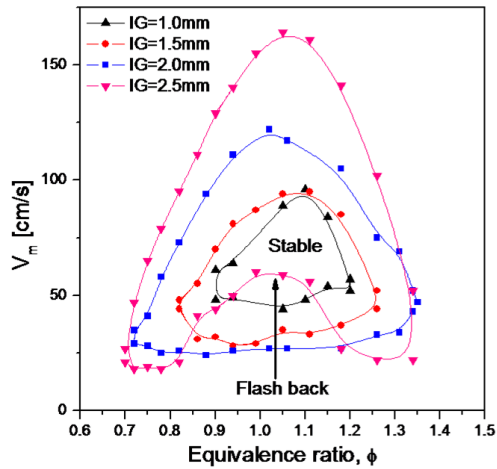


Fig. 2. Flame stabilization limits for various nozzle gaps (channel gap was 20 mm, QH=175 mm)

으며, 수분을 제거한 공기를 사용하였다. 유량은 MFC(질량 유량계)를 사용하여 제어하였다.

우선, 출구 채널의 폭을 20 mm로 충분히 크게 설정한 조건에서 다양한 노즐사이즈(IG)에 대한 화염 안정화 조건을 Fig. 2에 나타내었다. 노즐 사이즈가 1 mm에서 2.5 mm로 확대되는 동안 화염의 안정화 영역이 점차 증가하는 것을 확인할 수 있다. 화염 안정화 조건은 당량비(ϕ) 0.7~1.35 정도까지 확대되었으며, 평균 유속은 최소 20 cm/s에서 최대 170 cm/s 범위를 가진다. 노즐 간격이 2.5 mm 이상에 이르게 되면 이론혼합비 근처의 당량비 0.94~1.11 조건에서는 노즐 간격이 소염 거리보다 충분히 크게 되어 일부 조건에서 화염의 역화를 관찰할 수 있었다.

화염 안정화 실험 과정에서 세 가지의 화염 구조를 관찰할 수 있었는데, 대표 조건에 대해 약간 왼쪽과 정면에서 바라본 화염의 형상이 유량의 증가에 따라 변화하는 것을 Fig. 3에 제시하였다.

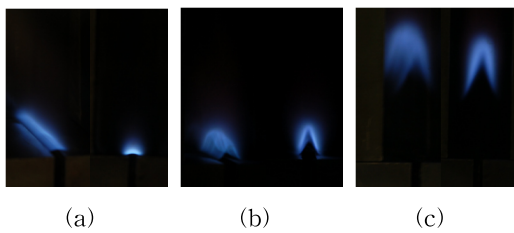


Fig. 3. The flame images in sudden expansion nozzle (channel gap was 20 mm, IG=2mm, QH=175mm, $\phi=0.94$), flow rate increases from (a) to (c)

화염의 역화가 발생하지 않으면서 가장 안정화 범위가 확대된 조건인 노즐 간격 2 mm 조건에 대해 출구채널의 스텝 간격(OS)을 변화시켰을 때 연소 소음의 크기를 비교하였다. 압력 변동을 측정하기 위해서 마이크로폰(130E20, PCB)을 출구 노즐 상부 200 mm 위치에 두었다. 측정 압력 변동을 Labview를 이용하여 FFT 변환한 결과를 Fig. 4에 비교하였다. 여기서 SPL A(Sound Pressure Level A)를 사용하였다. 출구 채널의 스텝 간격이 2 mm와 3 mm이 조건에서의 FFT 결과를 각각 Fig. 4(a)와 4(b)에 해당 조건에서의 화염 사진과 함께 제시하였다. 채널 스텝의 감소에 따라 전체적으로 소음의 강도와 주파수가 증가하는 것을 알 수 있었다[6]. 이는 연소기의 연공부와 밀폐부의 비 또는 연소기의 기공율에 따른 연소 소음의 특성 변화를 의미한다.

연소기 출구 채널에서의 단차 변화와 연소 공간의 크기 변화에 따른 최대 압력변동의 크기 변화를 실험한 결과가 Fig. 5이다. 채널의 길이(Q

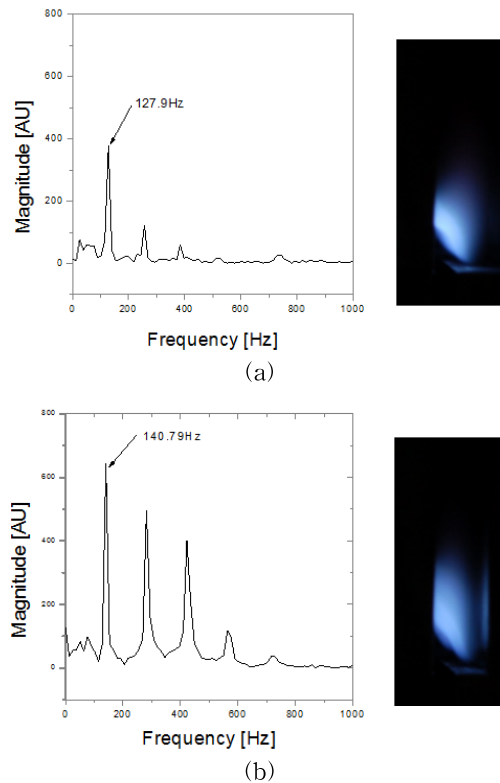


Fig. 4. Frequency of combustion noise within sudden expansion channels and direct flame images (a) OS=4mm, (b) OS=3mm (IG=2mm, $\phi=0.94$, $V_m=91\text{cm/s}$)

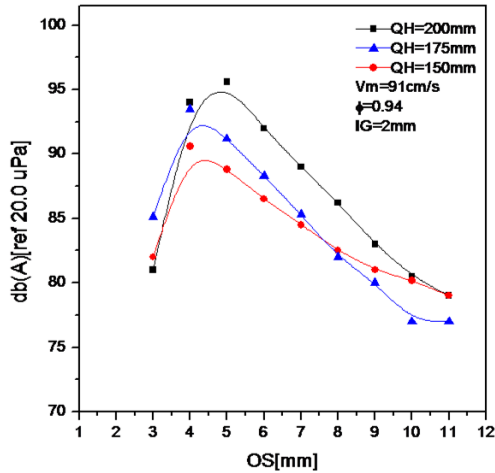


Fig. 5. Amplitude of the combustion noise depending on channel length and step scales

H)를 200 mm로부터 150 mm로 감소함에 따라 최대 연소소음은 감소하는 경향을 보이고 있다. 하지만 채널 길이 변화의 모든 조건에서 특정 채널 단차(OS) 크기 (4~5mm) 근처에서 최대 연소소음이 관찰되었다[5]. 다만 연소공간 길이의 감소에 따라 최대 압력 변동이 발생하는 스텝 길이 조건 역시 약간 감소하는 경향을 관찰할 수 있는데, 이에 대해서는 보다 세밀한 출구 단차 제어를 통한 자세한 실험을 추가 수행중이다.

이러한 결과로부터 본 연소기의 소음이 단차 공간에 형성된 유동 재순환 특성에 의해 지배됨을 짐작할 수 있다. 그리고 이러한 유동 재순환 구조는 채널의 길이에 의해 결정되는 음향학적 압력 변동에 직접 영향을 받고 있다. 다만 이러한 유동 재순환 구조가 화염의 구조에 어떤 형태로 영향을 미치고 그것이 화염 불안정성에 가진 효과를 일으키는지는 아직 불명확하여서 이에 대

한 추가 연구가 필요하다. 이에 대한 추가 연구를 통해 기공율이 낮은 연소기의 표면에서 발생하는 화염의 음향학적 불안정성을 이해한다면 예혼합 연소기의 설계에 도움 될 것이다.

후 기

본 연구는 경동나비엔의 연구지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] M. Leyko, F. Nicoud, S. Moreaud, T. Poinsot, "Numerical and analytical investigation of the indirect combustion noise in a nozzle" C. R. Mec., Vol. 337, 2009, pp. 415-425.
- [2] Mario Ditaranto, Jogen Hals, "Combustion instabilities in sudden expansion oxy-fuel flames", Combust. Flame, Vol. 146, 2006, pp. 493-512.
- [3] Tapan K. Sengupta, Thierry Poinsot, "Instabilities of Flows: With and Without Heat Transfer and Chemical Reaction", Springer Wien New York, 2010.
- [4] N.I. Kim, K. Maruta, "A numerical study on propagation of premixed flames in small tubes", Combust. Flame Vol. 146, 2006, pp. 283-301.
- [5] N.I. Kim, "Effect of an Inlet-Temperature Disturbance on the Propagation of Methane-Air Premixed Flames in Small Tubes", Combust. Flame, Vol. 156, 2009 1332-1338.
- [6] Daesik Kim, "Thermoacoustic analysis model using flame transfer function", 제 43회 KOSCO SYMPOSIUM 논문집, 2011, pp. 147-153.