

# 예혼합 보염기 화염의 희박 화염 날림에 음향 가진이 미치는 영향에 관한 연구

정찬영\* · 황정재\*\* · 윤지수\* · 김태성\* · 신재익\* · 윤영빈\*\*

## Analysis of Acoustic Excitation Effect on Lean Blowoff in Premixed Bluff Body Flames

Chanyeong Jeong\*, Jeongjae Hwang\*\*, Jisu Yoon\*, Taesung Kim\*, Jeoik Shin\*, Youngbin Yoon\*\*

### ABSTRACT

The blowoff phenomenon was experimentally investigated in a ducted combustor according to the acoustic excitation. The blowoff equivalence ratio rapidly increases at specific acoustic excitation frequencies. A resonance phenomenon occurs when the excitation frequency approaches the harmonic frequency of the combustor. The resonance increases the velocity fluctuation in the combustor and the infiltration velocity of the unburned gas in the shear layer. Consequently, the mixture velocity exceeds the burning velocity and the blowoff occurs at the higher equivalence ratio.

**Key Words** : Lean blowoff, Acoustic excitation, Resonance, Premixed bluff body flame

보염기는 고속유동 조건에서 안정하게 유지시키기 위한 장치로써 널리 사용되어 왔다. 따라서 보염기를 사용한 화염의 연소 한계에 대한 연구가 지속적으로 이어져 왔으며, 2009년에 Shanbhogue[1]가 이전까지 있어왔던 희박 화염 날림에 대한 연구를 정리하면서 그에 대한 후속 연구가 이루어져 왔다. Chaudhuri는 다양한 이미지 기법을 적용하여 전단층에서 존재하는 유동이 화염핵에 의해서 재점화되지 않을 때 화염이 소멸된다는 결론을 도출하였다[2]. Dawson[3]과 Kariuki[4]는 화염구간이 재순환 영역으로 들어오는 차가운 반응물의 유입으로 인해 분열된다고 제안하였다. 또한 소멸 특성 시간이 연소기의 특성 시간보다 길다는 사실을 밝혔다. 그러나 연소기에 외부 가진이 존재할 때 희박 화염 날림에 미치는 영향에 대해서는 연구가 거의 이루어지지 않은 상황이다. 따라서 본 논문에서는 보염기 화염의 희박 화염 날림에 대해 외부 음향 가진이 미치는 영향에 대해 연구하였다.

Fig. 1은 실험에 사용된 연소기의 개략도이다. 연소기는 가로와 세로 모두 40 mm 인 덕트형 연소기이다. 공기와 연료의 유량은 모두 MFC를 이용해서 조절된다. 연료로는 메탄(CH<sub>4</sub>)이 주 성분인 천연 가스를 이용했다. 연소기 상단에는

음향 경계로 오리피스를 두었다. 음향 가진을 위해 스피커는 오리피스 105 mm 에 설치하였다. 보염기는 한 번의 길이가 10 mm 인 비-거터형 보염기를 사용하였다.

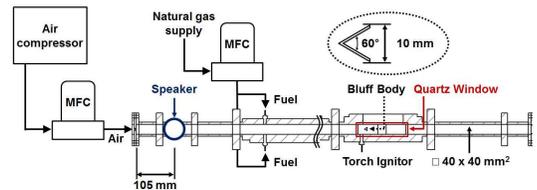


Fig. 1 Schematic of the ducted combustor with the v-gutter bluff body.

이전의 연구에서 특정한 가진 주파수에서 희박 화염 날림이 더 높은 당량비에서 발생하는 것을 관찰하였으며, 음향 가진이 희박 화염 날림에 영향을 미칠 때 공진 효과가 중요한 요소로 작용한다고 예측하였다. 따라서 이를 검증하기 위해 실험을 진행하였다.

우선, 연소기의 전체 길이를 변화시켜 음향 가진에 따른 희박 화염 날림이 발생하는 당량비를 측정해 보았다. 연소기 후단에 있는 연장 덕트를 제거하여 길이를 변경하였다. 연소기의 길이 변화는 고유 주파수를 변화시킨다. 따라서 고유 주파수가 변화되면 희박 화염 날림이 잘 발생하는 가진 주파수가 달라질 것으로 예상되었다. Fig.

2(a)와 Fig 2(b)는 각각 연소기의 총 길이가 2015 mm, 1615 mm 인 경우에 가진 주파수에 따른 희박 화염 날림 당량비의 경향성을 보여준다. 두 그림을 비교해보면, 당량비가 최대치가 되는 주파수들이 서로 약간씩 다른 것을 알 수 있다. 연소기의 길이 변화에 따라서 희박 화염 날림이 더 잘 발생하는 주파수가 달라진 것이다. 그리고 각 그림에는 고유 주파수에 따른 조화 주파수를 함께 표시하였다. 조화 주파수에서 화염 날림 당량비가 최대치를 가지고 조화 주파수에서 멀어질수록 당량비가 감소하는 것을 알 수 있다. 이를 통해 음향 가진 주파수에 따라서 발생하는 공진현상으로 화염 날림 당량비에 차이가 발생한다는 것을 알았다. 그러나 가진 주파수가 커지게 되면 음향 가진의 효과가 서서히 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이는 음향 소스와 보염기 사이의 거리에 따른 음향 감쇠나 보염기 와류의 높은 주파수에 대한 응답특성을 이유로 생각해 볼 수 있으며 명확한 원인에 대해서는 고찰이 필요하다.

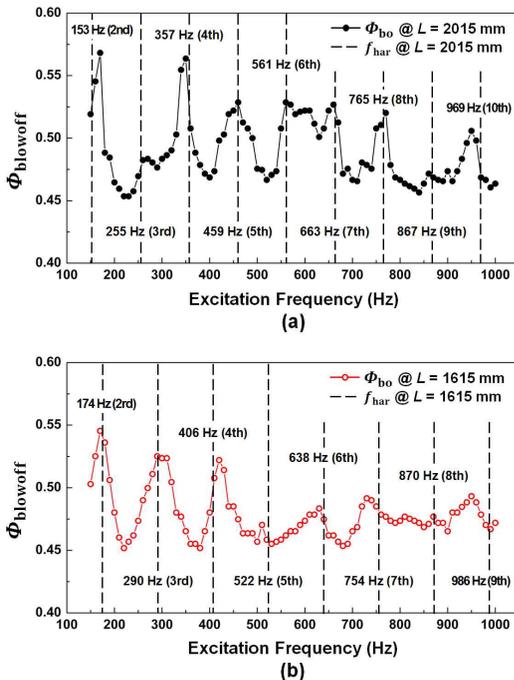


Fig. 2 The trends of blowoff equivalence ratio and harmonic frequencies in a combustor where the total length is (a) 2015 mm, (b) 1615 mm.

다음으로 음향 가진에 따른 공진 효과와 속도 요동의 관계를 알아보기 위해서 two-microphone method를 적용하였다. 실험은  $L = 1615$  mm 인 연소기에서 당량비 0.6인 조건으로 진행되었다. 당량비를 0.6으로 고정한 이유는 가진 상황에서

도 화염이 꺼지지 않고 유지되어야 공진주파수를 동일하게 얻을 수 있기 때문이다. Fig. 3에 two-microphone method를 통해 얻어진 속도 요동의 평균값이 검은색 실선으로 표시되었다. Fig. 2의 경우와 마찬가지로 연소기의 조화 주파수들도 표시하였다. 모든 주파수에서 속도 요동이 0보다 큰 것을 볼 수 있는데, 이는 음향 가진이 연소기 내부에 존재하면 유동에 영향을 미치기 때문이다. 음향 가진이 조화 주파수와 일치 할 때 속도 요동의 최대치가 나타나고 있는 것을 볼 수 있다. 따라서 연소기내에 음향 공진이 발생하면 그로 인해서 속도 요동이 더욱 커지는 것을 알 수 있다. 또한 화염 날림 당량비의 경향성을 파란색 점선으로 같이 표시했다. 속도 요동과 화염 날림 당량비의 피크점이 동일한 주파수에서 생성되고 있다. 두 그래프의 상관 계수도 0.80으로 계산되어 경향성이 상당히 일치함을 알 수 있다.

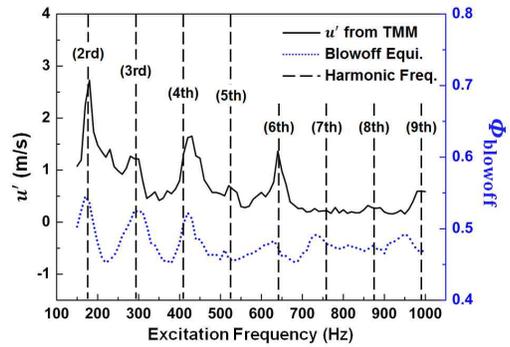


Fig. 3 Trends of the velocity fluctuation and blowoff equivalence ratio.

속도 요동이 변화하게 되면 보염기 후류로 유입되는 차가운 반응물의 속도도 변화할 것이다. 차가운 반응물의 유입 속도는 안정적인 화염 형성에 중요한 요소로 작용한다. 동일한 조건하에서 유입 속도가 증가하여 화염 전파 속도보다 커진다면 화염은 유지되지 못하고 소멸될 것이다. 따라서 가진 주파수에 따른 유입 속도의 변화를 살펴보기 위해 PIV 측정기법을 적용하였다. 장치의 한계로 인해 연소실 길이를 2150 mm로 변경하여 실험을 수행하였다.

Fig. 4는 PIV 실험을 통해 얻은 가진 주파수에 따른 반응물 유입속도의 경향성을 보여준다. Two-microphone method의 결과를 토대로 총 8개의 주파수 조건을 선정했으며 속도 요동의 최대점과 최저점 조건을 각각 2개씩 포함시켰다. 그림에서 검은색 원은 각 위상에서 유입 속도를 나타내며 빨간색 마름모는 평균 유입 속도를 나타낸다. 가진 주파수가 변함에 따라 유입 속도의

평균값이 경향성을 갖는 것을 알 수 있다. 이는 two-microphone method의 경향성과 상당히 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 강해진 속도 요동은 차가운 반응물의 유입 속도를 더 크게 한다는 것을 확인할 수 있다. 증가한 유입 속도에 대응해서 화염이 유지되기 위해서는 더 큰 화염 전파 속도가 필요하게 되므로 결국에는 화염 날림은 더 높은 당량비에서 발생하는 것이다.

“Measurement in turbulent premixed bluff body flames close to blow-off”, *Combust. Flame*, 2012, Vol. 159, Issue. 8, pp. 2589-2607

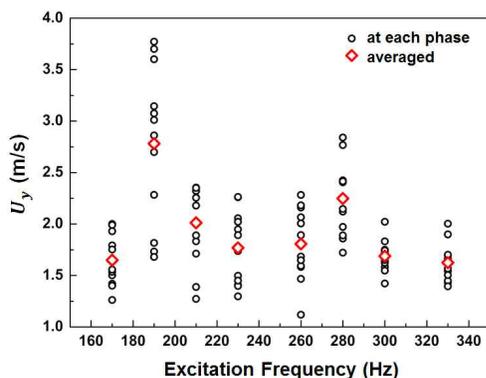


Fig. 4 The distribution of the inflowing velocity at each phase with the excitation frequencies.

## 후 기

본 연구는 서울대학교 IAAT와 연계된 미래창조과학부의 중견연구자지원사업(2010-0015100)과 산업통상자원부의 재원으로 KETEP의 지원을 받아 수행한 신재생에너지기술개발사업 (No. 2011951010001C)의 연구 결과이며 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- [1] S.J. Shanbhogue, S. Husain, T. Lieuwen, "Lean blowoff of bluff body stabilized flames: Scaling and dynamics", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 35, Issue. 1, 2009, pp. 98-120.
- [2] S. Chaudhuri, S. Kostka, M.W. Renfro, B.M. Cetegen, "Blowoff dynamics of bluff body stabilized turbulent premixed flames", *Combust. Flame*, 2010, Vol. 157, Issue. 4, pp. 790-802
- [3] J.R. Dawson, R.L. Gordon, J. Kariuki, E. Mastorakos, A.R. Masri, M. Juddoo, "Visualization of blow-off events in bluff-body stabilized turbulent premixed flames" *Proc. Combustion. Inst.* Vol. 33, 2011, pp. 1559-1566.
- [4] J. Kariuki, J.R. Dawson, E. Mastorakos,