

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 42(12), 1004-1012(2014)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2014.42.12.1004

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

예혼합 화염 날림 메커니즘에 음향 가진이 미치는 영향에 대한 실험적 연구

신재익, 정찬영, 윤영빈*

An Experimental Study of Acoustic Excitation Effect on Blowoff Mechanism for Premixed Flame

Jaeik Shin, Chanyeong Jeong and Youngbin Yoon*

Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University

ABSTRACT

In this study, blowoff was investigated in a ducted combustor with the bluff body when acoustic excitation was forced. To observe the flame structure, OH radical chemiluminescence was used and the image was analyzed by using POD (Proper Orthogonal Decomposition) algorithm. Natural gas mainly composed of methane was used as fuel. Blowoff occurred when the equivalence ratio was reduced. Equivalence ratio causing blowoff was measured by changing air flow rate, excitation frequency and sound pressure. Blowoff equivalence ratio was varied depending on the experimental conditions. Vortex frequency behind the bluff body and resonance effect in combustor are the main factors that affect the blowoff equivalence ratios with the excitation.

초 록

본 연구에서는 보염기가 장착된 덕트형 연소기에 음향 가진을 주었을 때 화염의 날림 현상을 이해하기 위한 실험을 수행하였다. 화염 구조를 관측하기 위한 촬영기법으로는 OH* 자발광이 적용되었고 POD (Proper Orthogonal Decomposition) 알고리즘을 이용하여 이미지를 분석하였다. 연료는 메탄이 주 성분인 도시가스를 사용했으며 당량비를 낮춤으로써 화염 날림이 발생하도록 하였다. 공기 공급 유량, 가진 주파수 및 음압에 변화를 주며 실험을 하여 화염 날림이 발생하는 당량비를 측정하였다. 실험 조건에 따라 화염 날림 당량비 값이 크게 달랐으며 이러한 당량비 값에 변화를 주는 요인은 보염기 후류의 와류 주파수와 연소기 공진 효과의 영향으로 판단된다.

Key Words : Ducted combustor(덕트형 연소기), Premixed flame(예혼합 화염), Bluff body(보염기), Blowoff(화염 날림), Forced condition(가진 상태)

1. 서 론

자동차 및 항공기 엔진 산업이 발달함에 따라 기존 연소기보다 발전된 고출력, 고효율 연소기

의 개발이 진행중이다. 연소기의 성능이 향상되면서 안정성을 요구하게 되었고, 연소기 내에서 안정한 화염을 얻어내는 연구가 활발히 진행되어 왔다. 안정한 화염을 얻어내기 위해서는 연소기

† Received : December 27, 2013 Revised : September 23, 2014 Accepted : September 29, 2014

* Corresponding author, E-mail : ybyoon@snu.ac.kr

내부에 유속이 순간적으로 감소되는 영역이 필요하게 되었고, 보염기를 사용함으로써 재순환 영역을 형성하여 안정한 화염을 지속적으로 형성하였다. 이후 다양한 형상의 보염기에 대한 연구가 진행되었으며 보염기 형상에 따라 안정된 화염의 구조 및 동특성이 달라진다는 사실이 입증되었다 [1,2]. 보염기를 이용하여 화염이 안정해졌음에도 당량비 값이 변화함에 따라 화염면의 발생 속도와 연료 유입 속도의 차이가 발생하여 화염 날림이 발생한다. Glassman 등은 화염 소멸 및 화염 날림과 관련한 주요 무차원수로 Damkohler number (Da) 를 사용하였으며, Da 값이 낮아질 경우 화염 날림이 발생함을 밝혔다[3,4]. 하지만 화염 날림이 발생하는 메커니즘에 대해서는 명확하게 밝혀지지 않았으며, Da 외에도 여러 변수에 의하여 화염 날림이 발생하게 된다[2,5].

가진 주파수 및 음압 또한 화염 날림을 발생시키는 변수로 작용하며, 최근 음향적 가진시 화염 날림에 관한 연구들이 진행되어왔다[6,7]. 보염기가 장착된 연소기의 경우 자발 진동에 민감하므로 이러한 연소기 환경을 모사한 가진시 화염 날림에 관한 연구가 필요하다[8]. 따라서 본 논문에서는 v-gutter 형 보염기를 장착한 덕트 연소기에서 음향적 가진이 화염 날림 현상에 미치는 영향에 대한 실험을 수행하였다. 화염이 안정화 되었을 때 공기 유량, 가진 주파수 및 음압 값에 변화를 주며 화염 날림이 발생하는 당량비를 비교하였다. 또한 화염 형상 촬영을 통한 화염 구조 분석을 하여 보염기 근처에서 화염의 동특성을 파악하였다. 이러한 실험 결과들을 바탕으로 가진시 화염 날림 현상이 발생하는 메커니즘에 대해 분석해보았다.

II. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 실험은 보염기 및 가진 스피커가 장착된 연소기에서 수행되었다. 연소기의 단면적은 $40 \times 40 \text{ mm}^2$ 으로 일정하며 길이 방향으로 긴 덕트 형상이며 연소기 출구가 개방되어있다.

실험 장치는 크게 공기 공급부, 연료 공급 및 혼합부, 연소부로 구성된다. 최대 8 bar 까지 압축이 가능한 압축기를 사용하여 공기를 공급하였으며, 필터와 체습 장치를 통과하여 공기가 연소기로 공급되도록 장치를 설치하였다. 연료는 메탄이 주 성분인 도시가스를 사용했다. 연소기 상단부에는 블록 오리피스를 두어 공기량을 조절하

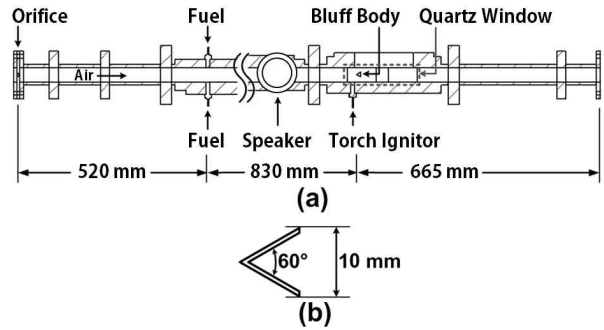


Fig. 1. Schematic of the combustor; (a)overall shape, (b)bluff body

였다. 블록 오리피스는 전체 연소기의 음향학적 경계로서 작용하며, 오리피스와 연소실의 면적비는 0.125 이다. 연료 분사는 오리피스를 기준으로 520 mm 뒤에서 이루어지며, 혼합부 위와 아래 벽면에 설치된 지름 0.8 mm 의 단공형 분사기에서 공기 유동 방향에 수직으로 분사된다. 혼합부에서 공기와 에혼합된 연료는 보염기 기준으로 210 mm 앞에 설치된 스피커에서 발생하는 음향적 가진을 받고 연소부로 공급된다. 스피커는 150 W 의 출력 및 150 ~ 5000 Hz 의 주파수 범위를 갖는 스피커 (삼미스피커, SU-150EF) 를 사용하였다.

연소부는 점화기, 보염기, 가시화 창과 연장 덕트로 이루어져 있다. 수소와 공기를 사용하는 토치형 점화기를 보염기의 직하부에 설치하여 초기 점화를 하였다. 보염기는 한 변이 10 mm 이고 두 변 사이의 각이 60° 인 v-gutter 형을 사용하였으며, 연소기 옆면에 설치되었다. 보염기 근처의 화염 가시화를 위하여 20 mm 두께의 석영창을 연소기 옆면에 설치하였다. Fig. 1은 실험 장치의 전체적인 구성과 보염기의 형상을 보여주고 있다.

2.2 실험 조건 및 방법

연소 실험 장치는 Fig. 2와 같이 공기 및 연료 조절부와 음향 가진부, 그리고 이미지 촬영부로 구성되어 있으며 동시에 제어하여 실험을 진행하였다.

연소실 유입 공기 유량은 10 g/s 에서 25 g/s 까지 2.5 g/s 간격으로 조절하였다. 공급되는 공기 유량에 따라 연료량을 조절하여 당량비를 계산하였다. 당량비는 최소 0.4에서 최대 1.0 까지 조절 가능하도록 하였다. 공급되는 공기와 연료는 모두 상온으로 290 K 내외의 온도를 갖는다. 가진 주파수는 150 Hz에서 400 Hz 까지 10 Hz 간격으로 조절하였으며, 공기 유량 15 g/s, 음압

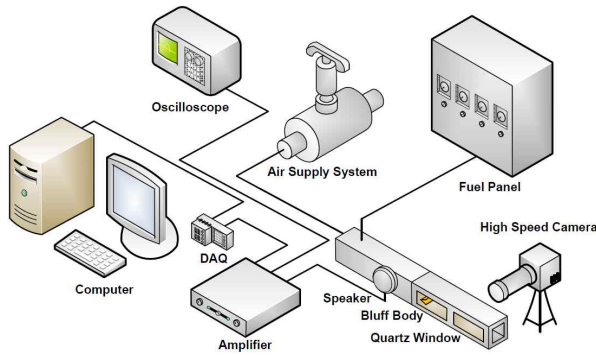


Fig. 2. Experimental apparatus setup

96.1 dB 조건에서는 가진 주파수를 150 Hz에서 1000 Hz 까지 10 Hz 간격으로 조절하였다. 음압은 스피커 입력 전압과 앰프를 제어하여 86.7 dB에서 98.8 dB 까지 조절하였다.

이미지를 통한 화염 구조 변화 및 동적 특성 파악을 위하여 OH* 자발광 촬영 기법을 사용하였다. OH* 자발광 촬영을 위해서 10 nm의 대역폭을 갖는 310 nm 대역 필터를 사용하였다. 촬영 속도는 초당 4000 장으로 고정하였고, 해상도는 1024 x 512 화소를 유지하였다. 고속 카메라로 얻은 이미지는 후처리 과정을 거쳐 화염 전 단층의 동특성을 파악하는데 사용되었다. Table 1에서 실험에 사용된 조건을 확인할 수 있다.

희박 화염 날림은 당량비가 감소함에 따라 나타난다. 따라서 실험시 안정한 화염으로부터 당량비를 조금씩 줄여나가면서 화염 날림이 발생하는지 관찰하였다. 가진 상태에서 화염 날림을 관찰하기 위해서는 안정한 화염을 먼저 형성하고 스피커에서 가진 후 당량비를 줄여나갔다. 연소기 내 유입 공기 유량, 스피커 발생 주파수 및 음압에 변화를 주며 실험을 반복하여 데이터를 얻어냈다. 고속 카메라를 이용한 자발광 촬영은 화염 날림이 발생하기 직전부터 화염이 가시화장에서 관찰되지 않을 때까지 진행되었다.

Table 1. Experimental condition

Fuel Type	Methane
Inlet Air Mass flow (g/s)	10 ~ 25
Mixture Temperature (K)	290±1
Equivalence Ratio	0.4 ~ 1.0
Bluff Body Diameter (mm)	10
Bluff Body Shape	v-gutter
Sound Frequency (Hz)	150 ~ 1000
Sound Pressure Level (dB)	86.7, 92.8, 94.8, 96.1, 97.1, 98.8

III. 실험 결과

3.1 당량비 변화에 따른 화염 특성

실험에 사용되는 연소기에서 비가진시 공기 유량별 화염 안정화 영역을 구하였다. Fig. 3은 레이놀즈수를 변화시켜가며 측정된 가연 당량비를 나타낸다. 공기 유량은 10 g/s에서 25 g/s까지 2.5 g/s 간격으로 조절하였다. 이 경우 연소기에서 공기 유량과 보임기 크기를 이용하여 구한 레이놀즈수는 6000에서 16000까지 값을 가지며 난류 유동을 보인다.

당량비 값의 변화에 따라 화염의 형상이 다르게 나타나며 형상에 따라 화염 날림 영역, 안정화 영역, 불안정 영역으로 분류된다. 화염이 불안정해지기 시작하며 화염의 진동이 시각적으로 보이는 시점을 화염 전이라한다. 화염 날림 현상은 최소 가연 당량비보다 작아질 경우 또는 최대 가연 당량비보다 커질 경우 발생한다. 최소 가연 당량비부터 화염 전이가 일어나는 당량비 사이는 화염 안정화 영역이며, 전이가 일어나는 당량비와 최대 가연 당량비 사이에서는 화염이 불안정해진다. 이 경우 유입되는 혼합기체의 속도가 변하며, 보임기 앞쪽으로 화염이 전이되는 역화 현상이 발생한다. 연료 유량이 증가하게 될수록 최소 가연 당량비와 전이가 발생하는 당량비는 증가하는 경향을 나타내며, 최대 가연 당량비는 거의 동일하여 가연 당량비 범위가 작아짐을 알 수 있다.

최소 가연 당량비보다 당량비가 낮아지며 발생하는 현상을 희박 화염 날림이라하며 본 연구에서는 이러한 희박 화염 날림이 발생하는 당량비를 가진 조건을 변화시켜가며 측정하였다.

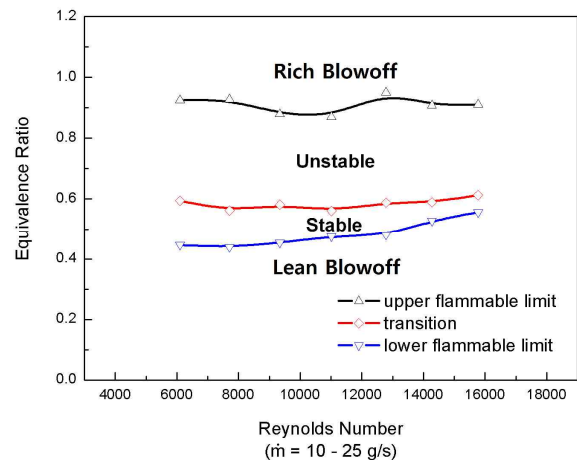


Fig. 3. Flame stability curve

3.2 가진에 따른 화염 날림 특성

가진시 화염 날림이 발생하는 당량비 (ϕ_{bo}) 는 공급되는 공기 유량, 음향 주파수 및 음압에 따라 다르게 나타난다. 본 연구에서는 각각의 변수가 ϕ_{bo} 값에 미치는 영향을 알아보기 위해 공기 유량 또는 음압을 변화시키며 주파수에 따른 ϕ_{bo} 값을 측정하였다.

Figure 4는 공기 유량을 15 g/s 로 일정하게 공급할 때 음압을 바꿔가며 측정한 ϕ_{bo} 값을 나타낸다. ϕ_{bo} 값은 0.452 에서 0.568 까지 나타나며 주파수가 동일한 경우 ϕ_{bo} 값은 음압에 비례하여 증가하는 모습을 보인다. 같은 공기 유량 조건에서 비가진시 ϕ_{bo} 값은 0.448 이다. 이 값은 220, 230 Hz 주파수의 모든 음압에서 ϕ_{bo} 값과 유사하며, 이 주파수의 화염을 관측한 결과 비가진시 화염 날림 형상과 유사하였다. 이와는 반대로 170 Hz 와 350 Hz 에서는 비가진시 보다 ϕ_{bo} 값이 매우 높게 나타나고 있다. 이를 통해 ϕ_{bo} 값이 급격하게 증가하는 특정 주파수가 있다고 판단할 수 있으며 이러한 현상을 종합적으로 분석하기 위하여 유량 변화에 따른 ϕ_{bo} 값을 측정하였다.

Figure 5는 음압이 96.1 dB 로 일정할 때 공기 유량을 바꿔가며 측정한 주파수에 대한 ϕ_{bo} 값을 나타낸다. 평균적인 ϕ_{bo} 값은 공기 유량에 비례하여 증가하는 모습을 보이며 특히 170 Hz 와 350 Hz 의 경우 ϕ_{bo} 값이 모든 유량에서 증가하는 모습을 보인다. 낮은 유량에서 ϕ_{bo} 값의 형태가 더욱 뚜렷하게 나타났으며 모든 유량에서 곡

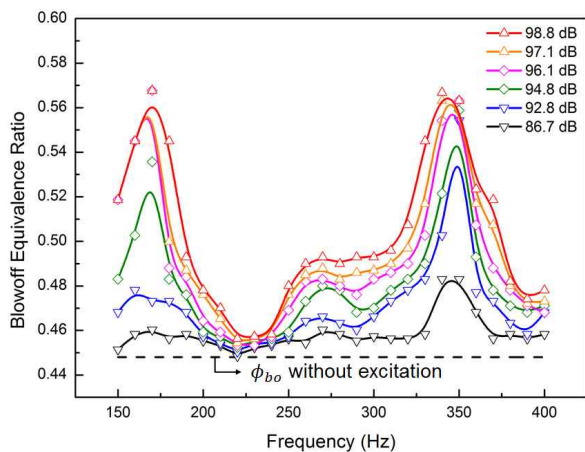


Fig. 4. Blowoff equivalence ratio with varying acoustic frequency and sound pressure level

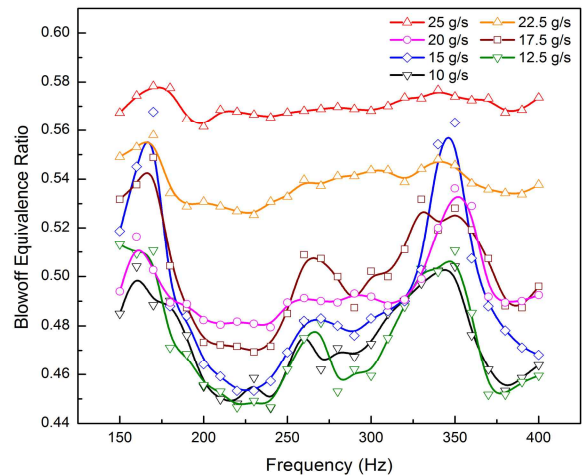


Fig. 5. Blowoff equivalence ratio with varying acoustic frequency and air flow rate

선의 개형은 비슷하게 나타났다. 하지만 높은 유량에서는 유속이 빠르므로 외부 가진의 영향을 상대적으로 적게 받기 때문에 ϕ_{bo} 값의 변화가 비교적 작게 나타났다.

일반적으로 가진시 ϕ_{bo} 값의 증감에 미치는 주된 요인은 화염 전단층에서 발생하는 와류 주파수와 외부 주파수의 공진 효과로 알려져 있다[9].

화염 전단층에서 발생하는 와류 주파수는 유량이 변함에 따라 발생하는 불안정 주파수와 연소기 형상에 의해 발생하는 공진 주파수와 상호작용에 의한 주파수 등이 있다. 하지만 공기 유량이 변하여도 ϕ_{bo} 값의 증감 곡선은 주파수에 따라 비슷하게 나타났다. 따라서 ϕ_{bo} 값의 증감에 주된 요인은 공기 유량에 변화에 따라 발생하는 와류 주파수가 아니라고 판단된다.

주파수에 따른 ϕ_{bo} 값의 변화를 자세히 알아보기 위해서 주파수의 범위를 150 Hz 에서 1000 Hz 로 늘려서 ϕ_{bo} 값을 측정하였다. Fig. 6은 15 g/s 의 공기 유량에서 96.1 dB 의 음압을 가하였을 때 Fig. 5와 동일한 조건에서 가진 주파수 범위를 1000 Hz 까지 늘려 ϕ_{bo} 값을 측정한 결과이다.

특정 주파수에서 ϕ_{bo} 값은 급격하게 증가하지만, 주파수가 증가함에 따라 ϕ_{bo} 값의 극댓값이 점점 줄어드는 경향을 보인다. 이는 음향 가진 진폭이 고주파수에서 낮게 작용하기 때문이다 [10]. 따라서 주파수가 점점 증가할 경우 ϕ_{bo} 값이 비가진시의 ϕ_{bo} 값인 0.448 근처로 수렴할 것으로 예측된다. 이는 고주파수에서 화염은 비가진시와 화염 날림 형상이 유사해짐을 의미한다.

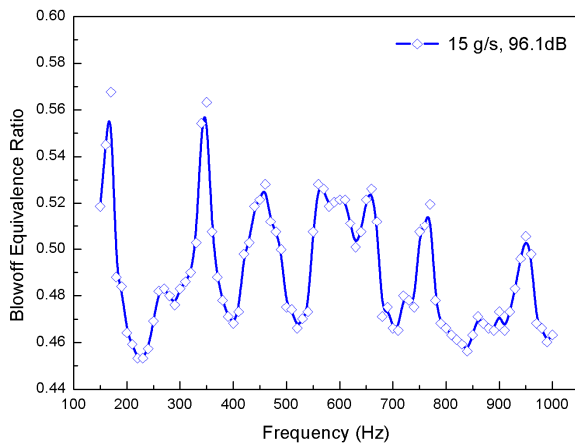


Fig. 6. Blowoff equivalence ratio with varying acoustic frequency (150 – 1000 Hz)

또한 ϕ_{bo} 값이 급격하게 증가하는 주파수가 주기적으로 생성되는 것으로 판단되며, 이에 대한 설명은 화염 이미지 분석을 한 후 논의하겠다.

3.3 자발광 이미지 분석

화염 날림이 발생하는 과정을 알아보기 위해 OH* 자발광 이미지를 분석해보았다. Fig. 7, 8은 각각 비가진시 화염 날림이 발생하기 전 화염 구조와 화염 날림이 발생하는 순간 자발광 이미지를 나타낸다. 화염 날림이 발생하는 시간을 $t = 0$ 으로 하여 표시하였으며 화염 날림이 발생하기 전 t 값은 음수로, 발생한 후 t 값은 양수로 표시하였다. 각각의 이미지는 4 ms 간격으로 배치하였다. 보염기 형상은 빨간색으로 표시하였으며 공기 유량은 15 g/s 이다.

Figure 7은 안정한 화염이 비가진시 화염 날림 당량비에 가까워짐에 따라 발생하는 화염 구조 변화를 나타낸다. 화염 전단층에서 발생하는 와류의 영향으로 화염면의 크기가 일정하지 않게 나타나는 것을 $t = -300, -296$ ms에서 확인할 수 있다. $t = -300 \sim -272$ ms 에서 보염기 후류 재순환 영역의 크기는 거의 일정하며 화염이 부분 소멸되는 모습을 $t = -292$ ms 에서 볼 수 있다. 하지만 소멸 되었던 화염이 회복되는 과정이 반복되고 화염 날림은 발생하지 않게 된다.

Figure 8은 화염 날림이 발생하는 모습을 나타내며 이 때 ϕ_{bo} 값은 0.448 이다. 당량비 값이 ϕ_{bo} 값에 가까워지면 재순환 영역의 크기가 줄어들게 된다. 이 경우 와류는 차가운 연소 반응물들을 보염기 후류로 유입하여 재순환 영역의 붕괴를 유도한다. 이 과정에서 재순환 영역의 크기가 변하는 모습을 $t = -28 \sim -16$ ms 인 이미지에

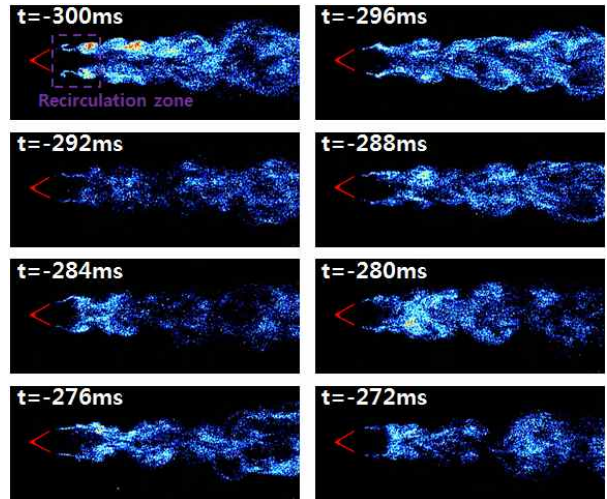


Fig. 7. OH radical chemiluminescence images near the blowoff without excitation

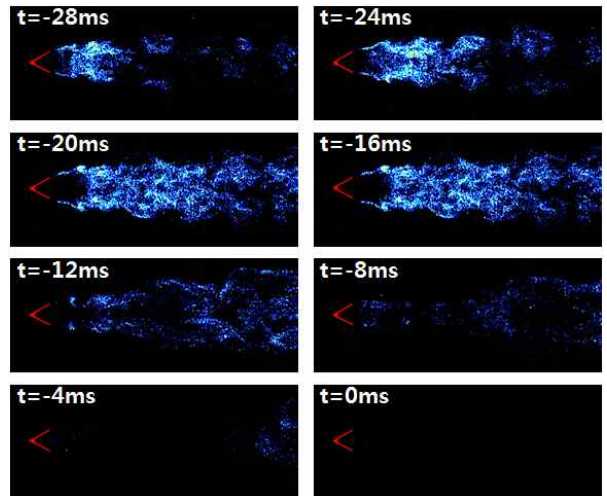


Fig. 8. OH radical chemiluminescence images in the event of blowoff without excitation

서 확인할 수 있다. 그 후 $t = -12$ ms 의 이미지에서 연소 반응물이 후류로 강하게 유입되어 화염면의 크기가 줄어들게 된다. 결국 화염 전파속도가 연소 반응물의 유입 속도보다 느려지면서 재순환 영역은 회복되지 못하고 화염이 소멸되면서 화염 날림 현상이 발생하게 된다.

Figure 9, 10은 공기 유량 15 g/s, 음압 96.1 dB에서 가진시 화염 날림이 발생하는 순간의 자발광 이미지이다. 두 이미지의 주파수는 Fig. 4에서 얻어낸 ϕ_{bo} 값 중 가장 높은 ϕ_{bo} 값과 가장 낮은 ϕ_{bo} 값을 갖는 주파수인 170 Hz 와 230 Hz 로 선정하였다.

Figure 9는 170 Hz 로 가진시 화염 날림이 발생하기 직전 화염 구조의 변화를 나타낸다. 이

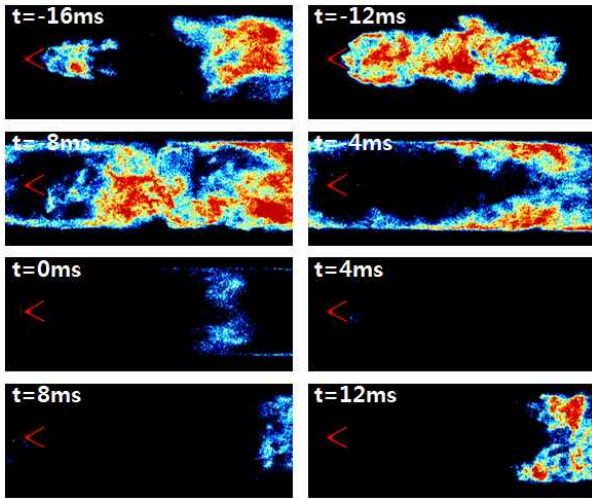


Fig. 9. OH radical chemiluminescence images in the event of forced blowoff (f=170 Hz)

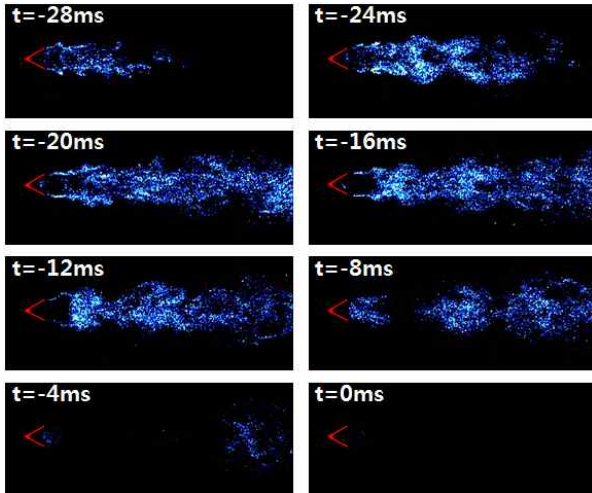


Fig. 10. OH radical chemiluminescence images in the event of forced blowoff (f=230 Hz)

때 ϕ_{bo} 값은 0.568이다. 비가진시와는 다르게 높은 당량비에서 화염 날림이 일어나고 이에 따라 화염 강도가 높은 이미지가 얻어졌다. $t = -16$ ms 이미지를 보면 비가진 상태보다 강한 와류가 발생하여 화염의 부분적 소멸이 뚜렷하게 발생함을 확인할 수 있다. $t = -8, -4$ ms 이미지에서 화염의 상하 크기가 커짐에 따라 연소기 내부를 꽉 채우게 됨을 확인할 수 있다. 또한 음향 가진에 의하여 혼합기체는 강한 유량 요동을 반복하여 갖게 되고 이러한 외부 가진 으로 인해 화염의 역화 현상이 발생하게 된다. 이러한 유량 변동은 연소기의 형상에 의한 고유 주파수와 외부 가진 주파수가 서로 공진 현상을 일으키며 발생하는

것으로 판단된다. 화염 날림이 발생한 후에도 화염이 뒤로 밀려들어오는 것을 8, 12 ms 이미지를 통해 확인할 수 있다.

Figure 10은 230 Hz 로 가진시 화염 날림이 발생하기 직전 화염 구조 변화를 나타낸 것이다. 이때 ϕ_{bo} 값은 0.453 으로 비가진시 ϕ_{bo} 값인 0.448 과 매우 유사한 값을 갖는다. 이미지를 통해 분석한 결과 Fig. 10의 화염의 형상도 비가진시 화염 형상인 Fig. 8과 매우 유사하게 나타난다. 즉 230 Hz 로 가진을 할 경우 화염은 가진의 영향을 거의 받지 않는다는 것을 알 수 있다. 자발광 이미지 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

화염 날림 당량비 근처에서 전단층 와류의 영향으로 연소 반응물이 줄어든 재순환 영역으로 강하게 유입된다. 재순환 영역이 붕괴되고 회복되지 못하며 화염 날림이 발생하였다. 가진 주파수에 따라 화염 날림이 발생하는 형상이 달랐으며 이는 연소기 형상의 효과에 의한 것으로 판단된다. 연소기 형상의 효과는 화염 전단층의 동특성과 밀접한 연관이 있다. 화염 전단층은 외부 가진 주파수에 민감하게 반응하며 외부 가진이 가해질 경우 공진 효과를 발생시킨다. 따라서 비가진시 전단층 와류 주파수를 구하여 화염의 동특성을 파악하였다.

3.4 POD 분석

OH* 자발광 촬영으로 얻은 이미지를 통해 화염 전단층에서 발생하는 주파수를 구하기 위해 POD (Proper Orthogonal Decomposition) 알고리즘을 사용하였다. POD 는 고속 촬영으로 얻어진 대량의 이미지들에 대해 수학적 해석을 적용하여 빈번하게 나타나는 모드를 순서대로 구하는 방법이다. 모드는 시간에 대한 화염의 형상 중 빈번하게 나타나는 형상을 의미하며 낮은 숫자의 모드일수록 더욱 빈번하게 나타나는 형상을 의미한다. 일반적으로 에너지의 특성을 파악하는데 사용하게 되며 화염의 열 방출량 및 와류 섭동을 구하는데 적용할 수 있다[11].

Figure 11 (a)는 비가진 상태 공기 유량 15 g/s, 당량비 0.5 의 안정한 화염을 OH* 자발광 이미지를 이용하여 구한 평균 화염 이미지를 나타낸다. Fig. 11 (b)는 Fig. 11 (a)와 같은 조건의 안정한 화염을 보이기 끝단부터 촬영한 이미지의 POD 모드 분석 결과를 나타낸다. 총 4000 개의 이미지를 분석하여 가장 빈번하게 일어나는 형상을 모드 0이라 정의하였으며, 0 부터 999 까지 1000개의 모드를 얻어내었다. 모드 0의 형상은 시간에 따른 평균 화염 이미지와 유사하다. 89%

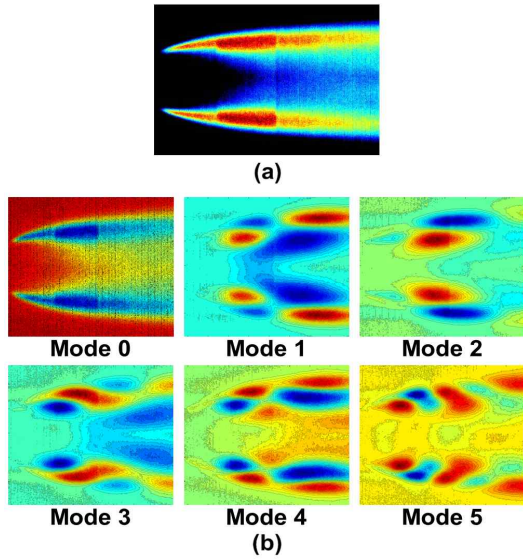


Fig. 11. (a)Time averaged flame image using OH* chemiluminescence, (b)Calculated modes using POD algorithm

이상의 에너지는 모드 0 ~ 5에 나타나며, 본 실험에서는 이를 집중적으로 분석하였다.

Figure 12는 공기 유량 15 g/s에서 비가진시 화염의 모드를 각각 FFT 하여 나타낸 그래프이다. 이를 통해 각각의 모드에 지배적으로 작용하는 주파수를 알 수 있다. 전체적인 화염의 주파수를 알기 위해 각각 모드의 FFT 결과를 합하여 Fig. 13에 나타내었다. 추가적으로 Fig. 12를 통해 높은 진폭을 갖는 주파수에 가장 많은 영향을 미치는 모드들을 분석하여 Fig. 13에 표시하였다. 이를 통해 모드 숫자가 증가할수록 높은 주파수의 형성에 영향을 미치게 됨을 알 수 있다.

또한 Fig. 13을 보면 공기 유량이 달라져도 진폭

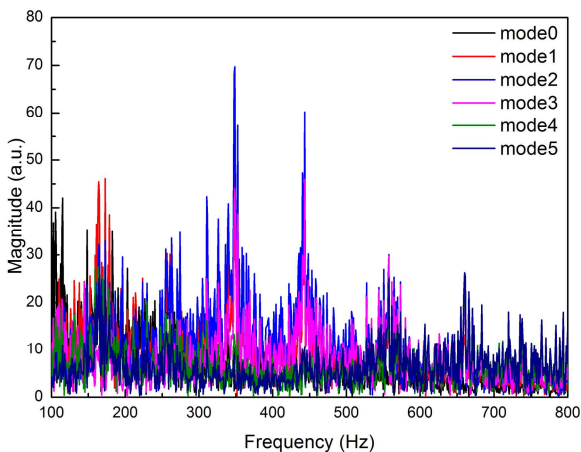


Fig. 12. FFT spectrum according to various mode

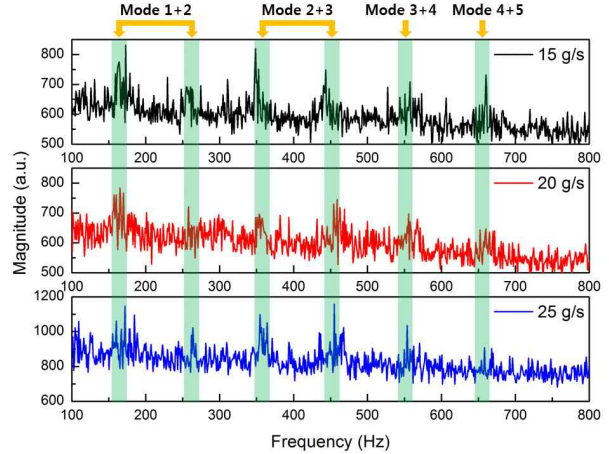


Fig. 13. FFT spectrum according to various air flowrate

이 급격하게 증가하는 주파수가 거의 변하지 않으며 주기적으로 나타남을 확인할 수 있다.

따라서 이 주파수는 유속과 관계없이 발생하는 것이며 이는 연소기 형상에 의한 공진 주파수라 판단된다. 연소기의 공진 주파수 식은 Eq. 1 과 같이 나타낼 수 있다. 연소기는 한 쪽 출구만 열린 관이며 이 때의 이론적인 공진주파수는 최소 공진주파수의 홀수배이다.

$$f_n = \frac{(2n-1)c}{4L} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

이 경우 음속 c 는 공기 및 연료 공급부와 연소부에서의 평균 음속이며 L 은 공급부와 연소부 길이의 합이다. 공급부의 길이는 1350 mm, 온도는 17°C 이며 음속은 341.87 m/s 이다. 연소부의 길이는 665 mm, 온도는 800°C 이며 음속은 819.5 m/s 이다. 위 값을 이용하여 계산한 평균 음속은 423.29 m/s 이다.

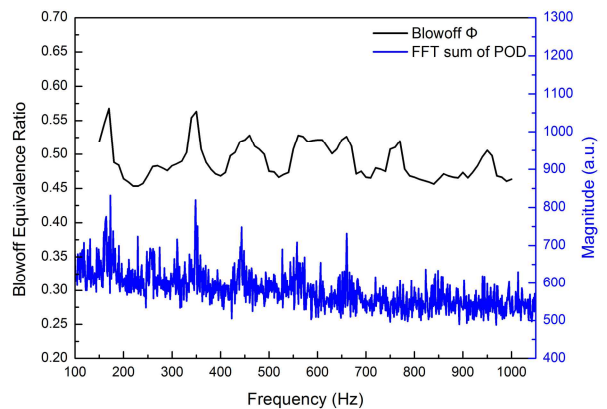


Fig. 14. Comparison of ϕ_{bo} and FFT result of POD analysis

식 (1)에 L , c , 그리고 $n = 1, 2, 3$ 을 대입하면 연소기의 이론적인 공진 주파수 값은 각각 52, 156, 260 Hz 이며 이 주파수 근처에서 POD FFT 합의 진폭이 증가함을 Fig. 13에서 확인할 수 있다. 따라서 화염을 지배하는 주된 주파수는 연소기 형상에 의한 공진 주파수임을 확인할 수 있다.

Figure 14는 POD FFT 결과와 화염 날림이 발생하는 당량비 그래프를 비교하여 나타낸 것이다. 두 그래프를 비교해본 결과 ϕ_{bo} 값이 증가하는 부분에서는 POD FFT의 진폭값도 높게 나타났다. 즉 앞서 구한 연소기 형상에 의한 공진 주파수와 같은 주파수로 가진을 할 경우 ϕ_{bo} 값이 증가한다는 것을 알 수 있다. 연소기 형상에 의해 화염 전단층에서 와류 주파수가 발생하며 이는 외부 가진의 영향을 받아 와류의 효과가 증가하는 것이다. 따라서 공진 주파수로 가진시 와류의 효과가 증가하여 연소 반응물들의 더 강하게 재순환 영역으로 유입되고 이로 인해 높은 ϕ_{bo} 값을 갖게 되는 것이다.

3.5 화염 날림 메커니즘

실험을 통해 얻은 결과들을 바탕으로 화염 날림이 발생하는 메커니즘에 대하여 정리하여 Fig. 15에 나타내었다. 연료량이 감소하거나 공기 유량이 증가함에 따라 재순환 영역의 크기가 감소한다. 이 때 재순환 영역은 붕괴되었다가 회복되

거나 와류의 영향으로 연소 반응물이 유입되어 회복되는 것을 방해한다. 최종적으로 당량비가 ϕ_{bo} 에 가까워지면 연소 속도가 혼합기체의 유입 속도보다 느려지며 화염 날림이 발생한다.

음향 가진시에는 외부 가진 주파수가 화염 전단층의 주파수와 일치하면 공진 효과가 일어나며 와류 효과가 강해진다. 음압이 증가하면 더 강한 와류가 발생하게 되며 강한 와류에 의해 연소 반응물의 유입 속도가 증가한다. 따라서 가진시 공진 효과에 의해 더 높은 당량비에서 화염 날림이 발생하게 된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 v-gutter 형 보염기를 장착한 연소기에 음향적 가진을 주며 회박 화염 날림이 발생하는 메커니즘을 분석하기 위해 실험을 수행하였다. 공기 유량과 가진 조건들을 변화시켜 실험을 수행하여 연료 회박 조건에서 화염 날림이 발생하는 당량비를 얻어내었다. 같은 공기 유량에서 ϕ_{bo} 값은 가진 음압에 비례하여 증가하며 주파수에 따라 0.452 부터 0.568 까지 값을 나타냈다. 또한 같은 음압에서 평균적인 ϕ_{bo} 값은 공기 유량에 비례하여 증가한다. 하지만 공기 유량이 변해도 ϕ_{bo} 값이 급격히 증가하는 주파수는 변하지 않았고 따라서 이는 연소기 형상에 의한 공진 주파수에 영향임을 확인하였다. 화염 전단층의 주파수를 알아보기 위해 비가진 화염 이미지에 POD 알고리즘을 적용한 모드 분석을 하였다. 각각의 모드를 FFT 를 이용하여 분석한 결과 외부 가진 주파수와 화염 전단층 주파수가 유사하면 공진현상이 발생하여 와류의 강도를 증가시키는 것을 확인했다. 강한 와류는 연소 반응물의 유입 속도를 증가시키고 결국 더 높은 ϕ_{bo} 값에서 화염 날림이 발생하게 된다. 연구 결과를 통해 기체 연료를 사용하는 연소기가 음향 가진에 얼마나 민감한지 알 수 있었으며 외부 가진이 있을 경우 연료의 공급량을 증가시켜야 함을 알 수 있었다. 차후에 PIV 실험을 진행하여 전단층 와류 주파수에 의한 연소 반응물의 유입 속도를 측정하여 와류 강도에 대한 연구를 수행할 것이다.

후 기

본 연구는 서울대학교 IAAT와 연계된 교육과학기술부의 중견연구자지원사업(2010-0015100) 과 산업통상자원부 재원으로 한국에너지기술평가원

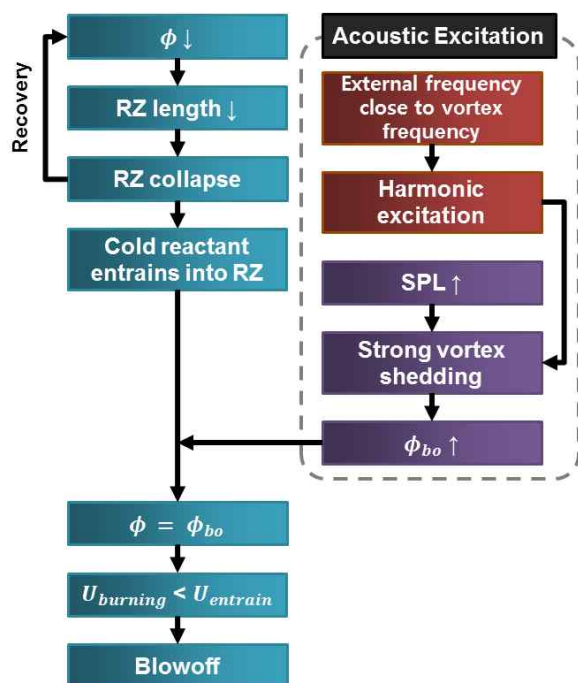


Fig. 15 Forced blowoff mechanism diagram

(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(2011951010 001C)에 대한 결과이며 이에 감사드립니다.

References

- 1) Blevins, R. D., "Flow-Induced Vibration", 2nd ed., Van Nostrand Reinhold, 1990
- 2) Edward E. Zukoski, Frank E. Marble, "Experiments Concerning the Mechanism of Flame Blowoff From Bluff Bodies", Thesis, California Institute of Technology, 1983
- 3) Glassman, I., "Combustion", 3rd ed., Academic Press, 1996
- 4) Santosh J. Shanbhogue, Sajjad Husain, Tim Lieuwen, "Lean blowoff of bluff body stabilized flames: Scaling and dynamics", Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 35, No. 1, 2009, pp.98-120
- 5) Dong-Hyuk Shin, Dmitriy V. Plaks, Tim Lieuwen, "Dynamics of a Longitudinally Forced, Bluff Body Stabilized Flame", Journal of Propulsion and Power, Vol. 27, No. 1, January, 2011
- 6) Swetaprovo Chaudhuri, Stanislav Kostka, Michael W. Renfro, Baki M. Cetegen, "Blowoff

mechanism of harmonically forced bluff body stabilized turbulent premixed flames", Combustion and Flame,, Vol. 159, No. 2, 2012, pp.638-640

7) Sayan Biswas, Kristin Kopp-Vaughn, Michael W. Renfro, Baki M. Cetegen, "Phase resolved characterization of conical premixed flames near and far from blowoff", Combustion and Flame, Vol. 160, Issue 12, December, 2013, pp.2843-2855

8) V. Shteinberg and P. Kim, "Regions of self-excitation of a singing flame", Heat Transfer Research, 2008, Vol. 39, Issue 7, pp.627-637

9) Tim C. Lieuwen, "Unsteady Combustor Physics", 1st ed., Cambridge University Press, 2012

10) Jan Kolacek, Etsuo Kawate, "Hight Frequency Vortex Dynamics and Magnetoconductivity of High Temperature Superconductors", Physics Letter A, Vol. 260, Issues 3-4, Septemer, 1999, pp.300-307

11) Stanislav Kostka, Sukesh Roy, "Characterization of Bluff-Body-Flame Vortex Shedding Using Proper Orthogonal Decomposition", AIAA, January, 2011