

# V-gutter형 보염기에서 발생하는 화염의 역화 및 재점화 구조에 관한 실험적 연구

정찬영\* · 김태성\* · 송진관\* · 윤영빈\*\*†

## An Experimental Study on the Flashback and Re-ignition Structure with a V-gutter type Flameholder

Chanyeong Jeong\* · Taesung Kim\* · Jinkwan Song\* · Youngbin Yoon\*\*†

### ABSTRACT

Structure of flashback and reignition occurring near flameholder was experimentally investigated in a model combustor with V-gutter flameholder. The combustor has a long duct shape with cross section of 40 x 40 mm and City Nature Gas(CNG) were used as fuel. Measurements of chemiluminescence with high speed camera was used for visualization of flame structure. In the lean case, flashback distance depend on equivalent ratio. New flame occurred at the front tip of flameholder when flashback. Flashback flame moved toward downstream direction of combustor because mixture flow velocity had increased, and then re-ignition was caused by entering flow into recirculation zone that is formed behind the flameholder.

### 초 록

V-gutter형 보염기가 장착된 모델 연소기에서 연소불안정이 발생할 때 보염기 근처에서 나타나는 화염의 역화 및 재점화 구조를 조사하였다. 연소기는 단면이 40 x 40 mm인 긴 덕트 형태이며 연료는 천연도시가스(CNG)를 사용하였다. 화염 구조를 가시화하기 위해서 고속 카메라를 이용한 자발광 계측을 하였다. 연소불안정이 발생하면 화염의 역화가 발생하며, 역화의 진행거리는 당량비에 따라서 달라졌다. 일정 당량비 이상에서는 역화가 진행됨에 따라 보염기 앞쪽 끝단에서 새로운 화염면이 형성된다. 흡입되는 혼합기의 속도가 증가하면서 역화되었던 화염면은 뒤로 밀리게 되고, 이때 보염기 안쪽에 형성된 재순환 영역으로 혼합기가 유입되면서 재점화가 이루어지는 것을 확인하였다.

Key Words: V-gutter type flameholder(비-거터 형 보염기), Combustion Instability(연소 불안정성), Flashback(화염의 역화), Re-ignition(화염의 재점화)

\* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

\*\* 서울대학교 기계항공공학부

† 교신저자, E-mail: ybyoon@snu.ac.kr

### 1. 서 론

연소 불안정성은 연소 현상 시 발생하는 유동

과 열 방출의 섭동의 상호 작용으로 인해 발생한다고 알려져 있다. 연소 불안정성의 발생 가능성을 예측하는 기준으로 Rayleigh Criterion이 적용된다[1]. Rayleigh Criterion에 따르면 내부 압력과 열 방출의 섭동이 보강간섭을 일으킬 때 연소 불안정성이 발생할 가능성이 높다.

터보제트 애프터버너나 램제트 엔진, 스크램제트 엔진 등 보염기가 존재하는 고속 유동 연소기에서도 연소 불안정성은 중요한 문제이다. 최근에 Dowling [2], Lieuwen 등[3], Nair 등[4], Jing-Tang Yang 등[5] 등의 연구에서 보염기가 존재하는 연소기의 연소 안정화와 연소 소멸에 대한 다양한 결과가 보고되었다.

연소 현상의 소멸은 연소 불안정성으로부터 기인하지만, 연소 불안정성이 바로 연소 소멸로 이어지는 것은 아니다. 어느 특정한 조건에서는 연소 불안정성이 일어나도 연소는 지속된다. 본 연구실의 비-거터형 보염기를 사용하는 덕트형 연소기에서 연소 불안정이 발생할 때, 화염면이 보염기를 기준으로 앞뒤로 진동하는 모습을 관찰하였다. 화염면이 매우 빠른 속도로 진동함에도 불구하고 연소 현상은 보염기 근처에서 소멸되지 않고 꾸준히 유지되었다. 이 경우 화염은 내부의 공력학적 불안정성이나 압력 모드에 의해 영향을 받으면서 형상이 변하는 것이나, 이에 대한 연구는 활발히 진행되지 않은 상태이다. 따라서 본 연구에서는 화염이 보염기 앞뒤로 움직이는 모습을 현상적으로 관찰하고, 그에 따른 구조를 파악하고자 한다.

## 2. 실험 장치 및 조건

### 2.1 실험 장치

본 실험은 비-거터형 보염기가 장착된 램 스케일의 모형 연소기(Fig. 1)에서 수행되었다. 공기 압축기에서 공급된 공기는 필터 및 제습 장치를 거쳐 실내로 공급되었다. 연소 시험 장치는 연료 공급 장치, 혼합 관측부, 연소 실험부, 연장 덕트, 배기 장치로 구성되어 있다. 연료의 공급을 위해 8bar의 압력을 유지하여 공급할 수 있는 도시가스 라인을 구성하였다. 혼합 및 연소 장치



Fig. 1 Experimental Apparatus

는 40 X 40mm의 단면적을 지닌 길이 방향으로 긴 덕트 형상이다. 공급공기의 유량을 제어하기 위해 지름 5mm의 오리피스를 두었다. 연소실 말단에는 노즐을 설치해 오리피스와 노즐을 통해 음향학적 경계를 이루었다. 두 경계 사이의 연소 시험 장치 길이는 2040mm이다. 연료 분사는 보염기를 기준으로 832.5mm앞에서 이루어지며, 혼합부 위와 아래 벽면에 설치된 0.8mm 지름의 단공형 분사기에서 수직으로 분사된다. 연소 실험부는 점화기, 보염기, 가시화 창으로 구성되어 있고, 온도센서와 동압센서를 통해 계측하였다. 초기 점화에는 수소와 공기를 사용하는 토치형 점화기를 이용하였고, 이 장치를 보염기의 직하부에 설치하였다. 보염기의 형상은 정삼각형이다. 보염기 근처의 화염 관측을 위해서 좌우 벽면에 20mm 두께의 수정 창을 설치하였다.

### 2.2 실험 방법 및 조건

본 연구를 위해 상온의 공기를 사용했으며 유량은 15g/s로 유지했다. 연료로써 상온의 CNG가 사용되었다. 당량비는 0.50~0.90사이의 값을 사용했고, 당량비의 간격은 0.1이 되도록 실험하였다. 노즐은 연소실의 면적비에 대해 0.5인 면적비를 갖는 노즐을 이용하였다. 보염기는 한 변의 길이가 14mm 인 비-거터 타입을 사용하였다. 8개의 동압 센서를 통해 동시에 여러 위치의 동압을 계측하고 이를 통해 주파수와 압력 변동치를 계측하였다. 또한 화염의 구조 변화를 가시화하기 위해서 고속 카메라를 이용한 OH\* 및 CH\* 자발광 촬영이 이용되었다.

### 3. 본 론

#### 3.1 당량비에 따른 화염의 역화 정도

연소 불안정성이 발생하면 화염은 주기적으로 보염기 전후로 진동하는 모습을 보인다. Fig. 2는 당량비가 달라질 때 화염이 역화되는 거리를 보여준다. 역화되는 거리는 화염이 진동하는 한 주기에서 보염기 뒤쪽 후단을 기준으로, 화염이 보염기 앞쪽으로 이동할 때 가장 멀리 진행한 거리를 의미한다. 각 당량비별로 40장의 이미지를 추출하여 계산된 평균값을 그래프로 나타내었다. 역화 거리는 OH\* 자발광 이미지를 기준으로 했기 때문에 화염면과 정확히 일치하지 않는다. 그러나 OH\* 자발광이 나타나는 영역과 화염면은 거의 비례하기 때문에, 조건별 추이를 알아보는 측면에서 큰 무리는 없을 것으로 생각된다. 당량비가 0.5인 경우에 화염은 안정한 상태를 유지하므로, 화염은 보염기 앞으로 이동하지 않아 역화되는 거리는 0이다. 당량비가 증가할수록 역화거리도 증가하며, 0.8에서 가장 크게 발생한다. 연소를 통해 발생한 고온의 가스들이 연소기 후단의 노즐을 통해서 충분히 빠져나가지 못하면, 노즐부근의 압력이 증가하게 될 것이다. 이

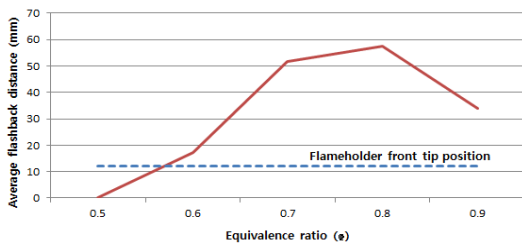


Fig. 2 Average flashback distances corresponding to equivalence ratio

로 인해 연소기로 유입되는 혼합기의 속도가 감소하고, CNG의 연소 속도와 혼합기의 상대속도가 점차 감소한다. 따라서 화염면이 보염기 앞쪽까지 이동하게 되는 것이다.

#### 3.2 역화가 발생하였을 경우 화염의 모습

화염의 역화가 가장 두드러지는 당량비 0.8인 조건에서 화염의 모습을 관찰하였다. ICCD 고속 카메라에 OH\* 자발광만 얻을 수 있는 필터를 이용하였고, 초당 이미지 수(fps)를 10,000으로 하고 촬영하였다. 또한 자발광 이미지 촬영과 동압 신호의 동시 측정을 통해서, 화염 진동의 주기를 확인하였다.

동압 신호와 자발광 세기를 각각 FFT한 결과, 모두 약 68Hz의 주파수를 갖는 것으로 나타났다. 이 주파수에 대해, 한 주기 동안 동압 신호가 변화하는 모습을 보여준 것이 Fig. 3이다. 동압 신호는 보염기 후단 약 10mm 뒤에 위치한 동압 센서로부터 얻은 것이다. Fig. 3에서 두 개의 주기가 나타나는 것처럼 보이는데, 이는 사분의일파장 모드와 반파장 모드가 함께 나타나기

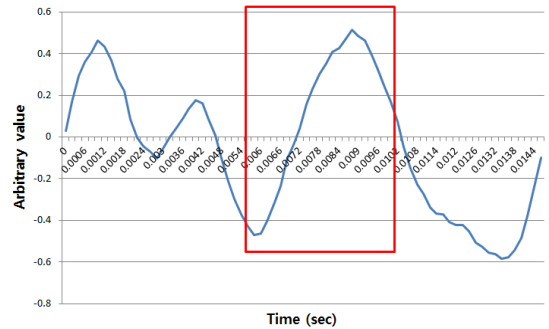


Fig. 3 Variation of Dynamic pressure signal during one period of flame structure change (equivalence ratio=0.8)

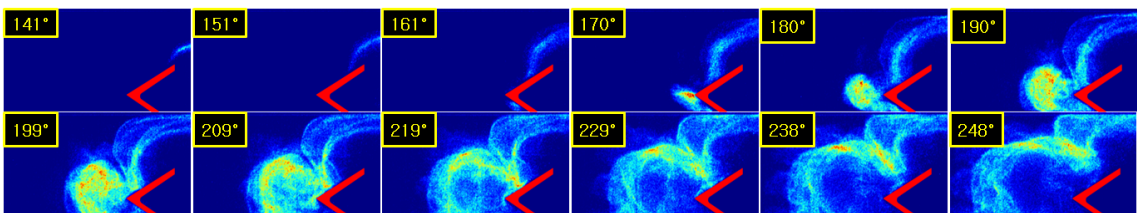


Fig. 4 OH\* Chemiluminescence images when the flashback occur (equivalence ratio=0.8)

때문이다. Fig. 3에서 빨간색 박스로 표시된 부분이 화염의 역화가 발생하는 구간이다. 화염의 역화가 진행되는 동안 동압 신호는 양의 값으로 증가하는 양상을 보인다. 이는 화염이 역화할 때 화염면이 벽쪽으로 확장하므로, 벽면과 화염면 사이에 흐르는 유체의 양이 많아지고 그 속도도 빨라지기 때문으로 추측된다.

Figure 3에서 표시된 역화 구간의 자발광 이미지를 나타낸 것이 Fig. 4이다. 빨간색으로 표시된 부분이 보염기이고, 혼합기는 왼쪽에서 오른쪽으로 흐르고 있다. 화염 진동의 한 주기를 360°로 구분할 때, 각 프레임의 위상을 그림 왼쪽에 표시했다.

위상이 141°~170°인 동안 연소기 후단의 압력이 강해지면, 화염면이 보염기 측면을 따라 왼쪽으로 이동하는 모습을 보여준다. 위상 170°일때의 이미지를 보면, 보염기 앞쪽 팁에서 새로운 화염이 형성되는 것을 알 수 있다. 새로 생성된 화염의 경우, 주위의 다른 화염보다 자발광 세기가 강한 것으로 관찰되었다. 이는 상대적으로 많은 양의 연료가 연소된다는 것을 의미한다. 연소기 후단의 압력증가로 인해 혼합기의 유입속도가 느려지면, 앞쪽 팁이 정체점 역할을 하면서 보염기 부근에 당량비가 증가한다. 따라서 이동하던 화염면에 의해, 당량비가 충분하고 유속이 빠르지 않은 보염기 앞쪽 팁에서 순간적으로 강한 화염이 새롭게 생성되는 것으로 보인다.

위상이 170°~250°인 동안 새롭게 생성된 화염면은 점점 커진다. 보염기 측면을 따라 이동하던 화염면은 거의 정지해 있는 반면, 새로운 화염면은 계속 성장하는 모습을 보여준다. 새로운 화염의 성장은 연소기 내부의 압력차에 의한 것이 아니고, 자체적인 에너지를 통해 이루어진다고 생각된다. 새로운 화염은 다른 부분보다 많은 연

료에 의한 연소로 발생했기 때문에, 화염이 가진 에너지가 큰 것이다. 새롭게 생성된 화염면의 이동속도를 자발광 이미지들을 통해서 계산해보면, 대략 3~5m/s의 크기를 갖는 것으로 나타났다. 층류유동에서 메탄가스의 연소속도인 40cm/s와 비교하면 매우 높은 수치임을 알 수 있다.

### 3.3 재점화가 일어날 경우 화염의 모습

화염의 재점화는 일어날 때, 당량비가 증가할수록 짧은 재점화 시간과 많은 OH\*로 인해 구조를 명확히 가시화하기 어려웠다. 따라서 재점화 구조를 명확히 관찰할 수 있는 당량비 0.6인 조건을 택하여 자발광 이미지 촬영을 하였다. 촬영은 3.2에서 밝혔듯이 ICCD 고속카메라와 OH\* 자발광 필터를 이용하였다. 초당 이미지 수(fps)도 동일한 조건인 10,000으로 촬영하였다.

동압 신호와 자발광 세기를 각각 FFT한 결과, 모두 약 62Hz의 주파수를 갖는 것으로 나타났다. 이 주파수에 대해, 한 주기 동안 동압 신호가 변화하는 모습을 보여준 것이 Fig. 5이다. 동압 신호는 보염기 후단 약 10mm 뒤에 위치한

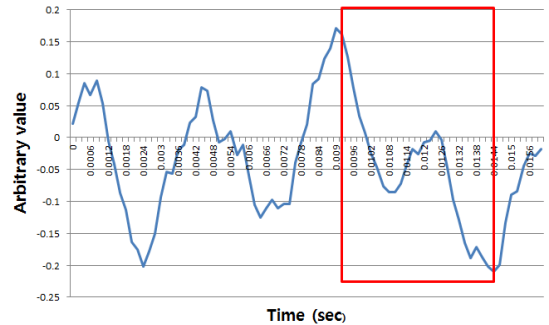


Fig. 5 Variation of Dynamic pressure signal during one period of flame structure change (equivalence ratio=0.6)

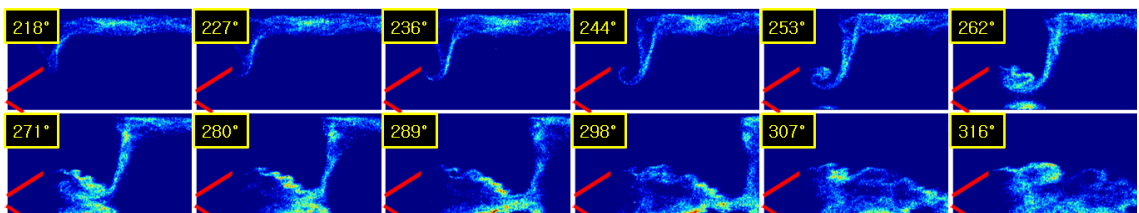


Fig. 6 OH\* Chemiluminescence images when the Re-ignition occur (equivalence ratio=0.6)

동압 센서로부터 얻은 것이다. Fig. 5에서도 주기기 하나의 사인과 형식이 아닌데, 이는 강한 반파장 모드에 사분의일파장 모드와 1L 모드가 함께 존재하기 때문이다. Fig. 5에서 빨간색 박스로 표시된 부분이 화염의 재점화가 발생하는 구간이다. Fig. 5에서 표시된 재점화 구간의 자발광 이미지를 나타낸 것이 Fig. 6이다. 빨간색은 보염기를 나타내며, 혼합기는 왼쪽에서 오른쪽으로 흐르고 있다. Fig. 4와 동일하게 화염 진동의 한 주기를 360°로 구분할 때, 각 프레임의 위상을 그림 왼쪽에 표시했다.

화염면이 혼합기에 의해서 뒤로 이동할 때, 보염기 안쪽에 비해 바깥쪽 유동의 속도가 매우 빠르게 증가한다. 속도 차이가 매우 큰 두 유동이 접하면 경계면에서 전단응력에 의한 와류가 발생한다. 따라서 상대적으로 속도가 빠른 보염기 바깥쪽 유동이 보염기 안쪽으로 밀려들어가게 된다. 이러한 와류 현상은 위상 250° 전후의 이미지를 통해 알 수 있다. 강한 와류의 발생으로 보염기 안쪽으로 연소로 생성된 고온 가스들이 유입된다. 뜨거운 가스의 유입을 통해 보염기 안쪽에는 재점화를 위한 충분한 온도조건이 얻어질 것으로 보인다. 그 직후에 미연소 혼합기가 유입되면서 재점화가 발생하고, 지속적인 연소 현상이 가능해진다. 따라서 역화된 화염에서 생성된 고온 가스들이 점화기 역할을 수행하면서 재점화에서 중요한 역할을 하는 것으로 보인다.

#### 4. 결 론

비-거터형 보염기가 장착된 모델 연소기에서 발생하는 화염의 역화 및 재점화 구조에 관한 실험적 연구를 통해 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 일정 당량비 이상에서, 화염이 보염기 앞쪽으로 이동하는 모습을 보여준다. 연소가스 노즐을 통해 충분히 빠져 나가지 못하면, 연소기 후단의 압력이 순간적으로 증가한다. 이로 인해 혼합기의 유입 속도가 감소하여, 화염면이 이동하는 것으로 여겨진다.
- (2) 화염의 역화가 발생하는 경우 보염기 앞쪽 팁에서 강한 화염이 생성된다. 이는 보염기

앞쪽 팁이 정체점으로 작용하여, 보염기 부근에 다른 곳보다 상대적으로 많은 연료가 존재하기 때문으로 생각된다. 이 때 생성된 새로운 화염은 큰 에너지를 가지며, 층류 연소 속도보다 10배 이상의 속도로 확장한다.

- (3) 역화된 화염이 소멸하지 않고 재점화가 이루어질 때, 보염기 안쪽과 바깥쪽의 유동 속도 차이로 강한 와류가 생성되었다. 와류로 인해 연소로 생성된 고온의 가스가 중요한 역할을 하는 것을 관찰하였다.

#### 후 기

본 연구는 서울대학교 IAAT와 연계된 교육과학기술부의 중견연구자지원사업(2011-0016455)과 2011년도 지식경제부의 재원으로 KEPTEP의 지원을 받아 수행한 “한국형 300MW급 ICCC실증 플랜트 기술개발 사업”(No. 2011951010001C)의 연구 결과이며 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. Rayleigh. J., “The Explanation of Certain Acoustical Phenomena”, Nature, July 18. pp. 319-321. 1878
2. A. P. Dowling, “A kinematic model of a ducted flame”, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 394, pp. 51-72, 1999
3. Tim Lieuwen and Santosh shanbhogue, “Dynamics of bluff body flames near blowoff”, 45<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, AIAA 2007-169
4. Suraj Nair and Tim Lieuwen, “Near-blowoff dynamics of a bluff-body stabilized flame”, Journal of Propulsion and Power, Vol. 23, No. 2, pp. 421-427, 2007
5. Jing-tang Yang, Chang-wu Yen, Go-long Tsai, “Flame stabilization in the wake flow behind a slit v-gutter”, Combustion and Flame, Vol. 99, pp. 288-294, 1994