

보염기가 존재하는 덕트형 연소기에서 화염의 동적 특성에 관한 연구

정찬영* · 김태성* · 송진관** · 윤영빈***†

Analysis of the Flame Dynamic Characteristics in the ducted Combustor with Bluff Body

Chanyeong Jeong*, Teasung Kim*, Jinkwan Song**, Youngbin Yoon***†

ABSTRACT

The characteristics of flame dynamics occurring near bluff body was experimentally investigated in a model combustor with V-gutter bluff body. Flashback occurs due to the change of pressure gradient in the combustor, and flashback distance depends on equivalent ratio. Unstable flames can be classified into three types depending on the flashback distance and structure. Re-stabilization takes place as the flame moves downstream. This process is supported by a strong vortex structure behind bluff body.

Key Words : V-gutter bluff body, Combustion Instability, Flashback, Re-stabilization

보염기는 오래전부터 에프터버너나 램젯 엔진 등에 널리 사용되었다. 1950년 이래로, 보염기 주변부에서 발생하는 유동 및 연소 현상의 특징에 대해서 매우 다양한 연구가 수행되어 왔다[1,2]. 현재까지 상당수의 연구가 화염 안정화나 Blowoff에 초점을 맞추고 있다. 그러나, 화염의 역화에 대한 이해는 아직 불충분하다. 역화 현상의 다양한 원인에 대해서는 많은 논문들에 언급되고 있다[3-7]. 이들 연구는 약한 역화에 대한 부분에만 초점을 맞추고 있으며 보염기를 넘어서는 역화에 대해서는 연구가 많이 이루어지지 않은 상태이다. 역화는 열에 취약한 연소기 상단 부분에 심각한ダメージ를 입힐 수 있으므로 완전한 이해가 요구된다. 따라서 본 논문에서는 보염기가 존재하는 밀폐형 연소기내에서 발생하는 종방향 연소 불안정에 대한 기초조사를 수행하였다. 이 때 발생하는 역화 현상을 가시화하여 화염이 보염기를 넘어서 상단으로 전파될 때 나타나는 모습을 살펴보았다. 화염이 다시 후단으로 밀리면 소멸되지 않고 보염기에서 재안정화가 이루어지는 것을 관찰하였다. 따라서 재안정화 현상에 대한 조사를 통해 연소 현상을 유지시켜 주는 원인을 살펴보았다.

본 실험은 비-거터형 보염기가 장착된 모형 연소기(Fig.1)에서 수행되었다. 연소 시험 장치는 연료 공급 장치, 혼합 관측부, 연소 실험부, 연장

덕트, 배기 장치로 구성되어 있다. 혼합 및 연소 장치는 길이 방향으로 긴 덕트 형상이다. 공급공기의 유량을 제어하기 위해 오리피스를 두었다. 연소실 끝단에는 노즐을 설치했다. 연료는 혼합부 위와 아래 벽면에 설치된 단공형 분사기에서 수직으로 분사된다. 연소 실험부는 점화기, 보염기, 가시화 창으로 구성되어 있다.

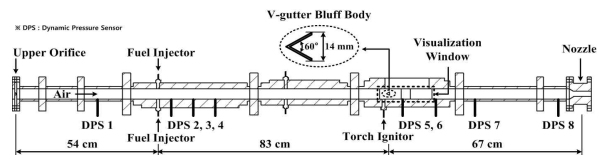


Fig. 1 Schematic of the ducted combustor for overall shape and V-gutter bluff body

본 연구를 위해 사용된 실험 조건은 표 1에 자세히 언급되어 있다. 화염의 구조 변화를 가시화하기 위해서 OH* 자발광 촬영과 PIV 기법이 이용되었다.

Table 1 Experimental condition

	Condition
Inlet Air Velocity	5.2 – 13.0 m/s
Inlet Air Temperature	297 ± 1 K
Fuel Type	Natural Gas (C _{1.14} H _{4.28})
Fuel Temperature	297 ± 1 K
Equivalence Ratio (φ)	0.45~1.1
Bluff Body Diameter	14 mm
Bluff Body Shape	v-gutter
Dynamic Pressure Sensor Location (based on the orifice)	30, 56, 64, 72, 139.5, 151.5, 165.5, 195.5 cm

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원
 ** 신시내티대학교 항공우주시스템학부
 *** 서울대학교 기계항공공학부 및 IAAT
 † 연락처, ybyoon@snu.ac.kr
 TEL : (02)880-1904 FAX : (02)-872-8032

연소기에서 발생하는 화염의 구조는 유입 공기의 유량과 당량비에 따라서 달라진다. Figure 2는 다양한 유량과 당량비에 따른 안정화 지도를 보여준다. 안정한 화염의 경우 파란색으로 표시가 되어 있으며 불안정 화염은 각각 노란색, 주황색, 빨간색으로 구분이 되어 있다. 불안정 화염은 공통적으로 보염기 앞, 뒤로 진동하는 모습을 보여주는데 이 진동의 정도에 따라 화염을 A, B, C type으로 구분하였다. 당량비를 증가시키기에 따라 화염은 점점 불안정해 지며 일정 당량비 이상에서는 블로오프 현상이 발생하게 된다. 이를 통해 당량비의 증가에 따라 화염이 점점 불안정하게 변화한다는 것을 알 수 있다. 또한 불안정 화염 구간이 안정 화염 구간보다 매우 넓게 형성되는 것을 알 수 있고 그 중에서도 B type 불안정 구간이 상당부분을 차지하고 있음을 알 수 있다.

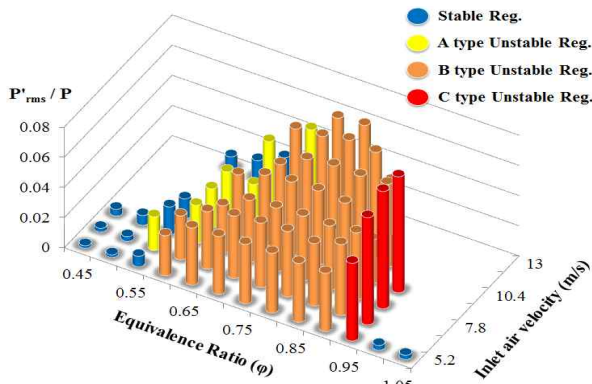


Fig. 2 The Stability map for various inlet air velocities and equivalence ratios

Figure 3은 위에서 언급한 각 화염 유형에 대한 한 주기 구조를 보여주는 OH* 자발광 이미지이다. Figure 3.(a)는 보염기의 전형적인 안정한 화염의 모습을 보여준다. 화염의 구조는 큰 변화가 없으며 유체역학적 불안정성에 따른 변화만을 보여준다. Figure 3.(b)는 A type 불안정 구간의 화염 구조 변화를 보여준다. 화염면이 보염기 뒤쪽 끝단에서 앞쪽으로 이동하기 시작한다. 그러나 화염면은 보염기 앞쪽 끝에서 더 이상 전파되지 못하고 뒤쪽으로 밀린다. Figure 3.(c)는 B type 불안정 구간의 화염으로, 화염이 보염기 앞쪽 끝을 넘어서 보염기의 몇 배에 해당하는 거리까지 이동하였다가 뒤로 밀리는 모습을 보여준다. B type 불안정 화염에서 불안정 화염을 A, B, C type으로 구분짓는 기준이 되는 화염 구조가 나타난다. 이와 같은 화염 구조가 나타남으로써 화염의 역화 거리가 A type보다 급격하게 증가하게 된다. Figure 3.(d)는 C type 불안정 구간의 화염으로 매우 강한 역화가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이 화염에서는 화염의 전파가 가시화

장을 넘어서까지 진행되는 상당히 큰 역화 거리를 가진다는 것을 추측해 볼 수 있다.

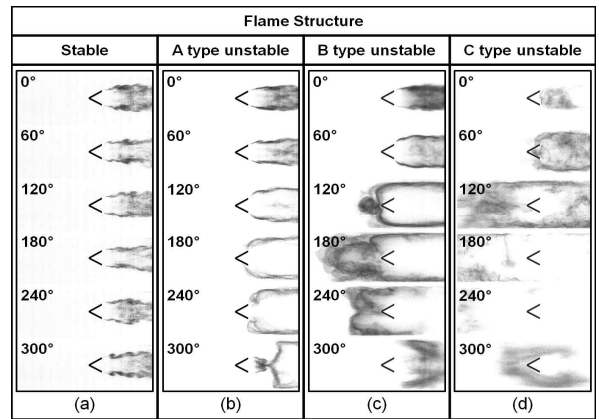


Fig. 3 The OH radical chemiluminescence images in the vicinity the bluff body during one period; (a) stable, (b) A type unstable, (c) B type unstable, and (d) C type unstable

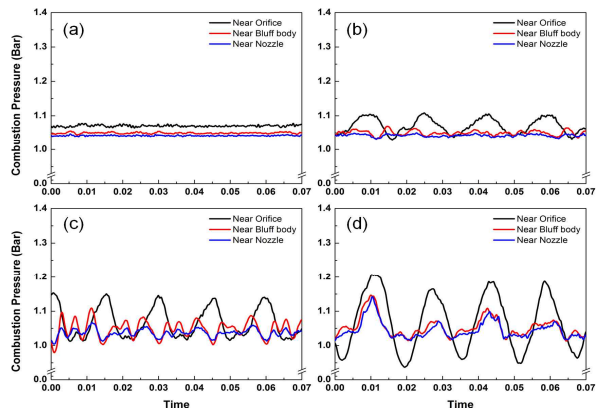


Fig. 4 The combustor pressure fluctuation graph; (a) stable, (b) A type unstable, (c) B type unstable, and (d) C type unstable

Figure 4는 각 화염 유형에 따른 연소기 내부의 압력 변화를 측정된 결과를 보여준다. 연소기 압력은 정압 데이터와 압력 진동의 결과를 합하여 얻었다. Figure 4.(a)는 안정한 화염 조건에서의 압력 변화를 보여주며 거의 일정하게 유지되고 있음을 알 수 있다. Figure 4.(b)는 A type 불안정 화염 조건에서의 압력 변화를 보여준다. 보염기와 노즐 근처에 비해 오리피스 근처의 압력이 크게 요동치는 것을 볼 수 있다. 이에 따라 역 압력 구배가 순간적으로 존재하게 된다. Figure 4.(c), 4.(d)는 각각 B type, C type 불안정 화염에서의 압력 변화를 보여준다. 불안정이 강해질수록 역 압력 구배의 크기도 점점 커지게 된다. 따라서 역 압력 구배가 연소기 내부의 유

동에 영향을 미치게 되고 화염 구조를 변화시킨다고 생각할 수 있다.

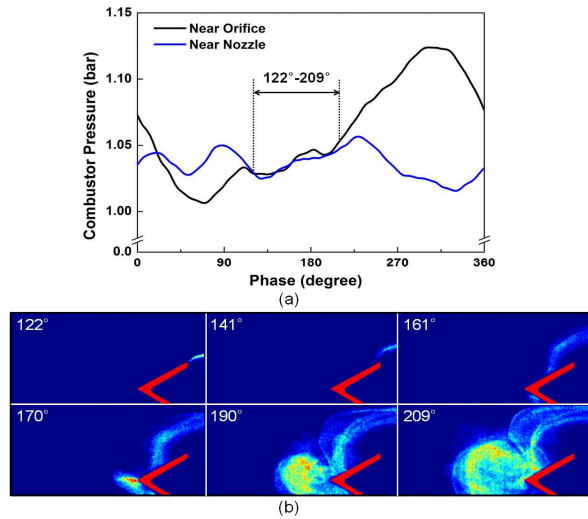


Fig. 5 (a) The combustor pressure graph during one period (b) OH radical chemiluminescence from 122° to 209°

중방향 불안정시에 나타나는 화염의 동특성을 더 자세히 알아보기 위해서, 불안정 화염의 구분 기준이 되는 화염의 생성 방식을 알아보았다. 초당 이미지 수(fps)를 10,000으로 하고 촬영하였다. 한 주기 동안 연소실 내부 압력이 변화하는 모습을 보여준 것이 Fig. 5.(a)이다. 위상이 20°에서 110°인 구간에서 역 압력 구배가 발생하고 있음을 알 수 있다. 이러한 압력 구배 발생 구간은 매 주기마다 유사한 경향을 보여주었다. Figure 5.(b)는 역화 현상이 발생하는 순간부터 보염기 앞쪽에 기준화염이 발생하여 성장하는 모습을 보여주는 OH* 자발광 이미지이다. 동압 신호와의 동시 측정을 통해 각 화염의 위상을 얻었다. 빨간색으로 표시된 부분은 보염기의 위치를 나타낸다. 안정하던 화염 구조는 120° 근처에서 상하로 약하게 진동하기 시작하고 140° 근처에서 보염기 끝단을 넘어서 앞으로 진행하기 시작한다. 이러한 역화 현상은 이전의 다른 연구자들에 의해서도 관찰된 적이 있다[5,6]. 역 압력 구배의 세기가 충분히 강해서 역화되는 화염이 보염기 전단의 혼합물을 연소시킬 수 있는 환경이 조성되면, 위상 170°에서 보는 것과 같이 보염기 앞쪽 틈에 주변보다 강한 자발광 세기를 지닌 화염이 관찰된다. 이는 상대적으로 많은 양의 연료가 연소된다는 것을 의미한다. 보염기 전단부에서 발생한 화염은 원형으로 점점 그 크기가 커지는 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 3.(c)에서 언급한 현상과 동일하다. 이 화염으로 인해 B type 불안정 화염은 A type에 비해 역화 거리가 상당히 증가하게 된다.

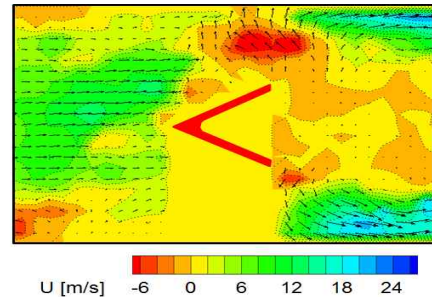


Fig. 6 The PIV images in the event of the case of flashback with 161°

이러한 역화 현상이 발생하였을 때, PIV 측정 기법을 이용해 유동장을 관찰해 보았다. Figure 6은 Fig. 5.(b)에서 위상 161°인 경우의 PIV 이미지이다. 화염면을 기준으로 하여 앞쪽에는 순방향 유동이 존재하고 뒤쪽에는 역방향 유동이 존재하는 것을 관찰할 수 있다. 이를 통해 연소기 내부의 역 압력 구배가 역방향 유동을 생성하고 이 역방향 유동으로 인하여 화염이 보염기 앞으로 전파되는 현상이 발생하고 있음을 알 수 있다. 그리고 보염기 측면 위쪽에서 순방향 유동과 역방향 유동이 서로 충돌하여 와류를 만들어 내는 것을 볼 수 있다.

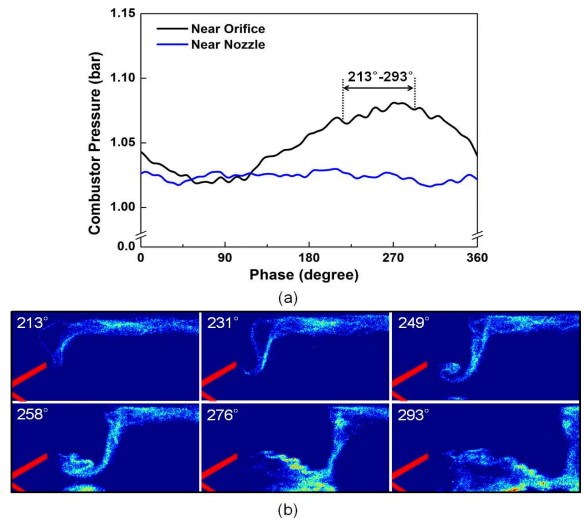


Fig. 7 (a) The combustor pressure graph during one period (b) OH radical chemiluminescence from 213° to 293°

연소기 압력 구배가 정상으로 되돌아가면 화염은 혼합기에 의해 다시 보염기 뒤쪽으로 밀리게 된다. 그러나 이 경우 화염은 연소기 후단까지 밀려나 소멸되지 않고 보염기에서 다시 안정화되어 연소 현상이 지속적으로 유지되는 모습을 보여준다. 이 경우 화염의 구조는 어떻게 변화되고

유동장은 어떻게 형성되는지 살펴보았다. Figure 7(a)를 보면 위상 90° 전후로 약한 역 압력 구배가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이것은 재안정화 촬영 조건이 A type 불안정 화염 구간이기 때문이다. Figure 7.(b)는 화염이 압력 구배의 정상화로 인하여 보염기 뒤로 밀리는 순간부터 재안정화 현상이 발생하여 보염기 근처에서 안정한 화염이 나타나는 모습을 보여주는 OH* 자발광 이미지이다. 역화로 인하여 보염기 앞쪽으로 이동했던 화염은 순방향 유동의 영향으로 다시 보염기 뒤쪽으로 이동하기 시작한다. 그리고 보염기 뒤쪽 끝까지 이동한 화염은 보염기 안쪽과 바깥쪽의 유동 속도의 차이로 인하여 위상 231°에서 볼 수 있듯이 와류를 형성하기 시작한다. 위상 249°에서 매우 강한 와류가 형성되고 있음을 관찰할 수 있다. 강한 와류의 발생으로 보염기 뒤쪽으로 고온의 연소 생성물과 미연 가스들이 유입되고 서로 혼합된다. 고온 가스로 인해 연소에 필요한 충분한 온도조건이 얻어지고 보염기 뒤쪽은 상대적으로 유속이 낮기 때문에 지속적인 연소 현상이 가능해진다. 따라서 역화된 화염에 의해 생성된 고온의 가스들이 점화기 역할을 수행하면서 화염의 재안정화에서 중요한 역할을 하는 것이다.

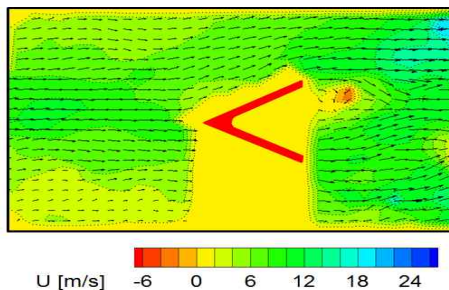


Fig. 8 The PIV images in the event of the case of Re-stabilization with 249°

와류현상이 발생할 때 보염기 근처의 유동장이 어떻게 형성되는지 관찰하기 위해 PIV 측정 기법을 이용하였다. Figure 8은 Fig. 7.(b)에서 위상 249°인 경우의 PIV 이미지이다. 연소기 전체적으로 순방향 유동이 존재하는 것을 볼 수 있으며, 보염기 뒤쪽에 역방향 유동이 존재하는 것을 관찰할 수 있다. 역방향 유동의 위치는 자발광 이미지에서 확인할 수 있는 와류의 위치와 동일함을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 서울대학교 항공우주신기술연구소와 연계된 교육과학기술부의 중견연구자지원사업(2011-0016455)과 지식경제부의 재원으로 에너지

기술평가원의 지원을 받아 수행한 신재생에너지 기술개발사업(2011951010001C)의 연구 결과이며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] B. Kiel B, K. Garwick, J.R. Gord, J. Miller, A. Lynch, R. Hill, S. Phillips, "A Detailed Investigation of Bluff Body Stabilized Flames", 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA Paper NO. 2007-168, 2007.
- [2] S.M. Bush, E.J. Gutmark, "Reacting and Nonreacting Flowfields of a V-Gutter Stabilized Flame", AIAA Journal, Vol. 45, Issue 3, 2007, pp. 662-672.
- [3] A. Nauert, P. Petersson, M. Linne, A. Dreizler Sommerer, "Experimental analysis of flashback in lean premixed swirling flames: conditions close to flashback", Experiments in Fluids, Vol.43, 2007, pp.89-100.
- [4] Y. Sommerer, D. Galley, T. Poinso, S. Ducruix, F. Lacas, D. Veynante, "Large eddy simulation and experimental study of flashback and blow-off in a lean partially premixed swirled burner", Journal of Turbulence, Vol. 5, 2004.
- [5] J.O. Keller, L. Vaneveld, D. Korschelt, G.L. Hubbard, A.F. Ghoniem, J.W. Daily, A.K. Oppenheim, "Mechanism of Instabilities in Turbulent Combustion Leading to Flashback", AIAA Journal, Vol. 20, No. 2, 1981
- [6] A.P. Dowling, "A kinematic model of a ducted flame", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 394, 1999, pp. 51-72.
- [7] D. Thibaut, S. Candel, "Numerical Study of Unsteady Turbulent Premixed Combustion: Application to Flashback Simulation" Combustion and Flame, Vol. 113, Issues 1-2, 1998, pp. 53-65.