

난류 보염기 화염에서 연소 불안정에 의한 역화의 실험적 연구

정찬영* · 배진현* · 김태성* · 윤지수* · 주성필* · 윤영빈**

Experimental Investigation of Flashback by Combustion Instability in Turbulent Bluff Body Flames

Chanyeong Jeong*, Jinhyun Bae*, Taesung Kim*, Jisu Yoon*, Seongpil Joo*, Youngbin Yoon**

Key Words : Flame dynamics, Combustion instability, v-gutter bluff body, Flashback

20세기에 급증한 화석연료의 사용으로 인해 지구 온난화 문제가 대두되면서 이를 막기 위하여 엔진에서 발생하는 배기배출물 양을 규제하기 시작하였다. 엔진에서 발생하는 배기배출물에 대한 제한이 점점 엄격해짐에 따라, 배기배출물 감소를 위하여 희박 예혼합 가스가 널리 사용되고 있다. 그러나 희박 예혼합 가스를 사용하는 연소기는 연소안정성에 문제가 발생할 수 있으며 연소 불안정에 민감한 성질을 가지고 있다. 연소 불안정은 연소기의 성능 저하 및 수명에 직접적으로 영향을 끼칠 수 있다. 따라서 희박 예혼합 화염에서의 화염 안정성 및 연소 불안정은 이전부터 널리 연구가 되어 왔다[1-3].

또한, 예혼합 화염이 가지는 다른 특징으로는 화염이 연소기 상류쪽으로 전파되는 역화 현상이 있다. 역화 현상은 국소 화염 속도가 유동 속도를 초과할 때 발생하는 현상으로 이러한 조건이 발생하는 데에는 다양한 원인이 있다. Sommerer는 역화가 발생하는 원인에 대해서 5가지 항목으로 요약하였다[4]. 그 중에서 '연소 불안정에 의한 역화'는 높은 속도 섭동이 야기되고 상대적으로 낮은 불안정 주파수를 갖는 연소 불안정 조건하에서 발생하는 역화를 의미한다. 이러한 발생 원인은 보염기를 사용하는 밀폐된 예혼합 연소기의 역화 현상을 설명하는데 적합하다. 보염기에서 발생하는 역화에 대한 연구는 1980년대부터 진행되어 왔다. Keller 등은 후향 계단에서 발생하는 연소 불안정과 그에 동반되는 역화 현상의 메커니즘에 대해 조사하였고, 화염의 구조 및 주파수 변화에 따라 'humming', 'buzzing', 'chucking' 이라는 용어를 제시하였다[5]. 그 이후에 Thibaut 과 Candel이 동일한 결과를 수치해석적 기법을 통해서 재도출 하기도 하였다[6]. 또한 Dowling 은 보염기에서 나타나는 역화 현상에 대해 수식을 통해 묘사하면서

발생 원인에 대해 고찰한 바 있다[7]. 이 이후에도 연소불안정에 의한 역화 현상은 지속적으로 연구가 되어 왔다[8-10].

위의 연구들은 모두 화염이 안정화되는 보염기 후단 팁 주변에서만 화염이 움직이는 역화 현상에 대해 보고하고 있다. 그러나 불안정의 규모가 점점 커지게 되면 화염이 보염기를 넘어서 더 앞쪽으로 전파되는 역화 현상이 발생하며 열에 취약한 연소기 상단부가 화염에 노출 될 가능성이 존재한다. 따라서 본 논문에서는 센서 계측 및 가시화 기법을 활용하여 보염기를 넘어서 발생하는 역화현상의 특징에 대해 조사하였다.

Fig. 1은 실험 장치의 개략도를 나타낸다. 실험 장치는 한 번의 길이가 40 mm 인 정사각형의 단면을 가지는 길이방향으로 긴 덕트형 모양이다. 공기 및 연료 유량은 모두 Mass flow controller (MFC)를 사용하여 조절하였다. 공기 속도와 당량비의 범위는 각각 5.2-13.0 m/s, 0.4-1.1 이다. 연소기 상단에는 지름 5 mm 의 오리피스를 두어 단한 음향경계의 역할을 수행하도록 하였다. 연료로는 메탄 89%, 에탄 9% 로 구성된 천연 가스를 사용하였다. 연료 분사기는 단공형으로 연소기 상단과 하단에 설치되어 공기 유량 방향에 수직하게 분사된다. 연료 분사기와 보염기의 거리는 830 mm 로 이는 공기와 연료를 혼합시키기에 충분한 거리이다[11]. 보염기는 한 번의 길이가 14 mm 인 비-거터 타입을 사용하였다. 초기 점화를 위하여 수소와 공기를 사용하는 도치 점화기를 보염기 하단에 설치하였다. 화염의 가시화를 위해서 보염기가 위치한 부분의 연소기 위쪽과 옆쪽에 퀴츠창을 설치하였다. 연소기 후단에는 막힘비가 0.5인 노즐을 설치하였다. 또한 센서 계측을 위하여 오리피스부터 보염기 사이에 4개, 보염기부터 노즐 사이에 4개씩 총 8개의 동압 센서를 두었다.

* 서울대학교 기계항공공학부

** 연락저자, ybyoon@snu.ac.kr

TEL : (02)880-1904 FAX : (02)-872-8032

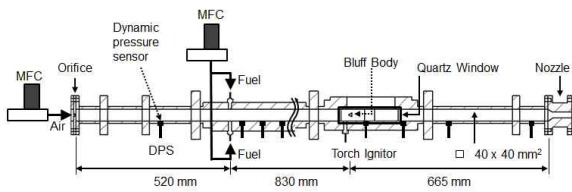


Fig. 1 Schematic of the ducted combustor

안정한 보염기 화염에서는 보염기 후단 팁에 화염이 부착되어 눈에 띄는 구조적 변화 없이 연소가 지속된다. 연소 불안정이 발생하면 화염의 구조적 변화를 가져오며 역화 현상도 그 중의 일환으로써 나타난다. 그 동안의 연구는 안정한 화염의 부착 지점을 중심으로 주기성을 가지고 움직이지만 화염이 보염기 자체를 넘어가지 않는 역화 현상에 대해서만 집중해 왔다. 본 논문에서는 이처럼 역화가 발생했을 때 화염의 최종 전파 위치가 보염기를 넘어가지 않는 현상을 ‘약한 역화(weak flashback)’ 이라고 명명한다. 그리고 화염이 보염기 상단 끝부분을 넘어서 전파되는 역화를 ‘강한 역화(strong flashback)’ 라고 명명하였다.

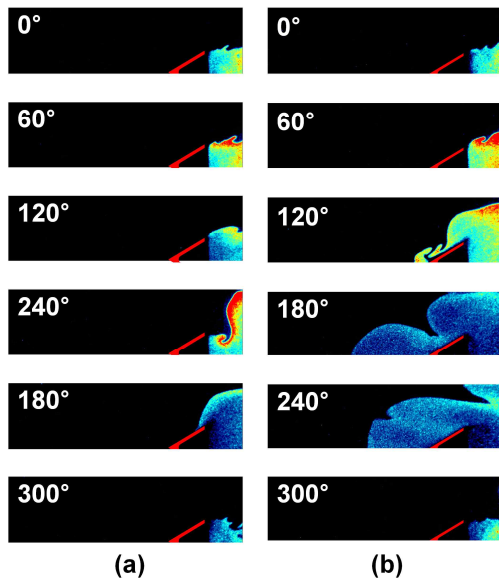


Fig. 2 One cycle images of OH-PLIF in case of (a) weak flashback, (b) strong flashback.

Fig. 2는 본 실험장치에서 관찰되는 약한 역화와 강한 역화 조건에서 한 주기 동안의 화염 구조 변화를 나타내는 OH-PLIF 이미지이다. 레이저가 보염기에 의해 가로 막히기 때문에 보염기 아래쪽의 이미지는 관찰되지 못했다. Fig. 2(a)에 나타나 있는 화염 구조는 다른 논문들에서 관찰되는 것들과 유사하다. 그러나 위상의 변화에 따라 두 조건에서의 화염 구조 변화가

명확히 다른 것을 확인할 수 있다. 약한 역화 조건에서의 위상 0-180° 까지의 이미지와 강한 역화 조건에서의 위상 0-90° 까지의 이미지에서 보여지는 화염 구조는 거의 유사하다. 약한 역화에서는 그 이후에 화염이 더 이상 앞으로 전파되지 못하고 뒤로 밀리면서 다시 안정한 화염 구조로 변화된다. 반면에 강한 역화에서는 화염이 연소기 앞쪽으로 계속 전파되면서 독특한 화염구조가 나타나는 것을 볼 수 있다.

Fig. 3은 연소기의 길이 변화와 유량 조건에 따른 압력 섭동의 크기 및 주파수를 나타내어 불안정 주파수가 형성되는 지점을 보여준다. 압력 섭동 데이터는 연소기 가장 상단에 설치된 동압 센서에서 측정되었다. 열-음향학적 연소 불안정의 불안정 주파수는 연소기의 공진 주파수와 연관되며, 공진 주파수는 연소기 내부의 온도 분포 및 길이에 따라서 달라진다. 따라서 미연소 가스가 존재하는 저온 구간 (오리피스부터 보염기까지)과 연소 가스가 존재하는 고온 구간 (보염기부터 노즐까지)의 거리를 다르게 하면 연소불안정 주파수가 변화한다. 연소기 상단의 오리피스와 노즐의 위치를 바꿔서 저온 구간과 고온 구간의 거리를 변화시켰고 이 때 연료 분사위치와 보염기의 거리는 고정시켰다.

Fig. 3에 표시된 공진 주파수는 COMSOL을 통해 계산되었고, 이 때 저온 구간과 고온 구간의 온도는 각각 290 K, 해당 당량비의 단열 온도로 설정하였다. Fig. 3에서 저온 구간과 고온 구간의 길이는 아래와 같다.

Table 1 Lengths of the cold zone and hot zone in condition of Figure 3.

	Fig. 3(a)	Fig. 3(b)	Fig. 3(c)
저온 구간	1.0 m	1.3 m	1.0 m
고온 구간	0.7 m	0.7 m	0.4 m

Fig. 3(a)와 3(b)는 저온 구간의 길이가 다른 경우이다. 그림에서 원의 크기는 압력 섭동의 크기이다. Fig. 3(a)에서 나타나는 불안정 주파수는 대략 80 Hz 근처이고 그림 3(b)에서 보이는 불안정 주파수는 대략 60-70 Hz 사이이다. 각 조건의 공진 주파수와 연소 불안정 주파수의 생성구간이 유사하므로 열-음향학적 연소 불안정이 생성됨을 알 수 있다. 두 경우 불안정이 발생했을 때 주파수 값이 공진 주파수보다 높게 형성되는데 이는 화염의 역화로 인하여 저온 구간과 고온 구간이 만나는 지점이 보염기보다 연소기 앞쪽으로 형성되었기 때문으로 생각된다. Fig. 3(a)와 3(c)는 고온 구간의 길이가 다른 경우이다. 두 조건에서 공진 주파수가 거의 동일하게 보이는데, 이는 고온 구간에서는 음파의

이동 속도가 상대적으로 빨라서 길이 변화가 공진 주파수에 큰 영향을 끼치지 못하기 때문이다. Fig. 3(c)에서는 거의 모든 조건에서 불안정이 발생하지 않는 것을 볼 수 있다. 본 실험장치는 화염이 노즐을 넘어서까지 관찰될 정도로 길이가 긴 화염을 갖기 때문에 화염과 노즐의 상호작용이 존재할 것으로 생각된다. 고온 구간의 길이가 짧아지면 상호작용의 특성이 변하면서 연소 불안정 현상에 영향을 미치는 것으로 추측되며 이에 관해서는 추가적인 연구가 필요하다.

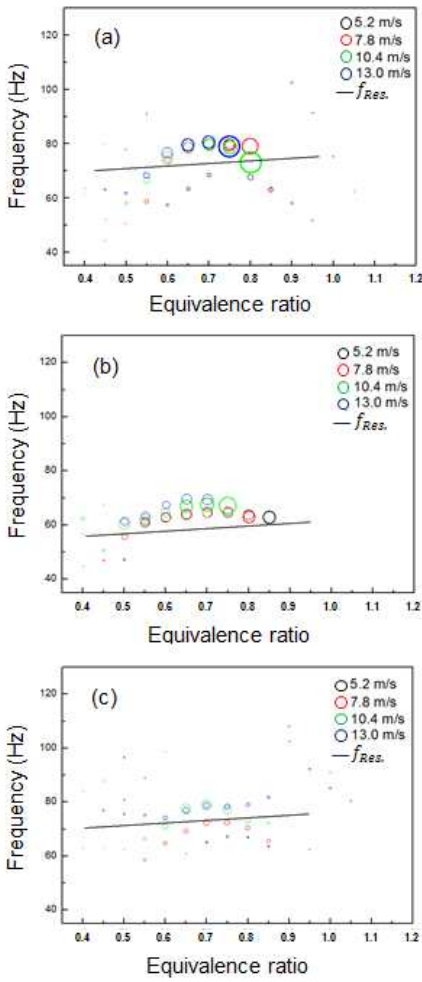


Fig. 3 Relationship between instability frequencies and equivalence ratio for various lengths of cold and hot zones.

불안정 주파수가 변화되면 역화 현상에 미치는 영향을 알아보기로 서로 다른 연소기 길이에서 화염의 역화 거리를 측정하여 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)와 4(b)의 연소기 길이는 각각 Fig. 3(a), 3(b) 와 동일하다. 역화 거리는 보염기 후단 팁을 기준으로 한 주기동안 화염이 연소기 상단으로 가장 멀리 전파된 순간의 위치로

정의하였다. 따라서 역화 거리가 보염기의 상단 위치보다 작으면 약한 역화, 역화 거리가 그 이상이 되면 강한 역화 조건이 된다. 연소기 길이에 관계없이 Fig. 4(a), 4(b) 에서 희박 조건하에서 당량비가 증가함에 따라 역화 거리가 증가하는 것을 알 수 있다. 당량비가 증가하면 화염 온도의 증가로 열방출량의 규모가 증가하고, 이에 따라 더 큰 섭동이 발생할 수 있다. 그러나 Fig. 4(a)에서 당량비가 1에 가까워짐에 따라 역화현상이 사라지고 Fig. 3(a)의 동일한 조건하에서도 압력 섭동이 거의 없어 불안정 현상이 나타나지 않는다. 이를 통해 이론 공연비에서 화염이 안정성을 다시 찾는 것을 알 수 있다.

한편, 연소기의 길이가 짧은 경우에 역화 거리도 짧아짐을 알 수 있다. Fig. 4(a)에서 강한 역화의 조건하에서 대부분의 경우에 역화 거리가 40 mm 를 넘기지 못하고 데이터들이 밀집되어 있는 것을 볼 수 있다. 그러나 Fig. 4(b)에서는 역화 거리가 동일한 조건하에서 2~3배까지도 증가하고 데이터들도 넓게 분포되어 있다. 또한 약한 역화 조건이 거의 없으며 대부분이 강한 역화 조건임을 알 수 있다. Fig. 3에서 불안정이 발생한 경우 압력 섭동의 크기는 연소기 길이 변화에 큰 차이를 보이지 않는다. 두 케이스에서 눈에 띄는 차이점은 불안정 주파수이다. 불안정 주파수가 높은 경우에 역화 거리가 감소함을 보인다.

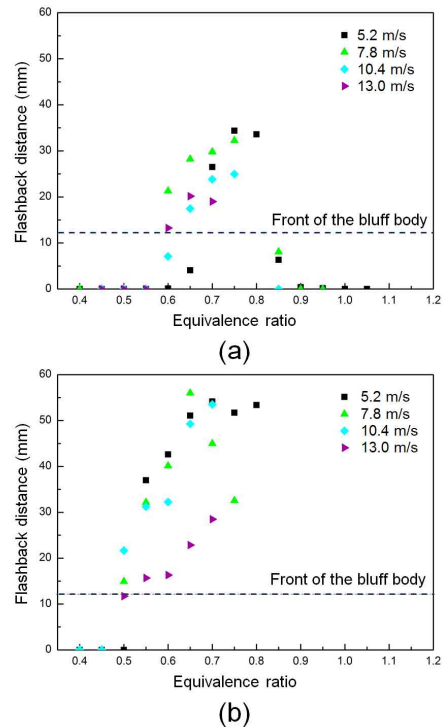


Fig. 4 Flashback distance for various bulk velocities and equivalence ratios.

연소 불안정은 속도 섭동을 야기하고 두 현상의 관계는 비례관계에 있다. 주기적인 현상이 동일한 속도를 특징으로 가질 때, 주기가 짧을수록 한 주기동안 움직일 수 있는 거리도 짧아진다. 역화 현상은 속도 섭동과 매우 밀접한 관계에 놓여 있다. 동일한 속도 섭동 조건하에서 화염 구조 변화의 주기가 짧을수록 화염의 전파 거리는 더욱 좁은 거리로 제한될 수밖에 없다. 따라서 불안정 주파수가 큰 Fig. 4(a)의 경우에 역화 거리가 더 짧은 것이다. Fig. 3 과 Fig. 4의 결과는 불안정 주파수가 역화 거리에 영향을 미치는 주요 인자 중의 하나임을 제시해 준다.

Rayleigh index(RI)는 연소 불안정 발생의 척도로 사용되는 가장 흔한 지표이다. PMT로 측정한 보염기 주변의 OH 자발광 강도를 이용해 측정된 열 방출 섭동과 보염기 근처의 동압센서에서 측정된 동압 신호를 각각 정규화하여 RI를 계산하였다. Fig. 5는 5초간 측정된 데이터를 이용해 RI의 정규 분포를 나타낸다. 약한 역화의 RI는 상대적으로 진폭이 작고 양의 값과 음의 값이 고르게 나타난다. PDF 이미지에서도 RI가 0을 중심으로 거의 대칭적으로 분포되어 열-음향학적 연소 불안정을 야기하는 요소와 감쇠하는 요소가 유사하게 발생하는 것을 알 수 있다. 반면에 강한 역화에서는 RI의 음의 값이 존재하긴 하지만 주로 양의 구간에서 형성되어 연소 불안정을 야기하는 요소가 감쇠 요소보다 지배적으로 작용하는 것을 알 수 있다. 섭동들의 움직임을 완전한 사인파 형태라고 가정하면, 약한 역화 조건은 열방출 섭동과 압력섭동의 위상차이가 약 90도 이고, 강한 역화 조건은 섭동들의 위상차이가 약 60도인 경우이다. RI 값 분포의 비교를 통해서 강한 역화가 발생하는 경우 열방출 섭동과 압력섭동의 위상 차이가 감소되어 섭동들의 강한 상호작용이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

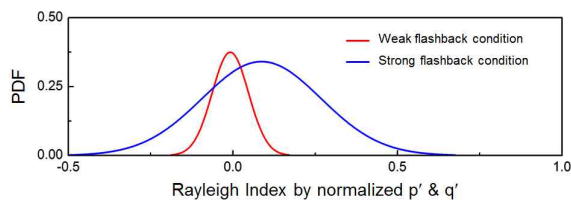


Fig. 5 Normal distributions of rayleigh index in case of weak and strong flashback.

후 기

본 논문은 미래창조과학부 한국연구재단의 핵심연구지원사업(No. 2015R1A2A2A010043)과 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원

(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(201195101001C)결과이며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] J.P. Longwell, "Flame stabilization by bluff bodies and turbulent flames in ducts", Proc. Combustion. Inst. Vol. 4, 1953, pp. 90-97.
- [2] S. Yamaguchi, N. Ohiwa, T. Heseegawa, "Structure and blow-off mechanism of rod-stabilized premixed flame", Combust. Flame, Vol. 62, 1985, pp. 31-41.
- [3] S.M. Bush, E.J. Gutmark, "Reacting and nonreacting flowfields of a V-gutter stabilized flame", AIAA journal, Vol. 45, 2007, pp. 662-672.
- [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, 1982, pp. 254-262.
- [6] D. Thibaut, S. Candel, "Numerical study of unsteady turbulent premixed combustion: Application to flashback simulation", Combust. Flame, Vol. 113, 1998, pp. 53-65.
- [7] A.P. Dowling, "A kinematic model of a ducted flame", J. Fluid Mech. Vol. 394, 1999, pp. 51-72.
- [8] J. Fritz, M. Kroner, T. Sattelmayer, "Flashback in a swirl burner with cylindrical premixing zone", Journal of Engineering for Gas turbines and Power, Vol. 126, 2004, pp. 276-283.
- [9] P. Domingo, L. Vervisch, "DNS of partially premixed flame propagating in a turbulent rotating flow", Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 31, 2007, pp. 1657-1664.
- [10] C. Eichler, T. Sattelmayer, "Premixed flame flashback in wall boundary layers studied by long-distance micro-PIV", Experiments in fluids, Vol. 52, 2012, pp. 347-360.
- [11] A. Birch, D. Brown, M. Fairweather, G. Hargrave, "An experimental study of a turbulent natural gas jet in a cross-flow" Combust. Sci. Technol., Vol 66, 1989, pp. 217-232.