Technical Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2013.17.5.121>

덕트형 연소기에서 화염의 동특성에 관한 실험적 연구

정찬영^a · 김태성^a · 송진관^b · 윤영빈^{a,*}

An Experimental Study on the Flame Dynamics in Ducted Combustor

Chanyeong Jeong^a · Taesung Kim^a · Jinkwan Song^b · Youngbin Yoon^{a,*}

^a*School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Korea*

^b*School of Aerospace System, University of Cincinnati, USA*

^{*}*Corresponding author. E-mail: ybyoon@snu.ac.kr*

ABSTRACT

The characteristics of flame dynamics occurring near the bluff body was experimentally investigated in a model combustor with V-gutter bluff body. Measurements of chemiluminescence with high speed camera and PIV were performed for visualization of flame structure. Flashback occurs due to the change of pressure gradient in the combustor, and the flashback distance depends on equivalent ratio. Unstable flames can be classified into three types depending on the flashback distance and structure. When the flame goes over the bluff body, an unusual flame structure occurs at the front of the bluff body. Re-stabilization takes place as the flame moves downstream of the combustor. This process is supported by a strong vortex structure behind the bluff body.

초 록

V-거터형 보염기가 장착된 덕트형 연소기에서 연소 불안정이 발생할 때 보염기 근처에서 나타나는 화염의 동특성에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 화염 구조를 가시화하기 위해서 고속 카메라를 이용한 자발광 계측과 PIV 기법을 사용하였다. 연소 불안정이 발생하면 연소기 내부의 압력 구배에 변화가 생기면서 화염의 역화 현상이 일어나고, 역화의 진행거리는 당량비에 따라서 달라졌다. 역화의 진행거리와 구조에 따라 불안정 화염을 세 가지 유형으로 분류하였다. 일정 당량비 이상에서는 역화가 진행됨에 따라 보염기 앞쪽 끝단에서 특이한 화염 구조를 관측할 수 있었다. 순압력 구배에서 역화 되었던 화염면은 후류로 밀리고, 이때 보염기 안쪽에 형성된 와류로 인하여 재안정화가 이루어지는 것을 확인하였다.

Key Words: V-gutter Bluff Body(V-거터 보염기), Combustion Instability(연소 불안정성), Ducted Combustor(덕트형 연소기), Flashback(화염 역화), Re-stabilization(화염 재안정화)

Received 29 November 2012 / Revised 10 September 2013 / Accepted 17 September 2013

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548 / <http://journal.kspe.org>

[이 논문은 한국추진공학회 2012년도 추계학술대회(2012. 11. 22-23, 여수 디오션리조트) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

보염기는 오래전부터 화염을 안정화시키기 위

하여 사용되어 왔다. Zukoski[1], Roshko[2] 등의 연구 이래로 보염기 주변부에서 발생하는 유동 및 연소 현상의 특징에 대해서 매우 다양한 연구가 수행되어 왔다[3-6]. 보염기의 유동 특성은 보염기의 기하학적 특성이나 유입되는 유체의 성질 등에 의해 크게 영향을 받는다. 보염기의 목적은 화염을 유지하고 안정화시키는데 있으므로, 초기의 많은 연구들은 화염 안정화나 블로오프(blowoff)에 집중하였으며 현재에도 상당수의 연구가 이러한 부분에 초점을 맞추고 있다.

이에 따라 보염기 근처의 연소 불안정에 대한 연구가 진행되어 왔으며, 특히 유체 역학적 불안정성(hydrodynamic instability)이나 연소-음향 불안정성(combustion-acoustic instability)에 대한 조사가 이루어졌다. 블로오프 현상은 유체 역학적 불안정성과 밀접한 연관이 있기 때문에 이 불안정성에 대한 연구는 1950년대부터 꾸준히 진척되어 상당부분 이루어져 있는 상태이다[7-9]. 이에 반해 연소-음향 불안정성은 1980년대 이후로 종방향 연소 불안정에 대한 연구가 다양하게 이루어지면서 학술적인 이해도가 높아졌다. 그 중 보염기 근처의 화염 동특성에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다[10-12].

그러나 많은 연구에도 불구하고 보염기가 존재하는 밀폐형 연소기(confined combustor)의 종방향 연소 불안정에 대해서 완전히 이해하기에는 아직 불충분한 상황이다. 화염의 역화와 이에 수반되는 재안정화 현상에 대한 부분도 마찬가지이다. 역화 현상은 공기와 연료의 예혼합으로 인하여 발생하는 매우 복잡한 현상이며 이를 일으키는 다양한 원인에 대해서는 많은 논문들에 언급되고 있다[13]. Sommerer 등은 다양한 원인을 크게 5가지로 구분지어 간략하게 설명하고 있다[14]. 이 중 보염기가 존재하는 밀폐형 연소기에서 발생하는 역화 현상은 '연소 불안정에 의한 역화'가 그 원인으로 알려져 있다. 1980년대에 보염기나 후향계단(rearward facing step)에서 발생하는 역화 현상의 실험적 연구가 이루어져 왔고[15,16], 최근에 들어오면서 Dowling[17], Thibaut 과 Candel[18] 등에 의해 이론식과 수치 해석을 통한 연구가 있었다. 그러나 이들 연구는

상대적으로 약한 역화 현상에 대한 부분에만 초점을 맞추고 있으며, 보염기를 넘어서는 강한 역화 현상에 대해서는 연구가 많이 이루어지지 않은 상태이다. 역화 현상은 상대적으로 열에 취약한 연소기 상단 부분에 심각한 손상을 입힐 수 있기 때문에 이에 대한 완전한 이해가 요구된다.

따라서 본 논문에서는 보염기가 존재하는 밀폐형 연소기내에서 발생하는 종방향 연소 불안정에 대한 기초적인 조사를 수행하였다. 그리고 이로 인해 발생하는 보염기 주변의 역화 현상에 대한 가시화를 수행함으로써 화염이 보염기를 넘어서 연소기 상단으로 전파될 때 어떠한 모습이 나타나는지 살펴보았다. 또한 그 모습이 나타나는 이유에 대해서도 유동장 속도 측정 등을 통해서 알아보았다. 역화된 화염이 다시 후단으로 밀리면서 소멸되지 않고 보염기에서 순간적인 재안정화가 이루어지는 것을 관찰할 수 있었고, 역화와 재안정화가 반복되며 연소 현상이 유지 되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 재안정화 현상에 대해서도 동일한 조사를 수행하여 위와 같이 연소 현상이 유지될 수 있도록 해주는 원인을 살펴보았다.

2. 실험 장치 및 조건

2.1 실험 장치

본 실험은 V-거터형 보염기가 장착된 랩 스케일의 모형 연소기(Fig. 1)에서 수행되었다. 압축기에서 공급된 공기는 필터 및 제습 장치를 거쳐 시험 장치 내부로 공급되었다. 연소 시험 장치는 연료 공급 장치, 혼합부, 연소 실험부, 연장 덕트, 배기 장치로 구성되어 있다. 연료공급을 위해 8 bar의 압력을 유지하여 공급할 수 있는 도시가스 라인을 구성하였다. 혼합 및 연소 장치는 40x40 mm의 단면적을 지닌 길이 방향으로 긴 덕트 형상이다. 공급공기의 유량을 제어하기 위해 연소실 상단에 40x5 mm의 블록 오리피스를 두어서 압력강하가 발생하도록 하였다. 블록 오리피스는 면적 차폐율이 87.5%로써 연소실 상단에서 음향학적으로 닫힌 경계로 작용한다. 연

Fig. 1 Schematic of the model ducted combustor and V-gutter bluff body.

소실 끝단에는 노즐을 설치하여 연소 불안정이 발생하도록 하였다. 주로 사용된 노즐은 면적 차폐율이 50%로써 연소실 끝단에서 음향학적으로 열린 경계로 작용한다. 따라서 불안정 화염이 발생하는 경우 연소기는 음향학적으로 닫힘-열림 경계를 갖는다. 두 경계 사이의 연소 시험 장치 길이는 2040 mm이다. 연료 분사는 혼합부 위와 아래 벽면에 설치된 0.8 mm 지름의 단공형 분사기에서 수직으로 분사된다. 연료 분사기와 보염기 사이의 거리가 830 mm가 되도록 하여 공기와 연료가 충분히 혼합되기 위한 공간을 확보하였다[19]. 연소 실험부는 점화기, 보염기, 가시화 창으로 구성되어 있다. 수소와 공기를 사용하는 토치형 점화기를 보염기의 직하부에 설치하여 초기 점화에 이용하였다. 보염기는 60° 각도를 갖는 V자 형태이며, 한 변의 길이는 14 mm이다. 보염기 근처의 화염 관측을 위해서 좌우 벽면에 20 mm 두께의 수정 창을 설치하였다.

2.2 실험 방법 및 조건

본 연구의 실험조건은 화염의 기초적인 동특성을 파악하기 위해 주기적인 역화가 일어나는 조건으로 설정되었고, 최근의 여러 연구자들도 비슷한 조건에서 화염의 동특성을 파악하고 있다. 이는 실 연소기의 작동조건과는 차이를 보이지만 현상 자체는 실 연소기에서도 일어날 수 있다. 본 연구를 통한 화염 역화의 거동 및 동압의 상관관계 분석은 실 연소기의 역화 및 불안정 현상의 기초연구로써 활용될 수 있다.

본 연구를 위해 상온의 공기를 사용했으며 유입 공기 속도는 6.0 ~ 15.0 m/s 까지 간격을 1.5 m/s 로 조절하였다. 연료로써 상온의 도시가스

Table 1. Experimental condition.

	Condition
Inlet air velocity	6.0 - 15 m/s (Error : $\pm 3\%$)
Inlet air temperature	297 K
Fuel type	Natural gas (CH ₄ : 89%, C ₂ H ₆ : 9%)
Fuel temperature	297 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)	300, 560, 640, 720, 1395, 1515, 1655, 1955 mm

가 사용되었다. 당량비는 간격을 0.05로 하여 0.45에서 1.10까지 조절하였다. 노즐은 연소실의 면적비에 대해 0.3, 0.5, 0.8의 면적비를 갖는 노즐을 이용하였다. 8개의 동압센서(DPS)를 통해 동시에 여러 위치의 동압을 측정하고 이를 통해 주파수와 압력 변동치를 측정하였다. 동압 센서의 정확한 위치는 Table 1에 나타나 있다.

화염의 구조 변화를 가시화하기 위해서 고속 ICCD 카메라와 대역 필터를 이용한 OH* 자발광 촬영이 이용되었다. 그리고 유동장 속도를 가시화하기 위하여 PIV 기법을 적용하였다. 평면광을 만들기 위해 Nd:YAG 레이저를 사용하였고, 산화지르코늄을 입자로 사용하였다.

3. 실험 결과

3.1 종방향 연소 불안정 기초 분석

연소기에서 발생하는 화염의 구조는 유입 공기의 유량과 당량비에 따라서 달라진다. 화염의 동특성을 자세히 살펴보기에 앞서 유량과 당량비에 따른 착화 가능 범위를 측정해 보았다. Fig. 2는 유속과 당량비 변화에 따른 안정화 지도를 보여준다. 안정화 지도에서 z 축은 오리피스에 가장 가까운 동압 센서에서 측정된 동압의

RMS(root-mean-square) 값과 연소기 내부 정압의 비를 나타낸다. 안정한 화염의 경우 파란색으로 표시가 되어 있으며 불안정 화염은 각각 노란색, 주황색, 빨간색으로 구분이 되어 있다. 불안정 화염은 공통적으로 보염기 상, 하류로 진동하는 모습을 보여주는데 역화가 수반되는 비정상 화염구조에 따라 화염을 A, B, C type으로 구분하였다. 각 유형의 구조와 자세한 구분 이유는 다음 문단에서 상세히 다루도록 하겠다. 동일한 유량에서 당량비를 증가시키에 따라 화염은 안정한 상태에서 A, B, C type 불안정 화염의 모습으로 점점 변화한다. 그리고 일정 당량비 이상에서는 블로오프 현상이 발생하게 된다. 화염이 각 유형으로 변할 때마다 압력비가 증가하는 모습을 볼 수 있다. 이를 통해 당량비에 비례하여 불안정성이 증가함을 알 수 있다. 또한 안정화 맵을 통해서 불안정 화염 구간이 안정 화염 구간보다 매우 넓게 형성되는 것을 알 수 있고, 불안정 화염 구간 중에서도 B type 불안정 구간이 상당부분을 차지하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3은 위의 Fig. 2에서 언급한 각 화염 유형에 대한 한 주기 구조를 보여주는 OH* 자발광 이미지이다. 연소 불안정이 발생하면 화염은 역화와 재안정화를 주기적으로 반복하는데, 동압을 기준으로 한 주기를 정하였다. 이 때 유동은 왼쪽에서 오른쪽으로 흐르고 있다. Fig. 3(a)는 보염기에서 나타나는 일반적인 안정한 화염구조를

보여준다. 위상의 변화에도 화염의 구조는 큰 변화가 없으며 유체역학적 불안정성에 따른 변화만을 보여준다. Fig. 3(b)는 A type 불안정 구간의 화염 구조 변화를 보여준다. 보염기 하류에서 계속 유지되는 안정한 화염과는 달리 화염면이 보염기 하류에서 상류로 이동하기 시작한다. 그러나 화염면은 보염기 앞쪽 끝에서 더 이상 전파되지 못하고 다시 하류로 밀린다. 결과적으로 화염면이 보염기 뒤쪽 끝에서 앞쪽 끝까지 옆면을 따라 주기적으로 이동하는 모습을 보여준다.

Fig. 3(c)는 B type 불안정 구간의 화염으로, 화염이 보염기 앞쪽 끝을 넘어서 상류로 보염기의 몇 배에 해당하는 거리까지 이동하였다가 하류로 밀리는 모습을 보여준다. B type 불안정 화염에서 불안정 화염을 A, B, C type으로 구분짓는 기준이 되는 독특한 화염 구조가 나타나는 것을 볼 수 있다. 위상 180°의 이미지를 보면 보염기 상류방향에 원 모양으로 형성된 화염 구조가 나타나는 것을 볼 수 있다. 이 화염은 점차 발달하여 위상 240°의 이미지를 보면 상당히 규모가 커져있다. 이와 같은 화염 구조가 나타남으로써 화염의 역화 거리가 A type보다 급격하게 증가하게 되는 것을 알 수 있으며 화염 유형 구분의 기준으로 작용한다. Fig. 3(d)는 C type 불

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

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

안정 구간의 화염으로 매우 강한 역화가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이 화염에서는 화염의 전파가 가시화 창을 넘어서까지 진행되기 때문에 정확한 역화 거리를 측정할 수는 없었으나, 보염기를 떠난 화염이 다시 되돌아오기까지 한 주기의 절반 가까이 되는 것으로 보아 상당히 큰 역화 거리를 가진다는 것을 추측해 볼 수 있다.

Fig. 4는 연소기 노즐의 열린 비율에 따라 변화하는 화염의 역화 거리를 측정한 결과를 보여준다. 이 때 유입 공기 속도는 9 m/s로 고정하였다. 본 논문에서는 화염 구조가 변화하는 한 주기 동안 화염이 연소기 상류로 가장 멀리 전파되었을 때 보염기 뒤쪽 끝에서부터 화염 면까지의 거리를 역화 거리라고 정의하였다. 그리고 각 당량비별로 40주기의 사진을 분석하여 평균 역화 거리를 계산하였다. 노즐의 열린 비율은 연소기 단면적 대비 노즐의 구멍 크기로 정의하였다. Fig. 4를 보면 열린 비율이 0.8일 때는 당량비의 변화에 관계없이 역화 현상이 거의 발생하지 않는 것을 볼 수 있다. 이는 대부분의 당량비 조건에서 안정한 화염이 유지된다는 것을 나타낸다. 그리고 당량비가 0.5인 경우를 제외하고는 노즐의 열림비가 줄어들수록 역화 거리가 점점 커지는 것을 알 수 있다. 노즐의 열림비가 0.3이고 당량비가 0.8인 경우에는 모든 경우에 화염이 가시화 창을 넘어가는 C type 불안정 화염이 발생하여 역화 거리를 측정할 수가 없었다. 위 결과를 통해 연소 불안정 현상은 노즐의 열림비가

Fig. 4 Average flashback distance for various equivalence ratio.

작을수록 강하게 발생함을 알 수 있다. 동일한 조건에서 발생하는 연소생성물의 양은 동일하다고 볼 수 있다. 그러나 같은 양의 연소생성물이 배출되는 과정에서, 연소 불안정이 발생하는 한 주기 동안에 노즐을 통해 빠져나가는 연소생성물의 양은 시간에 따라 달라질 수 있다. 노즐을 통해 빠져나가지 못한 연소 생성물들이 순간적으로 연소기 후단에 밀집되어 연소기 내부에 역압력구배를 발생시키며 이러한 현상은 노즐 열림비가 작을수록 강해지게 될 것이다. 따라서 노즐의 열림비가 줄어들수록 평균역화거리가 증가하게 되는 것이다. 결과적으로 연소기 후단으로 빠져 나가는 연소 생성물의 양과 역화 거리에 상관관계가 있음을 추측해 볼 수 있다.

Fig. 5는 각 화염 유형에 따른 연소기 내부의 압력 변화를 시간에 따라 측정한 결과를 보여준다. 연소기 압력은 정압 센서에서 얻어진 정압 데이터와 동압 센서에서 얻어진 압력 진동의 결과를 합하여 얻었다. 측정 위치는 Fig. 1에 나타나 있는 DPS 1, DPS 5, DPS 8의 위치와 동일하며 각각 near orifice, near bluff body, near nozzle로 명명되었다. Fig. 5(a)는 안정한 화염 조건에서의 압력 변화를 보여준다. 위치별로 약간의 떨림은 존재하지만 거의 일정하게 유지되고 있음을 알 수 있고 연소기 후단으로 갈수록

Fig. 5 The combustor pressure fluctuation graph: (a) stable flame, (b) A type unstable flame, (c) B type unstable flame, and (d) C type unstable flame.

압력이 다소 감소하는 모습을 보여주고 있다. Fig. 5(b)는 A type 불안정 화염 조건에서의 압력 변화를 보여준다. 보염기와 노즐 근처의 압력 요동에 비해 오리피스 근처의 압력이 크게 요동치는 것을 볼 수 있다. 이에 따라 연소기 전단의 압력이 연소기 중간이나 후단의 압력보다 낮아지는 역 압력 구배가 순간적으로 존재하게 된다. Fig. 5(c), 5(d)는 각각 B type, C type 불안정 화염에서의 압력 변화를 보여준다. B type, C type 으로 갈수록 오리피스 근처의 압력 요동은 점점 커지게 되어 역 압력 구배의 크기도 점점 커지게 된다. 따라서 역 압력 구배가 연소기 내부의 유동에 영향을 미치게 되고 화염 구조를 변화시킨다고 생각할 수 있다.

위에서 조사된 결과를 통해 보염기를 지닌 덕트형 연소기에서 연소 불안정이 발생하게 되면 화염이 보염기 근처에서 주기적으로 요동치는 모습을 보여준다는 사실을 알게 되었다. 그리고 요동치는 구조에 따라서 불안정 화염을 세 가지 타입으로 구분하였다. 또한 연소기 구조 변화와 압력 변화 측정을 통해 화염 구조가 변화되는 원인에 대해서도 살펴보았다. 그러나 종방향 불안정시에 나타나는 화염의 동특성에 대해서 더 자세히 알아보기 위해서는 불안정 화염의 구분 기준이 되는 화염이 어떠한 방식으로 생성되는지 자세히 알아볼 필요가 있다. 다음 장을 통해 이에 대해서 살펴보도록 하겠다.

3.2 역화가 발생하였을 경우 화염의 구조 변화

화염의 유형을 구분 짓는 기준 화염 구조가 가장 잘 나타나는 당량비 0.8, 유속 9 m/s, 노즐 열림비 0.5인 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 데이터들의 FFT 결과 68 Hz 에 대한 하모니 주파수들이 관찰되었고 자발광 세기 또한 68 Hz 의 주파수를 갖는 것으로 나타났다. 이 주파수에 대해, 한 주기 동안 보염기 근처의 압

Fig. 6 (a) The combustor pressure graph during one period (b) OH radical chemiluminescence from 122° to 209°.

력이 변화하는 모습을 보여준 것이 Fig. 6(a)이다. 압력은 DPS 4와 DPS 5 위치에서 측정한 값이다. 90° 이후로 역 압력구배가 크게 나타나고 이후에 220° 부근까지 압력구배가 요동치는 것을 볼 수 있다. 그리고 보염기 상류에 기준화염이 생성되면서 DPS 5의 압력이 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 압력 변화는 매 주기마다 동일하지는 않지만 유사한 경향을 보여준다.

Fig. 6(b)는 역화 현상이 발생하는 순간부터 보염기 상류에 기준화염이 발생하여 성장하는 모습을 보여주는 OH* 자발광 이미지이다. 동압신호와 동시 측정을 통해 각 화염의 위상을 얻을 수 있었고 이를 이미지 위쪽에 표시하였다.

빨간색으로 표시된 부분은 보염기의 위치를 나타낸 것이고, 혼합기는 왼쪽에서 오른쪽으로 흐르고 있다. 안정하던 화염 구조는 120° 근처에서 상하로 약하게 진동하기 시작하고 140° 근처에서 보염기 끝단을 넘어서 상류방향으로 진행하기 시작한다. 이러한 역화 현상은 이전의 다른 연구자들에 의해서도 관찰된 적이 있다[15-17].

화염의 역화가 역 압력 구배 구간과 일치하지 않는 이유는 압력 차이로 인한 유동의 움직임이 영향을 받아 전파되는데 약간의 시간이 필요하기 때문인 것으로 여겨진다. 그러나 이러한 위상 차이는 매우 짧은 시간 간격이기 때문에 거의 동시에 발생하는 현상이라고 보아도 무관하다.

만약 보염기 측면을 따라 이동하던 화염이 보염기 앞쪽에 화염을 형성하지 못하고 뒤로 밀리게 된다면 A type 불안정 화염의 모습이 나타나게 될 것이다. 그러나 역 압력 구배의 세기가 충분히 강해서 역화되는 화염이 보염기 상류의 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. 위상이 $170^\circ \sim 209^\circ$ 동안의 이미지를 보면, 보염기 상류에서 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. 또한 한 가지 주목할 만한 사실은 보염기 상류의 화염이 점점 커지는 동안 연소기 측면에서 유동에 수직으로 형성된 화염면은 거의 같은 위치에 자리하고 있다는 점이다. 보염기 상류의 화염이 성장하면서 연소기 후단에서 발생한 역 압력 구배를 차단하고 새로운 압력 형성 소스로 작용하는 것이다. 이는 보염기 상류의 화염이 연소기 상단으로 전파되는 것이 역 압력 구배의 영향에 의한 것이 아니라는 것을 의미한다.

이러한 역화 현상이 발생할 때, 보염기 근처의 유동장을 관찰하기 위해서 PIV 계측 기법을 이용했다. 실험실에서 보유한 PIV 계측 장비로는 10 Hz 이상의 촬영이 어려워 동압과의 동시 측

Fig. 7 The PIV images in the event of (a) the case of flashback with 161° , (b) the case of flashback with 190° .

정을 이용하여 위상 맞추를 하였다. 보염기가 레이저를 차단하여 보염기 하단의 유동장은 얻을 수 없어서 연소기 상단만을 나타내었다.

Fig. 7(a)는 Fig. 6(b)에서 위상 161° 인 경우의 PIV 이미지이다. 이 경우 화염이 보염기 측면을 따라 계속 이동하고 있는데 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 상류로 전파되는 현상이 발생하고 있음을 알 수 있다. 그리고 보염기 측면에 약한 역방향 유동이 형성되는 것을 볼 수 있다. 이는 보염기 측면 위쪽에서 순방향 유동과 역방향 유동이 서로 충돌하여 와류를 만들어 내기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 7(b)는 Fig. 6(b)에서 위상 190° 인 경우의 PIV 이미지이다. 보염기 근처의 모든 부분에서 역방향 유동이 생성되고 있음을 알 수 있다. 보염기 상류에서 성장하는 화염으로 인해 생성된 역방향 유동과 역 압력 구배로 인하여 생성된 역방향 유동이 모두 영향을 미쳐서 이와 같은

유동장 결과가 나온 것이다. 보염기 측면 위쪽을 보면 다른 구간과는 달리 순방향 유동 및 유속이 0이 되는 구간이 존재한다. 이는 보염기 상류의 화염이 생성한 압력장과 역 압력 구배로 인한 압력장의 충돌 때문에 발생하는 것으로, 앞에서 살펴보았던 것처럼 보염기 측면 화염이 더 이상 진행하지 못하는 원인이 된다.

3.3 화염 진행 위치와 보염기 경계층의 관계

보염기가 유동안에 존재할 때, 보염기 옆면에는 경계층이 형성되어 다른 부분보다 유동의 속도가 상대적으로 낮다. 그리고 혼합기의 속도가 상대적으로 느린 부분이 존재한다면 화염은 그 공간을 향해 진행하게 될 확률이 높다. 따라서 역화 현상이 발생하면 유입되는 혼합기의 속도가 느린 보염기 옆면의 경계층을 따라서 우선적으로 진행하게 될 것으로 예측할 수 있다.

Fig. 8은 자발광 이미지를 디지털화하여 각 행에서 가장 밝은 부분만을 표시하여 나타낸 것으로 화염면의 위치와 유사하다고 생각할 수 있다. t^* 은 한 주기의 시작을 0으로 하였을 때 상대 시간을 나타낸다. 위, 아래의 그림을 통해 보염기 측면에서 유동과 수직하게 전파되는 화염과 보염기 측면을 따라 전파되는 화염의 속도를 측정하였다. 수직하게 전파되는 화염의 이동거리는 보염기 뒤쪽 텅에서 연소기 벽 사이의 중간지점에 위치하는 화염의 위치변화로 정하였다(Fig. 8에서 점선으로 표시). 보염기 측면에서 전파되는 화염의 이동거리는 가장 멀리까지 진행한 화염의 위치변화로 정하였다(Fig. 8에서 실선으로 표시). 화염이 보염기 상류로 진행할 때, 보염기 측면에서 유동과 수직하게 전파되는 화염은 대략 6 m/s의 속도로 이동한다. 반면에 보염기 측면을 따라서 전파되는 화염은 약 16 m/s의 속도로 이동하는 것으로 보인다. 따라서 동일한 시간에 보염기 측면을 따라서 이동하는 화염이 다른 화염보다 2.5배가량 빠르게 이동함을 알 수 있다. 같은 조건으로 20주기의 사진을 분석한 결과, 보염기 측면에서의 이동 속도가 평균적으로 3배가량 빠른 것을 알 수 있었다.

또한 Fig. 7(b)를 통해서 역화가 발생할 때 역

Fig. 8 The post-processing OH^* chemiluminescence images in the event of the case of flashback.

방향 유동과 순방향 유동의 만남으로 인하여 보염기 옆면에서 와류 현상이 발생함을 알 수 있다. 이로 인해 보염기 옆면의 혼합기 속도는 더욱 더 느려지고 화염의 역화 현상이 발생할 때 다른 부분보다 보염기 옆면을 따라서 더욱 빠르게 전파될 수 있도록 돕는다. 이러한 화염의 전파로 인해 Fig. 6(b)에서 볼 수 있듯이 보염기 상류의 혼합기가 우선적으로 점화되면서 B type 불안정 화염의 특성이 나타나는 것이다. 따라서 보염기에서 형성되는 경계층이 B type 불안정 화염 현상이 나타나는데 주요한 원인으로 작용함을 알 수 있다.

3.4 재안정화가 일어날 경우 화염의 구조 변화

조건에 따라서 화염면은 안정한 경우와 달리 보염기 상류까지 상당히 진행되지만 연소기 압력 구배가 정상으로 되돌아가면서 혼합기에 의해 다시 보염기 후류로 밀리게 된다. 그러나 이 경우 화염은 연소기 후류로 계속 밀려나 소멸되지 않고 보염기에서 다시 안정화되어 연소 현상이 지속적으로 유지되는 모습을 보여준다. 이 경우 화염의 구조는 어떻게 변화되고 유동장은 어

떻게 형성되는지 살펴보았다. 화염의 재안정화가 일어날 때, 당량비가 증가할수록 짧은 재안정화 시간과 많은 OH^* 로 인해 자발광 이미지를 통해 구조를 명확히 가시화하기 어려웠다. 따라서 재안정화 구조를 명확히 관찰할 수 있는 당량비 0.6, 유속 9 m/s, 노즐 열림비 0.5인 조건을 택하여 자발광 이미지 촬영을 하였다. 촬영 시에 카메라 조건은 3.2에서 언급한 것과 동일하다.

동압 데이터들의 FFT 결과 62 Hz 에 대한 하모니 주파수들이 관찰되었고 자발광 세기 또한 62 Hz 의 주파수를 갖는 것으로 나타났다. 이 주파수에 대해, 한 주기 동안 동압 신호가 변화하는 모습을 보여준 것이 Fig. 9(a)이다. 압력 측정 위치는 Fig. 6과 동일하다. Fig. 9(a)를 보면 위상 90° 전후로 약한 역 압력 구배가 발생하는 것을 볼 수 있다. Fig. 6(a) 보다 약하게 역 압력 구배가 발생하는 것은 재안정화 촬영 조건이 A type 불안정 화염 구간이기 때문이다.

Fig. 9(b)는 화염이 압력 구배의 정상화로 인하여 보염기 후류로 밀리는 순간부터 재안정화 현상이 발생하여 보염기 근처에서 안정한 화염이 나타나는 모습을 보여주는 OH^* 자발광 이미지이다. Fig. 6(b)와 마찬가지로 동압 신호와의 동시 측정을 통해 각 화염의 위상을 얻을 수 있었고 이를 이미지 위쪽에 표시하였다. 빨간색으로 표시된 부분은 보염기의 위치를 나타낸 것이고, 혼합기는 왼쪽에서 오른쪽으로 흐르고 있다. 역화로 인하여 보염기 상류로 이동했던 화염은 순방향 유동의 영향으로 다시 보염기 후류로 이동하기 시작한다. 이 때 화염은 유동 방향과 수직한 구조를 가지고 이동한다. 그리고 보염기 뒤쪽 끝까지 이동한 화염은 위상 231° 에서 볼 수 있듯이 와류를 형성하기 시작한다. 화염이 혼합기에 의해서 뒤로 이동하게 되면, 보염기 안쪽에 비해 바깥쪽 유동의 속도가 매우 빠르게 증가한다. 속도 차이가 매우 큰 두 유동이 접하면 경계면에서 전단응력에 의해 와류가 발생하게 된다. 위상 249° 에서 매우 강한 와류가 형성되고 있음을 관찰할 수 있다. 강한 와류의 발생으로 연소로 인해 생성된 고온의 가스들과 미연 가스들이 보염기 안쪽으로 유입되고 서로 혼합된다. 고

Fig. 9 (a) The combustor pressure graph during one period (b) OH^* radical chemiluminescence from 213° to 293° .

온 가스로 인해 연소에 필요한 충분한 온도조건이 얻어지고 보염기 근처의 후류 지역은 상대적으로 유속이 낮기 때문에 지속적인 연소 현상이 가능해진다. 따라서 역화된 화염에 의해 생성된 고온의 가스들이 점화기 역할을 수행하면서 화염의 재안정화에서 중요한 역할을 하는 것이다. 위상 $267^\circ \sim 293^\circ$ 의 이미지를 보면 보염기 근처의 화염이 후류로 갈수록 적은 너비를 지니게 된다. 이는 해당 부분의 압력이 낮아서 미연 가스가 강하게 밀려들어 가는 것을 의미한다.

재안정화 현상이 발생할 때, 특히 와류현상이 발생할 때 보염기 근처의 유동장이 어떻게 형성되는지 관찰하기 위해 PIV 측정 기법을 이용하

Fig. 10 The PIV image in the event of the case of Re-stabilization with 249°.

였다. 위상 맞추를 위해 동압과의 동시 측정을 이용했다. Fig. 10은 Fig. 8(b)에서 위상 249° 인 경우의 PIV 이미지이다. 연소기 전체적으로 순방향 유동이 존재하는 것을 볼 수 있으며, 보염기 후류에 역방향 유동이 존재하는 것을 관찰할 수 있다. 역방향 유동의 위치는 자발광 이미지에서 확인할 수 있는 와류의 위치와 동일하다. 역방향 유동의 존재를 통해 와류로 인한 연소 생성물과 미연 가스의 혼합이 이루어지면서 재안정화가 이루어지고 있음을 다시 확인할 수 있다.

4. 결 론

V-거터형 보염기가 장착된 덕트형 연소기에서 발생하는 화염의 동특성에 관한 실험적 연구를 수행하였다. 실험 결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 일정 당량비 이상에서 보염기 후류의 안정한 화염이 연소기 상단으로 이동하는 역화 현상이 발생한다. 연소 불안정으로 인한 유입 유량의 요동이 발생하여 연소기 내부에 역 압력 구배가 생기는 현상과 연소로 인해 부피가 커진 생성물이 노즐을 통해 충분히 배출되지 못하는 상황이 화염 구조의 변화에 영향을 미치게 된다.
- (2) 역화 현상이 발생하는 경우 그 구조적 차이에 따라서 크게 세 가지로 화염을 구분했다. 그 중에서 B type 불안정 화염은 특이한 구조적 특성을 보여준다. B type 불안정 화염

에서, 보염기의 상류에서 발생하는 강한 연소 현상으로 상대적인 역화 거리가 매우 증가하였다. 또한 이 연소 현상은 역방향 유동에 의한 화염의 전파가 아닌 새로운 에너지원으로 작용하여 화염의 전파를 발생시키는 것으로 관찰되었다. 그리고 순방향 유동과 역방향 유동의 충돌에 의해 생성된 와류현상과 보염기 측면의 경계층 유동의 특징이 B type 불안정 화염 구조를 갖게 하는데 크게 기여하는 것을 알 수 있었다.

- (3) 역화된 화염은 시간이 지남에 따라 순방향 유동에 의해 뒤로 밀리게 되지만 완전히 소멸되지 않고 보염기 후류에서 연소 현상이 유지된다. 이는 매우 강한 화염 진동을 보여주는 C type 불안정 화염의 경우도 마찬가지이다. 이러한 재안정화는 보염기 후류에 생기는 와류에 의한 것으로 관찰되었다. 화염이 유동에 의해 밀려날 때 보염기 안쪽과 바깥쪽의 유동 속도 차이로 강한 와류가 생성되고, 와류로 인해 고온의 연소 생성가스와 차가운 반응가스가 혼합되어 연소 현상이 지속되는 것이다.

후 기

본 연구는 서울대학교 항공우주신기술연구소와 연계된 교육과학기술부의 중견연구자지원사업(NRF-2010-0015100)과 지식경제부의 재원으로 에너지기술평가원의 지원을 받아 수행한 신재생 에너지기술개발사업(No. 2011951010001C)의 연구 결과이며 이에 감사드립니다.

References

1. Zukoski, E.E., "Flame Stabilization on Bluff Bodies at Low and Intermediate Reynolds Numbers," *Ph.D. Thesis*, California Institute of Technology, 1954.
2. Roshko, A., "On the Development of

- Turbulent Wakes from Vortex Streets," Report NACA TN 2913, California Institute of Technology, 1953.
3. Longwell, J.P., Frost, E.E. and Weiss, M.A., "Flame Stability in Bluff Body Recirculation Zones," *Industrial & Engineering Chemistry*, Vol. 45, Issue 8, pp. 1629-1633, 1953.
 4. Yamaguchi, S., Ohiwa, N., and Hasegawa, T., "Structure and blow-off mechanism of rod-stabilized premixed flame," *Combustion and Flame*, Vol. 62, Issue 1, pp. 31-41, 1985.
 5. Kiel, B., Garwick, K., Gord, J.R., Miller, J., Lynch, A., Hill, R., and Phillips, S., "A Detailed Investigation of Bluff Body Stabilized Flames," *45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, AIAA Paper No. 2007-168, 2007.
 6. Bush, S.M. and Gutmark, E.J., "Reacting and Nonreacting Flowfields of a V-Gutter Stabilized Flame," *AIAA Journal*, Vol. 45, Issue 3, pp. 662-672, 2007.
 7. Chandrasekhar, S., *Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability*, Oxford University Press, 1961.
 8. Prasad, A. and Williamson, C.H.K., "The instability of the shear layer separating from a bluff body," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 333, pp. 375-402, 1997.
 9. Chaudhuri, S., Kostka, S., Renfro, M.W. and Cetegen, B.M., "Blowoff dynamics of bluff body stabilized turbulent premixed flames," *Combustion and Flame*, Vol. 157, Issue 4, pp. 790-802, 2010.
 10. Langhorne, P.J., "Reheat buzz: an acoustically coupled combustion instability. Part 1. Experiment," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 193, pp. 417-443, 1988.
 11. Bloxsidge, G.J., Dowling, A.P. and Langhorne, P.J., "Reheat buzz: an acoustically coupled combustion instability. Part 2. Theory," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 193, pp. 445-473, 1988.
 12. Shanbhogue, S.J., Husain, S., and Lieuwen, T., "Lean blowoff of bluff body stabilized flames: Scaling and dynamics," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 35, Issue 1, pp. 98-120, 2009.
 13. Nauert, A., Petersson, P., Linne, M. and Dreizler, A., "Experimental analysis of flashback in lean premixed swirling flames: conditions close to flashback," *Experiments in Fluids*, Vol. 43, pp. 89-100, 2007.
 14. Sommerer, Y., Galley, D., Poinso, T., Ducruix, S., Lacas, F. and Veynante, D., "Large eddy simulation and experimental study of flashback and blow-off in a lean partially premixed swirled burner," *Journal of Turbulence*, Vol. 5, Issue 37, 2004.
 15. Keller, J.O., Vaneveld, L., Korschelt, D., Hubbard, G.L., Ghoniem, A.F., Daily, J.W. and Oppenheim, A.K., "Mechanism of Instabilities in Turbulent Combustion Leading to Flashback," *AIAA Journal*, Vol. 20, No. 2, pp. 254-252, 1982.
 16. Vaneveld, L., Hom, K. and Oppenheim, A.K., "Secondary Effects in Combustion Instabilities Leading to Flashback," *AIAA Journal*, Vol. 22, No. 1, pp. 81-82, 1984.
 17. Dowling, A.P., "A kinematic model of a ducted flame," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 394, pp. 51-72, 1999.
 18. Thibaut, D. and Candel, S., "Numerical Study of Unsteady Turbulent Premixed Combustion: Application to Flashback Simulation," *Combustion and Flame*, Vol. 113, Issues 1-2, pp. 53-65, 1998.
 19. Birch, A.D., Brown, D.R., Fairweather, M. and Hargrave, G.K., "An Experimental Study of a Turbulent Natural Gas jet in a Cross-Flow," *Combustion Science and Technology*, Vol. 66, pp. 217-232, 1989.