

환형 5중 동축관 연소기 내부에서의 예혼합 화염의 전파 특성 직접 관찰

조문수* · 백다빈* · 김남일***

Direct Observation of Premixed Flame Propagation Characteristics in an Annular Coaxial 5-Tubes Burner

Moon Soo Cho, Da Bin Baek and Nam Il Kim

ABSTRACT

Flame stabilization characteristics of premixed flames in an annular coaxial 5-tubes burner (AC5TB) were investigated experimentally. The AC5TB was made of five quartz tubes, and the flame stabilization conditions in that burner were investigated with the variation of equivalence ratio and the flow velocities. Flame behaviors inside of narrow annular tubes could be observed directly. Overall flame stabilization conditions were similar to that of the previous study, while the flame behaviors and structures were different mainly due to the controlled uniform distribution of the velocities in channels. Flame flashback conditions were thought to be governed by the competition between heat release rate, heat loss and heat recirculation in each channel. Stationary flames at a fixed location were compared in its velocity distribution and burned gas temperature across the channel. This AC5TB can be a basic configuration for the development of flame stabilization model of porous media combustors, and it will help understand about the real behavior of flames in meso-scale combustion spaces.

Key Words : Annular coaxial multi-tube(환형 동축 다중관), Premixed flame(예혼합 화염), Flame stabilization(화염 안정화), Porous media combustor(다공성 연소기)

기 호 설 명

D_{in} : 관 내경(inner diameter)
 t : 관 두께(thickness)
 A : 관 단면적(area)
 p : 관 둘레길이(perimeter)

c : 채널(channel)
 w : 채널 간격(channel distance)
 V_n : n 채널 평균속도(mean velocity)
 ϕ : 당량비(equivalence ratio)

1. 서론

열재생을 통한 에너지 효율 증진과 더불어 배기 가스 오염물 배출 저감을 위해 주로 단열 재료로 제작된 허니컴 및 다공성 구조의 연소기를 사용하는 경우가 다수 존재한다. 이러한 연소기들은 주로 세라믹을 이용한 경우가 많은데 비교적 다양한 구조 형상을 쉽게 구현할 수 있다는 장점이 존재하기 때문이다[1-3]. 단열 소재의 낮은 열전도 특성은 화염

주위의 온도 유지에 유리하므로 화염의 안정화에 도움이 될 수 있으며, 낮은 전도율로 인해 화염의 역화 속도를 억제하는 데에도 도움이 될 수 있어서 다공성 연소기 내부에 화염을 안정화 시키는 목적으로 널리 사용되었다.

그런데 단열 소재를 활용한 다양한 연소기들의 개발과 운전에 있어서 화염의 안정화 및 거동 특성은 매우 중요하므로 예전부터 많은 연구자들이 관심을 가지고 연구를 수행하였다. 특히 비교적 작은 길이 스케일에 의해 연소현상이 지배되는 다공성 연소기 내부 화염은 일반적인 가스 연소의 현상과 달리 연소기의 구조 특성과 소재 특성에 의해 매우 다양한 현상의 발생을 예상할 수 있어서 다양한 연구가 진

* 중앙대학교 기계공학부 대학원

** 중앙대학교 기계공학부

† 연락처자, nikim@cau.ac.kr

행되어 왔다. 국내에서는 세라믹 허니컴 연소기 내부 화염의 안정화에 연소기 주변의 열적 경계조건이 미치는 영향에 관한 연구[1]와 세라믹 다공성 연소기 표면에 형성된 화염의 NOx 등의 공해물질 배출 특성과 화염의 형상 변화를 실험적으로 연구[2]한 바 있으며, 수치해석으로는 다공성 연소기 내부의 예혼합 화염에 대한 연구[3] 등이 보고된 바 있다.

그런데 기존의 다공성 연소기에 대한 연구들[3-6]은 대부분 연소기 내부 화염 거동을 직접 관찰하지 않고 연소기 외부 표면이나 입출구 경계에서의 측정 결과를 이용하거나, 수치 해석[3,5,6]을 통한 외부 혹은 내부 거동 특성을 이해하는 연구를 수행하였다. 특히, 연소기 내부의 화염 거동에 대해서는 간접적인 화염의 흔적을 이용한 실험이 주로 수행되어왔다. 대표적인 예로 Min 등[4]에 의해 수행된 연구를 들 수 있는데, 화염이 세라믹 연소기 내부에 남긴 연소흔적을 토대로 다공성 물질의 외부 열적 경계 조건에 따라 두 가지 화염 안정화 모드가 존재함을 실험적으로 제시하였다. 하지만, 이처럼 간접적으로 얻어진 연소기 내부 거동에 대한 결과들은 실제 내부에서의 화염 거동을 이해하는데 매우 제한적이었고, 이후로도 직접 비교할 수 있는 실험적 결과가 제한적으로 제공되어 실제 현상에 대한 이해에 큰 진전이 이루어지지 못했다.

따라서 다공성 연소기의 내부 화염을 직접 관찰할 수 있다면, 다공성 연소기의 연소현상을 보다 잘 이해할 수 있을 것으로 기대되었다. 이러한 필요성에 기인하여 다공성 연소기의 특성을 모사할 수 있으면서 연소기 내부 화염을 직접 관찰할 수 있도록 다수의 석영관으로 이루어진 다중채널 연소기를 이용하여 화염의 안정화 특성에 대한 기초연구를 수행한 바 있다[7]. 이를 통해 석영관을 통한 열전달 효과가 화염의 분포와 형상 그리고 화염의 안정화에 밀접하게 영향을 미침을 직접 관찰하였으며, 일부 조건에 대해 해석적인 방법으로 화염의 안정화 특성을 설명할 수 있었다. 최근에는 본 연구자들에 의해 2중 및 3중 동축 석영관을 이용하여 단일관 내부 예혼합화염 전파와의 차이를 직접적인 관찰을 통해 비교하였다[8]. 다중 동축관 화염 안정화에 있어서 가장 특징적인 현상 중 하나는 동축관의 표면에 형성된 화염의 역화 조건이며, 메탄과 프로판 예혼합 화염의 비교를 통해 루이스수의 차이에 의한 화염의 불안정보다는 화염의 두께와 연소 공간 또는 연소기 끝단에서의 유동 특성에 의해 연소소음 등의 불안정성이 더 크게 영향을 받을 수 있음을 보였다. 그런데, 기존의 연구[8]에서는 다수의 동축관 내부를 흐르는 전체 유량을 제어하였기 때문에 각각의 유로에는 유동 저항의 차이로 인해 서로 다른 유속의 유체가 흐르게 되어 유

동과 화염의 특성 관계를 명확히 구분할 수 없었으며, 채널의 개수가 최대 3개이며 전체 동축 연소기의 외경이 30 mm 정도에 그쳐 일반적인 다공성 연소기에 비해 상당히 작은 크기를 가졌기에 채널의 개수와 연소기의 크기 증대가 요구되었다.

본 연구에서는 화염간의 상호 작용이 보다 활발하게 발생할 수 있도록 동축관의 개수를 보다 증가시키고 연소기의 외경도 실제 다공성 연소기의 크기에 보다 근접할 수 있도록 증가시킴으로써 내부 채널과 외부채널의 열적 차이를 증대시키고자 하였으며, 다중 동축관 표면에서의 화염의 내부 전파 및 역화 조건에 집중적인 연구를 수행하고자 하였다. 그리고 각각의 채널에 흐르는 유량을 각각 제어하여 채널별 유속을 제어할 수 있도록 함으로써 화염과 유속의 관계를 보다 엄밀하게 실험할 수 있을 것으로 기대하였다. 본 연구에서는 새롭게 제작된 연소기와 개선된 유량 제어 시스템을 활용하여 루이스수와 화염의 특성 길이 스케일이 다른 메탄과 프로판 두 가지 연료의 화염 안정화 특성을 비교하고 대표적인 조건에서의 화염의 거동 특성을 실험을 통해 직접 관찰하고 비교하고자 한다. 이를 통해 본 연구에서 제안하는 다중채널 연소기가 좁은 연소공간을 가지는 다공성 원통형 연소기 형상에 대한 기초적인 모델로서의 활용 가능성을 향상시키고 직접 관찰된 화염의 거동 특성을 통해 기존의 다공성 연소기에 대한 이해를 증진하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

본 연구에 사용된 연소기는 5개의 석영관을 동축으로 설치해 5개의 환형 다중 채널을 형성하도록 제작되었으며 이를 Fig. 1에 제시하였다. 사용한 석영관은 화염이 채널 내로 전파되는 것을 집중적으로 관찰하고자 5개 관 모두 같은 길이를 가지도록 제작하였으며, 연소기의 길이는 35 cm였다. 가장 내부의 채널을 채널-1로 정의하고 가장 외부의 채널을 채널-5로 정의하였다. 기타 채널 간의 간격 및 관 두께 등 석영관의 길이 스케일에 따른 변수들의 정의를 Fig. 1(c)에 제시하였으며, 각 변수들에 대한 보다 상세한 치수는 Table 1에 제시하였다. 전체적으로 채널의 간격이 약 4 mm 정도로 균일하게 유지될 수 있도록 설계하였지만, 석영관의 일반적인 생산 단위로 인해 채널 3의 경우에는 4.5 mm의 채널 간격을 가진다. 사용된 연료는 메탄(99.995%)과 프로판(99.95%)이며, 수분제거 필터를 거친 공기와 함께 혼합하여 사용하였다. 총 유량 및 당량비는 두 개의 질량유량계(MFC)를 이용하여 제어되었다. 연소기의 평균 유속은 5개 채널의 모든 면적을 합한 면적을 기준으로 하여 계

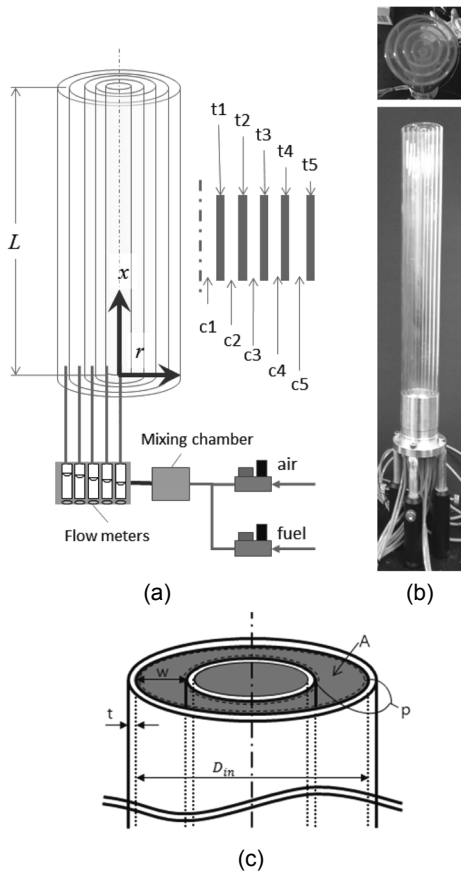


Fig. 1. Experimental apparatus; (a) the schematic of an annular narrow multi-channel burner, (b) photos of the test burner (top, and front view), (c) parameters of tubes consisting the test burner.

Table 1. specifics of tube and channels

	c1	t1	c2	t2	c3	t3	c4	t4	c5	t5
Din [mm]		4		14		25		36		48
t [mm]		1		1		1.5		2		2
w [mm]	4		4		4.5		4		4	
A [mm ²]	12.6		126		290		402		553	
p [mm]	12.6		63		129		201		277	
A/p [mm]	1		2		2.25		2		2	

산하였으며, 당량비는 $\phi = 0.6\sim 0.8$ 범위의 연료희박 조건에서 실험을 수행하였다. 공급된 혼합기의 채널별 유량을 5개의 볼-유량계(AALBORG, 2% error)를 이용하여 제어하였으며, 각각의 채널의 단면적을 고려하여 각 채널에 흐르는 유체의 속도를 일정하게 유지하거나 변화시킬 수 있었다. 각각의 볼-유량계를 지난 유체는 각각의 채널에 유입되는데, 채널 내부에서 원주방향의 유속 분포의 균일도 향상을 위해

각 채널의 유로 단면적을 고려하여 가장 내부 채널(c1)로부터 가장 외부 채널(c5)까지 각 채널별로 1, 2, 4, 6, 8개의 스테인레스 관을 통해 채널의 원주 방향에 대해 비교적 균일하게 예혼합기가 투입되도록 하였다.

동일 당량비 조건에서 기존 연구[8]와 마찬가지로 유속을 1분 간격을 두고 주로 1 cm/s 정도의 유량차를 가지고 서서히 감소시킴으로써 연소기에 적절한 수준의 전도 시간을 부여하여 화염 안정화 현상에 내제된 특성이 반영될 수 있도록 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 화염 안정화 특성

본 연구에 사용된 연소기의 화염 안정화 선도를 Fig. 2에 제시하였다. 본 연구에서의 주된 관심 영역은 연소기 채널 내부의 화염이므로 메탄, 프로판에 대하여 화염이 연소기 채널 내부로 유입되는 조건과 부분적으로 역화가 발생하는 조건을 화염 안정화 선도에 표현하였다. 본 연구에서 사용한 연소기의 채널 간격이 약 4 mm 정도로 연료의 최소 소염거리의 2 배 이내에 해당하는 비교적 좁은 채널이다. 화염 안정화 실험 결과, 메탄 화염의 안정화는 프로판 화염의 안정화에 비해 실험적 구현이 다소 어려웠다. 이는 메탄의 소염 거리(quenching distance)가 프로판에 비해 커서 쉽게 소염이 발생하는 것이 하나의 원인으로 생각되며, 연료별 루이스 수의 차이가 화염의 연소기 내부로의 이동 초기에 일부 영향을 미치기 때문으로 판단된다. 전체적으로 메탄에 비해 프로판의 경우 동일한 당량비에서 상대적으로 빠른 유속 조

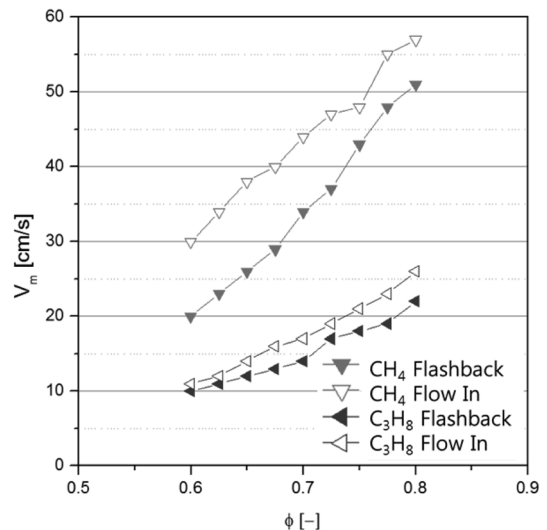


Fig. 2. Flammability Diagram on 5-multi tubes burner with methane, and propane.

건에서도 안정적으로 연소기 내부에 존재할 수 있었다. 부분 역화가 발생하는 조건은 연소기 내부화염 형성의 조건과 전반적으로 매우 유사한 크기와 경향을 보이고 있다. 하지만 프로판의 경우 낮은 당량비 조건에서 내부화염 조건과 부분역화 조건이 더 큰 차이를 보이는데 반해 메탄의 경우 낮은 당량비 조건에서 그 차이가 오히려 감소하는 것을 알 수 있었다. 이는 벽면과 화염의 열적 상호작용이 루이스 수가 1보다 큰 프로판의 경우에 화염대가 두꺼워짐에 따라 상대적으로 더 영향을 미치기 때문으로 판단된다.

당량비와 유속 변화에 따른 채널 내부에서의 화염의 전파 거동에는 다양한 구조적 변화가 발생하였는데, 대표적인 결과를 Fig. 3에 제시하였다. 메탄과 프로판 화염이 다중관 표면에 형성된 이후 유량 감소에 따라 채널 내부로 이동하는 모습이다. 메탄과 프로판이 동일한 당량비 조건이지만 채널 내부로 전파할 때의 평균 유속에는 큰 차이가 있었으며, 채널 내부에서의 화염의 분포 형상 역시 메탄의 경우 평면에 가까운 화염의 분포를 보이는 반면 프로판의 경우에는 상대적으로 더 큰 변위를 가지고 존재

한다. 이후 일부 채널 내부의 화염이 부분적으로 역화하게 되는데 관 내부에서의 예혼합 화염의 특징적 현상들을 다음 절에서 좀 더 자세히 다루고자 한다.

3.2. 평균 유속과 화염의 거동 특성

초기에 연소기 표면에 형성된 화염이 모든 채널에 걸쳐 연소기 내부로 완전히 유입된 이후의 화염 거동에 대해 관찰하였다. 본 연구 그룹에서 이전에 수행했던 3중 동축관 실험 결과[8]에서는 가운데에 위치한 채널 내부 화염이 가장 상류에 위치하여 미연가스 방향으로 볼록한 화염의 형상을 보였으며, 이는 외부로의 열손실이 가장 적은 가운데 채널에서 미연 가스의 온도가 최대가 됨으로 인해 상대적으로 연소속도가 증가한 결과로 이해되었다. 하지만, 본 연구에서는 채널1 내부의 화염이 가장 상류에 위치하지 않고 대체적으로 채널2 내부의 화염이 가장 상류에 위치해 상류 방향으로 전파되었으며, 채널1 화염은 채널3과 거의 동일한 위치에서 상류로 전파하는 경향을 보였다. 이러한 차이는 기존의 연구에서는 각 채널의 유량을 조절하지 않은 반면, 본 연구에서는 각 채널의 유속을 일정한 수준으로 조절된 결과로 판단된다. 다시 말해서 기존 연구에서는 전체 유량만 제어되었으므로 중심 채널의 경우 단면적이 가장 작아서 유체의 유동 저항이 크므로 해당 채널 내부에서는 상대적으로 유속이 낮게 공급된 결과로 화염의 상류방향 전파가 유리했던 것으로 이해된다. 그럼에도 불구하고 채널 간 유속이 동일하다면 가장 열손실이 적은 중간 채널에서 전파속도가 최대가 되어야 할 것이며 그 결과로 화염이 가장 상류에 놓여야 할 것으로 예상할 수 있다. 하지만 실험 결과는 이와 상이했으므로 화염의 전파속도에 영향을 미치는 새로운 변수가 필요하다.

가장 쉽게 생각할 수 있는 새로운 변수는 화염으로부터의 열손실 또는 벽면 근처에서의 예혼합 화염의 소염 등을 생각할 수 있다. 결국 동일한 유속 조건에서 각 채널에서의 발열량은 채널의 유로 단면적(A)에 비례할 것이며, 열손실 또는 소염 현상은 각 채널 단면의 표면길이(p)에 비례할 것이다. 따라서 각 채널의 단면적/표면길이 비(A/p)를 비교하면 채널1의 경우는 그 값이 1이며, 다섯 개의 채널 중 가장 작은 값을 알 수 있다. 이에 비해 채널 3의 경우 그 값이 2.25로 가장 크며, 나머지 세 개의 채널은 그 값이 동일하게 2 임을 알 수 있다. 따라서 채널3의 경우가 발열량/열손실의 관점에서는 가장 높은 전파속도를 가질 수 있을 것으로 예상할 수 있으며, 채널 1은 비록 열손실 면에서는 상대적으로 유리할 수 있겠지만 실제적인 화염으로부터의 발열량은 적어서 전파속도가 상대적으로 낮을 수 있다.

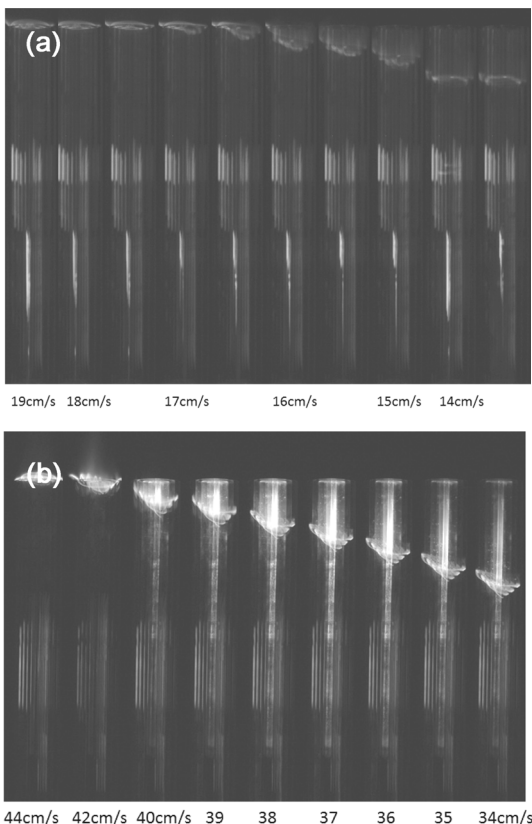


Fig. 3. The overall photos of Flame propagation in multi-channels ($\phi = 0.7$); (a) methane, (b) propane.

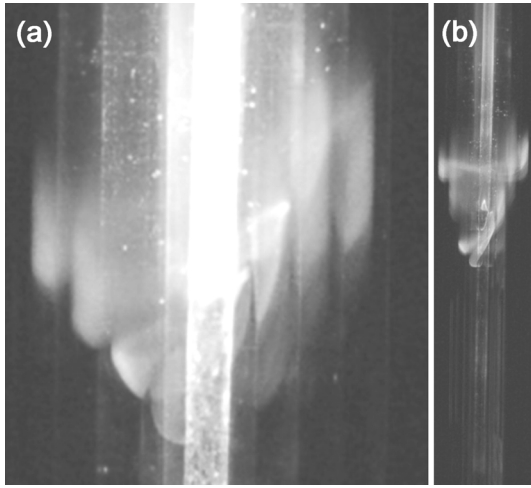


Fig. 4. Flame oscillation and flashback behavior for propane at $\phi = 0.8$; (a) oscillation 52 cm/s, (b) flashback 51 cm/s.

또 한 가지 흥미로운 사실은 채널 내부 유속을 감소시키기에 따라 화염은 점차 채널 상류로 전파되다가 어느 순간 역화하게 되는데, 이때 화염이 가장 상류에 위치한 채널 내부에서 가장 먼저 역화가 발생할 것을 예상할 수 있지만, 실험에서는 메탄과 프로판에 관계없이 대부분의 경우에서 채널4 내부 화염이 가장 먼저 역화하는 경향을 보였다. 이러한 조건에서는 Fig. 4(a)와 같이 가장 바깥쪽 채널의 화염에 불안정성이 야기되고 그 이후에 채널4에서 역화가 발생하였다. 참고로 채널 간격이 가장 큰 곳은 간격이 4.5 mm인 채널3에 해당하지만 역화는 그곳에서 발생하지 않았다. 그에 반해 채널 내부에서의 발열량은 동일당량비, 동일 유량조건에서는 채널의 유로 단면적에 비례할 것으로 예상되는데, 유로 단면적은 채널5에서 최대값을 가지며, 그 다음이 채널4이다. 채널5는 가장 외부에 존재하여 열손실이 가장 크므로 화염 주위의 축방향 온도 구배도 가장 크게 될 것이다. 이러한 조건에서는 화염의 열적 불안정성이 증대될 수 있다. 이로 인해 채널5의 화염은 상대적으로 넓은 채널 구간을 가열하게 되고, 그 결과로 채널4에서 먼저 역화가 일어나는 것으로 판단되었다. 일단 채널4 내부 화염이 역화를 시작하면 Fig. 4(b)에 표시한 바와 같이 시간이 경과함에 따라 채널5, 채널3, 채널2, 채널1의 화염으로 순차적으로 역화가 발생하는 경향을 보였다.

3.3. 정상상태 화염의 유속분포

그런데, 일단 연소기 내부로 유입된 화염은 상류로 전파하는 특성을 가지고 있어서, 평균 유량의 감소 없이도 연소기를 통한 열적 재순환에 의해 서서히

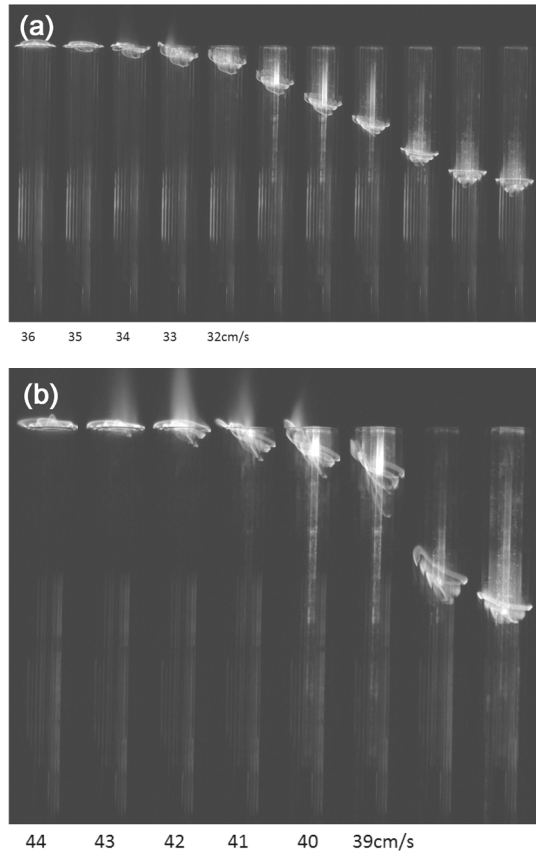


Fig. 5. Flame propagation for a fixed flow rate (propane); (a) $\phi = 0.65$, from 36 cm/s to 32 cm/s, (b) $\phi = 0.7$, from 44 cm/s to 40 cm/s.

상류로 전파하게 될 것을 예상할 수 있다. 실제로 연소기 내부로 유입된 화염이 시간이 경과함에 따라 상류로 전파하는 거동을 Fig. 5에 나타내었다. 상대적으로 안정적인 화염의 구현이 용이한 프로판에 대한 결과를 제시하였다. 화염이 연소기로 유입되는 조건은 당량비 0.65인 조건에서는 32 cm/s, 당량비 0.7의 조건에서는 보다 높은 속도인 39 cm/s 조건이었다. 이후 각각의 유속을 그대로 유지했을 때 각각의 전파속도는 (a) 조건에서는 대략 1.39 cm/min, (b)의 조건에서는 대략 2.34 cm/min 정도였다. 흥미로운 것은 추가적인 화염이 서서히 상류로 전파하다가 일정한 높이에 이르게 되면 역화 현상이 부분적으로 발생한다는 것이다. 이는 역화 현상이 채널의 길이에도 영향을 받음을 보여준다. 이는 화염이 전파함에 따라 화염 하류의 압력이 점차 상승하게 됨으로써 화염의 불안정성을 가속하기 때문으로 생각된다. 이처럼 동축관 내부 화염의 역화는 유속의 감소나 당량비의 증가에 따라 근본적으로 영향을 받을 뿐 아니라 각 채널의 발열량과 연소기의 전체적인

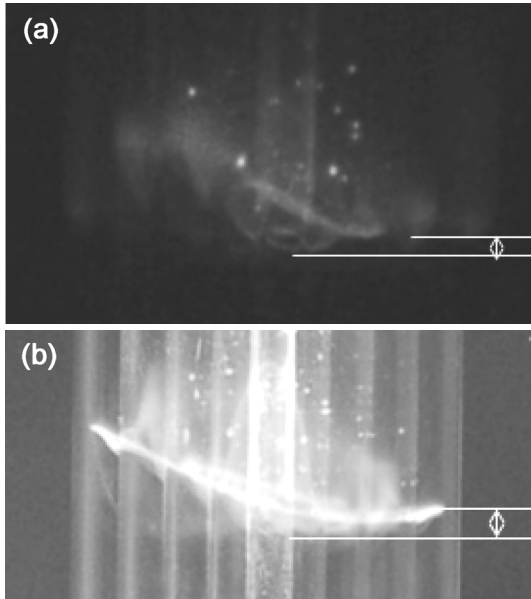


Fig. 6. Conditions of stationary flames at 10 cm from the exit of the burner; (a) methane flame, $\phi = 0.7$ and average velocity 16 cm/s, (b) propane flame $\phi = 0.7$ and average velocity 42.7 cm/s.

열손실 모드와 채널의 길이에도 연계되어 있는 복잡한 현상임을 알 수 있다.

이처럼 복잡하게 연계된 화염의 안정화 특성을 보다 용이하게 비교하기 위해 서로 다른 당량비 조건에서 화염의 위치를 연소기 출구로부터 10 cm 지점 근처에 일정하게 안정화 시키는 조건을 서로 비교하였다. 이 때 각각의 채널의 유량을 조절할 수 있는 본 실험 장치의 특성을 활용하여 화염의 형상이 거의 평면에 이를 수 있도록 각 채널의 유량을 조절하였다. 메탄과 프로판의 대표적인 조건에서 정상상태로 유지된 화염의 형상을 Fig. 6에 제시하였다. 실험에서 화염의 높이는 채널의 평균 간격과 비교할 수 있는 ± 4 mm 이내에 위치하도록 조절되었다. 축을 중심으로 화염을 완전 대칭으로 형성하는 데에는 많은 어려움이 있었기에 각 채널의 가장 선단 화염이 원하는 높이 범위에 들도록 조절하였다. 동일한 당량비 0.7 조건에서 프로판은 평균유속 42.7 cm/s, 메탄은 16 cm/s였다.

이 조건에서의 네 차례의 독립적인 실험을 통해 실험 오차와 평균값을 구하였다. 각 채널별 공급 유량을 유속으로 변환하여 Fig. 7(a)에 비교하였다. 상대적으로 외곽에 위치한 채널에서의 채널 내부 속도는 평균속도에 근접하는 속도를 가지는 것을 알 수 있다. 하지만 프로판의 경우 채널 1,2에서의 속도는 급격히 증가하고, 메탄의 경우에도 채널1의 속도가 평균속도에 비해 매우 큰 것을 알 수 있다. 이는 중

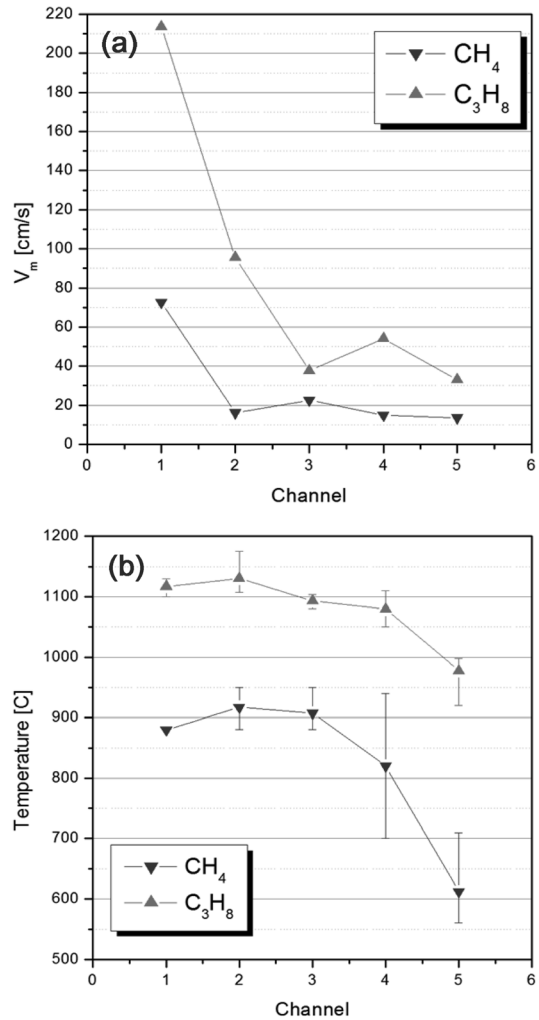


Fig. 7. Flow velocity in each channel at the stationary flame condition and temperature distribution (methane flame, $\phi = 0.7$ and average velocity 16 cm/s, (b) propane flame $\phi = 0.7$ and average velocity 42.7 cm/s); (a) velocity, (b) temperature.

간 채널에서의 화염의 전파속도가 상대적으로 커서 이를 일정한 높이에 유지하기 위해서는 매우 큰 유속이 요구됨을 의미한다.

동일한 실험 조건에서 출구로부터 9 cm 내부에서의 각 채널별 온도 분포를 열전대(K-type)를 이용해 측정된 결과를 Fig. 7(b)에 제시하였다. 채널 내부에서의 연소가스의 온도는 비교적 균일한데 반해 외곽에서의 온도는 감소하고 있으며, 가장 외곽에 위치한 채널5의 경우에는 외부로의 열손실 직접 영향을 미쳐서 연소가스의 온도가 급격히 감소하고 있다. 특히 메탄화염의 경우에는 점화온도(약 600 °C)와 큰 차이가 없을 정도로 저온을 유지하는 것을 확인할 수 있다. 열전대의 온도 측정 오차를 고려하더라도 상당

히 낮은 온도조건에 해당하며, 화염 직후에서 상당량의 열이 유출되고 있음을 의미한다. 이로 인해 채널 내부 연소속도를 맞춰주기 위한 유속 조건이 다른 채널에 비해 낮게 나타나는 것으로 판단된다.

4. 결론

5중 동축 석영관 구조로 이루어진 연소기를 이용하여 메탄과 프로판 화염의 안정화 특성과 화염의 형상을 직접 관찰하였다. 전체 유량만 조절하였던 기존의 실험과 달리 각각의 채널에 유입되는 유량을 직접 조절하여 동일한 평균유속을 가지는 조건에서 화염의 안정화 특성을 실험한 결과 안정화 특성에 차이가 있음을 확인하였다. 또한 역화가 발생하는 채널이 채널의 간격에 직접 영향을 받기 보다는 채널 내부에서의 발열량에 해당하는 채널의 유로 단면적에 영향을 주로 받음을 알 수 있었다. 다만, 가장 바깥쪽 채널의 경우 외부로의 열손실 효과로 인해 화염의 불안정성이 쉽게 유발됨을 알 수 있었다.

추가적으로 연소기 내부로 일단 유입된 화염의 경우 시간이 경과함에 따라 연소기 상류로 일정한 속도로 전파하게 되고 일정한 길이 이상을 전파하는 조건에서는 역화 현상도 발생함을 알 수 있어서, 역화 현상이 당량비와 유속뿐만 아니라 연소기의 길이에 도 영향을 받음을 알 수 있다. 이러한 복잡한 현상을 보다 쉽게 비교할 수 있는 방법으로 특정 위치에 화염간의 높이차를 일정 간격 이하로 유지하고 화염의 전파속도가 충분히 낮은 정상상태의 화염을 형성하는 조건에서의 각 채널의 유속과 채널 하류에서의 온도를 비교하였다. 그 결과, 각기 다른 유속과 온도 분포로부터 채널별 화염의 연소율 및 발열량 등 안정화 특성을 추측할 수 있을 것으로 예상된다. 다중 동축관 내부 화염의 직접 관찰과 각 채널별 유량 제어를 통한 화염의 안정화 특성을 연구한 본 연구의 접근 방법은 다공성 연소기의 화염 특성을 이해하기 위한 유용한 방법이 될 수 있음을 보였으며, 이러한 결과는 향후 추가 연구를 통해 다공성 연소기의 설계와 운전에 유용한 결과를 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2010-0013598).

참고문헌

- [1] 이용일, 신현동, “측면 열손실 또는 열공급에 의한 세라믹 연소기 내의 화염 거동”, KOSCO SYMPOSIUM 논문집(1994), pp. 43-52.
- [2] 황상순, “다공세라믹 버너를 이용한 표면화염의 연소 및 배기특성”, 한국연소학회 한국연소학회지 2001, pp. 29-35.
- [3] 임인권, “서로 다른 물성치로 이루어진 다공 세라믹 연소기 속에서의 예혼합화염 연소에 대한 수치해석 연구”, 한국연소학회지, Vol.2, No.1, pp.1-8.(1997)
- [4] D.K. Min, H.D. Shin, Laminar premixed flame stabilized inside a honeycomb ceramic, Int. J. Heat Mass Transfer, 34 (1991) pp. 341-356.
- [5] R.S. Dhamrat, J.L. Ellzey, “Numerical and experimental study of the conversion of methane to hydrogen in a porous media reactor”, Combustion and flame 144(2006), pp. 698-709.
- [6] G. Brenner, K. Pickenäcker, O. Pickenäcker, D. Trimis, K. Wawrzinek, T. Weber, “Numerical and experimental investigation of matrix-stabilized methane/air combustion in porous inert media”, Combustion and flame, 123(2000), pp. 201-213.
- [7] 박승일, 이민정, 김남일, “다공성 연소기 모델로서의 다중 채널 연소기 내부 화염의 안정화 특성 기초 연구”, 대한기계학회논문집(B), 35(8) (2011) pp. 815-823.
- [8] 조문수, 백다빈, 김남일, “좁은 다중 동축 석영관 내부에서의 예혼합 화염의 전파 특성에 대한 기초 실험”, 한국연소학회지, Vol. 18, No.2, pp. 1-7(2013)

논문접수일 : 2013. 08. 05

심사완료일 : 2013. 09. 23